

# Documentation

April 12/13, 2018

日本語版

SCHAEFFLER

# **SCHAEFFLER**

出版: Schaeffler Technologies AG & Co. KG Industriestrasse 1 – 3 91074 Herzogenaurach · Germany Tel . +49 9132 82-0 Fax. +49 9132 4950 www.schaeffler.com

編集: Matthias Zink, Uwe Wagner, Jörg Walz, Daniel Pokorny, Redaktionsbüro delta eta (Frankfurt, Germany)

本書に含まれる技術論文は電子データ(英語)で提供されています。

www.schaeffler-events.com/symposium

弊社の許可なく本書全体または一部を 複製することを禁止します。

#### Contents

Foreword Mobility for Tomorrow			4
Technical Papers			
Engine	1	Engine Systems	22
	2	UniAir	38
	3	Camphaser	54
	4	Phasing Systems	68
	5	Cylinder Deactivation	80
	6	Variable Valvetrain System	98
	7	Rollerized Crank Shafts	114
Transmission	8	Transmission Systems	132
	9	Damper Systems	146
	10	Clutch Systems	162
	11	Torque Converter	176
	12	Bearing Concepts	194
	13	Double Clutch Systems	208
	14	Actuation Systems	224
	15	Transmission Components	240
Hybrid & E-Mobility	16	Hybrid and Electric Drives	260
	17	Mild Hybridization	272
	18	48 V Hybridization	290
	19	High-Voltage Drives	304
	20	P2 Hybridization	314
	21	Hybrid Transmission	330
	22	eDrive	344
	23	E-Axle	360
	24	Thermal Management	374
Chassis	25	Chassis Systems	386

# 未来のモビリティ社会への道のり

#### Foreword

ほとんどの問題には解決策があります。もし解決策がなければ、私たちが見 つけ、考え出します。これがシェフラーの四つの基本的価値観の一つである "革新的であること"の定義です。また、この定義は、革新性そのものが目 的ではなく、革新性によってお客様や社会に貢献するという、私たちのイノ ベーションに対する理解を表しています。私たちは、二年前に定めた戦略「未 来のモビリティ社会のために」で、エンジニア独創的精神の方向性を打ち出 しました。シェフラーは、システムパートナーとして、都市内あるいは都市 間の人やモノの輸送において、高まるモビリティへの要望の具現化に対して 持続可能な方法で貢献しています。

それらに関連して、私たちはイノベーションの長い伝統の基盤を築いてきま した。そしてそれは1978年から四年ごとに開催し続けているシェフラー シンポジウムの議事録に記録されています。設立当初から、環境に優しいド ライブシステムに重点を置いてきました。低燃費と高い快適性という観点に よる従来型パワートレインの最適化は、当初からの重要な課題となっており、 パワートレインのハイブリッド化については、2002年のシンポジウムです でに論点になっていました。以降、今日のP2ハイブリッドモジュールおよ び電動アクスルの量産プロジェクトだけでなく、今年のシンポジウムのメイ ンテーマの一つとなっている電動化の重要性はますます高まっています。今 回初めて、「電気およびハイブリッドドライブ」を独立したセクションで発 表します。それと同時に、内燃機関とトランスミッションが未来のドライブ システムで担う役割を念頭に置き、これらをテーマにしたイノベーションに ついても発表します。

もちろん、今年のシンポジウムでは、私たちが今できる以上のことについて も目を向けていきたいと思います。駆動系とシャシーを一つのユニットにし た「ピープルムーバー」の章をぜひお読みください。

最後に、執行役員を代表して、皆様がシェフラーシンポジウム 2018 に興 味を持ち、インスピレーションを得られますように。

Hans Remplet

Klaus Rosenfeld 最高経営責任者 (CEO)







# Mobility for Tomorrow

Prof. Dr.-Ing. Peter Gutzmer Uwe Wagner Matthias Zink

# 私たちを動かすもの: 未来型モビリティのコンセプト

未来のモビリティの原動力は多様である。気候変動は、都市化、デジタル化、自動化と同じく重要課題として位置づけられており、これらのトレンドはすべて、サウジアラビアのNEOM [1]、中国のChengdu Tianfu District Great City [2]など、革新的で先進的な開発プロジェクトに集約されている。これらの都市計画では、以下のようなポイントが常に焦点となっている。

- 新しいコネクテッドモビリティソリューションにより、都市内の高度に自動化された高速 輸送を実現する。
- CO<sub>2</sub> 排出量をほぼゼロにすることで、生活の 質を高める。
- 3. 再生可能エネルギーのみを使用する。

今日の主要都市では、渋滞は日常生活の一部であ る。GPS 製品を提供している Tom Tom [3] のデー タによれば、メキシコシティでは自動車を運転 する人は日々、59分もの時間を渋滞で失ってい る。そのため、世界各地の主要都市では、公共交 通網の拡大を推し進めている。ヨーロッパの主要 都市においては、交通渋滞を緩和させるだけでな く、自動車が街中を支配する状況を緩和したいと 考えている。都市内の交通渋滞を悪化させている 要因は、一般の自動車だけではない。オンライン ショップなどによる、都市内の物資輸送の大幅増 加も大きな問題の一つである。そのような中で、 歩行者向けの簡易的なモビリティは、交通渋滞の 緩和を促すことで、周辺地域の住みやすさの向上 につなげることが期待されている。このような背 景から、都市交通に対しては、省スペースで高い 柔軟性を実現する新しい車両コンセプトが必要 とされており、電動自転車 (ペデレック)は、都 市内における理想的な交通手段の一つであると 考えられている。すでに、世界中では電気自転車 の販売が増加し、交通に占めるそれらの割合も増 えている。しかし、ハイテクのペデレックも自転 車と同様に雨よけがなく、利便性に欠けている。

二輪車では、荷物の運搬も非常に限られている。

そのため、シェフラーは、コンセプトスタディ 「Bio-Hybrid (バイオハイブリッド)」を開発し、 2016年に初披露した。ペデレックのアイデアを 活かした四輪車は、250~750Wで乗る人をサ ポートし、ハイブリッドドライブと同様に、制動 エネルギーを可能な限り回収する。電気駆動装置 には、バックギヤが組み込まれており、軽量車の 良好な操作性を確保する。バイオハイブリッドの 両輪の間隔は800mmで、自転車専用道路の利 用が可能である。そのため、人の輸送だけでなく 荷物の運搬も、自動車の交通量に関係なく、環境 に配慮して行える。2018年には、車両を開発す る別会社の有限会社 (GmbH)を設立し、現在量 産準備中である。

交通状況を緩和するもう 一つの解決策は、今日 のカーシェアリングコンセプトに代わる、主に 都市部での自動運転による電動車両であるロボ キャブ、ロボタクシーとも呼ばれるピープルムー バーである。これらのモビリティソリューション は、当初は限定された地域で利用され、そののち、 公共交通へ広がると考えられている。複数の研究 によれば、自動運転の飛躍的な進歩により、近い うちにこれらのモビリティサービスは大規模で 開始されるようになる[4、5]。インフラの開発 が現在進行形で進められ、社会がシェアリングエ コノミーのアイデアを受け入れているため、東南 アジアの主要都市 (シンガポールなど)には理想 的な条件が整っている。おそらく、これらのコン セプトは、地域の公共交通を補い、さらには完全 に取って代わるようになるであろう。

2018年のシンポジウムでは、コンセプトスタ ディ「Schaeffler Mover (シェフラームーバー)」 がこのようなモビリティコンセプトの技術基盤 として初展示される。コネクテッドオペレーショ ンを想定したこの車両は、最大で4人を輸送でき、 自動車産業のポートフォリオの大きなすきまを 埋める。「シェフラームーバー」では、車体の車 両プラットフォームからの切り離しが可能であ り、アプリケーションにあわせて改造可能な車体 を、走行に必要なすべての技術を搭載したプラッ トフォームからすばやく切り離すことができる。 自動運転に必要なセンサーシステムのみ、部分的 に車体に組み込まれている。プラットフォームの 中核は、インホイールドライブとサスペンション を含むホイールサスペンション、電気機械式ステ アリング用のアクチュエータといったすべての ドライブ、シャシー部品を一つに統合した四つ の「シェフラー・インテリジェント・コーナーモ ジュール」で構成されている [6]。

信頼性と柔軟性の高い快適なサービス、および高 水準の利便性は、都市で利用される自動運転車 に対する重要な条件であり、シェフラームーバー はこれらを満たしている。例えば、ビークルダ イナミクス制御により、各シェフラー・インテ リジェント・コーナーモジュールを個別に制御 することが可能であるが、これにより、最適な コーナリングフォースで車線を変更できるため、 読書中の同乗者にとっても快適な環境を提供す ることができる。また、このドライブコンセプト は、利便性と信頼性を非常に高い水準で保証して おり、厳選されたホイールサスペンションの採用 により最大 90°の操舵角が可能で、狭い通りで の優れた操作性を実現する。また、すばやく正確 な停止が可能となるため、乗降時の快適性も向上 される。

シェフラー・インテリジェント・コーナーモ ジュールの高度な一体化には、ほかにもさまざま な利点がある。駆動系およびシャシーの設置ス ペースが減り、その分を乗員や部品(バッテリー、 アクセサリ)のスペースに使用できる。さらに、 駆動系やシャシーを変更せずに、車幅や車体長を 変更できることから、車体のサイズ拡大などのス ケーリング変更を容易に行うことが可能となる。



1 The Schaeffler Mover with in-wheel drive is a vehicle platform for a wide variety of vehicle concepts and applications, such as robo taxis. The Schaeffler Mover is designed for a wide variety of hood concepts, thus enabling maximum flexibility. Maximum vehicle maneuverability is ensured by the combination of 90° steering system and in-wheel drive.



2 Primed for change: Clean powertrain solutions and innovative transportation concepts are decisive for the mobility world of tomorrow. zero-emission driving to new forms of mobility for the city of the future.

Schaeffler's activities range from energy-efficient technologies for low-emission and

移動の効率 シェフラーは最新の製品および 生産技術により、都市部の大気 汚染低減に貢献する。サーマル マネジメントモジュールから エンジンバルブコントロール、 48Vハイブリッド技術、電動ク ラッチシステムまで、幅広い製 品を取り揃えている。

 <sup>電動化の未来に向けて</sup>
 シェフラーは包括的なソリュー
 ショフラーは包括的なソリュー
 ションにより、電動アクスル、
 P2 ハイブリッドモジュールなど
 の電動パワートレイン技術を実
 現する。

シェフラームーバー ホイールハブ駆動を搭載した シェフラームーバーは、多様な車 両コンセプトのプラットフォー ムを提供する。パワートレイン とシャシーコンボーネントを一 つのユニットに組み込むことで、 90°のステアリングを可能に し、最大限の車内空間を確保す る。ロボットタクシー、運搬車 などの自律型電動モビリティソ リューションに最適である。

4
電動キックボード
電動キックボードの特長は、駐
車場から職場までの理想的な交
通手段を想定し、持ち運び可能
な大きさと25kmの走行距離を
実現する。

バイオハイブリッド ペデレックのような電動機を搭 載したこのコンパクトな四輪車 は、高水準のビークルダイナミ クス、走行安定性(ロードホール ディング)、南よけを実現してい る。このコンセプトはブラット フォームとして設計されている ため、乗用車に加えて、カーゴ タイプなどの車体スタイルも可 能である。 シェフラーは 2013 年にインホイールドライ ブの構想を披露した。その開発は、MEHREN 研究プロジェクトの一環として行われ、当 時、フォード「フィエスタ」をベースにデモ カーを製作して、インホイールドライブの省 スペース性と機能的利点を紹介した[7]。シェ フラームーバーには、そののち開発された別 バージョンの駆動方式が使用されている。

ピープルムーバーでは、コネクティビティ技術との連携が円滑な車両運転動作を行うための重要必須条件と考えており、これは車両のデジタルツイン(クラウド上の実車のコピー)により実現される。運転データや条件データの継続的な分析により、将来の整備項目を初期段階で特定する。また、利用プロファイルの分析に役立てたり、車両のさらなる最適化の基礎として利用したりすることも可能である。またコネクティビティは、パーソナライズされたデジタルサービスによるさらなる顧客価値も提供する。

#### 私たちを導くもの: モビリティエネルギーチェーン

目標はすでに定められている。国際社会が掲げ る地球温暖化目標は、産業革命以前と比較して 世界の平均気温上昇を  $1.5 \sim 2.0 \degree$ に抑える ことであるが、この目標を達成するには、現在 人為的に排出される  $CO_2 O 70\%$ を占める化石 燃料の燃焼を大幅に削減する必要がある [8]。 この 2DS (2 degree scenario) を現実的に 実行可能なコストで達成するためには、遅くと も 2030 年までに全産業におけるエネルギー の移行が開始されなければならない [9]。

世界的にモビリティを包括する運輸セクター は、人為的な CO<sub>2</sub>の主要な排出源である。

2016年の OECD 平均では、先進国の総排 出量における運輸セクターの割合は 26.6% であった [10]。政治的背景、経済構造、

地理的条件などによって、かなりのばらつき があるが、エネルギー効率の向上、再生可能 エネルギー源への変換に向けた取り組みが進 んでいる国であっても、運輸セクターはこれ まで CO。排出量の削減にあまり貢献してい なかった。例えばドイツでは、CO,相当量 に換算した値でみると、すべての部門の排出 量は1990年から2015年までの間に27% 削減されているが、削減量が特に大きかった のは建設(-34%)と製造(-32%)であっ た。一方、運輸セクターの削減量はわずか 2%で、2016年末には0%に減少した。同 じ期間における個々の車両の走行距離の燃料 消費量は検証可能な形で減少したものの、全 体的な排出量が減少しないのは、人や貨物の 輸送に対する需要の拡大が主な原因である。 交通量はこれからも拡大し続けるとみられる が、2010年と比較して2030年には自動車 による移動距離は12.9%、貨物輸送車両の 積載距離は16.8%上昇すると予想されてい る[11]。ドイツのこのような緩やかな伸び に対して、高度な経済成長が見られる地域で は、道路交通量は爆発的に増加する可能性が 高い。シェル社の研究によれば、世界の自動 車台数は 2050 年には約 20 億台に増加する と見込まれている[10]。

パリ協定による非常に高い気候目標を達成す るには、未来のパワートレイン技術には大転 換が必要である。シェフラーは市場分析およ び自社の計算に基づき、2030年のさまざま なパワートレインに対する市場シェアについ て、以下のようなシナリオを作成した。

- 生産される乗用車の30%は、電気自動車となる。世界全体の年間生産台数を1億2,000万台と仮定した場合、これは3,600万台に相当する。国際エネルギー機関によれば、2016年には世界中で約75万台の電気自動車が新車登録された[12]。
- 生産される乗用車の40%は、ハイブリッド車が占める。
- 残りの全車両の30%は、内燃機関のみを動力 源とした自動車である。

もちろん、これは数あるシナリオの一つに過 ぎず、その通りになるとは限らない。しかし ながらこのシナリオは、未来のパワートレイ ンの方向性を示してくれている。

CO₂については、使用段階での排出量はもち ろん、駆動・電気エネルギー貯蔵装置を含め、 エネルギー供給源や自動車製造で生成される 排出量も考慮する必要がある。よって、エネ ルギーチェーンを以下の三つのシーケンスに 分け、相互作用を含めて、すべての項目に関 して長期的な解決策を最適化する。

#### Tank to Wheel

CO<sub>2</sub>排出量の原因になっているのは内燃機関 であるが、内燃機関を対策するだけでは法的 に求められる 2030 年の世界目標を達成する ことはできない。一時期においては、電気駆 動とハイブリッド化による回生エネルギーの 使用も必要である。しかしながら今後は、 ヨーロッパにて2017年9月1日から施 行された新排出ガス・燃費試験法である WLTC (Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Cycle) や RDE (Real Driving Emissions) などによって拡大され た運転領域で CO, 排出量および汚染物質を削 減する必要性が高まるため、内燃機関のさら なる開発も引き続き進められている。ガソリ ンエンジンでは燃料消費量 200g / kWh を 達成し、約45%の効率を実現できると見ら れている。ディーゼルエンジンはすでにこの 値を達成しているが、課題は現在の効率に大 きな影響をおよぼすことなく、汚染物質の排 出量を許容限界値以下に削減することであろ う。最後に、天然ガスには、ガソリン運転と 比較して CO, 排出量を約 25% 削減できる可 能性がある。ここでは車両技術よりもむしろ、 その潜在力にふさわしい購入者の支持を得る ための適切なインフラの構築が課題となるで あろう。



3 The energy chain of mobility for tomorrow

#### Well to Tank

#### 生産および廃棄

自動車の使用による温室効果ガスの排出量 を全体的にみる場合、エネルギー源によっ て直接的、間接的に生じるすべての排出量 を考慮し、走行距離に変換する必要がある。 一般的に化石燃料は、エネルギー変換では なく化学的工程にて生成されることから、 従来好ましいとされてきた。しかしながら、 運輸セクターで再生可能エネルギー由来の 電力を利用するためにはできるだけす すなわちバッテリー電気自動車で使用する ことが、効率の観点から見て得策であると 考えている。したがって、化学結合エネル ギーへの変換時にはそのプロセスのステッ プごとの効率を踏まえ、シーケンスを理論 的に選ぶ必要がある。

- 1.電気分解によって水素を発生させ、燃料 電池で使用する(主に、初の燃料電池を 量産した日本で追究)。
- 2.e-methaneのような合成の気体または 液体燃料を、天然ガスと組合せて、生産 時の損失を最小限に抑えたエネルギー源 とする。

現実的には、エネルギー発生装置とエネル ギー貯蔵装置を組み合わせて使用すること が、効率の観点からも妥当である。例えば、 非常に長い距離を走行し、頻繁に給油を行 う運転プロファイルは電動化に適していな いため、ゼロエミッション目標を達成する ためには別の方法を考えるのが理にかなっ ている。一般的に、再生可能エネルギーは、 いつでも必要なときに必要な場所で待られ るわけではない。そのため、水素や合成燃 料などの代替エネルギーへの変換は合理的 なソリューションになり得る。食料生産と 競合しない第二世代のバイオ燃料の可能性 については現在、世界的な議論になってい る。

装置(バッテリー)の生産は、電気自動車 の<br />
CO<br />
排出量<br />
全体に<br />
大きな<br />
影響をおよぼ す。これらすべての生産および廃棄におけ る追加エネルギーの流れを考慮したライフ サイクル分析によると、現在ドイツの電力 構成における電力を電気自動車に使用した 場合、ディーゼル車と比較して走行距離が 150,000kmを超えるまでは、追加エネ ルギーは相殺されないことが分かった [13] (ディーゼル ICEV と BEV100 の比較)。 それら二つを正確に比較するには、自動車 に搭載されるバッテリーサイズが重要とな る。将来的に発電における再生可能エネル ギーの割合が飛躍的に増加した場合、電気 自動車はもっと早い段階で CO<sub>2</sub>の総排出量 削減に対してより良い結果を出すと予想さ れる。

内燃機関搭載車と異なり、エネルギー貯蔵

このような状況下において、シェフラー は先に説明したシナリオを適用する。こ のシナリオによれば、全車両の約30%が 2030年までに完全に電動化され、内燃機 関のみで走行する車両は30%になる。残り の40%は、各種のハイブリッドパワートレ インで構成される。また、このシナリオに 適した技術ソリューションの開発に加えて、 以下のトレンドにも引き続き焦点を当てて いく。

- エネルギー貯蔵装置技術の継続的な開発
   必要な資源の使用可能性
- 生産および流通インフラの整備
- 政治的な支援
- 交通需要(量的および質的)

革新的な製品開発と現実的なシナリオを組 み合わせて、初めてそれら技術革新の方向 転換にうまく対処できる。

#### 私たちを突き動かすもの: シェフラーの パワートレインマトリックス

考えられるすべての未来のモビリティに関す る主要な課題は、貯蔵エネルギーの運動エネ ルギーへの効率的な変換である。適切な推進 方法の持続的な評価には、さまざまな走行条 件、およびさまざまな市場や地域での車両の 実際の使用状況を考慮する必要がある。また、 可能な限りこの現状を反映するため、排気ガ ス規制に対する評価条件のベースを見直す必 要がある。最初の一歩はすでに、NEDCに代 わるWLTCの使用と、RDEの定義によって 動き出している。これらの新しく、より現実 的な評価条件、および CO<sub>2</sub> と汚染物質の両方 を削減するという目標により、自動車産業は 新たな課題に直面している。

今日の主要なエネルギー構成、さらには インフラおよび貯蔵の制限を考えると、

電動化ソリューションに加えて、実際の走行 条件と、現在のパワートレインをベースにし た技術的にも経済的にも実現可能で、短期的 なソリューションを開発することが重要であ る。先に述べたさまざまなエネルギー貯蔵ソ リューション(化石燃料、合成燃料、バッテ リー、燃料電池)、三つのエンジンタイプの 多様な駆動ユニット(ガソリン、ディーゼ ル、モータ)、五つのタイプのトランスミッ ション、少なくとも 六つの異なるハイブリッ ドタイプとポジション、の組み合わせの中 から、技術的にも経済的にも最善のソリュー ションを開発するには、高度な車両、パワー トレインの専門知識が必要である。この自動 車産業の転換期において積極的な役割を果た すため、シェフラーは、エンジンとトランス ミッションを区別する従来のアプローチから 離れ、全体的なシステムの開発に注力してい く。これにより、パワートレインのレベル、 さらには車両全体の技術革新を支援すると同 時に、より持続的な分析が可能になっていく。



4 Managing complexity through simulation and development competence

# POWERTRAIN MATRIX



5 The Schaeffler powertrain matrix – solutions for all powertrain concepts

「マイクロハイブリッド」、「マイルド/フル ハイブリッド」、「プラグインハイブリッド」、 「xEV」といった電動化の度合いに応じたパ ワートレインマトリックスは、未来のエンジ ン、トランスミッション、電気駆動サブシス テムの継続的な開発に使用される。

すべてのアプローチに共通しているのは、内 燃機関、トランスミッション、モータのすべ ての物理的相互作用を含め、パワートレイン 全体を分析して初めて最適なソリューショ ンの実現が可能になるということである。そ のため、力の流れだけでなく、音振現象、熱 的現象を考慮する必要があり、この分析プロ セスの基盤には、シェフラーのさまざまな製 品分野のシミュレーションおよび開発能力 と、高付加価値製品のアイデア実現における 専門知識が踏襲されている。

シンポジウムで披露されるシェフラームー バーのような新しいコンセプトは、パワート レインと シャシーの融合によるローリング シャシーの構築など、未来のモビリティにお けるまったく新しい技術基盤を提供してい る。

#### 新たな多様性

交通で使用されるエネルギー源の開発、パ ワートレイン、自動車部品のいずれにおいて も、未来のモビリティに対する画一的な技術 的アプローチは存在しない。社会および経済 発展の基盤としてモビリティを維持しつつ、 継続的な環境保護を追究する意欲的な目標 は、複数の技術を並行して追究することで初 めて達成できる。シェフラーは、自動車およ びモビリティ産業全体の技術における革新 的なパートナーとして、この新たな多様性の 時代を切り開いていく。

#### Literature

- [1] Neom: http://discoverneom.com, accessed on February 1, 2018
- [2] Adrian Smith + Gordon Gill Architecture (eds.) : Great City Chengu Master Plan. 2012
- [3] TomTom Traffic Index: https://www.tomtom. com/en\_gb/trafficindex/, accessed on January 19, 2018
- [4] Roland Berger (ed.): Focus Urbane Mobilität
   2030: zwischen Anarchie und Hypereffizienz.
   2017
- [5] Roland Berger (ed.) : A CEO agenda for the (r) evolution of the automotive ecosystem, 2016
- [6] Harkort, Ch.; et al.: Mobile in the City of Tomorrow – The Fusion of Powertrain and Chassis. 11. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2018
- [7] Eckert, A.; Eckstein, L.; Gutzmer, P.; van der Jagt, P.: Vorteile von elektrischen Radnabenantrieben im Hinblick auf Raumeffizienz und Fahrdynamik. In: MTZ 79 (2018), No. 6.
- [8] International Energy Agency (ed.) : CO<sub>2</sub> Emissions from Fuel Combustion. Paris, 2017
- [9] United Nations Environment Programme (ed.) : The Emissions Gap Report. Nairobi, November 2017
- [10] Warnecke, W.; Gutzmer, P.: Mobility of the Future: Integrated View of Energy and Powertrain Options. 16<sup>th</sup> International CTI Symposium, Berlin, 2017
- [11] BMVI (ed.) : Verkehrsverflechtungsprognose 2030. Berlin, 2014
- [12] International Energy Agency (ed.) : Global EV Outlook 2017
- [13] Helms, H.; et al.: Weiterentwicklung und vertiefte Analyse der Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen. Studie im Auftrag des Bundesumweltamtes. Dessau, 2016





# The Combustion Engine

A Drive with a Future

Dr. Martin Scheidt

#### はじめに

シェフラーは、70年以上にわたって性能向 上と走る喜びを実現しながら、低燃費でエ ミッションも低減するコンポーネントやシ ステムの開発を手がけてきた。周知のように 現在、エミッションに対する要求が世界的に 厳しさを増しており、それらの開発をさらに 後押しする主な動機付けとなっている。これ と並行して、低燃費、すなわち CO<sub>2</sub> 排出量 の削減についてもここ数年で重要性を増し てきている。これまで技術者が長い間直面し 続けてきた難題は、ある排気成分を最小限に 抑えると、別の成分の排出量が増加する、と いったように双方の要件をともに満たすこ とであった。ゆえに、パワートレインのこれ からの進化においては、有害物質の排出量と CO。排出量の両方を削減するという課題に 取り組まなければならない。本稿で示すよう に、内燃機関は単一の動力源として、または ハイブリッドシステムを搭載した動力源と して、それらの改善について大きな可能性を 秘めている。

短期的・中期的に見れば、圧縮天然ガス(以下 CNG)などの代替エネルギーや、再生可能 エネルギーから生成された水素などを合成し た燃料により、内燃機関の CO<sub>2</sub> 排出量を持続 可能な形で削減する可能性がある。化石燃料 としての CNG は現在すでに入手可能であり、 ガソリンに比べ CO<sub>2</sub> 排出量を約 25% 削減で きると考えられているが、将来的には CNG をバイオマスや電気分解 / 合成によって、完 全にカーボンニュートラルな形で製造できる ようになることが予想される。合成燃料は、 現在利用されているガソリンやディーゼル燃 料の代用品としても利用できるため、自動車 全般に使えるほか、酸素分子混合物を加える ことによって、煤の排出をほぼ 100% 削減 し、かつエミッションを抑えた燃焼とするこ とが可能である。ただし、これら燃料の特性 を活かすには、それ相応のエンジン技術が必 要となる。

#### 規制と技術開発

過去 15 年間で内燃機関、特にガソリンエ ンジンは大きく進歩を遂げてきた。CO<sub>2</sub> 排 出量規制が厳しさを増す状況に後押しされ、 ディーゼルエンジンや直噴ターボガソリンエ ンジンが主流となったが、特に直噴ターボエ ンジンの開発によってエンジンは小排気量ま たは気筒数を減らすことにより小型化でかつ 出力を向上することが可能となった。これに 加え、エンジントルクが向上したことで、よ り高いギヤ比、より多くのギヤ数を有するト ランスミッションとの組み合わせが可能にな り、ダウンスピードコンセプト、すなわち、 より低速でのエンジン運転が実現した。



1 Schematic depiction of the NEDC, WLTC and RDE-relevant performance map ranges

エミッションおよび燃費評価の基準としての NEDC (New European Driving Cycle) に牽引される形で、エンジンは低速・低負荷 でも適切な CO<sub>2</sub> 排出量を実現するよう開発 が行われた (図1左)。この結果、特定の走 行条件で走行する自動車認証試験時における 燃料消費量についてはきわめて低く抑えられ るようになったが、通常ユーザーの使用時に おいては走行条件が異なるため、燃料消費量 は認証時よりも大きく上回る結果となってい る。

欧州では、2017年9月1日より新型乗用 車を対象にした排出ガス・燃費試験法である WLTC (Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Cycle)が施行され、 2018年9月1日から新規登録されるすべ ての自動車に対して本試験法に基づく認証が 義務付けられるようになった。WLTCでは、 より高速での走行や急激な加速・減速と、従 来以上に厳密になった試験ガイドラインが盛 り込まれているほか、消費者に対して燃費を より正確に知らせるためのオプション機器に ついても考慮されている(図1中央)。

一方、欧州にとって最も大きな変化をもたら しているのが、エミッション排出量を実態に 即した形で測定するために新たに義務化さ れた RDE (Real Driving Emissions) で ある(図1右)。この試験では、自動車から のエミッション (NO<sub>x</sub>、PM、CO、HC) 排 出量の測定および定量化を、実験室ではなく 路上で実施する。この試験は定められた手順 に沿うのではなく、推計学的あるいは無作為 な形で行われるため、エミッションはエンジ ンの稼働範囲全体にわたって規制値に対応し なければならない。三元触媒を装備したガソ リンエンジンにとって、この新規制は、エン ジンマップ上のあらゆるポイントにおいて空 燃比 $\lambda = 1$ での運転を義務付けるものとな るであろう。トルク向上のためのスカベンジ ングや全負荷状態においての燃料リッチ運転 といった手法が、今後は利用できなくなると

考えられる。これは、エンジン排気量を一定 として考えた場合、定格トルクおよびエンジ ン出力が低下することを意味する。

これを解決する手段としては排気量増加によ るエンジン性能の維持が考えられるが、その 場合、エンジン構造や車両搭載スペースが制 約される。また、全負荷状態における改善オ プションとしてはクールド EGR (Exhaust Gas Recirculation) や水噴射があるが、 可変バルブタイミングがもたらすオプション を活かすことも効果的である。可変バルブタ イミングは、正しく導入すれば全負荷時の性 能を最適化できるだけでなく、部分負荷時に もポンプ損失を抑え燃焼効率を最大化できる 可能性がある。これにあわせてターボ過給の 条件を設定・調整することで、クリーンな燃 焼が可能になるほか、エンジン出力を落とさ ずに燃料消費量を削減することにもつながる と予想される。

また、あらゆるエンジンに対しての効果的な 燃料消費量の削減としては、パワートレイン 内の機械摩擦損失をさらに低減するという方 法がある。シェフラーにとって摩擦損失低減 は、今後も、パワートレインのさらなる進化 を目指すうえで最重要な領域である。

#### 摩擦損失の低減

カムシャフトやバランサシャフト、ターボ チャージャーやフィンガーフォロワーではす べり軸受から転がり軸受への置き換えが進ん でいるが、補機ベルト駆動においてはすでに、 転がり軸受がかなりのレベルでのフリクショ ン削減を実現している。4気筒エンジンにお いて、エンジン回転数の2倍の速度で回転 するバランサシャフトシステムでは、すべり 軸受を転がり軸受に置き換えることで摩擦損 失を約半分にできることがわかっている(図 2)。





2 Savings with balancer shaft systems with rolling bearings

エンジンの動特性においては、ターボチャー ジャーで発生する摩擦の損失低減が重要な要 因となる(図3)。ターボチャージャーに転が り軸受を使用することにより、コールドスター ト時の摩擦損失を最大80%まで低減すること が可能であり、エンジン応答を良好な状態に 保つことができる。同様に加速時には、ター ボチャージャー内のタービンも、より高速回 転するため、短時間でより大きなブースト圧 力が得られる。本試験結果では、このセット アップにより約2.5%の効率向上が見られ、 それだけでなくエンジン立ち上がりトルクと 出力も向上していることが確認されている。

このようにパワーとトルクの向上が見られる ことで、転がり軸受を採用したターボチャー ジャーシステムでは、過渡時に行われる NO<sub>x</sub> あるいは煤の排出量低減のための燃料リッチ 制御の使用頻度を低減することが可能とな る。次に考えられるエンジン内での転がり軸 受への置き換えは、クランクシャフトのメイ ン軸受である [1]。シェフラーではフォード社 と協力し、転がり軸受を既存のエンジンに使 用しフィジビリティスタディを行った。フラ イホイールから最も離れたクランクシャフト の第1メイン軸受位置に転がり軸受を使用す るだけで、燃料消費が1%改善できることが 確認された。メリットは、この場所なら転が り軸受を簡単に取り付けられる点にある(図 4)。また、第1クランクシャフト軸受には





Std bearing Ball bearing

3 Benefits of a turbocharger with rolling bearings



4 Three-cylinder engine with a rolling bearing at the first main bearing position

きわめて高い負荷がかかり、さらにベルトオ ルタネータスタータ (以下 BAS) による負荷 が掛かるエンジンに対しては、この方法がよ り大きな効果が期待できる。



#### BAS による回生ブレーキ

システム全体のエネルギー損失を最小限に抑 え、これによって燃料消費量と CO<sub>2</sub> 排出量を 低減させるための次なるステップとしては、 BAS を使用する方法が有効であろう。PO タ イプのハイブリッド構成は、新旧の自動車や エンジンの補機ベルト駆動に最も手軽に導入 できると考えられている (図 5)。

オーバーランモードでは、BAS は車両の運動 エネルギーを効率的に回生し、エネルギーを バッテリーに保存することができる。このエネ ルギーは、スタート / ストップ時のエンジン

> 再始動や、セーリン グ(エンジンとトラ ンスミッションを機 械的に切り離した) 時にも利用できる。 ほかにも、加速時の ブーストに利用する ことが可能である。 スタート / ストップ およびセーリングの コンセプトでは、エ ンジンの始動や停止 を頻繁に行う必要が あるが、このような 運転モードはこれま での経験上、ドライ バーに気付かれにく いほど受け入れられ やすい。従来のピニ オン式スタータに比 べて BAS ではエンジ ンをより早く、より スムーズに始動する ことが可能である。 これにより、BAS を搭載したエンジン は、頻繁な停止/ 発進に有効となる ことが予想される。



Decoupling technologies

Switchable

Pulley Decoupler





Twin

tensioner

2 x

tensioners

Active

tensioner

Decoupling

tensioner

6 Tensioning systems and decouplers for PO systems

BASを採用した PO タイプのハイブリッ ドでは、発電/回生およびベルト始動/ ブーストの際に、張り側とゆるみ側との切 替えが可能な双方向なベルトテンショナー システムが必要となる。このため、シェフ ラーでは二つのシングルテンショナーによ るシステムから電動式コンセプトに至るま で、さまざまなソリューションを開発した (図6)。

適度なベルト張力でトルクを確実に伝達す るには、クランクシャフトから伝達されるね じり振動を切り離すことが必須となる。こ こでもさまざまなソリューションがあるが、 PO タイプのシステムの場合は、クランク シャフトデカップラーが振動低減に貢献す ると考えている。NVH 特性の向上、つまり は運転手や同乗者の快適性レベルをさらに 向上させるためには、エンジンのスムーズな スタート / ストップを促すためのデコンプ レッションなど、エンジンに特化した対策 の導入が必要となってくる。シェフラーは、 電動カムフェーザーと eRocker (電気メカ ニカル式ローラーフィンガーフォロワーシ ステム)によって、これらの要件を満たす ために設計されたシステムを提供すること が可能である。

#### 可変バルブトレイン

シェフラーでは長年にわたって、バルブ位 相可変用カムフェーザーや、バルブリフト 二段切替え用可変バルブトレイン、ガス流 動に対しての設計自由度をさらに高めるバ ルブリフト連続可変用 UniAir システムな ど、幅広い動弁系部品を自動車メーカーに 供給している (図7)。

カムシャフトフェージングシステムは、エン ジンの運転条件に応じたバルブ位相可変が可 能であり、吸気および排気側共に使用する方 式が主流になりつつある。シェフラーではま た、油圧カムフェーザーおよび電動カムフェー ザー両方の開発および量産を行っている。油 圧式の場合は、ロバスト設計と低コストとい うメリットがあるが、作動させるために最低 限のエンジン油圧が必要となる。それに対し て、電動カムフェーザーは油圧に依存してい ないため、エンジン停止時のバルブタイミン グを変更することが可能である(図8左)。 またスタート / ストップ、またはセーリング モード走行などからのエンジン再始動時にお いて、電動式では、エンジン再始動時のデコ ンプレッションなどのバルブタイミング調整 を、エンジンが始動する前に準備することが できるようになる。これにより、エンジン再 始動時に必要となるトルクが低減されるため、 エンジンをよりスムーズに始動することが可 能となる。これはまたメイン軸受の負荷も減 らすため、フリクションも低減される。

さらに油圧式と比べた場合、カムフェーザー の作動温度範囲が広がっている(図8右)。 この結果から、電動式では非常に精密なバル ブタイミングの制御と、高い位相変換速度が 可能となるため、過渡運転時の燃料消費量を 低減できる可能性がある。油圧式から電動式 に切り替えることで、一般的にはオイルポン プの容量を低減することが可能となる。これ は将来的に、さらなる燃料消費量低減につな がる可能性を秘めている。これらの効果を、 直噴ターボ 1.0 リッターガソリンエンジンを ベースにしたシミュレーションで確認したと ころ、燃料消費量は最大2%まで抑えられる ことがわかった。

最近では、エンジンの圧縮比を可変的に変更で きるコンセプトが再燃している。この分野に おいてもシェフラーは、可変圧縮比 (Variable Compression Ratio (以下 VCR)) システ ム用のアクチュエータの開発に取り組んで いる。圧縮比を変化させると、エンジンシ リンダー内の燃焼に直接影響をおよぼし、



7 Variable valvetrain – Schaeffler's portfolio



8 Electric camshaft phaser: Expansion of operating ranges (left) and higher phasing dynamics (right)

当然ながらエミッションや燃費をも左右す るため、アクチュエータシステムにおいては 変換速度、保持精度、そして何より信頼性に ついて高い技術要求に適応することが大前 提となる。VCRシステムを完成度の高いソ リューションへと仕上げるにあたってシェ フラーは、電動カムフェーザーで培った豊富 な経験および技術を有効活用できると考え ている。

# 切替式ローラーフィンガーフォロ ワーと UniAir システムによる シリンダーごとのバルブ制御の実現

カムシャフトフェーザーは、バルブリフトの 位相可変を行うものであるが、切替式ロー ラーフィンガーフォロワーは二種類のバル ブリフトの切替えを行うものである。例え ば、バルブリフトの切替えを行うことにより、 吸気バルブ早閉じ (Early Intake Valve Close (以下 EIVC)) または吸気バルブ遅 閉 じ (Late Intake Valve Close (以下 LIVC)) による、ポンピングロス低減で燃料 消費量の削減が可能となる。また、フルリフ トとゼロリフトの切替えにより、バルブ休止 もしくは気筒休止も実現することが可能であ る。現行の切替式フィンガーフォロワーシス テムはシリンダーヘッド油回路中にあるオイ ルコントロールバルブによって切替えを行 う。一方、アクチュエータによる切替え方式 を採用した新しいローラーフィンガーフォロ ワーシステム (eRocker) は、機械的に切替 式フィンガーフォロワーのロックピンを作動 させるため、シリンダーヘッド内に油回路を 設ける必要がなく、容易に搭載できる。

可変バルブトレインはもっぱらガソリンエ ンジンに使われてきたが、最近ではディーゼ ルエンジンでの使用も増加している。一つの 例としては、排気バルブ側に二種類のバルブ リフトカーブを持たせ切替えを行うといっ た手法で、ディーゼルエンジンにとっては 多くのメリットが考えられる。第一に、コー ルドスタート時に高温の排気ガスをシリン ダー内に引き込めるため(内部 EGR)、排気 ガスの後処理側のヒートアップ時間が短縮 可能となる。第二に、エンジン負荷が瞬時に 変化するような場合、シミュレーションによ れば内部 EGR 率が急上昇して NO<sub>x</sub>のピーク 排出量が 21%低減する(図 9)。

さらに、吸気側の切替式ローラーフィンガー フォロワーは、例えば EIVC や LIVC による 有効圧縮比の最適化や、それによる、高負荷 時の NO<sub>x</sub> 低減対応のためのピーク圧や燃焼 温度低減などによって、さらに CO<sub>2</sub> およびエ ミッションを削減する可能性がある。

量産型ガソリンエンジンに適用可能で、かつ 現時点で入手可能な可変バルブトレインの中 で最も可変自由度に優れるのは、UniAirシ ステムである。このUniAirシステムでは、 バルブタイミングおよびリフトをあらゆる 運転条件に対して個別に最適化できるため、 EIVC やLIVC コンセプトの同時適用が可能と なる (図 10)。またノックによる点火時期の 遅角を最小化し、高負荷での燃料リッチを避けるなど、燃焼プロセス最適化のための自由度が高まることが期待される。いずれの要因も、空燃比 $\lambda = 1$ での運転範囲をエンジンマップ全体に拡大するものであり、新しい RDE 規制に対してもプラスに働くと考えられる。

# シリンダー順次休止方式 (Rolling Cylinder Deactivation (以下 R-CDA))による 小型エンジンの効率向上

エンジン効率を向上させる可変バルブトレイ ンシステムの一つに気筒休止がある。従来、 このコンセプトは主に、4 気筒、6 気筒、8 気筒エンジンのためのものとされていたが、 今後は3 気筒エンジンにおいてもこの機能 がもたらす CO<sub>2</sub>削減のメリットを享受でき るようになると考えている。例えば、フォー ド社では最近、シェフラーが提供する切替式 ローラーフィンガーフォロワーを採用したソ リューションを発表している [2][3]。



■ LP-EGR only ■ LP- and cooled HP-EGR ■ LP- and iEGR by SRFF SEVL

9 Switchable roller finger followers considerably reduce engine-out NO<sub>x</sub> emissions on a diesel engine



**10** UniAir variable valvetrain for all requirements

一般に、気筒休止による CO, 排出量削減の 可能性は、エンジン負荷に加え、気筒休止時 に使用可能なエンジン回転数の範囲によって も大きく左右される。 低速では通常、気筒 を休止できるか否かは、ドライブトレインの NVH特性で決まる。NVH特性は、遠心振り 子 式 ア ブ ソ ー バ (Centrifugal Pendulum) Absorber (以下 CPA)) 付きデュアルマスフ ライホイール (Dual Mass Flywheel (以 下 D M F)) またはエンジントルクが小さい のであれば、CPA 付きクラッチディスクと 組み合わせることで、ねじり振動を低減す ることが可能である。DMFに代わる、コス トに優れたオプションとして CPA を搭載し たクラッチディスクがあるが、これはドラ イブトレインによって生じる不快なねじり 振動を効果的に除去する機能を有している。



11 Prototype engine used to investigate the rolling cylinder deactivation system

2014年のシェフラーシンポジウムでは、3気 筒エンジンに R-CDA を導入するコンセプトを 紹介した。その名が示すように、このコンセプ トは、エンジンサイクルごとに気筒を一つずつ 順に休止していくというもので、各シリンダー はクランクシャフトが4回転するごとに一回 点火される。シェフラーは実際の試験をつうじ てこのコンセプトの検証を重ねてきた。検証に あたっては、毎回同じシリンダーを休止する、 固定型気筒休止方式と R-CDA 方式との比較を 行った。検証用試作エンジン(図11)の吸気 側には UniAir システムを、排気側には切替式 バルブトレインを取り付けた。UniAir システ ムを組み込むことで、R-CDA モードでは残留 ガスの閉じ込めや、EIVC および LIVC によっ てポンピングロスを低減し、エンジンの熱効率 をさらに向上させることが可能である。

二種類の気筒休止方式には、それぞれ異な る機能的制限がある。固定型気筒休止方式 では、エンジン低速運転時にドライブトレ インで発生する NVH が制限要因になる一 方、R-CDA方式では、最大トルクの制限を 受ける。その理由としては、固定型方式で はシリンダーを2気筒使用しているところ、 R-CDAではシリンダーを1.5気筒しか利 用できないことによる(図12)。実際には、 車両重量やエンジンサイズなど、エンジン マップにおいて最も使用頻度の高い負荷ポ イントを決定する要因を考慮し、最終的には 気筒休止による燃料消費量低減の可能性を 検討したうえで、最適なコンセプトを選択す ることになる。



**12** Comparison of operating ranges for static and rolling cylinder deactivation

# フルハイブリッドシステムに 最適な内燃機関

内燃機関は、今後もしばらくの間は自動車 の主な動力源であり続けるであろう。ハイ ブリッドシステムは、モータにプラスして 内燃機関がパワートレインに組み込まれて いるため、電動化を推進するトレンドとは 矛盾しない。ただし、フルハイブリッドシ ステムに関していえば、求められる高い動 力性能の大部分はドライブトレインのモー タによって対応可能であるため、内燃機関 をどれだけシンプルなものにできるかが重 要となる。この点を紐解くため、P2タイ プのパラレルハイブリッド方式、そしてパ ワースプリット方式(継続的にパワースプ リットを行う、シリアル・パラレルハイブ リッド)という現行二種類のハイブリッド コンセプトと、ここから派生する最適な内 燃機関に関する技術要件について検証を行 うこととする(図13)。

パワースプリット方式に通常利用されてい る内燃機関は、排気量が比較的大きく出力 が低い、自然吸気エンジンである。エンジ ンマップにおける低 - 中速域でのみ動作す るため、理論圧縮比が高く設定されており、 低フリクションに特化して最適化されてい る。それらはロングストロークエンジンと して設計されるのが一般的であるが、将来 的にはさらなるフリクション低減のために クランクシャフトに転がり軸受を組み込 む可能性がある。エンジンは EIVC または LIVCモードで動作し、運転状況に応じた 可変バルブタイミングによって有効圧縮比 を最適化することができる。こうしたバル ブタイミングを実現するのが吸気側のカム フェーザーである。吸気側でバルブタイミ ングを変更できる構造にするには、一般的 には、吸気バルブと排気バルブの駆動が独 立したシリンダーヘッドが必要となる。そ の場合、設計の手間が増えるほか、システ ム内のフリクションレベルも高まることが



🔲 Battery 📕 Generator 📕 E-motor 📕 Internal combustion engine 📕 Fuel tank 📕 Planetary gear

13 Comparison of different hybrid architectures

考えられる。設計上の手間を省いてより効 率的な形でバルブタイミングを可変にする もう一つの方法としては、一本のカムシャ フトで吸気と排気のバルブタイミングを変 更できる、UniAirシステムのような可変 方式がある。

遊星ギヤを有したパワースプリット式ハイ ブリッドの内燃機関とモータ出力の間で は、協調制御を行うことが必要である。こ の場合、要求出力を満足させるため、モー タとエンジンの出力をバランスさせる必要 がある。

パラレルハイブリッド方式の内燃機関と モータでは、個別にサイズ変更を行うこと ができる。このプラットフォームでは、よ り重量の重い乗用車や大型SUV向けにシ ステムを構築することが可能である。パラ レルハイブリッド方式の一つのメリットと して、ごくわずかな変更を加えるだけで、 従来型およびハイブリッド型ドライブトレ インの両方に対応可能な自由度の高さが挙 げられる。システム全体の効率を最大限に 高めるには、可変バルブトレイン、過給、 直噴、そして将来的には可変圧縮に至るま で、クリーンな燃焼と最高の効率を実現す るための、内燃機関に特化したあらゆる措 置を講じることが得策と考えられている。 従来型ドライブトレイン用エンジンと設計 上近接しているため、モジュラー式のソ リューションとプラットフォームコンセプ トを活用するのも有効である。またハイブ リッド用エンジンに課せられる要件が多岐 にわたることもあって、数多くの内燃機関 コンセプトが存在する。ある特定の用途に 使われる内燃機関は、ドライブトレインシ ステム全体として可能な限り最高の結果を 提供できるよう、目指すハイブリッドコン セプトにあわせて設計ないしは適合される 必要がある。

#### まとめ

厳しさを増す CO<sub>2</sub>排出量、ミッション規制 に対する要求の高まりに応えるには、ドライ ブトレインのさらなる開発と進歩が必要とな る。低フリクション技術や、エネルギー回生 のための BAS などのシステムを組み込むこと によって、シェフラーはエネルギー損失を最 小限に抑え、パワートレインの効率向上を実 現する。カムシャフトフェーザーから UniAir システムまで、さまざまな可変バルブトレイ ンシステムが、燃焼プロセスの最適化や、燃 料消費量およびエミッションを削減するため のツールとなる。これは、従来の内燃機関の ドライブトレインに限らず、ハイブリッドシ ステムにも適用することが可能となる。後者 において効率を最大限に高めるには、ドライ ブトレインシステム全体を同調させるように 内燃機関を設計することが必要不可欠となる。 それゆえ、内燃機関とそのサブシステムの最 適化については今後も、高効率と低エミッショ ンの追求が開発戦略の中心的テーマであり続 けるであろう。

代替燃料は、短中期的に対応しているエンジ ン技術によるCO,排出量削減に加えて、将来 的に実現される技術である。CNG はすでに、 一般的なガソリンに比べて CO, 発生量が約 25%少ないガス状化石燃料として入手できる が、中長期的には、電力を気体燃料に転換す る PtG (Power to Gas) でのメタンガス合成 が可能となるであろう。また、電力を液体燃 料に転換する PtL (Power to Liquid) プロ セスによる合成燃料の製造に関する議論が目 下進行中で、最初の試験プラントによる製造 がすでに始まっていることもあり、これら合 成燃料による運転が可能なエンジンが、今後 活用されることが予想される。このプロセス に要する一次エネルギーが風力や太陽光シス テムなど再生可能資源由来のものである場合、 燃焼時に排出される CO<sub>2</sub>の量は製造中に化学 結合する量とほぼ等しいため、これらはカー ボンニュートラルと見なすことができる。

# Literature

- [1] Schlerege, F.; Hagen, N.; Morawitz, U.: Evaluation of a Rolling Bearing Crankshaft. VDI report 2282, Baden-Baden, 2016
- [2] Schamel, A.; Scheidt, M.; Weber, C.; Faust,
   H.: Cylinder Deactivation for Turbocharged
   3-Cylinder Engines Feasible and Practical?
   36<sup>th</sup> International Vienna Motor Symposium,
   2015
- [3] Küpper, K.; Linsel, J.; Pingen, B.; Weber, C.: Cylinder Deactivation for the Three-Cylinder Engine. In: MTZ (77) 2016, No. 12





Unlocking the Full Potential of the UniAir System



#### はじめに

世界中で厳格化の一途をたどるエミッショ ン規制や、より低くなる CO<sub>2</sub> 排出量目標値 など、自動車メーカーが提供するパワートレ インの進化を特徴付けるこれらの要素は、こ れからも支配的なものであり続けるであろ う。これにより内燃機関は今後も、短中期的 にも重要な役割を担い続け、そうなることで モビリティに関連するすべてのニーズに漏 れなく対応するとともに、CO<sub>2</sub> 排出量目標 の達成に向かって大きく貢献していくと考 えられている。

欧州の法規制はこの目標に向かって、過去数 年間で根本的なパラダイム転換を果たした。 これまでは、より低い制限値を義務付ける形 で、より厳格なエミッション関連法が施行さ れてきた。試験機関では、実際の試験を行い クロスチェックが行われてきたが、試験方法 自体は更新されていなかった。NEDC (New European Driving Cycle) は、エンジ ンの運転領域のうち比較的狭い領域だけを 対象とするもので、エンジン回転数とエンジ ン負荷を包括的に測定するものではなかっ た。測定試験範囲を大幅に拡大した新しい WLTC (Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle)の制定によって、 状況は一変した。これに加えて、さらに興 味深いのが、実際の公道運転状況下で発生 するエミッション測定を含んだ RDE (Real Driving Emissions)試験である。

エミッションに関する認証は、より幅広いエ ンジンの回転数や負荷を対象とすることに なった。また、2021年までには全車両の平 均 CO<sub>2</sub>排出量を 95g/km に削減すること、 そして 2030年までにはその数値をさらに 30%削減することが義務付けられる。制約が 変化することで、未来の内燃機関のコンセプ トに関する新たな要件が生まれるのである。

- ポンピングロスを最小限に抑えるためのデ スロットリングが今後も重要。
- 過渡運転中におけるエンジン回転数および 負荷の変化に迅速に対応したエミッション 低減が必要。



1 Current fully variable valve train systems

RDE 要件に照らし合わせ、ガソリンエンジンはエンジン性能マップ全域にわたって理論空燃比(λ = 1)で運転。全負荷状態におけるコンポーネント保護のためのリッチ化は今後不可能。

この要件を基準に考えると、バルブリフト連 続可変システムが最適の技術であることが すぐにわかる。それぞれの運転点において、 吸気バルブをコントロールすることで吸入 空気量を管理し、一般的なガソリンエンジン では通常、吸気管内に設けられているスロッ トルバルブを完全に開放させたり(いわゆ るデスロットリング)、もしくはスロットル バルブ自体を取り除いたりすることが可能 となる。

バルブリフト連続可変システムは通常、アク チュエータの制御方式に基づいて、機械式、 電気油圧式、電磁式のシステムに分類できる (図1)。

シェフラーは、2009年に量産可能なソ リューションとして UniAir 技術を完了さ せ、同年にはフィアット社のアルファロメ オミト用 FireMultiAir エンジンに初めて 採用された。シェフラーは UniAir を、以下 で構成されるモジュールシステムとして供 給している。

- 電気油圧式アクチュエータ
- ECU 用の制御ソフトウェアモジュール
- アプリケーションごとのキャリブレーショ ンデータセット

製造開始以来、シェフラーはグローバルな 製造ネットワークによって、300万ユニッ トを上回る UniAir システムを製造してき た。また多種多様なエンジンに採用されて いる同システムは、アップグレードと新機 能による改良を重ねてきた。UniAir ソフ トウェアモジュールと、Continental 社、 Magneti Marelli 社、Bosch 社など大手 メーカーが提供するエンジンマネジメント システムとの互換性を確保することによっ て、シェフラーはエンジン用コンポーネント の選択において高い自由度を提供している。

UniAirシステムの最新世代では、ポンピン グロス低減のほかにも、空気流量をコント ロールすることで燃焼状態および過渡運転 におけるトルク特性を最適化することが可 能である。



2 Design of the electrohydraulic UniAir system





3 Interlinking of actuator technology and engine control unit

#### システム設計

図2は、電気油圧式 UniAir システムの設計を示したものである。ポンプ駆動用カムロブと吸気バルブ間を機械的に接続する代わりに、ポンプユニット~ブレーキユニット間に閉じ込められた一定量のオイルが、ポンプロブのリフトを吸気バルブまで伝達する。フィンガーフォロワーを介しカムシャフトによって駆動するポンプが、この油路内の油圧を発生させる。

ソレノイドバルブが閉じると、油圧がブレー キユニットにかかり、吸気バルブが開く。ソ レノイドバルブが開放されると、オイルが高 圧室から中圧室とよばれる緩衝部へと流れ 出す。これにより吸気バルブスプリングにか かる油圧が低下して、同バルブが閉じる。続 いて、ベースサークルフェーズでは、中圧室 のアキュムレータによって回収されたオイ ルが、高圧室へ戻される。これによって、シ ステム内での油圧上昇に必要なエネルギー の量を最小限に抑えることができる。

電気油圧式アクチュエータ技術に加えて、制 御ソフトウェアもまた、シェフラーが提供す る UniAir システムの主要モジュールの一つ である。シェフラーが開発した制御アルゴリ ズムが、ソフトウェアモジュールとして自動 車メーカーに提供され、エンジン ECU 内の 制御モジュールに組み込まれる(図3)。

制御ソフトウェアは、カムシャフト位相角 およびクランクシャフト位相角のセンサー 信号、および油温データを入力信号として 利用する。エンジン制御システムによって、 UniAirシステムのソレノイドバルブが励磁 される。ソレノイドバルブのオン/オフのタ イミングは制御ソフトウェアによって、吸気 バルブの挙動監視に使われ、さらにシステム 応答における誤差および経年変化を補うほ か、オイル品質の変動による影響を補う。

#### 開発・適用プロセス

シェフラーは数年前、UniAir システムのメ リットを実機で最大限に活かすため、エンジ ニアリングサービスプロバイダーとの共同プ ロジェクトに着手した。この試みにおいて は、既存のエンジンにUniAirを組み込み、 それを車両に搭載し、シェフラー社内で実証 実験を行った。図4は、現行のUniAir適用 プロセスの概要を示したものである。対象と なる試験車を選定したのち、車両に関するパ ラメータをシャシー

ダイナモで測定・定 量化を行い、その後 エンジンダイナモに よるエンジンの詳細 分析を行う。このエ ンジンダイナモでの 結果はUniAirシス テム適用のためのべ ンチマークデータと なる。これまでのプ ロセスによりGT-Powerモデルには 実際のエンジンデー タが組み込まれ、か つUniAirに特化し た適合が施された。

これをもとに、シミュレーションによって求 められる燃料消費量の削減効果を、シャシー ダイナモでいくつかの運転点において実機 確認および相関関係を検証した。この適用 プロセスによって、バルブリフト連続可変 システムに適合するエンジンコンポーネン トとそのソフトウェアパラメータに対する エンジニアリングサービスが可能となり、 UniAir 組み込みを検討している顧客を支援 することが可能となった。



5 Load curve on the performance map of a gasoline engine with forced induction

#### 定常運転における UniAirのメリット

図5は、過給機付きガソリンエンジンの性 能マップに各負荷領域を記入したものであ る。以下の、定常運転において UniAir がメ リットを提供できる領域を点線で示した。

- 低負荷条件で、ポンピングロスを低減できる領域(図 5-①)。
- 吸気バルブ早閉じ(以下 EIVC)または吸気バルブ遅閉じ(以下 LIVC)により、燃焼を悪化させることなく、ノック制限の境界を高負荷側にシフトできる領域(図5-2)。
- EIVC もしくは LIVC に最適化された過 給機を用いることで、全開領域における

Fuel consumption in %

UniAir friction in bar

0.06

1 IV

1

2

FIVC

4

2

0.04

0.08

0.10

420

400

380

360

340

320

300

280

420

400

380

360

340

320

300

280

空燃比のリッチ化を廃止することが可能と なる領域(図5-③)。これにより性能マッ プ全体にわたって、三元触媒の最適範囲で あるλ=1にてエンジンを運転することが 可能。

前述の開発方法を実践するため、シェフラー では EIVC および LIVC 技術を用いて、上に 挙げた三通りの負荷シナリオについて、定 常運転でのシミュレーションを行った。低 負荷領域は 2,000rpm、正味平均有効圧 (BMEP) 2barという運転点で評価を行っ た。図6は、特定の燃料消費量、摩擦損失、 吸気マニホールド圧力、燃焼期間に関する シミュレーションの結果をまとめたもので ある。

Fuel economy

Late Intake Valve

optimum:

Closing

odue to smaller

hydraulic friction

(higher Turbulent

4 this overcompensates better dethrottling of

equivalent Early Miller

and faster burning

Kinetic Energy)

緑線は EIVC を、赤線は LIVC を表している。 図6左上のグラフが示すように、LIVCでは ベンチマーク(ベースエンジン)と比較し て燃料消費量が約2%減少する。一方 EIVC では、概ねポンピングロスが改善されている にも関わらず燃料消費量が増加している。こ れは EIVC では LIVC に比べ燃焼期間が長い ため(図6右下)燃焼の効率が悪く、また UniAirに起因する摩擦損失も大きくなるた めである(図6左下)。これら二つの要因が、 EIVC によるポンピングロス低減のメリット を上回るため、燃料消費量削減の手法とし ては LIVC 方式を選ぶのが妥当となる。ただ しこの状況は吸気ポートもしくは燃焼室に シュラウドを追加した場合変わってくる。図 7は、シュラウドによる効果を示している。

シュラウドによって燃焼時間が大幅に短く なるため、EIVC方式では燃料消費量が大 幅に低減されるほか、EIVCによるデスロッ トリング効果が本来あるべき状態まで改善 される。UniAirの 摩擦損失は 依然として LIVCよりも高い状態であるが、それでも EIVCのほうが優れた選択肢であるといえ る。一般に、吸気による筒内流動は燃焼効率 にとって重要な要素であり、適用プロセスに あたって見過ごすことはできない。UniAir を組み込む場合、新しい運転条件にあわせて エンジン全体を調整することで、適切な結果 が得られる。通常 UniAir システムでは、慣 性質量が小さいためエンジンバルブスプリ ングの荷重を下げることが可能で、特に低 回転領域において、さらなる燃料消費量の



6 Results of engine tests at an operating point of 2,000 rpm with 2 bar of mean boost pressure, without masking

Intake pressure in bar

Burn duration in °CA

8

0.5

0.4

0.6

4

45

35

60

405 450 495 540 585 630 675 405 450 495 540 585 630 675

0.8

7 Results of engine tests at an operating point of 2,000 rpm with 2 bar of mean boost pressure, with masking

2 UNIAIR 47

低減の可能性がある。シェフラーでは現在、 シミュレーションならびに試験設備によっ て、この設計手法の可能性に関する検証を進 めている。

ノック制限領域で実施する試験条件として、 2,000rpm/BMEP13barという低速高負荷を選択した(図5-②)。図8では、ベン チマークエンジンにおける吸気バルブの閉 弁角ごとの各計測結果を青線で表し、グラフ の左方向が EIVC、グラフ右方向が LIVC を 示している。 EIVC、LIVC のいずれの方法においても、有 効圧縮比を低下させることによってノック 制限領域を高負荷側に押し上げている。前述 した運転点においても燃料消費量は EIVC、 LIVC の両方で大幅に低減している。本試験 においては LIVC (燃料消費量が最大 4.0% 減少)のほうが EIVC (最適点で 3.6%)に 対し若干向上代が上回る結果となった(図 8 左上)。この燃費向上の一つの理由として、 図 8 の左下で示すように MBF50%点(燃 焼重心)が良好であることが挙げられる。 ベンチマークエンジン(ベースライン)に



Intake Exhaust Operating point: IVO = const.

8 Results of engine tests at an operating point of 2,000 rpm with 13 bar of mean boost pressure

おいては、MBF50% 点が上死点 (TDC) 後 16°CAという不利な位置にあるのに対し、 EIVC および LIVC を活用することによっ て、MBF50% 点が EIVC 時では 12°CA、 LIVC では 9.5° CA となり、 理論 上 最 適 値 で ある 8°CA に近づく。図 8 左中央のグラフ は、吸気管および排気管における相対圧を示 したものである。EIVC および LIVC におい て、積極的なスカベンジングが見込める圧力 勾配であることがわかる。ポンピングロスを 考慮した場合においても、図8右下のグラ フで示しているように EIVC および LIVC で はベンチマークエンジンに比べて良好な性 能となる。図8右上で示されているウエイ ストゲート開度は、さまざまな運転点におい て重要な役割を果たしている。ベンチマーク エンジンでは、この運転点においてウエイス トゲートは完全に開放されている(無過給) が、EIVCの場合には吸入空気量が減少し、 また LIVC の場合には吸入空気量の一部が 排出されるため、過給が必要となり、特に EIVC においてはウエイストゲートが完全に 閉じている。これは EIVC および LIVC の要 件を考慮したターボチャージャーを選定す る必要があることを意味する。

全負荷条件の試験としては、5,000rpm/ BMEP22barの運転点を選択した(図5-③)。この領域では熱からエンジンコンポー ネントを保護する必要性が生じるため、最高 排気温度は多くの場合制限要因となる。本評 価で用いたベンチマークエンジンでは上限 排気温度を950℃とした。本試験条件では 排気温度を950℃に抑えるため、図9に示 す通り混合気を適宜リッチ化し運転を行った (ベンチマークエンジンでは $\lambda$ =0.88)。

図9では縦軸に吸気閉弁角を示し上方向が LIVC、下方向がEIVCを表している。い ずれの場合においても、上限温度条件を



9 Air-fuel blend at an operating point of 5,000 rpm with 22 bar of mean boost pressure

満足しつつ理論空燃比に近い燃焼条件を実現 することができる。図10は燃料消費率の結 果を示している。燃料消費率は330g/kWh を基準とし、EIVC またはLIVC にすることで

率の結 認された。これは理論空燃比に近い燃焼に /kWh 加え、EIVC および LIVC 時の燃焼重心が良 ことで 好であることも燃費改善に寄与している。 T<sub>Est.max</sub> = 950 ℃ BSFC in **Specific consumption** 

20%削減の260g/kWhに達することが確



10 Specific fuel consumption at an operating point of 5,000 rpm with 22 bar of mean boost pressure



11 50 % conversion point at an operating point of 5,000 rpm with 22 bar of mean boost pressure

冷却のためのリッチ化の結果、ベンチマーク エンジンの MBF50%点は、22°CA ATDC という不利な値となる。UniAirシステムに よって有効圧縮比を調整することにより圧縮 による筒内温度上昇を抑え、ノックが抑制さ れる。これにより点火時期および燃焼重心を 進角することが可能となる。本試験結果では、 MBF50%点が22°CA ATDCから16°CA ATDCに進角している(図11)。

#### 過渡運転における UniAir のメリット

WLTC および RDE の施行を考慮すると、内 燃機関の過渡運転は燃料消費量およびエ ミッションの評価において重要となる。従 来のガソリンエンジンにおいて、ダブルク ラッチトランスミッションのシフトチェン ジのように急激な負荷変動を行う場合、点 火時期を瞬間的に変更する方法によって対 応している。UniAirシステムはサイクルに 特化した制御ロジックによって、点火時期と ほぼ同等の応答速度で空気量を調整できる ため、吸気によるトルク制御という新たな可 能性を切り拓く。吸気を利用した高応答なト ルク制御の使用例として、急激な負荷変動や ギヤチェンジのほかに、アイドル回転数の維 持、慣性走行時の燃料カットからの復帰、気 筒休止などがあげられる。

図 12 ではベンチマークエンジンを用いた WLTC 運転中の各項目の推移を示しており、 動的な負荷変化に対応するため、点火時期を 遅角させているフェーズを灰色で示してい る。これによりWLTC では点火時期の遅角 が頻繁に行われていることがわかる。点火 時期を遅角させることによって、MBF50% 点(図 12 紺表示)も、一般的な 10°CA ATDC から最大で 70°CA ATDC まで遅角し ており、この間は効率を犠牲にした燃焼と なっている(図 12 紫表示)。このことは、 燃料消費量全体に対して目に見える形で悪 影響をおよぼしている。図 12 に黒で示した



12 Impact of altered ignition sequence on fuel consumption during WLTC testing



13 Fuel-saving potentials afforded by transient air path regulation in the WLTC test cycle

推移のうち、上側は非効率な燃焼によって生 じた燃料消費量の瞬間的な増加を示してい る。また下に黒で示した推移は値を積算した ものであり、WLTCにおいてこの燃料消費量 の増加分は 50gにおよぶ。

吸気によるトルク制御を行うことにより、過 渡運転においても点火時期と燃焼重心を適 切な範囲に保つことが可能となる。吸入空 気量は前述した定常運転評価のときと同様、 EIVC 制御によって調整される。これにより WLTC における燃費向上についての三つの可 能性が生まれる(図13)。

ーつ目は、従来エンジンの吸気システムで はアイドル時や低負荷条件において、必要 な空気量を瞬時に調整することができない ため点火時期を遅角させているが、UniAir システムは 0.5mm 刻みのバルブリフトを 可能とする細かな吸気調整ロジックを採用 しており、アイドル時などの低負荷条件で も流量調整を適切に行うことができるため、 点火時期を変更する必要がないことである。 これにより、UniAir システムでは WLTC サイクルにおいて燃料消費量を最大 1.8%

削減することが可能となる。二つ目は、この トルクリザーブのメリットを急速な負荷変 更要求やシフトチェンジ時においても燃焼 重心の不利な範囲を使うこと無く享受でき ることである。これにより、WLTC において 燃料消費量を約1.0%削減することが可能で ある。三つ目の効果は、減速後の触媒の 0, パージである。従来のエンジンでは、車の惰 行中シリンダーを通過した新気が触媒に送 り込まれ、燃焼を再開する際には触媒の0。 パージのため 5 ~ 10 秒間、 $\lambda = 0.8 ~ 0.9$ というかなりリッチな混合気で運転される。 UniAirでは減速中に吸気バルブを閉じるこ とができるため、燃料カット復帰時にリッチ な混合気を燃焼させて 0,パージを行う必要 がない。WLTC においては、この効果一つだ けでも燃料消費量を約1.0%削減できる。前 述した過渡運転における燃費改善効果を組 み合わせると、合計3.8%の燃料消費量削 減の効果となる。

シェフラーは、WLTC において過給機付き3 気筒エンジンに UniAir がもたらすメリット の全体像を把握するため、一連のシミュレー ションを行った (図14)。ポンピングロスを



1 WLTC simulated with measured 3 cyl. DOHC, VVT engine maps (with & without UniAir) and based on C-segment passenger car

14 Fuel-saving potentials afforded by the UniAir system in the WLTC test cycle 低減することで、このシステムでは従来の スロットルバルブ制御に比べ燃料消費量を 3.6%削減できる。UniAirシステムによっ てもたらされるノック抑制効果を活かし高 圧縮比化した場合、燃費は6%向上する。過 渡運転における改善分と合わせるとWLTC では合計 8.4%の燃料消費量の削減が可能 である。

# ハイブリッドシステムにおける UniAir システム

電動化されたドライブトレインにおけ る内燃機関の燃料消費量がUniAirシス テムによってどの程度改善できるかは、 ハイブリッドコンセプト次第である。図 15 は三種類の構成について WLTC で得られた 性能マップである。

- 100%内燃機関によるドライブトレイン (従来型)
- P0 / P1 タイプのハイブリッド (スタータジェネレータ)
- P2 タイプのハイブリッド (クランクシャフト上のハイブリッドモ ジュール、クラッチ機構付き)

図 15 の緑点は、所定の運転点における滞 留時間を示している。電動化していない ドライブトレインにおける内燃機関は特 に中 - 高負荷での運転が多くなる(図 15 上)。P0 / P1 タイプのハイブリッドでは、



15 Performance map results for a 100 % combustion engine drivetrain and hybrid systems in the WLTC test

モータによるアシストでエンジン負荷が緩 和されており、従来型のドライブトレインよ りも低負荷での運転にシフトしている。この 運転条件は内燃機関にとって好ましいもの ではないが、回生ブレーキシステムによって WLTC全体の燃料消費量は低減される。内燃 機関は低 - 中負荷条件で運転するケースが多 いため、UniAirシステムがもたらすポンピ ングロス低減によるメリットはこのハイブ リッド構成においては特に効果的である。

P0 / P1 タイプのハイブリッドと比較して、 P2 タイプのハイブリッドにおけるモータは 通常定格出力が高く設定されており、また回 生ブレーキ中に回収された運動エネルギーが ドライブトレイン内に還流するため低負荷 運転域の大部分を電気エネルギーだけでカ バーできるようになるため、内燃機関を停止 することができる。内燃機関は主として高負 荷域での車両駆動に用いられる(図15下)。 こうした状況下においてもエンジンを最適 化するためにUniAirシステムを利用するこ とができる。システムは、中 - 高負荷でのエ ンジンのポンピングロス低減を可能にする だけでなく、前述したようにノック抑制およ び燃焼重心を移動させることによって、全負 荷条件における燃料消費量を削減すること が可能である。

シェフラー社内での P0 / P1 タイプおよび P2 タイプの構成で用いられている 48V ハ イブリッドドライブトレインの WLTC シミュ レーション結果では、UniAir システムがも つ現実的な可能性を示している (図 16)。

試験においては 3 気筒 1.0 リッターガソリ ンエンジンを基本エンジンとして用いた。電 動化を行っていない従来型のドライブトレイ ンにおいては、UniAir システムを適用し圧 縮比を 10 から 11.7 に変更することにより





16 Fuel-saving potentials afforded by UniAir in a hybrid system

4.9%の燃費改善効果を確認できた(図16 上)。圧縮比をさらに13.5まで上げると、 全体で 6.3%の燃料消費量を削減することが 可能である。図 16 中央のグラフは、P0 / P1 タイプのハイブリッドドライブトレイン における UniAir システムの燃費改善効果を 示している。電動化のみを行った(UniAir システム無し)ドライブトレインを基準とす ると UniAir システムと 圧縮比 11.7 との組 み合わせによって燃料消費量は5.8%削減さ れ、圧縮比13.5 では燃料消費量が7.1%削 減された。図16下のグラフは、P2タイプ のハイブリッドドライブトレインでの結果を 示している。ここでも、UniAir システムが もたらすメリットと高圧縮比化を組み合わせ ることにより、3.9% (圧縮比11.7)から 5.1% (圧縮比13.5)の燃料消費量の削減 が確認できた。

#### まとめ

シェフラーでは、バルブリフト連続可変シ ステムである UniAir の量産を 2009 年か ら続けており、世界中のお客様に対してこれ までに300万ユニットを供給してきた。ま たシステムにより多くの機能を持たせるこ とで、改善・最適化を行っている。シェフ ラーは、既存のエンジン設計に UniAir シス テムを迅速かつ簡単に統合することを可能 にする手法を開発した。ただし UniAir シス テムの性能を完全に活かすためには、ター ボ過給システムを備えたエンジン全体をバ ルブリフト連続可変システムにあわせて調 整することが重要になる。この仕様によっ て、シェフラーでは WLTC における燃料消 費量を8.4%以上削減できることが確認で きた。特に、エンジンの過渡運転において は、UniAirシステムが提供するサイクル単 位で変更可能な吸気制御ロジックによって、 WLTC に基づく測定値にとどまらず、実際の 運転においても燃料消費量の大幅な削減が 可能であることを確認した。

P0 / P1 タイプのハイブリッドを含めた将 来のドライブトレインコンセプトに関して 述べると、UniAir はさまざまなコンセプト それぞれの要件にあわせて燃焼を最適化す るうえで、重要なモジュールとなる。シェフ ラーが追加実施した試験においても、内燃機 関の再始動時におけるUniAirシステムの燃 費改善効果が示されているが、これは触媒 の0,パージ行程にともなうリッチ運転が低 減されたことによるものである。UniAir シ ステムの自由度の高さについては前述した 通りであるが、さらに制御ロジックの調整に よって異なったエンジンアプリケーション に容易に組み込むことが可能であることか ら、費用対効果の高いモジュールであるとい える。

現在、追加のアキュムレータを装着した UniAirシステムでの追加試験を進めてい る。この仕様においては、EIVCコンセプト にともなう油圧損失の低減を目標にしてい る。追加されたアキュムレータにより、リ ターン経路から逃がしていた余剰油圧を蓄 圧し次のサイクルで回収することが可能と なる。試験結果の速報では、この改良によっ て油圧損失レベルが 30% 程度低減可能であ ることがわかっている。

#### Literature

- Haas, M.: UniAir The First Fully-Variable, Electrohydraulic Valve Control System. 9. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2010
- [2] Haas, M.; Piecyk, T: Valve Trains for Implementing Innovative Combustion Strategies.10. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2014



