

インペリアル・カレッジ・ロンドンとの ターボチャージャ共同研究組織

Turbocharger Joint Research Organization with Imperial College London



陣内 靖明*1
Yasuaki Jinnai

茨木 誠一*2
Seiichi Ibaraki

星 徹*3
Toru Hoshi

恵比寿 幹*4
Motoki Ebisu

横山 隆雄*5
Takao Yokoyama

岡 信仁*6
Nobuhito Oka

ターボチャージャの主要市場である欧州において、その先端技術を持つインペリアル・カレッジ・ロンドンとMHIグループは共同研究や人的交流等20年近くの歴史を持つ。脱炭素や乗用車の電動化が叫ばれる中、多様かつ的を射た研究を集中的に実施するために2019年より同大と共同研究組織(University Technical Centre)を立ち上げた。本報では、同大との研究により三菱ターボチャージャの技術力向上に寄与した成果、今回立ち上げた組織による活動内容、三菱重工エンジン&ターボチャージャ株式会社(以下、MHIET)ターボ事業への関わりについて述べる。

1. はじめに

MHIグループは、1957年から乗用車向けターボチャージャを生産しており、当初その技術は日本国内で開発してきた。一方、ターボチャージャの主要市場は欧州であることから当社ターボ事業は、徐々にその軸足を欧州に移し、現地の自動車メーカー向けに開発・生産することで成長してきた。ターボチャージャの技術についても欧州市場での要求に沿った開発の必要性をいち早く認識し、三菱重工業(株)総合研究所(以下、総合研究所)を中心に欧州の大学や研究機関と共同研究を進めてきた。MHIETの欧州拠点でターボチャージャを生産するMTEE(Mitsubishi Turbocharger and Engine Europe B.V.)は、1990年代後半にエンジニアリング機能を持ち、2010年代にターボチャージャの研究開発機能を持つに至った。

昨今の世界各国の脱炭素に向けた取組みの中、環境先進国が多く自動車メーカーと大学との産学連携が盛んな欧州において、MHIETとしては総合研究所を中心に築いた開発連携のパイプとエンジニアリング機能が成長したMTEEを活用し、欧州でも強固な開発パートナーシップを築くことで、三菱ターボチャージャの技術を欧州から発信できる体制整備を進めた。

2. 三菱ターボチャージャのグローバル開発連携

MHIグループでのターボチャージャ開発は、総合研究所やグループ内の海外拠点のみならず、各地の大学や研究機関とも連携して進めている。その開発体制を図1に示す。ターボチャージャの主要な市場である欧州と中国にあるMHIETの拠点にはエンジニアリングや開発機能があり、それぞれ現地の大学や研究機関とも交流を持つ。各拠点、大学、機関はそれぞれの市場ニ

*1 三菱重工エンジン&ターボチャージャ株式会社 ターボ事業部 技術部 次長 技術士(機械部門)

*2 三菱重工株式会社 総合研究所 ターボ機械研究部 部長 工学博士/技術士(機械部門)

*3 三菱重工株式会社 総合研究所 ターボ機械研究部

*4 三菱重工エンジン&ターボチャージャ株式会社 ターボ事業部 技術部 主席技師

*5 三菱重工株式会社 総合研究所 主席プロジェクト統括 技術士(機械部門)

*6 三菱重工エンジン&ターボチャージャ株式会社 ターボ事業部 技術部 工学博士

ーズに合った開発を進めつつ、特徴や得意分野を生かし、お互い補間し合うことで総合力の向上も目指している。乗用車パワートレイン用の過給システムにおける技術革新は流体、熱力学、トライボロジーから電制化や開発トレンド調査に至るまで幅広い分野でのリサーチと研究開発が必要であり MHIET 内のリソースだけに固執した自前主義では市場変化のスピードに対して先回りした開発を進めることが難しくなっている。そういった背景から社外の研究機関との開発連携が重要度を増している。



図1 三菱ターボチャージャのグローバル拠点と大学や研究機関との開発連携

3. インペリアル・カレッジ・ロンドンとの協業の歴史とこれまでの成果

インペリアル・カレッジ・ロンドン (Imperial College London, 以下、ICL) は 1907 年に the Royal College of Science, the Royal School of Mines, the City & Guilds College を統合して設立され、現在では EU でトップ3、世界でもトップ 10 にランキング (* The Times Higher Education World University Rankings 2020) される工学、医学、理学、ビジネススクールの4部からなる理工系総合大学である。特に革新的な研究開発による社会貢献を掲げ、産業への応用を重視した実践的な研究が進められている。ICL の工学部 Thermofluids Division の Martinez-Botas 教授は世界に先駆けてターボチャージャに用いられるラジアルタービンの非定常性能の重要性に着目し、図2に示す脈動流下で性能と流動計測が可能な独自開発の試験装置を用いた非定常現象の解明と一次元性能評価手法の開発などを推進し、脈動流下における斜流タービンの有効性や高性能化のアイデアを提示していた。総合研究所は 2003 年に同教授と交流を持ち、2005 年からラジアルタービンの非定常性能に関する共同研究を正式に開始した。以来、ターボチャージャ用タービンやコンプレッサの性能革新に関する共同研究を継続的に行っている。代表的な成果として、エンジンの脈動下でタービン効率を向上させるため、形状を最適化した新型タービンボリュートと斜流タービンを開発し、タービン単体試験、エンジン試験で高性能化を達成した⁽¹⁾。本技術は 2013 年に共同で知財化し、2016 年から量産化され、自動車の排出 CO₂ 削減に貢献している。また、コンプレッサでは、図3に示すエンジン実機の給気に伴う圧力脈動を模擬できる試験装置を構築し、従来困難であった脈動下の性能とサージ特性を計測するとともに、非定常流動解析により内部流動を明らかにした⁽²⁾。図4に脈動の有無によるコンプレッサの圧力-流量特性を示す。脈動下では非定常的な流量の増減に伴う流れの慣性効果により、定常流れに対してサージ流量が約8%低下し、サージングが抑制されることが判明した。本成果も実際に圧力脈動の影響を受ける量産品

のコンプレッサの高効率化設計に活用している。このように ICL との共同研究で創出された革新技術をMHIグループが実製品に迅速に展開する好循環を作り上げ、ICLとMHIグループの使命である革新技術による社会貢献を実現し、強固な信頼関係を築いてきた。更に一層の連携強化と研究開発能力を増強すべく、2019年にはMHIETとICLで共同研究組織(University Technology Centre)を設立するに至った。図5はUTC設立セレモニーを東京で開催した際のICLと当社グループの関係者の集合写真である。