# Fast and Precise

Electrical Cam Shifting



#### はじめに

排気規制の強化により、今後はエミッショ ンと燃料消費量の低減が内燃機関の開発に おいて重要な役割を果たすようになる。こ れに関連して、エンジンの燃焼プロセスは、 内燃機関の設計コンセプトの重要な要素と なるだけでなく、エンジン内の排気物質を 最小限に抑えるうえでも重要である。吸気 サイクルを最適化する取り組みは燃焼プロ セスに影響を与え、エミッションと燃料消 費量に作用することから重要な取り組みと いえる。自動車の内燃機関は定常状態での み運転するのではなく、異なるエンジン回 転数、異なる負荷で運転されるため、吸気 サイクルを運転状況に適応させる必要があ る。カムシャフトフェージングシステム(以 下 VCP) は、バルブタイミングを変える ことにより吸気サイクルを調整することが 可能で、前記したそれらの目的を達成する 手段として長年採用されてきた。エンジン が性能マップの異なる作動点に移行する過 渡状態では、フェージングシステムはカム シャフトのタイミングをすばやく要求角度 へ切替える必要がある。現在必要とされる 変換速度は最高 500°CA/s であるが、も しカムシャフトの変換速度が不十分であれ ば、ECUが点火時期および燃料噴射シーケ ンスに積極的に介入しなければならない。 この方法は有効であるものの、一般的には 過渡運転中のエンジン効率が低下するため 好ましくない。排気側にVCPを搭載した場 合、排気ガスを内部で再循環させ、未処理 の排気物質を減らし、燃料消費量を最小限 に抑えることが可能となる。そのためには、 VCP で両方のカムシャフトを可能な限り正 確に制御する必要がある。ターゲットは、 マップ上で定められている設定値との差 を1°CA未満に抑えることである[1]。ま た、ハイブリッドシステムやスタート/ス トップシステムの登場により、エンジン始 動回数が増えたことで、エンジン始動時に おけるカムシャフト制御にも注目が高まっ ている。エンジン始動時のエミッションは 特に重要であるため、エンジン始動時にお けるバルブタイミングの柔軟で正確な制御 はエミッションを減らす効率的な手段とな る。

かつて、VCPはガソリンエンジンのみで使 用されていた。その後登場した、VCPを搭 載した初のディーゼルエンジンでは、吸気 弁の閉弁タイミングを遅らせることで有効 圧縮比を減らし、エミッションを低減する ことができた。

### 油圧カムシャフトフェージング システム (Hydraulic Camshaft Phasing system)

一般的に、現在のVCPには、油圧駆動タ イプが搭載されている(図1)。ベーンタイ プのロータはカムシャフトに締結され、ス テータはチェーン、ベルトまたはギヤを介 してクランクシャフトから駆動される。ス テータとロータのベーンで一対の油圧室が



1 Design of a hydraulic camshaft phasing unit



2 Oil pressure of different generations of an engine family from 2004 (dark green) to 2016 (light red)

形成され、いずれかの油圧室にオイルを流 すことで発生する油圧により、ロータとス テータの位相が変化し、バルブタイミング が切替わる [2]。

油量はコントロールバルブで制御され、ク ランクシャフトおよびカムシャフトのポジ ションセンサーとあわせて、閉ループ制御 回路を形成する。これにより、要求される すべての角度位置を連続的に制御できる。

#### 油圧カムシャフトフェージングシステム (以下 HCP)はロバスト性が高く、多くの アプリケーションで実績があるものの、技 術的な限界に近づいている。応答性能は エンジン油圧に比例するが、最新のエンジ ンでは燃料消費量を低減するために、潤 滑回路でもオイルポンプが必要とするエ ネルギーを最小限に抑えている。図2に、 2004~2016年の同じエンジンシリーズ の異なる世代における油圧の推移を示す。

2016年に発売されたエンジンでは、ある 運転条件での油圧レベルが1barにまで下が ることもあり、過渡運転に必要な変換速度 を達成することがさらに難しくなっている。 欧州で2017年、排ガス試験をより正確に 行うために施行されたWLTC (Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Cycle)では、以前のNEDC (New European Driving Cycle)よりもエンジ ン回転数および負荷の範囲が広がり、エン ジン回転数が急激に上昇する条件が増えて いることから、高いレベルでの過渡応答性 が今後重要になってくることが予想される。

内燃機関が停止すると、VCPへの油圧が ゼロになり、エンジンの再始動直後ではそ の作動に利用できる油圧がほとんどないた め、カムフェージングはエンジン停止時の 角度位置(パークキング位置)でロックさ れている。つまり、HCPはロッキングポ ジションが一か所であり、エンジン始動時 もこの位置から作動することになる。一方 スタート/ストップ機能がある車両では、 エンジン再始動の回数が増加することにな るが、この状況下で燃料消費量とエミッ ションを最適化するには、さまざまな始動 条件にあわせて異なる始動シーケンスを実 現できるフェージングシステムが必要にな る。

# 電動カムシャフトフェージング システム (Electric Camshaft Phasing system)

シェフラーが 2015 年から製造している電動カムシャフトフェージングシステム(以下 ECP)(図3)を搭載することにより、 位相制御をエンジンの油圧依存から完全に切り離すことが可能になる。





3 The electromechanical camshaft phaser

ECPでは、油圧に代わりブラシレス DC (以下 BLDC) モータと減速ギヤを使用し て、クランクシャフトとカムシャフト間の 位相角を制御する。BLDC モータはブラシ モータよりも効率的でかつメンテナンスフ リーであり、システムとしてはこの BLDC モータと高効率の減速機で構成される。減 速機は二つのギヤホイールと、一つのフ レックスリングおよび楕円形転がり軸受か らなるウェーブジェネレータを使用する (図 4)。

ウェーブジェネレータのフレックスリング は、インプットギヤホイールとアウトプッ トギヤホイールを介して、タイミングチェー ン用スプロケットとカムシャフトを連結す る。ウェーブジェネレータは、歯付きフレッ クスリングを二つのギヤホイールと噛み合 わせ、ウェーブジェネレータが回転すると 二つのギヤホイールの歯数違いにより、位 相差が得られる構造である[2]。 BLDCモータは、ECPコントローラに接続 されており、ECPコントローラにてモータ からのホールセンサー信号を処理しモータ を駆動している(図5)。

phaser

BLDCモータには位置検出用のホールセン サーと温度監視用の温度センサーが搭載さ れている。ECPコントローラはECUと通信 し、ECUはカムシャフトの目標角度をCAN バス経由でECPコントローラに送信し、目 標角度と現在角度が比較される。VCPでは、 進角変換、位相保持、遅角変換の三つの動 作があり、進角させる場合はBLDCモータ をカムシャフトよりも速く回転させ、遅角 させる場合は、カムシャフトより遅く回転 させる。BLDCモータの回転速度をカムシャ フトと同速度で回転させると、位相角度を 一定に保持することができる。

ハイブリッド化が進む現在、エンジンルー ムの利用可能なスペースは減少している。



5 Topology of the electromechanical cam phaser

そのため、コンパクトなアクチュエータシ ステムが開発目標の一つとなっている。 ECPは、従来の HCP が搭載されているス ペースに収まるようコンパクトに設計され ている (図 6)。

モジュールの互換性により HCP と ECP を 比較的容易に置き替えることができるた め、エンジンシリーズのバリエーションご とに異なるアクチュエータを搭載するプ ラットフォームコンセプトとすることが可 能である。

# 電動カムシャフトフェージングシス テム (ECP) の特性

ECPでは HCPよりも速い変換速度を実現 することができる。その結果、よりアグレッ シブなバルブタイミングの適用が可能にな り、点火時期および燃料噴射シーケンスの 介入を最小限に抑えられる。非常に速い変 換速度は、加速中により速く内燃機関に



6 Hydraulic and electromechanical camshaft phasing units require the same amount of installation space



7 Phasing speed of different camshaft phasing systems in relation to the engine speed.

トルクを発生させることができるようになる。つまり、ECPは高い運転効率だけでなく、優れた走行性能の実現にも役立つ[3]。

ECPの変換速度は、エンジン回転数による 油圧やエンジンオイルの温度とほぼ無関係 であり、これによりコールドスタート時や エンジン停止時の作動も可能となる。図7 に、エンジン回転数に対する2つの現行の HCPとECPの変換速度を示す。ECPでは、 エンジン回転数全域で十分な変換速度があ り、特にエンジン回転数が低いときの変換 速度はHCPに比べて大幅に改善されてい ることがわかる。

現実的な運転環境下で ECP の性能を分 析するため、シェフラーは、エンジンに



8 Timing adjustment with an electromechanical camshaft phasing unit at engine start-up

搭載されている HCP から ECP に交換した 車両を使用して試験を実施した。図 8 にそ の結果を示す。エンジン始動時にカムシャ フトをパークキング位置から任意の目標角 度まで変換させた場合に着目すると、内燃 機関の最初の点火前には必要な位相角に達 していることがわかる。

目標角度はエンジン始動条件ごとに自由に 設定でき、瞬時に ECU で設定された目標 角度に到達し高い精度で保持される。

シェフラーは、内燃機関で使用されるスター ト/ストップ機構専用のアシスト機能を開 発しており、ECPのコントローラは、エン ジン停止時もアクティブなままでポジショ ンセンサーからのデータを分析し、カムシャ フトとクランクシャフトのより戻しを検知 したうえで、位相補正することができる。 そのためエンジンが始動する前に、または エンジンが始動する瞬間にすばやく所定の 角度へ変換できる。図9に、車両試験で得 られた値をもとに機能の仕組みを示す。

グラフの一番上に描かれている青線はエン ジン回転数を示す。スタート/ストップ機 能が作動すると、エンジン回転数はアイド ル回転数からゼロに低下しエンジンが停止 する。ECPコントローラは、エンジン停止 時にクランクシャフトのより戻しを含んだ 実角度位置を認識する。ECUから次の始動 時の目標角度を受取り、ECPコントローラ は、定められたエンジン回転数のしきい値 を超した場合は、すぐに目標角度への追 従を開始するように設定されている。目標 角度への標準的な到達時間は100ms以下 である。



9 Adjusting the camshaft at engine start-up

運転条件に合わせたタイミングシーケンス によりエミッションはかなり低減される。 吸気側に二つの ECP を搭載した V6 エンジ ンでの測定では、エンジン運転の最初の 15 秒間で HC 排出量が 16.7%低減された [3]。

# 電動カムシャフトフェージングによる 快適性の向上

エンジンが始動する前にタイミングシーケ ンスを調整することでエミッションを削減 できるだけでなく、エンジンのより円滑な 始動を可能にすることで快適性も向上でき る。これはスタート/ストップ機能を追加 する際に非常に重要であり、特にエンジン を完全に停止するタイプのハイブリッドシ ステムにおけるエンジンの再始動におい て、NVH レベルが、顧客の許容範囲内で あるかどうかが重要なポイントとなる。



#### Early IVC Late IVC

10 The charge cycle as depicted in the schematic PV diagram: When the intake valves execute a delayed close, part of the charge is ejected during compression such that less air is compressed



11 Engine speed ramp-up when starting at different phase adjustment angles

図10右側の赤丸は、吸気弁の標準的な閉 弁タイミングを表す。吸気カムシャフトを 遅角側へ変換すると、PV線図上の同点は 左にずれる。これは、圧縮工程初期段階で は開口中の吸気弁から空気が上流へ押し戻 される状態であり、その後、吸気弁が閉じ た時点から圧縮工程が開始される。これ により、内燃機関の有効圧縮比が下がり、 NVHが向上する。

エンジン始動時の異なる吸気弁のタイミン グ角の影響を分析するため、シミュレー ションを実施した (図11)。

図 11 に、異なる吸気弁のタイミングシー ケンスにおけるエンジン回転数の上昇を示 す。ピンクの曲線は、IVC が 60°CA のと きの吸気弁のタイミングシーケンスを示し ており、これは、今日の HCP におけるエン ジン始動時の初期設定値として標準的に使 用されているものである。黒の曲線は IVC が 110°CA のときを示している。この結 果によると、燃焼工程に起因するピーク回 転数の違いが明らかであるが、その結果生 じる排気の空気伝播音や固体伝播音の低減 が想定される。逆に、非常に早いタイミン グシーケンス(緑線)では、点火圧力や エンジン回転数の振幅が大幅に拡大してい ることから、この方策は快適志向の面から 実用的でない。

エンジン始動時に吸気タイミングを遅角側 に作動させることの欠点は、瞬間的なトル クの不足によりアイドル回転数へ瞬時に到 達せず、始動時間が長くなることである。 図 11に示すように、吸気カムシャフトの 遅角タイミングシーケンスが大きくなれば なるほど、この影響は顕著である。最適な NVH性能を優先させた IVC が 110°CAの ときのタイミングシーケンス(黒線)は、 エンジンのアイドル回転数に到達するのに 1秒以上かかる。図 12に、エンジンをす ばやく円滑に始動する方法を示す。

図 12 では、図 11 と異なりフェージン グシステムがカムシャフトを IVC 位置を 始動中に 200° CA/s で進角させた結果を 示す。黒実線は IVC 110° CA スタート時 のエンジン回転変動を示し、2回目の点火 では 90° CA、4回目の点火では 70° CA に移動している。フェージングシステムを 使用することで、800rpmのアイドル回 転数に到達する時間が、約 1.0秒から 0.6 秒に短縮されるので、NVH 性能とエンジ ン再始動時間の両立ができる。同様のシ ミュレーションを 800° CA/s まで実施し、 その結果 200° CA/s が最適な変換速度で あった。

エンジン始動時だけでなく、スタート/ス トップ動作中のエンジン停止も快適性にか かわる要素である。シェフラーが試験で証明 したように、エンジンの停止段階においても 上記の手段により最適化できる。図13に、 テストベンチでモータリングエンジンを



12 Comparison of different start angles for "advance" position



13 An intake camshaft adjustment reduces the acceleration amplitudes as the internal combustion engine enters shutdown

使用し、吸気弁のタイミングを30°CA 遅 らせた状態の測定結果を示す。タイミン グを変更しない元のアプリケーションで は、高い加速度振幅(赤線)が生成される が、吸気弁のタイミングを遅らせることに より、加速度振幅は大幅に低減される(青 線)。

#### イノベーション

シェフラーは 2015 年に ECP の量産を開 始以来、技術の進化を絶えず模索してい る。有望な技術進化の一つが、BLDC モー タのセンサーレス制御である。これにより、 BLDCモータの部品点数を減らすだけでな く、ワイヤーハーネスを減らすことが可能 となり、さらなるコストメリットの可能性 が期待できる。

ホールセンサーに代わりロータポジション を検出する方法としては、逆起電力(BEMF または逆 EMF)を利用することがよく知 られている。この方法の欠点は、モータ回 転数が約350rpm以上でしか確実に機能 しないことである。それよりも低い回転数 では、インパルス電流をフェーズに送るイ ンパルス法を利用する必要がある。ロー タ位置によってモータのインダクタンス が変化し電流値に影響をおよぼすことで、 この電流値にもとづいてモータ内のロータ 位置を特定する。図 15 に、ECP システム において、この二つの方法をどのように併 用しているかを示す。

図 15 の 横 座 標 に エン ジン 回 転 数 、 縦 座 標 にBLDCモータ回転数を示す。グレーの縦 線は、エンジンのアイドル回転数を表し、 白色の対角線は BLDC モータとカムシャフ トが同速度で回転している一定の運転状態 を<br />
表す。<br />
上部<br />
深緑の<br />
枠線は<br />
BLDC<br />
モータ がカムシャフトよりも高速で回転する範 囲(進角方向)、下部薄緑の枠線は BLDC モータがカムシャフトよりも低速で動作す る範囲(遅角方向)を表している。アイ ドル回転数までは大部分がインパルス法を 使用し、アイドル回転数から高速域では、 BEMF法が使用される。高速で正確なロー タ位置検出に時間がかかりすぎるため、高 速運転域でのインパルス法の採用は好まし くない。



14 Simplified electromechanical camshaft phasing unit concept without engine-integrated sensor system



15 The BEMF and pulse method together cover the entire operating speed range of the actuator

#### まとめ

エンジンの出力とトルクを高め、エミッ ションを減らすため、吸気側のみ、または 排気側にも VCP を採用するガソリンエン ジンが増えている。低下し続ける油圧レ ベルや適合に対する要求の高まりによっ て、HCPの物理的な限界が明らかになっ てきている。シェフラーは 2015 年からこ のECPを製品ラインナップに加えている。 ECP は従来の HCP に比べ変換速度が速く、 しかもエンジン回転数やエンジンオイルの 温度影響をほぼ受けずに作動できる。これ により、コールドスタート時やエンジン停 止時の作動も可能になり、エンジン始動前 にバルブタイミングを変換できる。その結 果、エンジン始動はより円滑になり快適性 も高まる。またエミッションも低減される。 これは、スタート/ストップ機能や、運転 中にエンジンを完全に停止させるハイブ リッドエンジンでは非常に有効である。

シェフラーではセンサーレス技術の適用な ど、次世代電動カムシャフトフェージング システムの開発を継続的に行っている。

# Literature

- Dietz, J.; Busse, M.; Räcklebe, S.: Smart Phasing – Requirements-Based Concepts for Camshaft Phasing Systems. 10. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2014
- [2] Solfrank, P.; Dietz, J.: The Benefits of Modern Camshaft Phasing Systems. In: MTZ 77 (2016), No. 11
- [3] Ando, S.; Ishii, H.; Shikata, A.; Sui, T.: The New VR30DDTT Engine from Infiniti – Outstanding Power and Response Combined with Environmental Performance. 25<sup>th</sup> Aachem Colloquium: Automotive and Engine Technology, 2016





The Last Big Step for Greater Efficiency

Dr. Peter Solfrank Joachim Dietz

#### はじめに

ここ数年、ガソリンエンジンの燃料消費量 とCO2排出量を削減するための手段として ダウンサイジング(エンジンの排気量低減) の傾向が頻繁に見られるようになった。そ れらの手段としては、各走行性能を維持、 もしくは向上させるため、過給気システム が組み込まれている。これにより、エンジ ン出力を犠牲にせずに排気量低減が可能に なった。しかしながら、高い圧力と温度に よる自己着火現象(ノッキング)により、 吸気量の増加には制限がある。図1のエン ジントルクマップの左上にその範囲を示す。

この現象は、二つの方策により対処できる。 一つ目の方策としては、高負荷領域での点 火時期を遅らせることである。これにより 燃焼室の温度と圧力の上昇を抑えることが できるが、一方でエンジンの効率を下げ、 燃料消費量も大幅に増加する。二つ目の方 策は、自然吸気エンジンと比較して、ター ボ過給ガソリンエンジンの有効圧縮比を下 げることである。つまり、燃焼室の温度上 昇を抑えることができるため、ターボエン ジンはECUが点火時期を遅らせなくても、 高負荷環境下で作動できるようになる。も しくは、燃料消費量の増加を最小限に抑え ながら、最低限の介入で作動することが可 能である。最終的には、圧縮作業の一部を 過給システムに転嫁し、受動的または積極 的な冷却の仕組みによりシリンダーの圧縮 端温度を下げ、その結果、ガソリンエンジ ン固有のノッキングを低減する。

ただし、部分負荷範囲で圧縮比を低減する と運転効率も低下するため、一般的には有 効圧縮比はわずかに減らすだけとして、点 火シーケンスに介入する。具体的には、一 時的にリッチ混合気を生成してノッキング 発生のおそれがある高負荷動作点(図1性 能マップ右上部分)において燃焼室を冷却 する。



1 The ranges of knocking combustion and wide-open throttle enrichment in the engine performance map

このようなエンジン設計を後押ししたのは、 2017年まで EU での自動車のエミッションお よび燃料消費量を評価する基準、NEDC (New European Driving Cycle) であった。NEDC では、低負荷および部分負荷範囲にある運転の 割合が高く、全負荷条件下での性能は考慮され ていなかった。そのため、全負荷領域よりも部 分負荷領域が燃費性能において最も重要であっ た。2017年に施行されたWLTC (Worldwideharmonized Light vehicles Test Cycle) と、 RDE (Real Driving Emissions) の登場によ り、NEDCがもたらしたこれらの設計手法を かつてほど活用できなくなった。その理由は、 WLTC がより幅広いエンジン回転数および負荷 範囲を網羅しており、RDE ではさらに一歩踏み 込み、車両において考えられるすべての実使用 環境下でのエミッション排出量測定を認定の必 須要件としているためである。これをエンジン に置き変えていうと、今後は過給レベルを下げ て、排気量を増加することが必要となると考え られる。その結果、燃料消費量や CO<sub>2</sub> 排出量も 増加することになる。

# 部分負荷および全負荷条件下での 高い効率

エンジンの部分負荷および全負荷性能の最 適化に内在する矛盾を解決する一つの可能 性が、可変圧縮比(以下VCR)技術の採用 である。この技術により、圧縮比をエンジ ンのさまざまな動作点でリアルタイムに最 うなエンジンでは、ノッキングが発生する うなエンジンでは、ノッキングが発生する 可能性がある動作点では圧縮比が低減され、 ノッキングが発生するおそれのない動作点 では高い圧縮比が得られる。このように、 この技術により小型化されたターボ過給ガ ソリンエンジンを今後も使用できる可能性 があり、未来のパワートレインコンセプト に適している。

また VCR システムでは、ターボ過給ガソ リンエンジンにおける高負荷条件下で部品 への過大応力を防ぐために、よく使われて いる全負荷条件下でのリッチ混合気生成の 必要がない (図1)。この条件では、大量 の燃料が燃焼用空気と混合されるため、シ リンダー内酸素量が不足して、混合気を十 分に燃焼させることができない。燃料増加 による気化エネルギーによって燃焼温度が 下がり、その結果、ピーク圧力と部品への 負荷も低減される。ただし、三元触媒は本 来の効率を発揮できなくなる。

図2(右)に、エンジンのトルクおよび回 転数に対する二段圧縮比をもつエンジンの 性能マップの例を示す。このエンジンは、 低負荷時には高圧縮比(12:1~15:1)、 高負荷時には低圧縮比(8.5:1~9.5: 1)に切り替わる。図2(左)には、等容性 モデルプロセスに基づきエンジンが理論的 に到達可能な熱効率に対する圧縮比の影響 を示す。8.5:1の低圧縮比時効率57.5% を基準として、15:1の高圧縮比で動作さ せた場合は効率が66.1%に上昇している。 これらは、全負荷性能に最適化されたエン ジンと比較して、部分負荷領域での圧縮比 を高めるためにVCRを利用した場合におけ る理論的に到達可能な最大効率である。

現在は、吸気バルブ早閉じ(以下 EIVC) または吸気バルブ遅閉じ(以下 LIVC)を 積極的に行う吸気サイクルが一般化してお り、カムフェージングシステムや可変バル ブトレインが搭載されている。代表的な方 法の一つは、燃焼ガスの有効エンタルピー をさらに活用するために、圧縮行程に対し て膨張行程を増やすことで、有効圧縮比が 高いエンジンのポンピングロスを低減する。



2 Influence of compression ratio on thermal engine efficiency (left) and performance map of a two-stage compression ratio (right)
4 | PHASING SYSTEMS 73

ただし、全負荷条件下で十分な吸気量を確 保するには、目標の圧力および温度条件を 満たしながら十分に高い充填効率を得なけ ればならないために、より高い吸気圧が必 要である。

# マルチリンクコンセプト

可変圧縮比のコンセプト自体は新しくはない。1920年代には、可変圧縮機構を使用した試作エンジンが作られていた。以来、さまざまな自動車メーカーやサプライヤーがこの技術を試したが、大量生産に求められる成熟度には達しなかった。克服すべき主な課題は、エンジンの寿命まで考えた十分なロバスト性と信頼性、およびすばやく正確に制御でき、コスト効率の高い仕組みを生み出すことである。CO2削減の議論の

拡大、ダウンサイジングにともなう上記の 相乗効果、ほかの可変エンジンシステム(バ ルブトレインなど)で得られた有益な経験 により、ここ数年、メーカー、サプライヤー、 開発サービスプロバイダーは VCR 開発プロ グラムを見直し、強化している。

現在議論されているシステムは、以下のよ うに分類できる。

- 折り曲げ式または上下方向に変位可能なシリンダーヘッド
- 可変長コンロッド
- 偏心クランクシャフト
- 代替クランクトレイン

シェフラーは以前から VCR コンセプトに 関わっており、ベンチマーク研究で複数の 案を比較した。その結果、マルチリンク システムのクランクトレイン (図3) は、



3 VCR system based on multi-link mechanicals

操作機能およびロバスト性に関して特に有 益であると判断した。シェフラーはその後、 現在量産となっている電動カムフェージン グシステムで使用されている構造をもとに、 さらにコンセプトを追究してきた。

従来と同様、エンジンにはコンロッドとク ランクシャフトが組み込まれている。ただ し、コンロッド大端部とクランクシャフト ピンは直接ではなく、インターリンクを介 して連結されている。このリンクは、第2 コンロッド(制御コンロッド)により第3 の継手を介して動かされる。一方、制御コ ンロッドは、コントロールシャフトの偏心 部で支持されている。図3に示すように、 上記の仕組みにより、コントロールシャフ トの回転位置でピストンの上死点の位置が 制御される。その結果、異なる圧縮比の調 節が可能となる。具体的には、コントロー ルシャフトを各位置に固定することにより、 最小値と最大値の間のあらゆる圧縮比を調 整できる。

また、圧縮比を無段階に調整できるマルチ リンクコンセプトには、従来のクランクシャ フトと比べさまざまな利点もある。運動条 件を詳しく分析した結果、適切な幾何学的 構成により、従来のクランクシャフトに見 られる二次慣性力を大幅に低減できること が明らかになった。さらに、4気筒エンジ ンではバランサシャフトを完全になくすこ とも可能である[1]。

また、上下死点の周辺でピストンの加速度 がより均一になることで、クランクシャフ トの動的なトルク変動が低減される。[1] の中で著者は、その結果、マルチリンクク ランクシャフトドライブを備えた直列4気 筒エンジンが従来のV型6気筒エンジン に匹敵する円滑さを実現できると主張して いる。上死点でのピストン加速度低減とそ れによるピストン速度の低下により、燃焼 の変動が小さくなる。その結果、熱効率に 影響を与える放熱変動の影響が最小限に抑 えられる。これにより、EGR 還流率が高ま り、希薄燃焼システムの導入が容易になる。

従来のクランクトレインと比較して、マル チリンクコンセプトは可動部品や軸受点数 が多いため、当然ながら、全体的な摩擦損 失が大きくなると思われるが、運動学的に 詳しく検証した結果、シリンダー圧が高い ときコンロッドは垂直位置になるので、圧 縮段階および最も重要な膨張段階でピスト ンの横力およびピストンとシリンダーの間 の摩擦が大幅に低減される。要するに、軸 受点数の増加などによる損失は相殺され、 マルチリンクエンジンの全体的な摩擦損失 は従来の構成と同等か改善される。4気筒 エンジンのバランサシャフトシステムの廃 止により、摩擦がさらに低減できる可能性 を考慮した場合はなおさらである[1]。

# アクチュエータシステム

上記の通り、コントロールシャフトを回転 することで異なる圧縮比が設定できる。こ のコントロールシャフトには非常に動的で 高いトルクが掛かることから、高減速比ギ ヤボックスとブラシレスDC(以下 BLDC) モータで制御が行われる。別体の制御ユニッ トを使用して、以下の情報に基づきすばや くかつ正確な制御を実現することができる。

- エンジン ECU からの目標角度
- BLDC モータのロータ位置
- コントロールシャフト位置

制御ユニットでは診断および安全機能が実装され、その情報がエンジン ECU に送られる。このシステムは、電動カムシャフトフェージングシステムのコンセプトとほぼ同じである(図4)。シェフラーは、これらのメカトロニクスシステムで得られた包括的な経験を活かして、VCRを開発することを決定した。



4 Topology of the multi-link multi-link phasing system

このシステムの開発初期段階として、エン ジンシリンダーで発生する燃焼圧力をもと に、クランクトレイン全体のマルチボディ シミュレーション(以下MBS)解析を行っ た(図5)。この取り組みにより、定格、動的、 振動的挙動に関して、マルチリンクドライ ブトレインの理解を深めることができ、開 発するアクチュエータの部品にかかる定格、 過渡、振動荷重の評価が可能となった。

# トランスミッションコンセプト

コントロールシャフトの回転の主な要件に は、保持状態および変換中に作用する燃焼 機関から発生する数百 Nm もの非常に高い 動トルクに耐えうること、また最大 180° のコントロールシャフトの作動範囲をもつ ことが含まれる。コントロールシャフトの



5 MBS model for quantifying the loads on the actuator

トルクを BLDC モータの能力に適合させる ため、高減速比ギヤボックスが使用される。 もう一つの重要な要件は、アクチュエータ システム内の負荷の反転によって歯面が切 換わることにより発生する可能性がある可 聴騒音である。使用する高減速比ギヤボッ クスのタイプにより、追加の対策が必要に なる場合がある。

これらの課題に対応する最適なギヤボック スコンセプトを特定するため、シェフラー は2014年、包括的なコンセプトの検討を 行った[2、3]。主に検討したのは、連結棒 を備えた偏心ギヤボックス、柔軟な波動式 ギヤボックス、遊星ギヤセットなど、減速 比の高いアクチュエータでよく使用される タイプのギヤボックスだった。その後、選 択肢を広げ、ピニオン、連結ギヤなどの一 般的なタイプの標準ギヤボックスを対象に 含めた。

シェフラーが定義したベンチマーク試験の 評価基準は以下の通りである。

- 出力密度(必要な搭載スペースに対する許 容出力トルクの割合)
- 動的応答性(変換中のギヤボックスの加速 能力)
- ガタツキ感度(負荷反転時、バックラッシュ により歯面が切換わることで発生する可聴 騒音)
- ギヤボックス全体の効率
- 耐摩耗性
- 部品の複雑さ
- 部品点数
- 技術経験

ベンチマーク研究の結果、すべての特性を 考慮したとき、最適な選択肢としてフレッ クスポットギヤボックスが浮上した。出力 密度が最も高く、バックラッシュが最も小 さいのが特徴となっている。そのコンセプ トは、電動カムフェージングシステムに関 する説明とほぼ同じである。



6 Components of the flex pot gearbox

フレックスポットギヤボックスの入力部は、 フレックスポットの開口端内側に配置され ている楕円形玉軸受である。楕円形の輪郭 がフレキシブルポットの外郭に伝達され、 さらに歯輪に伝わる。楕円形をしているこ とから、これらの歯は、回転固定されてい る中空歯車と二つの対合する点で噛み合う。 玉軸受の楕円形内輪が回転し始めると、フ レックスポットと中空ギヤ間の噛み合い歯 の二つの点が中空歯車の内郭に沿って動き 始める。ただし、フレックスポットの外郭 と中空歯車の内側の歯数が若干異なるため、 フレックスポットの方がゆっくりと回転す る。図6に、この原理に基づいて設計され たギヤボックスの分解図を示す。

設計プロセスでは、類似する電動カムシャ フトフェージングシステムの開発で得た経 験を活用し、VCRアプリケーションへの適 用が行われた。シェフラーが開発した代表 的なソリューションの主な技術特性は以下 の通りである。

- 100:1の減速比
- 約 60%の高効率ギヤボックス
- 350Nm を超えるトルク容量
- 直径 100mm、幅 40mm のコンパクトな寸法
- 少ないギヤバックラッシュ
- 970gの軽量設計

図7に、上記の要件を満たすギヤボックス のハードウェアの例を示す。アクチュエー タの機能と耐久性を検証するため、より負 荷の高い部品にも対応する十分な余力を もった試験設備を開発した。これにより、 この技術を異なる内燃機関に適合するため に必要な開発期間を最小限に抑えることが 可能である。

#### ブラシレス DC モータ

シェフラーは、VCR アクチュエータを駆動 する BLDC モータを開発した。従来のブラ シモータと比較して、BLDC モータは長寿 命、高効率、発熱が少ないのが特徴である。 搭載スペースや、磁気、熱、剛性、耐振性 要件に関して最適設計されたものを、本部 品用に開発された試験装置にて検証した。

フレックスポットギヤボックスの減速比は 100:1 であるが、例えば BLDC モータへ のクランクシャフトドライブからの負荷を さらに減らし、トルクや VCR を中間位置で 保持するための電力消費量を最小限に抑え るため、減速比が約2:1のスパーギヤを アクチュエータのハウジングに組み込み、 VCR アクチュエータ全体の減速比を 200: 1 に高めることができる。これにより、より コンパクトで軽量な BLDC モータの設計が 可能となる。VCRシステムの主な動作には、 正確な位置検出とアクチュエータの高精度 な位置制御が必要である。そのため、BLDC モータには、センサー制御のブロック整流機 能が搭載されており、高精度ホールセンサー でロータの位置を特定する。VCR システム 要求に基づいて、制御ユニットは BLDC モー タ相巻線の通電タイミングを特定する。モー タ (図 8) の技術仕様は以下の通りである。



8 VCR BLDC motor prototype and test stand for component testing

- 最大トルク:1.7Nm
- 無負荷時の最大回転数:2,800rpm
- 直径 80mm、幅 40mmのコンパクトな寸法
- 一体型の高精度センサーシステム

最終組み立てでは、BLDC モータとフレッ クスポットギヤボックスが、コンパクトで

メンテナンスフリーのアクチュエータユ ニット(図9)として組み立てられ、この ユニットをボルトで組付けるだけの状態で 出荷される。また、顧客の要求やアプリケー ションによって、ユニットをハウジングに 組み込み、絶対角度センサーなどの部品を 追加することもできる。



7 Example of a development sample for the gearbox for the multi-link phasing system and gearbox test stand for component testing



9 Motor and transmission are axially interlocked to form a complete unit

#### 電子制御ユニット

電子制御ユニットでは、エンジンマネジメ ントシステムからの情報を処理し、BLDC モータの整流と制御を行う。シェフラーで は、開発工数、コスト削減のため部品の標 準化コンセプトに従い、現在すでに同様の アプリケーションで適合性が実証されてい るハウジングとコネクターを一体化してい る。VCR制御システム固有の要件により、 まったく新しいプリント基板の設計が必要 であったが、既存のハウジング内に問題な く収まるサイズである(図10)。



10 Combination of a new printed circuit board and a proven housing concept

エンジン ECU との通信には、標準的な CAN バスインターフェースが使用される。また、 制御とセンサーが一体化されたシステムに は、包括的な監視機能と診断機能が組み込 まれている。シェフラーは、十分なフェー ルセーフ機能の実現にも特に注力した。

# エンジンとの一体化を促進する システムベースアプローチ

シェフラーは長年、幅広いアプリケーショ ン領域の複雑なメカトロニクスシステムの 開発および量産で経験を積んできた。この 経験を活かして、この環境で適用される最 新の基準にあわせて開発プロセスを継続的 に向上している。図11に、現在の開発範囲、 およびシェフラーがシステムとして供給可 能なシステム部品群を示す。

このように、エンジンメーカーは、既存の エンジンアーキテクチャにすばやく簡単に 組み込むことが可能な、十分に調整された 評価済み機能ユニットを受け取ることが可 能になっていく。VCRシステム固有の要件 に合わせた開発ツールと手法を使用するこ とにより、シェフラーは、エンジンとの機 械的な統合だけでなく、VCR 機能のソフト ウェアベースのアプリケーションでも統合 を進めていく。

# まとめ

ここ数年、新しいメカトロニクスシステム の適用により、いくつかのエンジン機能が 可変化された。手つかずのエンジン運転の 最後のパラメータの一つが、可変圧縮比で あり、これがさらなるエンジン効率向上に つながる。従来のガソリンエンジン設計に 適用される圧縮比は、利害の衝突を引き 起こす。なぜなら、部分負荷範囲、全負 荷範囲のどちらで性能の向上を図るかを



11 Supply scope of the complete system from Schaeffler (green)

選択しなければならないからである。その 結果、一般的にはエンジン全体の設計で妥 協することになる。多くの場合、CO2排出 や燃料消費量の新たな規制を考慮すると、 このような方法ではもはや十分ではない。 将来、認定を取得するには、エンジンの動 作マップ全体での RDE 試験が必要になる。

VCRシステムでは、エンジンの負荷範囲全 体で最適な効率を実現でき、同時に燃焼や 部品負荷に対して最適化も可能である。シェ フラーは、ほかのメカトロニクスシステム での豊富な経験に基づいて、マルチリンク VCRコンセプトが特に有益であると判断し た。電動力ムフェージングシステムとの密 接な相乗効果により、包括的なアクチュエー タシステムを提供することができる。シス テムは、フレックスポットギヤボックスを 備えたコンパクトでロバスト性に優れた省 エネルギーのアクチュエータ、BLDCモー タ、制御システムとそれに付随するセンサー 部品で構成される。さらに、VCRアクチュ エータシステムのエンジンへの一体化にお いても、エンジンメーカーを強力にサポー トできる。

#### Literature

- Kiga, S.; Moteki, K.; Kojima, S.: The World's First Production Variable Compression Ratio Engine – The New Nissan VC-T (Variable Compression Turbo) engine. 38th International Vienna Motor Symposium, 2017
- [2] Epp, J.: VCR Actuator System Gearbox Concept Study. Project no. 0155.07-0029, not published
- [3] Mulzer, F.: Systematics of High-Ratio Coaxial Gearboxes, Dissertation, TU Munich, 2010



# 3 Cylinder as an 8 Stroke

Rolling Cylinder DeActivation

Dr. Michael Elicker

#### はじめに

気筒休止については、1980年代からこれ まで、ガソリンエンジンの燃料消費量低減、 ひいては CO2 排出削減を実現する方法とし て議論が行われてきた。低負荷条件下で運転 させた場合、エンジンマネジメントシステム はエンジン内のいくつかのシリンダーへの 燃料供給を中断して点火を中止させるため、 この影響を受けるシリンダーでは燃焼は行 われず、ピストンの上下運動のみが行われ ることになる。各種要素(切替式タペッ ト、切替式ローラーフィンガーフォロワー、 切替式ピボットエレメント、カムシフティ ングシステム)のオン/オフといった可変 バルブタイミングを実現するシステムや、





🔳 no cylinder deactivation (CDA), cumulative excitation 🔲 static, dominant 0.5<sup>th</sup> order 🔲 rolling, dominant 0.75<sup>th</sup> order

1 Deactivation level and torsional vibration excitation of different deactivation strategies for three-cylinder engines

シェフラーの電気油圧式連続可変システム (UniAir) では、休止状態にあるシリンダー のバルブを閉じたままにして吸気サイクル のポンピングによる損失を低減した。気筒 休止による燃料消費量低減効果は、負荷を 燃焼気筒の高効率領域へシフトすることに より達成される。つまり、1気筒あたりの 吸気充填量を増やすため、スロットルを開 く(デスロットリング)ことになり吸気損 失が低減され、また燃焼行程における壁面 での熱損失も低減される。いずれの要因も、 一定トルク出力におけるエンジン熱効率を 大きく改善した。ほんの数年前まで、気筒 休止コンセプトは6気筒または8気筒の大 型エンジンに採用されるのが常だった。気 筒休止にあたっては、使用するシステムに 応じてシリンダーの片側バンク全体を休止 させる、または V 型エンジンの両側のシリ ンダーを個別に休止させる、という方法を 用いた。CO,排出制限が厳しくなるにつれ、 より小型の直列4気筒エンジンや、場合に よっては3気筒エンジンにまで気筒休止シ ステムの搭載が広がってきている[1、2]。

#### 3気筒エンジンの振動解析

3気筒エンジンの気筒休止にあたっては、 特に振動発生が重要な問題となる。燃焼間 隔が不規則である場合、点火シーケンスは エンジンが二回転したのちに繰り返される ため、固定型シリンダー休止方式(以下 CDA)は基本 0.5 次の振動成分が発生す る。その際には、シェフラーのデュアルマ スフライホイールや遠心振り子との組み合 わせなど、適切なダンパー技術を組み込む ことによってエンジンがかなりの低速域に ある場合でも、ドライブトレインのNVH を許容可能なレベルにまで低減させるこ とが可能になる。一方、シリンダー順次 休止方式(以下 R-CDA)システムによっ て 480°CA の<br />
一 定 間 隔 で 燃 焼 が 行 わ れ た 場合、より管理が容易な基本 0.75 次の

振動成分になる。このときデュアルマスフ ライホイールと遠心振り子の組み合わせを 用いることで、適用可能となる領域をさら に低速域にまで拡張することができる。3 気筒エンジンでの可能性を評価するため、 シェフラーは R-CDA コンセプトで運転可 能なエンジンを使用しシミュレーションと 実験を行った。検証プロセスにおいては、 エンジンのシリンダーを一定間隔で個別に 休止させた。

R-CDAは、全体の休止率が50%の1.5 気筒動作ということになる。シリンダー内 で燃焼と非燃焼のサイクルを交互に行う シーケンスにより、ほかのシリンダー二回 のサイクルを経たのち振動発生が繰り返さ れる。これにより、燃焼間隔は前述したよ うに、利用可能なシリンダーすべてを稼働 させた場合の二倍にあたる480°CAとな る。この一定間隔で発生する振動は、固定 シリンダーを休止させたときのようなカム シャフトが完全に1回転した後ではなく、 3分の2回転したのちに繰り返される。

振動発生に関連した性能の改善に加えてさ らなる大きな可能性が、CDAの33%に対 して、R-CDAの50%という高い休止率 がもたらす燃料消費量低減という大きなメ リットである(図1)。しかしその一方で、 休止率が高いということは気筒休止に関す るエンジンマップにおいて、最大トルク出 力または平均有効圧力が制限される。

# シリンダー順次休止 (R-CDA) システムの動作方式

これらシステムが提供する前述のメリット に照らして、シェフラーでは3気筒エンジ ンに適用できる R-CDA のコンセプトにつ いて検討を行ってきた[2]。その過程にお いて、どの動作方式であれば最も燃料消費 量を低減できるかについても調査を行った。 現在の量産型気筒休止システムでは通常、休 止中のシリンダー内に閉じ込めた新気を、燃 焼なしで圧縮・拡張させる。これに代わる方 法としては、残留ガスを閉じ込める、または 排気済みのシリンダーを休止させるやり方 がある。休止させたシリンダーでは吸気・排 気バルブが閉じられているため、吸気サイク ルも行われない。つまり、カムシャフトが一 回転する間に、シリンダーでは燃焼なしで圧 縮・膨張行程が二回繰り返し行われる。一方、 燃焼が行われているシリンダーでは、吸気、 圧縮、点火、膨張、燃焼ガスの排気によって 通常の四工程が完了する。その結果、燃焼が 行われるシリンダーではカムシャフトー回 転につき振動が一回発生するだけだが、休止 中のシリンダーでは一回転につき振動が二 回発生することになる[1]。

3 気筒エンジンでの、R-CDA において実現 可能な三種類の動作方式の可能性を評価す るため、シェフラーではそれぞれの方式に ついて比較シミュレーション調査を実施し た。図 2 では、2,000rpm、平均有効圧力 2barという定常状態動作点における燃料 消費量に対する効果を計算した結果を示す。

エンジンを全気筒稼働させた場合を基準 に、排気済みのシリンダーを休止させる (図中負圧閉じ込め) R-CDAでは燃料消費 率が12.5%低減され、CDAで二番目の気 筒を休止させた場合の低減率約10%と比 較して、さらなる低減の可能性が見られる。 従来型の気筒休止システムでもすでに、全 気筒稼働中のポンピングロスを大幅に低減 する能力を備えており、燃料消費量低減を



<sup>2</sup> Fuel-saving potential of different operating strategies for cylinder deactivation in steady-state operation

実現させる主要な要因となっている。ただ し、ブローバイ効果で生じる緩やかな圧力 均等化によってシリンダー内に閉じ込めら れるガスの量次第では、連続的な圧縮・膨 張フェーズとこれに続く壁面熱損失のた め、効率性に関してさらなる悪影響がおよ ぶ。残留ガスを閉じ込めて行う R-CDA で は、閉じ込められたガスの温度と圧力が非 常に高くなる。上昇したシリンダー内圧に よって高体積のブローバイ質量流量が生じ るため、これはその後、壁面熱損失を増 加させる。その結果、全気筒での稼働時 よりも燃料消費率が増加する(+12%)。 つまり、残留ガスを閉じ込める方式は、 R-CDAの実現にはまったく適していない ことになる。新気閉じ込みの場合は、休止 中は損失が大幅に低減されるとしても、全 シリンダーを稼働させた場合に比べて削減 できる燃料消費率は、わずか4%ほどにと どまる。ここで問題となっているのが、新 しいガス混合物の圧縮を二回行うことでタ ンブル流が完全に分断されるために生じる 低速燃焼で、これにより熱効率が約3%も 低下する。

R-CDA を行っている間、非燃焼動作サイ クル中の損失は最小限に抑えられる。この 方法によって、動作点における燃料消費率 は、従来の気筒休止設定からさらに2~3% 低減される。テストエンジンでは、燃焼動 作サイクルでの残留排気ガス量は、シリン ダーの休止・排気を組み合わせた場合で、 10%未満となった。残留排気ガスの合計 量は、全気筒動作時またはCDAでの動作 時のわずか半分ほどとなった。この理由は、 吸気・排気バルブの同時開放がまったく発 生しないことにより、内部残留ガスの割合 を積極的に制御する可能性が大幅に抑えら れているからである。このことは、R-CDA と組み合わせ、残留ガスの割合に関する制 御方法を改善することにより、燃料消費率 をさらに低減できるという考え方を示唆し ている。

# テストエンジンの設計

シミュレーションで得られた有望な結果を 受けて、シェフラーでは実際のテストエン ジンにてあらゆる側面を対象に動力計を用 いたー連の燃焼試験を行い、R-CDAの可 能性を分析した。ベースエンジンとして、 フォード社製の1.0リッター3気筒ガソ リンエンジンを試験に使用した。このエ ンジンには、直噴システム、ターボチャー ジャー、吸気・排気側でカムシャフトの位 相を制御するための油圧カムフェーザーが あらかじめ搭載されている。試験に使用し たエンジンでは、バルブはタペットにより 作動する。

R-CDAを実機のハードウェアとして試験 対象に組み込むには、エンジン内にある3 気筒のすべてのバルブが、それぞれ独立 した形で制御可能であることが大前提で ある。この点については切替機構を介し て、すべてのバルブ作動シーケンスにゼロ ストロークを導入することが最低条件であ る。燃料消費量低減や低エミッションの動 作を実現するための選択肢は増えており、 バルブリフトやバルブタイミングシーケン スに関して、ほとんど制約なしで制御可能 な吸気側に設けられた連続可変動弁が利用 できる。遡ること2009年、シェフラー はUniAirシステムを市場に投入し、量産 向けの広範囲なバルブタイミング方式に対 応する多彩なアプローチを提供した。この UniAirシステムは、気筒休止に使えるだ けでなく、吸気バルブ早閉じ(以下 EIVC) または吸気バルブ遅閉じ (以下 LIVC)、さ らにはさまざまなバルブリフト高さを実現 でき、システムがもたらす全体的メリット が、ハードウェアを追加することによって 増加するコスト分を上回っている。

R-CDAの検証を行うにあたって、テス トエンジンの吸気側にUniAirを搭載し、 排気側には切替式タペットを搭載した。 ベースエンジンの吸気側・排気側カムシャ フト上にある油圧カムフェーザーは、最適 なバルブタイミングに固定した。結果的に、 新しいプロトタイプ用バルブ作動システム の設計を行うにあたり、ベースエンジンに 大々的な変更を加える必要があった。ここ での変更は、シリンダーヘッド、ベルトド ライブ、エンジンまわりに影響をおよぼす ことになった(図3)。

シリンダーヘッドの再設計という複雑な作 業はフォード社と開発サービスプロバイ ダーの協力の下で行われた。この過程にお いて、ベースエンジンに取り付けられてい た動弁系全体を吸気側から取り外し、アル ミ製のUniAirモジュールに交換した。モ ジュールはUniAirアクチュエータシステ ム、カムシャフト、関連するベアリングマ ウントなど、吸気バルブの作動に必要な全 部品を一つのユニットに収めた(図4)。 モジュールとエンジン潤滑システムとの接 続にはオイルダクトを使用した。

ベースエンジンに対して吸気側をやや背 高にした設計コンセプトを試作機用に



4 UniAir cylinder head module

選択した理由は、吸気ダクト形状やバル ブ、点火プラグ、インジェクターの配置構 成に手を加えることなくシリンダーヘッド 内にUniAirモジュールを組み込むためで ある。また排気側で、標準型のタペットか ら切替式タペットに変更したのもそのため である。カムシャフトキャリアに追加した オイルギャラリーで切替式タペットと気筒 休止システムの油圧回路を接続し、シリン ダーごとに設けられた電磁式油圧切替制御 バルブを介して、独立して作動する。図5に、



3 Comparison between series production and test engine

吸気・排気側に動弁系モジュールを装備し Baseli た改造後のシリンダーヘッドを示す。 n=2,

図6は、新しい動弁系システムによって 実現されたバルブリフトカーブである。点 線はベースエンジンのリフトカーブを、実 線は新しい動弁系システムのバルブリフト カーブを示す。ベースエンジンのリフトカー ブでは、油圧カムフェーザーを介してバル ブタイミングを制御することが見て取れる。 一方、テストエンジンの排気タイミングは あらかじめ固定されているが、図6緑線が 示すように、吸気側ではUniAirシステム により自由度の高いバルブリフトを実現で き、この線の範囲内であればほぼあらゆる パターンでのバルブリフトが可能である。

この自由度の高さが、吸気サイクルで EIVC / LIVC 方式によるデスロットリングを行う ための土台となる。小刻みでのブーツリフ トを実現したことにより、吸気バルブはエ ンジン負荷に応じて、①で最小限のリフトに より迅速な開弁を行い、残留ガスを制御す る。気筒休止に備えるため、対象シリンダー 内の残留ガスは吸気マニホールド内へと



EMOP for UniAir
 Masterlift curve
 Exhaust valve lift base engine
 Intake valve lift base engine

6 Comparison of valve lift curves for the base engine and converted RCD test engine

押し出され、次の燃焼動作サイクルまでこ こに留め置かれる。このガスは次の吸気バ ルブリフト時に新気とともに燃焼室に流 入して混合気の調整に使われる。同時に、



5 Cylinder head with valve train modules for the intake and exhaust sides



7 Strategies for controlling the residual gas and intake valve lift with the UniAir system for rolling cylinder deactivation

燃焼が行われるシリンダーでは図 7 に示す ように、EIVC または LIVC を用いてデス ロットリングが行われる。

充填混合気の状態を適切に保つことにより 燃焼が安定し、休止後一回目の燃焼サイク ルでのエミッションにも好影響をおよぼ す。後付けしたUniAirモジュールにより、 テストエンジンの吸気カムシャフトはベー スエンジンより高い位置にあったため、 アイドラーやテンショナープーリーなどベ ルトドライブ全体を再設計する必要があっ た(図8)。新たなレイアウトの構築にあ たり、シェフラーのタイミングベルトドラ イブの量産開発をつうじて蓄積してきた社 内ノウハウを活用した。

エンジンのベンチレーションシステム、燃 料噴射および点火用部品を中心に、さらな る変更が加えられた。



8 Redesigned timing belt drive

改造されたテストエンジンのシリンダー ヘッドをモータリング試験設備に設置し て、バルブリフトのレーザー測定を行っ た。この試験は、シェフラーが新しいエ ンジンに UniAir システムを組み込む際に 用いているすでに確立された手順である。 UniAir システムのソレノイドバルブがカ ムシャフトの回転と連動する形で作動し て、クランク角度に対するバルブリフトが 記録される。測定にレーザーを利用するこ とで、高い測定分解能を確保する。目標と なる用途やエンジンの状態を考慮し、ソレ ノイドバルブの作動とバルブリフトとの相 関関係を特定することにより、UniAirシ ステムの適合を行う。

エンジンテストでは、部分負荷動作時にお いて吸気サイクルのデスロットリングを行 うための低バルブリフト化など、UniAir システムが提供する可変吸気制御機能を 可能な限り活用することが大前提となる。 ただし、燃焼室に変更を加えなかった場 合、低バルブリフト運転時の燃料混合が不 十分になるリスクが生じる。そのため、シ ミュレーションを利用し吸気バルブ付近の 燃焼室形状の最適化を行い、その効果を流 量試験設備で試験を行った。この燃焼室の マスキング追加により、エンジン圧縮比は 10.1 から10.4 へとわずかに増加した。 続くエンジン試験では、マスキング手法が もたらすプラスの効果を確認する。

# 燃焼エンジン試験

開発サービスプロバイダーと協力して、前 述のテストエンジン(図9)を用いて台上 試験を実施した。

試験設備の設計にあたっては、R-CDA中 におけるエンジン行程とこれらが排気に およぼす影響を定量化できるよう、あら ゆる側面に対応できる総合的な測定機器を 使用することに特に重点を置いた。使用し た測定機器は、以下の通りである。

- AVL Indiset system (high-pressure indexing)
- AVL Mexa emissions measurement
- AVL 489 particulate meter
- Fuel consumption measurement system
- IAV KIS knocking detection system
- Sensitec valve lift measurement system from Dewetron
- Various pressure and temperature sensors (including low-pressure indexing)
- Oxygen sensor and scanner
- Speed sensor for the exhaust turbocharger
- AVL Sensyflow flow meter for fresh air

誘導型近接センサー(非接触)を使用し て、エンジン運転中のバルブリフト高さを 追加で測定できるように配慮した。ベン チ試験を通して、燃焼関連のあらゆるパラ メータについて信頼性があり、きわめて再 現性の高い結果が得られた。これはつまり、 気筒休止後、最初の点火時における燃焼室 内のプロセスが直接明らかにされたという ことでもある。この行程は R-CDA におい て懸念点とされている。従来型の気筒休止 システムとは違って、各シリンダーでサイ クルごとに訪れる休止後の再燃焼において 誤燃焼を起こすことなく、要求トルクを発 生しなければならない。一方で有利な点と しては、R-CDA システムにおけるシリン ダーでは、ごく短い間隔で休止と燃焼が行 われるため、さほど冷却が進まないことが 挙げられる。

# 測定結果

テストエンジンを用いて CDA と R-CDA
 の両方で比較検証を行った。図 10 に、
 低 - 中負荷/低 - 中回転数範囲での六つの



9 Set-up of the test bench for the fired engine tests

測定ポイントを示す。これらの測定ポイントにおいて、定常条件で検証を行った。環 境温度、エンジン油・水温、油圧といった 個々の条件はすべての試験で統一した。

CDA でどのシリンダーを休止させるのが ベストであるかという問題はエンジン特有 のさまざまな要因によって左右されるた め、すべての用途に対応するような決定的 な解答を提示できるものではない。フォー ド社の量産型3気筒エンジンを用いた本テ ストの出発点として、シェフラーのテスト エンジンでは1番シリンダーを常時停止さ せた場合に最も良好な形で動作することが わかった[3]。

図 11 は、試験を実施した図 10 の測定 ポイントにおいて計測された、燃料消費 量の相対的な低減率を示す。このグラフ では、ベースエンジン(黒線)に対して UniAir システムおよび切替式タペットを

搭載したテストエンジンの燃料消費量の差 分を比率で示す。グラフ内青線は、吸気側 の UniAir システムを用いた EIVC によっ て部分負荷範囲でのエンジンのデスロット リングによる効果を示しており、気筒休止 なしでも燃料消費量が約5%低減された。 グラフ内黄緑線は、CDA と EIVC を採用し た場合の低減率を示している。低負荷にお いては、ベースエンジンや EIVC のみ使用 した場合と比較して、かなりの範囲で燃料 消費量低減が見られた。グラフ内黄緑点は、 追加で検証を行った低コスト型気筒休止方 式で得られた結果である。この構成(図 11 中「light」と記載)では、気筒休止点 において UniAir システムが継続してエン ジン吸気バルブを閉じており、標準シーケ ンスでは排気バルブが開いた状態である。 摩擦および吸気サイクル損失は生じたもの の、気筒休止なしで測定された、EIVCと 比較して燃料消費量低減は約2.5%であっ た。



**10** Operating points of the testing program across the engine performance map

この方式は、吸気側に UniAir システムが 搭載されているため、排気側に従来の動弁 系をもつエンジンに大きな設計変更を行う ことなく導入できる。また、CDAのポテン シャルの一部は、バルブトレインまわりの 追加費用なしでも達成可能である。緑線が 示しているように、R-CDA 設計コンセプト に合わせた調整を施した場合、さらに燃料 消費量低減が期待できる。測定結果は概し て、シミュレーション段階で予測されてい た、R-CDA による燃料消費量低減の可能性 を追認するものとなった。低 - 中負荷/低 - 中回転数範囲において R-CDA モードでエ ンジンを運転させる場合は、15%~20% と大幅な燃料消費量の低減が期待できる。 エンジンが高負荷域に移るにともない低減 幅は狭まる。テストエンジンでの気筒休止 の使用範囲として理想的となるのは、約 2,200rpm 未満および平均有効圧力 5~ 6barの範囲である。これより高い負荷レベ ルでエンジンを運転させた場合、燃焼が行

われるシリンダーのスロットルがほぼ完全 に開放されることになり、CDA / R-CDA によって負荷点をさらに移動させても、燃 料消費量が引き続き低減されることはなく なる。

図 12(左)では、各吸気圧力を比較した。 EIVC および気筒休止を使用しないベース エンジンでは、スロットル開度が低く吸気 圧力約 400mbar になるのに対し、テス トエンジンの各仕様では、大気圧力(約 1,000mbar)との差がかなり少なく、ポ ンピングロスが少ないことがわかる。想定 していたように、R-CDA はデスロットリン グによる効果を最も顕著な形で提供する。 図 12(中央)から見て取れるように、平 均有効圧力は試験を行ったすべてのコンセ プトで同等レベルとなった。ベースエンジ ンおよび UniAir による EIVC では、すべ てのシリンダーが常に燃焼しているため、 図 12(中央)の平均有効圧力レベルは、



🔳 Base (without UniAir, without CDA) CDA with UniAir: 🔳 Base 📕 static 🌒 light 🔳 rolling

11 Impact of EIVC and cylinder deactivation on specific fuel consumption

図 12(右)の燃焼シリンダーの平均有効 圧力レベルと同じである。CDAでは、二 つのシリンダーが常に燃焼(休止率 33% に相当)するが、R-CDAでは、サイクル に応じて一つまたは二つのシリンダーが燃 焼する(休止率 50%に相当)。平均する と、1.5シリンダーでエンジンを稼働させ た場合に相当する。負荷点シフトの効率は、 R-CDAでは大幅に向上するが、このこと は、測定した燃焼シリンダーの平均有効圧 力が 200%増加している点から見ても明ら かである。

#### エンジン変更およびさまざまな動作方式が、 図 10 の測定ポイントにおける未処理排気 ガスにおよぼす影響について、図 13 で示 す。ここでも、バルブトレインや燃焼室に マスキングによる変更を加えていない、ベー スエンジンを基準とした(黒線)。それ以 外は UniAir を追加したテストエンジンで、

青線は気筒休止無しのEIVC、黄緑線は3 番シリンダーを固定休止、緑線は R-CDA の結果を表す。 未処理の HC、 NO<sub>x</sub>、 COの 排出量ならびに O,が排気ガスに占める割 合は、CDA および R-CDA のいずれも同等 なレベルとなった。これによれば、気筒休 止の方式がエミッションに大きな影響をお よぼしていないことがわかる。HC排出量 と0,濃度に関していえば、それはシリン ダーの休止の有無やエンジンの仕様違いな どではなく、制御仕様に影響される。特に 注目に値するのが、変更を加えたテストエ ンジンと比較して、ベースエンジンの CO 排出量が比較的高いという点である。この 作用は、エンジン動作方式に左右されるも のではないため、EIVCとスロットル開放 方式との組み合わせによって行われる、燃 焼室のマスキングによって違いが生じた ものと考える。どちらの気筒休止方式も、 特に図10のエンジンマップの④および

⑤において、未処理の NO<sub>x</sub> 排出レベルが、 深刻ではないものの、やや高めであること がわかった。これは気筒休止中に残りの稼 働シリンダーで負荷点をシフトさせた結果 によるものである。

図14に、定常状態での休止モード中の、 エンジンからの未処理の粒子状物質排出量 に関する結果を示す。分析した測定ポイン トの多くで、CDA あるいは R-CDA のい ずれを採用しているかにかかわらず、気筒 休止で生成された粒子状物質は、ベースエ ンジンの場合と同じ、またはこれより少な いレベルであった。ごく低負荷の状態また はエンジン回転数がやや高めの場合につい てのみ粒子数の測定を行ったが、それらは 燃料噴射制御を最適化することで低減可能 と考えられる。特に、新しい RDE (Real Driving Emissions) に基づくエミッショ ン規制の登場にともない、ガソリンエンジン に GPF (Gasoline Particulate filter) が装着されるであろうことを考えれば、

全体として粒子数は深刻ではないと見てよ いだろう。ここでは測定していないが、全 気筒運転への復帰中に、CDAでは冷却が 進み、かつスカベンジングが行われてない シリンダーを再稼働させた場合に、粒子状 物質の生成数が多めになる傾向があるが、 R-CDAでは休止気筒が連続的に変化するた めに、こうした作用は見られない。

#### まとめ

気筒休止は、エンジンの燃料消費量を低減し、しいてはNEDC(New European Driving Cycle)などのテストサイクルによる測定や、実際の走行時に実施する測定でのCO2排出量削減に対する効果的な方法として登場した。した。この目標を実現するため、点火・噴射シーケンスを停止させることにより、低負荷レベルでのエンジン稼働中に一つまたは複数のシリンダーを休止させる。



12 Measurement results: Intake manifold pressure and indicated mean effective pressure for different operating strategies







Base (without UniAir, without CDA) CDA with UniAir: Base static rolling

14 Measurement results of raw engine-out particulate emissions in steady-state deactivation mode

Base (without UniAir, without CDA) CDA with UniAir: Base static

13 Measurement results of gaseous untreated emissions and O<sub>2</sub> concentration levels

その休止ポイントで、休止していないシリン ダーの負荷点をシフトさせることにより燃料 消費量低減の可能性が生まれる。この製品投 入がすでに成果を収めていることから、市場 では今後、この技術を搭載した3気筒エンジ ンの数が増加するものと見ている。ただし、 このパワートレインには、基本 0.5 次の振 動成分が発生してしまうという懸念点があ る。この振動成分をほかのドライブトレイン から切り離す適切な方法の一つとして、シェ フラーはデュアルマスフライホイールと遠心 振り子ダンパーの組み合わせを提案した。

本稿で取り上げている、一定間隔でのシリン ダーの個別休止を含めたローリング方式の 採用によって、基本的な発生振動成分を 0.5 次の次数からより管理に適した 0.75 次の次数へとシフトさせることが可能であ る。デュアルマスフライホイールと遠心振 り子ダンパーによって構成される、適切な ダンパー技術を導入すれば、NVH性能を さらに向上することができる。個々のシリ ンダーの休止率は、CDAの33%に対して、 R-CDA では 50% まで増加する。R-CDA による高い気筒休止率によって、トルクと 平均圧力レベルが低下するが、エンジン性 能マップの負荷領域をシフトすることでリ カバリーが可能となり、さらに燃料消費量 が低減できる可能性がある。

コンセプトを実際に実現するため、シェフ ラーではシミュレーションを行い、新気お よび残留ガスの閉じ込めや負圧閉じ込めを 含めた R-CDA における三種類の動作方式 を解析した。計算の結果、その中で負圧閉 じ込めが最も優れる方式であることが明ら かとなり、これが、燃焼試験のための指針 となった。その燃焼試験には、量産型3気 筒エンジンをベースエンジンとして使用し、 R-CDA機能を搭載するためこれに大幅な変 更を加えた。具体的には、吸気側にUniAir システムを、排気側に切替式タペットシス テムを搭載し、またタイミングベルトドラ イブの再設計なども行った。総合的な測定 機器を用いて試験を行い、エンジンの動 作パラメータを定量化した。試験結果を R-CDA に関するシミュレーション計算と比 較したところ、定性的ならびに定量的観点 の両方から、推定通りの燃料消費量低減が

検証された[2]。実際のエンジン稼働にお いては、R-CDA によるシリンダー休止率 が高くなった場合も同様に、燃焼シリン ダーの負荷点がより高い出力レベルにシフ トされ、低 - 中負荷/低 - 中回転数範囲に おいては15%~20%と、大幅な燃料消費 量低減を実現できた。エミッションに関し ていえば、気筒休止後最初の燃焼が特に重 要であり、ブーツリフトと呼ばれる手法で これに対処した。この過程では、残留ガス が気筒休止前の段階では吸気ダクト内に留 められ、その後に続く燃焼サイクルの吸気 行程中に、新気とともに燃焼室に入る。こ の方法では、R-CDA モードで必要な残留 ガス制御を行って、混合気形成を最適化し 燃焼を安定化させることも容易となる。結 果として、R-CDA におけるエミッション は、ベースエンジンと比較しても全体とし て問題ないレベルであった。

# Literature

- [1] Faust, H.: Drive Systems of the Future. 10. Schaeffler Kolloquium, 2014
- [2] Scheidt, M.; Brands, Ch.; Lang, M.; Kuhl, J.; Günther, M.; Medicke, M.; Vogler, C.: Static and Dynamic Cylinder Deactivation on 4-Cylinder and 3-Cylinder Engines. International Engine Congress, Baden-Baden, 2015
- [3] Schamel, A.; Scheidt, M.; Weber, C.; Faust,
   H.: Cylinder Deactivation for Turbocharged
   3-Cylinder Engines Feasible and Practical?
   36<sup>th</sup> International Vienna Motor Symposium,
   2015





New Concepts for Switchable Roller



#### はじめに

エミッション・燃費の観点から、リフト切替 式可変バルブトレインはガソリンエンジン のアプリケーションとして長年にわたり広 く利用されている。当初は大排気量のガソリ ンエンジンの気筒休止用に採用されていた が、近年これらの可変動弁技術は大きな広が りを見せている [1]。吸気バルブ早閉じ(以 下 EIVC) や吸気バルブ遅閉じ(以下 LIVC) などのカムプロファイル切替による吸気側の デスロットリングに注目が集まる一方、気筒 休止コンセプトがシリンダー数の少ない小排 気量エンジンにも適用されはじめている(図 2018 年初頭、気筒休止機能を備えた初 の3気筒エンジンの量産が開始され[2]、そ のほかのアプリケーションでも開発が進んで いる。切替式ローラーフィンガーフォロワー (Switchable Roller Finger Follower (以下 SRFF)) は、カムプロファイル切替に よる二段階のバルブリフト、フルリフトから

ゼロリフトへの切替による気筒休止が可能で ある。切替式ローラーフィンガーフォロワー は、ほかの可変バルブトレインシステムに比 べてころがり接触による摩擦損失低減が可能 である。

近年、ディーゼルエンジン向けに切替式バル ブトレインが採用されてきている。ディーゼ ルエンジンの排気側に切替式ローラーフィ ンガーフォロワーを使用することで、内部 EGR効果による低温スタート時の燃焼安定 性が向上する。また、排気側の昇温効果によ り排気ガス後処理装置が作用するまでの時間 を最小限に抑えることが可能である。さらに、 エンジンの過渡運転における内部 EGR 効果 が瞬時に得られるため、実走行中のダイナ ミックな状況変化の下でもエミッション低減 効果が期待できる。本稿では、切替式ローラー フィンガーフォロワーのガソリンエンジン・ ディーゼルエンジンへの適用と最新動向につ いて紹介する。



1 Product launch of gasoline engines with cylinder deactivation



2 Switchable roller finger followers on an early generation (left) and on the current generation (right) for gasoline engines

# ガソリンエンジン用切替式 ローラーフィンガーフォロワーの開発

過去 20 年におけるガソリンエンジンに適 用されてきた可変バルブトレインは、経済 状況、規制対応などの環境要件により変化 してきた。また、システムの技術的進歩、 特に制御性と切替速度の向上もこの流れに 影響をおよぼしている。シェフラーはこれ まで長年にわたって、ガソリンエンジン用 切替式ローラーフィンガーフォロワーのコ ンセプト開発を推進し、さまざまな要求事 項に適応してきた。その開発プロセスにお いては、主に三つの重要な要求事項が挙げ られる。

- 慣性モーメントの低減
- 搭載スペースの最小化
- 摩擦損失の低減

切替式ローラーフィンガーフォロワーの設 計開発の中でこれら要求事項を満足するべ く、さまざまな改良と最適化が行われた。 図2に、開発初期のデザインと現行デザイ ンの比較を示す。 効果が実証されている油圧作動の基本原理 は維持しつつ実施された改良と最適化の内 容を以下に示す。

- ロストモーションスプリング位置をバルブ側 からピボット側に変更することで、ピボット 周りの慣性モーメントが大幅に低減。これによ り、バルブ停止時のカムベースサークル上のス プリングによるサポートが不要となり、ロスト モーション時にベースサークルが接触するサ ポートカムが廃止でき、標準的なカムシャフト の採用が可能。
- ベースサークル上での接触をなくすことにより、摺動面のフリクションを低減。
- プライマリレバー(外側ハウジング)の製造 を精密鋳造法から金属射出成形(MIM)法に変 更。これにより機械加工工程を最小限にするこ とが可能。
- 設計の最適化により、セカンダリレバー(内側 ハウジング)の板金プレス成形による低コスト 化を実現。

量産実績の多い従来型のローラーフィンガー フォロワーと切替式ローラーフィンガーフォ ロワーを比較すると、切替式ローラーフィン ガーフォロワーでは慣性モーメントが大きく、



3 Relationship between additional expense and fuel savings of switchable finger followers (turquoise) and cam shifting system (light blue) for different vehicle segments

より大きな取付けスペースが必要になるも のの、その採用によるメリットは大きい。 一方で、従来型のローラーフィンガーフォ ロワーおよび切替式ローラーフィンガー フォロワーの慣性モーメントと全長は、と もにフィンガーフォロワー自体の設計だけ ではなく、シリンダーヘッドの設計からの 影響も受けるが、シェフラーは現在、切替 式フィンガーフォロワーのさらなる小型軽 量化に向けて、複数の開発プロジェクトを 進めている。

低 - 中排気量のガソリンエンジンでは、吸 排気バルブを休止させる気筒休止システム と、EIVC および LIVC によるデスロット リングコンセプトは競合関係にある。どの コンセプトを選択するかは、燃費改善の効 果代だけでなく、構成部品のコストによっ ても左右される。また、関連するすべての 規制に適合しながらも、異なる車両クラス に搭載できるだけの汎用性を備える必要が ある。そのため、シェフラーは開発サービ スプロバイダーと協力して、量産向け可変 バルブトレインを用いたさまざまな切替方 式の費用対効果について分析した。この検 討では、切替式ローラーフィンガーフォロ ワーとカムシフティングシステム(以下 CSS)を搭載したシステムの燃費効果につ いてシミュレーションを行い、エンジンへ 搭載する際の追加費用についても試算した (図 3)。

#### 検討の結果、二つのコンセプト(EIVC / LIVC と気筒休止)を比較し、気筒休止コ ンセプトはより燃費効果があり、CSS に対 して切替式ローラーフィンガーフォロワー を使用した場合は搭載コストが抑えられる ことがわかった。一方で、切替式ローラー



4 The innovative twin-pallet design allows two valves to be actuated using just one switchable finger follower

フィンガーフォロワーを EIVC / LIVC コ ンセプトに用いる場合、カムシャフト製造 の複雑さと摺動接触面へのコーティング追 加の二つの大きな要因により費用を押し上 げている。また、EIVC / LIVC コンセプ トの場合は、切替式ローラーフィンガー フォロワーと CSS を比較すると、燃費効 果、費用ともにほぼ同等レベルである。

前述したように、気筒休止システムは、低 燃費および低 CO<sub>2</sub>排出量という特長を備え たダウンサイジングエンジンにも広まるこ とが予想される。シェフラーでは現在、こ うした用途に向けて低コストでパッケージ 性を重視したツインパレットデザインの開 発を進めている (図 4)。

これは二つのバルブパレットを備えた Y字 型レバー構造をしており、シリンダーの吸 気バルブもしくは排気バルブニ本を同時に 作動させる。この構造により、各バルブに 必要なカムロブを一つにすることが可能で ある。そのため、ツインパレットを備えた 切替式ローラーフィンガーフォロワーは、 長手方向のスペースを最小限に抑えること ができ、シリンダーヘッドへの組み込みが 容易になる。当初の試算では、ツインパレッ トデザインを搭載した気筒休止システムに おいて、同レベルの機能性を維持しながら も約25%のコスト削減が可能である。

# シェフラー製 eRocker システム

CSSはコスト面で確かに不利であるが、電 気機械方式には一つのメリットがある。油 圧切替式システムの場合、切替のための特 別な油回路を設計する必要があるが、電気 機械式切替システムでは油圧系を大きく変 更することなく採用することが可能であ る。近年のエンジンコンセプトでは、機械 損失を減らすために油圧をできる限り抑え る必要があり、これは油圧式切替システム 概式システムでは、システム全体の最適化 に必要となる油圧系の試験と解析を大削減 が可能となる。

そのためシェフラーでは、すでに経験のあ る油圧式システムのコスト優位性を可能な 限り取り込んで、電気メカニカル式フィン ガーフォロワーシステムを開発している。 具体的には、個々にアクチュエータを配置 したり、コントロールシャフトのような伝 達要素を使用したりするのではなく、一つ のアクチュエータによってシステムを制御 する方式を用いている。

電気メカニカル方式を備えた切替式ロー ラーフィンガーフォロワーシステムの全体 像について、図5に示す。写真は、2番お よび3番気筒にバルブ休止機能を備えた一 般的なレイアウトの直列4気筒エンジンで ある。

シリンダーヘッド内に電気メカニカル式ロー ラーフィンガーフォロワーを組み込む場合、 そのレイアウトは油圧式システムと基本的に 同じである。作動方法としては、板金製の スライダーバーの動きがスプリングアームを



5 Overall design of the eRocker System with roller finger followers switched by electromechanical actuation

介してローラーフィンガーフォロワーに伝達 され、アウターレバー内の切替ピンを動かす。 このピンはロック機構の切替を行い、内部の シャトルピン機構を介してインナーレバーと アウターレバーの連結を解除する。この一連 の動作により、バルブリフトが休止する。リ ニアストロークソレノイドであるアクチュ エータ(図内右、青色)はシリンダーヘッド に取り付けられる。

このようなシステムを開発する際の課題 は、切替式フィンガーフォロワーの切替ピ ンが、いつでも自由に動かせるわけではな いということである。例えば、ロストモー ション中やバルブリフト時である。

油圧作動式システムの場合、動きはシンプ ルで、油圧に依存している。切替ピンがふ たたび自在に動ける状態になると、油圧に よってロックもしくは解除の状態となる。 イドまたは機械部品により直接作動させる ためには、精巧で高価なアクチュエータ システムが必要になるため、スプリング アームを介して作動させる方法を開発し た。スプリングアームはリーフスプリング 構造をしており、スライダーバーを介して アクチュエータの動きを切替式フィンガー フォロワーに伝達する。バルブリフト時に はスライダーバーを動かしても作動ピンが ブロックされているため、エネルギーはス プリングアームのたわみにより蓄積される (図6左)。バルブリフト終了後に作動ピ ンのブロックが解除されると、インナーレ バーとアウターレバーの連結が解除されバ ルブ休止モードとなる(図6右)。

電気メカニカル式システムの場合、ソレノ

このシステムのさらなる利点は、切替ピン をスプリングアームによって作動させるた め、シリンダーヘッド内でスライダーバーの 位置を自由に配置できるということであ る。スプリングアームの長さや断面積を変 えながら設計することにより、搭載上の制 約条件やシリンダーヘッドの構造に応じ て、スプリングアームと切替式フィンガー フォロワーの距離を自由に設定することが 可能となる。

eRockerシステムには、前述したツイン パレットデザインと組み合わせることも可 能である。この結果として生じるコスト削 減は、油圧部品からの置き換えに関連する 追加コストを上回る。

# ディーゼルエンジン用切替式 フィンガーフォロワー

ディーゼルエンジンへの切替式可変バルブ トレインの導入は、最新技術が投入される ガソリンエンジンよりも遅れて投入された。 ディーゼルエンジンは原則として過剰空燃 比で運転するため、吸気サイクルのデスロッ トリングによる CO<sub>2</sub> 排出量と燃量消費量低 減の可能性はない。むしろ、排気温度管理 や有効圧縮比の最適化に重点が置かれてい る。初期のディーゼルエンジンへの導入例 としては、三菱自動車で導入された切替式 ロッカーアームシステム[3]である。これ に続いて登場したのは、シェフラー製切替 式ローラーフィンガーフォロワーが搭載さ れた、マツダのSKYACTIVディーゼルエン ジン[4]の例が挙げられる。このコンセプ トでは、セカンダリ排気バルブリフト(以 下 SEVL)により、内部 EGR を実現してい る。このディーゼルエンジンでは圧縮比が 14:1と非常に低いため、低温条件におい て燃焼室温度を上昇させて燃焼を安定させ るのが鍵となる。

新たなエミッション規制の登場が、ディーゼ ルエンジン向け切替式可変バルブトレインコ ンセプトの開発をさらに促している。RDE (Real Driving Emissions Test) では公 道走行でのエミッションが評価され、また WLTC (Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Cycle) により運転走 行条件の範囲が大幅に増加した。RDE および



6 Actuator/slider bar motion with blocked locking pin via spring arm (left) and position after displacement (valve deactivated, right); locking mechanism partially cut away



7 Switching strategies for the variable valve train in a diesel engine

WLTCの導入により、エンジンの過渡運転に おける負荷条件の変化に対してエミッション を最適化させることへの要求が高まってい る。こうした背景から、燃焼を最適化するた め数多くの新しいオプションとして切替式可 変バルブトレインが実用化された。ただし、 このようなシステムはエンジン単独で最適化 するのではなく、パワートレインに組み込ま れた際に効率的に動作することに留意する必 要がある。

図7に、異なる運転点において切替式ロー ラーフィンガーフォロワーによる、ディーゼ ルエンジン用可変バルブトレインの適用範囲 と切替コンセプトを示す。

主な適用例として、排気バルブリフトの二 度開きにより内部 EGR を可能にし、低温 始動時に排気温度を上昇させることで排気 後処理部品の暖気を加速させることが挙 げられる。排気ガスを排気管から吸気管 に戻す外部 EGR システムとは異なり、内 部 EGR システムは、排気ガスの一部を 直接燃焼室に再循環させる。これにより、内 部 EGR システムは、燃焼安定化および早期 暖気に加えて、過渡運転条件下で目標 EGR 率に迅速に反応することが可能である。

シェフラーによるディーゼルエンジン向け切 替式ローラーフィンガーフォロワーの第1世 代では、カムとの接触部に、プライマリレバー にはスライダーパッド、セカンダリレバーに は転がり軸受が設定されている(図8)。

この構成では、メイン排気バルブリフトが スライダーパッドを介し、セカンダリバ ルブリフトは転がり軸受を介して行われ る。その結果、メイン排気バルブリフト中 にスライダーパッドとカムロブのすべり接 触による摩擦損失が発生する。そのため シェフラーでは、ディーゼルエンジン用の 切替式ローラーフィンガーフォロワー第2 世代において、その構成を逆転させた。メ インリフトの伝達に使われているプライマ リレバーを内側に配置することで転がり 軸受が設定でき、摩擦損失が低減できた。



8 Improved switchable roller finger followers for diesel engines from Schaeffler

また、セカンダリリフト用のセカンダリレ バーは外側に配置され、スライダーパッドが 設けられている。セカンダリレバーは、コ スト削減のため板金プレス成形で製造され ている。また、スライダーパッドへのDLC (Diamond Like Carbon) コーティングが 不要な、低コストコンセプトの可能性につい ても検討を行っている。 ハンドオーバーリフトなしでの切替ではバル ブストローク高さに制限があったため、セカ ンダリリフトを遅らせる必要があった。図 10 左から見て取れるように、遅延させた二 度目の排気バルブを開くことにより、吸気サ イクル中にパルセーションが発生し、吸気管 に排気が逆流する原因となっている。

このローラーフィンガーフォロワーコンセプ トを eRocker システムにも適用できるよう にした(図9)。その場合でも、スプリング アーム付きスライダーバーやアクチュエータ など、ほかのシステム部品については流用が 可能である。

セカンダリバルブリフトを使用する自由度 も広がると考える。セカンダリリフトは従 来、メインバルブリフトフェーズの完了後に 限って実現可能であった。現在では、メイ ン-セカンダリバルブリフトが重なり合うハ ンドオーバーリフトによって、いわゆる中間 リフトフェーズの追加が可能となっている。



9 eRocker System for secondary exhaust valve lift (SEVL) application in a diesel engine



**10** Intake backflow (left) and transfer of contact from main to secondary lift (right)

吸気管が排気残留物で汚染されないよう、こ のような現象は避けるべきである。脈動によ り吸気管内で生じる振動は、ノイズなどを引 き起こす可能性もある。ハンドオーバーリフ ト機能のある切替式フィンガーフォロワー を使用する場合は、メイン排気バルブリフト の閉じ行程で、セカンダリレバーにより再度 排気バルブをリフトさせる。つまり、バルブ リフト中のカムロブとの接触相手が転がり 軸受からスライダーパッドへと切替る。部品 の損傷を確実に防止するために、ハンドオー バーリフト時にはある所定の速度差以下で メインレバーからセカンダリレバーに伝達 させることが必須となる(図10右)。

ハンドオーバーリフトの切替位置では、ピ ストンが TDC に到達したとき、エンジンバ ルブ・ピストンの接触を防ぐため排気バル ブはほぼ完全に閉じられる。図 10 (左)に 示すように TDC 通過後にセカンダリバル ブを即座に開くことで圧力変動が発生しな いだけでなく、吸気バルブから排気バルブ への空気質量流量が非常に安定する結果と なっている。図 10 (左)で示した 4mm リフト高さのセカンダリバルブリフトカー ブは、ハンドオーバーリフトなしの標準的 なセカンダリリフトより遅いタイミングで 閉じる設定であったが、吸気管への逆流が 起こらない結果となった。このグラフから 見られるように、ある所定の条件において は高い EGR 率をもたらすことで、低い NO<sub>x</sub> 排出量を実現できる。

差圧は EGR 率に大きく影響するものである が、エンジンの種類によっても異なり、主 としてエンジンの全体構成(4気筒または6 気筒など)や、吸排気管の設計、使用され るターボ過給システムなどによって変化す ると考えられる。また、可変ターボチャー ジャーの場合はガイドベーンの角度変更な どや、外部 EGR システムの制御によく用い られている排気管内のフラップを介して変 化する可能性があると考える。

ただし、セカンダリリフトカーブを一つだ け用いる場合、より多くの新気が必要な状 況においては、低負荷域は高 EGR 率(温度 を大幅に上昇させるため)となる一方で、 高負荷域では限定されてしまう。このよう な制約により、セカンダリリフトが比較的 低負荷で休止する可能性があるため、EGR を従来の外部 EGR システムによって作動さ せることが必要となる。連続可変式、また は多段式のセカンダリリフト切替機能を利 用することで、このような制約は回避でき ると考える[5]。 後者は、各シリンダーに独立した二つの切 替式フィンガーフォロワーを設けることで 実現できる。両方の切替エレメントで異な るセカンダリバルブリフトを利用できるた め、何通りもの空気質量流量と EGR 率を実 現できる。

ーつ目の排気バルブ(以下 EX1)でセカン ダリのリフト量を大きくし、二つ目のバルブ (以下 EX2)でセカンダリリフト量を小さく する設定も可能である。EX1バルブのセカ ンダリリフトだけを休止する場合、EGR 率 は低くなる(図 11 ステージ 2)。EX1バル ブだけを作動させると、逆流率は中程度にな る(図 11 ステージ 3)。両方のセカンダリ リフトカーブを同時に作動させた場合、セカ ンダリリフト内の最大排気ガス量を燃焼室 に戻すことができる(図 11 ステージ 4)。

すべてのシリンダーの EX1 / EX2 バルブ と連結する、並行した二本のスライダーバー を用いることにより、両方のバルブで独立 した切替が実現可能となる。これらスライ ダーバーは、ニピン式アクチュエータによっ てそれぞれ独立して作動することが可能で ある。

シェフラーは油圧作動式システムに対して も、同様の機能を開発している[6]。適用に あたってはシリンダーヘッド内の複雑な油 回路設計が必要となる。

# eRocker システムの試験 一 初期試験結果

図 12 に示すように、量産型 3 気筒エンジ ンの排気側に eRocker システムを搭載し 試験を実施した。なお、アクチュエータは シリンダーヘッド外側に取り付けている。

eRockerシステムと二つの油圧式切替シ ステムにおいて、切替ピン作動時間の測定 および、比較を行った(図13)。



11 Multi-mode switching concept via the e-rocker system



SRFF Slider
 12 Multi-mode switching concept

Actuator

油圧式システムでは、予想通り低温領域に おいて、切替時間が長くなることが明確に 見て取れる。温度の低下によりオイルの粘 性抵抗が増加、また圧力上昇が緩やかにな るため、切替機構の作動までにより多くの 時間がかかると考えられる。図13の油圧 アプリケーション1および2と比較した 場合においても明らかであるように、この ような性能低下の度合いはシステム全体の 設計(利用可能な油圧の大きさ、油回路の 長さ/直径など)によって異なる。ここ での例における、アプリケーション2は

直列 6 気筒エンジンである。包括的なシス テムの最適化を行ったとしても、油回路長 さなど一般的な設計上の制約があるため、 さらなる切替時間の改善は困難である。

eRockerシステムでも同様に、システム 内の機械部品がオイルと接触することで摩 擦力が発生し、これによってアクチュエー タの作動力が小さくなるため、低温での切 替時間がより長くなる。理論的には、アク チュエータの作動力を上げることにより、 解決することが可能である。



Hydraulic Application 1 Hydraulic Application 2 eRocker System



14 Variation in switching time

切替時間については、ECU から早めに切替 信号を出すことで補正できるが、ここで問 題となるのはむしろ、切替時間が安定せず にばらついてしまうことであり、電気機械 式システムに比べて油圧式システムではこ の点でさらに不利となる (図14)。この影 響により、ローラーフィンガーフォロワー システムが個々の燃焼サイクルにあわせて 切替を行うかどうか、ECUでは予測不可能 となる状況が生じる。これは、「サイクル 選択切替」または「サイクル非選択切替」 と呼ばれる。eRockerシステムでは切替 性能の変動が少ないため、サイクル選択切 替については回転数および温度の範囲が大 幅に広がるとともに、予測不可能な切替状 況を回避することもできる。目標とする切 替時間の変動を最大12msとして、4気筒 エンジンでは 2,500rpm の回転数に到達 するまで、理論上ではセカンダリリフトに よるサイクル切替を実現できる。これは、 セカンダリリフト用途の一般的な要求仕様 を満たしている。2,500rpm を超える回 転数では、個々の燃焼サイクルにあわせて 切替を行うことが困難となる。

油圧切替式ローラーフィンガーフォロワー を適用するには、切替時間の長さやばらつ きを許容する必要があるが、油圧やオイル の粘度特性、さらには、油圧によるバルブ ラッシュ調整などの観点から、複雑で最適 化が難しいものになる。このような難しさ も、eRockerシステムならば回避できる。

# まとめ

シェフラーはこれまで20年近くにわたっ て、可変バルブトレイン用部品の開発・製造 を手がけてきた。近年では、特にガソリンエ ンジンの気筒休止システムでの使用におい て、切替式ローラーフィンガーフォロワーが 機能的かつコスト効率に優れたソリューショ ンであることが証明されている。シェフラー は設計の継続的な改善をつうじて、システム の進化と最適化を進めるべく努力している。 試験結果が示しているように、切替式ロー ラーフィンガーフォロワーは、ほかのより高 価なシステムと直接比較しても、非常に優れ た性能を発揮する。吸気バルブニつ、または

<sup>13</sup> Switching time for interlocking SEVL systems in relation to oil temperature and internal engine constraints

排気バルブニつを同時に作動させることの できる、Y字型のツインパレット型切替式 ローラーフィンガーフォロワーにより、気 筒休止向けの非常にコンパクトかつコスト 効率の高い手段を提供している。シェフラー は、ディーゼルアプリケーションにおける SEVLや気筒休止およびカムプロファイル切 替の用途に、油圧および電気機械方式の可 変バルブトレインシステムを開発している。 eRockerシステムは、エンジンの油回路に 影響をおよぼすことがなく、それゆえ比較的 搭載が容易なプラグアンドプレイソリュー ションとして設計されている。一方で大排気 量のアプリケーションにおいては、依然とし て油圧式システムが採用されている。

エミッションに関する規制が強化されるこ とにより、ディーゼルエンジンの高効率化お よび NO<sub>x</sub> 低減のため、高い内部 EGR 率が燃 焼システムに求められている。それを実現す るための方策として、排気バルブにセカンダ リバルブリフトを用いる可変バルブトレイ ンに注目が集まっている。さらに、ハンド オーバーリフト機能を組み込むことによっ て、特定のエンジン運転条件にあわせてセカ ンダリリフトのタイミングを設定し、エミッ ションや NVH に対してさらなるメリットを 得ることができる。二つの排気バルブに異な るセカンダリリフトを設け、切替えによりそ れらを組み合わせることで、内部 EGR 制御 の自由度を向上させている。この構成は、油 圧切替式よりもエンジンまわりへの変更が 少なく導入が容易な eRocker システムに適 している。

SEVL機能を備えた量産型の3気筒ディーゼ ルエンジンにおいて、eRockerシステムは 切替機能と適用のしやすさを実現している。 このほか、2018年上半期にはガソリンエン ジンへの気筒休止導入を、また下半期には、 ディーゼルエンジンにおける二つの排気バ ルブの個別切替などへの開発適用を予定し ている。

# Literature

- Ihlemann, A.; Nitz, N.: Cylinder Deactivation

   A Technology with a Future or a Niche Application? 10. Schaeffler Kolloquium, 2014
- [2] Press release from Ford Werke AG: World premiere: Ford fits the EcoBoost three-cylinder engine with fuel-saving cylinder deactivation. (http://www.presseportal.de/pm/6955/3497442)
- [3] Mitsubishi press release: The 4N13 1.8 liter/4N14 2.2-liter diesel engines realize low fuel consumption, low emissions, and low combustion noise for the European market. (www.mitsubishi-motors-com)
- [4] Terazawa, Y.; Nakai, E.; Kataoka, M.; Sakono,
   T.: The new Mazda four-cylinder diesel engine. In: MTZ 72 (2011), No. 9
- [5] Brauer, M.; Pohlke, R.; Berndt, R.; Manns, J.; Elicker, M.; Brands, C.; Scheidt, M.: Variable valve train in diesel engines as key technology for compliance with future emission limits and further downsizing, SIA Magazine Ingénieurs de l'automobile no. 884 (11/2016) and SIA Powertrain Conference 2016, Rouen, France, 07/2016
- [6] Himsel, F.; Christgen, W.; Schmidt, V.: Valve Train Trends – Variability for Future Gasoline and Diesel Engine Applications. VDI conference on valve train and cylinder head technology, Würzburg, 2017





# Breakthrough of Rollerized Crank Shafts

Dr. Frank Schlerege

#### はじめに

内燃機関は今後も重要な役割を担い続ける と考えられていることから、エンジンが現 在直面している課題が近い将来なくなるこ とはないであろう。具体的にいうと、CO。 排出量を削減するために、摩擦損失は最小 限に抑えることが不可欠で、今後もエンジ ンの最適化にとって重要な手段であり続け ると考えられている。この課題を解決する ための一つの方策としては、エンジン排気 量を低減させる、いわゆるダウンサイジン グのコンセプトがある。しかしながら、こ の方法を軸受としての視点で見た場合、結 果として軸受にかかる負荷が大きくなる。 また必要に応じてエンジンを停止させるス タート/ストップ機構も、エンジンのすべ り軸受における摩擦損失を増大させる。P0 タイプのハイブリッドでは、スタータジェ

ネレータがベルト ドライブに組み込 まれており、始動 時とセーリング時 に内燃機関をアシ ストする。発生す るベルト張力は大 幅に高まる場合が あり、また頻繁に 行われる始動がこ れと相まって、第1 クランクシャフト 軸受にかかる負荷 はさらに増大する。 これによりエンジ ン内のすべり軸受 の摩擦が増加し、 さらに軸受の摩耗 リスクは高まる。

こうした条件下に おいて、エンジン 内のすべり軸受 を転がり軸受に 置き換えることは興味深い選択肢となって いる[2]。シェフラーは包括的な先行開発 や、多くのアプリケーションで試験を実施 し、その実現のための基礎固めを行ってき た。その結果、開発の一つの方向性として、 乗用車用エンジンのクランクシャフトに転 がり軸受を適用する新たなアプローチを開 始した。シェフラーは、フォード社と協力 してクランクシャフト用転がり軸受に関す る技術課題と、1.0 リッター3気筒ガソリ ンエンジンにおけるメリットを詳しく調査 する開発プロジェクトを実施した。

# 内燃機関におけるトライボロジー

流体すべり軸受は、内燃機関のさまざまな場 所で使われている。摩擦係数と全体の摩擦レ ベルは、相対すべり速度、負荷、潤滑剤の



1 Stribeck curve with static friction, mixed friction and viscous friction.

粘度によって左右される。図1のストライ ベック曲線が示すように、流体すべり軸受 は稼働条件により、境界摩擦(または静止 摩擦)、混合摩擦、流体摩擦という三種類 の摩擦形態がある。これら三種類の摩擦は、 それぞれ異なる物理法則を特徴としており、 いずれも個別に最適化することが可能であ る。

影響力の大きい項目としては、次のような ものがある。

- 静止/境界摩擦:表面粗さ、表面処理、コーティング
- 混合摩擦:表面粗さ、表面処理、添加材(粘度)、 コーティング、表面形状
- 流体摩擦:オイル粘度、運転温度、添加物(剪 断速度または粘度)、表面形状、オイル量

摩擦損失を低減させる一つの方法として、 低粘度潤滑剤の使用が挙げられる。現在は 0W16、0W12、0W8というグレードの オイル (SAE J300) [1]が市販されてい る。ただし、これら極低粘度オイルによっ て、剪断損失ひいてはパワー損失は大幅に 低減される一方、エンジン運転中の混合摩 擦は増大する。トライボロジーに基づく開 発アプローチではこの作用に焦点を当て、 摩耗を抑制し高い混合摩擦レベルに対応し ながらも、摩擦損失を最小限に抑えること を目指すことになる。考えられる方策とし ては、摩耗・摩擦低減効果のある表面コー ティング処理、前処理の実施(輪郭形状、 粗さ)、高添加潤滑剤の使用などがあげら れる。

摩擦低減に向けた一般的な設計手段として は、等価質量を最適化して荷重レベルを下 げ、接触部のすべり軸受を転がり軸受に置 き換える手法がある。図2に、3気筒テス トエンジンのエンジンブロック内で円筒こ ろ軸受を使用した場合と、すべり軸受を使 用した場合の摩擦係数の差異を示す。すべ ての負荷点において、転がり軸受の摩擦係 数がすべり軸受よりも小さく、負荷が上が るにつれてさらに低減していることがわか る。

# 内燃機関における転がり軸受

現在内燃機関では、補機ベルトプーリーおよ びテンショナープーリー、ウォーターポンプ 軸受、カムシャフトおよびバランサシャフト、

**Rolling Bearing Friction** 

• Lubricant film squeezing

• Hysteresis due to damping

capacity of rolling element

Sliding friction with shearing

and churning of the oil film

within the EHL contact

and race material



2 Comparison of friction between a cylindrical roller bearing and a plain bearing.

ターボチャージャー、ローラーフィンガー フォロワーなどに転がり軸受が使われている (図3)。オートバイやスノーモービル、船 外機や水上オートバイではすでに転がり軸 受が普及しているが、乗用車および商用車用 エンジンのクランクシャフトでは現在もす べり軸受が使われ続けている。1950年代 までは、乗用車用エンジンや航空機用エンジ ンのクランクシャフトに転がり軸受が使用 されていたが、その後すべり軸受が使われる ようになった。クランクシャフト用すべり軸 受がきわめてコスト効率に優れ、取り付けが 簡単で、ロバスト性が高いことがその理由で ある。現在完成車メーカーやすべり軸受メー カーでは、摩擦、摩耗、オイル供給など動的 状態における軸受の挙動に関して膨大な経 験を有している。一方、転がり軸受ではクラ ンクシャフトへの取り付けがより難しいと いう課題がある。例えば過去には、組み込み 型クランクシャフトが使われたこともあっ たが、製造や組み立ての観点から、現在の量 産用途においてこのコンセプトは非常に高 コストとなる。シェフラーはここ数年、さま ざまな軸受構造の長所・短所の見極めに力 を注いでいる。スプリットアウターリング、 ケージ付き転がり軸受をクランクシャフト に直接取り付けるなどの技術開発を行って いる。

シェフラーが、乗用車エンジンのクランク シャフト用転がり軸受について研究してい る理由の一つは CO<sub>2</sub> 排出削減である。もう 一つは、スタート/ストップ機構および低 速・高負荷条件時に性能向上が見込めるとい う点である。完成車メーカーとシェフラーに よる調査結果が示しているように、エンジン 設計に手を加えることなく、単純にすべり軸 受を転がり軸受に置き換えるだけでは不十 分である。エンジン全体の検証のなかで、す べり軸受、転がり軸受の最適化を行い、ノイ ズレベルの悪化などを避け、転がり軸受によ る CO<sub>2</sub> 排出量削減の可能性を最大限に引き 出す必要がある。

これこそが、シェフラーがフォード社と1.0 リッター3気筒ガソリンエンジンをベース にクランクシャフト用転がり軸受を搭載し た共同研究プロジェクトを行った所以であ る[3]。本プロジェクトではNVH性能の定 量化に加えて、エンジンマップ上のさまざ まな作動点において、どのような項目を改 善できるか特定することも目標とした。一 般的には、転がり軸受を使うにあたって、3 気筒エンジンは非常にハードルの高い対象 である。クランクシャフトには軸受が四つ しかないという理由から、転がり軸受を使 用する意義は決して大きく感じられない。



3 The use of rolling bearings instead of plain bearings has proven successful in different applications.



4 Self-contained development process for designing crankshaft bearings.

本検証では、すべての軸受部に転がり軸受 を使用した構成、転がり軸受とすべり軸受 を併用した構成など、考え得る組み合わせ のすべてについて評価を行った。さらに組 み立て工数や、コンロッドおよびすべり軸 受へのオイル供給といった基準も評価に織 り込んだ。

#### 開発手法

軸受の摩擦と摩耗を低減させるパラメータ を特定し、最適なソリューションを決定する ため、開発段階で複雑なシミュレーション や試験手法が必要となる。高度なシミュレー ションは長い計算時間とコストを必要とす るが、実用的な結果を得るためには、軸受点 における境界条件をできる限り正確に把握 しておく必要がある。さらにはシステム全 体の制約事項(運転条件、周辺環境、電動化、 スタート/ストップ機構、燃料)が結果に 大きく影響をおよぼすため、これについても 考慮が必要となる。さらに設計的な要素だ けでなく、高精度な軸受形状の機械加工、 前処理など、製造に関する側面もまた重要 である。クランクシャフトへの転がり軸受 適用に用いた開発手法は、おおよそ研究的 なアプローチをとっている(図4)。クラン クシャフトの転がり軸受部を設計するにあ たっては、マルチボディシミュレーション モデル(以下 MBSモデル)と、弾性流体 潤滑の特性に関する計算、そしてシェフラー が開発した軸受シミュレーションソフト ウェア BEARINXを使用し、関連するすべ てのパラメータの検討・特定を行った。対 象としたパラメータには、以下のようなも のがある。

- 慣性力および回転力の1次、2次成分
- 完全弾性変形のクランクシャフト
- 転がり軸受およびすべり軸受の反作用ト ルクおよび反力
- クランクシャフトの変形と軸受反作用ト ルクとの相互作用
- 転がり軸受とすべり軸受との相互作用

BEARINX の軸受分析で、以下の結果を定 量的に算出することが可能である。

- 軸受内部の負荷分散
- オフセットおよびティルティング
- ころおよび内輪の変形
- 各部応力
- ISO / TS 16281 に基づく推定耐用年数

開発プロセスは、用途に適した転がり軸 受を選定することから始まる。続いて、 BEARINX を 使 用 し て 軸 受 の 非 線 形 剛 性 マップを作成する。これは、オフセットや たわみ荷重に対する軸受の状態を予測する 際の基準となる。BEARINX は個々の転動 体要素における接触面圧も計算するため、 転がり軸受の詳細な分析が可能である。 シェフラーが作成したエンジンの完全弾性 MBSモデルには、軸受の剛性マップが組 み込まれている。マップ作成にあたり、プ ロジェクトパートナーからは関連するすべ てのエンジンコンポーネントの CAD デー タが提供された。さらに公差データ、材料 物性値、燃焼圧カーブから推測される運転 条件により、現実的な制約条件のモデリン グが可能となる。

シミュレーションでは、燃焼圧カーブに対 応した複数のテストサイクルを実施し、バー チャルな形でエンジンを運転させる。テ ストサイクルは、使用寿命、燃料消費量、 NVH性能に関連してくる、負荷、回転数、 温度といった運転条件を再現するものであ る。結果として得られる軸受の負荷スペク トルから、負荷が加えられた頻度と時間の 長さがわかる。シェフラーでは転がり軸受 の設計において長年の経験があり、組み立 て時や運転時に発生するひずみなども考慮 することができる。MBSソフトウェアア プリケーション CABA3D (シェフラー製 ソフトウェア)は、転がり軸受内で発生す る動的挙動について、詳細な分析を行うこ とができる。これによって、軸受部の動的 挙動や、コンポーネント間で作用する力、

そしてこれらの結果として発生する摩擦の 推定が可能となる。試験結果を評価したの ちに、最適化プロセスで反復ループの実施 が必要であると判断した場合には、更新さ れた入力データを用いて再計算を行う。こ の際の評価は、システムの摩擦損失、使用 寿命、ノイズレベルを織り込んだものとな る。

# 検証

機能的な設計手法を開発するためには、検 証プロセスが必要である。この検証プロセ スは、既存エンジンをベースにして、クラ ンクシャフトの動的挙動や摩擦損失率、な らびに固体伝播音など、入手可能な測定デー タを用いて行う。また既存エンジンモデル に新たな軸受モデルを組み合わせることで、 仮想環境において、これまでになかったシ ステムを設計することが可能となる。仮想 モデルによる結果と実際の結果を比較する ことで、摩擦損失低減の可能性、システム の耐用寿命や固体伝播音といった要素の予 測に役立てることができる。

クランクシャフトの挙動からシミュレー ション方法を検証するため、すべり軸受が 使用されている量産型エンジンを用いて、 さまざまなエンジン回転数でエンジンダイ ナモ実機試験を行った。また、図4に示す シミュレーション方法を用いて一連の計算 を実施した。

ー般的に、この方法は、すべり軸受と転が り軸受の両方に適しており、量産型エンジ ンに大きな改良を加えることなくモデル化 が可能である。フライホイールおよび補機 ベルトプーリーの回転変動率は、実測結果 およびシミュレーションの結果を比較する 際の基準パラメータの役目を果たす。図5 が示すように、6,000rpmにおける全負荷 条件について、実機試験で得られた結果は



5 The comparison between the physical engine and the engine model reveals close conformity with the crank angle resolved speed.

クランク角度全体にわたって、シミュレー ション結果とほぼ一致している。クランク シャフトの両端(補機ベルトプーリー、フ ライホイール)とも、シミュレーションに よって、クランク角度に応じた回転変動を 的確に予想することができる。

さらに補機ベルトプーリーにねじり振動ダンパー(以下 TVD)を装着した状態で、シミュレーションモデルを検証した。全負荷条件において、TVD 搭載有り、搭載無しで

それぞれ実機試験を行い、シミュレーションの結果と比較した(図6は4000 rpm)。

シミュレーションモデルはこのシナリオでも 同様に、クランクシャフトの動的挙動を定量 化できていることから、その計算精度を確認 することができた。図6に、エンジンシス テムでのTVDによる影響の検証結果を示す。 TVDを搭載した場合では、搭載していない 場合と比べてクランクシャフトの回転変動率 が大幅に低減されていることがわかる。





6 The measurements and engine model calculations showed a high level of congruence both with and without the vibration damper.

次に検証の中心となるのが、エンジンの摩 擦損失である。摩擦損失の分析に確立され た方法の一つに、エンジンの部品要素を一 つずつ取り外す、いわゆるストリップダウ ン法がある。該当するコンポーネントがあ る場合とない場合の比較測定を行うことに よって、そのコンポーネントがもつ摩擦の 影響が明らかになるが、コンポーネント間 の相互作用までを完全に解明することはで きない。図7で示すように、エンジン全体 の摩擦に占める各コンポーネントの摩擦の 割合はエンジンの回転数や負荷に応じて大 きく異なるが、概ねあらゆる回転数におい て、ピストンとコンロッドによる摩擦は最 上位を占め、クランクシャフト軸受とシー ル、オイルポンプとバランサシャフトの順 となる。図7(右)は、4.000rpmにお ける摩擦損失の内訳を示している。クラン クシャフト軸受とシールから成るシステム は、この回転数において全体の摩擦の18% を占めており、この割合はエンジン回転 数 1,000 ~ 6,000 rpm の範囲において、 10~20%の間で変動する。 クランクシャフ トシールの摩擦はエンジン回転数によらず、 ー個あたり約 0.25 Nm 程度あり、寄与率は 比較的小さい。

図8にストリップダウン測定と計算の結果 を示す。棒グラフの各要素の値は、クラン クシャフト軸受部のシミュレーションで得 られたもので、実測で得られた摩擦(赤点 線)とほぼ一致している。このことはエン ジン全体(左)をモータリングした場合で も、クランクシャフト単体(右)をモータ リングし個別に解析した場合にも当てはま る。これをもって開発モデルの検証段階が 完了し、テストエンジンのクランクシャフ ト軸受を最適化するための方策を、シミュ レーションを用いて効率的に検証できる状 態となった。

#### 摩擦損失低減の可能性

エンジン全体およびそのサブシステムに対し て検証された計算方法を用いることによっ て、実測だけでは検証が不可能な場合にお いても、システムの妥当性を判断することが





7 Breakdown of friction percentages using a strip-down measurement.



🔲 Seal 📃 FEAD 🔳 Timing drive, valvetrain 🔳 Main bearings 📕 Strip down total measurement



可能となる。図9(左)にある三つのグラフ は、ベースエンジンにおけるクランクシャフ トの総摩擦損失に占める、各クランクシャフ ト用すべり軸受の摩擦損失割合を示したもの である。一つ目のグラフは、タイミングベル トおよび補機ベルトがない状態で試験した場 合の測定結果を示す。全体の摩擦に占める四 つの軸受の割合は、ほぼ同じとなっている。 二つ目のグラフは、補機ベルトによる負荷を 考慮した場合で、この均一な分布状況に変化 が生じる。ほかの三つの軸受に比べ、第1ク ランクシャフト軸受の摩擦損失割合が大幅に 増加していることがわかる。この現象は、タ イミングベルトドライブおよび補機ベルトド ライブによってクランクシャフトに働く曲げ 荷重によるものと推察することができる。三 つ目のグラフはさらに運転中の燃焼圧を考慮 した場合で、軸受荷重はさらに変化する。こ の結果から、エンジン回転数と各軸受荷重の 関係がわかる。

図10に、すべり軸受を使用したエンジン (緑線)と第1クランクシャフト軸受部に転 がり軸受を搭載したシステムとの摩擦損失 を比較した結果を示す。全負荷条件の運転 において、第1クランクシャフト軸受の摩 擦がクランクシャフト軸受の総摩擦に占め る割合は最も低くなる。このことから、高負 荷・低速域における転がり軸受のメリットが 示された。

これらの結果は、第1クランクシャフト軸受 のみをすべり軸受から転がり軸受に変更した エンジンを試作するための根拠となった。複 数回繰り返し計測を実施し、前述の開発手法 を用いて最適化を行った。初期段階として 外径72mm、内径35mmの転がり軸受を エンジンに組み込み最適化が行われた(図 11)。最終的な転がり軸受の仕様は、クラ ンクケース内における7%の省スペースと、 14%のクランクシャフト径拡大を実現した。



9 Friction percentages of the four crankshaft main bearings and virtual reciprocal effects.

さらに、初期の大型の軸受に比べて寿命が大 幅に向上し、摩擦損失も大幅に低減された。

このことについて、ベースエンジン(すべ

てすべり軸受)と試作エンジン(第1クラ

ンクシャフト軸受部のみ転がり軸受)の総

摩擦損失の比較によっても検証が行われた。

この検証にはさまざまな温度およびエンジ ン回転数で実機計測が行われ、損失が低減 されていることが確認された。シミュレー ションで計算されたメリットについても、 広範囲にわたる測定によって検証すること ができた。エンジンの性能マップ全体にわ たって解析を行ったところ、転がり軸受は



<sup>10</sup> Potential for reducing friction using rolling bearings.

すべり軸受を大幅に上回るメリットを有す ることがわかった。この効果は特に、高負 荷・低速域において顕著である。

図 12 に、第 1 クランクシャフト軸受を転 がり軸受に変更した場合の予測される燃料 消費量低減率マップを示す。この試験には、 フォード社製 Focus に搭載されている 1.0 リッター EcoBoost エンジンを使用した。

Initial Design Optimized Design



11 Optimally designed rolling bearing for the first crankshaft main bearing in the 1.0-liter three-cylinder engine.

WLTC (Worldwide-harmonized Light vehicles Test Cycle) においては、摩擦 損失を低減させることにより1.1%の燃料消 費量低減につながる。この燃料消費量低減の 効果は、適用するエンジンのクランクシャフ ト軸受に作用する補機ベルト負荷と燃焼圧 に依存する。こうした燃料消費量低減の予測 について、フォード社が実機確認試験を行っ たところ、燃料消費量が0.9~1.2%低減 されるという結果が得られた。

#### NVH 举動

クランクシャフト用転がり軸受の設計にあ たっては、摩擦損失の低減や適切な寿命 が重要な要素となるが、これ以外にNVH 性能についても調査を行った。NVH 性能 を比較するうえで重要な特性は、空気伝 播音および固体伝播音である。振動系の 励振周波数が変化しているか、また変化 している場合はどの程度かを特定するた め、空気伝播音および固体伝播音を両方の エンジン(すべり軸受搭載エンジンおよ び転がり軸受搭載エンジン)で測定した。



12 The reduced friction attributed to the first crankshaft bearing fitted as a rolling bearing averages out to 1.1 % less fuel consumption in the WLTC.

#### Friction Simulation: Series Engine vs. Main Bearing 1 Roller Bearing

図13(上)に、固体伝播音に関する結果 をまとめたものを示す。結果を比較したと ころ、大きな違いは特定できなかった。空 気伝播音(図13下)に関しても、それぞ れのエンジンの値はほぼ同じであった。測 定の結果、転がり軸受を使用したエンジン のNVH性能はすべり軸受を使用したエン ジンの場合と同等であることが分かった。 この結果は、感応評価でのノイズレベルと も一致している。 ことによって、クランクシャフトにはさら に大きな曲げ応力が加わり、これによって 軸受荷重が増加する。図14に、標準的な 補機ベルト駆動とP0タイプハイブリッド のクランクシャフト軸受について接触面圧 を比較した結果を示す。この結果をみると、 P0タイプハイブリッドのクランクシャフ ト軸受では接触面圧がかなり大きくなって いることから、すべり軸受では摩耗リスク が高いことがわかる。そのため、この用途 においてロバスト性向上と摩擦損失の低減 を目指すのであれば、クランクシャフトに 転がり軸受を使うことが効果的である。

# P0 タイプのハイブリッド

シェフラーはさらに、P0 ハイブリッドにお けるスタータジェネレータがクランクシャ フト軸受荷重におよぼす効果を調査した。 ベルト張力が高まり負荷の方向が変化する もう一つのメリットは図 15 に示されており、これは、ベルトに高負荷がかかっている状態でエンジンを始動させた際の油温90℃、始動時回転数 1,000rpm までの



14 The load exerted on the first crankshaft main bearing can be very high, particularly on a P0 hybrid, which means that a rolling bearing mount can measurably reduce fuel consumption.

挙動を確認したものである。クランクシャフト軸受部で発生する摩擦損失を10分の1に低減することができ、低温時においてはさらに大きな効果が期待できる。その結果、スタータモータの出力を低減できるなどの可能性がある。

# まとめ

シェフラーはフォード社と協力して、第 1 クランクシャフト軸受をすべり軸受か ら転がり軸受に置き換えた 1.0 リッター EcoBoost エンジンでの調査を行った。



15 The start sequence of a PO hybrid application as compared with a plain bearing and a rolling bearing assembly.



13 The subjective analyses revealed that there was no perceptible difference in NVH performance between the engine when fitted with rolling and with plain bearings.

この調査では、シミュレーションモデルと 実測を併用し検証を行った。本プロジェク トでは、転がり軸受がもたらす可能性を最 大限に活かすためには個々のエンジンの運 転条件にあわせて転がり軸受を最適化する 必要があることを解明した。転がり軸受を 使用したエンジンでは、予想された燃料消 費量低減代(1.1%)が実測でも立証され、 またベースのNVHレベルからの悪化がな いことも確認された。シェフラーでは、引 き続きNVH性能についてさらなる向上を 目指していく。

# Literature

- [1] Luther, R.: "Lubricants Must Be Multi-Talented". In: MTZ 76 (2015) , No. 7-8
- [2] Schlerege, F.; Hagen, N.: Rolling bearings at crankshaft – method, application and analysis. R&D Conference Automotive, 2017
- [3] Schlerege, F.; Hagen, N.; Morawitz, U.: Evaluation of a Rolling Bearing Crankshaft. VDI publication, 2016

内燃機関のクランクシャフトに転がり軸受 を用いるということは(特に P0 タイプの ハイブリッドシステムに用いるということ は)、摩擦レベルの低減とクランクシャフ ト軸受の耐久性向上において、大きな可能 性を秘めている。シェフラーではさらに、 クランクシャフト用転がり軸受が4気筒エ ンジンなどほかのエンジンコンセプトにも たらすメリットについても、引き続き検討 を進めている。

# Transmission



# The Transmission

Now and in Future the Most Efficient Connection Between the Powertrain and the Road

Dr. Hartmut Faust

#### はじめに

# 2030 年、トランスミッション システムの展望

今後数年で、自動車用パワートレインのコン セプトの種類は増えていくことになる。図1 で示したように内燃機関で駆動するのか、ハ イブリッドパワートレインによるのか、それ とも電気のみで駆動するかに関わらず、こう したコンセプトはすべて、自動車の駆動にお ける一次エネルギーの使用量を可能な限り 最小限に抑えること、ひいては CO<sub>2</sub>排出量 を技術的に可能な範囲で最小限に抑えるこ とを目指している。

トランスミッションについていえば、この ことはパワーを伝達してある比率で回転と トルクを変換する時の損失、特に摩擦によ る損失や始動のためのエネルギーの発生を 最小限に抑えて、できるだけ多くの機械的 エネルギーを車軸に供給するという要件に つながっていく。クラッチおよびシフト操作 の自動化に向かう流れは、特にパワートレイ ンの電動化推進など最適化された駆動方式 の導入を後押しすることとなる。

#### 課題

内燃機関に関しては、燃料消費量および CO<sub>2</sub>排出量の削減[1]にあたって小型化や、 今や3気筒エンジンにも適用されるように なった気筒休止など、エンジンベースの対策 を講じることになるためパワートレインに は別の要件も加わる[2]。このときクランク シャフトで生じるねじり振動を効果的に減 衰させ、パワートレインそのほかの駆動伝達 系への影響を排除し、快適さを求めるドライ バーの声に応えることが必要不可欠となる。

摩擦およびエネルギーの損失を最小化 [3] することに加えて、トランスミッション コンポーネントのさらなる軽量化もまた



1 Automation trend in transmission systems and percentage of powertrain concepts in the overall market in the Schaeffler scenario for 2030

Transmission Trends	Product innovation fields
Reduction of losses: all types of transmissions for ICE, hybrid, EV	<ul><li>Friction optimized bearings</li><li>Increased ratio spread and # of gears</li></ul>
Cylinder deactivation on ICE: CDA, RCD, DSF	• Damper, CPA, double CPA, coupled CPA, iso-radial pendulum
Automatization: AT, CVT, DCT, MT	<ul> <li>Launch: TC/iTC/4TC, WDC/DDC</li> <li>Inside TM: Planetary gearset, SAX, clutch packs, CVT chain</li> <li>Actuation: PoD (HCA, MCA, GA), E-Clutch (MT<i>plus</i>, CbW, ECM)</li> </ul>
Hybridization/Electrification: P0, P1, P2, P3, P4, DHT, EV	<ul> <li>PYD, PYD-S</li> <li>P2HM, 3K, short synchronizer</li> <li>PoD actuators: ECA, EPA, EAA, IPS, PRND</li> <li>DHT damper w/ torque limiter</li> <li>DH-ST 6+2, DH-CVT, serial/parallel (e. g. Twin Drive)</li> <li>E-Ayle high speed plagetary sets high speed bearings</li> </ul>

2 Transmission system trends and products and system solutions developed by Schaeffler

CO, 排出量削減に貢献できる。同時に、よ り軽量でより小型のコンポーネントがあれ ば、特にハイブリッド車においては設計ス ペースに関するより厳しい要求仕様にも適 合できることとなる。CO, 排出量削減の可 能性をめぐる体系的調査はこれに加えて、パ ワートレイン内の各コンポーネントがエネ ルギーを消費している点も考慮しなくては ならない。こうしたコンポーネントとして は、クラッチを自動化するアクチュエータの 作動に使われる油圧ポンプやモータ、そのほ かトランスミッションコンポーネントなど がある。「チリも積もれば」の例えのように、 文字通りの「パワーオンデマンド」(PoD) コンセプトによって、アクチュエータの平均 消費ワット数を3桁レベルから2桁台前半 まで低減することも可能になった。

ー方で、技術的ソリューションがどれだけ優れていても、市場性のある価格で手に入らなければ市場で優位に立つことはないだろう。 そのためには特定の要件にあわせて、つまり過剰スペックとならないよう適切に設計 されたコンポーネントと、効率性に優れた製 造プロセスの両方が必要になる。その一方で コスト評価にあたってはコンポーネントの 直接費だけでなく、パワー損失や全世界的に 法規制が厳しさを増している CO<sub>2</sub> 排出量関 連で生じる間接費も含め、すべてのコストを 漏れなく織り込む必要がある。

#### 各種ソリューション

こうした要件を念頭に置きながら、米国市場 で選ばれている遊星ギヤセットを使用した オートマチックトランスミッション(以下 AT)から日本市場で選ばれている無段変速機 (以下 CVT)、ヨーロッパ市場のデュアルク ラッチトランスミッション (以下 DCT)、さ らには主としてヨーロッパや BRIC 諸国で根 強く利用されている昔ながらのマニュアルト ランスミッション(以下 MT)など従来型の トランスミッション、そして新しく登場した ハイブリッド型トランスミッションや電動ア クスルのためのコンポーネント、サブシステ ム、システムの設計をシェフラーがどのよう に進めているかを本稿でご紹介していく(図 2)。シェフラーではまた、低摩擦転がり軸 受、適切な電力消費量の高効率アクチュエー タ、新しい遠心振り子式ダンパーを採用した 高性能の振動減衰用コンポーネントの開発 /製造も手がけている。こうした技術によ り、さらに効率の優れたパワートレインの 進化が可能となる。特定の要件にあわせて設 計され、最適化されたトランスミッションを 実現するためには、設計の初期段階から将来 想定される要件などさまざまな側面を考慮 に入れた、CAE などのシミュレーション技 術の幅広い活用が求められる。

トランスミッション設計におけるもう一つ のトレンドが、自動化の拡大であり、燃料消 費量の最適化を実現する新しい変速方式や、 コースティング(惰行)などのより複雑な ドライビング方式にも対応し、適切な回生 動作によってパワートレインの電動化とい うコンセプトの可能性を存分に活用できる ことから、CO2排出量削減に役立つ。また、 さらなる快適さを求めるドライバーからの 声にも対応する。

シェフラーが行った市場評価によれば、世 界全体で自動変速機が占める割合は、今後 10年間で約60%から約70%に増加する 見込みである。その一方で、世界市場にお けるハイブリッド車と電気自動車を合計し た割合は、2030年までには70%まで上 昇する。ハイブリッド車だけの割合で見た 場合は40%となり、市場において販売され る内燃機関搭載の新車台数は、10年後も なお70%を占めることになるだろう。AT、 CVT、DCT に 48V 以上の高電圧技術を用い た P2 タイプのハイブリッドモジュールを追 加したトランスミッション以外にも、市場 シェアを伸ばしているトランスミッション 設計が存在する。電動可変トランスミッショ ン(EVT)や、モータを第二の動力源とし て組み込むハイブリッド専用トランスミッ ション (DHT) などである。その一方で、よ りシンプルな構造の減速機をもった電動ア クスルを搭載したハイブリッドや電気自動 車のシェアも高まる[3]。

駆動力を車軸に伝える役割を担っているあ らゆるタイプのトランスミッションにとっ ては、一次エネルギーの使用を最小限に 抑えながら電気エネルギーでのドライビン グレンジを広げるためにも、トルク変換時に 発生する損失を減らすことが引き続き重要 な開発目標となっている。

# トランスミッション全種類に 低摩擦転がり軸受を 採用するという、新たなコンセプト

#### 課題

内燃機関の世界においては、燃料消費量を低 減させるために摩擦損失を抑えることが、ト ランスミッション用軸受にとって重要な課 題である。CO。排出量削減と電気駆動範囲 の拡大が重要な目標であり続ける以上、この 課題は今後も変わることがない。この目標 は、負荷条件に応じる形で、新たなCAE手 法を用いて摩擦損失を最小化する形状とな るよう開発された円すいころ軸受を使用し たり、円すいころ軸受を複列アンギュラ接触 玉軸受に置き換えたり、アキシャル予圧不要 の固定側/自由側軸受コンセプトを採用し たりすることによって達成できる。摩擦損失 を低減して高い定格荷重を維持する方法と してはほかにも、円すいころ軸受に似ていな がら内輪・外輪に革新的なつば形状を採り入 れることによって、両方向からの軸力を支持 できる点において円すいころ軸受とは異な るアンギュラローラーユニット (以下 ARU) など、まったく新しい軸受コンセプトが存在 する[5]。

#### 新たな軸受設計としての

アンギュラローラーユニット (ARU)

通常、シャフトを支持する場合、深溝玉軸受 を固定側、円筒ころ軸受を自由側とする場 合が多い。その際、深溝玉軸受の定格荷重は 比較的低く、必要に応じて軸受寸法を大きく



Tapered roller bearing • Boards at inner ring only • Supports load in one direction → preload needed • Separate outer ring • Window cage

Board at inner and outer ring
Supports load in both directions

no need for preload

Self holding design

Snap cage

Angular roller unit



3 Comparison of the design principle of a tapered roller bearing and an angular roller unit (ARU) (left) as well as loading conditions for an ARU with preferred direction (right)

するなどして所要定格荷重に到達させなけ ればならないが、必ずしも設計スペースの変 更なしで変更できるとは限らない。そこか ら、深溝玉軸受に代えてどういった軸受設計 を固定側軸受に使用できるか、ということが 問題となってくる。

図3は、アンギュラローラーユニット(以下 ARU)という新しい固定側軸受を採用した、 シェフラーのアプローチをまとめたものであ る。深溝玉軸受より定格荷重が高いながら も、アキシャル負荷がかかった状態において、 円筒ころ軸受よりも低摩擦で動作する。 ARUは非分離型の単列軸受として、両方向 からの軸力を支持できる。ただしその分、円 すいころ軸受と同様に軌道面を介して高い 軸力を支持できるよう、規定されている方向 に軸受を取り付ける必要がある。

摩擦損失に関して言えば、ARU と円筒ころ 軸受を採用した固定側/自由側軸受支持部 もまた、深溝玉軸受を利用したソリューショ ンと同等である。ARU を固定側軸受とした 場合は、所要定格寿命も維持でき、これに よって設計スペースに変更を加えることな く、円すいころ軸受を使った固定/固定支持 方法から固定/自由支持方法への切り替え を実現できる。

# CAE ツールの活用

#### 課題

シミュレーション手法を利用することに よって、パワートレイン内における振動など の現象に関する信頼性の高い予測、損失発生 源や燃料消費面でのメリットに関する有益 な情報の提供、そして必要に応じて、パワー トレインシステム全体のきわめて詳細な最 適化が可能である。シェフラーではトラン スミッション用軸受の最適化に、計算ソフト ウェア BEARINX などの CAE ツールを利用 している。さらに、クラッチなどほかのサブ システムにもシミュレーションを採用して おり、負荷頻度を利用しながら想定用途にあ わせてコンポーネント設計の最適化を行っ ている。CAE 手法を用いることによって設 計限界に近くとも確実に動作させることが できるようになり、トランスミッションコン ポーネントを可能な限り小さく設計できる。 これによってコスト、重量、設計スペースの 低減のみならず摩擦損失の低減にもつなが り、CO,排出量削減というより高次の目標 達成に役立つ[6]。



4 Optimization variants reached in comparison with a basic clutch

#### 活用例: 熱機械的に最適化したクラッチ

クラッチに熱機械的最適化を施すにあたっ ては、システム全体において関連するすべて の要因の相互作用を解析する必要がある。そ のためシェフラーでは、従来は別々であった 熱挙動、機械的変形、摩擦係数のモデルを CLUSYS ソフトウェア内で一つに統合した。 最適化後の熱機械的クラッチ設計は、摩擦係 数挙動、コンポーネント形状、クッション の偏向、システム剛性を考慮したものとなっ ている。同ソフトウェアは、さまざまなプロ フィールにおける定格寿命計算や、ミスユー スによる熱損傷の計算、トルク容量の計算に も対応している。

#### 最適化なアプローチについてクラッチの例 を用いて紹介する。従来型クラッチにおける テーパ変形挙動は完璧なものではなかったも のの計算に膨大な時間を要するため、最適化 された形状を設計に織り込むことは不可能 であった。ただし現在では新しい熱機械的モ デルに完全に組み込める状況となっている。

最適化によってトルク容量が大幅に増大す るとともに、過度の応力集中を回避すること によって摩耗も低減している。トルク容量が 改善された分については、接触圧つまりはペ ダル踏力の低減や、作動時の快適性向上に活 かすことができる。定格寿命要件において得 られた剰余分は、ほかの箇所で利用できる。

想定できるバリエーションを図4で示す。 ここでは、クラッチディスクとプレッシャー プレートの内径を大きくすることによって、 接触圧を下げペダル踏力を低減させている。 別の例では、クラッチディスク上に遠心振り 子式ダンパー(以下 CPA)を取り付けるた めのスペースをクラッチ内に確保して、振動 減衰効果を向上させている。もう一つのバリ エーションでは、システム全体の外径を小さ くすることによって、クラッチシステム自体 の所要スペースを抑えている。摩擦材、プ レッシャープレートの外径を小さくするこ とによって、クラッチカバーの剛性最適化に 必要なスペースができ、ペダル踏力のさらな る低減につながる。

#### ねじり振動の遮断

#### 課題

エンジンの小排気量化や気筒休止、低回転化 (アイドル回転数をわずかに上回るだけのロ ングレシオでの走行)など、内燃機関をベー スにした燃料消費量の低減策は、クランク シャフトのねじり振動減衰に対する高度な 要求をともなう。歯打ち音、こもり音、その ほかノイズや振動などの不快な NVH 現象を 防止するため、シェフラーは MT 車や DCT 車用のデュアルマスフライホイール、なら びに AT 車や CVT 車用のトルクコンバータ (以下 TC)振動減衰システムを始めとする ソリューションを開発した。さらなる減衰 性能向上として、デュアルマスフライホイー ル、トルクコンバータ、クラッチディスクに CPA の適用需要が増えている。 図5で示したのは、シェフラーによる二つ のソリューションである。すでに量産され ているカップル式振り子(図5右)の場合、 円周方向のスプリングを介して振り子が互 いに支え合っている。エンジンが完全停止し ても振り子がガイド軌道内にとどまるため ように、スプリングによりプリロードを付与 する。スプリング分の慣性マスがねじり振動 の減衰性能におよぼす影響は、CPAの次数 をシフトさせて補正することで排除できる。 カップル式振り子は、4気筒運転から2気 筒運転に切り替える気筒休止方式で特に有 効である。一次振動に設計された振り子が、 2気筒運転による一次加振に加え、重力によ る一次加振にも効果を発揮するためである。

イソラジアル振り子の構成を図5左に示す。 この方法ではトルクフローに位置していない リングに各振り子がピボットで連結されて いるため、各振り子の挙動が同期している。



CPA が市場で大いに成功を収めた理由とし ては物理的原理によって、加振次数と振り 子の振幅次数の均衡が取れているという点 が挙げられる。CPA はエンジン回転数によ らず、狙った次数の振動を減衰することが できる。振り子の振れ角は、エンジンの回 転数に依存する回転変動により変化する。 減衰性能を保証するうえで重要な要因とな るのは、フランジ、振り子、ローラーの形 状と併せて振り子のガイド軌道の精度であ るが、シェフラーでは産業界最先端を誇る 製造プロセスによって高い精度を保証する ことができる

ただし CPA にあっても、不快な騒音が発生 する場合がある。エンジン停止時のある回転 数から重力が遠心力を上回ることがその原 因である。これによって振り子とローラーの 接触が失われるため、ローラーが振り子やフ ランジに衝突するためである。





Engine speed in rpm

Coupled CPA optimised 📕 Iso-radial pendulum optimised

5 Couple pendulum and iso-radial pendulum (top) with a diagram of vibration amplitudes in relation to the speed (bottom)



6 DTH damper with integrated slip clutch as a torque limiter

通常二つあるローラーを一つとすることに よって、振り子は純粋な径方向運動ではなく 揺動運動となる。この設計によって、個々の 振り子の質量の重力による一次加振がなく なる。ただしこの原理では、エンジンの停止 時の低速状態でガイド軌道の接触が失われ ることに対応できないため、ストップエレメ ントによる騒音制御が必要になる。

ハイブリッド専用トランスミッション (DHT)を使用する用途では、許容範囲を超 えるインパクトトルクからパワートレイン 全体を保護することが必要になる場合があ る。このため、トルクリミッターとしてフリ クションクラッチを追加した、特殊なDHT ねじり振動ダンパーを開発した(図6)。

# パワーオンデマンド型 アクチュエータ

課題

自動車の開発における主要テーマが、エネル ギー効率である。ポテンシャルを存分に活か すには、自動変速機内のコンポーネントを作 動させるアクチュエータなど、すべてのエネ ルギー消費要素を考慮しなければならない。 真のパワーオンデマンドアクチュエータを使 用すれば、モータに供給されるエネルギーを、 適切かつできる限り直接的な形で、十分な力 と圧力に変換することができる。もう一つポ ジション維持という側面があり、実際には止 まっているが状態維持のために多くのエネル ギーが消費されている [8]。

一つの重要な方法として、複数のエネルギー 消費項目への供給、調整を可能にするアク チュエータの設計がある。P2タイプのハイ ブリッド構成コンセプトには、DCT用のトル プルクラッチ内蔵P2ハイブリッドモジュー ルがあり、電子部品を含めたクラッチアク チュエータの追加が必要不可欠となる。この 場合、バルブ追加やポンプ - 蓄積器モジュー ルのスケーリングによって容易に拡張できる 油圧式ソリューションの方が、電気機械式ソ リューションよりも適している。ただし、ハ イブリッド化したDCTを効率的に作動させる ためには、それに適したアクチュエータが必 要である。ここで新たに登場するのが、電気 式ポンプアクチュエータ(以下 EPA)である。

#### 電気式ポンプアクチュエータ (EPA) の 用途

EPA には 2 圧式バルブが組み込まれ、圧力 を両ポートに連続的に供給させることができ る。EPA はポンプを正転させることで、P1 側のバルブが閉じ、クラッチなどの駆動デ バイスのために P1 圧力を供給する。圧力を P1からP2に連続的に供給する場合、ポン プを逆転させることで、P2側のバルブが閉 じ、P2圧力を供給することができる。同時に、 P1側のバルブが開放され、P1圧力をリザー バーに逃がすことにより、圧力が立ち続ける のを防ぐ。したがって、EPAを用いれば、二 つのデバイスを連続的に作動させることがで きる。

図7は、P2タイプハイブリッド車のDCTに おける EPA の適用例を示す。EPA を用いた 効率のよい DCT アーキテクチャを実現する には、それぞれのクラッチに対応する EPA が 必要である。EPA を使用すると、先に述べた ように圧力を両ポートに連続的に供給させる ことができるが、各クラッチには片方のポー トしか使わない。そのため、もう片方のポー トを変速機能とパーキングロック機能に使用 できないか検討した結果、油圧による作動が





7 Actuator system for double clutch transmissions with two EPA and one HGA

可能で、かつ量産のDCTで実績のあるアク ティブインターロックの原理を用いたギヤア クチュエータが最適であった。このアクチュ エータを Hydraulic Gear Actuator (以下 HGA) と呼び、必要となる要求作動はギヤセ レクトとギヤシフトである。このアーキテク チャでは二つの EPA と二つの制御バルブで、 四つの要求作動に対応できる。

P2 ハイブリッド構造を組み合わせた DCT アーキテクチャでは、さらに CO クラッチを 制御する必要があるため、もう一つ制御バル ブが追加となる。このアーキテクチャでは二 つの EPA と三つの制御バルブで、五つの要求 作動に対応できる。さらに、HGA が組み込ま れたトランスミッションユニット全体の制御 を二つの EPA で置き換えられないかという疑 問が生じるが、結論としては、高価な部品で あるトランスミッション制御ユニット (TCU) は取り除けるが、トランスミッション制御 マッピングは EPA が担わなければならないと いう考えに至った。それには、クラッチ、ギ ヤアクチュエーションを正しく判断するシス テムとソフトウェアの構築が必要である。ギ ヤ段選択制御とクラッチのオーバーラップ制 御は、両 EPA のローカル制御ユニットが担う か、もしくは分割するか、あるいはハイブリッ ドシステムに多く見られる上位の制御ユニッ トに移管させなければならない。それが可能 となれば、このアーキテクチャは最もコスト 効率の高いものとなる。

# トランスミッション設計の さらなる効率化

#### AT および CVT 用 TC

TC をできるだけ早くロックアップしたり、 微小なスリップで稼働させたりできるよう に、システムの効率性とクラッチの切り離 し性能にとっては、AT および CVT の TC 内にあるロックアップクラッチが制御性に



Apply port
 Cooling inlet
 Compensation port
 Cooling outlet

8 Design of the four-channel torque converter with four hydraulic connections for compensating centrifugal oil pressure

優れていることが必要不可欠となる。コン バータのロックアップは、ロックアップク ラッチへの加圧によって制御する。ただし、 コンバータの充填圧力の変動や、ピストン両 側での遠心油圧の差異は、制御性の悪化要因 となる [9]。

図8は、精密かつ動的な稼働条件に左右さ れない形でのロックアップクラッチ制御を 可能にする、4-パスTCの設計を示している。 油路のうち二つは、コンバータを通過する 流れに使われる。3番目の油路はクラッチ制 御に、追加された4番目の油路は、高圧側 と低圧側の圧力差をキャンセルすることで、 制御性を向上させている。この4番目の油 路によって、ピストン両側の圧力を同一の 状態に保つ。クラッチ作動室および圧力キャ ンセル室のシール外径が同じであるため、 ATFの遠心力はピストン両側で等しくなる。 これはつまりピストン圧力が圧力分布ばら つきの影響を受けることがなく、その上ク ラッチ作動室がトルクコンバータ充填圧力 の変化の影響を受けない。

#### ダブルクラッチトランスミッション

トランスミッション開発ではこれまで、コ ンポーネントおよびシステムの直接費に目 が向けられてきました。しかし、CO<sub>2</sub>排出 量規制の厳格化を背景に、さまざまな損失 およびアクチュエータや冷却システムによ るパワー消費が原因で発生する燃料消費に 関する間接費についても、検証が欠かせない [10]。

図9では、シェフラーによるコスト、効率 が異なる三種類のダブルクラッチを紹介し ている。パワー損失の点で言えば、エンゲー ジメントベアリングを採用したシステム(中 央および右)が有利である。作動システムは クラッチスレーブシリンダーから構成され ており、リークフリーの電動油圧セクション を使用して、ごくわずかの損失で作動エネル ギーをクラッチに伝達する、電動油圧クラッ チアクチュエータ (以下 HCA) によって作 動する。トラベルセンサーにより、HCAで はピストンのストロークを直接モニタリン グできるため、ヒステリシスによる圧力精度 への影響を最小限にすることが可能であり、 これによりクラッチ内のパワー損失が最小 限に抑えられる。

よりコスト主導型であるアプローチは、機械 駆動式油圧ポンプ(左)を使用し、必要に 応じて体積流量のピーク需要に対応するた め追加の電気ポンプを使用する仕様である。 クラッチ作動エネルギーの伝達は、軸受では なくロータリー式オイルフィードで行われ、



9 Wet double clutch with rotary oil feeds and rotating cylinders (left) as well as wet and dry double clutch with engagement bearings (center and right).

またトランスミッション変速システムの作 動は油圧式または電気機械式で行われる。こ のシステムには、ポンプを継続的に稼働させ ている点で不利ではあるが、システムコスト の面では利点があると言えるだろう。

#### マニュアルトランスミッション

トランスミッションのコンセプトはバラエ ティ豊かになっているものの、MTは生産数 という点では今後も、最も重要なトランス ミッションの一つであり続ける。つまりここ での効率向上が世界規模で大きな影響力を もつことになるわけである。ただし、燃料消 費量とCO<sub>2</sub>排出量の低減を実現するための 新たな技術がもたらす可能性を活かすため には、MT車のクラッチを自動化する方が有 利である。シェフラーの計測結果によれば、 RDE (Real Driving Emission)準拠のテ ストコースでセーリング機能のみを使用した 場合、燃料消費量とCO<sub>2</sub>排出量を3%から 5%削減できた。さらに、制動エネルギー回 生の拡大により、P0タイプのハイブリッド では約5%、組みあわせて使用した場合は約 8%の改善が可能になる[11]。

図 10 では、MT 車用 クラッチの 自動 化を 可能にする三つの方法を紹介している。 MTplus (左) は、クラッチを部分的に自動 化して、MT車でもドライバーの入力なしで のセーリングなどを可能にする、エントリー レベルのシステムである。クラッチペダル上 のマスターシリンダーと並行する形で、コン パクトな追加のアクチュエータを採用してい る。クラッチバイワイヤーシステム (CbW) も、ドライバーの感覚ではクラッチペダルの ある通常の MT 車と変わらない。ただし、実 際のクラッチ作動は常にアクチュエータに よって行われており、これによってスタート アシストや渋滞アシスト、スリップ制御な どの追加機能を可能にしている。バイワイ ヤーという名称が示すように、クラッチペ ダルとクラッチのスレーブシリンダーとの


10 Variants for clutch automation: MTplus, clutch-by-wire (CbW) and electronic clutch management (ECM)

接続は、機械式でも油圧式でもない形で行われる。クラッチペダルなしで操作を行う ECMシステム(右)でも、この方法が採用 されている。クラッチペダルに代えて、シフトレバーに設けられたセンサーが変速指示 を認識して、アクチュエータを介してクラッ チの開放を制御する。効率性に関する可能性 と新しい機能のほかに、自動化されたクラッ チは誤操作を行った場合などに生じる過負 荷から MTを保護できるという、さらなるメ リットをもたらす。

#### まとめ

ドライブコンセプトの増加にともない、今後 もトランスミッションおよびコンポーネン トの設計は多様化の一途をたどるだろう。本 稿では複雑なシステムであるハイブリッド や電気自動車などを始めとして、新たに登場 したさまざまなソリューションがトランス ミッションの進化を後押ししている例を多数紹介した。自動化などの一般的な風潮も、 自動車の走行にあたって一次エネルギーの 消費量をできる限り抑えるという共通の目 標を掲げていることから、所定のエネルギー 貯蔵装置での走行範囲拡大にもつながる。

このとき、トランスミッション軸受、振動減 衰コンセプト、アクチュエータのパワー消費 など、燃料消費量と CO2 排出量を低減させ るため、トランスミッションシステム内にあ るすべての関連コンポーネントを考慮する ことが不可欠となる。カスタマイズされた コンセプトを導入するには、サブシステム とシステムを関連付けることのできる最先 端の CAE ツールが必要となる。こういった ツールの活用によって、個々のトランスミッ ション設計に合わせた、パワー伝達やトルク 変換時の損失を最小限に抑える効率的なソ リューションが生まれる。

#### Literature

- Scheidt, M.: The Combustion Engine: A Drive with a Future! 11. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2018
- [2] Faust, H.: Powertrain Systems of the Future. Engine, Transmission and Damper Systems for Downspeeding, Downsizing, and Cylinder Deactivation. 10. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2014
- [3] Faust, H.; Schübel, R.: Göckler, M.: Reduction of Energy Losses in Transmission Systems.
   CTI Transmission Symposium, December 2016, Berlin
- [4] Englisch, A.; Pfund, T.: Schaeffler E-Mobility
  With Creativity and System Competence in the Field of Endless Opportunities.
  11. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2018
- [5] Petery, G. von; Rumpel, R.: Innovative Bearing Concepts for the Powertrain of the Future.11. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2018
- [6] Heinrich, D.; Kerstiens, J.; Schneider, M.; Wittmann, C.: Innovative CAE – Optimal Layout of Transmission Components. 11. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2018
- [7] Kooy, A.; Seebacher, R.: Best-in-Class Dampers for Every Driveline Concept. 11. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2018
- [8] Müller, B.; Grethel, M.; Göckler, M.: Innovative Power on Demand Concepts for Transmission Actuation. 11. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2018
- [9] Heck, T.; Zaugg, B.; Krause, T.; Vögtle, B.: Efficient Solutions for Automatic Transmissions
   Torque Converters and Clutch Packs. 11.
   Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2018
- [10] Rathke, G.; Grethel, M.; Baumgartner, A.; Kimmig, K.-L.; Steinmetz, S.: Made-to-Order Double Clutch Systems. 11. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2018

[11] Welter, R.; Kneißler, M.: The Manual Transmission Has a Future: E-Clutch and Hybridization.11. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2018







### はじめに

駆動方式の多様化の結果、ドライブトレ イン内ではさまざまな振動が生成される ため、エンジン - トランスミッション間 で振動を減衰させることが必要不可欠で ある。シェフラーは、内燃機関が今後も 長きにわたって重要な役割を果たすこと になると確信している[1]。将来は燃料 消費量をさらに削減するために、多くの コンセプトが登場することが期待されて いる。ハイギヤレシオで走行することに よって、低エンジン回転走行による内燃 機関の損失低減がその一例である。ただ し、内燃機関をアイドル回転数より若干 高い回転数で運転させる場合、確かに経 済的ではあるが振幅の大きい低周波振動 が生成されるデメリットがある。さら に走行性能低下を防ぐため、トルクを 増加させることが必要である。このほ か、気筒休止やダウンサイジングに加え、

内燃機関、モータ、トランスミッション のさまざまな構成によって多様化したハ イブリッドシステムの増加もまた、振動 に関連する課題を招く原因となっている。 モータ駆動とエンジン駆動のオンデマン ドでの切り替えは、ハイブリッド自動車 の特徴でもあるが、ドライバーに意識さ れることなく行われる動作であり、これ によってダンパーには内燃機関のスター ト/ストップ時に新たな課題が課される ことになる。

将来のドライブトレインが目指すトレン ドは、エンジンとトランスミッション間 の減衰システムに対する高い要件をも たらし、快適性やドライバビリィティー に対するドライバーの期待が高まるにつ れて、要求水準はさらに引き上げられる ことになる。増え続けるドライブトレ インのバリエーションに対処するため、 CAE ツールを駆使して開発プロセスの 初期段階で振動減衰やNVHに関する要 件を織り込み、試作車を使って行われる テストの回数を減らそうという動きが進 んでいる。これには高度な開発力が必要 となるが、シェフラーでは許容誤差評価 や各要素の最適化をシミュレーションで 行うことにより、車両におよぼす影響を 検証し、これを実現している[2]。さらに、 小型化や設計スペースの複雑化といった 傾向に合わせながらも、効果的かつカス タマイズされた振動抑制システムを開発 することが重要である。ここではより優 れた動作原理を探求し、革新的な組み合 わせによってダンパー技術を進化させる ために、シェフラーがどのような方法を 採っているか紹介する。

# 遠心振り子式ダンパーの改良 当初の状況

遠心振り子式ダンパー(以下 CPA)は 2008年から、エンジンとトランスミッ ション間で生じるねじり振動の減衰機能 に利用されており、今では広く普及して いる。図1で示したように、トランスミッ ション用途向けに毎年約2,000万個の CPAが製造されている。このうち約3分 の2がオートマチックトランスミッショ ン(以下 AT)のトルクコンバータ(以 下TC)に、約3分の1がマニュアルト ランスミッションとデュアルクラッチト ランスミッションに取り付けられている。



1 Schaeffler production of centrifugal pendulum-type absorbers per year for manual transmissions and double-clutch transmissions (left) as well as automatic transmissions (right)



2 Applications for the centrifugal pendulum-type absorber in the DMF (left) and other applications (right) on the clutch disk, in the single mass flywheel and as a double CPA in an automatic transmission converter

デュアルマスフライホイール(以下 DMF)内に設置している内蔵型CPA (アークスプリング下に省スペースで配 置)と外付型CPA(アークスプリング近 隣に配置され、高慣性モーメントにより 回転変動の減衰性能が向上)に区別され ている。

CPA が市場で大いに成功を収めた理由としては物理的原理によって、加振次数と振り子の振幅次数の均衡が取れているという点が挙げられる。CPA はエンジン回転数によらず、狙った次数の振動を減衰することができる。振り子の振れ角は、エンジンの回転数に依存する回転変動により変化する。性能を保証するうえで重要な要因となるのは、フランジ、振り子、ローラーの形状と併せて、回転振り子の

ガイド軌道の精度であるが、シェフラー では産業界最先端を誇る製造プロセスに よって高い精度を保証することができる。



3 Basic simulation for optimization of the guide track curvature of the pendulum and the flange in combination with the roller diameter using the example of an CPA without (top) and with (bottom) spring elements between the pendulums (couple pendulum). 各関連部品の公差により、フランジと振 り子がオフセットもしくは、傾斜した位 置関係となる可能性がある。いずれも振 り子をフランジに接触させる可能がある ため、ローラー上のリブによりフランジ と振り子の接触を防いでいる [3]。

こうした幅広いアプリケーションにより、 CPA はパワートレインのさまざまな場所 で利用されている (図 2)。当初は DMF や AT 用 TC における減衰性能を向上させ るために開発され、その後クラッチディ スク用 CPA が開発された。その一方で、 AT 用 TC でも二つの CPA が同時に使わ れるようになる。ダブルフランジ型 CPA では、振り子が二つのフランジの間に配 置されて、エンジンで頻繁に行われる始 動/停止のために必要となる振動減衰エ レメントを設置しやすくしている。

ほかの開発として、商用車のドライブト レイン向けシングルマスフライホイール 内に CPA を採用した。ここで特記すべき ことは、フライホイール側に振り子を一 体化したことである。

## アイドル回転数からの、 遠心振り子式アブソーバの設計

C PA 設計は三つの目標に向かって行われる。一つ目はエンジン回転変動が大きい低速でも優れた減衰性能を実現することである。そのためには、振り子の慣性マスや振れ角をできるだけ大きくする必要がある。二つ目は摩耗防止のため、低速の場合や振れ角が広い場合でも、振り子がガイド軌道から浮き上がらないようにすることである。そして三つ目は、極くの衝突をできるだけ少なくすることである。

図3のカラーチャートは、4気筒エンジ ンとP2ハイブリッドを組み合わせた車 両モデルでのエンジン回転数と燃焼次数 における減衰性能(図3左)と振り子の 振れ角(図3右)のシミュレーション結 果を示し、図の上段は振り子間のばね年り し仕様で、下段は振り子間のばね有り仕 様(カップル式振り子)を示す。振り子 の次数は、ダンパー中心からフランジの 軌道円半径中心の距離と、フランジの軌 道円半径の比で決定される。

振り子間のばね無し仕様において、回転 二次を使用し続けたままエンジンが極低 回転になると、振り子の衝突が見受けられる。それを防ぐため、ガイド軌道曲率 を変化させることによって、ガイド軌道 終端部の次数を大きくしている。カラー グラフからは、この変化による影響が確 用すると、減衰性能は低下するが、振れ 角も小さくなり、振り子が衝突するのを 防げる。

CPAの減衰効果に関するシミュレーショ ンは最初にエンジン全負荷で基本シミュ レーションを行う。それは部分負荷では 回転変動が小さいため、振れ角が小さく 軌道形状の設計に影響を与える可能性は 低いためである。通常、最適と言えない 領域はアイドル回転数をわずかに上回る 範囲だけとなり、解決策が必要となる。 内蔵型CPAの場合は外径方向の設計ス ペースが十分に確保できないので、軸方 向の設計スペースを使い振り子の慣性マ スを大きくすることが一つの解決策とな る。軸方向の設計スペースが十分であれ ば、アークスプリングの隣に振り子を置 くことも一つの解決策となる。設計ス ペースとねじり振動減衰に必要となるソ リューションには密接な関連があり、開 発の初期段階からシミュレーションを活 用する必要がある。



4 Design of an internal CPA with W stop damper (left) as well as tangential connecting elements on the pendulums (couple pendulum, right)

# アイドル回転数未満のエンジン始動/ 停止領域における設計

エンジン停止時、回転数の急速な減速が 起こる。ある回転数からは、重力が遠心 力を上回り、振り子とローラーとの接触 が失われる。特に振り子が径方向の外側 に配置されている外付型 CPA においては 内蔵型 CPA と違い、不快な騒音が認識さ れる場合がある。エンジン停止時と比べ て、エンジン始動時は比較的強い加振力 が発生するため、ガイド軌道の終端部に おける振り子の衝突が課題となる。

エンジン始動時における振り子の衝突エ ネルギーは計算可能だが、衝突点やガイ ド軌道の寸法などのばらつきにより、各 部品の挙動が異なるため難易度が高い。 衝突の課題に対応するソリューションと して、W型エンドストップダンパーがあ る(図4左)。それによって、衝突エネ ルギーを減少することが可能である。

エンジンの再始動が頻繁に行われるハイ ブリッド自動車のように高水準の快適性 が求められる場合には、さらなる対策が 必要である。解決策としては、ばねを介 して振り子どうしが円周方向で互いに支 持するカップル式振り子(図4右)を使 う方法がある。エンジン停止時でもばね のプリロードにより、振り子がガイド軌 道に残るようになるからである。特に内 蔵型 CPA に適用する場合は 2 フランジ設 計との組み合せが必要となる。

もうーつのソリューションが、U 型 振 り子を使用した CPA コンセプトである (図5左)。ここでは、振り子はフラン ジ空洞内に配置されたIntermediate plateを介して、フランジの真下にある ローラーによって支えられる。振り子と Intermediate plate がリベットによ り連結され、U字型の断面が形成される。 これにより振り子の重量が上乗せされる ため、減衰性能を向上できる。CPA 内の 騒音は、振り子がフランジにぶつかるこ とで生成されるが、この騒音はエンドス トップダンパーや、振り子に接触するロー ラーやフランジの適切な設計によって改 善できる。

イソラジアル振り子の構成を図5右に 示す。この方法ではトルクフローに位置 していないリングに各振り子がピボット で連結されているため、各振り子の挙動 が同期している。通常二つあるローラー を一つとすることによって、振り子は純 粋な径方向運動ではなく揺動運動とな る。この設計によって、個々の振り子の 慣性マスの重力による一次加振がなくなる。ただしこの原理では、エンジンの停止時の低速状態でガイド軌道の接触が失われることに対応できないため、ストップエレ メントによる騒音制御が必要になる。

## 遠心振り子式ダンパー付き クラッチディスク

CPAはDMF内に限らず、クラッチディ スクに直接配置することも可能である。 この設計および基本構造はすでに「シェ フラーシンポジウム2014」で公開され ており[3]、一連の試験が完了して、ま もなく量産される予定である。図6では、 図3と同様、減衰性能と振れ角を示して いるが、こちらでは3気筒エンジンにお いて振り子に摩擦要素がない場合(図6 上)と、摩擦要素がある場合(図6下) を示している。エンジン変動の少ない高 回転の場合、振り子の振れ角が小さく、



5 Design of an CPA with U pendulum (left) and an iso-radial pendulum (right)



6 Basic simulation for optimization of the guide track curvature of the pendulum and the flange in combination with the roller diameter using the example of an CPA on the clutch disk without (top) and with (bottom) friction elements

発生させることにより、ガイド軌道終端ま で振り子が振れないようにした。高速では 減衰性能に顕著な影響がなく、またエンジ ン停止時に発生する振り子がフランジに衝 突するエネルギーをフリクションで低減す ることができ、騒音が低減した。

## ハイブリッド車の 遠心振り子式ダンパー採用

プラグインハイブリッドの場合、EV 走行 時とエンジン走行時のNVH 特性の差を 最小化することが目標である。この場合、 モータによってダンパーの設計スペース が制限されるため難易度が増す。 モータの配置もダンパーに要求される機 能に影響を与える。POタイプの配置で は、モータによる追加トルクがダンパー を介して伝達することになるが、P1 およ び P2 の配置ではその必要はない。特に P2 タイプの場合、モータで追加される慣 性マスがねじり振動の減衰に役立ち、ど のようなダンパー形式が適切であるかは 設計スペースによっても異なる。マスダ ンパー、スプリングダンパー、振り子ダ ンパーなどを組み合わせ、最適化するこ とが可能である。また、ハイブリッド車 に要求されるエンジンの始動/停止時の NVH 性能向上は重要である。上記の通り、 停止時の NVH 対策にはカップル式振り 子が有効である。

主要加振1.5次と同じガイド軌道が選択 されているが、エンジン変動の大きい低 回転の場合、振り子の振れ角が大きくな ることによるガイド終端部への衝突を避 けるため、低次数のガイド軌道としてい る。減衰の最適化にあたっては、パワー トレイン部品との共振についても十分考 慮することが必要である。

ローラーと振り子軌道面は、低速状態の 大きな振れ角においても、十分な接触力 を確保することが不可欠である。その ため、振り子にトラベルセンサーを取り 付けた状態で実験を行い、二つのロー ラーの相対運動、傾斜、ローラーの軸方 向挙動を測定した。ローラーと振り子 軌道面ですべりの発生がない状態では、 ヒステリシスは発生しないが、ガイド軌 道終端ですべりが発生し、両ローラー間 の距離が変わっていることによるヒステ リシスが見て取れる。これによりガイド終 端で接触力が失われていることが分かっ た(図7左側)。シミュレーションによる 解析の結果でも、ガイド軌道終端でロー ラーと振り子の接触力が大幅に低減し、 すべりが生じていることが確認できた。

低速状態における振れ角の大きい状況下 においてガイド軌道終端で接触力が失わ れることに対応するため、振り子がガ イド軌道終端まで振れないようにする対 策を実施した。振り子とフランジ間に波 形ワッシャー (図7右)を導入し、樹 脂製エレメントとの間にフリクションを



7 The distance between the rollers with multiple pendulum motions (left) and inserted friction elements for roller stabilization (right)



8 Reversed small radial damper (RSRD) with CPA and flywheel on front end of the crankshaft

ハイブリッド化にともなうモータの設計 スペースを確保するため、ダンパーの小 径化、幅狭化が要求される。小径化のソ リューションとして、リバースドスモー ルラジアルダンパー(RSRD)がある。 このコンセプトでは、一次側の慣性が少 なくなるため、エンジンのフロントエン ドに慣性マスを追加することが必要にな り、300Hz ~ 500Hz の ク ラ ン ク シ ャ フトのねじり振動はクランクシャフトの リアエンド側に移行する。シミュレーショ ンの結果、適切に設計すれば、アークス プリングによりクランクシャフトのリア エンド側の振動を減衰できることが分か り、マスダンパーに置き換えられる。た だし、要求される減衰性能を達成するに は、CPAが必要であるが、それでもモー タの設計スペースをDMFに比べ、確保 することができる。

## 振動減衰のための、 新たなアプローチ

#### 作動原理レベルでの解析

ー般的に、振動減衰システムは次の三通 これらシ りに分けられる。 わせて、

アクティブシステム:エネルギーは外部システムに供給され、そのエネルギーを吸収する。例えば、パワートレイン内のモータなどによって、入力振動に対向する振動を生成することにより、振動エネルギーを吸収するなどがある。

- パッシブシステム:エネルギーは、運動エネルギーと位置エネルギーとの相互変換を行いながらエネルギーを相殺する。例えば、DMFなどのダンパーや、位置エネルギーを遠心力に変換する CPA などがある。
- スリッピングシステム:エネルギーは システムから放出される。例えば、ト ルコンでは流体の伝播損失によって放 出され、クラッチは摩擦によって熱エ ネルギーとして放出される[6]。

これらシステムすべてを効果的に組み合わせて、良好な結果を得ることが可能である。

ここでは、パッシブシステムについて詳 しく説明する。図9で示しているように、 運動エネルギー、位置エネルギー、レシ オに関する基本要素を任意に組み合わせ ることによって、作動原理を何通りにも 検証できる[7]。

これら作動原理を解析すると、振動が発 生し得るシステムに特有の特性として、 共振と反共振を包含しているという点が 見えてくる。原則としては、反共振も効 果的に利用しながら共振をコントロール していくことが目標である。



9 Various operating principles for damping vibrations



🔲 Damper 📕 Absorber 📕 Resulting torque



10 Implementation of the anti-resonance principle using the example of a damper

低速域での振動減衰に関しては共振周波 数の振動をすべて消去できる反共振原理 が特に有望である。共振周波数において、 トルク変動の合計がゼロに等しくなるよ うなマスダンパーを追加する。図10は、 反共振原理がマスダンパーによって実現 できることを示している。追加されたマ スダンパーは回転マス上でスプリングに よって接合されており、起震源のトルク 変動の位相(黒線)から180° ずらし た位相(オレンジ線)で変動するように 設計される。理論的には、反共振原理は 任意の周波数に対応できる。しかし、こ れによって異なる周波数で共振が生じて しまう。

反共振原理は、サメーションダンパーや パワースプリットによっても実現可能で ある。ここでも、ある周波数において互 いのトルク変動を完全に打ち消し合うよ うな、トルク振幅が加えられる。ただし この場合スプリングを追加しないので、 新たに自由度が加わることがないため、 新たな共振が発生しないというメリット がある。

すべての反共振システムは、対向振動の 振幅を正反対とする必要がある。パラメー タを慎重に選択することによって、反共 である。ただし、パラメータが一定で あるは一定の周波数は仕意に設定で あるは一定の周波数はエンジンに としてCPAは一つの例である。エ ジン回転数に比例して変化する周波数 に比例して変化する周波数 にのの加振動を減衰すること で、全エンジン回転数領域に対応してい る。

# 遠心振り子式ダンパーへの 作動原理適用

上記の作動原理を適用することによって、 CPA の新しい可能性が拓ける。例えば、 設計スペースの不足については、ダンパー システムの慣性マスを CPA に分配するこ とで対処できる (図11)。こうすること で、同じ重量でも CPA に慣性マスを付加 した方が減衰性能向上により寄与する。 それによりまた全体の重量を低減させる ことも可能である。



11 Theoretical potential of the CPA in the redistribution of the mass down to a reduction of the total mass of the damper system



12 Operating principle of the damper on the intermediate flange: Achievement of an anti-resonance without interfering resonance in a higher speed range

# マスダンパー作動原理を 中間フランジに適用

マスダンパーを二次側に設定した場合、 ある回転数で共振が発生する。マスダン パーを二次側から一次側に移動すること で、共振回転数が低回転側に移動し、最 終的には常用回転数領域での共振はなく なる (図 1 2)。

マスダンパーを一次側と二次側の中間フ ランジに適用した例を図13に示す。そ の場合、既存の設計スペース内でマスダ ンパーと CPA を両立させるためには、 CPA を薄くする必要があり、CPA の慣 性マスは低下する。ただし、この組み合 わせはマスダンパー無し CPA (黒)に比 べ、重量を増加することなく使用可能な エンジン回転数を約300rpm 落とすこ とができ、結果として燃料消費量を約6% 低減できる。



**13** Placing a damper on an intermediate flange to utilize anti-resonance

# まとめ

ここでは、ドライブコンセプトの多様化 とそれにともなう振動減衰に関するさま ざまな要件に対し、シェフラーの対応手 法を紹介した。課される要件は非常に広 範囲にわたっており、モータをベースに した駆動方法からエンジンを使用した駆 動方法への切り替えと、これにともなう エンジン始動/停止にまつわる課題、気 筒休止、設計スペースの縮小、低速での 走行、減衰要件の増加などへの対応も求 められる。遠心振り子式アブソーバ原理 の改良と、さまざまな振動減衰原理の組 み合わせによって、機能およびコストの 面で最適な設計を実現することが可能で ある。 また、本稿で紹介した方法によっ てエンジンのさらなる低回転での運転を 可能とすることで、燃料消費量と二酸化 炭素排出量のさらなる低減が可能である 遠心振り子式アブソーバの設計方法につ いても紹介した。

新しい振動減衰コンセプトを追及する中 で、各コンセプトの作動原理が重要な役 目を果たしている。特に、共振および反 共振の原理を用いることは、限られた設 計スペースに適した振動減衰コンセプト の開発に適している。

## Literature

- [1] Faust, H.: The Transmission Now and in Future the Most Efficient Connection Between the Powertrain and the Road. 11. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2018
- Heinrich, D.; Wittmann, C.; Walther, V.: Innovative CAE – Optimal Layout of Transmission Components. 11. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2018
- [3] Kooy, Ad: Isolation is the Key The Evolution of the Centrifugal Pendulum-type Absorber not only for DMF. 10. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2014
- [4] Heck, T.: Efficient Solutions for Automatic Transmissions – Torque Converters and Clutch Packs. 11. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2018
- [5] Reitz, D.: P2 HV Drives The Most Efficient Hybridization for all Transmissions. 11.
   Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2018
- [6] Küpper, K.: Think Systems Software by LuK.7. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2002
- [7] Reik, W.: Less is more! Using unconventional means to design new products. 9. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2010



# The Manual Transmission Has a Future

E-Clutch and Hybridization

Dr. Roland Welter Markus Kneißler



## はじめに

トランスミッション形式はバラエティ豊か になっているものの、マニュアルトランス ミッション(以下MT)は変わらず重要なト ランスミッション形式の一つである。グロー バル規模でみると、新車販売台数の43%を MT車が占めている。MT車の大部分はイン ド亜大陸で販売されているが、欧州や中国 でも根強い人気がある。MT車の割合は今 後数年でわずかに減少する見込みであるが、 自動車市場の成長にともない、MT車の生産 台数は増加すると見込まれている。全世界 における MT車の年間生産台数は2016年 には4,000万台を数え、今後も高水準の生 産台数が維持されると予測されている。

MT車の割合は地域によって大きく異なり、 2025年にはインドで90%、欧州で57%、 東南アジアで 51%、中国では 45% に到達 する見込みである [1]。これらの市場におい てMT車が選ばれる主な理由としては、比 較的低価格で動力伝達効率が非常に優れて いることがあげられる。燃料消費量という 点において、MT車は長年にわたって、オー トマチックトランスミッション (AT) 車を 凌駕してきた。しかし近年では、AT車の変 速線の最適化などにより、効率のよい走行 が可能となり、MT車に対して優位に立つよ うになった。燃料消費量におけるこうした メリットは、継続的に改善が進んでいるトー ションダンパーにより低速時のロックアッ プが可能になったことも一つの要因である [2、3]。MT車においても最適な変速ポイ ントで走行することで、その効率をさらに 高めることが可能である。

ただし、新技術によって燃料消費量および CO2排出量の削減の効果を得るためには、 MT車のクラッチ作動を自動化する必要が ある。例えば、エンジンを停止してのセー リング(惰行)走行など省エネ型の走行 と、PO/P1タイプの48Vハイブリッド システムでの減速エネルギー回生を両立さ せる場合、自動クラッチを利用しないので あれば、ドライバーの操作が必要となり、 快適性を損なうどころか、実現することさ えほぼ不可能である。

前述したように、MT車は今後も世界各地で 台数を増やし続ける見込みであり、グロー バル規模の環境負荷目標を達成するために は、MT車のさらなるエネルギー効率の向上 はきわめて効果的である。セーリングだけ を採用した場合は3%~5%、マイルドハイ ブリッドシステムによりエネルギー回生量 を上げた場合は約5%、また、両者を組み 合わせた場合は約8%のCO2排出量削減を 達成できる。本稿では、MT車のクラッチの 自動化によるさらなる高効率化とCO2排出 量削減というアプローチに則した、シェフ ラーが提案するソリューションを紹介する。

## クラッチ作動の自動化

#### 自動クラッチの必要性

P0 / P1 タイプの 48V ハイブリッドシス テムにおいて、エンジン停止状態でのセー リング走行とエネルギー回生を行う場合、 クラッチ作動の最適化が必要になる。通常 ドライバーがこの操作を行うことはほぼ不 可能であり、クラッチの自動化が必要であ る。セーリング走行では、適切なタイミン グでクラッチを開放して、エンジンをアイ ドリング状態、もしくは状況に応じて完全 に停止させることができる。また、その時々 の交通状況と運転方式に応じてエンジン、 モータを切り離す必要があり、それを実現 するために自動クラッチは必要である。

自動クラッチは、渋滞中の発進時における クラッチ操作のサポート、クラッチを急激 に締結した際のドライブトレインへの過 負荷防止、急発進を抑制してドライバー



1 Variants for clutch automation:

MTTplus, Clutch-by-Wire (CbW) and Electronic Clutch Management (ECM)

および同乗者の安全性を高めるといった付 加機能を実現するためにも利用可能である。 近年では緊急時自動ブレーキアシスト機能 が普及しているが、アシストブレーキ作動 時に自動的にクラッチを開放しエンストを 回避することも自動クラッチのもつ可能性 の一例である。

#### 自動クラッチのバリエーション

ここでは、クラッチペダルの有無や、自動 化の度合いという点で三種類の自動クラッ チバリエーションを紹介する(図1)。三種 類の内訳は、部分的に自動化された低コス トのソリューション(以下 MTplus)、ク ラッチペダルエミュレーターを使用したク ラッチパイワイヤー(以下 CbW)、そして クラッチペダルを完全になくしたエレクト リッククラッチマネジメント(以下 ECM) である。

MTplus は、クラッチを部分的に自動化し たシステムであり、技術的要求は CbW や ECM ほど高くない [3]。既存のクラッチマ スターシリンダーに加え、油圧ライン上に アクチュエータを追加している。機能原理 についてはのちに説明するが、このアクチュ エータのクラッチ開放所要時間は300ms で、セーリングモードのオン/オフという 基本的機能を実行するには十分な性能を有 している。MTplusにおける最大の懸念点 はアクチュエータの作動がドライバーのク ラッチ操作に干渉してしまうおそれがある ことである。ドライバーが常にクラッチ操 作をコントロールできることは必須であり、 アクチュエータ作動時においても、ドライ バーのクラッチ操作に対応できるアクチュ エータコンセプトが必要である。

CbWも、ドライバーの感じるクラッチ踏力特性は通常の MT 車と変わらない。ただしペダル踏力特性はフォースエミュレーターによって

模擬的に再現されている。ストロークセン サーがペダル位置を認識して ECU に信号を 送り、実際のクラッチ作動はアクチュエータ によって行われる。バイワイヤーという名称 が示すように、クラッチペダルとクラッチス レーブシリンダー間の接続は、機械式でも

Foot operation Sailing

Driver take-over during sailing

Driver has fully taken

over

2 Operating conditions of the actuator: Clutch actuation by driver and pedal, actuation by actuator only when coasting and return to actuation by the driver 油圧式でもない形で行われる。システムの 性能はアクチュエータに依存すると言われ る理由がここにある。シェフラーが開発し たモジュラー式クラッチアクチュエータ (MCA)は、クラッチ開放所要時間わずか 150msを実現し、エンスト回避、発進ア シストなどの補助機能や、クラッチスリッ プ制御によるトランスミッションへの入力 回転変動の減衰も可能にする。このアクチュ エータについてはのちに詳しく説明する。

ECM では、クラッチペダルを完全になくし、 これに代えてシフトレバーに配置したセン サーによって変速タイミングを認識し、ア クチュエータがクラッチを操作する。過去 に、LuK では BMW・アルピナ(1993年) やメルセデス・ベンツA クラス(1997年) など、2 ペダルシステムとして自動クラッチ を量産した実績がある。しかし当時は、セー リングなどのクラッチの自動化による効率 面でのポテンシャルを活用する技術がなく、 市場で成功を収めるには至らなかった。

## MTplus 用アクチュエータの機能

前述したように、MTplusは自動クラッチ 機能を実現し、MT車の大幅なアップグレー ドを可能にする。システムの中核となるの は、自動で作動している状態から、ドライ バーの操作への切り替えを可能にするアク チュエータである。図2では、それぞれの 状況におけるアクチュエータの作動を示し ている。上から、通常のドライバーによる クラッチ操作の状況、アクチュエータによ る自動操作(セーリング)の状況、セーリ ング中のドライバーによるクラッチ操作の 状況、クラッチ操作のコントロールがドラ イバーに移行する状況を示している。

断面図は、スピンドルを備えたモータと、マ スターシリンダーおよびスレーブシリンダー との接続部を示している。通常運転では、

クラッチペダル操作により油圧を発生させ、 アクチュエータは休止する。セーリングで は、スクリュードライブとスピンドルを介 してアクチュエータが分割された片側のスプ リットピストンを前方へ動かし、ペダルから の油圧を遮断して、スレーブシリンダーを作 動させてクラッチを開放する。アクチュエー タ作動によるセーリング中にドライバーがク ラッチ操作を行おうとした場合、クラッチが すでに開放されていても、通常操作と同様の ペダル踏力特性をドライバーに感じさせる仕 組みになっている。クラッチペダルを作動さ せたとき、アクチュエータ内の分割されたも う片側のスプリットピストンにて油圧を受け る。これと同時に、クラッチペダルを操作し ようというドライバーの意図が、ペダル操作 を検知するセンサー信号によってアクチュ エータに伝えられる。ペダルを踏み込んだと きにドライバーが感じる反力は、アクチュ エータ内のスプリングによって再現されてい る。キャッシュピストン内とクラッチ側の



3 Schaeffler's modular clutch actuator (MCA)

圧力がつり合い、ピストンが後退して油路を 開放し、スレーブシリンダーに油圧がかかる。 一連のプロセスは、クラッチの開放状態を保 ちながらアクチュエータによるクラッチ開放 状態からドライバーによるクラッチ開放状態 への移行をドライバーが気付かない間に行わ れている。

## クラッチアクチュエータ

シェフラーは、CbW および ECM システム 向けにモジュラー式クラッチアクチュエー タ (以下 MCA)を開発した (図 3)。詳しい 説明については [4] に譲るがその名が示す通 り、モジュール設計を目指して開発が進めら れた。アクチュエータの中核を構成するの が、ブラシレスモータ、コントローラ、遊星 ネジである。データ信号は CAN、CAN FD または Flexray を介して伝えられる。

アクチュエータの駆動ユニットの設計には、 内蔵リザーバーー体型/別体型の油圧式と、 クラッチレバーを直接作動させる機械式の 3種類がある。内蔵の制御ユニットはセン サー入力部を五つ備えている。コンパクト でロバスト性の高い設計によって、エンジ ンルーム内またはトランスミッションへの 直接取り付けを可能にした。シェフラーは このシステムを複数のテスト車に搭載して 検証を行っており、2018年末の量産開始 を予定している。

## 自動クラッチの各種機能

図4では、自動クラッチの最も重要な機能 を系統ごとに分けて明示している。一般的に その機能は、運転状況やドライバーの要求な どに応じて三つのグループに分類される。

発進/停止およびセーリングに影響を与える 機能は、CO<sub>2</sub>排出量に関する目標達成のカギを



4 Functions of the automated clutch in the MTplus, CbW and ECM variant

握るものであるため、一つ目の「Sailing & Efficiency」は自動車メーカーにとって重 要である。これに対して二つ目の「Comfort & Fun to Drive」は、例えばパーキングア シストシステムなどは顧客が直接試乗などで 体験でき、かつそれによって購入の決め手 となる機能であるため、主に顧客側の視点 で重要であり、三つ目の「Robustness & Safety」は耐久信頼性に関する顧客満足度 が向上するため主にディーラーにとって重要 である。

#### 自動クラッチの開発

#### 開発/評価方法

シェフラーは、自動クラッチ開発拠点 であるビュール周辺にて、RDE (Real Driving Emissions Test) に準拠する ように決めたコースとテスト条件によっ てセーリング機能の解析を実施してい る。ここで行われる燃料消費量の測定は、 自動クラッチにおけるセーリング機能の開 発/設計するにあたって、重要な基礎デー タとなっている。

後述するパッシブセーリング機能について、 シェフラーは RDE 準拠のテストコースで、 自動車4台を使用して合計42回のテスト走 行を行なった。テスト走行の半数(21回) はセーリングモードありの条件で、残り半数 はセーリングなしの条件で実施した。ドライ バーによる影響を解析しやすいよう、テスト 走行は総勢9人のドライバーによって実施 された。

ビデオカメラを用いて全テスト走行を撮影 し、測定データに基づいてセーリングモード オン/オフの時間の解析とそれに影響をおよ ぼしていると考えられる要因との関連付けを 行い、セーリングモードへ切り替わる要因が 明確化された。さらにビデオ記録と測定デー タを同期させて(図5)、正確なセーリング 開始時間の自動検出をできるようにし、ビデ オ記録から直前(セーリング開始2秒前)と



5 Field test on coasting mode: Video material synchronization with measured data

直後(セーリング開始2秒後)の画像を追加 し、セーリングモードに切り替わる要因を分 類した。

#### セーリングモード解析

図6は、解析によって明らかにされたセー リングモードに切り替わる主な要因六つを まとめたものである。厳密に言えば全世界 の道路状況を考慮すれば、セーリングモー ドの開始はここに記した理由以外にも考え 得るという点を付け加えておく。

ドライバーがアクセルペダルから足を離し てセーリングモードに移行させる要因とし て最も多いものは、カーブ(25.9%)など の道路状況による減速で、「ゆずれ」標識(欧 州で一般的な標識)の接近(21.6%)な ど規則に則るための減速、さらにはスピー ドの遅い車両が前方を走行している場合 (19.2%)がこれに続く。そのほかの理由 としては、登坂やそのほかのさまざまな要 因(14.9%)、速度制限(12.4%)、停止 標識(2.8%)がある。

もう一つ、セーリングの発生回数も興味深 い課題である。各走行条件における1km走 行あたりのセーリングモード移行回数の解 析結果を図7で示す。全体として、RDEテ ストコースでは 2 回 / km セーリングを行っ ている。想定した通り、市街地での走行で は4回/kmと、高速道路(0.6回/km) や幹線道路(1.5回/km)に比べてセーリ ング回数が多くなっている。特に注目すべ き点は、全走行距離におけるセーリング走 行距離の比率が平均で約27%となり、各 走行モードにおいては、走行時間の18%~ 31%がセーリングモードとなった。これら の結果は、実際の走行モードにおいてはセー リングが大きな可能性を有していることを 示している。



6 Reasons for entering coasting mode



7 Number of coasting operations in various driving situations

解析

セーリングによる CO₂排出量削減の可能性 について図8にまとめた。この分析にあたっ ては、エンジン動作(アイドリングまたは エンジン始動/停止)、減速/停車時のギヤ 作動、ドライバーによるペダル操作を考慮 し、その結果として実行されるセーリング モードの切り替えを考慮に入れた。

図は、特定の状況に関するドライバーの 意図をペダル信号に基づいて認識する (Variable entry/exit)、セーリング中は

#### 解析結果および結論

シェフラーではまた、顧客とともに多数の テスト走行を実施して、セーリングに関す るさまざまな問題の分析も行っており、セー リングテスト走行回数はすでに 500 回を 超えている。そこで掲げられた重要な課題 の一つが、セーリング中にアクセルペダル が踏まれたとき、セーリングモードを終了 させ、ドライバーが要求する時間内に必要 な加速度を発生させられるか、というもの である。技術的な観点から言えば、ベルト 駆動式スタータジェネレータでの再始動の

常にエンジンを停止させる (Stop-start

sailing)、完全に停車するまでセーリング

モード (Sailing to standstill) という

条件を満たした場合、セーリングの可能性

を最大限に活用できることを示している。

この条件を満たした場合、セーリングによ

る燃料消費量の削減率は約5%となる。シェ フラーが実施した測定結果によれば、低速

(1 / 2 / 3 速)時の減速にセーリングを使

用しないシンプルな制御方式を用いた場合、

燃料消費面でのメリット(ひいては CO, 排

出量に関するメリット)は約3%となる。



8 Evaluation of potential implementation variants for coasting mode

代替案として、クラッチによるダイナミッ クスタートいわゆる押掛けは理屈上可能で ある。ところがテスト走行の結果、多くの 顧客がダイナミックスタートは快適性を大 きく損なうという評価を下した。3速以下 では特に意図しない減速が不快に感じられ るという結果が出ている。ベルト駆動式ス タータジェネレータなしでのダイナミック スタートは低コストの代替案として、高速 ギヤのみでセーリング中のエンジン停止を 想定している制限付きセーリング方式にの み適している。

車両テストの結果、ベルト駆動式スタータ ジェネレータなしの MTplus コンセプトは、 比較的低コストで約3%のCO<sub>2</sub>排出量削減 を達成できることを示している(図9)。た だし、クラッチ自動化によるポテンシャル を最大限に活かし、燃料消費量とCO<sub>2</sub>排 出量の削減最大約8%というメリットを



9 Recommendations for manual transmission automation

実現するためには、さらなるハイブリッド化 が必須となる。ダイナミックスタートの使用 を避けるために推奨される構成は、48Vシ ステムを採用した P0 タイプである [6]。

## 自動クラッチ用途の例

#### 技術的課題の解決策

MT車用の自動クラッチと、P0タイプのハ イブリッドコンセプトとの組み合わせから 成る解決策を紹介する。このアプローチに は、以下の要素が含まれる。

- 燃料消費量とCO<sub>2</sub>排出量を最適化する駆動 方式
- 実際の走行状況に基づいたクラッチの自動 作動
- ドライバーのクラッチ操作に関わりなく行われる、最適なエネルギー回生
- 前述のモジュラー式クラッチアクチュエータ (MCA)

#### 実際の運転状況におけるメリット

図 10 では、現実の運転状況における自動ク ラッチ作動のメリットを、自動クラッチな しで停車した場合(上)と自動クラッチあ りで停車した場合(下)の比較によって示 している。

上段の図は、自動クラッチ無しで減速中の 回生をベルト駆動式スタータジェネレータ で行っている状態を示す。ドライバーはア クセルペダルから足を外してブレーキをか け始め、回生動作が直ちに始まるものの、 ドライバーがクラッチを開放した途端に回 生を停止する様子を示している。前述の走 行テストでは、MT車を運転する多くのドラ イバーは回生を意識していないクラッチ操 作(クラッチ開放が早すぎる)をしている ことを示しており、そのため P0 / P1 タイ プのハイブリッドシステムの回生能力を無 駄にしていることが示されている。



10 Stop from 50 kph without and with an automated clutch



11 Driving strategies with automated clutch on approaching a city limits sign and when passing other cars

下段の図は、自動クラッチありで同じテス トを行った場合を示している。ドライバー がブレーキをかけ始めると、クラッチペダ ルボックスは、クラッチと電気的に接続さ れているため、クラッチは電子制御システ ムにより制御される。もしもクラッチペダ ルの踏み込みが早すぎた場合でも、できる 限り長く回生動作を続けられるようクラッ チは可能な限り締結状態を保つよう制御さ れる。また、もしもドライバーがブレーキ 操作を止めて再加速または変速を行おうと した場合でも、クラッチは即座に反応でき るように制御される。

自動クラッチは、例えば図11の上段に示す ような、道路標識がみえた場合などセーリ ングしながら減速する際に、最初はクラッ チを開放してエンジンを停止させるという 形で、セーリングと回生を組み合わせて使 用することもでききる。ドライバーがブレー キを作動させてさらに減速させたいという 場合は、クラッチを締結することでジェネ レータを介して回生をはじめ、同時にエン ジンは燃料噴射なしの状態で稼働する。も しもドライバーがブレーキペダルから足を 離し、アクセルペダルを踏んだ場合は、通 常走行を維持するためふたたび燃料が噴射 される。

図11の下段は、セーリングと回生動作のの ちに1台追い越した場合のシナリオを示し ている。ドライバーはアクセルペダルから 足を外すが、ブレーキはかけない。ここで、 クラッチが開放され、第1段階ではセーリ ングを開始するためにエンジンが停止する。 ドライバーがブレーキをかけると、ジェネ レータを介して回生動作がスタートし、エ ンジンは燃料噴射なしの状態で回転を続け る。そして、前方の1台を追い抜く(ドラ イバーがアクセルペダルを踏み込む)際は、 エンジンの加速力をモータでサポートする、 いわゆるブーストを行うことができる。

#### コスト評価

図 12 は、走行距離 1km あたりの CO<sub>2</sub> 排出量削減 1 グラムに対する燃料消費面 でのメリットとシステムコストを、自動 クラッチなし/ありの場合で比較した結 果である。自動クラッチのない PO タイ プの 48V ハイブリッドシステムの場合、 WLTC (Worldwide-harmonized Light vehicles Test Cycle) でのメリットは平 均 5% であるが、実際の運転状況では 3.5% 止まりとなる。CO<sub>2</sub> 排出量削減分 1 グラム に対するシステムコストが 84 ユーロから 119 ユーロと増加しているのはそのため である。一方、自動クラッチありのシステ ムでは実際の走行における燃料消費面での



**12** CO<sub>2</sub> reduction and system costs using the example of a manual transmission in a 48 V hybrid concept in PO arrangement

メリットは8%となり、 $CO_2$ 削減分1グラ ムに対するシステムコストは、わずか69 ユーロとなる。したがって、ベルト駆動式 オルタネータに加えて自動クラッチにも投 資を行った場合の投資回収額は、1kmあた りの $CO_2$ 排出量削減1グラムにつき30ユー ロ( $\epsilon/g CO_2/km$ )となり、自動クラッチ はコストの面においても魅力的なソリュー ションとなっている。

## まとめ

MT車の市場シェアは、今後数年で若干の 低下が予想されているが、未だに世界中で 広く利用されており、その絶対数は今後も 増加を続けることが見込まれる。そのため、 このカテゴリーにおける CO2排出量削減が、 世界規模の地球温暖化対策の目標達成にお いて重要な課題となっている。したがって、 MT車の自動化と電動化は、この点に関して も大きな役割を担っている。

本稿では3通りのアプローチを紹介した。 MTplus アクチュエータコンセプトでは、 クラッチペダルとクラッチ間に機械式また は電動油圧式の接続を残しているが、モジュ ラー式クラッチアクチュエータ (MCA) に よる CbW および ECM コンセプトでは接続 が完全に電気的に行われており、後者では さらにクラッチペダルをもなくしている。

膨大な回数の走行テストを行って自動ク ラッチを装備した走行条件、特にエンジン 停止状態でのセーリングモードを解析した 結果、MTplusはコスト重視のソリューショ ンとして、また、PO / P1 配置の48Vハ イブリッドを採用した ECM は、特にセーリ ングと回生の組み合わせをつうじて CO<sub>2</sub>排 出量削減を重視したソリューションとして 最適であるという結果が得られ、それらを 裏付けるさまざまな実際の走行シチュエー ションを紹介した。 コスト面での評価をつうじて、MT車の自動化/電動化を行うことによって、走行性、 快適性、安全性に関する機能がプラスされ るだけではなく、CO2排出量に関する将来 の法規制への対応という点でも理にかなっ ているという結果が得られた。

## Literature

- [1] IHS (Ed.) : Automotive Light Vehicle Production Forecasts. IHS Markit, London 2016
- Heck, Th.; Zaugg, B.; Krause, Th.; Vögtle, B.:
   Efficient Solutions for Automatic Transmissions Torque Converters and Clutch Packs.
   Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2018
- [3] Kroll, J.; Hausner, M.; Seebacher, R.: Mission CO<sub>2</sub> Reduction – The Future of the Manual Transmission. 10. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2014
- [4] Müller, B.; Grethel, M.; Göckler, M.: Innovative Power on Demand Concepts for Transmission Actuation. 11. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2018
- [5] Stuffer, A.; Heinrich, D.; Hauck, Ch.; Schmidt, T.; Stief, H.: Introduction of 48 V Belt Drive System – New Tensioner and Decoupler Solutions for Belt Driven Mild Hybrid Systems. 10. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden 2014
- [6] Schröder, Ch.; Stuffer, A.: P0 Mild Hybrid With System Competence to Maximum Efficiency. 11. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2018



# Efficient Solutions for Automatic Transmissions

Torque Converters and Clutch Packs

Thomas Heck Brian Zaugg Thorsten Krause Benjamin Vögtle Martin Fuß



#### はじめに

## 4 パス式トルクコンバータ

自動車産業においては世界的に CO<sub>2</sub> 排出量の さらなる削減を目指し、より効率的なシステ ムを求めるというトレンドが主流の時代が続 いている。そのため、気筒休止やターボ過給 をフル活用する形で、内燃機関の最適化が続 けられている。車両のダイナミクス性能を改 善するには、車両全体の重量、パワートレイ ンの重量を減らす必要があり、かつターボエ ンジンにおける最適かつ効率的な動作点へ迅 速に到達させるには、コンポーネントの慣性 モーメントを低減させることが不可欠となる。

シェフラーは、損失低減によってトランスミッ ションの効率を改善する一方で、新しいエン ジン技術の利用も可能にするテクノロジーを 提供している。近年トルクコンバータ用ロッ クアップクラッチおよびダンパーに関する要 求が非常に厳しくなっている[1]。有望なソ リューションの一つとしてコンポーネントの 軽量化が考えられるが、従来から使われてき た慣性マスをシステムに巧みに組み込んで振 動を低減する方法も有効である。

また、CO<sub>2</sub> 排出量を削減するには、あらゆる 運転条件下で正確に制御できるロックアップ クラッチが必要である。また今後のトランス ミッションにおいては、多段化の傾向があり、 これによってトルクコンバータ用の設置ス ペースがさらに縮小される結果となっている。

本稿では、これらの問題に対する技術的ソ リューションを紹介する。

# 技術課題

トルクコンバータ用ロックアップクラッチ の制御性向上は、システムの効率向上と振 動低減のためには必要不可欠なものである。 いかなる走行状況でもクラッチの開放/締結 を任意に実行できるようにし、また目標とし たスリップ速度を正確に維持できるようにす ることが要求される。ロックアップクラッチ のスリップを可能にすることは、ドライブト レインの振動を低減させる効果的な方法であ るが、スリップ速度の上昇につれて発生する 熟という形で、効率性が損なわれる。

ロックアップクラッチは、ピストンに加え られる油圧によって制御される。従来から2 パス式/3パス式システムが使われている。 2パス式トルクコンバータの場合、トルクコ ンバータを通してオートマチックトランス ミッションフルード(以下ATF)を逆流させ ることにより、クラッチを作動させる。3パ ス式トルクコンバータの場合、2本の通路は トーラスを流れるATFの循環とクラッチの 冷却に使用され、3本目の通路はこれとは独 立させた形で、クラッチの制御に使用され る。2パス式および3パス式トルクコンバー タの比較を図1に示す。

簡潔に言えば、クラッチ容量は以下によって 決まる。

- ピストンの受圧面積、摩擦材料の有効半
   径、摩擦面の数
- 摩擦材料 スチール間の摩擦係数
- ピストンにかかる圧力

設計により形状や摩擦係数は定められ、ク ラッチを制御する圧力については、トランス ミッションの油圧システムによって制御さ れる。理想的なシステムは、クラッチのトル ク容量や必要とされるスリップ量が圧力に よって制御されるシステムである。

## ロックアップクラッチの 制御性悪化要因

現実には、クラッチのトルク容量はほかの 要因による影響も受けるため、理想的な システムというものはあり得ない。後述す る制御性悪化要因は、クラッチスリップの 正確な制御を難しいものにしており、2パ ス式および3パス式システムの短所を示し ている。

- 1.油圧低下:2パス式トルクコンバータの 場合、摩擦材料はトルク伝達を行うだけ でなく、ピストン径外側のシーリングコ ンポーネントの役割も果たしている。ク ラッチ冷却のため、摩擦材料には多くの 場合、溝状のパターンが圧刻されてい る。ATFが溝を通ってピストン高圧側 から低圧側に流れるとき、油圧低下が生 じる。このときの油圧低下量は、溝の形 状、摩擦面の均一性、温度、スリップ速 度に応じて異なる。
- 2.ピストン有効圧力低下:ATFは2パス 式トルクコンバータの摩擦材料に設け られた溝を通って流れた後、トルクコン バータの外径側からトランスミッション 入力シャフトに向かって内側へ流れてい く必要がある。油圧差によりATFは内 側に流れるが、システム全体が回転する ためコリオリの力を受け、これにより背 圧が生じ、ピストンの有効圧力を低下さ せる。
- 王力変動:トルクコンバータ充填圧力の 変動は、2パス式システムではピストン 高圧側に、3パス式システムではピストン 、低圧側に影響をおよぼす。
- 4. 圧力分布ばらつき:クラッチの開放、ス リップ状態において、2パス式/3パス 式システムではダンパー、タービン、カ バーなどのコンポーネントがそれぞれ異 なる速度で回転する。それによりATF の遠心力が各コンポーネントにより違う ため、ピストン全体の圧力分布にばらつ きが生じる。



1 Comparison of a two-pass and a three-pass converter

3-pass torque converter



# 有望なソリューション: 油圧通路を四つ備えた トルクコンバータ

制御性悪化要因1および2については、3 パス式システムによって大幅に緩和できる。 また、残りの要因についても、3パス式シス テムにより、かなりの割合で改善でき、ある いはトランスミッションのソフトウェアの キャリブレーションにより補正が可能であ る。ただし、すべての要因に根本的に対応す るには、4パス式トルクコンバータという別 の原理が必要になる。その名の通りこれは油 圧通路が4本あるトルクコンバータシステ ムであり、設計ならびに機能原理を図2に 示す。



Apply por Cooling inlet Compensation port Cooling outle

2 Design of the four-pass torque converter

3パス式システムと同様、油路のうち2本は トルクコンバータを通過する流れに、3本目 の油路(緑線)はクラッチ制御に使われる。 4パス式トルクコンバータ独自の特徴となっ ているのが、4本目の油路(黄緑線)であ る。高圧側と低圧側の圧力差をキャンセルす ることで、制御性を向上させている。クラッ チ作動室および圧力キャンセル室のシール 外径が同じであるため、ATF の遠心力はピ ストン両側で等しくなる。これはつまりピス トン圧力が圧力分布ばらつきの影響を受け ることがなく、その上クラッチ作動室がトル クコンバータ充填圧力の変化の影響を受け ないことを意味する。

### 各種システムの比較

4パス式トルクコンバータの場合、運転条件 に左右されることなく、きわめて正確なク ラッチ制御が可能になる。シェフラーでは 2014年からこのシステムの量産を始めてお り、現在は新たな顧客向けの実装に向けた開 発を進めている。量産モデルの2パス式/ 3パス式/4パス式トルクコンバータの運 転中の制御可能なスリップ速度の比較検証 結果を図3に示す。

検証結果から、4パス式トルクコンバータで はより低回転でのスリップ制御が可能であ ることがわかる。これにより発進時のNVH 性能を維持したまま伝達効率の向上が可能 となり、燃料消費量の低減も可能となる。ま たダンパーも小型化できるため、トルクコン バータ全体の省スペース設計が可能となる。

# 一体型トルクコンバータ iTC

#### 設計

ー 体 型 ト ル ク コ ン バ ー タ (以下 iTC) は、ロックアップクラッチ用ピストンを



3 Comparison of the slip speeds of two-pass, three-pass and four-pass systems.

図5で示したように、2014年の生産開 始以来、さまざまな用途に向けた量産が 始まっている。下段で示した従来のトル クコンバータと比較してみると、iTC では 軸方向の所要スペースが最大17.5mm、 重量は最大 3.8kg 削減される。

従来のトルクコンバータの多くでデュア ルサーフェスクラッチが使われているー 方、iTCではシングルサーフェスクラッ チが使われる。これによって複雑度は低 減されるが、同等以上のクラッチ容量を 確保するために、iTC内のクラッチ取付 け面をテーパ形状として接触面を増やし ている。さらにインペラ表面に大きく テーパをかけることで応力分布を改善さ せ、より薄い材料の使用を可能にし、重 量低減を実現している。また、重い焼結 材のハブやそのほかのコンポーネントを

シェフラーの製造技術を駆使したプレス 部品に替えることで、さらなる重量低減 を実現している。

## コーストエンゲージメント ダイヤフラムスプリング

現代のパワートレインにおいて効率性を 追求するには、コースティング中にクラッ チを正確に制御できることは必要不可欠 である。iTCではDレンジ(ドライブモー ド)ではトルクコンバータ内の圧力がク ラッチの締結状態を維持する方向に働く が、コースティング中はタービンおよび クラッチが開放側となる圧力を受けるた め、クラッチの締結状態を維持すること が課題となる。



4 Design of a conventional converter (left) and an iTC (right)

その課題に対応するために、ATFの流れを 利用してよりクラッチ締結側に大きな圧力 を掛けることもできるが、これによってク ラッチが急速に締結し、不快なトルク変動 が発生する可能性がある。この問題を解決 する手段は、コースティング中にクラッチ を油圧だけではなく、機械的に締結する力 を補助することである。 スプリング (以下 CEDS) によって可能と なる (図 6)。スプリングはダンパーフラン ジとタービンの間に配置される。コースティ ングトルクが形成されるとフランジ (緑) が回転し、フランジとダイヤフラムスプリ ング (黄) 双方の傾斜によりスプリングが 圧縮され荷重を発生する。これがコースティ ング中のクラッチを締結する補助力となる。 現在ではすべての iTC に CEDS が採用され ている。

これは、コーストエンゲージメントダイヤフラム



5 Integrated torque converters (iTC, top) for front-wheel (FWD, left) and rear-wheel drives (RWD, right) .



6 Design and function of the coast engagement diaphragm spring

# レーザーエッチング面

iTCの導入と併せて、顧客要件をすべて満 たしながらも設計の違いに対応できるよ う、新たなプロセスを開発した。クラッチ 機能をタービンに組み込む場合、摩擦材 料は独立したプレートに接着するのではな く、タービンに接着する必要がある。一般 的には、接着プロセスの前にタービンのス チール表面に酸化アルミニウム  $(Al_{2}O_{3})$ を吹き付ける方法で粗面加工を施す。ただ しブレードが多数設けられているタービン 固有の形状により、洗浄後にコンポーネン ト内に取り残された酸化アルミニウムがト ランスミッションまで入り込むリスクがあ る。これによりトランスミッションのバル ブボディを損傷させ、コンタミネーション の要求の高まりに対応できなくなるおそれ があった。そこでシェフラーはレーザー エッチング処理を開発した。このプロセス では、粒子がレーザーによってスチール表 面で蒸発するためコンタミネーションの

発生がなく、表面粗さと高水準のクリーン 度を兼ね備えた表面処理が可能となった。

従来のブラスト処理とレーザーエッチング 処理を比較した結果を図7に示す。レー ザーエッチング処理では、粒子が完全に蒸 発するため、残存物のコンタミネーショ ンに関する要求はまったく問題とはならな い。実際に、このソリューションならば従 来のトルクコンバータで標準とされている よりも、さらに高水準のクリーン度に適合 できる。表面粗さについて、偶発性に頼る ところの大きいブラスト処理とは異なり、 レーザーエッチングではレーザー処理をプ ログラミングすることで、狙いを数値的に 設定できるというメリットがある。





7 Reparation of adhesive surface by laser etching

## トルクコンバータ用ダンパー

遠心振り子式ダンパーの可能性

NVH 性能や効率性に関する要件が高まる 中、振動減衰技術の進化は急務となってい る。こうした中で設計スペースと減衰効果 の両方を最適化すること、特にクラッチを 完全にロックした状態で、低速での NVH 性能を向上するというテーマが重要となっ ている。

ドライブトレインにおける、遠心振り子 式ダンパー (CPA) による減衰性能のポテ ンシャルについては広く認識されている。 2006年にシェフラーがドライ環境の CPA をデュアルマスフライホイール (DMF) 用 に発表した。2008年に量産を開始し[3]、 2010年にはトルクコンバータ用 CPA の 量産も開始した。この CPA は油中環境で 機能し、ロックアップクラッチを完全に ロックさせた状態で要求された減衰性能を 達成するよう設計された。

CPA をさらに進化させていくにあたり、ロ バスト性だけでなく、減衰性能の改善にも 焦点を当てて開発を行った。図8で示した ように、トーションダンパーとCPAシス テム(図中DD+CPA)の組み合わせに より、4気筒エンジンにおいてクラッチを 完全にロックさせた状態で、エンジン回転 数を1,000rpmまで下げても目標とする NVH性能を達成した。このCPAの適用に よって、より低いエンジン回転からのロッ クアップが可能となり、燃料効率がさらに 向上した。

将来は、ドライブトレインの効率性向上の ため、ロックアップ回転数の下限をさらに 下げることが求められることが予想される。



8 Isolation comparison of torsion dampers with and without a CPA

## ダブル遠心振り子ダンパーを搭載した トーションダンパー

トーションダンパー (以下 TD) およびダ ブルトーションダンパー (以下 DD) は、 最もよく CPA と組み合わされるダンパー システムである。CPA 搭載 DD は後輪駆 動車に、CPA 搭載 TD は前輪駆動車に適 している。これは、軸方向の許容される 搭載スペースが小さいことに対応するた めであるが、低中速域での減衰性能は DD よりも劣る。対応としては CPA 後方のス プリングダンパーを適用する案もあるが、 前輪駆動車の場合、低中速域での振動に 対する感度が低いため、その対応は不要 である。 図9で示すDD+CPA(青線)の場合、 CPAはスプリングの間に設けられた中間 フランジ上のタービンと組み合わせて配置 され、1,000rpmより高い回転数で減衰 能力を発揮するが1,000rpm以下では、 入力シャフトの振動によって使用が制限 される。CPAの慣性マスを2倍にしてバ ネレートを20%低減させたとしても、フ ルロックアップ回転数を1,000rpmから 800rpmに低減させることは不可能であ ることがわかる(DD+CPAx2 水色線)。

これに代えて、CPAをタービンと組み合わせてダンパー出力部に配置した場合、 トランスミッション入力シャフトの振動 モードの固有振動数は中速域にシフトする (SCD+CPA赤線)。



9 Isolation comparison of torsion dampers with CPA and double CPA

11 | TORQUE CONVERTER 187

DD+CPAと比較した場合、このCPA付き シリーズトーションダンパー (SCD+CPA) は 1,000rpm 未満でも優れた減衰性能を 発揮する。ただしその分、1,000rpm か ら 2,000rpm の中速域での共振点の減衰 性能は妥協が必要となる。

ダブル CPA 搭載型(DD+DCPA 緑線) も 有望なソリューションである。ダブル CPA の画期的な点は、従来型ダンパーコンセプ トのさまざまな長所を組み合わせている 点にある。CPAはどちらも同じ次数にな るように設計される。1,000rpm 以上の 領域では、中間フランジ上のCPAが減衰 性能を発揮し、1,000rpm以下の領域で はダンパー出力部にある二つめのCPAが 800rpmのロックアップ回転数まで減衰 性能を発揮する。ダブル CPA では、シン グル CPA を搭載したトルクコンバータよ り小さい振り子が使用できるが、はるかに 優れた減衰性能を発揮する。このことから もCPAの配置が重要であることは明らか である。同コンセプトは気筒休止にも適し ており、CPA のいずれか一方はエンジンの 全気筒運転に対応し、もう一方は気筒休止 運転に対応するように設計される。

ダブル CPA では、一つ目の CPA を小型化 できるが、全長は通常の CPA よりも長く なってしまう。そのため、ダブル CPA 搭 載型 DD (DD+DCPA) の設計にあたって は、システム全体をできる限りコンパクト にすることが最優先課題となる。二つめの CPA のために軸方向の所要スペースを縮小 する目的で開発されたインライン CPA を 図 10 に示す。

この設計では、振り子とローラーがフラン ジと同一平面に配置される。振り子はフラ ンジ両面にある薄いカバープレートと結合 されており、振り子の重量、イナーシャを 同等とし、二つめの CPA における軸方向 の所要スペースが約 2mm 縮小される。

#### 4気筒エンジンにおける気筒休止

CPA ダンパー付きトルクコンバータは、気筒休止付き4気筒エンジン用に適用され 量産が開始されている。気筒休止エンジン では、気筒休止中かつ低速域での減衰性能 が最大の課題である。このダンパーコンセ プトはエンジン全気筒運転状態に限らず、

**10** Design of the inline CPA using a DTD with a double CPA as an example

気筒休止運転状態でも十分な減衰性能を達 成することが前提となる。気筒休止中はエ ンジンの励起周波数が半分になり、固有振 動数がアイドル回転数以上にシフトされ る。全気筒、気筒休止、および低速での運 転でもロックアップクラッチを完全に締結 した状態で、十分な減衰性能を実現するこ とが目標となる。図11で示した CPA を使 用しない量産ダンパーコンセプト(赤線) では、エンジン全気筒運転時(図11上) には十分な減衰性能を発揮するが、気筒休 止時(図11下)では、減衰性能は許容で きないレベルとなる。

対策として、CPAの追加およびばね定数 を2段特性としたねじりダンパーの組み合 わせがある。CPAとダンパーのばね定数の 1 段目の特性を 2 気筒向けの設計とするこ とによって、減衰効果を大幅に向上させ、 ロックアップ回転数を 1,200rpm まで落 とすことが可能となる。

さらなるエンジン全気筒運転時の減衰性能 向上として、CPA を二つ追加するダブル CPA コンセプト(CD+DCPA 緑線)があ るが、設計スペースが広がる課題がある。 それに対応するため、二つめのねじりダン パーを CPA に置き替えれば、設計スペー スを拡張する必要はない。残る上流側のね じりダンパーは、入力される振動により最 適化が必要となる。このコンセプトは、全 気筒および気筒休止運転のほぼ全速度域で 非常に優れた減衰性能を達成する。



11 Isolation potential of torsion dampers with CPA and double CPA upon cylinder deactivation of two cylinders of a four-cylinder engine

#### 重力が CPA におよぼす影響

通常重力の影響は無視できるレベルである が、メインの回転次数が一次となる用途で は、ドライブトレインの減衰性能に加えて、 重力の影響にも対応するソリューションが 必要となる。

次数の設定に関わらず、重力はすべての振 り子に少なからず影響をおよぼす。振り子 に掛かる重力の影響は、1回転につき1回 方向が入れ替わる。つまり、重力は振り子 への一次入力である。1,000rpmを超え る回転数では、遠心力は重力より100倍 以上大きい。それでも、一次振動に設計さ れた振り子は、重力の一次入力により共振 周波数で振り子を振動させる。振り子を三 つ用いる構成の場合、この重力による入力 の位相は振り子ごとに120°シフトする。 図 12 で示しているように、これによって ねじり加振されずに単純に回転だけ行って いる状態でも、振り子がそれぞれ120°の

位相差で重力により加振される。つまり特 に低速域においては、重力の影響に加えね じり振動を吸収するために、CPA はより大 きな揺動角度が必要となる。

この重力による共振に対するソリューショ ンが、振り子の慣性マスをスプリングに よって互いに連結させる第3世代の CPA (カップル式振り子)である。スプリング は振り子どうしをリンクさせて振り子の加 振タイミングのズレを防止し、重力による 加振を解消する。スプリングにより追加さ れた慣性マスがねじり振動の減衰性能にお よぼす影響は、CPAの次数をシフトさせ て補正することで排除する。こうすること で、一次ねじり振動を適切に吸収できるよ うに、CPAに十分な揺動角度を確保するこ とができる。

2015年に一次振動に設計された CPAの 開発中、重力による加振が減衰性能に大き な影響を与えることが分かり、振り子の



12 Effect of gravity on the pendulum motion in a 1<sup>st</sup> order CPA



13 Damper concepts TD and DTD with double CPA

同期が必要であることが明らかになった。 第3世代 CPA の効果はプロトタイプの試 験で確認されており、2017年に気筒休止 付き4気筒エンジン向けとして量産が開始 されている。

CPA は 幅 広 い 用 途 で、NVH 対 策 の た めのソリューションとして確立され ている。目標とする減衰性能、ドラ イブトレイン、設計スペースといっ た 個 々 の 要 件 に あ わ せ て、CPA を 採用したさまざまなダンパーコンセプトを 図 13 で示す。現在のラインナップは、8 気筒から3気筒までの気筒休止有/無エン ジン、前輪/後輪駆動、トルク 250Nm ~ 900Nm など、幅広い用途に対応している。

# トルクコンバータ内のダンパー

エンジン回転数に関係なく特定次数の成 分を相殺できるCPAは、あらゆる速度 範囲にわたって卓越した減衰性能を実現 できる。ただし、励振次数が一次を下回 る用途では、CPAの設計スペース要件

(ガイド軌道長さ、曲率)を満足させるこ とが難しくなり、設計難易度は高まる。

こうした一次を下回る次数では、振り子の 設計がより困難になる。ここで振り子の代 替品となり得るのが、タービンティルガー (ダイナミックダンパー)である。タービ ンティルガーは、ロックアップクラッチを 閉じた状態ではタービンをダンパーの慣性 マスとして使用する。トルクコンバータに は通常タービンが組み込まれているため、 重量増加がほぼないが、ダンパーの効果を 上げるために慣性マスを追加することも可 能である。図14で示したように、タービ ンティルガーコンセプト(DD+TT 緑線) ならば、従来の量産型ダンパー (SCD 赤 線)に比べて特に低回転域での減衰能力を 向上させることができる。

タービンティルガーを搭載した最初のダン パーコンセプトは2007年、CPAと同時 期に開発された。当初は、全速度域で効 果のあるCPAが脚光を浴びていた。最近 では、例えば3気筒エンジンの気筒休止 によって、一次未満の次数に対応できる



14 Isolation comparison of torsion dampers with and without turbine tilger

タービンティルガーの減衰性能への需要が高 まっている。

初期のタービンティルガーコンセプトで は、第3のトーションダンパー(図14左 桃色)を追加して、シリーズトーション ダンパー(黄色)にタービンを連結して いた。量産化にあたっては、トーションダ ンパーがシリーズトーションダンパーと同 じ径に組み込まれ、設計スペースの最適化 を行った。これによりできたスペースに プレス加工で成形した慣性マスを追加するこ とも可能である。シェフラーはタービンティ ルガーコンセプトを適用したトルクコンバー タを、2018年に量産を開始する。

## 今後の製品への技術移転

前の章ではトルクコンバータとこれに関連 する振動減衰システムに関する技術につい て紹介してきたが、これらのコンセプトは ドライブトレインのほかのコンポーネント、 アセンブリ、システムにも応用できる。応用 が見込まれる技術には、以下のものがある。

- 成形加工技術:高密度焼結または鋳造による高価な鉄製部品を軽量設計が可能なプレス加工部品に置き換える、あるいはほかのコンポーネントに組み込む。
- 接合技術:過去数年で、特に成形加工技術 と相まって進歩したリベット締め技術を始 めとして、さまざまな形で技術革新が行わ れている。
- 摩擦システム:シェフラーでは長年にわたって、摩擦材料の開発に積極的に取り組んできた。トルクコンバータ向けに開発した特殊な摩擦材料は現在、シェフラーが提供するほとんどのトルクコンバータのロックアップクラッチ用に採用されている。湿式摩擦材料[4]における専門知識は、要件や環境条件が近似しているオートマチックトランスミッション(以下AT)のクラッチにも応用できる。

ATも、今後のドライブトレインの電動化の対象である。シェフラーではトルクコンバータ

内蔵型 P2 ハイブリッドモジュールを開発した[5]。ハイブリッドモジュールをエンジン とトルクコンバータの間に配置する従来型の 設計に代えて、モータのロータをトルクコン バータカバーにリベット締めする。こうする ことで中間壁が不要となり、軸方向の設計ス ペースを縮小できる。C0 クラッチは湿式で、 プレス加エコンポーネントとして設計されて おり、トルクコンバータ用ロックアップク ラッチと同じ摩擦材料を使用している。前述 したような P2 タイプハイブリッドモジュー ルの量産は、2019 年の開始を予定している。

ハイブリッドモジュールやデュアルクラッチ の開発で得られた知見を、AT のクラッチにも 応用していく。

シェフラーでは、最適化したスペースの範囲 内で設計を行うだけでなく、高トルク容量お よび引きずりトルクの低減を実現する摩擦シ ステムを開発している。こうしたモジュール のコンセプトについて図 15 に示す。

上記コンセプトで示したようなプレス加工お よび接合方式の最適化によって、同等性能 の量産設計と比較して軸方向の設計スペー スを10mm ほど縮小、重量を最大20%



application

- 24 % reduction in inertia
- 20 % reduction in mass
- 10 mm reduction in axial space

**15** Concept for clutches with an optimized design space



16 Concept of a clutch with self-amplifying actuation

低減することが可能となる。検討にあたって は、摩擦システム内におけるオイルの流れ 特性を把握するため、流体シミュレーション (CFD)解析を実施しており、トルクコンバー タの分野でも、同様の技術を利用している。 こうした流体シミュレーションでは、摩擦材 料の溝形状を最適化し、オイルの流れを理想 的な形にして熱伝達を最適化することに加 え、引きずりトルクを可能な限り低くするこ とを目指している。

最先端の自己増幅型クラッチコンセプトを図 16に示す。ここではリーフスプリングがク ラッチ締結力の一部を担うことによって、ク ラッチ作動圧力や油圧損失の低減を可能にす る[6]。

この技術に変更を加えたものが、オートバイ 用のクラッチとして量産されている。 まとめ

## Literature

本稿では、AT用のダンパーおよびトルク コンバータシステムの設計スペース、重 量、制御、効率性を最適化するためにシェ フラーが提供しているさまざまなアプロー チを紹介した。あらゆる運転状況における ロックアップクラッチの制御性を改善する ために、4パス式トルクコンバータは優れ たソリューションである。一体型トルクコ ンバータ (iTC) は、ピストンをタービン に組み込むことで、コンパクトな設計が可 能となり、そこで作り出されたスペースの 有効的な活用例を紹介した。iTC の設計お よびプロセス技術に関するそのほかの改善 点についても紹介した。

トルクコンバータにおいては、減衰性能も 重要な役目を担っている。遠心振り子式ダ ンパー (CPA)の可能性については、活用 できる余地が大いに残されている。ここで はダブル CPAを搭載したダブルトーショ ンダンパーをトルクコンバータに用いる新 たなアプローチを紹介した。さらに気筒休 止機能を適用した4気筒エンジン用ダン パーコンセプトに加え、特定用途において CPAの代わりとなる、タービンをダンパー の慣性マスとして使用する方法も紹介し た。

トルクコンバータと関連する振動減衰シス テムに関するシェフラーの専門知識は、ド ライブトレインの電動化にも活かされる。

- Kooy, A.; Seebacher, R.: Best-in-Class Dampers for Every Driveline Concept. 11. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2018
- [2] Lindemann, P.; Steinberger, M.; Krause, T.: iTC

   Innovative Solutions for Torque Converters
   Pave the Way into the Future. 10. Schaeffler
   Kolloquium, Baden-Baden, 2014
- [3] Fidlin, A.; Seebacher, R.: DMF Simulation Techniques – Finding the Needle in the Haystack. 8. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2006
- [4] Rathke, G.; Grethel, M.; Baumgartner, A.; Kimmig, K.-L.; Steinmetz, S.: Made-to-Order Double Clutch Systems. 11. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2018
- [5] Reitz, D.: P2 HV Drives The Most Efficient Hybridization for all Transmissions. 11. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2018
- [6] Freitag, J.; Häßler, M.; Lehmann, S; Raber, C.; Schneider, M.; Wittmann, C.: The Clutch Comfort Portfolio – From Supplier's Product to Equipment Criterion. 10. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2014



# Innovative Bearing Concepts for the Powertrains of the Future

Georg von Petery Reinhard Rumpel



## はじめに

トランスミッションの摩擦と出力密度を改 良する際、最新の転がり軸受が必要不可欠で ある。パワートレインの電動化開発の波を受 け、この重要コンポーネントとなる軸受で は、新たな設計スペースや諸条件に適合する 最適な設計が必要となり、この流れから、新 たな軸受タイプやコンセプトが登場してき ている。

本稿では、低摩擦の固定側/自由側軸受支持 部の使用機会を、これまで以上に増やすこ とができる新しい軸受設計を紹介する。ま た、既存の軸受設計の最適化を着実に進める ことで、さらなる摩擦低減や必要設計スペー スの縮小のほか、電気駆動装置による適正温 度下での高速対応についても紹介する。さら に、コーティング技術の適用によって使用限 度の拡大を可能にする方法についても紹介 する。

## 転がり軸受への今後の要求

より厳しさを増している CO2 排出量規制は、 トランスミッションの設計如何を問わず、ト ランスミッションの開発を始めとした重要 なトレンドを決定付ける要因となっている。 新しい電気駆動装置によって、ほんの数年前 に予測されていたよりも早いペースで、軸受 技術への要求は変化してきている。この変化 を後押ししているのが、ハイブリッド化、ハ イブリッド専用トランスミッション (DHT) および電動アクスルである。この理由から、 今後のトランスミッション軸受の議論には、 トランスミッションだけでなく、それらを 駆動するための駆動ユニットに内蔵される モータも対象に含まれることになる。

このような背景から、新しく電動化製品で使 用される軸受には以下を始めとする新たな 要求が含まれてくる。

- ・低摩擦およびより高い定格荷重化
- 高速化:現在、回転数と平均軸受ピッチ 円の積で表される速度パラメータは、オ イル潤滑タイプのトランスミッション軸 受で約20万~50万mm/分の範囲だ が、グリース潤滑したモータ軸受では最 大130万mm/分までの高速化。
- ●ノイズ低減
- 軸受内外輪間の温度差拡大対応:停止/ 発進がより頻繁に行われ、またロータからの熱伝達が発生するため、軸受の内輪と外輪との温度差は、15K~20Kの範囲から最大70Kまで増大する。軸受の内部すきまの寸法設計ならびに軸受の内輪と外輪の熱処理設計には、こうした大きな温度差を考慮することが必要不可欠となる。
- 電蝕、および絶縁対策
- 出力密度の向上
- グリース潤滑:現在市販されている高速 用グリースは、温度上限が低すぎる。従 来の高温用グリースは、温度の点では非 常に安定しているが、速度パラメータ n × dm は最大100万mm/分に制限さ れている。シェフラーは新たに開発した グリースにて、速度パラメータと温度安 定性という二つの相反する目標の両立に 成功した。
- オイル潤滑:トランスミッション軸受では、使用するオイルの低粘度化が進むことによって混合潤滑下での作動頻度が上昇する。その結果、表面起点による損傷発生の確率が高まる。現行のトランスミッションオイルには、軸受内でのホワイトエッチングクラック(以下WEC)の発生を促進させてしまうものもあるが、シェフラーが開発したDurotect B コーティングでは、こうした作用を抑制することができる。

# 新しい軸受コンセプト

## 摩擦を最適化した円すいころ軸受と、 固定側/自由側軸受支持部

高性能転がり軸受の存在なくして、現在のト ランスミッションは考えられない。軸受は特 定用途にあわせて、またシステム全体を念頭 に置いて設計される。このような背景から シェフラーでは、独自の計算プログラムを開 発した [1]。

現在、トランスミッションシャフトの多くが 円すいころ軸受で支持されている。その理由 は、このタイプの軸受はロバスト性が高く、 荷重支持性能が非常に優れているからであ る。さらに、円すいころ軸受は比較的断面積 が小さく、組み立てもきわめてシンプルであ るという特徴を備えている。

シェフラーでは円すいころ軸受の継続的改良 をつうじて、性能向上と摩擦トルクの低減に 努めている。最新の設計では、個々の用途に 特化した設計を、高水準の製造技術と組み合 わせている。その一環として、接触角度の設 計最適化、特殊な軌道形状の採用、最適な長 さおよび直径の円すいころの使用、特定荷重 にふさわしいローラー数の選択、公差範囲の



1 Comparison of ultra low friction tapered roller bearings

縮小、表面処理、材料および熱処理プロセス の改善などを実施している [2]。

CAE モデルの最適化ツールとしてシェフ ラーが開発した OPTIKIT プログラムでは、 自由に設定可能な目標パラメータおよび外部 条件との調整を取りながら、円すいころ軸受 の設計を進めることができる。BEARINX に 組み込まれているこの自動最適化ツールを使 用することにより、同じ時間内で、手作業で 行った場合に比べてはるかに優れたソリュー ションが得られることが分かっている [1]。 シミュレーションによる最適化による成果 が、T29D 製造規格に準拠し、きわめて優れ た低摩擦トルク性を実現した「超低摩擦」(以 下 ULF) 円すいころ軸受である(図 1)。

円すいころ軸受の開発が進化する一方で、現 状の固定/固定支持を固定/自由支持に換え ることによって、軸受のアキシャル予圧が不 要となり、摩擦力をさらに低減できる。トラ ンスミッション効率の最適化のために膨大な 時間と費用が投じられた結果、既存のトラン スミッションや新規設計の根本的見直しにつ ながるような、軸受コンセプトが開発され た。将来のトランスミッションに対応する形 で、トランスミッションで使用される軸受の 支持構造を、固定/自由支持に換える検討が 始まっている [3] (図 2)。

深溝玉軸受は固定側軸受として、また円筒ころ軸受、あるいは径方向でコンパクトなシェ ル型円筒ころ軸受は、自由側軸受として使わ れている。このメリットの一つは、比較的低 負荷の運転状態において、深溝玉軸受におけ る点接触では、円すいころ軸受における線接 触に比べて低摩擦であることが挙げられる。 ただしその一方で、深溝玉軸受では定格荷重 が比較的小さくなる。また、軸方向および径 方向にある程度のすきまを要する。こうした 理由から、個々の用途に適しているかについ ては、その都度確認していく必要がある。





2 Adjusted tapered roller bearing supports (left) versus locating/non-locating bearing supports (right)

# アンギュラローラーユニット (ARU): 高い定格負荷重/低摩擦を両立させた 革新的な固定側軸受

設計スペースに変更を加えることなく固定 側/自由側軸受支持を導入するため、シェフ ラーは「アンギュラローラーユニット」(以 下ARU)と呼ばれる新しい革新的な固定側 軸受を開発した。ARUは深溝玉軸受に比べ て定格荷重がかなり高いにも関わらず、低摩 擦で稼働する。定格荷重の同じ深溝玉軸受と アンギュラローラーユニットの寸法比較を 図3に示す。

新たな軸受設計は、前述したような円すいころ軸受の進化による恩恵を受けている。そのため、ARUは一見すると円すいころ軸受に



3 Comparison of the dimensions of a deep groove ball bearing and an angular roller unit with the same load rating



Tapered roller bearing
Supports load in one direction
Separate outer ring
Lips at inner ring only



Angular roller unit

directions

• Supports load in both

• Lip at inner and outer ring

• Self holding design

4 Comparison of the design principle of a tapered roller bearing and an angular roller unit (ARU) (left) as well as loading conditions for an ARU with preferred direction (right)

似ているが (図4、左)、設計上の本質的 特徴のいくつかが異なっている。例えば、 ARUは円すいころ軸受とは違い、単列軸受 として両方向の軸力を支持できる(図4、 右)。ただしその分、円すいころ軸受と同様 に軌道を介して高い軸力を伝達できるよう、 推奨されている方向に軸受を取り付ける必 要がある。内輪/外輪のつばが、推奨方向に 対して働く両方向の軸力を伝達する。このた め、円すいころ軸受の場合とは異なり、テー パを付けたローラーの両端に機械加工を施 している。つばを付けることによって ARU は両輪側で非分離となるため、深溝玉軸受と 同じ方法での取り付けや、所定の内部すきま にあわせての製造が可能となる。この結果、 軸方向すきまも深溝玉軸受と同程度になる。

ARUは、深溝玉軸受の場合よりも高い定 格荷重を要するあらゆる取り付け位置に適 している。その際、発生する軸力高さを精 査したうえで、規定された方向に軸受を取 り付けることが必須条件となる。

## 各種軸受コンセプトの シミュレーション

現行の FF6 速マニュアルトランスミッショ ンを使用して、さまざまな軸受コンセプト の特性を比較した。図 5 は、前輪駆動タイ プのコンパクトカーで使用されるマニュア ルトランスミッションにおける約 250Nm までの入力トルク条件での計算モデルであ る。この例ではすでに、トランスミッショ ンの出力シャフトに組み込んだ ARU を含 んでいる。

軸受を比較するにあたり、出力シャフトを 例として使用し、同一の設計空間を用いて、 4種類のコンセプトを解析した。



5 Mounting position of an angular roller unit (ARU) in a six-speed manual transmission on the transmission output shaft



- と 固定 グ 固定 軸 受 受
  持;摩擦を最適化し
  た円すいころ軸受
- 固定/自由軸受支 持;深溝玉軸受およ び円筒ころ軸受
- 固定/自由軸受支 持; ARU および円 筒ころ軸受

図6は、上記の軸 受バリエーション おける5速ギヤ 時したものである。 上のグラ月失からは、 標準的な円すいこ

# る軸受では、摩擦

が最も高くなっていることがはっきりと見 て取れる。摩擦を最適化した円すいころ軸 受は、これだけでかなりの低摩擦損失を実 現しているが、深溝玉軸受や円筒ころ軸受 を使用した固定側/自由側軸受支持部の性 能は、これをさらに上回っている。摩擦に 関して言えば、ARUと円筒ころ軸受を採 用した固定側/自由側軸受支持部も、深溝 玉軸受を利用したソリューションと同様で ある。

計算寿命という点では、低摩擦に特化して 調整を施した円すいころ軸受が、最も優れ た性能を示している。ただし、多くの用途 でサイズが大きすぎて、摩擦も大きすぎる ことから、推奨できる選択肢とはならない。 最適化を施した円すいころ軸受は、従来型 の円すいころ軸受を採用した軸受支持部に 比べて、短いながらも十分な定格寿命を有 している。通常は、摩擦特性の面で非常に 優れた固定側/自由側軸受コンセプトが



6 Simulation of friction (top) and rating life (bottom) for the 5<sup>th</sup> gear of a manual transmission

推奨される。ところがその計算寿命は、5 速ギヤ時に深溝玉軸受を使用したソリュー ションに対して十分であるとは言えない。 一方、ARUを固定側軸受として使用した 場合、最適化を施した円すいころ軸受より も長い定格寿命でより低い摩擦を実現でき る。そのため、円すいころ軸受支持から固 定/自由支持への転換を、設計スペースの 変更なしに行う場合、ARU軸受を固定側 軸受として使用する方法が唯一の選択肢と いうことになる。

#### シミュレーション結果の検証

ARUの摩擦挙動について、シミュレーション結果と試験との間には、非常に高い相関 関係が見て取れる(図7)。摩擦トルクの 一般曲線と、測定および計算による摩擦ト ルクの値は、いずれもかなりの精度で一致 している。



7 Comparison of the simulated friction torque and the friction torque measured on the test stand for the new ARU bearing design

摩擦トルクと並行して、定格寿命試験につ いてもシミュレーションと試験結果の比較 を行った。図8は、定格寿命試験に使用し た設備の概要である。試験は、推奨方向に 静荷重をかける方法(試験A)と、荷重方 向を変更しながら行う方法(試験B)の2 通りを実施した。

#### 円筒ころ軸受の開発

ARUは、従来の深溝玉軸受に比べて出力 密度が高い、新しい固定側軸受である。当 然ながら、自由側軸受における最適化の 可能性としてはどのようなものがあるか、 という疑問が生じることになる。設計上、



8 General design of the test stand used to validate the rating life calculations for the new ARU bearing design

軸受内の変位を許容することによって、軸 受外輪とハウジングとの間に発生する変位 を防止する性質をもつ円筒ころ軸受が、理 想的な自由側軸受ということになる。つば を持たない内輪または外輪を備えた NUタ イプおよび Nタイプの単列円筒ころ軸受、 ならびに、外輪上に固定つば二つ、内輪上 に固定つば一つを設けた NJタイプの円筒 ころ軸受は、軸受内でシャフトの変位の影 響を受けないという点において、自由側軸 受として特に適している [4]。

従来の円筒ころ軸受の場合、自由側軸受と して使用するものであっても幅広のつばが 設けられており、軸方向つばの荷重がか かることはなかった。トランスミッショ ンという観点から見れば、スペースを余分 に取りすぎるため幅広のつばは好ましくな い。最適化の可能性としては、つばを可能 な限り狭くして軸受を設計するという方法 が考えられる。技術的には幅1ミリ強の つばを製造することは十分可能であるが、



9 Increase in radial load capacity and reduction of design space requirements and weight through an improved design using an RNU308-E-XL type cylindrical roller bearing as an example この設計の有用性は以下の二つの理由によ る。一つは、径方向負荷性能を変更するこ となく、軸受の幅と重量を低減できること。 もう一つは、軸受の幅を変更することなく、 径方向負荷性能を大幅に向上させることが できることである。図9は、定格荷重、重 量、設計スペースに関するメリットの例と して、RNU308-E-XLタイプの円筒ころ 軸受のケースを示す。

# オートマチックトランスミッションお よび CVT 用軸受

トランスミッションには、転がり軸受支持 部をもつコンポーネントが数多く使われて いる。軸受設計は、基本的には、トランス ミッションのタイプと構造設計によって決 まる。マニュアルトランスミッション、ダ ブルクラッチトランスミッション、CVTに おいては、円すいころ軸受、深溝玉軸受、 円筒ころ軸受またはシェル型円筒ころ軸受 が軸支持に使われる場合が多くなってい る。常時噛み合い歯車は、ローラーとケー ジアセンブリ(ケージ&ローラー軸受)に よって支持されている。一方、トルクコン バータを備えたオートマチックトランス ミッションには、スラスト針状ころ軸受、 ケージ&ローラー軸受、遊星ギヤ軸受が数 多く使われている。

定格荷重と速度レベルにもよるが、シミュ レーションベースの形状設計とこれに相応 した製造プロセスによって、スラスト針状 ころ軸受の摩擦を最大50%まで低減する ことが可能となっている。新たな形状では 軌道はわずかにカーブしており、低-中負 荷ではほぼ点接触になるため、ニードル ローラーの差動滑りが低減され、摩擦損失 が低減される。また高負荷では完全線接触 が形成されるため、高い定格荷重が確保で きる。この軸受はすでに量産が開始されて、 試験の結果もまた、非常にコンパクトな



10 Increase in robustness against WEC damage with Durotect B

スラスト針状ころ軸受によって、遊星キャ リア軸受支持部においては摩擦面で大きな メリットが得られることが確認されている。

相対速度が高速であるため、遊星ギヤ軸受 は多段オートマチックトランスミッショ ンにおいて、場合によっては重力加速度 の 5.000 倍にものぼる極度の加速にさら される。結果として生じる力は、遊星ギヤ 軸受の弾性変形ならびに摩擦増大、さらに は接触形状が不適切なものとなることで、 ケージ摩耗の原因となる。ケージ、特に転 動体間にあるケージバーの形状を最適化す ることで、耐久性は大幅に向上する。ショッ トブラストプロセスを追加し、これによっ て残留圧縮応力が加わることによって、 ケージ強度をさらに向上させることができ る。遊星ギヤアッセンブリ評価設備におけ る試験では、強度の向上が確認されたほか、 ケージ摩耗が低減することも証明された。 シェフラーの Durotect M でコーティン グした場合、ケージ表面の状態によっては 最大25%まで摩擦を低減する効果がある ことが確認された。

WECによるダメージは、転がり軸受で頻 繁に発生するようになってきた。これは 機械的負荷やそのほかの新たな負荷が加 わることによって、軸受材料の組織変化 にともなって発生する亀裂で、自荷がか かっている間に表面まで広がる可能性があ る (図 10、左)。WEC は、用途や軸受の 種類を問わず発生する。シェフラーが開発 した Durotect B コーティングは、WEC による損傷に対するロバスト性を大幅に 向上させる。WEC 発生条件を狙って行っ たベンチテストでは、耐久時間が3倍に なることが証明されている (図10、右)。 Durotect B コーティングを施したトラン スミッション軸受は、CVTトランスミッ ションに採用されている。



11 General measures against current damage to bearings

# 自動車用電気駆動装置に特化した 軸受コンセプト

電気駆動装置で軸受を使用する場合、通電 が生じると、場合によっては融解や部分的 再硬化、電蝕の原因となるおそれがある[4]。 通電を防ぐには、一般的に二通りの方法が ある(図11)。内輪または外輪にセラミッ クプラズマスプレーコーティングによる 気的絶縁対策を施した軸受は、鉄道車両の 発電機やトラクションモータにおける電 の問題をパワートレインのほかの箇所に転 の問題をパワートレインのほかの箇所に転 する可能性が残る。したがってシェフラー では、内輪と外輪の間における電位を防止 するためグランドー体型の軸受を開発した。 本技術に対しては、すでに初期試験を実施 し、効果があることが証明されている。

深溝玉軸受[5]は主に径方向負荷、そして コストが決め手となって、モータの軸受支 持部として使われている。モータの軸受支 持部においては、ロータをステータに精 度よく位置決めし、確実な動作を低騒音 レベルで実現することが必須条件となる。 内輪と外輪の温度差が大きいために必要と なる、ラジアル内部すきまの増加分を補正 するよう、はめあいおよび軸方向取付け位 置が最適化されている。また軸受の内輪と 外輪は、稼働温度が高温になった場合のリ ングの寸法変化を抑制するための処理がな されている。

使用寿命を延ばすためにグリース封入シー ル付高速軸受は、ハイブリッドシステムや 電動アクスルなど、ほとんどのモータで必 要となる。そのためシェフラーは、電動ト ランスミッションに関するこれらの新しい 要件に特化して最適化された、電気駆動装置 用軸受を開発した(図12)。推奨仕様を選 択することで、サンプル納入期間が短縮で き、価格面でも有利となる。高度な製造精 度と、特殊開発されたグリース、シール、ケー ジを組み合わせることで、n×dm(回転数 ×ピッチ円直径)で130万mm/分超とい う高速パラメータを達成し、すでに試験で も実証されている。現在の電動パワートレ インにおけるモータの速度パラメータとし ては、50万~100万mm/分が一般的で ある。高出力密度のコンパクトドライブを



12 Bearing concept requirements for electric drives



13 Integration of bearing systems using a bearing cartridge for a hypoid drive as an example

実現すべく、さらなる許容回転数の上昇に 取り組んでいる。 電動トランスミッション用に最適化した軸 受支持部が使われている[8]。

電動アクスルでは、ロータに限らず、スプ ラインを介してモータと連結されたトラン スミッションの入力シャフトも高速で回転 する。よって、開放型設計を採用した新開 発の軸受は、こうしたオイル潤滑されたト ランスミッションシャフトの軸受支持部に 適している。

P2 タイプでのトランスミッションのハイ ブリッド化は、特に注目を集めている [6]。 P2 タイプのハイブリッドモジュールでは、 トランスミッションとエンジンとの間に モータが配置される。二つのクラッチを巧 みに作動させることで、電動のみ、あるい は二つの駆動力を組み合わせて使用してい る間も、エンジン単体で走行しているかの ようなドライビングを実現する [7]。加え て、コースティングおよび回生の機能も実 現できる。そこにこそ、シェフラーが P2 タイプ用ハイブリッドモジュールを開発し た理由がある。これらのハイブリッドモ ジュールやシェフラーの電動アクスルには、



14 Locating/non-locating bearing supports as a compact unit with a shaft and gear teeth for a hydraulic auxiliary drive in commercial vehicles



15 Bearing with integrated resolver

## 統合型軸受システム

トランスミッション用途においては、転がり軸 受の最適化に加えて、アセンブリのさらなる小 型化が進んでいる。コンポーネントを組み合わ せて使用することによって、アセンブリ効率や 取り付け、設置スペースの点でメリットを提供 する一体型軸受ソリューションの需要が高まっ ている。

このタイプの統合の例としては、ピニオンフラ ンジ軸受とピニオンヘッド軸受をコンパクトな ユニットとして組み合わせたハイポイドドライ ブ用軸受カートリッジが挙げられる(図13)。 このソリューションによって、組付け性の向上 により高いロバスト性が実現可能になる。

軸受システム統合のもう一つの例を、図 14に示す。固定/自由支持は、ダンプト ラックといった産業車用の油圧式補助ド ライブの一部として、シャフトおよびギ ヤとともに一つのユニットを形成してい る。シャフトの機械加工も軸受メーカーの 担当範囲であるため、円筒ころ軸受を直接軌道 と併せて設計することが可能となる。円筒ころ 軸受と深溝玉軸受で外輪を共有させることに よって、自動車メーカー側でのアセンブリを容 易にする組立済みの軸受システムを実現できる。

パワートレインのデジタル化が継続的に進 められていく状況において、軸受への電子装 置組み込みを目指すソリューションに注目 が集まっている。例えば、従来は独立したコ ンポーネントとしてモータの近傍に設置さ れていたレゾルバを、レゾルバー体型軸受に 替えるといったような発展が考えられる(図 15)。シェフラーは、このように自動車産業 の枠を超えた用途にも応用可能な「インテリ ジェント軸受」の研究開発活動に尽力してい る[9]。

## まとめ

従来型あるいは電動パワートレインのどちら に使用する場合であっても、高度なロバスト 性を確保しながら摩擦を低減させることが、 今後もトランスミッション軸受の最大の課題 であり続けると思われるが、シェフラーが開 発した OPTIKIT プログラムを使うことで、 きわめて短時間での軸受最適化設計が可能と なった。円すいころ軸受の最適化設計により、 摩擦損失低減のメリットを最大 20%まで高 められることが分かった。このいわゆる「超 低摩擦」設計の円すいころ軸受については、 アクスルドライブ向けの量産が始まった。

シェフラーは革新的なアンギュラローラーユ ニット (ARU) によって、同一の設計スペー スにおける深溝玉軸受と比べて、低摩擦で定 格荷重が 40%高い固定側軸受を開発した。 狭いつばを採用した円筒ころ軸受は、最大 20%の軸受幅低減、あるいは同一の軸受幅で 最大 27%の定格荷重向上を実現する。これに よって、最新のマニュアルトランスミッショ ン、ダブルクラッチトランスミッションや 電動アクスルの減速機で必要とされる低摩擦 の固定/自由支持は、これまで以上に実現す ることができる。

電気駆動装置では高速化への志向が高まっ ており、最大30%軸受速度を高速化できる 状況となっている。このような高速化に対 応する信頼性の高い軸受支持部を実現する には、高精度で製造された軸受と特別に開 発されたグリース、シール、ケージの組み 合わせが不可欠となる。そのためシェフラー は、推奨タイプと組み合わせ、これら新しい 要件に特化して検討された電気駆動装置用 軸受を開発した。通電が発生する用途に向け て、シェフラーはグランドー体型の軸受を開 発しており、すでに試験においてその効果が 実証されている。コンポーネントを共有する ことで、このように高度に統合化された軸受 は、効率ならびに取り付け、設計スペースの 点においてメリットを提供している。

諸用途に合わせてカスタマイズを施した、き わめて特殊性の高いこれらの軸受構成を取 り揃えて、シェフラーは今後も従来型/電動 パワートレイン向けのトランスミッション の効率向上に貢献していく。

#### Literature

- Heinrich, D.; Kerstiens, J.; Schneider, M.: Innovative CAE – Optimal Layout of Transmission Components. 11. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2018
- [2] v. Petery, G.; Zintl, G.: Optimized Transmission Solutions with Innovative Products, Proceedings of CTI Symposium and Exhibition, Suzhou, 2014
- [3] Gröhlich, H.; Germershausen, D.: DQ381 The Latest Generation of Dual-Clutch Transmissions from Volkswagen, Proceedings of VDI Congress, Drivetrain for Vehicles, Bonn, 2017
- [4] Schaeffler: Wälzlagerpraxis, Handbuch zur Gestaltung und Berechnung von Wälzlagerungen, ISBN 978-3-7830-0401-4, 4. Auflage 2015
- [5] Bohr, A.-J.; v. Petery, G.: Bearing Development for Electric High Speed Drives and Hybrid Application, Proceedings of VDI Congress, Drivetrain for Vehicles, Friedrichshafen, 2013
- [6] Reitz, D.: P2 HV Drives The Most Efficient Hybridization for all Transmissions. 11.
   Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2018
- [7] Welter, R.; v. Petery, G.; Massini, S.; Eckenfels, T.: What Manual Transmissions of the Future Need, Proceedings of CTI Symposium and Exhibition, Berlin, 2016
- [8] Biermann, T.: The Innovative Schaeffler Modular E-Axle. 11. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2018
- [9] Schaeffler: FAG VarioSense-Lager Konfigurierbare Sensorlager für die Maschinen- und Prozessüberwachung, BearingNEWS vom 27. März 2017







#### はじめに

この数年で、ダブルクラッチトランスミッ ション(以下 DCT)は、オートマチックトラ ンスミッション(以下 AT)の分野で欠かせな い機構としての地位を確立した。運転する楽 しみ、快適性、効率を追求するこの分野の高 い要求基準を満たしているためである。DCT には、さらなる電動化によりさらに CO<sub>2</sub> 排出 量を低減できる大きな可能性がある。

シェフラーはここ数年、湿式ダブルクラッ チ(以下 DWC)、乾式ダブルクラッチ(以下 DDC)、および多種多様なアクチュエータな ど、トランスミッションの重要な部品を開発、 量産することで市場をリードしてきた。世界 全体で年間 400 万個を超えるダブルクラッ チを生産している。

コンパクトカーからスーパースポーツカー、 SUVまであらゆるタイプの車両を対象に、 パワートレインの効率および快適性のさらな る向上を目指して、カスタマイズされたソ リューションを開発している。



1 Half section of a wet double clutch with actuation bearings

本稿ではまず、さまざまな設計のダブルク ラッチを紹介する。幅広い設計により、シェ フラーは顧客ごとのニーズに合わせた最適な ソリューションを提供している。摩擦材の最 新開発品を以下に紹介する。開発が終了し、 量産待ちの状態にある新しい湿式摩擦材によ り、シェフラーは主要なコンポーネントを すべて自社製部品で構成する DWC システム を提供できるようになった。乾式アプリケー ションについては、B9000 摩擦材が、車両 の快適性の面で改良された。そして最後に、 効率、制御性、およびトランスミッションア クチュエータシステムのコストについて述べ ていく。

## DWC の製品ポートフォリオ

#### エンゲージメントベアリング付き DWC

図1に示したダブルクラッチは、ラジアル方 向に取り付けられ、エンゲージメントベアリ ングを介して作動する。このタイプの作動で は、クラッチの位置を固定しラジアル、アキ シャル両方向それぞれの力を支える支持軸受 が必要である。転がり軸受によって支えられ ているクラッチの動きにより、回転するシリ ンダーの摩擦損失は、油圧システムと比較し て最小限に抑えられる。この場合クラッチレ バー比はなく、直接作動するためレバー作動 式のクラッチと比較して設計スペースの面で 利点が生まれる。

## レバーアクチュエータ付き DWC

図2は内分比のあるDWCを示している。 この設計原理では、効率のよいエンゲージ メントベアリングにて連続して保持できる。 摩擦径の小さな内側のクラッチは通常、要 求トルク容量を満足させるためには、摩擦 板を追加するか、作動力を上げなければな らない。摩擦板の枚数には制限があるため、



2 Half section of a wet double clutch with internal ratio on subclutch 2

内側のクラッチには同じ作動力でより高い 接触圧を得るためのレバー比が必要になる。 これによって、わずかに必要な設計スペー スは大きくなるが、CO2排出量を増大させ ることなく要求トルクを伝達することが可 能になる。ここでも、作動力は転がり軸受 によって支えられている。レバーアクチュ エータと組み合わせたこのクラッチは、コ ストおよび効率面で優れたソリューション である。

#### ロータリーフィードスルー付き DWC

このクラッチは、油圧アクチュエータを備え たアプリケーションに特に適しており、わず かな油圧を追加するだけで、クラッチを作動 させられる。



3 Half section of a wet double clutch with rotary feedthroughs and rotating cylinders

この設計では、転がり軸受ではなくロータ リーフィードスルーを介して作動力がクラッ チに伝達される。スライドするシールリング を介して伝わる圧力は逃げやすく、圧力に応 じた摩擦損失が生じる。しかし圧力ピストン による摩擦材の直接作動では、エンゲージメ ントベアリングタイプに比べ、油室が狭く可 動域を大きく取れず、ストロークに限りがあ る。クラッチピストンの必要な戻り力は、内 部の圧縮ばねによって供給される [8]。

## DDC の製品ポートフォリオ

#### 摩耗調節機能付き DDC

DDC は今後も引き続きシェフラーのポート フォリオにおいて重要な役割を果たす。最大 280Nm までのトルククラスでは、この設計 がコスト効率の高いソリューションの代表で あり、引きずりトルクが抑えられているため、 CO<sub>2</sub> 排出量も削減できる。



4 Half section of two double clutches with wear adjuster



5 Half section of a dry double clutch without wear adjustment

このことは図4に示したすでに量産中の2 種類のクラッチで明らかになっている。こ れらのクラッチには摩耗調節機構が組み込 まれており、それぞれのアプリケーション はエンゲージメントベアリングによって作 動する。熱容量に関しては、低~中重量の 車両を対象として設計されている。

これらのクラッチは油冷式ではないため、 クラッチの必要熱容量を確保するのに必要 な鋳造製のプレートの重量が、湿式クラッ チより高い慣性モーメントにつながり、こ れがトーションダンピングシステムの二次 重量としても働く結果につながる。シール されたグリース潤滑軸受は、引きずりトル クがやや高くなるものの、DDCはそれに 適したアプリケーションにおいて、低コス トの有効な選択肢となる。

摩耗調節機構を取り外して熱容量を最小限 に抑えることで、低車重で150Nm までの 低トルクの車両に適したクラッチを提供する ことが可能になる。このクラッチは、低コス トを求める顧客のニーズにマッチしている。

## ダブルクラッチ用摩擦材

クラッチのカギを握るテクノロジーはトライ ボロジーである。湿式クラッチの場合これは スチールプレートとオイル、ならびに摩擦材 で構成される。シェフラーは乾式および湿式 両方のダブルクラッチシステムに向けて、独 自の摩擦材を提供している。

DWC および DDC の量産経験が、自社生産 の摩擦材を含めたシステム開発に不可欠で あった。シェフラーは顧客それぞれのニーズ にあわせて、機能をカスタマイズすることが でき、完全なシステムを提供できる独立サプ ライヤーになっている。シェフラー摩擦材は 量産の準備が整っており、スチールプレート の製造設備も完備している。波形スチールプ レート用にあわせて、製造プロセスも開発し、 2015 年から量産されている。 摩擦システムにより以下の特性を実現する。

- ●良好な熱放散
- 低引きずりトルク
- 高い静摩擦係数
- 少ないトルクばらつき
- 全ライフサイクルをつうじて、プラスの 動摩擦係数勾配(μ-ν)

この1層湿式摩擦材の開発に続いて、材料開発、 設計開発、表面処理技術、プロセス関連の専門 技術、シミュレーション、試験、製造技術まで 含めた総合的アプローチを図6に示す。要求さ れる特性を備えた湿式摩擦材の開発には、シェ フラーのさまざまな分野の専門知識を最大限活 用した。

市場に出ている他社の摩擦材と比較して、シェ フラーの湿式摩擦材は、新品状態から最大摩耗 状態まで、良好なパフォーマンスを示している (図7)。

シェフラー摩擦材の摩擦係数特性は、競合製品 の摩擦係数特性とほぼ同等である。そのため、 顧客の既存のアプリケーションにも使用できる。



6 Comprehensive approach to the development of Schaeffler's wet friction lining



7 Benchmark results for the dynamic friction coefficient of Schaeffler' s wet friction lining and a competitor product (new and after endurance test)

すでに市場投入されている1層材料に加え て、より先進のアプリケーションにも対応で きるよう現在2層の湿式摩擦材料が開発中で ある。両材料の断面比較を図8に示す。図 8の右側に示した通 り、2層の摩擦材料 は図中でアンダーレ

は 図中 で アンターレ イヤーと記されてい る 支 持 層 と、オー バーレイヤーと呼ば れる第二の層で構成 されている。

摩擦材は、支持層と 摩擦接触層の特性を 正確に調整すること で、要求特性に合わ せることができる。 例えば、荷物を満載 して上り勾配の道で 何度も発進させる 1-layer material



に適用していく。2層の湿式摩擦材料は、過酷

な条件で使用されるアプリケーション向けに、

パフォーマンスを確実に向上させつつ、最適

な費用対効果を実現するよう開発中である。

の開発ステップで得

られた検証結果を量 産アプリケーション

8 Schaeffler' s wet friction lining as a one-layer design (left) and the new development approach with a two-layer wet running friction material (right)



9 Comparison of dynamic friction coefficients of the one-layer and two-layer Schaeffler friction lining after 15,000 uphill starts at full load.

湿式摩擦材は、システムパートナーとして顧 客にサービスを提供するシェフラーにとっ て、その能力を発揮することにより、製品に 関する高い専門知識を示すよい例である。

湿式クラッチの場合と同様に、トライボロ ジーは乾式クラッチにも欠かせないもので ある。シェフラーは数年前から、ダブルク ラッチシステムの熱耐性、可用性、快適性に 関して、顧客の要求に応える乾式摩擦材を 開発してきた。シェフラーの RCF-1 および B8040 摩擦材は現在、世界的なベンチマー クになっている。

この分野での経験、および年間数百万台を量 産してきた実績をベースに、シェフラーは自 動クラッチ向けに新世代の乾式摩擦材を開発 してきた。2014年に開催した前回のシンポ ジウムで発表した通り、B9000摩擦材はさ らなる快適性が期待されている。 B9000とB8040のトライボロジーにおけ る減衰性能比較を図10に示す。

トライボロジーの減衰性能は、試験間隔、 温度、湿度、速度、定格寿命でさまざま な条件で繰り返し試験し、その結果を解 析したものである。青で示した B9000の ほうが、B8040と比べて優れた性能を示 し、特に厳しい条件であるスリップ回転数 200rpmで顕著である。

## アクチュエータのポートフォリオ

理想的なダブルクラッチシステムを作るに は、アクチュエータと高度なソフトウェア を用いた制御は欠かせない。シェフラーが 提供する市場で成功を収めてきたアクチュ エータのポートフォリオの一部を図 11 に 示す。


**10** Comparison of tribological system damping



シェフラーのアクチュエータシステムについ て簡単に概要を説明したのち、システムとい う視点でご紹介していく。これらをベースに、 競合システムと比較することで、さらに進ん だ開発について説明する。

## 電動油圧クラッチアクチュエータ ( 以下 HCA)

HCA[3] はリークフリーの電動油圧セクショ ンを用いて、最小限の損失で動力をクラッチ に伝える。このソリューションにより効率が 最大限に引き上げられる。

### レバーアクチュエータ

DDCとの組み合わせでは、すでに何百万と いうレバーアクチュエータが製造されてお り、湿式アプリケーション向けには油圧の最 適化のみが必要となる。スプリング支持式 のレバーがクラッチに作動力を伝え、レバー アクチュエータはクラッチハウジングに 組み込まれて、効率およびコスト面でメリッ トのあるソリューションである。

## アクティブインターロック付き ギヤチェンジアクチュエータ

数年前より、コストおよび機能面で、実績 あるギヤチェンジアクチュエータ(以下 GA)はさらなる改良が進められ、すでに量 産されている。GAは、二つのモータで駆動 し、一つはセレクト方向のため、一つはギ ヤシフト方向のためである。このように機 能を分離することで、理論的にはどんな数 のシフトレールでも動かすことができ、例 えばパーキングロックも容易に統合できる。 アクティブインターロック機構によって、 二つのギヤが同時に噛み合ってしまうのを 機械的に防ぎ、センサー追加の必要性を取 り除いている。また多くの箇所にプラスチッ ク部品を用いることで、軽量化、低コスト 化に寄与している。

#### システム専門知識

技術的な視点から見てシステムを正しく比較 するには、制御性や効率といった側面も評価 しなくてはならない。

#### システムの制御性

損失が最小限に抑えられるだけでなく、電動 油圧システムには制御面での利点もある。圧 力だけでなくストロークでもクラッチの作動 が制御でき、この点がこのシステムを競合シ ステムから差別化する要素である。ほかのシ ステムは通常、圧力だけを用いてクラッチを 制御している。

クラッチシステムのトルク測定結果を図12 に示す。左側の図は、圧力と伝達されるクラッ チトルクの関係を表したもので、右側の図は ストロークと伝達されるクラッチトルクの関 係を表したものである。



12 Torque characteristics of leakage-free systems with regard to controllability of the touch point



11 Portfolio of Schaeffler actuators: Hydrostatic clutch actuator, lever actuator and transmission actuator



13 Determination of the touch point by means of the pressure-travel characteristic curve of a double clutch system



14 Driving profiles and load spectra worldwide, determined in a separate driving profile and broken down by city, freeway, highway and uphill starts (customer usage profile – CUP)



**15** Components analyzed and their power losses

制御性の重要な側面として、いかにタッチポ イントを精度よく定義できるか、が挙げられ る。タッチポイントとは、クラッチがトルクを 伝達し始める点のことである。トルク容量が 10Nmとなる位置を制御上のタッチポイント と定義した場合、圧力 - トルク特性線図では、 ヒステリシスの影響で13Nmの差があり、そ れに対してストローク - トルク特性線図では、 2Nmの差しか無いことが図12からわかる。

電動油圧アクチュエータではストロークと圧力 の信号が両方得られるので、図13に示した通 り、タッチポイントはこれら二つの信号で決め られ、これがシステムの制御性における利点で ある。クラッチの実トルク伝達がないタッチポ イントは線図上で定義され、またエンジンから のトルク信号といったほかの入力パラメータに 関係なく定義される。上述した理由により、精 度のいいタッチポイントはクラッチによる自動 発進機能が要求されるシステムに必須であり、 パワートレインの電動化促進につながる。

#### システム損失の評価

技術面での評価を行うため、シェフラーは NEDC (New European Driving Cycle) や WLTP (Worldwide harmonized Light vehicles Text Procedure) といった統 ーされた検証モードだけでなく、何年も前 から独自に実際の運転状況と頻度を検証し、 図 14 に示した通り世界中の市場について それらの違いも考慮に入れてきた [6]。こ の実際の走行サイクルは、EU発行の RDE (Real Driving Environment Cycle) 測定基準に合わせることもできる [10]。

各コンポーネントによる損失を図 15 に示 す。

市場に出ている以下のシステムについて、 システム損失の比較を行う:

- 油圧:ロータリーフィードスルー付き DWC、油圧システムによるクラッチ作 動、変速、クラッチの冷却
- パワーパック:エンゲージメントベアリング付き DWC、パワーパックによるクラッチ作動、変速、クラッチの冷却
- 電動油圧:エンゲージメントベアリング 付き DWC、電動油圧アクチュエータに よるクラッチ作動、GAによるギヤチェ ンジ作動、電動ポンプによるクラッチの 冷却



Actuation CRS + clutch bearings Clutch drag torque

16 Power losses compared to "Hydraulic", "Power pack" and "Hydrostatic" systems at an average speed of 1,000 rpm and 1,800 rpm in relation to the crankshaft

シェフラーの推奨する電動油圧システムは、 競合製品と比較してパワー損失が最小である。

実際の走行サイクルにおける平均エンジン 回転数は、最新のダブルクラッチシステム 搭載車両では1,800rpmであり、NEDCの 平均エンジン回転数はそれに比べはるかに 低くなっている。そのため1,000rpmと 1,800rpmの二通りの平均エンジン回転数 において損失を検証した。

回転数の違いは以下に示す通り、クラッチ作動の引きずり損失に影響をおよぼす。エン ゲージメントベアリングで起動するクラッチ の場合、引きずりトルクは 0.25Nm と推測 され、ロータリーフィードスルーで起動する クラッチの場合、引きずりトルクは 0.5Nm と推測される (図 17)。軸受作動のクラッ チでは、これによってパワー損失が 50W から 25W に減少し、ロータリーフィードス ルー式では、回転数を 1,800rpm ではな く 1,000rpm と仮定すると、パワー損失が 95W から 50W に減少する。



17 Drag loss measurements of engagement bearings and rotary feedthrough 機械駆動式のポンプなど、クランクシャフト から動力を得ているシステムの場合、クラッ チや変速の消費電力は回転数に左右される。 油圧アクチュエータシステムは、平均圧力が 4bar 程度の8cm<sup>3</sup>/rev ポンプをベースに している。これによって、上述の回転数では パワー損失が160Wから90Wに減少する。

ここで評価したシステムでは、クラッチは要 求により制御される電気式の油冷ポンプ、ま たはクラッチとトランスミッションの両方を 作動させるために搭載された機械駆動式ポン プで冷却されている。電気式の油冷ポンプの 場合、サイクルに関連した損失は走行速度に 関係しないものとする。機械駆動式ポンプの 場合、ポンプに対する走行速度の影響はすで に考慮に入れられているので、ここでは損失 に加えない。

油圧、パワーパック、電動油圧の三つのベン チマークシステムの比較から、油圧システム は特に、回転数の変化に敏感であることが わかる。油圧システムの場合、1,000rpm で200Wだった損失が1,800rpmでは 55%高い315Wとなる。これに対して、電 動油圧システムのパワー損失は、上述の回転 数のレンジであっても、100W~120Wの 間で変動するのみである。

DDC システムにおいても、現在の市場の状況分析を実施した。

- パワーパック:エンゲージメントベアリン グ付き DDC、パワーパックによるクラッ チと変速
- エレクトロメカニカル:エンゲージメント ベアリング付き DDC、レバーアクチュエー タによるクラッチ作動、GAによるギヤチェ ンジ作動

DDC を用いる境界条件が適切に決まれば、 これらのシステムは低コストで効率のよい選 択肢になる。1,000rpm で、システムのパ ワー損失はわずか 75 ~ 90W である。

	System "Hydrostatic"	System "Powerpack"	System "Hydraulic"	System "Electro- mechanic"	System "Hydraulic/ Electromechanic"
Torque	> 300 Nm	> 300 Nm	> 300 Nm	> 300 Nm	> 300 Nm
Pressure level	40 bar	40 bar	15 bar	mechanic	15 bai
E-Pumps	2x Hydrostat +1x 4 cm³/U	1x 0.4 cm³/U +1x 5 cm³/U	1x 3,5 cm∛U	1	C
Pressure accumulator	0	1	0	0	0
Mechanic pump	0	0	1x 8 cm∛U	0	1x 4.5 cm³/L
Suction jet pump	0	0	0	0	1
active valve	0	7	10	0	4
Actuator E-Motor incl. pumps	5	1	1	5	2

18 System comparison

## 新しいパワートレインの必要要件

DWCの利用が広がり、電動化が促進され たことで、これらのシステムに対する必要 要件は増えた:

- クラッチ、トランスミッション、モータ およびパワーエレクトロニクスの冷却
- C0やパーキングロックなどの追加エレメント
- アクチュエータの搭載位置、必要スペースに関するより高い柔軟性
- 効率向上とコスト削減

ここで紹介したシステムのほかに、これらの要求を満たす選択肢を2種類追加して図 18に示す。

 エレクトロメカニカル:エンゲージメン トベアリング付き DWC、アクチュエー タによるクラッチ作動、GAによるギヤ チェンジ作動、電気ポンプによるクラッ チの冷却

GAなど、量産実績のあるテクノロジーを 採用しているため、DWCトランスミッショ ン向けには、特に低コストで効率のよいソ リューションを開発できる。

搭載位置の柔軟性を高めて、シフトエレメ ント追加の可能性を実現するには、以下の コンセプトを用いることができる。 ・油圧/エレクトロメカニカル:ロータ リーフィードスルー付き DWC、機械駆 動式ポンプ(4.5 cm<sup>3</sup>/rev)によるク ラッチ作動とトランスミッション冷却か つエジェクターポンプの作動圧発生のた めの流量確保、エジェクターポンプによ るクラッチ冷却、GAによるギヤチェン ジ作動

低コストのエジェクターポンプを用いなが ら、機械駆動式ポンプをコンパクトにして 効率性を維持しながらも油冷に必要な流量 を確保する。





**19** Ejector pump including measurement of the amplification factor of the volume flow

このコンセプトでは、クラッチの冷却ソ リューションについて特に説明する必要が ある。エジェクターポンプを用いれば、体 積流量を上げることができるため、エネル ギーを発生するポンプのサイズを小さくで きるのである。

## まとめ

顧客の要件に応じて、シェフラーが開発した 部品をシステムとして組み込むことで、低コ スト、高制御性、高効率を含めた多数の利点 を享受できる。シェフラーは湿式摩擦材を開 発したことにより、そのポートフォリオに重 要なテクノロジーを加えられ、顧客の要件に より合致するシステムソリューションを、自 社単独で提供できるようになった。

新しい B9000 世代の乾式摩擦材によって、 特に快適性などの水準も上がり、乾式システ ムと湿式システムの差がますます縮まった。 B9000 は間違いなく、世界のベンチマーク になっている。

シェフラーは高度な部品とシステムの専門知 識を活用して、最新のパワートレインに向け た新しいソリューションの開発および製造に 関して、適切なパートナーとなっている。

電動化が進んでいることを考えると、アク チュエータシステムもまた、消費電力の低減 に対応できなければならない。ここに示した ソリューション以外では、油圧のパワーオン デマンド(以下 PoD)式アクチュエータが選 択肢として考えられる。この PoD 式油圧シ ステムとトリプルクラッチの組み合わせにつ いては、関連する章で説明する。

## Literature

- Series of presentations in: CTI Symposium.
  15. Internationaler Kongress und Expo, Berlin, 2016
- [2] Müller, B.; Grethel, M.; Göckler, M.: Transmission Actuators Reducing Complexity or Increasing Performance? 10. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2014
- [3] Müller, B.; Grethel, M.; Göckler, M.: Innovative Power on Demand Concepts for Transmission Actuation. 11. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2018
- [4] Müller, B.: Efficient Components For Efficient Transmissions. CTI Symposium, 13. Internationaler Kongress und Expo, Berlin, 2013
- [5] Dilzer, M.; Reitz, D.; Ruder, W.; Wagner, U.: One Idea, Many Applications – Further Development of the Schaeffler Hybrid Module. 10. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2014
- [6] Maier, G.; Wassmer, A.: Innovative Systementwicklung für automatisierte Antriebsstränge – Kupplungssysteme / Hybridsysteme. VDI-Fachtagung, Ettlingen 2017
- [7] Eckenfels, Th.: 48 V Hybridization A Smart Upgrade for the Powertrain. 11. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2018
- [8] Reik, W.; Friedmann, O.; Agner, I.; Werner, O.: Die Kupplung – das Herz des Doppelkupplungsgetriebes. VDI-Fachtagung, Friedrichshafen 2004 (VDI-Berichte 1827)
- [9] Kimmig, K.-L.; Agner, I.: Double Clutch Wet or Dry, that is the Question. 8. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2006
- [10] RDE (Real Driving Emissions) gemäß den EU-Verordnungen 2016/427 und 2016/646





## Innovative Power-on-Demand Concepts for Transmission Actuation

Bruno Müller Marco Grethel Mathias Göckler

#### はじめに

自動車の電動化の開発では、エネルギー効率に重点が置かれている。そのポテンシャルを最大化するためにはドライブトレイン部品を動かすアクチュエータを含め、エネルギーを消費するすべての部品を念頭に置かなければならない。部品によっては平均数百ワットの出力を消費してしまうことがある。こうした背景を受けて本稿では、ドライブトレインのエネルギーロスを最後の1ワットまで削減するコンセプトについて紹介する。シェフラーは平均で10~20ワットの電力しか消費しないアクチュエータシステムを開発することが可能で、すでに量産品として市場に送り出している[1、2]。



- Benchmark hydraulics/powerpack
- 1 Conflicting requirements for actuators in vehicle powertrains

燃費向上およびCO,排出量削減に加え、 WLTC (Worldwide-harmonized Light vehicles Test Cycle) や RDE (Real Driving Emission) に対応するには、合 理的な設計コンセプトがますます重要に なってくる。その設計コンセプトがエンジ ンやトランスミッションの機能面の信頼性 を担保し、故障時の緊急走行性も向上させ る[3]。また、トランスミッション構造は 多様化し、従来のトランスミッション構造 がさまざまな形にアレンジされハイブリッ ド化されたり、ハイブリッド車専用のトラ ンスミッションが開発されたりしている (Dedicated Hybrid Transmission (以 下 D H T ))。 電気自動車でも、 高効率な トラ ンスミッションが求められ、アクチュエー タも効率的に作動されなければならない。 また異なる作動媒体を同タイプのアクチュ エータで使用するなど、多様な顧客の要望 に応じるため、モジュール化が必要である。 図1は、低消費電力、低コストから機能安 全までのさまざまな構成モジュールの最適 設計から、アクチュエータの開発に対して 考慮しなければならない要件を示す。

## 現実的なパワーオンデマンド

#### 当初の状態

多くのトランスミッションコンセプトにお いて、アクチュエータシステムは、全体的あ るいは部分的にデマンドベースではない。例 えば、従来の自動変速機は、主に、エンジ ンによって駆動されるオイルポンプを使用 する。その効率面での欠点は、トランスミッ ションの多段化による効果を相殺している。 数百ワットにもおよぶアクチュエータの出 力損失は無視しがたい問題であるが、この場 合クラッチ、トルクコンバータも冷却システ ムやオイル潤滑システム同様にオイル供給 が常時必要となる。そのため、常時機能を 担保する必要があり、パワーオンデマンド式



2 Throttling losses on pressure reduction valves of power packs

アクチュエータの適用は難しい。エンジン停 止時のトランスミッションの制御、停止後の 迅速なエンジン復帰の制御には、追加の電動 油圧ポンプもしくは油圧式のアキュムレー タが必要となる。

従来型の CVT でも状況は同様であり、トル ク伝達のために高い圧力をバリエーターに 掛ける必要がある。DCT は AT に比べてギ ヤ数とドラッグ損失のあるクラッチの数が 少ないため機械効率に優位性があるが、そ れを生かすためにもアクチュエータによる 消費電力を最小化することは重要である。 ハイブリッド化されたトランスミッション では、アクチュエータの消費電力が EV 走行 距離を短縮させてしまっている。

油圧制御システムを備えた現代のトランス ミッションでは、高い応答要求に対応する ためにパワートレインに連結された機械式 ポンプと電動油圧ポンプを備えたものが多 くみられる。この2ポンプ式の構成が、今 日での油圧制御式トランスミッションの最 低基準と見なすことができる。油圧システ ムはリーク量とのバランスを取りつつ高温 時に動作する、すなわち低粘度オイルでの 低速運転を考慮した上で設計されている。 しかしながら実際の運転下、通常走行や高 速スポーツ走行時では必要以上にオイルが 供給され循環するため、大きな損失を生む。 したがって、常時稼働式の油圧ポンプを備 えたアクチュエータは、多くの状況下で余 分な流量を発生させるために多くのエネル ギーを無駄にしている。このようなアクチュ エーションコンセプトはパワーオンデマン ドシステムとは見なすことはできない。

電気駆動式ポンプと油圧アキュムレータを 備えたパワーパックが、しばしばパワーオ ンデマンドシステムと見なされることがあ る。しかし、アキュムレータからの供給圧 を下げるために油圧アキュムレータからの 流量を減らすと、絞り損失が生じる。圧力 は絞り点において熱に変換され、加えて高 圧流体の一部はバルブ内すきまを通りア キュムレータからタンクに運ばれる。また システム内にリークが存在する場合損失が 際立つ。よって、パワーパック油圧システ ムも同様に真のパワーオンデマンド式アク チュエータシステムと見なすことはできな い。図2では、減圧バルブの絞り損失を、 アキュムレータおよびクラッチの特性曲線、 ならびにギヤシフト曲線と合わせて示して いる。

## デマンドベースのアクチュエータの 必要要件

真のパワーオンデマンド式アクチュエータ を使用する場合、モータに供給されるエネ ルギーは精度の高い作動ストロークおよび 作動体積を以って、可能な限り直接かつ適 切な力と圧力に変換されなければならない。 特に重要なことは、過剰な力(高すぎる圧 カやトルクなど)や、過剰な作動ストロー ク(過度な体積)を発生させず、求める機 能に対し必要なだけの力を正確に発生させ ることである。

もう一つの重要な側面として状態維持の問 題がある。理論的には仕事は存在しないが、 実際には状態維持に多くのエネルギーが費 やされている。

トランスミッション駆動時、エネルギー はシステムの弾性部分、特にクラッチに

蓄積される。クラッチ開放時には、このエ ネルギーがアクチュエータを補助すること ができ、クラッチ開放時のアクチュエータ の戻り動作時間を短縮できるだけでなく、 消費電力も抑えることが可能となる。状態 維持のための出力を最小にするためには、 摩擦係数の最適値を設計に落とし込まなけ ればならない。そのため、ほかでもないメ カニカルスピンドルドライブ[1、2]や特殊 な摩擦要素部品が使用される。例えば、ス プリングを使用すれば方向指定の摩擦調節 が可能である。

セーフモードや故障時の緊急走行性でク ラッチの自動開閉が必要である場合、ク ラッチはそのリターン力に反して、常時 作動されていなければならない。電気エ ネルギーを直接保持力に変換するために は、モータまたはマグネットを備え、常時 電流を流して保持する必要がある。このと き、電気エネルギーはモータやマグネット、

GB

CL 1

CL 1

パワーエレクトロニクスシステムで熱とし て失われ、またこの熱を冷却するために苦 労することが少なくない。このような保持 のための損失は、機械的な自己保持システ ムを用い、かつ故障時に求められる開閉を 積極的に動作させることでしか防げない。 そうした自己保持システムは、故障時には 残った部品でセーフモードを起動し、機能 的冗長性を利用して、緊急時に必要な機能 を提供できるシステム構成とすることがで きる [3]。

実際のパワーオンデマンドシステムにおい て、すべての制御ユニットはアクチュエー タが停止している際の消費電力を最小限に 抑えるために、自己消費電流は可能な限り 低い設計でなければならない。マイクロプロ セッサや電圧レギュレータ、センサーなど、 電力を消費する電子部品を選ぶ場合は、特 にこの点を考慮しなければならない。また、 ソフトウェアが停止条件下での電力消費に

影響することもある。従って、位置制御コ ントローラの停止、あるいはパラメータ化 することで消費出力をできるだけ少なくす る必要がある。同様に、保持電流の最適化 によっても消費出力を大幅に小さくするこ とができる。図3に、実際のパワーオンデ マンド式アクチュエータシステムが備える べきものをまとめ、それをパワーパックや 油圧のシステムと比較した。

2ポンプ式油圧システムと比較して、デマ ンドベースのアクチュエータシステムでは パフォーマンスの観点で100W以上のメ リットがある。これは燃料消費量、あるい は CO, 排出量における 1.0% 以上に相当し、 これはトランスミッションにとって、パワー オンデマンド式アクチュエータシステムが いかに重要かを表している。しかしながら 重要なことは、このシステムを一般的な市 場コストで実現しなければならないという ことである[4、5]。



4 Active Interlock transmission actuator and electric axle actuator



3 Comparison of real power-on-demand actuators (right) with hydraulic solutions and power packs



5 Actuators for automated driving and for smart interior solutions (Park-by-Wire)

## デマンドベースの アクチュエータの例

## アクティブインターロック付き ギヤチェンジアクチュエータと 電動アクスル用アクチュエータ

アクティブインターロック機構を組み込ん だ量産のアクティブインターロック付きギ ヤチェンジアクチュエータシステムの場合、 ギヤ締結時あるいは開放時のみ、二つのモー タが作動する。それ以外の場合は、アクチュ エータの制御ユニットではわずかな自己消 費電流以外の損失は生じない。電動アクス ルアクチュエータは同様の原理に従って動 作するが、セレクタ軸がない。これは、ギ ヤチェンジアクチュエータがどのようにし て電気自動車用の量産アプリケーション (この場合、2速変速付き電動アクスル)で 使用されているかを示す好例である[6]。図 4に、両方のパワーオンデマンド式アクチュ エータの例を示す。



6 Electric concentric slave cylinder (EZA) for activating the KO clutch in hybrid modules

## 自動運転およびスマートインテリア/ ソリューション向けアクチュエータ

シェフラーは、電気自動車用アプリケーショ ンおよび自動運転用のエレクトロメカニカ ルアクチュエータニ種類を開発した(図5)。 PRND選択用アクチュエータを用いれば、 既存のトランスミッションの作動媒体であ るケーブルをワイヤーに置き換えることが でき、Shift By Wire (SBW) 化のみなら ず、自動運転化にも活用することが可能と なる。

Integrated Park Lock actuator (IPL) は、特に電気自動車のトランスミッション における電動アクスルや DHT のパーキング ブレーキなどの用途として、効率のよいパー キング機能アクチュエーションモジュール として開発された。

#### **Electric Concentric Actuator**

図 6 の Electric Concentric Actuator (ECA) は、量産アプリケーションに用いら れるエレクトロメカニカルアクチュエータ である。クラッチに用いる場合、このアク チュエータシステムは、最も使用頻度の高い 動作点で保持電流が最小となるように設計 されている。上述の通り、保持電流や調整電 流とのバランスを取るために、クラッチ特性 とボールネジのピッチを最適条件で適合さ せた。例えば、エンジンとモータで駆動す るハイブリッド車を設計する場合、使用頻度 の高い動作点が遷移するのであれば、その アプリケーション向けにはこの適合を行わ なければならない。パワーオンデマンド式 アクチュエータシステムでは、各アプリケー ション向けに細部まで最適化する必要があ る[7]。

#### Hydrostatic Clutch Actuator

もう一つのデマンドベースのエレクトロ メカニカルアクチュエータが、図7の Hydrostatic Clutch Actuator (以下HCA) である。この場合、特別なのはリークの無い 油圧エリアを用いてほぼロス無く、作動力を クラッチに伝えていることである。参考文献 の[1]および[3]で、低消費電力を考慮した 本アクチュエータの設計について詳しく述べ られている。ここで強調しておかなければな らないのは、これらのアクチュエータを複 数使用する際、ローカル制御ユニット(以 下LCU)が機能的冗長性を持つことである。 HCAは、ダブルクラッチトランスミッション、 ハイブリッド車、およびマニュアルクラッチ 車用の電動クラッチにすでに使用されている。 150~700 Nmのトルク範囲でクラッチを 作動させ、ブレーキフルードと ATF の両方で 作動させることができる。



7 Hydrostatic clutch actuator (HCA)



8 Modular clutch actuator with new planetary spindle drive

#### Modular Clutch Actuator



9 Real power-on-demand actuator system for double clutch transmissions in various vehicle platforms Modular Clutch Actuator (以下 MCA) はHCAの発展型であり、さまざまなアプ リケーションに対応するため、モジュール 設計に重点が置かれている(図8)。特に、 新しいタイプの遊星スピンドルドライブ (PWG) について述べておく必要があるだろ う。新しい回転角度位置センサーのおかげ で、回転体の角度位置および回転数が検知 できるため、それまで HCA で使用されてい た絶対位置センサーは不要となった。また、 ダブルサイドスプリングを採用することで、 前進および後退の摩擦を最適化することが 可能になった。MCAには、油圧またはメカ ニカルなインターフェースを適用すること が可能である。一体型 LCU には、外部セン サー入力と要求機能に対応した計算能力が 備わっており、マニュアルトランスミッショ ンの自動クラッチ (E-Clutch) など、幅広 いクラッチアプリケーションで MCA が利用 可能となった[2、8、10、11]。



Power loss / Fuel consumption / CO<sub>2</sub> emission

DCT + P2.5 actuation DCT + P2 actuation

10 Efficiency gains for various actuator systems in relation to system costs for P2.5 and P2 double clutch transmissions

## ダブルクラッチ式 トランスミッションの パワーオンデマンド式アクチュエータ

現在市場に出ている中で、DCT用で実用的 かつパワーオンデマンド式アクチュエータ システムと呼ぶに最もふさわしいものは、 上述したHCAやMCAなどのクラッチアク チュエータ二つと、アクティブインターロッ ク付きギヤチェンジアクチュエータ、トラ ンスミッション制御ユニットの組み合わせ で構成されている(図9)。このシステムは、 大小問わずあらゆる自動車クラスの湿式お よび乾式ダブルクラッチで使用され成功を 収めている。このシステムはセンサーと制 御ユニットを統合しているため、ストロー クや圧力制御が容易で、求められる動的特 性を実現し、さらには信頼性や故障時の 緊急走行性の面での新しいソリューション を見出すことを可能にしている。

しかしながら、電気モータ四つとローカル 制御ユニット三つを備えたこのアクチュ エータシステムは複雑である。そのため、 このコンセプトをさらに発展させるにはシ ステム構成全体を見直す必要がある。

## ハイブリッド化された ダブルクラッチシステム向け アクチュエータシステム

DCTをハイブリッド化する最も簡単な方法 は、トランスミッションの片側の入力シャ フト上にモータが配置される P2.5 構造で ある。この構造においてアクチュエータ システムへの要求は従来のトランスミッ ションのものとほぼ同等である。顧客から ギヤ段追加の要求があれば、アクティブイ ンターロックギヤチェンジアクチュエータ にギヤゲートを容易に追加することができ、 またパーキングロックを動作させることも 可能である。このことは、アクチュエータ システムのトータルコストバランスに対し てプラスに作用している。図10に、さま ざまなアクチュエータシステムのシステム コストと効率の関係を示した。この図から、 P2.5 ダブルクラッチシステムに向けたパ ワーオンデマンド式アクチュエータシステ ムが、さほど大きなコスト追加なく実現可 能であることが見て取れる。

通常 P2 ハイブリッド構造のコンセプトでは 第三のクラッチが必要となり、その結果電子 部品を含めたクラッチアクチュエータをさ らにもう一つ追加しなければならない。この 場合、バルブの追加とポンプ - アキュムレー タモジュールの容量拡大で容易にシステム 構成を拡張できる油圧ソリューションのほ うがより好ましい選択肢のように見える。し かし、このようなハイブリッド車用ダブル クラッチトランスミッションを、効率面で 確固たる次のマイルストーンとするために は、クラッチを三つ備えた P2 ハイブリッド 用トランスミッションなどにも使える、パ ワーオンデマンド式アクチュエータが必要 となる。そうしたアプローチの一つの解で ある Electric Pump Actuators (以下 EPA) ベースのアクチュエータシステムの 例を用いて、以下で紹介する。

#### **Electric Pump Actuators**

#### システム説明

EPAは、特殊なバルブを用いて二つのパワー 駆動デバイスにエネルギー供給し、駆動デ バイスを連続的に切り換えられる、複数の 駆動デバイスを作動させるアクチュエータ としてシェフラーが開発してきたものであ る。実際のパワーオンデマンドシステムの 高い要件を満たすために、EPAに上述した LCUを備えたアクチュエータの開発で得た 専門知識を用いて、ロバスト性の高いポン プ技術を組み合わせている。図11にEPA の部品構成を示した。



11 Electric pump actuator (EPA)



12 Operating principle of the two-pressure valve in the EPA

すきまを小さくしてリークを少なくしたポ ンプに、高感度のロータ位置センサーを組 み合わせて用いることで、容積調節が非常 に正確に行える。これにより、追加の作動 ストローク測定機能を搭載する必要がなく なり、クラッチ開放からタッチポイントま で、低圧で低荷重の条件で好ましい選択肢 となる。ポンプの荷重出力両側に圧力セン サーを取り付けると、さまざまな制御が行 えるようになる。

EPA は、省エネモードと、高応答モードで 操作でき、実際の走行条件下では、省エネ モードを利用することで、HCA や MCA と 同等の消費電力を実現することができる。 クラッチおよびシステムの制御コンセプト により、EPA の間欠的な動作も可能であり、 平均電力消費量が低減される。一方、高応 答モードでは、スリップ制御や、対ジャダー 制御が EPA にて可能になるが、エネルギー 節約の理由によりこのモードの利用時間は 制限される。 EPA には 2 圧式バルブが組み込まれ、圧力 を両ポートに連続的に供給させることがで きる。このバルブの動作原理を図 12 に示 す。EPA はポンプを正転させることで、P1 側のバルブが閉じ、クラッチなどの駆動デ バイスのために P1 圧力を供給する。圧力を P1 から P2 に連続的に供給する場合、ポン プを逆転させることで、P2 側のバルブが閉 じ、P2 圧力を供給することができる。同時 に、P1 側のバルブが開放され、P1 圧力を リザーバーに逃がすことにより、圧力が立ち 続けるのを防ぐ。したがって、EPA を用い れば、二つのデバイスを連続的に作動させる ことができる。

三つ以上の駆動デバイスを EPA で制御す る場合、制御する駆動デバイスごとに動作 ポートを切り換えるバルブを追加する必 要がある。この拡張能力を利用するため に、アクチュエータの LCU は、パワー処理 能力を拡張するほか、バルブ出力およびセ ンサー入力を追加できる構成としている。 つまり、アクチュエータの数を増やさなく ても、トランスミッションの複雑なアクチュ エーションシステムに、EPA を用いること ができるということである。 ギヤセレクトとギヤシフトである。このアー キテクチャでは二つの EPA と二つの制御バ ルブで、四つの要求作動に対応できる。

## ダブルクラッチトランスミッションの EPA

EPA を用いた効率のよい DCT アーキテク チャを実現するには、それぞれのクラッチに 対応する EPA が必要である (図 13)。 EPA を使用すると、先に述べたように圧力を両 ポートに連続的に供給させることができる が、各クラッチには片方のポートしか使わ ない。そのため、もう片方のポートを変速 機能とパーキングロック機能に使用できな いか検討した結果、油圧による作動が可能 で、かつ量産の DCT で実績のあるアクティ ブインターロックの原理を用いたギヤアク チュエータが最適であった。このアクチュ エータを Hydraulic Gear Actuator (以 下 HGA) と呼び、必要となる要求作動は P2 ハイブリッド構造を組み合わせた DCT アーキテクチャでは、さらに C0 クラッチを 制御する必要があるため、もう一つ制御バ ルブが追加となる。このアーキテクチャで は二つの EPA と三つの制御バルブで、五つ

の要求作動に対応できる。

さらに、HGA が組み込まれたトランスミッ ションユニット全体の制御を二つの EPA で 置き換えられないかという疑問が生じるが、 結論としては、高価な部品であるトランス ミッション制御ユニット (TCU) は取り除 けるが、トランスミッション制御マッピン グは EPA が担わなければならないという考 えに至った。それには、クラッチ、ギヤア クチュエーションを正しく判断するシステ ムとソフトウェアの構築が必要である。ギ ヤ段選択制御とクラッチのオーバーラップ 制御は、両 EPA のローカル制御ユニットが



13 Actuator system for double clutch transmissions with two EPA and one HGA A transmission control unit (TCU) is not required because the EPA performs this function.

	2x EPA + HGA	Powerpack	Full hydraulics
Efficiency	+	0	0
Cost	0		+
Limp home capability	+		
Package flexibility	+	+	0
Physical robustness	+	0	+
Controllability	+	0	0
Parallel actuation dynamics	0	+	+
			0 = sufficient

14 Analysis of various actuator systems for P2 hybrid double clutch transmissions

担うか、もしくは分割するか、あるいはハ イブリッドシステムに多く見られる上位の 制御ユニットに移管させなければならない。 それが可能となれば、このアーキテクチャ は最もコスト効率の高いものとなる。

三つ目のクラッチ(CO)は、油圧制御ユニッ トと同様にバルブーつの追加と、必要に応 じて圧力センサーーつの追加で容易に制御 が可能となる。このアプローチで最も重要 となるのは、エンジンとモータの締結/開 放のために追加された C0 クラッチの制御 が、DCT では二つの EPA しか利用できな いにも関わらず、ほかの二つのクラッチと は別系統になっているのか、ということで ある。P2 ハイブリッド + ダブルクラッチ、 すなわちトリプルクラッチ構成におけるさ まざまな運転状況をシミュレーションした 結果、COクラッチが、DCTクラッチと並 行して作動される状況の大半は、適切な置 換か事前にギヤ選択する手法で回避できる ことが分かった。ごく限られた状況下では、 ここで述べた EPA アクチュエータシステム のシフトシーケンスにより、わずかに時間 的制約を生じるが、それは以下の複数の状 況が同時に発生していることが前提となる。 間違ったギヤ段の事前選択、ドライバーの チェンジオブマインド、エンジンのクイッ クスタート(P2モータによる電動走行の電

カ不足にともなう C0 クラッチの締結が必要 な場合)である。このような発生確率の低 い問題に対応するためには、EPA システム とソフトウェアを開発初期の段階で最適化 しておく必要がある。

## パワーパックを付属した EPA システムと油圧ソリューションの 比較

P2 ダブルクラッチトランスミッションに向 けた、そのほかの考えうるアクチュエータ コンセプトと比較すると、上述した EPA シ ステムには、特に WLTC サイクルや実際の 走行条件下において消費電力の点で利点が ある (図14)。このアプローチを着実に進 めて、HGAを用いた上で、EPAのLCUを VCUに直接つなぐことでトランスミッショ ン制御ユニットを廃止すれば、このシステ ムにはコスト面の利点も生み出される。ま た、二つの制御ユニットによって機能の分 散と冗長性を持つだけでなく、不具合の管 理と不具合時の緊急走行性も向上する。こ のシステムはあらゆる点において、さまざ まなレベルで必要要件を満たす。必要要件 それぞれの重み付けを行うと、欠点や利点 がシフトする可能性がある。

#### ほかのアプリケーション向け EPA

EPA-HGA システムはまた、ほかのアプリ ケーション向けに適用することも可能であ る。従来のトランスミッションも、必ずし もすべてのデバイスを同時に作動する必要 はなく、せいぜい二つから三つ程度なの で、一つの EPA で複数のデバイスを作動す ることが可能である。回転型のクラッチピ ストンを作動する場合、回転接触部から漏 れが発生するが EPA はそれを補填すること ができる。ハイブリッド化されたオートマ チックトランスミッションでは、トルクコ ンバータの廃止が考えられ、その場合、従 来のオートマチックトランスミッションの 制御ユニットに換えて、EPA でシフトコン トロールを行うハイブリッド専用トランス ミッションシステムの設計の可能性がある。 CVTでも、押し付け圧やプーリーの調節制 御システムに用いることが可能である。さ らに、どのようなタイプのトランスミッショ ンでも、潤滑および冷却機能が十分でなけ ればならないが、これも通常 EPA でサポー トが可能である。

#### まとめ

さらに電力消費量と CO<sub>2</sub> 排出量を削減しよ うとする場合、たとえ1ワットでもアクチュ エータの消費電力を節約することが重要に なってくる。低消費電力のアクチュエータ は、電動パワートレインにおけるモータ走 行領域を増大させる。平均で10~20ワッ トの損失しかないパワーオンデマンド式ア クチュエータがすでに実現可能になってい る。現在の油圧アクチュエータソリューショ ンをベースにすると、今後さらに消費電力 を低減できる可能性も大いにあり、WLTC や RDE をベースに検証を続けていく。

本稿では、アクチュエータシステムで消費され る電力は、たとえ1ワットであったとしても いかに問題で、最適化しなければならないか を見てきた。従来のハイブリッド化されたト ランスミッションに用いられる幅広いアプリ ケーションについて、アクチュエータを紹介 し、持論を展開してきた。効率向上やコスト の削減に加えて、アクチュエータの知能 (LCU) もまた、機能面の信頼性や不具合時の緊急走 行性といったシステムの必要要件の実行に役 立つ。

さまざまなアクチュエータが、モジュラー 式システムとして組み込まれたり、アドオ ンシステムとして利用したりすることがで きる。これにより、新しいハイブリッド専 用トランスミッション (DHT) や電動車をは じめとして、さまざまなタイプのトランス ミッションにアクチュエータを使用するこ とが可能になる。

新しいアクチュエータコンセプトの開発に おいて、シェフラーは、クラッチやリリー スシステム、アクチュエータ、ソフトウェ アすべてを単一の動力源として捉え、各コ ンポーネントを理想の形で最適化すること ができる。それによりシェフラーは、効率 のよい、小型でかつ強力なアクチュエーショ ンシステムを提供することができる。

#### Literature

- Müller, B., Ubben, H., Gantner, W., Rathke, G.: Efficient Components for Efficient Transmissions. CTI Symposium, Berlin, 2013
- [2] Müller, B., Rathke, G., Grethel, M., Man, L.: Transmission actuators – Reducing complexity or increasing performance? 10. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2014
- [3] Müller, B., Kneissler, M., Gramann, M., Esly, N., Daikeler, R., Agner, I.: Smaller, smoother, smarter – Advance development components for double clutch transmissions. 9. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2010
- [4] Rathke G., Grethel M., Baumgartner A., Kimmig, K., Steinmetz S.: Made-to-Order Double Clutch Systems. 11. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2018
- [5] Wagner, U., Müller, B., Henneberger, K., Grethel, M.: What makes a transmission operate – tailored actuation systems for double clutch transmissions. CTI Symposium, Berlin, 2011
- [6] Biermann, T.: The Innovative Schaeffler Modular E-Axle. 11. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2018
- [7] Mitariu, M.: Herausforderungen und innovative Lösungen der nächsten Hybridmodulgeneration, VDI-Tagung Kupplungen und Kupplungssysteme in Antrieben, Karlsruhe 2013
- [8] Welter, R., Kneissler, M., Baumann, M.: The Manual Transmission Has a Future: E-Clutch and Hybridization. 11. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2018
- [9] Kataoka, R.: 9-Speed Dual Clutch Transmission for Super Sport Car. CTI Symposium, Berlin, 2016
- [10] Hoffmann, J.: The Top 3 of P2 Space, Space, Space. 11. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2018
- [11] Eckenfels T.: 48 V Hybridisation A Smart Upgrade for the Powertrain. 11. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2018



# Innovative CAE

Optimal Layout of Transmission Components

Dr. Daniel Heinrich Johannes Kerstiens Michael Schneider



#### はじめに

過去25年間、コンピューターを用いてシミュ レーションを行うためのソフトウェアツール は、パワートレインの効率や性能の向上に重要 な役割を果たしてきた。シェフラーは顧客の要 望に合った製品を提供すると同時に、開発プロ セスを加速するためソフトウェアツールを広く 活用し、その開発を進めてきた。その中で重要 なことは、市販されているシミュレーション ツールと比較して、より優れた計算精度とス ピードをもつ内製シミュレーションツールの開 発である。

今後ますます高まる最先端車両の開発プロセス 要件を満たすため、シェフラーはシミュレー ションツールの開発をこれからも続けていく。 ここでは、以下の四つのイノベーションを例と して取り上げる。

- ハイブリッドパワートレインのねじり振動ダンパーの最適化
- BEARINX を使った転がり軸受の自動最適化
  機械的および熱的相互作用を考慮した新しい クラッチの設計方法
- 仮想試験の活用による製品開発期間短縮化と 統計情報の品質向上

## 最新のハイブリッドパワートレイン の振動シミュレーション

シェフラーは、パワートレインの振動を計算す るための DYFASIM マルチボディシミュレー ションプログラムを独自に開発した。このソフ トウェアには内燃機関、電動ドライブシステ ム、エンジン制御システム、クラッチ、ねじり 振動ダンパー、トルクコンバータなどのドライ ブトレインコンポーネントのライブラリが含ま れており、効率的に動的シミュレーションを行 うことができる(図1)。

開発プロセスに適用されたシミュレーションの 一例が、ねじり振動ダンパーの最適化である。 エンジンと軸受、スタータ、バッテリーと接続 ケーブル、トランスミッション、ドライブシャ フト、タイヤなどの部品を含むシステム全体の シミュレーションを行うことが可能で、幅広い 選択肢の中から最適な設計を提案することがで きる[1]。標準的なデュアルマスフライホイー ル (DMF)の設計プロセスでは、複数の段階で 行われる最適化検討の中で約 2000の特性曲 線が生成され、その中から顧客のアプリケー ションに最適な設計が選定される(図 2)。顧 客からの問い合わせ一つ一つに対してこれだけ の量の作業を行い、上記の特性曲線の最適化 を一晩で終えるため、シェフラーは自社内に





2 Optimization process for the design of modern torsional vibration dampers

計算サーバを構築し、年間 440 万通りのシミュ レーションを実施している。このようなプロセ スにより最適化された品質で、ねじり振動ダン パーの遠心振り子式アブソーバ (CPA) が設計 できる [2]。 さらに拡大しなければならない。例えば、ホ イールにかかる動的トルクによって、ダンパー やトランスミッション部品にどのような負荷が 入力されるか、分析する必要がある(図3)。

新しいハイブリッドパワートレインに向けたね じり振動ダンパーの開発では、最適化の範囲を ー例として、悪路での走行が挙げられる。ク ラッチのないハイブリッドパワートレイン では、ホイールからの励振によってパワー



3 Maneuvers that must be taken into consideration in damper design

トレイン内で共振が生じ、トランスミッション に深刻なダメージを与える可能性がある。この 場合、異なる走行条件とダンパー設計の影響を 考慮した計算(図4)により開発の早い段階で 評価を行う。例えば、ストレートスプリングダ ンパーでは、広範囲の道路条件で負荷が高く なっている一方、アークスプリングダンパーで は広い範囲で許容トルクが向上し、よりロバ スト性の高いデザインにすることができる。ま た、いずれのダンパーでもトルクリミッターを 追加することで過大入力時の負荷を低減するこ ともできる。

パワートレインのシミュレーションは繰り返し 行う必要があるため、このプロセスの大部分は 自動化されており、迅速なダンパー特性の最適 化が可能となる。これにより以降の製品の適合 作業が大幅に軽減される。また、ダンパーとシ ステム全体を早期に最適化することで、システ ム全体の出力密度が高まり、機能の向上につな がる。

## **OPTIKIT** による転がり軸受の 最適化

シェフラーは 1995 年から自社開発のシミュ レーションソフトウェア BEARINX を使用し て、複雑なトランスミッションアプリケーショ ンの軸受支持部の配置、設計、分析を行ってい る。このシミュレーションツールを最新の研究 に基づいて継続的に拡張、改良しさらに顧客向 けとしても提供している。BEARINX は軸受を 単独で評価するだけでなく、システム全体の荷 重、変位、弾性構造や軸受とギヤの噛み合いも 考慮に入れることができる。



5 Modeling depth of BEARINX from the system level of the complete transmission to an individual contact



4 Simulation results for bumpy roads with driving range variations for four different damper systems

広範囲のモデリングが可能な BEARINX では、 トランスミッションと転がり軸受の両方の挙 動を詳細に予測できる(図5)。これには、パ ワー損失の予測などのシステム全体レベルで の評価と、表面起点の損傷が生じるリスクの 評価など、個々の転動体レベルでの評価の両 方が含まれる[3]。これにより、開発のごく初 期の段階で顧客に的確な仕様提案を行うこと ができる。

詳細かつ精緻なモデリングにより、システムを 効果的に分析することができ、開発期間の短縮 につながる。しかしながら、出力密度と限界荷 重を高めつつ、設計スペースとパワー損失を最 小限に抑えるためには、すべての軸受の最適化 が必要となる。図6に、円すいころ軸受を例 にさまざまな設計パラメータを示す。これらパ ラメータの影響は、ほかのトランスミッション 部品やそのパラメータと密接に関連しており、 直観的な検討プロセスや手計算による検討で最 適化を行うことは困難である。 そのため、シェフラーは、軸受およびシステ ムレベルで幅広いパラメータを自動的に最適 化して、指定された目標値を得る最適化アル ゴリズムを開発した。一般的にこのようなア プローチは新しくはないが、ここで述べてい るような目標に対して十分な成果は上げるこ とはできなかった。実際、さまざまな機能的、 技術的要求により、相反する目標が存在する。 したがって、優秀な最適化アルゴリズムの特 徴は、設計スペースや性能といった顧客要件 をすべてマッピングし、設計および製造上の 制約をすべて考慮できることである(図7)。

このためにシェフラーは OPTIKIT 最適化 ツールを開発し、これを BEARINX の中に統 合した。ユーザーは OPTIKIT を使用して、 開発目標や制約を自由に組込み、負荷頻度要 件を同時に満たす最適なシステムの設計がで きる。OPTIKIT を用いて、リアアクスルド ライブのピニオンフランジ側とピニオンヘッ ド側の円すいころ軸受の摩擦損失について



6 Variety of parameters and influencing factors in the design and optimization of transmission bearings using a tapered roller bearing as an example

最適化した例を図8に示す。低摩擦モデルで あるX-Life-T29D設計と比較して、摩擦損 失がさらに20%以上低減された。同時に内 部負荷分布、接触圧力曲線などの機能上重要 な指標に基準を定めることで、必要な寿命が 確保される。 ある設計段階における二つの軸受の摩擦損失 は、初期状態では約12Whであった。ここ での最適化の目標は、製造のしやすさ、設計 スペース、寿命の要件などの、ほかの境界条 件に影響をおよぼすことなく軸受の摩擦損失 を低減することである。



7 Comparison of the function of a classic optimization algorithm (left) and a real-life optimization based on development requirements (right)



8 Model of the rear axle drive to be optimized in BEARINX

OPTIKIT アルゴリズムでは、摩擦損失を低減 するパラメータの組み合わせを一つずつ処理す るが、境界条件を追加することで、寿命の要件 を維持しながら摩擦損失の最適化を行うことが できる。最適化の実行中におけるシステムの摩 擦損失と寿命の評価結果の推移を図9に示す。 最適化の過程で、新しいアプローチを象徴的に 示す二つの領域が明らかになった。一つは許容 される目標寿命 100% に対してシステムの最 適化が行われ、その結果手動による軸受の設計 時と比較して、摩擦損失が 15% 低減されるこ とである。一つはアプリケーションに対して



9 Curve of the determined friction energy and service life evaluation based on optimization Both values are calculated using different design cycles that represent the respective target requirements



10 CAE-assisted optimization of tapered roller bearing parameters in the rear axle final drive analyzed



▲ Bearing 1, 3,000 rpm ▲ Bearing 2, 3,000 rpm ● Bearing 1, 6,000 rpm ● Bearing 2, 6,000 rpm



11 Comparison of calculated and measured friction torques for optimized on the rear axle final drive 軸受を調整することで、システムがさらに最 適化されることで最終的には、システムの特 性および顧客の開発目標を考慮した最適な軸 受が得られることである。ピニオンヘッド側 軸受とピニオンフランジ側軸受の設計パラ メータに与えた影響を図 10 に示す。

結果として、リアアクスルドライブ用に最適 化された軸受では、設計スペースを変更する ことや、特殊な材料を使用することなく、摩 擦損失が21%低減できた。この計算値を検証 するため、最適化された軸受の摩擦によるト ルク損失を試験設備で測定した例を図11に示 す。摩擦によるトルク損失の計算値と実測値 が高い精度で相関があることが見て取れる。

BEARINX のモデリングの広範さと高精度、 および OPTIKIT による対象パラメータの最 適化を組み合わせることで、より良い設計を より迅速に行うことが可能になる。これは BEARINX のすべてのアプリケーションで利用 可能である [4]。

## クラッチの熱機械的設計

従来、クラッチの熱機械的設計は、発進時に おける仕事量の計算に基づき行われてきた(図 12)。この計算結果から、熱容量、摩擦材体積、 摩擦面性状などに関する最低要件を求め、こ の要件を満たす設計を行うのである。この方 法はこれまでは非常に有用性のあるものと考 えられていた[5]。しかしながら、FEMの計 算や寿命プロファイルは、その後の最適化プ ロセスまで、役割を果たすことはなかった。

しかし、トリプルクラッチといった最新のク ラッチシステムの開発[6]では、非常に高い 出力密度を限られた設計スペースで達成する 必要があるため、この従来のアプローチでは 不十分である。またシングルクラッチでも、 機能やコスト面で最適化の可能性を検討する 必要がある。



**12** Clutch design based on simplified calculation values

この相互関係は、坂道発進を考えれば明らか である。一見単純なシナリオに見えても、よ く見てみると、非常に複雑なことがわかる。 最初にエンジン、トランスミッションの同期 段階でかかる摩擦により、摩擦面の温度が大 きく上昇する。局所的で微小な圧力分布、半 径によって異なるスリップ速度、代表的な表 面温度といったすべての摩擦に関する要素を 合わせたものがマクロ的に見たときの伝達可 能なトルクとなる。システムは常に定常的で はなく、熱源によって生じる部品内の熱伝達 と、それによって生じる摩擦表面の機械的変 形の影響を受ける(図13)。

これらの影響を考慮するシミュレーションで は、摩擦面の径方向で生じる変形に加えて、 周方向で生じるうねりを考慮する必要がある ため、膨大な量の計算作業が必要となる。も う一つの重要な要素は、径方向で生じる変形 と周方向で生じるうねりを吸収することがで きるクッションと摩擦材などの部品間の相互 作用である。



13 Interaction of pressure distribution with thermal and mechanical effects in the clutch



14 Schematic diagram of the optimized thermal clutch design

たとえインテリジェントネットワーキング、計 算モデルの分散、計算プロセスの分散を使用し ても、5回の連続発進の計算に必要な時間を5 週間に減らせただけであった。これを踏まえる と、パラメータスタディは現実的な選択肢とは なりえない。この方法は分析ツールとしては適 切だが、通常の設計プロセスとして使用するに は、計算時間を1,000分の1に減らす必要が ある。さらに、シングルクラッチだけでなく、 ダブルクラッチやトリプルクラッチといった複 雑なシステムでもこの方法を使用するには、柔 軟な構造が必要である。

新しいシミュレーションツールでは、必要なパ ラメータの影響とその相互作用を体系的に分析 し、計算モデルを見直して、結果を損なうこ となく、必要な計算時間の短縮化を実現した。 新しい熱機械連成シミュレーションツール ATM は、最適化された有限要素モデルをベー スにしており、以下を考慮している。

- 一般的な加速度での坂道発進条件
- 個々の部品の形状および剛性、特にプレッシャープレートおよびフライホイールの傾き剛性と、それらの径方向で生じる変形および周方向で生じるうねり、クッションの圧力分布
- 摩擦材などの非金属材料、および金属材料の熱および弾性特性
- クラッチ内部およびクラッチハウジング内 の熱伝達
- 温度、圧力、スリップ速度の相互作用のマッピングに加えて、熱負荷の履歴
- 熱機械的負荷条件における時間変化

坂道発進には熱機械モデルを、平坦面での発進 には純粋な熱モデルを使用して、寿命プロファ イルを計算する(図14)。また顧客の負荷頻度 を実装することができれば、試験サイクルとの 直接的な検証、およびその計算値と測定値を比 較することも可能となる。

これにより、開発の初期段階で顧客と結果について話し合い、コスト削減、摩擦材の摩耗低減 などの最適化の目標を早期に設定できる。また、さまざまな負荷条件における、複数の摩擦 材による効果を予測することも可能である。

これら熱と機械の組み合わせにより、これまで は活用されていなかったポテンシャルを引き出 すことも可能になる。例えばクラッチを最適化 して、摩擦材表面の圧力分布の均質化ができた 結果、熱変形の動的挙動が向上するだけでな く、表面圧力の均質化によりプレッシャープ レート表面最高温度を約40℃下げることが可 能となった(図15)。 ピーク温度が下がることでトルク容量が高ま り、その結果クランプロードの低減とシステム の効率性の向上が実現する。さらに表面圧力の 均質化による高負荷領域での温度の低下によ り、摩擦材の摩耗も低減する。これによって得 られた利点を、例えば以下の設計要素に活用で きる。

- クラッチディスク上に遠心振り子式アブ ソーバを配置するスペースを確保し、適用 することでパワートレインの減衰性能が大 幅に高まる。
- クラッチサイズを縮小し、軽量化と省スペース化を実現する。

また、全体では出力密度を高め、保護メカ ニズムを導入することにより信頼性を向上 させることが可能となる。これにより計算 プログラムを使用して、運転中の摩擦面の表 面温度を監視し、限界値に達した場合は直 ちに運転者にフィードバックを提供できる。



15 Excerpt from uphill start simulation with the thermal-mechanical model

例えば将来的には、エンジン制御システムで はすでに使用されている熱モデルを従来の マニュアルトランスミッションアプリケー ションでも利用できるようになる。走行中の クラッチシステムの能動的な介入が可能な ことから、ここに記載されている設計手法 と制御ソフトウェアによる保護手段をトリ プルクラッチシステムの開発に適用可能と なった (図16) [6]。マニュアルトランス ミッションと比較して、このクラッチシステ ムの信頼性をさらに高める結果となった。

この熱機械連成シミュレーションツール ATM の導入の成功と、既存の CLUSYS 設計 プログラムへの統合によりシステム全体の 熱設計の最適化は新しい段階に来た。つま り、機械力学設計と熱機械設計の最適化が、 設計の初期段階で体系的に組み込まれるこ とを意味する。

## バーチャル試験

車両部品の耐久試験は、顧客にとって多く の時間と費用がかかる。そのため耐久試験 は頻繁に実施できず、統計的な検証が困難 である。耐久試験時には重要な部品が完成 していない場合もあり、また破損すれば再 設計が必要になることから、たとえ耐久試 験が無事に終了したとしても、本当の意味 での終了とはならないリスクは残る。耐久 試験の大半を単体部品試験やCAE計算で置 き換えることができれば理想的だが、その ためには、実際の走行条件における負荷や 統計的なばらつきを、クラッチシステムな どの部品の設計時に把握しておく必要があ る。特に運転者のばらつきや、国によって 異なる運転スタイルの影響は、繰り返し議 論になっている (図17)。

> Driving profiles

0\_0

LuK-CUP

Hill start test

0

**OEM** cycles

0

0



17 Distribution of start frequencies in the analysis of real driving data from Germany and China

Thermo-mechanic model Traffic jam profile Cushion deflection Friction model Geometries Stiffnesses Temperature Tapering Wear Transmittable torque

16 Development and safeguarding of complex clutch systems by including thermal-mechanical effects

現実的な運転条件で部品の設計および試験を 行うために、シェフラーはかねてより実際の 運転条件にて測定を行ってきた。Schaeffler Driving Cycle, LuK CUP (Customer Usage Profile) などの運転プロファイルは、 新しいダブルクラッチシステムなどの革新的な 製品の試験に不可欠である[7]。

上記に記述された目標を達成するには、さらな る開発が必要である。測定データ、シミュレー ションモデル、統計モデル、部品試験といった 影響を受けるすべての領域で活動を増やし、組 み合わせることで、この目標を達成できる。

実際の運転条件で測定したデータは新しいデー タベース構造を使用して集計され、運転者の 挙動や負荷プロファイルを分析する際に利用 される。このデータベースには、Schaeffler Driving Cycle、LuK CUP、 一般的な車両、 タクシー、教習車などで長期にわたって集計さ れたデータが格納されている。

シミュレーションモデルの利点は、必ずしも測 定できるとは限らないパワートレインの振動、 摩擦損失、温度などのデータを繰り返しシミュ レートし、詳細なデータ評価を行うことができ る点にある。また、既存のシミュレーション ツールチェーンの拡大にともない、交通の流れ のシミュレーションなど、さまざまなレベルの シミュレーションツールとリンクできるように なってきた。

統計モデルを体系的に利用することで、試験サ イクル、実際の運転条件でのさまざまな頻度分 布、シミュレーションおよび試験リグなどの間 でデータ変換することが可能となる。さらにこ のツールチェーンにより、さまざまな国の統計 データを含め、運転挙動などのソフト因子の定 量化を行うことができる。

個々の部品の摩耗または耐久試験の結果は既存 のツールチェーンにリンクされる。車両全体の 試験と異なり、これらはずっと短時間で円滑に 行うことができる。

ここでは、設計に関係した運転データに対す る国の影響を例に、データおよびシミュレー ション方法の統合を示す。この新しいアプロー チでは、関連する影響因子について、適切な 補正係数により、上記の国別の依存性を考慮 に入れながら、大量の運転データを系統的に 分析できる。この例では、運転データを細分 化し、それぞれの走行セグメントについて、 セグメントの平均速度と始動頻度を比較した (図18)。

交通密度は、平均速度に基づく分析では支配的 な役割を果たすが、測定された変数として利用 可能な測定データには含まれていない。そのた め、交通の流れのシミュレーションに基づく補 完的な分析が必要になる。そこで、複雑な道路 システムで数千台の車両を同時にシミュレート し、それらの相互作用を含む現実的な運転状況 をシミュレートできる交通の流れモデルを構築 した (図19)。



Moving average Real world driving data

18 Analysis of real driving data on the distribution of the start frequency of individual driving ranges based on average speed



19 Traffic simulation model configured for city driving

交通の流れモデルでは、測定データで確認 された挙動が十分な精度でマッピングされ る。また、交通密度、道路の種類、運転ス タイルなどのパラメータのばらつきも系統 的に含めることができる(図20)。交通密 度が高い場合、運転者の影響はごくわずか だが、外部影響により、ばらつきは大きく なる。

測定データとシミュレートされたデータを 組み合わせて、各国の交通統計データとの 関連付けを行うことができる。利用可能な データをシェフラーが収集したデータに系 統的にリンクさせて、着目する地域ごとの データに変換できる(図21)。個々の車両 への変換は、モンテカルロシミュレーショ ンを使用して行う。

これにより、基本データをさまざまな地域 のばらつき、頻度分布に変換できる。この 方法は、POハイブリッドによるマニュアル トランスミッションの回生量に関するデー タベース [8] や、その結果生じるベルト駆 動部品の負荷頻度 [9] を算出できるように、 車両とベルト駆動部品の特性を含められる ように拡張されている。次のステップとし て、算出された負荷分布は、関連する損傷 メカニズムに応じてシステムおよびコン ポーネントレベルの寿命設計および検証を 行うために用いられる。

この一例が、クラッチアクチュエーション サブシステム (CASS)の試験であり、アプ リケーション固有のサイクルを合成するこ とで、定格寿命要件の試験を従来の一般的 な試験サイクルと比較して改善できた(図 22)。

これにより車両全体で要求される試験を減 らすことができる。ここで紹介したアプロー チは多くのアプリケーションに適用されて おり、新製品の開発と市場投入、既存技術 の進歩と設計最適化の両方に段階的に使用 されている。



• Defensive driver, high traffic density

- Aggresive driver, high traffic density
- Defensive driver, low traffic density
- Aggresive driver, low traffic density

20 Traffic flow simulation results with dispersion based on various dependencies



21 Use of traffic statistics for data prostratification



Application-specific test cycle (excerpt)

## Improvement compared to previous test cycle



22 Optimized synthetic test cycle for testing the clutch actuation system

## まとめ

本稿では、設計および開発プロセスの迅速化、 より良い予測精度、より高い機能および出力密 度を実現可能にするシェフラーの CAE ツール の開発について説明した。

- DYFASIM でのねじり振動ダンパーの計算 は、開発の初期段階でリスクを低減するた め、包括的で高度に自動化された計算を含 めることで、ハイブリッドパワートレイン の最適な設計を可能にする。
- OPTIKIT ツールの BEARINX への統合は、
  関連するトランスミッションおよび境界条件での転がり軸受の自動最適化が可能になり、例えば、摩擦損失を 20%以上低減する。
- 熱機械連成シミュレーションツール ATM の CLUSYS クラッチ設計への統合は、計 算時間を従来モデルの 1,000 分の 1 に減 らすことで、クラッチの設計で複雑な機械 的および熱的相互作用を考慮することがで きる。
- バーチャル試験は、運転データ、CAE 手法、 部品試験をリンクすることで、承認試験の 迅速化と統計的手法による安全性の担保を 可能にする。

## Literature

- [1] Kooy, A.; Eireiner, D.; Krause, T.; Herbers, C.; Vögtle, B.: Torsional damping systems for all relevant powertrains – Extending current damping technologies. 16<sup>th</sup> International VDI Congress Drivetrain for Vehicles, Friedrichshafen, 2016
- [2] Kooy, A.; Seebacher, R.: Best-in-Class Dampers for Every Driveline Concept. 11. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2018
- [3] Vierneusel, B.: Schnelles Berechnungsverfahren zur Vermeidung oberflächeninduzierter Schäden in Wälzlagern. 12. VDI-Fachtagung Gleit- und Wälzlagerungen, Schweinfurt, 2017
- [4] von Petery, G.; Rumpel, R.: Innovative Bearing Concepts for the Powertrains of the Future.11. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden 2018
- [5] Wittmann, C.; Bergl, T.: Kupplungskonzepte für steigende Motormomente, VDI-Fachtagung Kupplungen und Kupplungssysteme in Antrieben, 2007
- [6] Eckenfels, T.: 48 V Hybridization A Smart Upgrade for the Powertrain. 11. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2018

- [7] Rathke, G.; Kimmig, K.-L.; Baumgartner, A.: Made-to-Order Double Clutch Systems. 11. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2018
- [8] Welter, R.; Kneißler, M.; Baumann, M.: The Manual Transmission Has a Future – E-Clutch and Hybridization. 11. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2018
- [9] Schroeder, C.; Stuffer, A.: P0 Mild Hybrid With System Competence to Maximum Efficiency. 11. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2018



# Schaeffler E-Mobility

With Creativity and System Competence in the Field of Endless Opportunities



#### はじめに

シェフラーは電動化分野において電動ドラ イブトレインの開発および製造をつうじ、 専門知識を蓄積してきた。そして 2002 年 には最初のコンセプトカーが製造された。 2010年に開催された第9回シェフラーシ ンポジウムでは、マイルドおよびフルハイ ブリッドカーに向けた高度なソリューショ ンが紹介された [1]。2013年には、ハイ ブリッドカー用コンポーネントの量産が開 始された。その後、シェフラーは専門知識 のさらなる蓄積に注力し、2014年に開催 された第10回シェフラーシンポジウムで は、電動アクスル、ホイールハブ駆動など、 実走行可能なプロトタイプカーを展示した [2、3]。このようにして得た技術力はハイ ブリッドモジュールや電動アクスルといっ た複数のプロジェクトにつながり、2017 年から2019年にかけて複数の製品が 量産化される(図1)。近い将来、中国、ヨー ロッパ、米国を含む電動化推進の大きな市 場すべてで、シェフラーが開発、製造した 製品が供給されるようになる。2018年初 めには、これらの活動を統括する新しい電 動モビリティ部門が発足した。

#### パワートレイン開発の方向性

ここ数年、自動車業界では、ハイブリッドお よび電動ドライブトレインのコンセプトが多 数発表されている。この原動力は主に、汚染 物質排出量の制限値の順守を義務付けた CO<sub>2</sub> 排出量規制である。2017 年 9 月 1 日からは、 新しい走行試験モードを含め、これに関連した 評価基準 WLTC (Worldwide-harmonized Light vehicles Test Cycle)、RDE (Real Driving Emission) が段階的に導入され た。2019 年 9 月 1 日からは、販売される



1 Series launches for electrical drives in 2017 to 2019

すべての新車について、汚染物質の制限値 を実走行での計測値でも順守することが求 められる (Euro 6d TEMP、RDE)。

自動車メーカーやサプライヤーにとっての 課題は、適切なフリート燃費を定義すると 同時に、顧客の好みが世界中で多様化する なか、価格や性能に対する要求も満たさな ければならないことである。さらに限られ た開発資源を効果的に活用する必要もあ る。

現在の世界的、地域的な技術開発、エネル ギーチェーン、インフラの転換、限られた リソースなどを考慮すれば、しばらくの間 は異なるパワートレインが存在することが 推測される。今後は電気自動車用の電動パ ワートレインの割合が増えるが、これは高 圧バッテリーと関連するエネルギーチェー ン、インフラの整備に大きく依存している。 電気自動車用の電動パワートレインについ ての解決策は、電動アクスル、ホイールの 直接駆動(ホイールハブ駆動)である。こ の領域のもう一つの推進力は、デジタル化 と自動運転技術の開発である。都市部の新 しいモビリティコンセプトが新しく特別な ビジネスモデルを創出し、新しい自動車の コンセプトが生まれ、ホイールハブ駆動な どスペースの最適利用と高い操作性を実現 する駆動形式が注目を集めていくことが推 測される。

ハイブリッド化にともない、多種多様なパ ワートレインの開発が行われるようになっ ている。これらのパワートレインは、アー キテクチャやトポロジーによって分類で き、機能の観点から説明できる。電動化の 度合いは下記のように分けられ(マイクロ、 マイルド、フルおよびプラグインハイブ リッド、電気自動車)、機能に基づいて特 徴付けられる。ハイブリッド構造(パラレ ル、シリーズおよびパワースプリット)は、 エネルギーの流れから区別できる。適切な システムの選択は、最終的には車両レベル でどのような機能、性能が求められるかに よる (動性能、運転性能)。

また、パラレルハイブリッド構造は、市販 されている多くのパワースプリット式のハ イブリッドトランスミッションとともに定 着している(トヨタ・プリウスなど)。さ らに、パラレルまたはシリーズ運転が可能 な構造も存在する(三菱アウトランダーな ど)。パラレル構造が利点を発揮するのは、 以下の場合である。

- パワートレインが主に運動エネルギーの 回収のために設計される(マイルドハイ ブリッド)。
- 一つの電動システムのみを使用する。
- ベースのトランスミッションがそのまま 組み込まれる。
- 走行プロファイルの大部分が高速である。
- 高い機能的冗長性が要求される(低バッ テリー時の要求機能)。

電力が十分で、冗長性がそれほど要求され ない場合、トランスミッションへの要求は それほど多くないため、コスト効率は高く なる。内燃機関の動作範囲を高効率な範囲 に制限することができれば、さらなる優位 性を得ることができる。これは、以下の運 転モードで実現できる。

- 無段変速運転(eCVT、パワースプリット)
- シリーズ運転
- 限定されたエンジン駆動での走行(中高 車速以上でのメカニカル締結によるエン ジン駆動)
- 低速域での EV 走行

さらなる運転モードを組み合わせることで、 より良い結果が得られるが、そのためには、 特殊なトランスミッション構造に加えて、 専用の内燃機関および電動システムの設計 が必要である。これら特別に作られたパワー トレインでは、ハイブリッドシステムの



2 Installation position of the electric drive in hybrid vehicles

オペレーションが性能、燃費、操縦性、 NVH に対して大きな影響を与える。

Parallel hybrid powertrain



Dedicated hybrid powertrain Electric axle Electric a



 Parallel
 P4
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I
 I

電動システムとパワートレインの連結位置

によりさまざまなハイブリッドが定義され

全輪駆動など、パワートレイン機能と車両

駆動機能と一緒に考慮する場合、ハイブリッ

ド構造の問題にはそれらの機能レベルも関

わってくる。モータ走行を含むすべてのハ

イブリッド機能は、P4トポロジー(電動ア

クスル)を使用することで実装できる。内

燃機関による駆動と組み合わせることで、

全輪駆動が可能になる。バッテリーが空に

なってもこの全輪機能が失われないように

するため、電動アクスルには、通常エンジ

ンの出力により発電がおこなえるシステム と組み合わせる必要がある。電動アクスル と組み合せる可能性のあるソリューション

電動アクスルにはさらに機能的な利点がある。SUVのように、高い駆動トルクと高い

最高車速を同時に達成するため、2 速変速機

の追加も可能である。また、ホイール間の

ている (図 2)。

を図3に示す。

3 Functional scope of different P4 solutions

48 V HV HV EV (12 V) Micro Mild Full Plug In EV Power-Split Hybrid Hybrid Hybrid Hybrid Туре Serial 12 V 48 V ΗV ΗV ΗV P4 P4, P5 P3 P3 DHT P2,5 CVT P1, P2, P2,5 P2 DCT AT Card Con P0 p1 MT/AMT P0 30-12544 10-20×M 20-5041 40-300 KM 2-5414 16 possible Variants

4 Combination of architecture, topology, and transmission options in a hybrid powertrain

トルク配分の制御により、動的性能を大幅 に向上できる機能(トルクベクタリング) の追加も可能である。

ハイブリッド化の度合いとトポロジーの組 み合わせは、全部で16通り存在する。さ らに、駆動モジュールで提供されるトラン スミッションのバージョン(シリーズおよ びパワースプリット)も考慮すれば、シス テムレベルでの複雑さは大幅に増すことに なる(図4)。

#### 課題

限られた開発資源で、高度に複雑なシステムの機能、コスト、日程に関する目標を達成するには、システム専門知識をもったサ プライヤーとの協調が必要となる。シェ フラーのシステム専門知識には、上記す べてのパワートレイン部品(内燃機関、 トランスミッション、電動トランスミッショ ン)や、機械、電気、情報技術に関連する サブシステムおよび熱に関連するサブシス テムのさまざまな相互作用に関する知見が 含まれている。それらは、シミュレーショ ンツール、試験設備、車両試験などを継続 的に最適化することで向上される。シェフ ラーにとっての課題は、数十年にわたって 内燃機関やトランスミッションで培ってき たパワートレインの専門知識とノウハウに、 電動関連の能力を追加することである。

#### 電動システムの開発能力

将来の製品ポートフォリオで、電動アクス ル、ハイブリッドモジュール、ホイールハ ブ駆動、ハイブリッド専用トランスミッショ ンを供給することが計画されている。供給 範囲は、システム全体、すなわちモータ、 パワーエレクトロニクス、ソフトウェアが



5 Platform approach for e-machines and power electronics in various applications

含まれる。そのため、モータとパワーエレ クトロニクスに関し、さまざまな知識が要 求される(図5)。

走行性能および燃費に関して最適化するに は、ギヤ比、モータ、パワーエレクトロニ クスが高次元でバランスが取れていること が要求される。同時に、設計スペース、重 量、快適性などの要件を満たす必要がある。 そのため、シェフラーは約10年間、関連 するすべてのエンジニアリング分野で開発 能力を高めてきた。

多くの影響をおよぼすパラメータについて 的確な決定を行うためには、すべての主要 な開発工程でのモデルの構築とシミュレー ションが不可欠である。このことは、ある アプリケーションの要求仕様書に記載され た要件を満たすために、モータの寸法を どうするべきかという簡単な問題によって 明確になる。設計とはつまり、相反する影 響因子のバランスを取りながら、最低電圧、 最大許容電流、許容スペース、冷却性能な どの境界条件を各アプリケーションでしっ かりと定義し、最適解を求める複雑な問題 である。

- 最大トルクは許容電流の範囲内で達成す る必要がある。許容スペースには限りが あり、エアギャップなどの機械的に変更 できる余地はほとんど存在しない。残る 変更余地は、出力密度向上であり、これ にともない高い逆起電力が発生する。
- 最高回転数を達成するためには、弱め界 磁で逆起電力を低減させる必要がある。
   同レベルの電力で、弱め界磁の最適化の ためには、最大トルクとのトレードオフ が必要となる。

- フェール時(最高回転数時のオープンゲートまたは相短絡)には、高い逆起電力によって危機的な状態に陥る可能性がある(過電圧、過電流)。このような状態はパワーエレクトロニクスによって阻止する必要がある(アクティブショートカット、短絡電流による熱安定性など)。
- さまざまな損失(電気抵抗、ヒステリシス、 電流変位効果など)がモータの設計による 影響を受ける。これらは高効率化や最大効 率値にも影響を与え、負荷頻度を物理限界 内にすることにも影響を与える。
- 電磁的最適値は、ロータを含む機械的強度 と熱設計によって設定される。磁石穴部に おける応力集中低減や巻き線の冷却性能向 上により、モータ性能を向上できる。
- 磁極の特性としてトルクリップルなどによる高周波の回転振動が発生する。これらはNVHの問題を引き起こす可能性がある。そのため、振動伝達経路や固有振動モードに関する解析が必要である。回転振動はロータ、ステータの仕様にも影響を受ける(極数とスロット数の比率、スロット開口部の幅、ロータのオフセットなど)。性能の遡及効果についても確認する必要がある。
- 材料の量や品質は性能パラメータだけでなく、コストにも影響をおよぼす。

磁場シミュレーションに必要な最適化ループ には、電気的設計、機械的モデリング、CFD の計算、熱の流れに関するシミュレーション が含まれる。



6 Continuous development of a thermal model for tractive motors



7 Factors influencing the increase in power density in an electric axle drive

さらに、計算モデルをパラメータ化するに は、多くの検証済みの特性が必要である。熱 挙動モデルなどは、開発工程で考案、検証さ れたモデルが最終的にはモータ制御内に実 装されている。その後の検証は、このアプリ ケーションの安全性向上のためだけではな く、モデルの改善のためにも使用される(図 6)。

幅広い市場の要件を許容できるコストで提 供できるように、シェフラーは電動システム の開発プラットフォームを構築した[6]。プ ラットフォームは電動アクスルだけでなく、 ハイブリッドモジュール、ホイールハブ駆 動、ハイブリッド専用トランスミッションに も適している。ただし、モジュラーアプロー チに含まれるのは電動システムの電気部品 だけではない。クラッチ、アクチュエータ、 電動アクスル用トランスミッションのモ ジュラーコンセプトも計画、開発されてい る。図7に、電動アクスルにおけるこれら のモジュラーシステムのアプリケーション を示す。

以下の四つの領域で大幅な向上が達成され た。

- モータの出力密度および熱的安定性
- 焼結接合を用いた IGBT、AUTOSAR 互換の制御技術をベースにした統合パワー エレクトロニクス
- 車両搭載に必要なスペースを最小化し、 モジュール化されたギヤセットによりギ ヤ比を変更することで各顧客の要望に対 応可能なトランスミッションコンセプト
- 電気的特性、NVH、冷却などの主要なシ ステム特性を考慮した開発手法

最新技術を適用し、サブシステムとの最適 なバランスを取り、メカトロニクスの統合 をさらに進めることで、重量を15%低減 しながら、トルクと出力を倍増することが できた。

2017 年 12 月 の Compact Dynamics 社の完全買収により、モータの設計に関 する専門知識をさらに広げることができ た。Compact Dynamics 社 は、 自 社 開発のモータがチーム Audi Sport ABT Schaeffler のフォーミュラ E 車両に搭載 されるなど、開発パートナーとして定評が ある。

技術的な課題だけでなく、コスト的な課題、 スケジュールに関する課題も克服する必要 がある。さまざまな顧客要望に対応しなが ら、同時に開発期間を短縮するには、柔軟 なモジュラーアプローチが不可欠である。 そのため、シェフラーは重要なサブシステ ムのモジュール化を推進することで標準化 と多様性を両立させている。

#### ロードマップ

現在量産されている第二世代のハイブリッ ドモジュールに加えて、発進機能を統合化 した第三世代、さらにパワーエレクトロニ クスまで一体化された第四世代が数年以内 に量産される予定である。ハイブリッド専 用トランスミッションでは出力密度がさら に高まり、モータがトランスミッション機 能の一部を担う。1速/2速電動アクス ル用のトランスミッションはすでに量産が 開始されているが、将来的にシェフラーは モータ、パワーエレクトロニクス、トラン スミッションが一体化された電動アクスル を開発、供給する予定である(図8)。



8 Product road map for electric drives.

## Literature

- Wagner, U.; Reitz, D.: The Future comes Automatic – Efficient Automatic Transmissions Provide a Basis for Hybrid Capable Drive Trains. 9. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2010
- [2] Smetana, Th.: Who's Afraid of 48 V? Not the Mini Hybrid with Electric Axle! 10. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2014
- [3] Fischer, R.: More Agile in the City Schaeffler's Wheel Hub Drives. 10. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2014
- [4] Eckenfels, Th.: 48 V Hybridization A Smart Upgrade for the Powertrain. 11. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2018
- [5] Pfund, Th.: The Schaeffler eDrive Plattform Modular and Highly Integrated. 11. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2018
- [6] Gutzmer, P.: Die Zukunft des Motors kommt über das Getriebe. 36<sup>th</sup> International Vienna Engine Symposium, 2015
- [7] Kinigadner, A.: Dedicated Hybrid Transmission How the Transmission Becomes a Powertrain. 11. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2018





# PO Mild Hybrid

With System Competence to Maximum Efficiency



#### はじめに

パワートレインシステム全体は現在、絶え 間ない変革の途上である。内燃機関とトラ ンスミッションという従来からの組み合わ せには、ハイブリッドコンポーネントや新 しい電装品などの補助的装置がさまざまな 箇所で続々と追加されている。ベルト駆動 式スタータジェネレータ(以下 BSG)を従 来型の補機駆動システム内で使用する形式 を、POマイルドハイブリッドと呼ぶ。元来 は補機ドライブの12Vベルト駆動式停止/ 発進システムが中心だったが、現在は厳格 化する CO<sub>2</sub>排出量規制への完全準拠を念頭 に置き、48V BSG を搭載した POマイル ドハイブリッドが主役になりつつある。

## **P0 マイルドハイブリッドを** 効果的に組込む

P0 マイルドハイブリッドを推す主な理由 は、得られる効果に対して比較的少ない時 間や労力、かつ低コストでの組込みが可能 な点が挙げられる。こうした状況によって、 よりパワフルな BSG を導入することによ り、ベルト駆動による内燃機関の迅速かつ 快適な再始動が可能となった。さらに制動 エネルギーを回生して、必要に応じてその エネルギーを駆動に回す、いわゆるブース ティング機能も実現可能である。

シェフラーの評価では、こうした特徴に よって次世代の自動車における PO マイル ドハイブリッド適用車両数は大幅に拡大す ると見ており、2030 年にはグローバル市 場における 48V ベースの PO システムの普 及数が約 2,000 万ユニットに上ると予想 している。

P0 マイルドハイブリッドはフルハイブリッ ド車やプラグインハイブリッド車との組み 合わせでも利用されており、このコンセプト 設計では P0 システム単体の場合に比べ、シ ステムコンポーネントへの要件をより少な く抑えることができる。また、P0 システム は快適な発進システム専用に設計すること も可能である。

シェフラーは、ベルト駆動およびパワートレ イン用の主要コンポーネントを提供してお り、多彩なハイブリッドシステムに関する蓄 積された豊富な専門知識で自動車メーカー との提携をつうじて、あらゆる用途に合わせ た適切な効率性を発揮するシステムを設計、 実装することが可能である。ここでは実例を 挙げてサブシステム間の相互作用と、それら がコンポーネントや設計におよぼす影響に ついて、さらに PO マイルドハイブリッドシ ステムに最適なベルト駆動式コンポーネン トについて紹介する。システム全般を網羅し ているシェフラーでは P0 システムの検討範 囲をベルト駆動に限定せず、摩擦損失低減用 の転がり軸受を取り付けたクランクシャフ ト軸受構成[1]や、手動変速用途向け E ク ラッチシステム [2] などの研究、最適化をつ うじて、パワートレインの効率性向上を目指 している。

## ベルト駆動システムに およぼす影響

48V ハイブリッドでベルト駆動を行う場 合、伝達される出力量は従来の12V 用途 と比べて大幅に高まる[3]。例えばジェネ レータの出力量は約3kWから12kWに上 がり、こうした出力増加により、ブースティ ングと回生との切替えも頻繁に行われる。 これによってシステムやコンポーネント全 体にかかる負担は大幅に増大し、制約条件 も従来型ソリューションとは大きく異なる ものとなる。シェフラーでは以前からこう した課題にも対応しており、ベルト駆動へ のモータ組込みを実現するための主要コン ポーネントを開発している[4]。



1 Operating modes of a decoupling tensioner

### 将来におけるベルト駆動の 主要コンポーネント

48V ハイブリッドの機能として、特にブー スティング機能、制動エネルギーの可能な 限りの回生といった機能を余すことなく実 装可能とするため、モータからベルト駆動 にかかるトルクは大幅に増大している。ア イドリング速度域でのジェネレータ稼働時 および内燃機関の始動時には、最大 50Nm のトルクがスタータジェネレータに伝達さ れる。

スタータジェネレータが発電として機能 しているか、それともモータとして機能 しているかに応じて、ベルトへの張力、

張り/緩みの方向が変化するため、テン ションシステムの変更が必要になる。これ を実践する最も簡単な方法としては、二つ の独立した張力調整機構を、BSGのプー リーの前後に配置するという手法がある。 これに代えて、二つの張力調整プーリーを 組み合わせた、いわゆるツインテンショ ナーを形成し、テンションスプリングの一 方だけを二本のアームに接続することで、 モータ上の取り付けポイントも一か所だけ にする方法もある。もう一つの設計方法が、 デカップリングテンショナーである。トル クの方向が変化するとベルトテンショナー の作動位置を変更し、動作点に応じてベル トのセット張力が最適になるよう調整が可 能である (図1)。



2 Tensioning elements and decoupling tensioners for P0 belt drives



Decoupling performance - Decoupling tensioner

n<sub>cr</sub> n<sub>ALT</sub>

3 Decoupling function of a PO system, based on two individual tensioners (above), compared to a PO system with a decoupling tensioner. Graphed here are speeds over time during generator operation; the BSG speed is converted to the crankshaft

デカップリングテンショナーは、BSGと 同軸になる形でボルト固定により取り付け られて一つのユニットを形成する。詳細な 設計は補機類の各デバイスの配置や、各車 両レイアウトによる設置可能なスペースな ど複数の要因によって左右される。シェフ ラーではさまざまなソリューションを開発 しており、未来のベルト駆動の可能性を広 げている(図2)。

さらに、内燃機関によって生じる回転変動 や、これらがジェネレータにもたらす影響 についても検証が必要である。P0 用途に おいてはデカップリングテンショナーが ジェネレータ内の回転変動を低減させ、独 立した二つのテンショナーを使用する場合 との比較においても、このソリューション では補機ドライブ全体の動的特性が改善されて低張力ならびに低出力損失が実現可能 となる(図3)。

デカップリングテンショナーに起因するこうした回転変動については、一定の制限値 未満になるよう最適化が可能である。ただし、高負荷のかかる内燃機関で気筒休止機能を使用する場合は、アイドリング速度をわずかに上回っただけで高レベルのトルク変動が発生し、その結果、回転変動は増大する。1,000rpm時の全負荷における変動角が約±4°を超えるような場合、このようなクランクシャフトから発生した回転変動が P0マイルドハイブリッド方式のベルト駆動に作用するようなことは、システムの観点から許容できない。これは指標としての役割を 果たし、設計、エンジンの特性、補助的データに応じて個別に計算することが不可欠である。こうした回転変動はすでに、現行の3気筒および4気筒エンジンでも発生しており、特にP0マイルドハイブリッドシステムにおいては、ベルト駆動からの分離が急務となっている。

シェフラーではそのため、クランクプーリー デカップラー (以下 PYD) [5]を開発し、 2013年には従来型ベルト駆動システムお よび P0マイルドハイブリッド用ベルト駆動 システムの両方をターゲットに、初の量産 をスタートさせた。ベルト駆動式プーリー デカップラー (図 4)は DMF 同様にアーク スプリングを採用し、高出力密度、優れた デカップリング性能、高ロバスト性を実現 しているほか、100万回を超えるスタート ストップにも耐えるよう設計されている。



プーリーデカップラーを使用することにより、ベルト幅を狭くしセット張力を低減さ せることで CO<sub>2</sub>削減につなげる [5] など、

4 Belt pulley decoupler

さらなる最適化の可能性を切り拓くことが 可能である。



5 Decrease in engine irregularities by using a crankshaft decoupler. Graphed here are speeds over time during generator operation; the BSG speed is converted to the crankshaft

#### 最大限のメリットを 生み出すための設計

ベルト駆動システムにおいては将来的なト ルク要件に応えるためにプーリー径、ドラ イブレシオ、セット張力、ベルト幅、巻き角、 ベルト仕様などの複数の設計パラメータが 変更可能である。

クランクシャフト - ジェネレータ間のレシ オは、モータの性能を有効利用できるか否 かの決め手となる。クランクシャフトプー リー径をどの程度拡大可能かは通常、設置 スペースによって制限される。クランク軸 上を高レシオ化する場合、ジェネレータの ベルトプーリー径は小さくする必要がある。 その場合、特に低速域でのブースト中に過 度のスリップが生じて、P0システムの効率 が低下することになりかねない。図6では、 プーリー径51.3mm および56mm という 二つの設計バージョンで、エンジン始動中の スリップ(伝達動力損失)を比較している。 ジェネレータのベルトプーリーが小径化され、ベルトとプーリーの接触面積が小さくなるため、回転変動が大きいエンジン低回転域ではスリップが大きくなる。平均スリップ値が2%を超えると、ベルトの摩耗増大、過度の騒音、効率レベルの低下につながるため、許容不可である。

スリップレベルを低く保つことが、設計に おける基本的目標である。例で示すように、 ブースト運転の場合に限らず、あらゆる回 生フェーズや始動フェーズにもこのことが当 てはまる。P0タイプ48Vハイブリッドシ ステムでは、エンジン始動トルクが約40~ 50Nmであり、既存の6山リブベルト(6PK) と張力調整機構による伝達が可能である。

シェフラーでは将来、伝達トルクがさら に増大すると予測している。始動時の最 大トルクは一時的に最大 65Nm まで到達 し、連続運転およびブースト/回生動作中 のパワーレベルも同様に増大するだろう。







7 Torque limits of the e-machine due to the maximum admissible belt forces, depending on the belt width, BSG diameter, and wrap angle.

その結果として、増大したトルクをエンジ ンのコールドスタート時にも利用できるた め、ピニオンスタータなしで始動できる可 能性もある。計算の結果はプーリー径を大 きくするだけでなく、さらにリブ数を増や し、BSG プーリーの巻き角を最適化するこ とでより大きなトルクを伝達できることを 示している (図7)。また、径を大きくした 場合、リブ数を6から8に増やすことと同 レベルのトルク伝達向上が可能となる。さ らに、ベルト幅を狭くすることでベルトの 変形に要する仕事量が低減する、つまり機 械損失が低減することも明確である。

すべりを防止する観点では、モータのベル トプーリー径を大きくすることも理にか なっているが、設置スペースが限られてい る場合が多く、このような最適化方法には 限界がある。

ContiTech 社とINA による合弁事業において、シェフラーはベルト駆動システムの開発を一貫したサービスとして提供している。ContiTech 社では許容負荷の向上を

目標として、スタートストップシステム向 けのベルトの開発を進めている。

断続運転においても連続運転においてもBSG システム内におけるベルトの負荷は常に許容 値内とする必要があり、デカップリングデバ イスを用いることで、実現できる。

#### 将来の要件に備えて さらに進化したコンポーネント

シェフラーではベルト駆動システムの評価結 果に基づき、次世代のデカップリングテンショ ナーに重点を置き、POマイルドハイブリッド 用コンポーネントの開発を進めている。設置 スペースの削減や軽量化といった通常行われ る最適化に加え、リブ数8までの各種ベルト におけるモジュール化にも注力している。す でに量産が始まっている6山ベルト(6PK) をベースにしたPOタイプ48Vベルト駆動向 けバージョンのほかに、テンションプーリー がジェネレータ側に設定されたバージョンの 開発も進められている(図8中央)。





• SOP 2017

 Pulley up • Weight -30 % • max. starter Db 70 mm • 6 up to 8 PK

8 Decoupling tensioners in comparison; left: series standard; middle: tensioner pulleys facing in the direction of the e-machine; right: tensioner pulleys facing away from the e-machine

このタイプでは、ジェネレータの入力 シャフトへの曲げモーメントが小さく なるためジェネレータシャフト軸受の 負荷低減が可能である。ベルトはテン ショナー取り付けに先がけて、ジェネ レータプーリー上にあらかじめセット される。

これに加えてシェフラーでは、アクティ ブベルトテンショナーの先行開発が進 められている (図9)。このタイプのテ ンショナーは、ベルトのあらゆるセッ ト張力に対して対応可能なため、より 低温でのエンジン始動が可能になる。 ベルトの入力トルクに対応したセット 張力への制御が行われる。現在、さま ざまな動作点においてセット張力を最 適化した状態で、摩擦損失低減のメリッ トを確認するための基礎試験が行われ ている。



9 Electromechanical belt tensioner

その一方で、PYDのさらなる開発にも重 点が置かれている。現状すでに P0 マイル ドハイブリッドおよび既存の補機駆動に適 用できるベルト駆動システムは、ベルト 幅 5~8PK ならびにプーリー径 140~ 200mmの範囲まで網羅している。直近 の開発では難易度の高い P0 用途であって も効率的な対応を可能にするために、出力 密度と伝達能力の増大に重点が置かれてい る。特にPO用途ではスタータジェネレー タの作動条件と大きく関わっており、その 影響を織り込むため、特性を決定する際は 総合的かつ体系的なアプローチを採用して いる。

シェフラーではさらなる自由度をもたらす PYD の提供が可能である。動的条件下での 過負荷防止は、パワートレインの剛性レベ ルやクラッチを急速に締結した際のトルク 勾配など、システムに大きく依存している。 パワートレインを含めた大規模かつ正確な 解析環境が揃っていること、またデュアル マスフライホイールの開発から得られた

PYD characteristic optimization in misuse case



10 Torque at the interface to the crankshaft Left: standard design; right: optimized characteristic curve of the "shifting error" load case



11 Switchable belt pulley decoupler for air conditioning when the combustion engine is stopped

アークスプリングの設計、適用に関する膨 大な専門知識の蓄積により、現在ではさま ざまな挙動を初期段階でシミュレーション による精度の高い予測が可能となってい る。こうした最適化により、想定外な使わ れ方のケースも含めて、クランクシャフト、 ベルトプーリー間の許容トルクを超えない 設定が可能となる(図10)。

スイッチャブルデカップラーによって、 シェフラーが提供する PYD のラインナッ プにさらなる快適性向上を目的としたタイ プが加わった。これによって、POマイル ドハイブリッド向けデカップラーのメリッ トが存分に発揮される。これはクランク シャフトとベルト間の駆動力を必要に応じ て分離するアクチュエータが追加されてお り、セーリング中や信号での停車時にエン ジンが停止している状況でも P0 タイプ用

スタータジェネレータによりベルト駆動エ アコン用コンプレッサの動作を継続させる ことが可能となり、エンジン停止時の快適 性は大いに改善する。また走行中にエアコ ンが使用されている状況でも内燃機関を停 止することが可能となり、燃料消費量の観 点でもメリットがある。アクチュエータを 閉じたのち BSG によってエンジンは快適 に再始動可能である。

スイッチャブルデカップラーの最適化に よって、通常の設計スペースでも利用可能 になり、以前に比べ必要な設計スペースは 低減されている。さらに内燃機関の稼働 中もクランクシャフトとベルト間の駆動力 を分離できるオプションが加わったことで ベルト駆動を停止させることも可能となっ た。

シェフラーではすでに、標準型および PO マイルドハイブリッド向けベルト駆動用の テンショナーおよび PYD の幅広いライン ナップを取り揃えている。コンポーネント やサブシステムのさらなる進歩によって新 たなメリットが得られる上、PO タイプを

Boost without PYD

より効率的に活用することも可能となる。 最適化にあたってはベルト駆動だけでなく デカップリングも含めたシステムとしての 検証が必要である。

#### 運転時におけるシステム挙動

シェフラーはベルト駆動からホイール駆動 に至るまで、ハイブリッド用パワートレイ ン全般に関するシステム知識を有してい る。システム全体を効率的に最適化するた め、システムどうしの相互作用や、システ ムと車両との相互作用についても考慮する 必要がある。特に密接なものとして、クラ ンクシャフト軸受とダブルクラッチあるい はデュアルマスフライホイールダンパーと の相互作用が挙げられる。

#### クランクシャフト軸受

PO マイルドハイブリッドシステムはさま ざまな運転モードにおいてクランクシャフ ト自体や第1クランクシャフト軸受などに

Z 3,000 2,500 2.000 1,500 1,000 500 1,000 2,000 3,000 4,000 5,000 6,000 7,000 0 Crankshaft in rpm

12 Reduction in the bearing forces on the crankshaft pulley by using a crankshaft decoupler

Boost with PYD



13 Friction power vs. effective medium pressure and speed in a three-cylinder engine with a displacement of 1.0 l and a P0 belt drive. Using color gradients, the diagram shows the advantage in the overall drive torque in the case of a rolling bearing arrangement in the first position of the crankshaft.

およぼす影響を考慮し、PYD、さらには転 がり軸受の適用など、さまざまなコンポー ネントを用いた最適化が行われている。

ブースティングなどの新たな運転モードで は非常に高いベルト動張力が生じることが あり、これにより発生した軸荷重は第1ク ランクシャフト軸受にも加わる。図12は、 PYD の適用により、動張力が低減したこと でクランクシャフトにかかる荷重が明らか に低減していることを示している。第1ク ランクシャフト軸受のみではなく、そのほ かすべての軸受位置で荷重が低減した。

P0 システムでは標準システムに比べ BSG によるトルク増加にともない、ベルトの





14 Vibration system of the belt drive – decoupler – crankshaft – dual-mass flywheel: rotational irregularities when starting the engine, both before (middle) and after optimization (right); green: crankshaft; bright green: belt pulley

セット張力と作動力が標準システムに比べ て高くなり、クランクシャフトのすべり軸 受の摩擦損失の増加が不可避である。その ためシェフラーではPOシステムによる第 1クランクシャフト軸受の摩擦損失も考慮 に入れている。図13では、排気量1.0リッ ターの3気筒エンジンでは、第1クランク シャフト軸受に入力される負荷によって、 面圧が増加することにより摩擦損失が増加 していることを示している。すべり軸受を 転がり軸受に変更することで、摩擦損失を 低減することが可能である。

## デュアルマスフライホイールとの 相互作用

BSG を補機に組み込むことにより、エン ジン・トランスミッションシステム全体の 挙動に影響をおよぼす。開発の過程でクラ ンクシャフト両端にあるベルトプーリーと ダンパーとの相互作用によって、BSG が エンジンを始動させる際にパワートレイン 内に共振が発生し、エンジン始動の妨げに



<sup>15</sup> Sample parameter test of dual-mass flywheel and decoupler characteristic curves

なるという問題が発生した。これはトラン スミッション側のスタータ、ベルト駆動、 ダンパーのさまざまなパラメータに依存す るものであったが、シミュレーションツー ルによって開発の初期段階でこれらの影響 を把握することができた(図14)。デュア ルマスフライホイールとPYDのそれぞれ の特性を最適化することにより、モータの 出力が2kW未満という4気筒ディーゼル エンジンにおいても快適なエンジンスター トを実現することが可能となった。

P0 マイルドハイブリッドシステムにおい ては、エンジンの始動、再始動時の快適性 が優れていることが期待されている。そ のためにも開発初期段階でNVH性能を最 適化することが重要となる。シェフラーで はそのためのシミュレーションツールを 有しており、またクランクシャフト両端に あるコンポーネントの特性の最適化に関す る専門知識も有していることから、実際の 試験による検証の前に、この課題に対応す ることが可能である。例えば、シェフラー が独自に開発したシミュレーションツー ル「DYFASIM」では、パワートレインの 振動現象による相互作用を迅速に計算する ことが可能である。図15は、さまざまな デュアルマスフライホイール特性とデカッ プラー特性で、エンジンスタート時の相互 作用について計算を行った際のサンプル結 果である。

デュアルマスフライホイールおよびデカッ プラーの個々の特性が優れていたとして も、ベルト駆動によるエンジンスタート時 の相互作用を考慮すると、特定のデュアル マスフライホイールとデカップラーの特性 の組み合わせだけが、良好な挙動を示すこ とが分かっている。開発の初期段階でこの ような知見を得られることにより、最適な 設計、開発ループ数の削減、開発リソース の効率的利用が可能となる。



16 Schaeffler components interacting in the GTC I technology car: P0 belt drive with decoupling tensioner and crankshaft decoupling on the left; E-clutch actuator on the right

#### 車両システムへの組込み

実際の道路での走行において、CO<sub>2</sub>排出量 を削減することは重要な課題である。その ためにシェフラーでは、開発の拠点である 欧州の RDE (Real Driving Emissions) 規制の要件を反映した走行サイクルを設定 した。

シェフラーではこの走行サイクルを使用し て、さまざまな電動化車両に P0 ハイブリッ ドシステム組込み、試験を実施している。 主に以下の車両で比較走行を実施した。

 P0:シェフラーのデモカー「Gasoline Technology Car I (GTC I)」。公称出力 92kWのガソリンエンジン、マニュアル トランスミッション、電動クラッチに加 え、BSGの最大出力は10kW(図16)。

- P0 + P4 電動アクスル:120kW ディー ゼルエンジン搭載の量産型乗用車。最大 出力 25kW の電動リアアクスルを搭載。
   P0 BSG の公称出力は 8.5kW で、P4 電動アクスル用モータと同様に電圧は 200V。
- P0 + E クラッチ: 80kW ディーゼルエンジン搭載の量産型乗用車で、48V P0 マイルドハイブリッドとEクラッチ。 BSGの最大出力は10kW。

ベルト駆動の負荷頻度という観点で、走行 データを解析した結果、ブーストおよび回 生動作モードの切替えプロセス数、およ び荷重レベルそのものにも明らかに違い が見られた。ブーストおよび回生動作モー ドの切り替えプロセス数の違いは、P0と 組み合せたシステムの違いに依存する。



17 Time-weighted occurrence of various loads in the PO drive over the electric motor speed for two operating strategies: histogram analysis in sport mode on the left and in comfort mode on the right

例えば、P0をP4電動アクスルと組み合 わせた場合、ブーストおよび回生動作の大 部分はP4電動アクスルで行われる。P0は、 車両電源への電力供給、走行中の充電、内 燃機関の再始動を行うため、通常ブースト および回生動作は行わない。純粋なP0シ ステムではブーストおよび回生までをもま かなうことから、これら二つの動作モード の切り替えプロセス数は多い。P0+Eク ラッチのシステムでも同様であるが、セー リング機能との相互作用にも重点が置かれ ている。

いずれのシステムにおいても、ベルト駆動内 のコンポーネントにかかる負荷に直接影響 するため、仕様を決定する際には相応の配 慮が必要となる。P0とP4電動アクスルを 組み合わせたシステムの場合は、純粋な P0システムと比べ負荷が減った分だけベ ルト駆動のコンポーネントの最適化が可能 となる。

負荷頻度の違いは車両の運転モードによっ ても生じる。以下、スポーツモードおよび コンフォートモードの影響について、PO システムを搭載したGTCIデモカーを例 により紹介する。スポーツモードではより 多くのパワーが要求されるため、モータの ブースト/回生の切り替えも頻繁に行われ る。このモードでのRDE走行中、ブース トおよび回生の合計数は走行距離 87.5km で620回となり、1km あたりの切り替え 回数は7.12回であった。一般的に要求さ れる耐久距離24万km分に換算すると、

Date		Optimised "delayed" clutch opening	Mech. recuperation in kJ/km			
	Driver		City	Country	Highway	Total
12.09.2017	F4810	yes	37	39	23	33
12.09.2017	F4831	no	8	19	22	17
13.09.2017	F2924	no	28	38	17	23

18 Results of RDE test drives: influence of the clutch closure time on the recuperated energy in the same vehicle

170万回のモード切り替えが行われること になる。コンフォートモードでは、同じサ イクルでイベント発生数が半分以下の313 回である一方、内燃機関の始動回数は160 回(セーリングモードおよび停止状態から のエンジンスタート)で、これは走行距離 1kmあたりベルトスタート1.82回に相 当する。これに対して、スポーツモードで の始動回数は0.74回であった(図17)。

デモカーで実施した解析はあくまで一例に 過ぎないが、新たに加わった方式と組み合 せた形でのハイブリッドシステム構成が、 コンポーネントにかかる負荷に大きな違い をもたらしている。

PO マイルドハイブリッド車の CO<sub>2</sub> 排出量 は、実走行中にどの程度の制動エネルギー を回生できるかによって大きく左右される。 システムの性質上、制動エネルギーの回生 はクラッチ締結状態かつ内燃機関がブース ト運転をしていない間にのみ行われる。ド ライバーによる影響を確認するため、最大 出力 10kW の 48V P0 システムを搭載し た車両で、さらに検証を実施した。このと き、ドライバーがクラッチペダルを踏むタ イミングだけを唯一変更している。一般的 な運転操作では、RDE サイクルで回生され るエネルギー量は17kJ/km~23kJ/km であり、クラッチを開放するタイミングを 可能な限り遅らせた場合は、33kJ/kmと なった (図18)。

このように回生量が1.5倍から2倍 になることによって、燃料消費量を約 0.2L/100km削減できる計算になる。

P0 マイルドハイブリッドとマニュアルト ランスミッションの組み合わせにおいて は、Eクラッチの使用によって燃費節約効 果が向上する[6]。Eクラッチではアクチュ エータにより最適のタイミングでクラッチ の締結/開放を制御できるためである。

#### 効率の最大化

CO<sub>2</sub>排出量削減は、自動車メーカーが将来 の自動車に求める最も重要な要件の一つで ある。シェフラーがWLTC (Worldwideharmonized Light vehicles Test Cycle) に基づいて行ったシミュレーションによれば、 CO<sub>2</sub>排出量に関してPOタイプ48Vハイブ リッドシステムがもたらすメリットは、ブー ストおよび回生の利用効率向上によって、ス タートストップに対応可能な12Vスタータ ジェネレータ方式の二倍近くとなり、またス タートストップ非対応の車両と比較してCO<sub>2</sub> 排出量を最大7%近く削減可能である。

E クラッチやそのほかのハイブリッド技術 などの多様な組み合わせを考慮した場合、 P0 + P4 電動アクスル(高電圧)を採用し た C セグメントの車両では、CO<sub>2</sub> 排出量が 最大 18%削減できるとシミュレーション結 果が示している。ここで採用されている PO マイルドハイブリッドは、エンジン再始動、 負荷点シフト、レンジエクステンダー機能 などシステム全体における重要な機能を実 現しており、システム効率を最大限に高め ることに貢献している。

また、平行軸タイプの P2 ハイブリッドモ ジュールにおいては、BSG、ベルトおよびデ カップリングテンショナーのコンセプトを最 大限活用し、48V ベースのモジュールの開発 を進めている [7]。

48VのPOハイブリッドシステムのコスト 効率が非常に高まったことで適用数が増え、 CO<sub>2</sub>排出量削減、快適性向上、駆動特性向上 を目的としたほかのシステムの適用の可能性 も向上している。現在、それらのソリューショ ンは12Vで稼働しているが、48V稼働にな れば、例えば充電量の増大、アクティブロー ル制御システム、車高制御システム、電動エ アコンプレッサなどの機能を向上する可能性 も大きくなる。
まとめ

#### Literature

- 電動化車両の電圧レベルとは関係なく、PO マイルドハイブリッドが市場のスタンダー ドになりつつあることは明らかである。そ の理由として最も重要なものを、以下に挙 げる。
- 技術によって、お客様が明らかなメリットを得られる。
- さまざまなユニットとの多様な組み合わ せ、システム全体の最適化の実現が可能。
- P0 システム開発リソースと、得られる メリットとのバランス面が非常に良好で ある。

ここではベルト駆動に、より高出力なモー タを組み込んだことで、ベルト駆動の全コ ンポーネントやシステム全体の設計に、新 たな技術的要求が課されることとなった経 緯を紹介した。こうした状況においても シェフラーが開発したシミュレーションや システム開発力によって対処可能である。

先に紹介したように、BSGをパワートレイン内でのモータと組み合わせる並行軸タイプのP2ハイブリッドモジュールも有効であり、その場合は技術的変化にともない、設計基準も変化する。そのためシェフラーではPOシステムを単なる電動化のための手段にとどまらない、未来のハイブリッドシステムのスタンダードとなるための前提 ターはシステムに関する膨大な専門知識をもっており、お客様と協力しながらあらゆる用途のシステムの効率を最大化することが可能である。

- Schlerege, F.: Breakthrough of Rollerized Crank Shafts. 11. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2018
- [2] Heinrich, D. et al.: Innovative CAE Optimal Layout of Transmission Components. 11.
   Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2018
- [3] Stuffer, A.; Schroeder C.: Effects of 48 V System on the front-end accessory drive (FEAD) dynamics and design along with a holistic system approach. "Automotive 48 V Power Supply Systems" conference, Berlin, 2017
- [4] Stuffer, A. et al.: Introduction of 48 V Belt Drive System – New Tensioner and Decoupler Solutions for Belt Driven Mild Hybrid Systems. 10. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2014
- [5] Stief, H. et al.: Belt Drive Systems Potential for CO<sub>2</sub> Reductions and how to Achieve them.9. Schaeffler Symposium, Baden-Baden, 2010
- [6] Welter, R.; Kneißler, M.: The Manual Transmission Has a Future – E-Clutch and Hybridization. 11. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2018
- [7] Eckenfels, T., 48 V Hybridization A Smart Upgrade for the Powertrain. 11. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2018



# 48 V Hybridization

A Smart Upgrade for the Powertrain

Thomas Eckenfels Florian Kolb Steffen Lehmann Waldemar Neugebauer Manuel Calero

#### はじめに

48Vハイブリッドシステムは、従来型パ ワートレイン全体のアーキテクチャへ大き な影響を与えることなく、最大出力 20kW のパラレルハイブリッドとして電動化機能 を追加することができる。48Vハイブリッ ドシステムは制動時の運動エネルギーをほ ぼ回生できるため、WLTC (Worldwideharmonized Light vehicles Test Cycle) において、燃料消費量で最大 15%の削減につながる[1]。実走行時には、 走行状況によって削減量は変動するが、都 市部での走行シーンが最も大きな燃費向上 の可能性があると考えられる。48Vハイ ブリッドは、快適性能や運転性能の向上お よび自動運転など、ますます高まる電動化 要求に対応していくための解決策の一つと 考えられている [2]。内燃機関の効率と性 能もまた、48Vハイブリッドとの相互作

用をつうじて大きく向上できる可能性があ ると考えられる。例えば、エンジン低回転 数でのトルクアシストを行うブースト機能 や、48V電源による発電機能を利用し部分 負荷運転において可能な限りスロットルバ ルブを開くデスロットリングを組み合わせ る走行中発電機能などである。RDE (Real Driving Emissions)規制に照らせば、 加速フェーズにおけるエンジン負荷変更や 電気加熱触媒の使用によって、エミッショ ンの大幅な改善が可能となる。

高電圧ハイブリッドシステムと比較する と、高電圧システムでは必須のオンボー ド電源用直流コンポーネントの保護手段 が不要で、補機システム(電動コンプレッ サ、触媒コンバータ加熱、シャシーシス テム作動など、短時間高出力が必要なシ ステム)を対高電圧の保護に関する追 加費用なしで開発/適用を行えることが



1 Various 48 volt architectures and the associated functionalities

#### 優位点であり、これが 48V システムが費 用対効果で優れている理由である。

48Vシステムモジュールを、既存のエン ジンおよびトランスミッションに組み込 むことは、コスト面からも有利である。 つまり、システムを可能な限りモジュー ル化し、既存の製品およびアッセンブリー 構造に組み込むことが48Vシステムに とって重要である。車両システムという 側面から考えると、どのような48Vアー キテクチャが最適であるかは重要な課テ クチャに分類される各種ハイブリッドシ ステムの特徴を比較し、エンジンの再始 動性を含めた検討結果、特にCO<sub>2</sub>排出量 削減、機能性、運転性能について紹介する。

### 48V アーキテクチャ

#### 当初の状況

図1に各アーキテクチャにおけるモータの 搭載位置を示す。いずれのアーキテクチャ にも内燃機関が駆動軸と接続状態にあると きのブースト機能および回生機能、および セーリング機能といった基本機能は備わっ ている。セーリング機能にはクラッチの開 放 / 締結を自動で制御する必要があるた め、自動化されたクラッチが必要である。 P2からP5までの配置における共通点は、 内燃機関を切り離した状態で効率的に制動 エネルギーの回生ができ、またモータ走行 を実現できるところにある (P0 および P1 は、エンジンと常時接続状態)。P4 およ び P5 アーキテクチャでは、48V ベースの 全輪駆動機能を追加できる。ただし、48V インホイールモータの P5 アーキテクチャ は、軽量車両向けの駆動装置に適している とシェフラーでは認識しているが、本稿で は紹介しない。

#### P0、P1 タイプのハイブリッド

48V システムをベースにした PO ハイブリッ ドでは、12Vシステムと比べて制動エネル ギーのかなりの部分を回生できるほか、快適 性が高く、高応答なエンジン始動が可能とな る。このアーキテクチャではほかにも、ス イッチャブルデカップラーを作動させるこ とにより、エンジン停止中もエアコン動作が 可能となるなど、快適性のための機能を付加 することができる。組み込みコストが比較的 低いため、この技術は今後、特にヨーロッパ で大いに普及し、近い将来、地域別の CO<sub>2</sub> 排出量目標の達成に貢献すると考えられる。 シェフラーでは効率性および快適性の向上 を目指して、これらのシステム(スイッチャ ブルデカップラー、ベルトテンショナー)の 最適化を進めており、デモカー「Gasoline Technology Car I」(GTC I) など車両レ ベルで実証を行っている。

従来からある P0 配置の 12V および 48V ハ イブリッドに加えて、ほかのハイブリッド システムと、さまざまなバージョンの補機 ドライブ (Front End Accessory Drives (FEAD))の組み合せが考えられる(図 2)。 こうしたバリエーションは、ベルトレスエン ジンから、モータなしの標準的なベルトレ 動、さらには 12V、48V、あるいはより高 電圧のモータを組み込んだ本格的なベルト 駆動まで、多岐にわたる。後者では、エンジ ン始動と発電が主な機能であるが、その機能 に応じて負荷プロファイルが変わる点を設 計段階で考慮してすることが不可欠である [3]。

クランクシャフトにモータを配置した P1 ハ イブリッドは、トランスミッションの変速比 と関係なく、モータの回転数はエンジンの回 転数に依存する。設計スペースの制約により、 シェフラーでは、特にエンジンのコールドス タート時における高トルク要求と効率を考 慮し、永久磁石同期モータ(以下 PSM)を



2 Possible combinations of hybrid architecture and accessory drives on the internal combustion engine side

常に採用しているが、非同期型に比ベコスト 高となることが課題となる。P1 ハイブリッ ドモジュールは、基本的な点では同軸タイ プの P2 ハイブリッドモジュールと似ている が、エンジンとトランスミッションの締結/ 開放を行う C0 クラッチがない点が相違点で ある。

Vehicle	C-Segment/FWD			
Drivetrain		Gasoline 3 cyl. 1.0	l/7-speed DCT dry	
Hybrid		Micro 12 V/smar	t alternator 2.5 kW	
	+ 48 V bordnet/1.4 kWh battery			
	P0	P0	P1	
FEAD	48 V BSG	48 V BSG	beltless	
Eta max (EM + PE)	84 %	94 %	94 %	
EM @ 42 V/100 °C	ASM 8.5 kW (20 s)	PSM 16 kW (20 s)	PSM 15 kW (20 s)	

シェフラーが実施した WLTC シミュレー ション結果では、48V 非同期型モータ (ASM)を使った PO ハイブリッドは、ス タートストップ機能付き12Vのマイクロ ハイブリッドに対して 3.8%の CO。低減 を実現している(図3)。48V高出力永久 磁石同期モータ(PSM)を搭載すること で、6.6%のCO,低減が可能である。また、 P1 ハイブリッドで PSM を使用した場合 の低減率は、8.5%に到達する。両者の違 いを生み出しているのは、P1 配置で採用 されている、高効率かつ高出力な PSM と、 エンジンのベルトレス化によるフリクショ ン低減であると考えられる。純粋なアーキ テクチャの違いによる効果を比較するた め、いずれのシミュレーションも同一のエ ンジンを使用する前提で検討を行った。実 際の P0 および P1 ハイブリッドについて は、UniAirシステムおよび内燃機関の高 圧縮比化により、さらなる CO。 削減効果が 期待できる [4]。

### P2 タイプのハイブリッド

シェフラーは10年以上にわたって、高電 圧 P2 ハイブリッドシステムの開発を行って いる。2014年には、このアーキテクチャ を48Vシステムに拡大すると発表した[5]。



3 Simulated CO<sub>2</sub> savings in a PO and P1 hybridization compared with a basic vehicle in the WLTC



48Vモータはモジュール化されており、ほ かのアーキテクチャでの採用実績がある 同軸設計と平行軸設計がある。モータを 駆動軸と平行に配置する方法は、軸方向の パワートレイン全長を最小化することがで きるため、特にパワートレインが横置きに 配置されている前輪駆動車に適している一 方、モータ動力をクランク軸に伝達する仕 組みが必要になるため、効率は同軸設計よ りも劣る。高電圧を含む同軸設計のP2シ ステムは平行軸構成とは違ってモータの動 力をクランク軸に直接伝達することができ るため、損失を最小限に抑えることができ るが、軸方向の必要設計スペースは並行軸 設計よりも大きくなる。

図 5 にダブルクラッチを備えた 48V ハイ ブリッドモジュールを組み込んだ 2 種類の 断面を示す。左側のハイブリッドモジュー ルは、乾式ダブルクラッチトランスミッ ションと組み合わせたものである。C0 乾 式多板クラッチとモータは、固定ハウジン グ壁を介して支持されている。ハウジング は、クラッチ作動用のスレーブシリンダー (CSC) およびレゾルバも支持している。 乾式ダブルクラッチへの接続は、端部にス プラインを備えた中間シャフトによって行 われる。固定された中間壁と複列軸受を用 いた設計によって、力の流れはすべて内部 で還流される。



5 Cross-section through the coaxial 48 volt P2 hybrid module with damper on the engine side combined with either dry disconnect/double clutch option (left) or wet triple clutch (right)

図5の右側は、湿式トリプルクラッチ(C0、 C1、C2)を備えた設計に同一のモータを 配置したものである。出力密度の高いこの システムは、軸方向の必要設計スペースを さらに低減できる可能性がある。48Vハ イブリッドモジュール内の湿式トリプルク ラッチの詳細については、参考資料[6]お よび[8]に記述。

電気システムはハウジング内に組み込まれ た集中巻き PSM、レヅルバ、パワーエレ クトロニクスによって構成されている [9]。 バスバーはハウジング内に配置されてお り、外からアクセスができない構造となっ ている。この電気システムは、冷却水温度 が Max 85℃、流量 6L/min の冷却回路 をベースに設計されている。

48V PSM を備えたハイブリッドモジュー ルによって、15kW で 20 秒間まで、10kW で連続出力が可能である。C0 乾式クラッ チのトルク容量は 250Nm である。これら の要素を組み込むには、軸方向に 80mm の空間が必要になるが、前輪駆動車に おいても3気筒エンジンと組み合わせることによって実現可能であると考える。ハイブリッドモジュールによる追加重量は31kgである。

同軸タイプでは、エンジン始動トルクを P2モータから供給できるため、エンジン のベルト駆動の廃止も可能となる。その場 合、ベルト駆動による摩擦損失がないため、 CO<sub>2</sub>排出量の面でさらなるメリットが得ら れる。

平行軸タイプでは、48Vスタータジェネ レータを含めた補機ドライブをP2ポジ ションに移動させるというコンセプトを採 用している。モジュールはモータ、COク ラッチシステム、ハウジングによって構成 されており、オプションでエアコン用コン プレッサとC1発進装置を含めることも可 能である。このタイプのハイブリッドモ ジュールについては、デモンストレーショ ン 車 両「Gasoline Technology Car II」に搭載し、マニュアルトランスミッショ ンと組み合わせた検証を進めている。 平行軸モジュールにおいてモータは、乾式 でのベルトまたは湿式でのチェーンを介し て、パワートレインに連結される(図6)。 ベルト駆動と組み合わせて使用する場合、 図5で示した同軸システム用と同様のCO 乾式多板クラッチを、ベルトプーリー内に 組み込むことが可能である。また、チェー ンおよび湿式クラッチを使用したソリュー ションの最大トルク容量は、最大300Nm である。平行軸のP2ドライブでもベル トまたはチェーンドライブのために軸方 向にスペースが必要となるが、25mm~ 55mmの範囲に抑えることが可能である。

これらの連結駆動用コンポーネントをダン パーの背後に配置することによって、動荷 重による加振が大幅に低減し、メンテナン スフリーとできる可能性がある。モータの 回転数はベルトまたはチェーンドライブの レシオによってエンジン回転数の2.3 倍か ら2.8 倍まで増速されるため、高回転型の モータ(最高回転数18,000rpm)で駆動 することが可能となる。

シミュレーション結果より、ベルト 駆動を装備した 48V 平行軸タイプの P2 ハイブリッドは、CO<sub>2</sub>を大幅に低減で きることを示している (図7)。PSM で 16kWを20秒間駆動させるモータを使 用した場合、CO,低減率は11.9%とな る。シェフラーでは、平行軸タイプには、 ベルト駆動内で主にプリロードによって生 じる損失を低減できる可能性があると考え ている。同軸タイプでは平行軸タイプを大 きく上回る15.8%に到達しているが、こ の理由は主にベルト損失の有無によるもの である。さらに、同軸タイプに使用してい る電動モータは効率が高いことやトルク容 量が大きいといった点もこの結果に寄与し ている。同軸タイプによるベルトレス化に よる効果は1%であった。また、同様の同 軸タイプの電動モータを装備した P1 ハイ ブリッド(図3)との差7.3%は、注目に 値するものであり、CO システムを加える ことは費用対効果の観点からも有効である と考える。このように大きな差が生じたこ とについては、効率向上による回生の効果 がより大きいことに加え、このセグメント ではエンジンの低負荷運転を避けるため、 COクラッチによりエンジンとの接続を開 放し、モータのみで運転する頻度が多くな るためであると考えられる。



6 P2 hybrid module with belt (left) and chain (right) for parallel axis installation

Vehicle			C-Segment/FWD	0		
Drivetrain		Gasoline 3 cyl. 1.0	l/7-speed DCT dry	-2 ····		
Hybrid		Micro 12 V/smar	t alternator 2.5 kW	<sub>~</sub> -4 ···	• • • • • • • • • • •	• • • • • •
	+ 48 V b	ordnet/1.4 kWh ba	ttery	·6 ····		
	P2 off-axis			8		
	with belt drive (i = 2.3)	P2 coaxial	P2 coaxial	av. 10 ····	• • • • • • • • • •	
FEAD	beltless	Standard without alternator	beltless	0° -14 -11.	9%	
Eta max (EM + PE)	93 %	94 %	94 %	-16		.8 %)
EM @ 42 V/100 °C	PSM 16 kW (20 s)	PSM 15 kW (20 s)	PSM 15 kW (20 s)	10		

7 Simulated CO<sub>2</sub> savings by P2 hybrids when using a parallel axis and coaxial 48 volt hybrid module

#### P3 タイプのハイブリッド

トランスミッションの出力軸にモータを配 置する P3 タイプは、パワートレインの縦 置き/横置きの両方に適している。シェフ ラーは、エンジンおよびトランスミッショ ンを縦置きにした車両向けのモジュールの 開発を進めている。P3 モジュール(図8) では、車室下にある限られたトンネル状の 空間の径方向スペースを最大限に活用する ため、同軸設計を採用した。P3 モジュー ルはトランスミッションの出力軸に接続さ れるように設計されており、省スペース化、 モジュール化を容易にする。モジュール化 によって、必要に応じて全輪駆動タイプ用 多板クラッチの組み込みも可能である。

液冷式モータの最高出力は、駆動モード で 16kW (20s)、発電モードで 20kW (20s)となる。 力行モードでの モジュール の出力軸の最大トルクは234Nm(モータ の最大トルクは 60Nm) で、1 つの遊星ギ ヤを介してレシオ 3.9 で減速される。ドグ クラッチは、アクチュエータによって作動 し、必要に応じてモータを駆動軸から分離 させることができる。モータは、車両速度 約140km/h で最高回転数となる。これよ り高速では、ドグクラッチによる開放が必要 となる。これらの仕様を前輪駆動車に適用し た場合、モジュール重量は 22kg である。

-15.8 %

このモジュールは、多板クラッチを追加す れば車両を全輪駆動車にすることも可能で ある。クラッチは最大 800Nm を伝達し、 プロペラシャフトの連結/分離を可能にす る。クラッチ開放時は、P3 モジュールがト ランスミッションのメインシャフトだけで 動作するため、前輪駆動ハイブリッドとし て機能する。全輪駆動時には、多板クラッ チが閉じられ、P3 モジュールが前後の車軸 を駆動する。

上記のモータを備えた P3 ハイブリッドモ ジュールを前輪駆動車へ組み込み、ベルト 駆動式12Vスタータジェネレータと組み 合わせた場合、WLTC において CO, 排出 量はベース車両と比べ15.3%低減される (図10)。このことは1速ギヤとニュート ラルギヤのみのシステムでも、高い CO, 排 出量削減を実現できることを示している。 これは 48V で発生可能な上記のモータ出 カが WLTC をカバーするのにほぼ十分な

ギヤによってモー タの引きずり損失 を回避しているこ とが主な理由であ る。ただし、実際 の運転条件を考慮 し高速域まで駆動 力をカバーしなく てはならない場合、 1速ギヤでは、CO, 排出量削減や機能 の 観 点 で、2 速 ギ ヤと比べて限界が ある。多板クラッ チを採用すること でモジュールを機 械式後輪駆動シス テムと組み合わせ、 全輪駆動化させる ことも可能ではあ るが、機械式全輪駆動システムの引きずり 損失が加わるため効果代は低下するか、ま たは P3 による効果を上回る損失が発生す



8 Construction of the single-speed (1+N) hybrid module for a 48 volt P3 hybridization (without optional multi-disk clutch for AWD)

る可能性がある。

#### P4 タイプのハイブリッド

P4 アーキテクチャでは、機械式全輪駆動 に換えて、エンジンの動力を補助する電動 ドライブシステムをリアアクスルに搭載可 能である。このアーキテクチャの大きなメ リットは、全輪駆動を実現できることに加 え、エンジン、トランスミッションと電動 アクスルを設計スペース的に完全に分離で きる点にある。シェフラーでは、「High Performance 48V」デモカーを使用して、 このアーキテクチャの検証を進めている。

図9は、ベベルギヤディファレンシャル、 2 速変速付き游星ギヤセットを備えた電動 アクスルを示す。1速/2速/ニュートラ ルのギヤ切り替えには、既存のセレクタス リーブと電動機械式アクチュエータ (EAA) を使用している[7]。1速(i=15)は、モー タ走行および回生能力を最適化するために 使用される。モータの最大トルクによるが、 48Vシステムの場合、低車速においてモー タのみで最大 1,200Nm の車軸トルクを発 生可能であり、都市部で必要とされるモー タ 走 行 性 能 を 有 す る 。 車 速 が 約 70 km / h に到達したところで2速(i=5)に変速さ れ、これは都市間走行や高速道路での走行 を想定したものとなっている。どのような モータ仕様を選択するかは、用途に応じて 自由に選択可能であり、最大出力、出力密 度、搭載空間、機能安全といった要素によっ て選択される。

電動アクスルの合計重量は 40kg 程度で あるが、搭載するモータに依存する [10、 11]



9 Construction of two-speed (2 + N) electric axle for a 48 volt P4 hybridization

このシステムでは、エンジンにベルト駆動 式48Vスタータジェネレータを装備して おり、バッテリー充電量が低下した場合で も、発電した電力をバッテリーもしくは P4 システムへ供給することで、常時全輪駆動が可能である。よってP4タイプハイブリッドのWLTC シミュレーションは上記のシステムで実施した。ベースとなっているのは、

Basic vehicle		C-Segment/FWD	C-Segment Conv. full AWD	Elimination of mechanica AWI
Drivetrain	Gasoline 3 cyl. 1.0	l/7-speed DCT dry	see left	0
Hybrid	Micro 12 V/smar	alternator 2.5 kW	see left	% -4 ···
	+ 48 V bordnet/	1.4 kWh battery	see left	лини <b>8-</b> ГТС іл
	P3 1-speed	P4 2-speed	P4 2-speed	> ഗ്ല -12 ···
Fahrzeug	FWD	AWD "light"	AWD "light"	-16
FEAD	12 V RSG	48 V RSG	48 V RSG	-15.3 %
Ratio to wheel	i1 = 10 / N	i1 = 15 / i2 = 5 / N	i1 = 15 / i2 = 5 / N	-24
EM @ 42 V/100 °C	PSM 16 kW (20 s)	PSM 15 kW (20 s)	PSM 15 kW (20 s)	-2

10 Simulated CO<sub>2</sub> savings on a P3 hybrid using a single-speed hybrid module on the transmission output and a P4 hybrid (based on FWD and AWD) with a two-speed electric axle

ー般的なCセグメントの前輪駆動車と全輪 駆動車である。この場合、従来型全輪駆動 の使用によるCO2排出量削減率の悪化分は 約11%である。48Vベースの前後輪のプ ロペラシャフトなしで電動リアアクスルを 使用したP4の場合、前輪駆動車と比べて 15.5%、機械式全輪駆動車との比較では 24%近くまで改善される(図10)。

#### 機能の最適化

48V ハイブリッドシステムで CO<sub>2</sub> 排出量 をどの程度削減できるかは、回生能力によ るところが大きい。回生エネルギーは、ブー スティングやモータ走行、またはセーリン グ中の目標車速の維持(アクティブセーリ ング)など、多くの走行状況に利用される。 これにより、P2、P3、P4 ハイブリッド では、エンジンとの開放/締結のためのク ラッチ操作が 60 万回~90 万回繰り返さ れることを意味する。そのため 48V ハイブ リッドシステムの普及にあたっては、エン ジン再始動時の快適性および応答性が特に 重要な課題であり、特定の操作(アクセル ペダル踏み込み)から、平均的レベルのド ライバーが即座に知覚できる加速度に相当 する約0.25m/s<sup>2</sup>の加速を運転者席で感 じられるまでの時間によって規定される。

エンジンスタート専用のスタータのない 48Vシステムを使用する場合、この規定 に到達するまでの時間は、エンジンの回転 数がトランスミッション入力シャフトの 回転数に到達し、エンジンのトルクが発進 クラッチに伝達される時間で決まる。現行 の試作車では、モータを切り離した状態で のセーリングにおいて P0 ハイブリッドで 0.5 秒、P2 ハイブリッドで 0.8 秒を達成 しており、この値は量産可能な水準と考え られる。追加スタータシステムとしての P0 スタータジェネレータを P2 および P4 ハ イブリッドと組み合わせることによって、 時間が 0.2 秒~ 0.4 秒まで大幅に短縮さ れる (図 11)。

図 11 で示したように、48V システムにス タータシステムを追加した場合におけるこ の大きな違いは、追加スタータを持たない 構成を採用する際には、システム設計を精 査する必要があることを示している。例え ば、オートマチックトランスミッションと 組み合わせた場合、あらゆる走行状況にて、 再始動時のトランスミッション入力シャフ トの回転数を最小限に抑える、などがある。



48 V P0	Sailing with open K1	Demonstrator (MT) "Gasoline Technology Car 1"
48 V P2 +	Sailing with open K1	Demonstrator (MT)
ICE	Sailing with open K0	"Gasoline Technology Car 2"
48 V P4 + 48 V P0	Sailing with open K1/K2	Demonstrator (DCT) "High Performance 48 V"
HV P2 + HV P0	Sailing with open K1/K2	Series (DCT) "Benchmark"

11 Measured times to achieving an acceleration from sailing of  $0.25 \text{ m/s}^2$  on the rails of the driver's seat for various 48 volt architectures with and without additional starter system



12 Simulation of a restart from electric driving with a 48 V P2 hybrid with and without additional starter system

さらに可変動弁システムの使用などによっ て、エンジンにおけるクランキング中の圧 縮トルクを最小限に抑える、という方法も ある[4]。

図 12 の P2 タイプハイブリッドの例が示 しているように、モータ走行からエンジン を再始動する場合、モータは常にエンジン の再始動時のクランキングトルクを確保で きるようにする必要がある。さらに、エン ジン再始動のため、クラッチが相応のトル ク制御精度を備えていることが必要不可欠 となる。モータ走行からエンジンを始動す る場合、セーリングから再始動する場合 とは異なり、ドライバーが車の加速に違和 感を感じないような駆動力を制御する、と いう課題がある。またエンジンの再始動で

許容されている P0 ハイブリッドの所要時 間をクリアすることも必須条件となる。追 加スタータシステムを備えた P2 アーキテ クチャの場合、エンジンをクランキングす るためのトルクをモータから供給する必要 がないため、モータによる駆動力を最大限 使用することができる。ただし、追加ス タータシステムを備えたアーキテクチャで あっても、エンジンとトランスミッション が結合された時点での駆動力がドライバー の要求を満たすことも重要な設計要件であ る(図122)。これに加えて、モータと スタータジェネレータの電圧が同じである 場合、再始動中に双方が同時に消費する電 力量を考慮して、バッテリーサイズを設計 する必要がある。

# まとめ

シミュレーションにより、48V各ハイブ リッドアーキテクチャによる CO<sub>2</sub> 排出量 削減量を計算した。削減量は選択したアー キテクチャによって異なるが、費用対効果 という観点からも評価を行うことが重要で ある。アーキテクチャを選択する際は、前 記に加えて全輪駆動など、どの機能が必要 とされるかについても考慮していくことが 重要である。今後10年間でCO, 排出量が さらに厳しく制限されることを考慮した場 合、P0 および P1 システムの実績から見 ても、費用対効果の点から P2、P3、P4 アー キテクチャによるハイブリッド化はさらに 魅力的な選択肢となり、ハイブリッドアー キテクチャの主流を占めていくことが予想 される。

シェフラーは過去にさまざまなデモカーを 製作して、実際の走行状況における48V ハイブリッドシステムの評価および実証を 行ってきた。現在はパートナー企業と協力 して、同軸タイプのP2タイプ48Vハイブ リッドモジュールを3気筒エンジンおよび ダブルクラッチトランスミッションと組み 合わせ、エンジンを横置きに配置した前輪 駆動の新しいデモカーを開発している。こ のコンセプトによって実現されるCO<sub>2</sub>排出 量削減については、後日報告する。

### Literature

- Eckenfels, Th. et al.: 48 volt Hybrid Modules: More than a Point of Entry into Electrification In: ATZelektronik 11 (2016), Nr. 2, pp 65ff.
- [2] Fritz, M.; Hillenbrand, Th.; Pfund, Th.:
   48-V-Technologien im Fahrzeug: ATZextra (April 2017), pp 28ff.
- [3] Schröder, Ch.; Stuffer, A.: P0 Mild Hybrid With System Competence to Maximum Efficiency. 11. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2018
- [4] Kehr, D.: Airpath Flexibility Unlocking the Full Potential of the UniAir system. 11.
   Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2018
- [5] Dilzer, M. et al.: One idea, many applications:
   Further development of the Schaeffler hybrid module. 10. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2014
- [6] Reitz, D.: P2 HV Drives The Most Efficient Hybridization for all Transmissions. 11.
   Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2018
- [7] Müller, B.; Grethel, M.; Göckler, M.: Innovative Power on Demand Concepts for Transmission Actuation. 11. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2018
- [8] Hoffmann, J.: The Top 3 of P2 Space, Space, Space. 11. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2018
- [9] Pfund, Th.: The Schaeffler eDrive Plattform Modular and Highly Integrated. 11. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2018
- [10] Biermann, T.: The Innovative Schaeffler Modular E-Axle. 11. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2018
- [11] Daniel, B.: eAxle Family in Coaxial and Offset Arrangements. 16<sup>th</sup> International CTI Symposium Automotive Transmissions, Berlin, 2017





# P2 High-Voltage Drives

Efficient Hybridization for all Transmissions

Dierk Reitz Willi Ruder Martin Dilzer Cedric Blaes

#### はじめに

パワートレインの電動化においてこの先ど の技術が優勢となるか、という問いへの答 えは今後の法規や、関連するコンポーネン トのコスト変動などに大きく左右される。 法規は、世界の国や地域によって異なるが、 その CO, 排出量削減目標だけでなく、新工 ネルギー車に関する販売比率の規定など、 ほかの要因にも着目する必要がある。現在 中国の法律で定められているように、CO。 排出量が特に少ないプラグインハイブリッ ド車もこの販売比率の適用対象に含めるな ら、プラグインハイブリッド車は2025年 までにかなりのマーケットシェアを占める ことが予想されている(図1)。また中国 では目標が厳しさを増しており、48Vハ イブリッド車の普及も大いに期待できる。 同様の傾向は、CO<sub>2</sub>排出量削減目標が厳 しく、販売比率が設定されていない欧州で も見て取れる。これに対して日本と米国で は、高電圧のフルハイブリッド車が主流と なっており、これら二つの市場において、

48V ハイブリッド車はいくつかの理由から 大きく普及する可能性は低いと考えられて いる。日本では、すでに多くの高電圧フル ハイブリッド車が量産され、また米国では 比較的大きな自動車が主流を占めており、 その車重が 48V ハイブリッド車の普及の 障壁となっている。

WLTC (Worldwide-harmonized Light vehicles Test Cycle) における燃費シ ミュレーション結果では、48Vハイブリッ ド車でも、かなりの CO<sub>2</sub>排出量削減が可能 なことがわかる [1]。プラグインハイブリッ ド車の CS (Charge Sustaining) レンジ との比較は、モータの位置、トランスミッ ションのタイプ、そのほかのパラメータは 変更を加えずに実施している。シミュレー ション用のバッテリー容量は、EV 走行の 距離 50km を達成できるよう 9.0kWhを 選択した。プラグインハイブリッド車では、 DCT を搭載したベース車両と比べて P2 ハ イブリッド車は 15.5%の CO<sub>2</sub>排出量削減 を実現している。パワースプリット式および



1 Volume scenarios for electrified drives in various global regions



• The power split and the serial hybrid drivelines are nearly on the same level

2 Simulated fuel consumption for various high-voltage hybrid systems in the WLTC

シリーズ・パラレル式ハイブリッド車は両 方共 CO<sub>2</sub> 排出量削減率が約 14%とほぼ同 等である (図 2)。

WLTCにおいてCSレンジでは、フルハイ ブリッド車とプラグインハイブリッド車の 比較では、プラグインハイブリッド車が 9kWhのバッテリーを搭載し、車重が増え ているにも関わらず燃費差はほとんど無い。 その主な理由はバッテリーの出力密度の向 上とバッテリーが効率のいい状態で動作で きていることによる。

CO2排出量削減観点では、最新のCVT、 DCTのどちらを使用するかは、もうそれほ ど大きな影響はない。しかし、パワースプ リット式、シリーズ・パラレル式のシミュ レーション結果と比較すると、P2ハイブ リッドが若干良好な結果を示しているのは、 トランスミッションの効率と大いに関係し ている。

この点を明らかにするため、パワースプ リット式およびシリーズ・パラレル式に おける燃料消費量を、P2 ハイブリッドと 比較しながら紹介する。DCT 搭載の4気筒 C セグメント車を P2 ハイブリッド化した場 合の燃料消費量は、運転状況に応じた最適 なオペレーションにより、改善されている。

## ハイブリッドモジュール

第二世代ハイブリッドモジュール

シェフラーは 2010 年より、P2 ハイブリッド モジュールのための重要なコンポーネントで ある C0 クラッチを量産、供給している。さ らなる出力密度の向上が要求される中、第二 世代ハイブリッドモジュールのコンセプトは 2014 年のシェフラーシンポジウムで最初に 発表され [3]、2017 年末にはモジュールの量 産が始まっている。

現在ほとんどの市場において、ハイブリッド 車は未だ少数派にとどまっている。そのため 第二世代のハイブリッドモジュールは、よ り低価格でさまざまなトランスミッション に適合できるよう設計されている。その軸と なっているのが、多様な出力要求に対応する



3 Cross-section through the second generation hybrid module in a dry clutch design

2-EM-test rig

leating syste

• 0 rpm - n<sub>EM,max</sub>

A sample

0 Nm – Trq<sub>EM,max</sub>
 defined clutch energy input

defined thermal boundary conditions: air, coolant

B sample

Several vehicle

tests during all

sample phases

with and without

telemetry hot and

cold condition

cycle tests

4 Comparison of the thermal model during validation

EM

input

(ICE)

Benefits

永久磁石同期モータ(以下 PSM) である(図 3)。コモナリティーを持たせるため、ステー タ外径は 270mm、300mm に 設定し、積 厚を変更することで、自動車メーカーからの 多様な出力要求を満足させている。最初の量 産仕様は、最大出力が82kW、最大トルクが 300Nm である。

第二世代のハイブリッドモジュールは、非常 にコンパクトな設計が特徴である。ロータの 回転角を計測するレゾルバと、エンジンと モータを締結/開放する C0 クラッチはロー タ内部に配置されるため、モジュールの全長 に影響を与えることはない。クラッチおよび アクチュエータは必要な耐久性をもつように 設計されており、プラグインハイブリッドの 場合、C0 クラッチの作動回数については 65 万回の耐久性を確保している。必要とされる 耐摩耗性を限られたスペースで実現するため、

内製クラッチ摩擦材が開発され、ダブルクラッ チを出力側に直接接続することができる。必 要に応じて、トランスミッション入力シャフ ト用の軸受支持部を組込むことも可能である。 出力密度の目標を高く設定しているため、量 産開発工程の初期段階から、熱マネジメント の課題には特に注意を払った。そのためシェ フラーではハイブリッドモジュールにおける ロータ、ステータの発熱量および熱伝達に関 する熱シミュレーションモデルを要求トルク ベースで作成した(図4)。

このモデルは、MATLAB-Simulink で作成し た後、テスト車両で実際に測定した結果とコ リレーションを実施し、すでに量産ハイブリッ ド車用の制御に適用されるだけの水準に達し ている。

ハイブリッドモジュールにおいて、NVHも量 産開発における重要な課題である。量産品に おいても目標としたレベルを確保できるよう、 組立後のハイブリッドモジュールすべてを対 象に最終工程において NVH の検証を実施して いる。この検証はモータで駆動負荷を掛ける モード、回生モード、CO クラッチの締結/開 放の動作も含め実施されている。

### 第三世代ハイブリッドモジュール

シェフラーでは、現在開発中の第三世代ハイ ブリッドモジュールにおいて統合化の度合い を高め、必要スペースのさらなる低減を目指 している。将来的には、ハイブリッドモジュー ルに発進デバイスも組込む予定である。現在 シェフラーでは、米国市場での量産を間近に 控えた、トルクコンバータを統合したハイブ リッドモジュールの開発を進めている(図5)。 モジュールの上流にトーショナルダンパーを 設けることで、仕様によってはトルクコンバー タ内における振動減衰機能の大部分が不要と なり、トルクコンバータの大幅なコンパクト 化が可能となる。



5 Hybrid module with integral converter

ディーゼルエンジンや、高負荷のかかるガソ リンエンジンなどと使用する場合は、ハイ ブリッドモジュールに部分的に組込み可能 な、二つ目のダンパーが必要になる。このタ イプの設計では、従来型のトルクコンバータ を使用したモジュールに比べて、30mm~ 50mmの全長短縮が見込める。

放熱性を改善させることで、連続出力観点で の出力密度をさらに増加させることも可能に なる。プラグインハイブリッド車の場合、ス テータで最大 2.8kW の熱負荷が発生する。第 三世代では、水の代わりにトランスミッショ ンの油路をハイブリッドモジュールに直接接 続し、オイルによってステータを冷却するオ プションも存在する。

第三世代のトルクコンバータ統合型のハイブ リッドモジュールは現在、量産準備段階にあ り、2018年末には量産される。

さらなる進化版として、ロータは完全にウェッ ト状態で動作させ、湿式ダブルクラッチと組 み合わせることによって、統合化の度合いを



C sample

Several thermal sensors to collect the temperature behavior of the HYM components during all tests Blue dots

Standardized implemented thermal couples at non-rotating components. Mounted in a lot of HYM

Optional implemented telemetry sensors at rotating components (e.g. clutch and EM) for special thermal vehicle tests

Helpful for calibration and validation work to ensure a high accuracy of the temperature model

• test rig + vehicle tests in all development phases

- A: basic understanding about thermal behavior; initial calibration of temperature model
- B: validation of offline temperature model: initial calibration of online temperature model
- C: validation of online temperature model and protection strategies

Red dots



6 Cross-section through the complete oil-cooled hybrid module with integral triple clutch

さらに高めたトリプルクラッチ内蔵型ハイ ブリッドモジュールを開発中である(図6)。 DCTにP2ハイブリッドモジュールを適用す る場合、C0クラッチおよび湿式ダブルクラッ チをロータ内部に配置することで、トランス ミッション内にダブルクラッチを配置する必 要がなく、軸方向の必要スペースを大幅に低 減することが可能である。

図6で示したハイブリッドモジュールは、油 圧式アクチュエータで発生させた油圧でCSC (コンセントリックスレーブシリンダー)を介 してクラッチを作動させるコンセプトである。 このタイプのクラッチおよび作動技術の詳細 については、[4]に示す。

潤滑油は原則として内側から外側に向けて供給 される。潤滑油は、トランスミッションインプッ トシャフトおよびハイブリッドモジュールのハ ウジングの穴からロータのスペースに流れ込 む。クラッチの熱が最初に冷却され、続いてロー タおよびステータ上にある磁石が冷却される。 このコンセプトによって、シェフラーが現在 P2 ハイブリッドモジュールで提供している、 最大出力 125kW を上限とするすべての出力レ ベルで、熱マネジメントを可能にしている。

図5 で紹介しているモジュールのCOクラッチ 下の軸受は、トルクコンバータの二つ目の軸受 として十分であり、図6 で紹介しているトリ プルクラッチモジュールは、複列玉軸受によっ てロータ内部に配置されているため、トランス ミッションインプット側にもう一つの軸受を設 ける必要はない。

# ハイブリッドモジュール用 電動デバイスのさらなる進化

#### 第四世代ハイブリッドモジュール

ハイブリッドモジュールの今後のコンセプトに は、最大出力が85kW、最大トルクが330Nm の、新世代の電動デバイスが含まれる。積厚約 60mmのPSMの出力は、将来的には最大出 力100kWまで増大し、最大トルク350Nm の実現も可能となる。設計にもよるが、出力密 度は現行世代に比べて10%~15%増加する。 これらの特性については、[5]に示す。

シェフラーではハイブリッドモジュールのハ ウジングにパワーエレクトロニクスモジュー ルを一体化している(図7)。パワーエレクト ロニクスの端子はステータ端子とネジで固定 されることで電気的に接続され、シールによ り防水性と防塵性を確保している。

ハイブリッド車では、電動デバイスの効率が WLTCでの燃費に大きく影響する。また、バッ テリーの容量を決める際にも重要な要因とな り、システムコストに直接影響をおよぼす。 シェフラーによる新世代型モータの効率は、 最適な動作点において96%を達成しており、 効率95%以上での運転範囲の大幅な拡大が可 能となった(図8)。



7 Hybrid module with integral power electronics

# 並行軸式ハイブリッドモジュール

モータをクランク軸と平行に配置した P2 ハ イブリッドモジュールは、軸方向の必要スペー スを削減するため、横置きパワートレインを 搭載した FF 車に適したシステムとなってい る。シェフラーは、V ベルトを介してトルク を伝達する 48V ハイブリッドシステム向け ソリューションを開発した。高電圧モジュー ルによって発生するより大きなトルクを



≤ 209
65 °C
120 °C
150 °C
328 V <sub>peak</sub>
400 Arms
185 Arms
3.4 kW

Drag torque up to 0.6 Nm from bearings and clutches excluded

8 Efficiency level data map for a third generation electric motor

伝達する場合のオプションとして、チェー ンまたはギヤを使う方法があり、いずれ も最大 80kW までの出力を伝達できる。 チェーンの場合、ベルトより許容周速が高 いため、クラッチ周囲にチェーンガイドを 設ける必要がある。従来型のハイブリッド モジュールでは、チェーンは駆動側で直径 200mmの円周上で使われている。図9は、 エンジン側からのトルクが最大 400Nmと なることを想定して設計された、このモ ジュールのサブシステムである。

自動車メーカーの車両またはエンジン製造 ラインで、できるだけ簡単に組立てられる ようにオイルを充填した状態で供給できる ようにモジュールは設計された。この設計 では、遠心振り子式ダンパーがあらかじめ



9 Subsystems of a high-voltage hybrid module for axially parallel installation

モジュール内に組み付けられており、振動 に関する技術的な理由からも、ダンパーを チェーンドライブの正面に配置した。ダン パーとチェーンドライブの間にある湿式ク ラッチは、モジュール内に組み込まれてい るクラッチアクチュエータ(MCA)を介 して作動する。モジュールのトランスミッ ション側のインターフェースは、組み合わ せるトランスミッションのタイプに応じて 設定できる。

このサブシステムは、スペースをできる限 り節約するように設計されている。COク ラッチはダンパー背面に配置され、COク ラッチ作動用の電動油圧式アクチュエータ は、エンベロップ内に配置されている。C1 クラッチ用のアクチュエータのために、軸 方向に追加スペースは必要ない。システム の軸受支持部は、トランスミッション側の ハウジングで支持された複列配置となって いる。

このモジュールでは、2本目のチェーンが 設けられており、エアコン用コンプレッサ を駆動させる。このチェーンにより、アイ ドリングストップ中でもモータで従来品の コンプレッサを駆動できるため、高価な電 動コンプレッサは不要である。

# まとめ

P2 ハイブリッドは、エンジンとトランス ミッションの間にハイブリッドモジュール を組込むことによって、既存のパワートレ インを電動化する際の魅力的な選択肢とな る。量産体制に入った第二世代のハイブ リッドモジュールによって、シェフラーは 統合化のレベル向上、出力密度のさらなる 向上に成功している。2018 年末の量産開 始が予定されている第三世代では、発進デ バイスをモジュール内に組込むことによっ て、この統合化の流れを継続していく。



**10** Evolutionary phases for the Schaeffler modular system for P2 hybrid module

出力密度と効率の向上によって、モータが もたらす可能性はさらに広がる。ハイブ リッドモジュールにパワーエレクトロニク スを組込むというアプローチにより、さら なるコスト削減につなげていく。

シェフラーではさらに、チェーン駆動式高 電圧モジュールを並行軸配置させることで 必要スペースを削減するという、パワート レインを横置きに搭載した FF 車向けのソ リューションを提案する。

シェフラーは今後も、P2ハイブリッドモ ジュールのシステム開発を継続(図10) し、高電圧、48V両方のハイブリッドモ ジュールで、新しい基本技術を採用してい く。第四世代のハイブリッドモジュールは、 すでに開発に着手している。統合型パワー エレクトロニクスによって、今後10年で さらなるコンパクト化が可能となり、パ ワートレイン全体の統合化も今よりシンプ ルに行えるようになるだろう。

#### Literature

- Eckenfels, Th.; Kolb, F.: 48 V Hybridization A Smart Upgrade for the Powertrain. 11. Schaeffler Kolloguium, Baden-Baden, 2018
- [2] Kinigadner, A.; Lauinger, C.; Vornehm, M.: Dedicated Hybrid Transmission – How the Transmission Becomes a Powertrain. 11. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2018
- [3] Reitz, D.: One Idea, Many Applications: Further development of the Schaeffler hybrid module. 10. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2014
- [4] Hoffmann, J.; et al.: The Top 3 of P2 Space, Space, Space. 11. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2018
- [5] Pfund, Th.: The Schaeffler eDrive Plattform Modular and Highly Integrated. 11. Schaeffler Symposium, Baden-Baden, 2018



# The Top 3 of P2

Space, Space, Space

Dipl. Ing. Joachim Hoffmann Dipl. Ing. Karl-Ludwig Kimmig Dr.-Ing. Andreas Baumgartner Dr.-Ing. Knut Erdmann Dipl. Ing. Wolfgang Haas Dipl. Ing. Philippe Wagner



#### はじめに

ダブルクラッチトランスミッション(以下 DCT)の導入によって、過去10年間にお いて、車両動力性能と快適性の向上にとど まらず、自動車の効率を大きく向上させる ことが可能となった。しかし、環境に影響 を与える CO, 排出量をさらに削減し、将来 設定される規制値に適合していくには、燃 費レベルのさらなる向上が必要となる。そ のためのカギを握るのが、P2 ハイブリッ ドとDCTの組み合わせである[1]。P2 ハ イブリッドでは、エンジンとトランスミッ ションとの間にモータが同軸または平行軸 で配置される (図1)。さらに、エンジン とは独立した形でモータを使用してEV走 行を実現するには、自動制御されたCOク ラッチが必要になる。



 ICE
 Internal combustion engine
 C0
 Clutch for ICE

 DMF
 Dual mass flywheel
 C1/C2
 Clutch 1/clutch 2

 EM
 Electric motor
 DCT
 Double clutch transmission

1 Schematic diagram of P2 hybridization in connection with a double clutch transmission

モータが奇数もしくは偶数シャフトに係 合されている P2.5 ハイブリッドシステム とは異なり、P2 ハイブリッドシステムを DCTと組み合わせることで得られる大き なメリットとしては、すべての動作モード (EV 走行、ハイブリッドモード、バッテ リー充電)で DCT のすべてのギヤ比を選 択できる点が挙げられる[2]。これによっ て、全体として高水準のエネルギー効率が 実現できる。また、いかなる状況において も駆動力を失うこと無く走行できるため、 快適なドライビングの提供が可能である。

特にパワートレインをフロントに横置きに した小型車の場合、限られたスペースの中 にDCTと組み合わせたP2ハイブリッド を搭載することは、非常に困難である。本 稿では、乾式/湿式クラッチシステムで P2ハイブリッドシステムの全長を最小限 に抑えるための検討について述べる。トラ ンスミッションの全長はシンクロ機構に も大きく左右されるため、シェフラーで はシンクロ機構の寸法を縮小するためのソ リューションを開発した。これらについ て、以下に紹介する。

# 従来のテクノロジー

アドオン型 P2 ハイブリッドの場合、従来 のトランスミッションからの変更はごくわ ずかで済むため、既存のパワートレインを 用いた電動化が可能である。その結果、ハ イブリッド型パワートレインと DCT を組 み合わせた製品が量産されている。図 2 に クラッチ配置が異なる三つのソリューショ ンを示す。左図では、モータと CO クラッ チを軸方向に配置しており、中央図はロー タ内に乾式の CO を一体化したシェフラー のハイブリッドモジュールと、湿式ダブル クラッチとの組み合わせを示している。こ れに対して右図のシステムでは、三つの 湿式クラッチをハイブリッドモジュールの



2 Implemented series solutions for P2 hybridization of double clutch transmissions

#### モータとコンパクトな形で組み合わせてい る図を示している。

三つのシステムすべてにおいて、トランス ミッションの全長が従来トランスミッショ ンに比べて 80mm ~ 120mm 延長され ている。全長がどの程度増加するかは、 モータ出力、つまりはモータ寸法とクラッ チシステムの軸方向の追加スペースに大き く左右される。将来のソリューションにお いては、搭載スペースの大幅削減の要求に 応えると同時に、動作寿命とトルク容量に 対する要求までも満たす必要がある。この ため、クラッチシステムならびにトランス ミッション内における搭載スペースの最適 化に向けた検討を行った。

#### システム評価

クラッチシステムへの要件は、パワートレインの電動化にともない変化する。高電圧ハイブリッドモジュールをP2として適用する場合、クラッチによる伝達損失をほとんど起こすことなくモータで車両を発進させることができる。バッテリー容量とバッテリーマネジメントによっては、クラッチ負荷が大幅に低減する。発進時の従来型



3 Clutch slip during vehicle launch with a combustion engine (left) and an electric motor (right)

240,000 km Schaeffler-Driving Cycle



4 Friction energy of the clutches for double clutch transmissions, with and without P2 hybridization

DCT のエンジンートランスミッションイ ンプットシャフト間の回転差の積分値と、 P2 ハイブリッドトランスミッションの同 値について図 3 に示す。

ただし、DCTの電動化にともない新たな 課題も生じる。例えば、クラッチを設計す る際は、熱によるモータの損失を考慮する 必要がある。さらに、C0 クラッチ内では ドライブ中に繰り返されるエンジン始動 によって、さらなる摩擦エネルギーが生じ る。

クラッチへ影響をおよぼす要因を定量化 するために、シェフラーでは量産開発プ ロジェクトの過程で膨大な測定とシミュ レーションを行った。三つのクラッチすべ てについて、社内で規定した走行モード (Schaeffler Driving Cycle) での計 測結果をベースに24万キロ相当の摩擦エ ネルギーの累積を算出した。図4は、P2 ハイブリッドあり/なしのDCTにおける 結果をまとめたものである。

測定結果によれば、現行の量産型のDCT を組み合せたP2ハイブリッドにおいて、 特に発進時、クラッチ負荷がすでに50% 以上低減できた。システムの各部寸法や、 エンジン、モータ、バッテリー容量と出力 の最適化など、システムのさらなる開発を 行うことによって、トリプルクラッチシス テムにおける摩擦力や摩擦エネルギーの さらなる低減が期待できる。摩擦力および 摩擦エネルギーはクラッチ設計における重 要な要因であり、クラッチ寸法に直接影響 をおよぼす。次世代のP2ハイブリッドシ ステムでは、摩擦エネルギー負荷のさらな る低減、さらには、より小型化したクラッ チによる搭載スペースの大幅な削減も可能 になる。従来型DCTと同様、湿式/乾式 クラッチの選択肢はあるが、主に湿式ク ラッチは大型車に使われ、乾式クラッチは 小型車に使われる(図5)。

#### ローター体型の湿式 トリプルクラッチシステム

シェフラーは、上記要件に準拠した C0、 C1、C2 クラッチ搭載の湿式トリプルク ラッチシステムを量産向けに開発した。三 つのクラッチは、モータのロータにほぼ完 全に組み込むことが可能であるため、全長 にも影響を与えずに問題なく収まる [2]。ハ イブリッドモジュール、トリプルクラッチ、 トランスミッションからなるシステム全体 は非常にコンパクトである。このため、ロー タ内に DCT を組み込まないソリューション と比べて、トランスミッションの軸方向長 さを 50mm ~ 70mm 削減できる(図6)。

基本的な設計コンセプトには、エンゲージ メントシステムの径方向および軸方向のス ペースをできる限り節約して湿式トリプル クラッチを収めながらも、要求通りのトル クや冷却性能も満足することなどが含まれ る。伝達されるトルク容量は、摩擦材、有 効径、プレートの数と作動力によって決ま る。C0クラッチは径方向でC1の内側に 配置されるが、C2はC1に対して軸方向 に配置される。トリプルクラッチのベアリ ングは、ハウジング内にあるロータのメイ ンベアリングによって支持されており、ハ イブリッドモジュール全体の高効率化と、 コンパクト化を可能にしている。

三つのクラッチは、C1 および C2 ではトラ ンスミッション側、C0 ではエンジン側に



5 Energy needed for vehicle launch with various stages of electrification of wet and dry double clutch transmissions



6 P2 hybrid module with a rotor-integrated, wet triple clutch system



7 Oil flow inside of the rotor for the sub-clutches and the bearing positions

配置された、ピストンリングを採用した縦 型 CSC (Concentric Slave Cylinder) によって作動する。レリーズベアリングに よって、その作動力はクラッチに伝達され る。実質的にリークフリーであるため、ク ラッチ作動システムは効率よく動作する。 クラッチプレートが小径であることに加 え、冷却オイル経路を最適化することで、 クラッチを開放した状態での引きずりトル クを最小限に抑えられる。

クラッチはハイブリッドモジュールのオイ ル/冷却経路に配置され、クラッチに必要 なオイル流量が設定され冷却される(図 7)。COの冷却とベアリングの潤滑には、 冷却オイル流路から枝分かれした流路が用 いられる。クラッチハウジングの外側から 流れるオイルも、モータのロータとステー タに沿って流れることで、冷却に役立って いる。

熱設計にあたっては、オイル流路の最適化 によって、多板クラッチの全ディスクの均 ーな冷却性能を確保できた。さらに、オイ ルがディスク面から迅速に取り除かれる ため、不要な引きずり損失が発生しない。 ロータを冷却することによって、高負荷状 況においても、高温に弱い磁性材料の温度 を150℃未満という許容温度範囲内に保ち、 結果としてモータの出力密度を高めること に成功した。該当する要素の最適化を施し た状態で、流れおよび温度に関するシミュ レーションを実施し(図8)、テストベンチ で検証を行った。テストでは、伝達トルク および熱容量の確認に加え、システム全体 の引きずりトルクと損失の最適化を検証し た。テストベンチでの検証にもとづいて、



8 Flow simulation for a P2 hybrid module with an integrated wet triple clutch



9 Wet lining for double and also triple clutch systems

コンパクトな湿式トリプルクラッチシステ ムが機能および耐久性に関する要件を確実 に満たせることが立証できた。

多くのクラッチシステムと同様、摩擦材、 その摩擦面性状、冷却オイルから成るトラ イボロジーが中心的役割を担っている。ト ルク容量、耐熱ロバスト性、NVH、クラッ チ開放時の引きずりトルクといった機能的 特性は摩擦材に大きく影響される。この点 に対処するため、シェフラーは乾式用摩擦 材に加えて、湿式ダブルクラッチ/トリ プルクラッチシステムに合わせた摩擦材も 開発し、各種の試験を通して確認を行った (図 9)。その結果、複数(三つ)クラッチ におけるトルク容量と引きずりトルクの両 方で、良好な値を得ることができた。C0 内の引きずりトルクは、形状設計、摩擦プ レートにおける最適化、冷却オイル流量の 最小化によって大幅に低減できた。

将来的にはクラッチ負荷のさらなる低減が 見込まれることから、摩擦特性向上、クラッ チパッケージの小型化も可能になる。現在開 発段階にあるシェフラーの複層(2層)湿式 摩擦材は、性能向上によりさらなる最適化を サポートする[3]。このように、最終的には モータの長さが、軸方向の必要追加スペース の決定要因となる。図10では、油圧回路を 用いた作動方式を搭載したバージョン(右) などのコンセプトについて紹介する。次世代 の湿式トリプルクラッチに向けた画期的ア プローチとしてはほかにも、スペースを最 適化したニードルベアリングの作動システ ムへの採用、低ヒステリシスアクチュエータ ピストン、面振れ傾きにきわめて強いロータ ベアリング構成、出力側における低質量慣性 などがある。最先端のコンパクトなモータを 開発して組み合わせることによって、ハイブ リッドモジュールの搭載スペースは最小限 まで縮小される。



タはセントラル シートハウジング 102 によって、乾式ト リプルクラッチか らの熱やクラッチ 摩耗粉から保護さ れている。さらに、 トリプルクラッチ ユニットは取り付 け済みのモータに ごく簡単にネジ止 めできる。この構 成は、約 60kW と いう中程度のモー タ出力において、 特にショートサイ ズのモータと組み 合わせた場合にき

**10** Further development of the wet triple clutch

# ローター体型の 乾式トリプルクラッチシステム

低トルクおよび小型車の従来型トランス ミッションでは、主に乾式ダブルクラッチ が使われている。次に乾式トリプルクラッ チシステムとP2ハイブリッドシステム (同軸)のスペース最適化について検討す る。特に、ローター体型の湿式トリプルク ラッチと組み合わせた場合と同等な設計を 目指す。

一つ目のアプローチは、径方向にダブル クラッチを収容したローター体型C0ク ラッチを組み合わせる方法で、ダブルク ラッチをモータのロータに取り付ける(図 11)。こうすることで、標準的な乾式ダブ ルクラッチと比べて軸方向のスペースを 20mm~25mm短縮できる。エンジンと 接続するC0クラッチは、ハイブリッドモ ジュールのロータ内に組み込まれるため、 搭載スペースへの影響はほとんどない。 モータの出力をこれより上げる場合、つま り軸方向長さが長いモータを使用する場 合、通常は乾式トリプルクラッチまでを ロータに組み込むことができる(図12)。 クラッチ摩擦面の数は、必要とされる

この設計では、モー

わめて有利である。



11 Radially nested dry triple clutch

トルク容量の大きさに応じて異なる。これ はつまり、乾式トリプルクラッチ向けで あってもマルチディスククラッチの設計が 可能であり、軸方向の搭載スペースの大幅 な縮小ができることを意味する。

#### クラッチ周辺部品のさらなる進化

量産準備の整ったトリプルクラッチシス テムでは、径方向に収容した二つの同軸 ピストンリングを使用してクラッチを作 動させる。ただしこの場合、外側のピ ストンリングとカウンターシャフト用の ベアリングを配置するハウジングが径方 向で両立させることが困難なケースがよ くある (図 13 左)。このような状況に 対して、同軸のピストンリングの代わ りに、互いに結合された三つのピスト ンを、カウンターシャフト用のベアリ ングを配置するハウジングを径方向で



12 Triple clutch integrated inside the rotor

避けながら配置することが対策として 考えられる(図13右図)。これによって、 最大30mmにおよぶ搭載スペースの追加 も回避できる。



13 Further development of the double actuator system for C1 and C2 (3-piston actuator system)





CFP Centrifugal pendulum

14 Arrangement variations for the centrifugal pendulum absorber in the P2 hybrid system

高電圧ハイブリッドシステムを備えた自動 車では、電気駆動部品によって、NVH性 能の重要性がさらに高まる。[2] で示され るように、三相式のモータを使用してパ ワートレイン全体の振動挙動を最適化する ことも可能だ。車種、使用するエンジン、 快適性の要求によっては、振動減衰要素 として遠心振り子ダンパー (CPA) を追加 で組み込む方法もある。従来の構成では、 デュアルマスフライホイール部分(図14、 a) に配置されていたが、これに代えて トランスミッション側のロータ/クラッチ フランジ(図14、b)に配置することも可 能である。いずれにせよ、クラッチアクチュ エータの配置スペースはこの箇所に設ける 必要があるため、こうした措置を取ること によって全体の軸方向長さを短縮するうえ で役立つ場合もある。

振動減衰特性は、いずれの配置において も走行状況に応じた固有の長所と短所が



ICE Internal combustion engine CO Clutch for ICE DMF Dual mass flywheel C1/C2 Clutch 1/clutch 2 EM Electric moto DCT Double clutch transmission CD Chain drive

15 Axially parallel arrangement of a P2 system with a triple wet clutch



ある。トランスミッション側の配置は、 主にハイブリッドモジュール(ドラッグス タート)のモータを介してエンジン始動す る場合に有利である一方、エンジン側の配 置は、エンジン駆動での低速走行時に最大 のメリットを発揮する。

上記のトリプルクラッチを備えた P2 ハイ ブリッドシステムはすべて、トランスミッ ション入力シャフトと同軸となるように配 置される。特にパワートレインをフロント 横置きした乗用車など、モータのサイズや 容量によっては、軸方向にモータを平行軸 に配置する方が有利な場合もある。シェフ ラーではさらに、ダブルクラッチトランス ミッションとの組み合わせに適した、平行 軸の P2 ハイブリッドモジュール [2] も開 発している。図15は、湿式プレートクラッ チを径方向に収容することで、ハイブリッ ド化による軸方向の搭載スペースをどの程 度縮小できるかを示している。 平行軸の構成においては、特にクラッチお よびロータベアリング方式という点で、設 計上の難易度が高まる。

## トランスミッション内における 搭載スペースの最適化

### 軸方向全長を最小限に抑えた シンクロ機構

トランスミッションの構造とギヤ数を変え ずにダブルクラッチトランスミッション の電動化する場合には、トランスミッショ ン長さを抑える方法は限られている。この 問題を解決するため、シェフラーはすでに 2014年からショートシンクロを開発して いる [4]。



この方法は、それ 以降さらに進化を 遂げており、軸方 向の搭載スペース をシンクロ方向そ れぞれにつき最大 10mm 縮小するこ とが可能となった (図16)。シンクロ 機構二つを軸方向 に配置した一般的 な 3 軸 タイプのト ランスミッション 構成では、全体の長 さが約 20mm 縮小 されることになる。 全体の長さを切り 詰めるには、コン パクトなモジュー ルによる歯車の製 造を可能にする製 造技術が必要不可 欠である。

16 Optimizing installation space by using shorter synchronization units, taking the Schaeffler Short Synchro as an example

シンクロ機構周辺の歯車部は、切削加工に よって製造されることも多い。これに対し てシェフラーでは、シートメタル成形によ る歯車成型を導入した。また、歯のモジュー ルサイズを2mmから1mmに抑えること で、歯数増加を可能にし、それにより歯を 小型化しても変わらぬトルク容量を実現で きる。また小モジュール化をすれば、チャ ンファー長が短い、ディテントピンの飛び 出し防止機構などによりストローク長を短 くできるため、シンクロ機構部で軸方向全 長を約6mm短縮できる。

さらに小モジュールを使用したとしても、 関連するパラメータ(摩擦コーンの幅、ギ ヤ負荷、必要クリアランス、シンクロ摩耗 代)の内訳は同じである。これら軸短縮の 結果を、ギヤの歯幅を増加するなどにて高 トルクの歯車設計

に利用したり、シ フトレバー比の増 加に利用したりす ることも可能。

新しいディテント ピンはハブに切り 欠き部分を必要と しないことから、円 周全部にてトルク 伝達が可能となり、 リブの厚みを 3 m m ほど薄くすること ができる。摩擦性 能に決定的な影響 をおよぼすシンク ロナイザーリング の円すい面も、こ れによって変えず に保つことができ る。また、摩擦に よる損失が、現行 のシンクロ機構を



17 Synchronization unit with a rotary actuation under the gearwheels (Schaeffler Ultra Short Synchro)

#### 上回ることもない。

軸方向長さが短くなったことで、シフトト ラベルが短縮される。これは約3割のシフ トトラベル減少に相当し、これに応じた動 的設計が可能になる。車両試験では、マニュ アルシフトでも操作性が良好であるとの評 価が出ている。もう一つの効果が軽量化で ある。軸方向のスペースで、短いシャフト とこれに相応する小型ハウジングを使用し た場合、さらに3.5kg分の軽量化が可能 になる。

#### 回転作動式ギヤシフト

搭載スペースの大幅削減を可能にするもう 一つの要因としては、画期的な回転作動式 シフトシステムがある。スリーブの軸方向 移動はすべてギヤ端面より内径側で行われ るため、外側の設置スペースが不要になる。 1速のギヤが3速のギヤの直近に配置され ている場合など、より大きなギヤを使用す るトランスミッションでは、こうしたシス テムをギヤの真下に配置できる。これによっ てアイドルギヤの距離が大幅に短縮され、 同期ユニットにつきさらに5mm~10mm の設置スペースを削減できる。

図17 にシフトシステムの一例を示す。作 動はドライブホイールの旋回回転によって 行われる。内側にあるスリーブはドライブ ホイールと接続されており、スクリュース リーブ上の三つのスライドカム溝によって 摺動面上を軸方向に移動する。ハウジング に固定されたスクリュースリーブが、反力 を受ける。

もう一つのメリットとして、シフト用アク チュエータはモータで直接作動できる点が 挙げられる。特に変速段数の少ない DHT で は、変速に必要なモータ数も DCT と同数で かつ、シフトフォークなどの部品が不要に なるため、さらなる軽量化の可能性がある。

現在は、このような超コンパクト型同期ユ ニットの開発が相当程度進んでいる。その 一方で、この技術が大きな可能性を有する ことは試作車を使った初期試験ですでに明 らかとなっており、新たに開発されたトラ ンスミッションへの採用が見込まれている。

# P2 ハイブリッドを採用した コンパクト型ダブルクラッチ トランスミッション

前述したように、ダブルクラッチトランス ミッションの P2 ハイブリッドで所定の搭 載スペースを確保するために、シェフラー はさまざまな製品技術革新を実現し、さら なる開発ソリューションを提供している。 P2 ハイブリッドモジュールおよびトランス ミッション部分に関する製品アイデアによ り、従来型 DCT と比較して高出力の P2 で あっても、トランスミッション全長をほぼ 一定で組み合わせることができた(図 18)。



18 Measures for reducing the overall transmission length of P2 hybrid double clutch transmissions

のスペースに収めることが可能である。

# まとめ

動力性能、効率性、快適性のバランスを適切に 取ることによって、ダブルクラッチトランス ミッションはグローバルなトランスミッション 市場における足場を固めつつある。これまで に設計されたシステムは、P2 ハイブリッドモ ジュールによる電動化に適していることが実証 された。ただし、ハイブリッドモジュールをエ ンジンとトランスミッションの間に配置するこ とは、パワートレインの長さがかなり伸びるこ とを意味する。軸方向の搭載スペースを確保す るため、シェフラーは将来の量産用途への導入 に耐える膨大な数の製品技術革新を実現した。 P2 ハイブリッドとパワフルなバッテリーを組 み合わせた場合、車両の発進の大部分は電力 (モータ)によって行われるため、クラッチシ ステムの最大平均負荷は従来のダブルクラッチ トランスミッションに比べて 50%未満にまで 低減し、搭載スペース削減を目指すうえで重要 な足がかりとなる。

こうした境界条件を念頭に置くことによって、 ロータの軸方向のスペース内にクラッチを収め ることを可能にした、高度に統合された湿式/ 乾式トリプルクラッチシステムの開発や試験が 可能になる。三つのクラッチを作動させるた め、コンパクトで高度に統合された作動ピスト ンの開発が必要となり、三つのピストンを作動 させるためのデバイスも初めて導入した。

トランスミッション自体で、搭載スペースを 削減することも可能である。これにあたって シェフラーでは、従来と比べて DCT の軸長を 15mm ~ 20mm 削減する新たなシンクロ機 構を開発した。クラッチ、アクチュエータ、ト ランスミッションのソリューションをほぼ自在 に組み合わせることにより、搭載スペースは全 体で最大100mm 削減できる。P2 ハイブリッ ド式 DCT ではこのようにして、P2 ハイブリッ ドモジュール分の追加機能およびスペースにも 関わらず、従来の DCT パワートレインと同等

## Literature

- Zink, M.; Wagner, U.; Feltz, C.: Double Clutch Systems – Modular and Highly Efficient for the Powertrain of Tomorrow. 10. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2014
- [2] Reitz, D.: P2 HV Drives The Most Efficient Hybridization for all Transmissions. 11. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2018
- [3] Rathke, G.: Made-to-Order Double Clutch Systems. 11. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2018
- [4] Hirt, G.; Kohtes, P.; Franke, C.: Holistic Development of Synchronizing Systems – Short, Light and Convincing. 10. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2014



# Dedicated Hybrid Transmission

How the Transmission Becomes a Powertrain

Andreas Kinigadner Christian Lauinger Martin Vornehm



#### はじめに

PHEV は、ハイブリッド運転による一部エ ミッションフリーの低燃費走行と走る愉し さとを両立させる。これに加え、法規制によ る要件が厳しさを増すことでバッテリー容 量が増加し、また性能の向上にともなって電 気エネルギーによる出力も増加していく傾 向にある。こうした背景によって、パワート レイン全体を設計するにあたり、さらなる機 能の統合化が求められるという課題が生じ ている。電気部品のコスト上昇にともない、 設計を簡略化するべく、あらゆる可能性を活 かすことが不可欠となっている。

自動車の全世界販売台数に占めるハイブ リッド車の比率は未だ低いため、ハイブリッ ド車用パワートレインでは、従来のパワー トレイン用コンポーネントを踏襲する場合 が多く見られる。エンジンとトランスミッ ションの間にモータを配置するシステムが その一例である。今後、電動化に対応した パワートレインの需要の増加が見込まれる が、それはシステム全体の最適化が優先課 題になっていくことを意味する[1]。例えば リバースギヤをなくし、トランスミッショ ンにモータを一つ組み込んでこの機能を担 当させることによって、機械式トランスミッ ションを簡略化するというオプションも含 まれる。こうしたトランスミッション方式 は、ハイブリッド専用トランスミッション (以下 DHT) と呼ばれている[2]。

DHT は、デュアルクラッチトランスミッ ション (以下 DCT) や遊星ギヤ式オートマ チックトランスミッション (以下 AT)、無 段変速トランスミッション (以下 CVT)、セ ミオートマチックトランスミッション (以 下 AMT) などの従来型トランスミッション 方式をもとに開発できる。モータはトラン スミッションの一部となり、さまざまな駆 動シャフトへの接続が可能となる (図 1)。



1 Function of dedicated hybrid transmissions with one or two electric motors

遊星ギヤユニットと組み合わせれば、パワー スプリットおよびパラレル(またはシリー ズ)ハイブリッド化が可能になる。それぞ れの構成では、複数のモータを組み込む場 合もあるため、さまざまな要求にあわせて 幅広い選択肢が存在する。

モータを一つだけ使用する方式と同様に、 例えばパワースプリット方式またはシリー ズ方式において、いかなる運転状況でも要 求される快適性を満足できるか、というこ とが課題となる。PHEVにおいてエンジン 作動時でも高い効率を実現するためには、 それ相応の変速比のレンジが求められる。

システムの複雑度を上げないため、モータを 一つだけ搭載する二通りの構造を検討した。

ーつ目の方法は CVT をベースにしたもの で、高レベルの快適性と優れた動的特性が 特徴で、ここではリバース用遊星ギヤとこ れに対応する変速要素が不要になる。二つ 目の方法は AMT をベースにしたもので、 特に多段式トランスミッションが大部分を 占める中国およびヨーロッパ市場を想定し ている。

# CVT ベースの DHT : (DH-CVT)

シェフラーでは 20 年近くにわたり CVT 用主要コンポーネントである動力伝達用 チェーンの開発、製造を手がけており、こ れまでに 1,200 万本を超えるチェーンと、 400 万個を超えるプーリーセットを提供 してきた。シェフラーは CVT チェーンの モジュール方式を適用し、現在ではコンパ クトな 05 チェーンから 500Nm を超える トルクにも対応可能な 08 チェーンまでを 市場に提供している [3]。05 チェーンは、 現代自動車社が量産を開始したトルク容 量 180Nm の CVT に初めて採用されたが (図 2)、高い出力密度と伝達効率が特徴で



2 Hyundai Motors CVT transmission with the Schaeffler 05 chain

[4]、チェーンピッチが小さいため、NVH も良好である。シェフラーは長年にわたり、 CVT プーリーセットおよび CVT 油圧制御 ユニットの量産開発も手がけており、CVT のシステム設計に関する詳細な知識を蓄積 している。

#### P2 配置における DH-CVT

CVTにおける動力伝達の基本特性は、幅広 い速度域でエンジンの動作点を自由に選択 するタイプの電動パワートレインに適して いる。これに加えてエンジンの効率が高い 条件での運転を可能にする。

エンジン側にモータを組み込んだ CVT は、 すでに量産化されている。ただしこのトラン スミッションでは、通常リバース用に遊星ギ ヤを必要とする。将来的には、モータのト ルクおよびバッテリー容量の増加によって、





3 Operating modes of the DH CVT with electric reverse gear

モータだけによるリバースも可能になる。 リバース走行への駆動力の切り替えのため に必要であった遊星ギヤ、ギヤセット、ア クチュエータ、クラッチは不要になり、ト ルクコンバータも必要がなくなるだろう。 ほかの従来型の P2 ハイブリッドに対応す る運転方式を図 3 に示す。

ここで紹介する DH-CVT のモータは最大出 カ90kW、最大トルク330Nm で、トラン スミッションハウジング内に完全に組み込 まれており(図4)、軸方向長さ約340mm というコンパクトさを実現している。同等 性能のP2タイプを採用したハイブリッド トランスミッションと比べて、この軸方向 長さは最小レベルである。変速比のレン ジが燃費におよぼす影響について検討を 行った結果、変速比のレンジが7までは 加速性能を損なうことなく燃費において明 らかなメリットが得られることが確認され た。本結果から、今回の方式における変速 比のレンジは7を選択した。バリエーター はセカンダリプーリーセットの後に位置す るかみ合いクラッチによって、ホイール側 から切り離すことができ、つまり停車中 もエンジンでモータを回すことで発電し、 バッテリーの充電ができるということであ る。これは、バッテリーが完全放電状態に なった場合においても短時間で充電を行 い、リバース走行ができるようにするため の非常用機能である。

従来の CVT では通常、機械式高圧ポンプを 含む油圧デバイスが使われている。WLTC (Worldwide-harmonized Light vehicles Test Cycle)におけるエネル ギー損失の約3分の1はポンプにより発 生する。その原因は、キックダウン時の要 求加速性能を満足させるため、ある時間内 に変速比を低速側に変えられるようにバリ エーターを急変速するなど、極端な運転状 況を想定したポンプサイズを採用せざるを 得ない点にある。さらに、ハイブリッド化 にともない、電動式の補助ポンプも必要と なる。

トランスミッションの電動化によって、ク ランピングやシフティングなどのアクチュ エータ技術をよりエネルギー効率の高い形 で設計できるようにもなってきた。シェフ ラーの新しいアクチュエータ技術は、既存 の方式を論理的な形で発展させたものであ り[5]、クランピング機能とシフティング 機能を分離して、要求に応じて制御可能な 電気式ボンプアクチュエータ(以下 EPA) を二つ搭載することを提案している。アク チュエータにはブラシレス DC モータが設 けられる。もう一つの電動オイルポンプは、 トランスミッションコンポーネントの冷却 と潤滑を行う。EPA によって、WLTC で 要求されるポンプの平均出力は、標準的な





4 Cross-section and construction of the DH CVT

油圧装置において 340W から 61W まで低 減された。これは、WLTC における約 4% 分の燃料消費量削減に相当する(図 5)。



5 Comparison of the of the output requirements of a standard hydraulic unit with EPA actuation technology CVTパワートレインモデルにおいて、各コ ンポーネントの特性を計測し、性能を調査し た。シミュレーションは、エンジン、湿式多 板クラッチ、パワーエレクトロニクスを搭載 したモータ、リチウムイオンバッテリーに関 するデータマップも織り込んだものとなっ ている。バリエーター、油圧デバイス、軸受 についてさまざまな運転条件で収集した実 測データも使用している。EPA とそのモー タについては既存データを使用した。

ハイブリッドトランスミッションにおい て EPA 方式を使用する場合は、ポンプア クチュエータやそのパワーエレクトロニク スの設計にかかわる特殊な運転状況を把握 しておく必要がある。全負荷加速やこれに ともなう迅速なレシオ変更、あるいはバリ エーターに継続的に最大トルク負荷がかか るような状況もこれに含まれる。



6 DH CVT hydraulic unit with innovative EPA actuator

プライマリプーリーが大きく作動する条件 においてシフトポンプの高流量状態から解 放するには、高速シフトバルブを使用する (図6)。この動作は電気的、またはシフティ ングポンプを通過する流量によって制御さ れる。高速シフトバルブを使えば、クラン ピングとシフティングのアクチュエータで 同容量のモータを使用できる。冷却油圧を 利用してクランピングアクチュエータに予 圧をかけることによって、効率性と動的特 性が向上する。

図7の左側は、キックダウン時のトルク急 上昇によるバリエーター高速作動中のバリ エーターレシオおよびバリエーター入力ト ルクと時間との関係を示す。 図7の右側では、同じ状況における EPA モータニつの動作点を示している。設定し た設計に応じて、ここではアクチュエータ それぞれのモータ最大出力を約200W と している。実線は、モータの最大連続出力 を表しており、最大では約450W に到達 する。

#### AMT ベースの DHT: (DH-ST)

シェフラーは 1997 年より電気機械式サブ システムを供給しており、その内訳は従来 型の MT 向けから、AMT および DCT 向け へと変化している。クラッチ作動デバイス やギヤシフト作動デバイスも、さまざまな 技術に適したものが開発された [6]。 これらの量産を手がけてきた経験をもとに、 電動化された AMT のコストメリットを利用 した、新開発のトランスミッションコンセ プトが登場した。P2 モータとクランクシャ フトの間に配置されるクラッチ (CO)、二 つあるクラッチのうち一つ、そして軸受と ギヤを備えた駆動軸一本が不要になるほか、 作動に要する動力も低減される。

パワーシフトはエンジンとモータの相 互作用を介して行われる。したがって、 モータの出力はエンジンと同等かそれ以 上となる。図8で示しているのは、最大 出力147kWのモータを搭載した6速 トランスミッションの設計である。トラ ンスミッションは、二本のシャフト上に 設けられた五つのギヤだけで動作する。



#### 1.0 0.5 Nm .= Torque i -0.5 -1.0 200 $\geq$ Ś U C 052 200 4 5 -1.5 -6,000 -4,000 -2,000 0 2,000 4,000 6,000 Speed in rpm

📕 EPA shifting 📒 EPA clamping

#### 7 Tip-in maneuver.

technology

Left: Time dependency of variator ratio and torque.

Right: Output uptake for both EPA actuators (dotted line) and maximum continuous mechanical output for the electric motors The previous section shows that the simulation tools developed by Schaeffler allow an optimum design of the pump size, the motors and the actuator electronics to be found for the specific customer requirements. The compact EPA enables such highly efficient CVT-actuation concepts.

1.5



8 Cross-section and design of the DH ST 6+2 with six combustion engine and two electric gears



9 Transmission schematic for a hybrid transmission with six combustion engine and two electric gears

登坂能力 25% 超、最高車速 200km/h 超 を実現するため、変速比のレンジは 6 とさ れている。軸方向サイズは 410mm とな り、一般的な 350Nm の横置き前輪駆動パ ワートレインのパッケージとの互換性を備 えている。

トランスミッションは、二つの構成に分割 できる。エンジンと平行に配置されたモー タは、トランスミッション部分の一方で動 作し、二組のギヤを介して二通りの変速比 を利用できるよう、トランスミッション構 造に組み込まれている(図9)。そのほかの トランスミッション部はシステムがエンジ ンだけで稼働しているときに、二通りの変 速比を有する。エンジンは、直接もしくは 変速比を使って、トランスミッション部を 介した動力伝達を行うことも可能となる。 これらは二つのトランスミッション部の 間で一種の増速トランスミッションを形成 するため、さらに四つのギヤが利用可能と なる。つまり、エンジンは合計六つのギヤ で動作し、電気モータは二つのギヤで動作 することになる。一組のギヤは重複して使 用するため、6速を実現するには五つあれ ば十分となる。

シングルクラッチとシフト要素三つをこの ように組み合わせることで、電気だけによ るリバース走行など、さらなる走行条件 やパワーフローを実現できるようになる。 パーキングロックの役目も果たすアクチュ エータを介して、ギヤ選択を行うことも可 能である。

この設計による大きなメリットは、エンジ ン走行時の変速中のトルク瞬断をモータ によって補填できること、電気自動車と 同様にモータ走行を実現できる構造となっ ていることがあげられる。モータ走行から ハイブリッド走行にモードを切り替え、こ れにともないエンジンを始動させた後は、 モータ側ギヤが2速にシフトできる状態に なる。この仕組みによって快適な変速を実 現している。高速走行では、エンジン用の 六段ギヤとモータ用の二段ギヤによって、 燃料消費量とNVHの低減を実現する。

トランスミッションの設計にあたって は、最高車速が200km/hを超えること、 140km/hまでモータ走行を可能にする ことを目標とした。加速目標、またはキッ クダウン時の変速快適性に関する要求を低 めに抑えられる場合は、より小型のモータ を使用することも可能である。例えば、パ フォーマンス志向型バージョンのトランス ミッションのほかに、最大出力を100kW (最大トルク170Nm)としたコスト重 視型のバージョンも実現可能となる(図 10)。

バッテリー容量が十分であれば、PHEVは モータ走行モードで相当程度の距離を走行 できる。一定の走行速度を超えるか、ある いは規定の駆動トルクを超えると、バッテ リー充電量に応じてエンジンを始動する状 態になる。適切なギヤをあらかじめ選択し、 クラッチを締結することでエンジンを始動 することから、ピニオンスタータは不要に なる (図 11)。エンジンが規定の駆動トル クに到達次第、モータ側がシフトアップで きる状態になる。さらに、モータ側ギヤの 1 速から 2 速へのシフトポイントは、負荷 状況に応じて調節できる。

DH-ST ソリューションはほかの構成の余 地を残している。モータを同軸配置した り、エンジン用のギヤ数を3に減らした り、あるいはモータのみの発進で、発進時 のクラッチ作動を不要にすることも可能だ ろう。



10 Axle torque as a function of the driving speed for two variants of the electric motor (147 and 100 kW) as well as two different ratio stages in the electric gears



11 Internal combustion engine gear selection and startup process



Transmission	R/C	power	(Peak)
DHCVT	7	140 kW	80 kW
DH-ST 6+2	6	220 kW	147 kW
P2-6DCT (wet)	6	180 kW	80 kW
Powersplit	-	184 kW	50 kW (MG1)/100 kW (MG2

12 Comparison of the fuel efficiency of various hybrid drives in charge sustaining mode

## 走行性能および燃費に関する可能性

DHT で達成すべき走行性能および燃料消 費量の削減について定量化するため、燃費 シミュレーションをWLTC に準拠して行っ た。ベースは車体重量1,670kg、1.4 リッターターボガソリンエンジン搭載のD セグメントのPHEVである(最大トルク 250Nm)。モータ走行レンジを決定する リチウムイオンバッテリーの充電容量は、 8.7kWhである。図12では、DH-CVT およびDH-STの燃費シミュレーション結 果を、ハイブリッド型6速ダブルクラッチ トランスミッションおよびパワースプリッ トドライブトレインと比較している。

これらシミュレーションではモデルの精度 が非常に重要となるため、量産型の湿式 多版クラッチを採用したハイブリッド型 DCT[7]の各種パラメータを測定した後、 モデルのデータマップとのコリレーション を行った。また車両試験により、さまざま な湿式 DCTの変速制御についても、モデ ルとの比較、コリレーションを行った。 WLTC での Charge sustaining モードに おいては、6 速湿式 DCT を搭載した P2 ハ イブリッドでも、パワースプリット方式ト ランスミッションでも卓越した効果を発揮 する。EPA 付き DH-CVT は約4.3L/100km と、約4.5L/100kmのDH-ST 6 + 2ト ランスミッションに比べて若干良好な結果 となっている。その主な理由としては、エ ンジンがより広い動作領域において、より 大きい変速比幅で動作できる点が挙げられ る。パワースプリット方式のように、動力 変換による損失が発生することが無いから である。

CVT方式の評価結果が、このように良好な ものであった点は意外と思われるかもしれ ない。最近公開された調査[8]によれば、B セグメント車プラットフォームでは最新の CVTとDCTが、同等の効率を発揮するこ とが分かっており、社内で行った調査でも その旨が確認されている。CVT内で最もエ ネルギー消費量の大きかったコンポーネン トが、従来型油圧デバイスから EPA 式のパ ワーオンデマンドに移行したためである(図 5)。関連する効率が向上したことによって、 DH-CVTのハイブリッドモードおよびモー タ走行レンジにおける燃費も改善されてい る。将来にわたってCVTの競争力を確保す るうえで必要となる油圧式ユニットの最適 化も重要な要素である [9]。DHT のモータ 走行距離は、WLTC走行距離全体を網羅す る。<br />
一方、<br />
DH-CVTの<br />
55.4km<br />
という値は、 DH-ST 6 + 2 の 54.9km という値を若干 上回っており、DH-CVT 向け EPA 技術によ るメリットを示すものとなっている。DH-ST 6 + 2 ドライブが効率の良い機械式ギヤ を使う一方、DH-CVTではモータを P2 配 置にすることよってバリエーター周辺のス ペースを確保しトランスミッションの変速 比幅を7とすることができた。

モータ走行による 0 - 100 km / h の全開加 速性能を比較したところ、DH-ST がほかを



13 Criteria with allocation by market and segment for the DH CVT and DH ST

大きく引き離して 6.8 秒という最高の値を 達成している。ただし、この方式で使用し ているモータは現時点で最高出力 (147kW) であるため、当然の結果とも言える。ハイブ リッド専用 CVT およびハイブリッド型 DCT の性能比較については、モデルの精度を考慮 すれば実質ほぼ同等であるといえる。

モータおよびエンジンでの全開加速性能に 関して言えば、DH-ST 6 + 2 は 220kW と いう高いシステム出力によって、5.9 秒とい う結果を出している。DH-CVT は 6.4 秒と、 現行のハイブリッド型 DCT と同等の結果を 出している。

図 13 では、現行の量産型車両での DHT に 関するそのほかの比較基準を紹介している。 CVT をベースにした方式は、高水準の快適 性と軸方向のスペース低減を実現し、さま ざまなシステム出力範囲にも比較的簡単に 対応できることから、中型車から高級車の 車両区分で、そして SUV でもアジア市場の 枠を超えて競争力のあるソリューションと なっている。DH-ST 6 + 2 は、小型車か ら中型車、そしてコンパクト SUV 向けのダ イナミックかつ効率的な PHEV 用トランス ミッションを実現するシンプルさと確かな 性能を兼ね備えたソリューションである。

#### まとめ

ハイブリッド専用パワートレイン (DHT) は、PHEV の効率や駆動特性のさらなる 向上のための可能性を大いに秘めている。 HEV での使用に特化することで、システム 特性を改善すると同時に、パワートレイン 全体をよりシンプルなものにすることが可 能になる。

ここで紹介した CVT をベースにした DH-CVT は、現行の P2 配置の進化形を体現 している。通常、遊星ギヤセットによって 構成される機械式リバースギヤは完全に不 要になる。機能別のポンプアクチュエータ を採用した新方式のアクチュエータ技術に よって、油圧損失が大幅に低減され、高水 準の効率性を実現できる。

AMT をベースにした DH-ST 6 + 2 は、エ ンジン用六段ギヤとモータ用二段ギヤを採 用した非常にコンパクトな設計になってお り、トランスミッション方式をさらに進化 させている。機械式の動力伝達経路は、パ ワートレイン全体として非常に優れた効率 性を発揮する。

ここで紹介した DH-CVT と DH-ST 6 + 2 という二つの方式は決して、ハイブリッド トランスミッション技術の究極の姿ではな い。パワートレインは切磋琢磨して、さら に進化をし続ける可能性を大いに秘めてい る。

## Literature

- [1] Gutzmer, P.: The Future of Engines Is Strongly Influenced by Transmissions. 36th Internationales Wiener Motorensymposium, 2015
- [2] Fischer, R.: Dedicated hybrid transmissions a new category of transmissions. In: Conference Report 14. Internationales CTI-Symposium, Berlin, 2015
- [3] Teubert, A.: How to build better CVT's; VDI Reports 2276 (2016) 791
- [4] Choi, B.D.: Development of high-efficiency new CVT for compact car. In: Conference Report 11<sup>th</sup> CTI Symposium, Novi (USA), 2017
- [5] Marquenie, L., Clephas, T.T.G., van Rooij, J.H.M.: Development of an improved electro-hydraulic CVT actuator. In: VDI Reports 2276 (2016) 859
- [6] Kroll, J.; Hausner, M.; Seebacher, R.: Mission
   CO<sub>2</sub> Reduction: The future of the manual transmission. In: Conference Report 10.
   Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2014
- [7] Shinbori, I.: Transmission which has built-in electric motor for hybrid electric vehicle. In: Conference Report 12th Internationales CTI Symposium Automotive Transmissions, HEV and EV Drives, Berlin, 2013
- [8] Hellenbroich, G., Janssen, P., Steinberg, I.:
   CVT in comparison to other transmission concepts. In: VDI Reports 2276 (2016) 767
- [9] Kato, K.: Development of new hydraulic control system for JATCO new wide-range CVT. In: VDI Reports 2276 (2016) 847



# The Schaeffler eDrive Platform

Modular and Highly Integrated



#### はじめに

電動システムの開発は、モータ設計の枠を超 えた領域にまでおよんでいる。効率、出力、 システムコストの観点で最適な仕様に到達す るには、モータ、パワーエレクトロニクス、 センサー、メカニカル設計、制御ロジックを 最適に組み合わせる必要があり、そのために はシステム指向アプローチが必要である。

シェフラーは 2011 年に「Active e-drive」 コンセプトカーを発表し、このシステム領 域の専門知識を有していることを証明した。 このベース車両、シュコダ・オクタヴィア (Škoda Octavia)、のエンジンは最大出力 105kWを有する電動アクスル2台に置き換 えられた。これらのモータはシェフラー社内 で開発されたものである。当初モータのギヤ 比は固定だったが、2014年に発表された同 名のコンセプトカーでは、2速トランスミッ ションを搭載し、最大出力が 65kW まで小 型化された第三世代の電動アクスルが採用さ れた。このシステムには社内で開発された新 しいパワーエレクトロニクスが採用された。 どちらの世代のコンセプトカーも、左右輪に トルクベクタリング機能を備えている。この ときはトルクベクタリング用とは別に、駆動 用のパワーエレクトロニクスを実装してい た。

今後の10年間、自動車に占める電動化車両 の割合が増加することで、機電一体化が大幅 に進むことが予測される。また同時に、大き く異なる多様なトポロジーをもったパワート レインが導入されて来ているが、その種類は 電動システムの実装位置によって分類される [1]。これらのパワートレインの実現には、 以下の四種類の電動システムが必要である。

- エンジンとトランスミッションの間に配置される P2 ハイブリッドモジュール
- ハイブリッド走行、および EV 走行モードを 実現するために特化したハイブリッド専用ト ランスミッション (以下 DHT)

- ハイブリッド専用パワートレイン、および電気自動車用電動アクスル
   新しいモビリティコンセプト用のインホイー
- ・新しいモビッティコンセット用のインボイー ルモータ

電動システムは、マイルドハイブリッド用 の48Vからバッテリー電気自動車用に使 われる400Vまで、さまざまな電圧レベル で動作していることから、その複雑さが増 している。バッテリーの充電時間短縮のた めに、いくつかの自動車メーカーがすでに 800Vの車載電気システムを備えた車のプ ロジェクトに着手している。それにともな い電動システムの出力範囲は、20kWから 400kW以上までと大きく広がっている。

これら将来の電動システムのコンセプトの 共通点は、機械/電気/電子システムの大 部分が一体化されるという点である(図 1)。ただし、個々のモータに求められる要 件は大きく異なり、例えば P2 ハイブリッ ドモジュールとインホイールモータはどち らも、主に軸方向の設置スペースに限り がある。さらに、モータ速度はパワートレ インの速度と一致しており、このことはパ ワーの変更が、モータのトルクの変更によ り行われる必要があることを意味する。電 動アクスルでは軸方向の設置スペースが大 きいものの、主に径方向は搭載位置の制約 により制限される。また必要な駆動トルク を確保するため、少なくとも一つ以上の変 速段を介して車軸ヘトルク伝達が行われ る。これにより、モータを高回転で回す必 要はあるものの、モータ自体のトルクは小 さくできるため、モータの小型化と材料費 の低減が可能となる。DHTにも同じことが 当てはまる。一方で、パワーエレクトロニ クスはパワートレインのタイプによる影響 からは独立しているが、主に電圧レベルや 最大出力時に必要な電流の大きさ、パワー トレインの設置スペースによって主に制限 される。



1 Powertrain concepts with an integrated electric drive

多くの要件が関係することから、さまざま な設置スペース、出力クラスを考慮したモ ジュール化のアプローチが必要である。設計 にもよるが、電動システムのうちの電気およ び電子部品のコストが全体の最大 80%を占 めており、したがってそれらの部品が総コス トに与える影響は大きい。

# モジュラーアプローチ

プラットフォームの開発

多様な車両や駆動方式に対応する一方で、開発 費を最小限に抑えるため、シェフラーは電動シ ステム用にモジュール方式による設計手法を採 用し、三つに分類されたレイヤーを図2に示す。 電動部品だけでなく、それらを制御するのに必 要なハードウェアとソフトウェアも含まれる。

プラットフォームの基礎となるのはモータであ る。前述した通り、多様な要件を満たすため、出力 の縮小や拡大が可能(スケーラブル)な複数の シリーズを定義する必要がある。現在の見積り によれば、将来必要となるすべてのアプリケー ションを六つのモータシリーズでカバーでき る。このプラットフォームは必要な出力密度や ほかの要件に応じて、永久磁石同期モータ(以 下 PSM)と非同期モータ(以下 ASM)の両方が 使用できる。

次に、中間レイヤーにはパワーエレクトロニク スが含まれており、これには電源スイッチ、コ ンデンサ、バスバー、ドライバー類、センサー などの主要部品が含まれている。また、プラッ トフォームに含まれるもう一つの要素にはキャ リアフレームがあり、これには冷却水を流す機 能と、パワーエレクトロニクスのすべての部品 のヒートシンク機能が含まれる。また、本レイ ヤーに内包する第2レベルには、駆動制御用 基板があり、その仕様はモータやパワーエレク トロニクスに依存するだけでなく、車両レベル で求められる機能によっても異なるため、アプ リケーションに応じた実装が求められる。例え ば、FlexRay、CAN または CAN FD などの通 信ネットワークがその一例である。

そのため、同様の理由で機能要件に基づいて 開発されるソフトウェアプラットフォームを 含む第3レイヤーから第2レイヤーを切り離 すことはできない。このソフトウェアには、 AUTOSARに基づくファンクションライブラ リが含まれ、関連するハードウェアの要件が定 義される。



2 Powertrain concepts with an integrated electric drive

## プラットフォームの部品

### モータ

P2 ハイブリッドモジュール、電動アクス ル、あるいはインホイールモータなど、高 出力密度が求められる電動パワートレイン においては、モータを単体で機能する部品と して扱っていては限界がある。多くの場合、 パワートレインの組み立てが完了する前に モータの全機能を試験することはできない。 なぜなら、多機能をもつモジュールはほかの サブシステムが機能するために必要な要素 に影響を与えるからである。例えば、適切に 配列された軸受は駆動システム全体を支持 する機能を担い、あるいはロータのキャリア はクラッチプレートのキャリアにもなりえ る。しかしながら、そのために製造ラインで の検証は難しいものとなる。不良部品を適 時選別し、不良部品が EOL (End-of-line) 試験まで流出してしまうことを防止するた めには、巻線の抵抗、インダクタンス、磁場 の分布などのパラメータを適時測定し、磁気 回路を構成する部品(ステータおよびロー タ)の品質を管理することが重要である。

同様にこのモータに関しては、主たる機能で ある回転速度 - トルク特性の実現のほかに、 以下の要求を満たす必要がある。

- 長時間、かつ連続的に性能を保証するため に必要な冷却能力および高いコイル占積率
- コスト削減のため、最小限の材料使用
- NVH を最適化するため、ステータで発生 する径方向および接線方向の高調波の抑制
- 同様に、駆動力へ悪影響を与えるだけでなく、渦電流を誘起させ、最終的に損失やステータ/ロータの熱要因となる高調波成分の抑制・低減
- コギングおよびリップルトルクの低減

詳細な分析をするほど、問題となる現象に応 じて要件は増えていく。したがって、結果的 には最適化の問題に直面し、その問題を解決 するには該当するアプリケーションの要求 と期待される負荷頻度に則って行われなけ ればならない。

分布巻は高トルク密度に有利で、高調波成分 が少なく、巻線からステータコアへの熱の流 れも適正であることが証明されている。ただ 分布巻はコイルが複数のスロット上を跨って いるため、集中巻に比べてコイルエンドが大 きくなる問題がある。産業および電気工学的 知見から、丸線コイルを使った分布巻は、自 動車用途には適していないことが証明されて いる。最近ではコアに平角線を用いたセグメ ントコイルを挿入し溶接する、ヘアピン(あ るいは | ピン)技術を使用するソリューショ ンがますます増えているが、各ステータの溶 接ポイントが多いことから、この生産技術に 求められる要件は非常に多い。平角線を用い た方式は、丸線コイルに比べて大きな断面積 をもつことから、動作時のコイル内の表皮効 果などの損失が大きくなり、特に周波数の増 加とともにその損失は急激に増える。

分布巻のコイルエンドが集中巻に比べて大き くなる問題は、ヘアピン技術によってかなり 軽減できるものの、完全に解消されるわけで はない。そのため、設置スペースの理由で軸 方向の長さが極端に短いことが求められるア プリケーション、例えば、48V P2 ハイブリッ ドモジュール用モータなどではモータの有効 長が 50mm 以下となり、現在の生産技術で は分布巻は適さない (図 3)。これは、利用 できる生産技術による制約が大きいことを示 す一例でもあるが、コイルエンドを小さくす ることができれば、分布巻の適用限界は取り 払われ、軸長が短い用途にも使われるように なるであろう。

シェフラーはこれまで、これらの利点をその ままに、欠点を最小限に抑えた、ヘアピン方 式に代わる代替案がないか検討してきた。そ の一つが波巻で、一種の成型工程で波型状の コイルをステータスロットに結合する方式で ある。コイル占積率は劣るが、断面積を小さ くできる。これによりスロット数を増やし、 渦電流損失の影響を減らせる。三つの巻線タ イプの定性的比較を図4に示す。



3 Application areas of concentrated and distributed winding, depending on the active length of the electric motor

	Concentrated		Distributed	
	and the second	ARABELI I I I I I I I I I I I I I I I I I I		
	Single tooth	Hairpin winding	Wave winding	
Copper fill factor	+	++	+	
Utilization of active material	0	+	+	
Dynamic stator resistance	+		+	
Number of slots	-	+	++	
Rotor losses		+	++	
Stator cooling	-	+	++	
Size of winding heads	++	0	0	
Number of welding points	+		++	
Production flexibility	++	_	0	

4 Application areas of concentrated and distributed winding, depending on the active length of the electric motor

```
長所と短所が実際どの程度影響するかは、ア
                            図5に示す。ステータ外径は220mmで、ス
プリケーションによって異なる。違いを定量
                            ロット数は96、積厚は110mmである。
化するため、Cセグメントにおける電気自動
車用の電動アクスルを例に、ヘアピンと波巻
の比較を表にまとめた。減速ギヤと組み合わ
せた場合、以下の仕様が考えられる。
• P_{max} = 147 kW
• T_{max} = 265 Nm
• n<sub>max</sub> = 18,000rpm
```

このアプリケーションに要求される各動作点に おける、波巻を採用したモータの性能データを 次にモータを同一のスペース要件でヘアピン 技術を使った場合、このモータでは72スロッ

トを実装した。続いて、上述の動作点で、ス テータおよびロータの損失を比較した結果を 図6に示す。その結果、低速域ではヘアピ ン巻のステータ損失は、波巻よりも少ないこ とが分かった。逆に、高速回転域では周波数 損失が大きいことにより、ヘアピン方式の方 が損失が大きかった。さらに、ロータ損失に

Operating point	OP2	OP3	OP4	OP5	Partial load	Max. cont. power
Speed in rpm	5,300	18,168	4,542	18,168	3,750	10,000
Torque in Nm	265.1	64.5	146.5	36.5	3	95.5
Power in kW	147	123	70	69	1.18	100
Efficiency in %	94.9	94.9	96	95.3	91.9	97

5 Calculated level of efficiency in an electric motor with wave winding for various operating points



Operating points

**Operating point** 

Speed in rpm

Torque in Nm

Power in kW

Efficiency in %







Wave winding

0P3

64.5

123

94.9

18,168

OP2

5,300

265.1

147

94.9

72 slots Hairpin winding

OP4

4,542

146.5

70

96



6 Comparison of the stator and rotor losses for the electric motor in an electric axle application with wave and hairpin winding

OP5

36.5

95<u>.3</u>

69

18,168

ついては波巻はすべての動作点でロータの損 失が小さいと言えるが、これは主に、高調波 成分が少ないことがその理由だ。

さらに、波巻の方がスロット数を多くできる ため、全体の表面積が大きくなり冷却に有利 である。このことは、実際の損失を考慮した 設計を行い、ロータとステータで発生する温 度を調べれば明らかである。低負荷と高負荷 時の各動作点での比較を図7に示す。

最後に、それぞれの平均効率をWLTC (Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle) で比較した。波巻 モータの平均効率は94%、一方へアピン巻 モータの平均効率は89%であった。また分 布巻の一般的な利点の一つは、ステータを PSM、ASM、さらには他励式同期モータに 使用できることである。そのため、モジュラー システムへの採用により適している。





Identic	al losses assumed	Winding temperatur	Magnet temperatur
OP/	72 Slot	164 °C	160 °C
UP4	96 Slot	151 °C	151 °C
OPE	72 Slot	137 °C	157 °C
UFJ	96 Slot	133 °C	153 °C

Losses	according topology	Winding temperatur	Magnet temperatur
0.04	72 Slot	155 °C	175 °C
UP4	96 Slot	151 °C	151 °C
OP5	72 Slot	210 °C	232 °C
015	96 Slot	133 °C	153 °C

7 Comparison of the stator and rotor temperatures at two operating points in an electric motor with wave and hairpin winding

#### パワーエレクトロニクス

自動車用のパワーエレクトロニクスは、電動 アクスル、P2 ハイブリッドモジュール、DHT などの多くの電動システムへの統合化が必要 で、さまざまな要件を考慮する必要がある。

- 高いロバスト性:ユーザープロファイルの ばらつきが大きく、大幅に増える環境関連 の要求(振動、周囲温度など)に対応する 必要がある
- 狭いスペースでも設置できる出力密度を満たし、かつパワー損失によって発生する熱の放熱性を考慮した設計
- アプリケーションによって設置スペースが 異なることによる設計の柔軟性
- 高調波損失を最小限に抑えるための最適な 電流の流れの設計
- すべての運転条件下で要求を満足するトル ク精度

信頼性:多様なバッテリー構成に対応し、
 広い電圧範囲で動作できること

● 機能安全性

パワーエレクトロニクスの場合もモータと 同様、詳細な分析をすれば要件のリストは 増え続けるであろう。加えてパワーエレク トロニクスを各アプリケーション固有のパ ワー要求に適合させることも必要だ。シェ フラーは、前述の要件を考慮したうえで、 各アプリケーションにあわせてパワーエレ クトロニクスを適合可能なモジュラーコン セプトを採用した(図8)。以下に85kW ク ラスのP2 ハイブリッドモジュールを例に説 明する。

まず、制御モジュールとパワーモジュールは 切り離され、各モジュール単位で組み合わせ ることによって多様な要求に対応している。



Small IGBT Medium IGB1 Large IGBT Extra large IGBT 70 80 90 100 110 120 130 140 150 160 170 180 190 200 210 220 230 240 250 Max. EDS power in kW ~ 300 arms ~ 400 arms ~ 550 arms ~ 700 arms IGBT half-bridge power modules small medium extra large large • Highly reusable • Scaling by silicon chip size Scaling by thermal impedance Chip size: Chip size: 8,8 x 8,8 mm<sup>2</sup> 8,8 x 8,8 mm<sup>2</sup> Chip size: Chip size: Chips per switch: 2 Chips per switch: 3 10 x 10 mm<sup>2</sup> 10 x 10 mm<sup>2</sup> Chips per switch: 3 Chips per switch: 3 special ceramic E-motor • Scaling by number of motor-phases Scaling by design parameters

9 Power scaling through the size and number of IGBT semiconductors and the number of phases in the electric motor

制御モジュールは、制御基板、パワーエレク トロニクス用の制御IC、オプションのアク チュエータ用アンプ(電力増幅器)から構 成される。一般に、制御基板には二つのモー タ用制御チャンネルが用意される。この例で は、第2チャンネルは、P2ハイブリッドモ ジュールのC0アクチュエータの制御用に 使用される。あるいは、このチャンネルを 2段変速機のギヤアクチュエータやパーキン グロック、パワースプリットトランスミッ ションの二つ目の駆動モータ用として使用 することもできる。

パワーモジュールでは、まずパワー半導体 のスケーリングを考慮する必要がある。パ ワー半導体は、コストの大部分を占め、評 価や試験に多大な労力が必要になる重要な 要素である。シェフラーは、まずハーフブ リッジモジュールを最小単位として使用す ることを選択した。なぜなら、三相以上の

多相駆動システムの構築にもそのまま使用 できるからである。幅広い要件を満たすた め、二つのメカニカルなサイズ、一つの基 本的なチップセット(チップサイズおよび チップ数)を定義した。結線および冷却のた めの外部へのインターフェースは常に同じ 条件とした。さらに、ロバスト性確保のため、 モジュールの重要な箇所の接合に、はんだ 接続やアルミワイヤーボンドの使用は避け た。現在の設計では、IGBT (Insulated-Gate Bipolar Transistors) と並列ダイ オードには、シリコン半導体を使用してい る。しかしながら、モジュールコンセプト では最大 20kHz の動作周波数を想定して、 新しいワイドバンドギャップ半導体を将来 的に使用することも考慮している。これよ りも動作周波数が高くなると、パワーエレ クトロニクスの基本設計の変更が必要とな る。本方式のスケーリングの基本的な考え 方を図9に示す。

焼結技術の採用で、IGBT モジュールの耐久 性は従来のアルミニウムワイヤーボンディ ング技術に比べて、10倍に増加した。その ほかの基本部品にはコンデンサとバスバー があり、これらの部品は電流が流れる経路 上にあることから常に電力の損失が発生す る。

設置スペースへの柔軟性は、キャリア・冷 却フレームの設計によって決まる(図8)。 この部品は、射出成形によって作られ冷却 水の流れを決定し、発熱する部品をヒート シンクに接続し、基本部品を互いに所定の 位置に配置する。これらの部品や配置は CFD シミュレーションを使って最適化され、 この手法によりハーフブリッジの冷却が 対称的に行われるように設計される。さら に、寄生インダクタンスやコンデンサ容量に よる問題が起こらないよう、電気的な接続 を最適化し、この例では出力密度 30kW/l 以上を達成することができた。

設置スペースの柔軟性とこのモジュラーア プローチのおかげで、さまざまな要件に対 応可能となった。最大出力150 kWの電動 アクスルの設計例を図10に示す。EMCフィ ルタをオプションとしてDCライン側に追 加したり、十分大きなEMCフィルタを付け たりすることでDC電源ケーブルのシール ドを省くことも可能である。これは車両レ ベルでのシステムコストの最適化に貢献で きる選択肢となりえる。



10 Power electronics setup for an electric axle drive

パワーエレクトロニクス用に選択された基 本コンセプトは、設置スペースや電気出力 を含む、P2 ハイブリッドモジュールとP4 電動アクスルの高電圧電動システムの幅広 い要件を満たすのに十分な柔軟性を備えて いる。

次のステップとして、48Vの同軸 P2 ハイ ブリッドモジュール に対しても、選択した アプローチが使用できるかどうかを確認し た。この場合、パワースイッチング素子と して使用されるのは、MOSFET (Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistors) である。部品はセラミック 基板に直接実装され(いわゆる「ベアダ イ」)、この基板は、キャリア・冷却フレー ムに完全に密着して接続される。これによ り、放熱性が大きく向上し、高い出力密度 が実現される。このことは高電流レベルが 求められるハイパフォーマンスの 48V ドラ イブシステムでは特に重要である。実際に 最大<br />
出力 15 kW (20 sec) の<br />
場合、<br />
発生す る最大電流は 650 Arms にも達する。コン デンサは、低インピーダンスを維持するた めに MOSFET の近傍に直接取り付けられて いる。

この例では、設置スペースの都合上、モー タの有効長は45mmになることから、集中 巻を使用したモータが設計された。HVのア プリケーションと比べて違いはあるものの、 このプラットフォームの主要部品はこの場 合でも使用することが可能で、コンパクト な設計のP2ハイブリッドモジュールが実現 した(図11)。

#### ソフトウェア

シェフラーは、必要なハードウェアの仕様を 含む、包括的な機能指向のソフトウェアライ ブラリを作り上げるアプローチを取った。こ のライブラリの主な要素は以下の通り。

#### Power electronics

Realization of high current specification with bare dies
Supply voltage: 36 - 52 Vdc
AC current: 650 Arms (peak 20 s)
AC current: 320 Arms (continuous)
Low impedances



11 Integration of the power electronics in a P2 hybrid module at the 48-volt level

- センサー信号の分析:ロータ位置、相電流、 温度などの検出
- モータ制御ロジック:使用するモータのタイプ (PSM、ASM) に応じた制御
- 電流制御機能:弱め界磁制御を含む各要因を 考慮した界磁制御
- 上位コントローラ機能:顧客要望に応じてカ スタム化、統合化されたパワートレイン制御 ロジック
- 監視機能:熱保護のための出力ディレーティング制御、機能安全

ソフトウェアライブラリには、これらのソ フトウェア・ビルディングブロックに加え て、必要なハードウェア回路の定義や推奨さ れるソフトウェアモジュールが用意される。 また最適な放熱や EMC 特性を保証するため に、最終レイアウトでハードウェア個別仕様 にあわせたソフトウェアを実装できるよう



🔲 3<sup>rd</sup> party SW (AUTOSAR) 📕 SW platform 📕 Project specific SW



定義されている。このレイアウトは、個別の アプリケーションに特化して作成され、顧 客要件に柔軟に対応することができる。そ の具体例として、さまざまな通信プロトコル (CAN、FlexRay) などがある。

アーキテクチャに関して、このソフトウェア ライブラリは高水準のコモナリティーを保証 するため、AUTOSAR に準拠している(図 12)。

#### システム開発

プラットフォームに基づいて行うドライブ ユニットのシステム開発は、パワートレイ ン全体や、自動車コンセプトの影響を受け る。これについて、インホイールモータの開 発中にあった、動作中に騒音が発生したとき の例を用いて説明する。研究パートナーであ る KIT、FAST、ETIと共同で、音の伝達経 路に関連する、ハードウェア、ソフトウェ アを分析した結果、モータ内の磁場変動に より、ステータ内に縦力および横力が生じ、 これらの力がシャシーに伝達して騒音が発生 していたことが判った。

初期の対策としては、騒音が問題となる 周波数範囲または共振次数での励振を防 止するため、モータの設計変更を試みた。



13 Vibration reduction in a wheel-hub drive through targeted torque variation in the e-machine



14 Propagation of torque generation inaccuracies in a typical e-machine

ただこの方法では限界があることが判り、残った問題となる周波数範囲については、振動を 抑制するモータ制御に変更した。この対策に よる振動の振幅が抑制されたグラフを図13に 示す。

システム指向開発を取り入れたもう一つの例 は、トルク精度であり、すべてのモータ仕様に 含まれている。モータが発生するトルクを決め る経路上のすべての物理的要素にはそれぞれ一 定の誤差があり、トルクが変動する原因となっ ている。例えば、ロータ位置検出用のアナログ 信号処理回路の電圧がわずか1%でも変動する と、角度誤差が要因となり、結果的に0.5Nm のトルク変動を発生させてしまうことがある。 今回の手法は、全システムがモデル化されてい るため(図14)、個々のコンポーネントがトル ク精度に与える影響を特定することが可能だ。 これにより、各動作点上で期待されるトルク変 動を推定できるようになり、必要に応じて対策 を講じることが可能となる。

### まとめ

今後ますます進む電動化パワートレインの 多様化と採用数の増加にともない、電動シ ステムには新たなソリューションが求めら れている。シェフラーは、スケーラブルな プラットフォームを用いて、電動システム の多様性と標準化という相反する要求のバ ランスを取る解を見つけた。

このプラットフォームには、モータとパワー エレクトロニクス、ドライブ制御用のハー ドウェア/ソフトウェアが含まれるが、多 様なアプリケーション(高電圧および低電 圧用のP2ハイブリッドモジュール、P4 電動アクスル)への応用事例から、この手 法を用いることにより広範囲の電動アプリ ケーションに適用できることを確認した。

このプラットフォームで使用される技術により、 システムの効率、出力密度、スケーラビリティに

	E-Axle 2011	E-Axle 2017
Power electronics (traction)	separately	integrated
Peak torque	2,000 Nm (10 s)	4,000 Nm (60 s)
Peak power	60 kW (10 s)	145 kW (60 s)
Overall lenght (flange to flange)	525 mm	515 mm
Weight	90 kg	80 kg

15 Comparison of electric axle drives from 2011 and 2017

要求される多くの項目に高いレベルで対応可 能である。また、モジュール方式で開発され ていることから、他社製のハードウェアやソ フトウェアをシームレスに統合することも可 能だ。

次世代の電動システムでは、電気、電子、機 械の各要素の一体化がいっそう進むと考えら れる。シェフラーのプラットフォームがもた らす利点を最大限に活用すれば、システムレ ベルで多くの点での改善が可能である。例え ば、本稿で述べた現在開発中の電動アクスル では、初期モデルと比べ、全重量が10kg軽 量化されながらも最大トルクは二倍に増加、 かつ最大トルクの持続時間も10秒から60 秒まで伸ばすことができ、また同様に最大出 力も60kWから145kWへと、二倍以上に 増加させることができた(図15)。

## Literature

- Englisch, A.; Pfund, Th.: Schaeffler E-Mobility

   With Creativity and System Competence in the Field of Endless Opportunities. 11.
   Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2018
- [2] Reitz, D.: One Idea, Many Applications Further Development of the Schaeffler Hybrid Module. 10. Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2014


## The Innovative Schaeffler Modular E-Axle

Thorsten Biermann



#### はじめに

2011年、シェフラーは電気自動車の将 来を見据えたパワートレイン「Active eDrive」を搭載したコンセプトカーを発 表した。このコンセプトカーはシュコダ・ オクタヴィア (Škoda Octavia Scout) がベース車両で、電気自動車化に加えて前 後の左右両輪でトルクベクタリングを可能 とする二つの電動アクスルを搭載してい る。この電動アクスルの特長は、トランス ミッションとモータが同軸で配置され、遊 星ギヤ式のディファレンシャルを有してい ることである。当時の永久磁石同期モー タ(以下 PSM)は高回転まで機能させる ことができず、二つの電動アクスルを搭載 しているにもかかわらず、最高速度は約 150km/h に制限されていた。それでも、 トルクベクタリング機能がもたらす電気自 動車のダイナミック性能の可能性を初めて 経験することができた。

以来、電動アクスルの電気および機械部品 の開発が進められ、幅広いカスタマーアプ リケーションやプラットフォームに最適な ソリューションを提供する電動アクスル ファミリーが誕生した。これらの電動アク スルは、電気自動車だけでなく、ハイブリッ ド車での使用にも適しており、ロー/ハイ レシオとニュートラルを備えた 2 速 P4 ソ リューションは、フルハイブリッド車およ びプラグインハイブリッド車に適合でき る。48Vのモータでもローレシオのトラン スミッションと組み合わせることで、比較 的高いドライブシャフト上のトルクを発生 することもできる。つまり電動アクスルは、 CO, 排出量を大幅に削減しようとする場合 に推奨される選択肢であるだけでなく、全 輪駆動を実現し、シビアな運転条件下でも 最適なトラクションを得たい場合にも有効 である。

電気自動車では、1速(固定ギヤレシオ) 電動アクスルと、パワーシフト機能を備え た2速電動アクセルの両方を開発し、必要 な発進性能と最高車速を満足するギヤレシ オとモータの最適化を行い、高い出力密度 を実現している。同軸、平行軸配列に関わ らず、出力密度に対する要求が高いスポー ツカーから、ドライブシャフトの変位に関 する要求が高い SUV まで、幅広いプラッ トフォームに対応可能である。

また、パワートレインや出力に関係なく、 電動アクセルにいくつかの機能モジュール を追加することも可能である。顧客の要求 に適合させるため、変速モジュール、トル クベクタリングモジュールなどのサブシス テムを追加することで、最大限の機能を発 揮することができる。コモナリティーを持 たせた機械的および電気的サブシステムを 複数のパワートレインに利用することで、 開発リソースとコストの両方を低減するこ とができる。

#### 軽量ディファレンシャル

シェフラーの電動アクスルの大きな特徴 は、ベベルギヤ式ディファレンシャルの代 わりに遊星ギヤ式のディファレンシャルを 適用したことである [1]。機能に関しては、 従来のベベルギヤ式ディファレンシャルと の違いはない。従来のディファレンシャル 同様に、コーナリング中の左右輪の差回転 を吸収しながら、トルクを左右輪に均等に 分配することができる。

シェフラーの軽量ディファレンシャルは、 同じトルク容量をもつ従来のディファレン シャルに対して、遊星ギヤを配置する必要 があるため、径方向の必要スペースは仕様 によっては若干増える可能性があるが、軸 方向の必要スペースは大きく削減できる。



 Lightweight differential with planetary design with O-arrangement bearing support for parallel axis drive axles

軸方向のスペース削減は、同軸電動アクス ルにおいて軽量ディファレンシャルを利用 する理由になっている。従来のベベルギヤ 式ディファレンシャルでは不可能な、モー タ用の軸方向のスペースを十分に確保でき るからである。

さらに、軽量ディファレンシャルは、その 名の通り、従来のベベルギヤ式ディファレ ンシャルよりも約30%軽く、高トルクの パワートレイン用では最大3kgの軽量化 を実現できる。この重量削減の利点が、シェ フラーの平行軸電動アクスルでも使用され る主な理由である。

## 同軸トランスミッションの コンセプト

同軸電動アクスル用のトランスミッショ ンは、1 セット以上の游星ギヤユニットが ディファレンシャルに接続される。つまり、 ディファレンシャルにファイナルドライブ はなく、ディファレンシャル自体がハウジ ングを介して直接駆動される。ディファレ ンシャルの出力軸はモータのロータを介し てホイールに接続されているため、ロータ 軸は中空となる。同軸配列をもつ電動アク スルで重要なのは、軸方向のスペースの確 保であり、ドライブシャフトの必要長さを 確保するため、できるだけ全長の短いトラ ンミッションが要求される。ドライブシャ フトが短すぎる場合、変位角がジョイント の許容値を超えるおそれがある。よって、 スペースに関する目標は、トランスミッ ションの軸方向をできる限りコンパクトに することで、モータの必要スペースを確保 し、出力トルクを高めることである。

同軸電動アクスルでも、スパーギヤディ ファレンシャルの幅の狭い設計は、球形の ディファレンシャルケースを備えたベベル ギヤ式ディファレンシャルに比べて大きな 利点をもたらす。また、軽量ディファレン シャルは、遊星ギヤへの接続にも適してい る。さらに、スパーギヤディファレンシャ ルハウジングを遊星ギヤキャリアとして同 時に使用することで、減速比を作ることも 可能である。このように、ディファレンシャ ルのギヤリングは、遊星ギヤユニットとと もにハウジング内に取り付けられる。この 設計のディファレンシャルケースのトルク は、遊星ギヤi。のギヤ比に応じて、(i。-1) 倍大きくなる。ここで、 $i_0 = - Z_{Ringgear}$  / Z<sub>Sun.</sub> であり、「Z」は歯数を表す。よって i。は負の数値となり、トランスミッション 全体の減速比は、正の値になる。



2 Stepped planetary gear set with integral compensation gearing on the differential

ただし、実際のアプリケーションでは、ス パーギヤと2速遊星ギヤユニットを組み合 わせるだけでは、要求を満足しない場合が ある。モータとトランスミッションを組合 せた軸方向の長さが要求スペースを満足し ない場合、段付き遊星ギヤセットを使用す ることで解決できる。 段付き遊星ギヤセットでは、遊星ギヤに段 差が設けられており、二つのギヤ段がある (図 2)。段付き遊星ギヤセットの使用によ り、10を超えるレシオが可能になった。 このようなレシオを実現できるのは、ほか には遊星ギヤユニットを二つにつなげる手 法のみであるが、もう少し見てみると、段 付きでない遊星ギヤセットでは実現できな いさらなる利点が見えてくる。

従来の遊星ギヤユニットでは、ディファレ ンシャルのギヤは遊星ギヤ段にアキシャル 方向に配置されるが、段付き遊星ギヤセッ トを使用することにより、ディファレン シャル上のスパーギヤを遊星ギヤセットの 空いた空間に移動でき、その結果、非常に 短いトランスミッションコンセプトが生み 出された(図3)。

段付き遊星ギヤには、標準的な遊星ギヤ セットにはない特徴があるため、ディファ レンシャルを統合することが可能である。



#### Technical data

Weight transmission in kg	16
Power in kW max./continuous	190/100
Output torque in Nm max./continuous	3,960/2,250
Input speed in rpm	18,200
Dimensions transmission in mm	Ø 300 x 150
Ratio	9

#### Customer benefits

1-speed system

- Compact axial space due to combination of stepped planetary gearset with spur gear differential
- Different optional ratios
  Low weight
- Series development

3 Transmission with highly integrated stepped planetary gear set

例えば、サンギヤは遊星ギヤセットのスペースにごくわずかしかはみ出さず、大きな遊星ギヤのみと噛合う。ディファレンシャルハウジングと遊星キャリアは一つの部品に組み込まれているため、ディファレンシャルのサンギヤを小さな遊星ギヤ内にラジアル方向に配置できる。さらに、ディファレンシャルギヤは、段付き遊星ギヤの間に埋め込ま起 ギャレットの小さな遊星ギヤの間に埋め込まれているため、ギヤに接触せず、段付き遊星ギャムの小さな遊星ギャムである。 マットの小さな遊星ギャムの間に埋め込ましているため、ギャに接触せず、段付き遊星 レンシャルギャは、日本の間に埋め込ました。 ジャルの小さな近星、ディファレンシャルに重ねることが可能である。 ジーンシャルのギャンシャルのギャは、互いに入れ子になる。

実際のアプリケーションでは、軸方向の 長さが150mm以下で、許容トルクが約 4,000Nmのディファレンシャルケースを 備えたトランスミッションを設計すること ができた。このようなコンパクトな設計に より、車両の設置スペースの要求を満足し ながら、より強力なモータを電動アクスル に一体化することも可能になった。

現 在、最 大出 力 190kW で 最 大 ト ル ク 440Nm の永久磁石同期モータ (PSM) を 開発中で、定格出力 100kW で定格トルク は 250Nm である。このモータは、非常に コンパクトなトランスミッションと組み合 わされた強力な電動アクスルとしてまもな く供給される。また、このモータは高い効 率を実現している (図 4)。

このモータは高効率であり、約30 km /h ~ 90 km /h の車速に相当する、2,500 rpm ~ 7,500 rpm の WLTC (World wideharmonized Light vehicles Test Cycle)の動作範囲で95%を超える効率を 実現する。効率が95%未満になるのは、ト ルクや車速が高い場合だけである。PSM は最大18,000 rpmまで回すことができ、 200 km /hを超える車速で走行させることが 可能である。



4 Efficiency of the drive axle with 440 Nm PSM and power electronics

同軸電動アクスルの概要を図5に示す。こ こに示されているのは、遊星ギヤセットの 片側断面図のみで、遊星キャリアに接続 されているディファレンシャルは省略さ れている。段付きギヤセットは、先に説 明した最大出力が190kW、最大トルクが 440NmのPSMのような強力な駆動モー タとともに、左端に示されている。

現在開発中の段付きギヤセットは最小12の 減速比を実現できるように設計されている。

多くの地域で最高速度が200km/h以下 に制限されているため、電気駆動システム の市場について言えば、それ以上の高車速 は必要ない。

自動車の駆動系としての要求性能の一つと して、低中車速でのダイナミック性能が挙 げられる。この場合、最高車速が比較的低 い場合は、減速比をさらに下げることは理 にかなっている。これは追加の遊星ギヤ セットを連結することにより実現できる。 このように減速比は、モータの許容回転数 の範囲内で、下げることができる。これら の対策により、モータの重量およびサイズ が低減され、コスト削減にもつながる。 必要な、連続出力、 最高車速、低車速域 での加速、および電 圧レベルのトレード オフでは、このよう に減速比を調整する ことで、全体的に優 れたコスト効率をも つシステムが設計で できるようになる。 減速比とモータのサ イズの関係を簡略図 で図5に示す。実 際には、システム全 体のNVH、冷却、 効率を考慮に入れる 必要がある。



モータの連続出力が80kW、最大トルクが 250Nmのモータをさまざまなギヤセットと 組み合わせたコンセプトを図6に示す。ギヤ 段のユニットを変えることにより、電動アク スルをさまざまな最高車速、駆動トルク、タ イヤ径、車重に適合させることが可能である。

上記のソリューションは、最高車速が高く、 駆動トルクが高い車両にも適している。図に 示されている電動アクスルでは、モータとト ランスミッション、第1遊星ギヤセットのイ ンターフェースは同じである。さらに、すべ てのギヤセットに同じディファレンシャルギ ヤが使用されている。唯一の違いは第2の遊 星ギヤ段である。それによって減速比が15 と19という違いはあるが、リングギヤと ディファレンシャルハウジングの設計は同じ であり、どちらも軽量ディファレンシャルと 段付き遊星ギヤセットが使用されている。

減速比が11の電動アクスルには段付き遊星 ギヤセットは使用されていない。その代りに ほかの二つのタイプで使用されている小さい 遊星ギヤとリングギヤが使用されている。減 速比が高いタイプのトランスミッションの レイアウトは、図5の中央の図と同じである。 減速比が19と低い1速の場合は、最高車速 の低さから市街地交通のみに適したシステム となるが、後述の最高車速を上げる多段変速 機構の議論へとつながっていく。

減速比が 15 の電動アクスルのテクニカル データを図 7 に示す。電動アクスルには、 最大トルク 250Nm、連続出力約 80kWの PSM が使用されている。減速比が 15 のと きの最高車速は約 150km/h、ドライブシャ フト上の最大トルクは 3,750Nm、連続トル クは 2,250Nm となる。この電動アクスル は、市街地内外で C セグメントの車両の良好 なダイナミック性能を実現する。このように 優れた性能を有しながら、一体型パワーエレ クトロニクスを含む電動アクスルのシステム 重量は 75kg である。

SUV タイプの電気自動車などの車重の重い 大型車のプラットフォームに対応する場合、 発進性能と最高車速を満足させるため、二 つの電動アクスルを取り付けることが必要 な場合がある。これらの要求を満足させる ためには、11 など減速比を上げた電動アク スルを前後輪に使用するのが合理的である。



6 Schematic representation of the coaxial drive concept

連続出力を160kWに上げることにより、 200km/hの最高車速を容易に達成できる。 比較的低い2,750Nmの出力トルクでも、 前後二つの電動アクスルが同時に駆動力を供 給することで必要駆動力を発生させることが 可能である。

## 同軸トランスミッションの 変速システム

1 速(固定ギヤレシオ)電動アクスルは 常に、発進および低車速時の加速性能と最 高車速の両方が固定ギヤレシオ内で成立 するように設計される。減速比が19の1 速(固定ギヤレシオ)電動アクスルには、 PSMの回転数の制限(約18,200rpm) により、最高車速が約120km/hに制限 される欠点がある。ただし、変速システム を持てば、電動アクスルは、よりパワフル なプラグインハイブリッド車の興味深いソ リューションになり得る。

変速システムは、ニュートラルギヤと6.4 のレシオをもつ2速ギヤを電動アクスル に統合することができる。2速ギヤにより 120km/h以上の車速で駆動することがで きるが、ニュートラルギヤポジションによ り、必要に応じて駆動力を切断することも できる。2速ギヤでは、第1遊星ギヤ段を バイパスし、段付きギヤセットのみを使用 して6.4のレシオを実現する。このシステ ムを電気自動車で使用する際の課題は、変 速中のトルク瞬断である。

#### Technical data

System weight in kg	75	
Power in kW max./continuous	150/80	
Output torque in Nm max./continuous	3,750/2,250	
Input speed in rpm	18,200	
Dimensions in mm	Ø 285 x 425	
Ratio	15	

#### Customer benefits

- Modular system
- Compact design with high power density
- Different optional ratios
- Customer acquisition

7 Electric axle drive for C segment with reduced maximum speed



8 Two-speed electric axle drive for powerful PHEVs

ハイブリッド車では、トルクの瞬断はメイ ン駆動源のパワートレインによるトルク補 完制御で補うことができる。これにより電 動アクチュエータで既存のドグシンクロ式 のシフト機構を変速システムに使用するこ とが可能である。その結果最大トルクが 150Nmのモータで、1速ギヤを介して最 大 2.850Nm のドライブシャフト上のト ルクを追加することができる。このサブ駆 動源である電動アクスルで追加された駆動 力で、発進性能と加速性能を最適化するこ とができる。市街地交通では、エンジンを 使用した走行が法律で認められていない場 合などに、電動アクスルを単体の電気駆動 装置として使用して、120km/hの最高車 速を実現できる。

車両のモータ走行レンジは、バッテリーの 容量に依存する。また電気による全輪駆動 をさまざまな走行条件に利用できる。ただ し、電動アクスルを適用する主な目的は、

#### Technical data

System weight in kg	69
Power in kW max./continuous	75/45
Output torque in Nm max./continuous	2,850/1,615
Input speed in rpm	18,200
Dimensions in mm	Ø 285 x 450
Ratio	19/6.4

#### Customer benefits

- P4 with full e-drive option for midsized SUVWLTC driving cycle without combustion engine
- possible
- Electric AWD option w/o mechanical cardan shaft, less mech. losses
- $\bullet \ 1^{\, st}$  gear for high output torque and acceleration
- Boost and recuperation at high speed due to 2<sup>nd</sup> gear
- Optional with 48 V technology

従来のパワートレインに比べて CO<sub>2</sub> 排出 量を減らすことである。この目的では、上 記の高電圧電動アクスルに加えて、低出力 の 48V 電動アクスルも利用可能である。 48V 電動アクスルを使用した CO<sub>2</sub> 削減の 詳細は、48V システムの項目を参照 [2]。

## 平行軸トランスミッションの コンセプト

シェフラーのトランスミッションコンセプ トは、同軸トランスミッションのみではな い。遊星設計の基本コンセプトは平行軸ト ランスミッションにも応用でき[3]、ディ ファレンシャルをロータ軸に平行に配置す る(図9)。

平行軸コンセプトの設計で特に注意した のは、同軸コンセプトのギヤセットやサ ブシステムの共用化である。同軸コンセ プト向けに開発された部品のいくつかは、 設計を若干変更するだけで、平行軸コンセ プトにも使用できる。共用化の利点は、検 証済みの実績を使用できることであり、量 産実績をもつ遊星ギヤセットを使用するこ とで、新しいトランスミッションの開発コ ストを大幅に削減できる。この手法で、開 発に掛かる時間とコストを削減しながら、 同時に製品のロバスト性と品質を高められ る。

#### 瞬断について、メイン駆動源のパワートレ インによるトルク補完制御で補う方法があ るが、もう一つの方法は、変速時のトルク 瞬断による車両への影響を低減することで ある。

これは、電動アクスルの出力が低くなって いる高車速側にギヤシフトのタイミングを 変更することによって実現できる。

## 平行軸トランスミッションの 変速システム

「同軸トランスミッションの変速システム」 の項で説明したように、2速ギヤの使用は ハイブリッド車にとってさまざまな利点が ある。つまり、高いトルクを比較的低い電 力で達成できるようにハイブリッド車用パ ワートレインを設計できる。変速時のトルク 平行軸トランスミッションの2速ソリューションを図10に示す。遊星ギヤとスパー ギヤを組み合わせることで、非常にコンパ クトな設計となり、ロータ軸とディファ レンシャルの出力軸の軸間距離はわずか 127.5mmである。トランスミッションの レシオは、1速で15、2速で5となる。

アクチュエータを含む変速モジュールの設 計は、上述の同軸トランスミッションの



9 Schematic representation of the parallel axis drive concept

ソリューションと同じである。現在開発段 階にある上記のシステムを PSM と一緒に 取り付けることで、100kW の最大出力お よび約 60kW の連続出力を実現する。

1 速ギヤは120km/hまでの速度範囲を カバーし、2 速ギヤは高車速でのクルージ ング用として、主に減速中のエネルギー回 生、およびアクティブセーリング機能に適 している。このシステムではニュートラル ポジションで機械的に駆動力が切断され、 高車速でのクルージング中のセーリングお よびエンジンのみでの走行の車両効率を高 める。

1 速ギヤレシオが低いことから、低車速時 の最大トルクは約3,000Nmになる。そ のため、このユニットを搭載した車両は、 市街地でのモータ走行時に、優れたダイナ ミクス性能を発生できる。またモータは2 速同軸タイプの電動アクスルにも使用でき る。また同軸電動アクスルで使用した比較 的低出力のモータを並行軸電動アクスルに も使用することも可能である(図8)。

## トルクベクタリング

トルクベクタリングは、駆動装置によっ て発生されるトルクを自動車の左右輪に 分配する機構である。トルクベクタリン グの仕組みを理解するには、最初に機械式 ディファレンシャルの機能を知る必要があ る。ロック率や内部摩擦はさておき、ディ ファレンシャルは入力トルクをアクスルの 両輪に均等に分散する。左右輪の回転数の に均等に分散する。た右輪の回転数しい 距離をカバーしなければならない外側の 車輪よりも、コーナー内側の車輪が とのを考慮した場合、その値が大想 定される。これは、コーナー外側の車輪が ディファレンシャル内部の摩擦によって ディファレンシャルハウジングに対して減 速され、コーナー内側の車輪とのトルク差 が大きくなる。

この効果は、二つの車輪のうち一つを加速 または制動するトルクベクタリングシステ ムでも利用される。これを実現するために シェフラーの電動アクスルでは、電気機械 的に駆動される3列遊星ギヤを使用する。 このトランスミッションと追加の電動デバ イスを使用することにより、出力軸間で「動 的な制動モーメント」が発生される。車輪 は、通常の機械式ディファレンシャルの作 動範囲で加速され、より大きなトルクを伝 達し、より大きな駆動力を生み出す。こ の駆動力により、車両のヨーモーメントが 発生される。シェフラーのトルクベクタリ ングモジュールは、すべてのトランスミッ ションと組み合わせることができる。同軸 コンセプトとの組み合わせを図11に示す。

トルクベクタリングモジュールは、基本的 には二つの同一の遊星ギヤユニットで構成 される。これら二つの同一の遊星ギヤは一 つのセクターハブを共有する。出力はさら に別の遊星ギヤを介して出力軸およびディ ファレンシャルハウジングに連結された二 つの同一のリングギヤを介して行われ、い ずれかの遊星ギヤユニットのサンギヤはハ ウジングに、もう一方はスパーギヤを介し て、平行に配置されたモータに連結される。

車両の直線走行中は、ディファレンシャル も、トランスミッションも、モータのロー タも回転せず、損失が最小限に抑えられ る。モータが作動しない限り、差動トルク は発生されない。ホイールトルクも同じで、 モータはモーメントの影響を受けない。ト ランスミッションおよびモータの慣性によ り、能動的に制御可能なディファレンシャ ルは、停止時には、ロック率の高い従来の ディファレンシャルのような挙動を示す。



10 Two-speed electric axle drive in parallel axis arrangement

モータにより、トランスミッションのサン ギヤが接続方向に回転すると、リングギヤ とディファレンシャル出力軸の間で回転 が生じ、さらに左右輪の回転に差が生じ る。トランスミッションにより、モータの ホイールに対する比率は約40になる。こ のギヤ比により約 30Nm のトルクがモー タで発生され、左右輪間で1.200Nmの ディファレンシャルモーメントが発生され る。この大きさは、ほぼすべての速度範囲 でベクタリング機能を確保するのに十分で ある。このタイプのシステムでは、トルク 分配に必要な電力は、電気駆動装置を左右 両輪に搭載したコンセプトよりもずっと少 なくなり、6~7kWの最大出力があれば 十分である。

さらに、電動アクスルと追加のトルクベ クタリングモジュールを組み合わせた

#### Technical data

System weight in kg	74
Power in kW max./continuous	100/60
Output torque in Nm max./continuous	3,000/1,650
Input speed in rpm	18,200
Offset/System length in mm	Ø 127.5 x 485
Ratio	15/5

#### Customer benefits

- P4 with full e-drive option
- WLTC driving cycle without combustion engine possible
- Electric AWD option w/o mechanical cardan shaft, less mech. losses
- 1<sup>st</sup> gear for high torque and max. acceleration
- Boost and recuperation at high speed due to 2<sup>nd</sup> gear
  Optional with 48 V technology

システム構成では、二つのメイン駆動モー タとギヤ段をもつシステムよりもノイズ特 性が大幅に向上する。この理由の一つは、 二つのシステムの同一周波数のノイズが車 両構造体のある1点で重なるためで、これ を車両側で低減するには、費用のかかる対 策が必要となる。

電気機械式のトルクベクタリングシステム は、上記の同軸電動アクスルと平行軸電動 アクスル両方のコンセプトと組み合わせ ることができる。このように、「Active eDrive」は電動アクスルから生まれた。 車両テストや検証結果から、「Active eDrive」は機能やダイナミクス性能の観 点で画期的であった。このシステムは、電 動アクスルとトルクベクタリングを組み合 わせて、ステアリングのアシスト、限界時 の車両挙動の安定化に寄与する。



11 Coaxial drive concept with additional torque module

#### まとめ

車両の駆動技術は現在、飛躍的に進歩して いる。また従来のパワートレインから電動 パワートレインへの移行は、自動車業界に とって大きな課題であり、サプライヤー とOEMの双方が、個々のプラットフォー ムの相乗効果につながる包括的な規格やソ リューションに強い関心をもっている。

したがってシェフラーは、ハイブリッド車 と電気自動車の両方の駆動ユニットの需要 を考慮した電動アクスルのコンセプトを提 案している。またモジューラーアプローチ により、コスト削減が実現され、管理しや すさだけでなく、開発にかかる時間とコス トの削減にもつながっている。今後、現状 の技術を反映しただけのソリューションで は不十分であり、より高い出力密度と機能 を提供する必要がある。 そのためシェフラーは、電動アクスルコン セプトから一歩踏み出して、さまざまな機 能、最高車速、ダイナミクス性能の要求を 満たす適応性の高いシステムを考案し、コ スト、重量、スペースに関して最適解をも たらす電動アクスルを開発している。モ ジューラーアプローチにより、電動アクス ルの搭載位置や機能に関係なく、個々の部 品とモジュールを共有化していく。将和し には、電動アクスルのモジュールを利用し て、高出力密度、高性能でありながらきわ めてコンパクトな高集積なシステムを、短 い開発サイクルで顧客の要求仕様に応じて 提供することが可能になる。

#### Literature

- Biermann, Th.: Light, compact and efficient: Schaeffler Differential systems set the pace.
   Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden,
   2014
- [2] Pfund, Thomas: The Schaeffler eDrive Plattform – Modular and Highly Integrated. 11.
   Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2018
- [3] Daniel,; Biermann, T. B.: eAxle Family in Coaxial and Offset Arrangements. 16<sup>th</sup> International CTI Symposium Automotive Transmissions, HEV and EV Drives, Berlin, 2017
- [4] Eckenfels, Th.; Kolb, F.: 48 V Hybridization –
   A Smart Upgrade for the Powertrain. 11.
   Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2018



# Intelligent Thermal Management for Hybrid Powertrains



thermal management module

#### はじめに

未来のパワートレインが効率を最大化するに は、熱力学的、機械的、電気的なエネルギー 経路の最適化のほかにも、ドライブシステム や個々のコンポーネントの熱収支の最適化は もはや必須事項であり、熱の流れを確実にコ ントロールすることが重要である。シェフ ラーはガソリンエンジン用パワートレイン向 けサーマルマネジメントモジュールを2011 年に初めて発表して以来、その量産に携わっ てきた[1]。以来、モジュールとそのコンポー ネントはともに進化を重ね、システムの開発 や検証に関する専門知識もこれにあわせて飛 躍的な向上を遂げている。

## アクティブサーマル マネジメント用コンポーネント

#### 新たな課題

サーマルマネジメントに関する要求レベルは 今後もいっそう高度化していくことが予測さ れ、内燃機関の高効率化に向けた開発のトレ ンドが、それを後押ししている。高出力ダウ ンサイジングエンジンの冷却回路は、ベー スエンジンの熱容量が小さいこと、ターボ チャージャーが一体化されていることから高 い熱流入量が特徴である。また、スタートス トップシステムの幅広い普及とハイブリッド 化が進んだことによってコールドスタート後 の熱入力が不連続な形で行われるようになっ た。

このような状況に対応するため、冷却システ ムの運転モードは「1秒以内に冷却動作開始」 という迅速さで対応する必要があるが、従来 型のサーモスタットではこの要件を満足する 動作スピードを有していない。またエンジン や車両の運転状況に応じてあらかじめ算出さ れたエネルギー量を用いて積極的に温度制御 を行うことが理想的であるが、シェフラー 第一世代のサーマルマネジメントモジュー ルではすでにこの制御方式を実現しており、 NEDC (New European Driving Cycle) に おいて約 3.5% の  $CO_2$  削減を達成している。 この直接的な  $CO_2$  排出量の削減に加えて本モ ジュールは "Active engine heating" や "Active transmission heating" を実現す る機能を備えているため、US CAFÉ 基準に したがって認定された乗用車に対する追加ク レジットを得ることが可能である。またこれ らいずれかの機能を備えた乗用車では、1.5g  $CO_2/m$ のクレジット優遇措置が得られる。

サーマルマネジメントモジュール 第二世代

シェフラーの第二世代サーマルマネジメント モジュールは第一世代同様、運転状況に応じ た冷却水流量を制御するロータリーバルブを ベースに新たなアクチュエータコンセプトを 採用し、第一世代に対して、機能、設置スペー スの要件において大幅に改善が図られている (図 2)。

この第二世代のモジュールには二つの独立し たロータリーバルブとアクチュエータが搭載 されており、一方はエンジン冷却回路の流 量制御を、もう一方はシリンダーヘッドと



1 High heat inputs and low heat capacity will characterize the engine cooling circuit of the future.



ブロック内のサブ回路制御に適用される2系

統冷却の実装を可能としている。これにより、

コールドスタート時には可能な限りの熱をシ

リンダーブロックに貯蔵しフリクションを低

減させ、一方シリンダーヘッドでは燃焼室周

りの温度を適切に保つことが可能となる。ま

た二つのアクチュエータを搭載するもう一方

の利点は、エンジン周辺機器の配置に関して

2系統冷却用のアクチュエータはスマートバ

ルブとして設計されており、ECUからロー

タリーバルブの目標角度を設定するのみで動

作し、統合制御システムは発生する熱や追加

情報に基づいて正しいバルブ角度を算出する

よう絶えず調整し続けている。このアクチュ

エータシステムはオンボード診断機能を備え

た Smart Single Valve (以下 SSV) である

が、それらについてはのちのセクションでよ

第二世代のコンセプトはロータリーバルブの

軸受構造にも新たな設計を採用し、ロータ

リーバルブの設計自由度を格段に向上した。

より柔軟性が向上する点である。

り詳細を説明する。

第一世代ではロータリーバルブを貫通した シャフトに軸受を設けており、その結果高 い通水抵抗が発生していたが、軸受の一方 をロータリーバルブの外周そのものへと置 き換え(図3、図4)、直接軸受としてスラ イドさせる構造とした。つまり軸受は冷却 水流路の外へレイアウトし通水抵抗を低減 させた。



3 Main valve



4 Auxiliary valve

電動化パワートレインにおける 分散型サーマルマネジメント

一般的な冷却システムの概略図を図5 に示 す。電動化は追加されるコンポーネントと冷 却回路を統合する必要があるため、サーマル マネジメントはかなり複雑になる。例えば市 場には、内燃機関、電動駆動装置およびバッ テリーなど、動作温度の異なる冷却回路を 三つ以上有するハイブリッド車両がすでに 存在する。それにもかかわらずこれらの回 路は熱交換器を介して互いに接続されてお り、個々のコンポーネントは従来のように放 熱部、発熱部として一方的な役割を担うので はなく、時として役割が入れ替っている。こ のようにハイブリッドパワートレインに適 用されている多数のバルブや冷却回路のス イッチングオプションを考慮すると、単一の モジュールにすべてのバルブを一体化する ことは不可能であると考えられる。配管やモ ジュールの設置スペース、および冷却回路ご とに異なっている冷却水温も一体化を妨げ る要因である。集中制御システムを介して



6 Smart single valve in near-production design



5 Complexity of the different drive cooling systems

配置される SSV は分散型サーマルマネジメ ントを構築する際の一つの解決手段である。 さらに SSV は自動車メーカーが仕向地別に 異なる法的要件に対処するために揃えてい るさまざまなエンジンバリエーションに対 応することができる。第一世代の SSV は 2017 年以来、BMW 社の新世代 3 気筒およ び 4 気筒ガソリンエンジンに採用されてい る。

SSV は非常にコンパクトな設計が特徴であ り(図6)12V で駆動し、140℃までの広 い温度範囲で動作する DC モータが、ウォー ムギヤやスパーギヤを介してロータリー バルブを駆動し、ECU から Lin (Local Interconnect Network)通信を介して制 御される。バルブの回転角度位置検出には 電磁誘導式角度センサーを採用しており、 ホールセンサーとは異なり非常に高い耐電 磁波性を有している。電動化にともない電流 およびケーブル類は増加するが、ホールセン サーではケーブル類より不連続に放出され る電磁波など、外部からの影響を排除できな い。今後、自動車部品へのEMC要求が引き 続き増加することは明らかである。

SSV はモジュール構造を採用した。ギヤボッ クス内の電気系統部品やギヤは使用用途に 関わらず共通化しているが、特に冷却水の流 量制御に関与する部位に関しては、個々の用 途に応じて要求される冷却水流量に適合し た設計が可能である(図7)。

SSV において内部リークの防止は流量制御 デバイスとして重要な要件であり、冷却水 を流したくない局面では確実に内部リーク を防止しなければならない。そのためシェ フラーでは、サプライヤーと協力し0.5bar から3 barの差圧環境下で20 ml/min以 下の漏水量に適合するシーリングコンセプ トを開発した。 ロータリーバルブを駆動するためのシャフ トもまたロバスト性の高い設計がされてお り、高剛性の1ピースのシャフトがアク チュエータに接続されている。ロータリー バルブはシャフトと一体成型され外周部の 軸受に相当する部位は適切な嵌め合いを確 保することで制御精度を確保している。

#### システムの開発、検証

パワートレインおよび車両のアクティブな サーマルマネジメントとその作動条件の間 には密接な相互作用があるため、シェフ ラーでは過去10年間、デモカーを使用し システムの専門知識を蓄積してきた。膨大 な計測データをもとに車両用のサーマルマ ネジメントモデルの開発、検証が進められ ている(図8)。

シミュレーションモデルの個々のブロック は、さらに個々のコンポーネントのより詳 細なモデルへ落とし込まれ、これらはパワー トレインのコンポーネントより要求される



7 Modular design in intelligent valves for coolant control



8 Simulation model for a plug-in hybrid vehicle

冷却能力または熱出力から発生する任意に 定義可能な熱流を介して互いにリンクして いる。熱出力においては車室内だけでな く、個々のパワートレインコンポーネント の目標とする最低動作温度も参照している。

特にハイブリッド車両では、内燃機関の熱 入力は、電気による駆動によって減少し、 他方ではバッテリーに蓄積されている電気 エネルギーは可能な限り駆動に使用され、 暖房そのほかの加熱要素には用いられない。

0.7

0.6 ≥

0.5 🙍

0.4

0.3



Velocity Temperature E-motor Heat flow E-motor

9 Model calculations for the heat entry through the electric motor in the NEDC (left) and during full-load acceleration

その結果として、サーマルマネジメントシ ステムの実際の設計では、多くのパワート レインコンポーネントを熱源としても、あ るいはヒートシンクとしても使用される。

電動走行時の電気デバイスの冷却能力がパ フォーマンスに決定的な影響を与える要素 となるため、サーマルマネジメントシステ ム制御を走行条件やハイブリッド制御と関 連させることも不可欠である。例えばモー タの一時的なピーク性能は通常、許容熱負 荷を念頭に置いて設計されている。そのた めには、一般の運転サイクルや特定の走 行条件の中で発生しうる熱入力や、可能な 限り正確な放熱性能を開発の早い段階で シミュレートすることが必要である。図 9は NEDC および全負荷加速時における モータの熱入力の例を示している。一回の 全負荷加速での平均熱入力は 500W であ り、NEDCにおける緩加速を含む平均熱入 力 600W より小さくなる。これは、全負荷 後にモータ出力が速やかに下げられたこと、 また、熱容量が比較的大きいことが挙げら れる。



シミュレーションモデルを検証するため、 標準的なプラグインハイブリッド車で測定 を実施し、シミュレーション結果と比較し ている。以下は測定を実施したパラメータ である。

#### 冷却回路全体の流量

- 冷却水温度
- エンジンおよびトランスミッションオイ ルの温度
- モータおよびバッテリーコンポーネント の温度
- バッテリーの充電状態、電圧、電流
- 関連コンポーネントの熱入力
- 熱交換器の放熱量

図10は低温冷却回路(バッテリー冷却) の測定結果とシミュレーション結果を比較 したものであるが、現状の開発モデルがす でに良好な品質に達していることを示して いる。

このシステム評価はシステム全体の効率を 最適化するために、どの場面で制御可能な アクチュエータを使用することが効果的で あるかを明確にすることが可能である。こ の効率向上はシェフラーによって改良され たプラグインハイブリッド車両において、 まもなく実証、定量化される。

#### 冷却回路およびサーマル マネジメントモジュールのモデル

アクティブに切り替え可能でかつ動的に制 御可能な冷却回路を設計するにあたって は、システム全体より下層のレベルで、材 料および熱や電気信号の流れに関する詳細 なシミュレーションが必要である。 これを実現するために、最初の試作品を製 作する前であっても流量制御モード、電気 的負荷、機械的パラメータはデジタルツイ ンのように仮想テストが可能な物理モデル へ反映される(図11)。

物理モデルのベース は、ギヤボックスと トルクと電気的負荷 を発生するモータか らなるメカトロニッ クモデルであり、熱 流は個々のロータ リーバルブポジショ ンのレベルまで考慮 されている。これは サーマルマネジメン トモジュールの流体 力学的なモデルまた は個々のアクチュ エータのバルブの動 きによって生じるフ リクションと相関関 係にあることを意味 している。このサブ モデルは冷却回路 全体の熱流体モデ ルヘフィードバック される。



サーマルマネジメントシステムに用いるコ ンポーネントにこの種のデジタルツインを 適用する恩恵はコンセプト段階で高い精度 を達成するだけでなく、特に複数のシステ ムバリエーションを検討する際にも、冷却 システムの個々のさまざまなパラメータの 影響を非常に迅速に算出できるため、開発 期間を大幅に短縮できる点である。

#### 試験設備

シェフラーでは開発段階において、上記で 述べたシミュレーションモデルやテストモ ジュール、サーマルマネジメントを行うコ ンポーネントを評価するために、ここ数年 間でドイツ、中国、北米に自社のテストセン ターを設立してきた。そのほか、試験設備 に関しては韓国、日本にも設置されており、 現在でも、社内の生産技術部門と協力して さまざまなテストスタンドが各地で整備さ れている。そのなかでも重要な試験設備を 以下に列挙する。

- Typhoonと呼ばれるテストベンチは -40から125℃の間で大きく変動する冷却水温度条件を与えることができ、極限 条件下で完全なモジュールの試験を実施 することが可能である。このテストベン チにはバルブの動作、温度勾配、ポンプ の流量などが試験を通して記録され、約 6,000,000回のバルブ動作や1,200時 間を越える耐久試験に適している。
- 電気的機能試験に用いる試験装置は動的 作動条件下におけるアクチュエータの検 証が可能である。加えてモータ機能やポ ジションセンサーの信号品質なども確認 可能である。

 センサー単体を評価する特殊な試験装置 では、センサー精度、温度特性、ヒステ リシスなどが確認可能である。

耐久性やロバストな温度挙動とあわせて、 特にプラスチック部品や耐電磁波性も重要 な検証の対象である。シェフラーは EMC class5 に適合する次世代製品を開発する べく尽力している。

#### まとめ

シェフラーは、2011年に初代のサーマル マネジメントモジュールを世界に先がけて 世に送り出し、第二世代のサーマルマネジ メントモジュールはスマートアクチュエー タに制御システムを統合させることでメカ トロニクスモジュールへと進化を遂げてい る。

シェフラーの見解では今後、電動化車両の パワートレインは単ーユニットに集結され た集中制御のサーマルマネジメントから 徐々に分散型アクチュエータへ移行してい くと考えている。スマートシングルバルブ (SSV) はすでにこの目的に適した技術を 有している。

今後のサーマルマネジメント開発は車両全 体の熱収支と密接に結びついている。例え ばハイブリッド車両における熱の入力およ び流れに関する的確な知識は、車内や排ガ スの浄化システムが冷やされることを防止 する予測制御へ適用可能である。シェフ ラーは現在、複雑なシステム設計のための 開発ツールの構築に取り組んでおり、コン ポーネントレベルではすでに、成熟度が高 く最大効率のための熱収支設計を行うこと が可能である。

#### Literature

 Weiss, M.: Hot & Cold – Schaeffler's Thermal Management for a CO<sub>2</sub> Reduction of up to 4 %.
 Schaeffler Kolloquium, Baden-Baden, 2014
 Weiss, M. et al.: Umfassende Simulation und vernetzte Intelligenz im Thermomanagement. In: MTZ 78 (2017), no. 9, pp. 42ff.





# Mobile in the City of Tomorrow

The Fusion of Drive and Chassis

Dr. Christian Harkort Dr. Dirk Kesselgruber Dr. Manfred Kraus Dr. Jan Moseberg Benjamin Wuebbolt-Gorbatenko

これによって生ま

#### はじめに

現在、世界中の人口の半数近くが都市に暮ら しているが、人口の集中は今後もさらに進む と考えられる。例えば国連では、2050年ま でに全人口の3分の2が都市に居住してい ると予測している [1]。特にアジアではここ 数年で、人口一千万を超える大都市の数が増 加している。こうした状況によって、モビリ ティに対して特殊な需要が生じ、相応の車両 コンセプトが求められるようになってきた。 一つの解決策としては、高度に自動化された 無人運転による旅客輸送車両が挙げられる が、シェフラーでは目下そのフィジビリティ スタディを進めている。ネットワーク化され たモビリティコンセプトの一部として、電 動の Schaeffler Mover (シェフラームー バー)はやがて4人の乗客を快適に、静かに、 安全に、ゼロエミッションで目的地へと送り 届けることになるだろう。周囲との広範囲に わたるデータ接続によって、乗客はスマート フォンアプリを介して簡単な操作で車両に リクエストを送り、目的地を指定することが できるようになる。

無人輸送システム導入にあたって最も重要 な前提条件の一つとなるのが、自動運転への 道筋をつけるドライバーアシスト技術の開 発である。この技術による自動運転レベルは 通常、レベル0(アシストなしでドライバー が直接運転)からレベル5(ドライバー介入 不要の完全自動運転)までの6段階にわけ られる[2]。シェフラーが行っている研究は、 このうちレベル5に該当する。こうしたシ ステムは、今後二十年以内に広く普及すると もいわれている[3]。図1で示すように、ベー スシナリオにもよるが、2035年にはすで に、製造される自動車の3%~15%が高度 に自動化された走行機能を備えるようにな るだろう。数が増えるがゆえ今後は開発・シ ステムのコスト低下が期待でき、無人輸送ソ リューションの市場への普及がさらに進む ことが期待される。

#### 車両コンセプト

自動輸送車両を技術的に実現するためには、 高度に自動化された走行の要件に適合し、

Accelerated scenario





1 Market scenarios for the introduction of automated driving

れる技術的自由度 がもたらすメリット を十二分に活かせる ような、新たな開発 が必要になる。例え ば乗車スペースを広 げるため、ハンドル やコクピットなどの 運転要素をなくすと いう考え方もあるだ ろう。特に、取り回 し性、安全性、走行 安定性といった要素 は、都市部での使用 を想定した車両に とって、重要な開発 パラメータとなる。 これら要件をベース にしながら、四つの ホイールすべてが互 いに独立した形で駆 動・転舵できるよう



2 The wheel module from Schaeffler

な車両コンセプトが、フィジビリティスタ ディの段階において形となっている。このシ ステムは、高度な快適性と機敏な運動性を兼 ね備えており、乗っている人に横力を意識さ せないコーナリングを可能にする。

シェフラーはこの課題を解決するため、ホ イールハブモータ、サスペンション、エレク トロメカニカルステアリングをコンパクト なユニットに凝縮した、画期的なホイールモ ジュール「シェフラー・インテリジェント・ コーナーモジュール」を開発した(図2)。 コストを抑えるため、モジュール方式をベー スにして、フロントとリアの両方に同じユ ニットを配置した。制御については、ESP、 駆動力配分(トルクベクタリング)、全輪ス テアリングといった機能を組み合わせるこ とによって高度な安全性を提供する、統合型 走行性能アプローチという選択肢が新たに 登場した。各輪それぞれが走行機能とステア リング機能を持つことにより優れた冗長性 を発揮するため、技術的不具合が発生した場 合でも、ホイールモジュールのうち一つか二 つの不具合であれば、ステアリングやトラク ション機能を維持することができる。

#### 車両全体像

車両全体のコンセプトは、ホイールモジュー ルを保持する、安定性と軽量性に優れたアル ミ製フレーム構造をベースにしている。トラ クションバッテリーは車両下部に収容され る。このため、衝突安全性に優れることに加 え、スペースを有効活用できるというメリッ トがあり、また車両重心も低くなる。プラッ トフォームコンセプトは、車両構成におけ る自由度を最大限に高めるものとなってい る(図3)。最もシンプルな構成においてシ ステムの範囲に含まれるのは、シャシー要素



3 Platform concept of the Schaeffler Mover

(フレーム、ハブモータ、サスペンション、 ステアリングシステム)、走行性能制御用ソ フトウェア、車載電気・電子装置、トラクショ ンバッテリーである。この基本構造を補完す るのが、外装、内装、照明システム、あらゆ る走行機能のための制御ソフトウェア、セン サーパッケージといったモジュール群であ る。ここに窓、空調システム、操作表示、通 信機能、キャビンなど、各種付属品や設備を プラスすれば、車両が完成する。これらに代 えて、商品輸送などに特化した特殊装備を搭 載することも考えられる。

都市部での短距離走行に特化しているため、 車両は比較的小型でそれゆえ軽量でもあり、 シェフラーの計算によれば、低価格のトラク ションバッテリーでも輸送タスクを問題な く実行できる。将来は非接触充電システムに よって、赤信号での停止時などでも充電が可 能となるため、この計算がいっそう現実性 を帯びて来る。重量の点では、実用車両で (キャビンを除く)シャシー、四つのホイー ルモジュール、内装、150kgの高電圧トラ クションバッテリーで、わずか 1,150kgに 抑えられる。 四輪ステアリングにより、外輪21.8°、 内輪45°の最大転舵時に最小回転半径を 2.5m未満とできることにより、都市交通で の機動性がきわめて高く、フロントステア リングモードであっても最小回転半径は5m を余裕で下回る値となり、従来型のアクスル 設計と比べて大きなメリットを提供する。さ らに、停車状態ではホイールは最大90°ま で転舵可能であるため、車両の前後方向に対 して垂直方向にも走行させることができ、か なりコンパクトなスペースでも操縦、停車、 旋回が可能となっている。

## ホイールモジュール構成

ホイールモジュールのステアリングシステ ムは、エレクトロメカニカルステアバイワイ ヤーシステムとして設計されている。アク チュエータは、ステアリング軸と同軸とな るようホイールモジュールに組み込まれて おり (図 4)、ステアリング操作時にユニッ ト全体を回転させることにより、制御ユニッ トからの転舵指示を実行する。前述したよ うに、モジュールのステアリング角度は、 通常走行モードでは最大 45°に制限されて いるが、設定を変更すれば最大 90°まで調 整可能である。48V モータでは理論上、最 大 1,000Nm のトルクを発生できるが、実 際に必要となるトルクはこれよりもかなり 小さいため、システムは電力をかなり温存で きることになる。ステアリング機能に使用す るアクチュエータは、シェフラーが提供して いる大型のモジュールシステムのものであ り、ほかの用途において卓越したロバスト性 を発揮している。

シャシーの個々のパーツは図5で示した通 りで、フレームよりフォークを介して吊り 下げられるトレーリングアームを備えてい る。トレーリングアームのホイール側で、 ショックアブソーバが連結しており、上部 はベアリングを介してフォークに接続して いる。オプションとして、ホイールモジュー ルには、乗り降りなどをサポートできるよう エレクトロメカニカル車高調整装置を取り 付けることも可能である。トレーリングアー ム位置は、ホイールのキャンバー角も含めた



4 Actuator for the steer-by-wire system



5 Chassis components

アクスル全体のジオメトリによって決まる が、キネマティクスの検討において、特にト レーリングアームのベアリング支持部とス テアリングアクスルに関する広範囲にわた るシミュレーションを行い、ステアリングア クスルの上下位置、キャスタ/キングピンオ フセットを決定した。さらに、ステアリング アクスル上部のベアリング支持部は、制動中 などに生じる大きなトルクを支持できるよ うに設計されている。

最適なホイールモジュール構成とシャシー 特性を作り出すため、シェフラーは初期のコ ンセプト開発段階から、マルチボディシミュ レーションを実施した(図6)。その結果を 参考にして、可動部分の動的特性と負荷・力 の分布に関する解析および最適化が可能と なった。このシミュレーションは、ピッチン グ、最高80km/hでの高速安定性、適切な タイヤ径選択、走行安定性を織り込んだもの となっている。これに加えて、開発の初期段 階における乗り心地検討が可能である。



6 Vehicle setup in the multiple-body simulation

一連のシミュレーションでは、数多くの設計 ソリューションの検討・比較が行われた。例 えば、図7で示すように三種類のモデルにて 0.4G ブレーキング時の車両挙動比較を行っ た。バージョンAでは、トレーリングアー ムのピボット点が外側に、つまり車両の前後 方向に出ており、配置構成を反転させたバー ジョンBでは、ピボット点が車内に向いて いる。バージョンCはバージョンBの流れ を汲んでいるが、トレーリングアームのピ ボット点はかなり下方に移動している。バー ジョンAには、設置スペースが小さいという メリットがあるが、シミュレーションではブ レーキングや加速中のピッチング挙動が大き くなる傾向がはっきりと表れている。これに 対してバージョンBでは、車両の左右軸まわ りで不快なトルクが発生している。これは、 スキーのリフトでケーブルのたるみによって

#### 生じるサギングに似 ている。バージョ ンCはシミュレー ション結果が示すよ うに、ピッチトルク がほとんど発生しな いという点で、最大 のメリットを提供し ている。ホイールモ ジュールの開発にあ たっては、これらの バージョンをさらに 精査してフィジビリ ティスタディの設計 検討に導入すること になる。

## ホイールハブモータ

ホイールモジュールのモータ (図 8) は、ブ ラシレスの永久磁石同期モータとして設計 された。同様の非同期モータと比較して、こ のタイプは出力密度が高いというメリット がある。これは、設置スペースが限定されて いるホイールハブに使用する場合、特に顕著 である。フィジビリティスタディにおける現 時点の設計では、四つの電気モータ (動作 電圧 300V) それぞれの定格出力を 13kW、 最大出力は 25kW としている。公称トル ク 250Nm は、60 秒という短時間に限り 最大 500Nm まで増加させることができ る。モータの最高回転数は 1400 回転 / 分 である。駆動トルクは、ギヤレシオ 3.35 の



7 Simulation of different trailing arm configurations

3 段遊星ギヤを介してホイールハブに伝達 される。ホイールドライブのシステム効率 は90%と非常に高いレベルとなっている。 モータの耐熱性は、液体冷却システムによっ て確保されており、モータハウジング内に はクーラントが流れる多数の流路が埋め込 まれている。集中型熱交換器によって、ホ イールハブモータから熱エネルギーを取り 出している。

ブレーキをかけるとモータが発電機として 機能し、バッテリーに電気エネルギーを返 すとともに(図9)、すべてのホイールで機 械式ドラムブレーキを作動させることで、 システムを補完する。シェフラーは、回生 ブレーキと機械式ブレーキの相互作用を最 適化することで、乗車している人の快適性 を犠牲にせずに、回生率を可能な限り向上 させた。

車両全体モデルを使用したシミュレーショ ンにより、さまざまな車両質量について、 実現可能な走行性能を算出した。これによ ると、600kgというごく軽量の車両では、 3.3秒未満で50km/hに到達し、最高速度 は約140km/hに達するという結果が出た。



8 The wheel-hub drive components



9 Interaction of regenerative and mechanical brake

また、最大 31%の傾斜を登坂する能力を備 えている。非積載質量 1,000kg という重 い車両の場合も、5 秒未満で 50km/h に到 達でき、最高速度は約 135km/h、登坂性 能は 21.5%という、ハイレベルの性能を発 揮する。

## ステアバイワイヤーシステムおよび 駆動系の制御アルゴリズム

ステアバイワイヤーシステムおよびドライ ブ用の複雑な制御アルゴリズムは、ソフト ウェア開発の中心となるコンポーネントで ある。一方では、各ホイール個別のステアリ ングによって機能範囲が広がった点を制御 ソフトウェアにも反映させる必要があり、そ の一方で、多数の安全回路や冗長性をソフト ウェアに実装することも必要になる。ステア バイワイヤー制御ソフトウェアの開発は、完 全にシェフラー社内で行われた。図10は、 ホイールモジュールの作動および制御に関 係する信号の流れを示している。

高度に自動化された走行機能のための制御ユ ニット(図10赤色表示)は、CANバスを介 して車両全体の制御装置(図10緑色表示)に



**10** Signal flows for controlling the wheel modules

直接接続されており、特にブレーキングおよ び回生の機能や、エアコンなどの快適性に 関する機能を制御する。開発および試験の段 階では、ドライバーが乗車して、必要に応 じてセントラルジョイスティックを操作し て介入を行なう。後の通常運転の段階では、 このモジュール(図10では CAN バス4を 介して接続)は不要となる。車両制御システ ムは、走行性能制御装置と相互にデータ接続 されている。走行性能制御装置のトラクショ ンおよびステアリングに関する仕様は、相応 のトルクおよびステアリング角を発生させる



11 Signal flow in the electronic module and the individual components of the controller

ホイールモジュールに実装されている。ステ アバイワイヤーシステムは、個別の信号配線 を介して個々のホイールモジュールの機能 を監視し、不具合が発生した際は相応の安全 機能を作動させる。

図11に、走行性能制御におけるアルゴリズ ム構造の詳細を示す。ブロック図は、電子モ ジュールおよび制御装置の個々のコンポー ネントにおける信号の流れを表している。プ レ制御では、カーブ走行時の軌跡や、個々の ドライビング操作にあたって適用する必要 のある車両重心に関する力の合計について 計算を行なう。走行性能制御装置は、車両 の前後方向および左右方向のガイダンスシ ステムの目標値と実測値を使用して、必要な ホイールハブモータトルクおよびステアバ イワイヤーアクチュエータのステアリング 角度をホイールごとに個別に計算する。その 際、ESP機能とトルクベクタリング機能を 反映する形で、ホイールごとの駆動トルクを 合計する。四つあるホイールモジュールのス テアリング角度については、特に、車両の前 後加速度、カーブの形状、車両のロール角を 考慮する。最大限の走行安定性、さらには安 全性を保証するために、動的に変化するス リップ限度内にホイール横力を合わせ続け ることが、目標パラメータの一つとなってい る(図12)。ホイールモジュールのステア リング角度を90°にして車両を操作・旋回 させる動作についても、走行性能制御装置に よって制御・監視を行う。



12 The driving dynamics controller controls the force distribution of the four wheel drives in such a way that the actual force is always below the friction contact lim

#### 安全に関するコンセプト

ステアバイワイヤーを採用した、高度に自動 化された自動車においては、個々のコンポー ネントやシステム全体の機能的安全性につ いて、特に高水準の要件を満たすことが求め られるが、故障のシビアリティに応じたさま ざまな対策を講じることにより、最大限の安 全性を実現することが可能となっている。ホ イールモジュール内でステアリング、駆動、 データ通信を阻害するような故障を検知す ると、車載エレクトロニクスは不具合の出た モジュールを停止させる。キャスタートレー ル、フリクションなどの影響で、モジュール は失陥直後は舵角をキープし、残る三つの ホイールモジュールによって、故障したモ ジュール分のトラクションとステアリング 機能を補うため、車両全体の機能に支障を来 たすことはまったくない。安全上のシビアリ ティ第二段階は、走行性能制御の不具合や、

48V または 300V 車載電気システムの故障 が対象に含まれる。この場合、油圧式ドラ ムブレーキによって急ブレーキが作動する。 ステアリングシステムに故障がある場合は、 機能を停止させてフリクションなどにより ほぼ同じ舵角を維持する。このとき車両は 旋回半径をほぼ維持しながら停止状態に移 行する。第三段階のシビアリティとして、 システム全体に不具合が発生した場合は、 第2サーキットの油圧ブレーキが作動し、 ステアリングは先ほど同様にほぼ元のポジ ションにとどまる。図13のシミュレーショ ンは、安全性コンセプトの効果を検証した ものである。このシナリオは、車載電子装 置または車載電気システムの故障をきっか けに急ブレーキが作動するという、想定し 得る最悪の故障をベースにしている(最悪 条件)。このような場合でも、車両は機動性 を維持しており、障害物を回避したりカー ブを走行したりすることができる。

まとめ

コンパクトなユニットに収めた、画期的なイ ンテリジェント・コーナーモジュールを開 発した。全輪駆動とステアリングで構成され るこのアプローチは、自動車の走行安定性を 高めながら、都市部でも優れた機動性を実現 する。非常に効率性に優れた強力なモータに よって、広いバッテリーレンジで申し分のな い走行性能を発揮できる。高度に自動化され た未来型自動車の要となるのが、ステアバイ ワイヤーシステム用制御アルゴリズムであ る。シェフラーでは膨大な安全コンセプトを 始めとして、ソフトウェアの開発から実装ま ですべてを自社で手がけてきた。近々、電気 自動車に関するフィジビリティスタディ結 果を最適化し、2018年のうちには、路上走 行に十分耐える現行のシャシー試作品に乗 車スペースと空調装置を装備して、本格的な 旅客運搬車を誕生させる予定である。

#### Literature

- [1] Sanwal, M.: Paris Agreement on Climate Change: The First Global Sustainable Development Agreement. https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/1017666\_ Sanwal\_Paris%20Agreement%20on%20 Climate%20Change-The%20First%20Global%20Sustainable%20Development%20 Agreement.pdf. Downloaded on December 17, 2017
- [2] http://www.bast.de/DE/BASt/Forschung/ Forschungsfoerderung/Downloads/cedr\_ call\_2014\_2.pdf?\_\_blob=publication-File&v=2. Downloaded on December 17, 2017
- [3] Study by Roland Berger: Autonomous Driving
   Penetration rate of highly automated cars, 2018



13 Vehicle behavior during emergency braking due to total system failure

都市化のトレンドは現在すでに目に見える 形となっているが、今後も引き続き強まって いくことであろう。居住地域の人口密度が高 まることによって、都市は大都市へと変貌を 遂げていく。このとき、特にモビリティの分 野ではまったく新しい問題が発生する。電気 自動車で培った経験を基に、シェフラーでは 地域内旅客輸送向けの高度に自動化された 電気自動車を開発し、路上走行に耐える試作 車としてフィジビリティスタディに投入し ている。試作車は、ゼロエミッションで乗客 4人を快適に、静かに、安全に目的地まで送 り届けるよう設計されている。一方では、モ ジュール式の車両設計を採用し、単一のシャ シー構造でより多くの人や物品の輸送を実 現することが、プロジェクトの技術的要点 に据えられている。また一方で、シェフラー は、ホイールハブモータとエレクトロメカニ カルステアリングシステムを組み合わせて

Schaeffler Technologies AG & Co. KG Industriestrasse 1 – 3 91074 Herzogenaurach Germany Telephone +49 9132 82-0 Telefax +49 9132 4950 www.schaeffler.com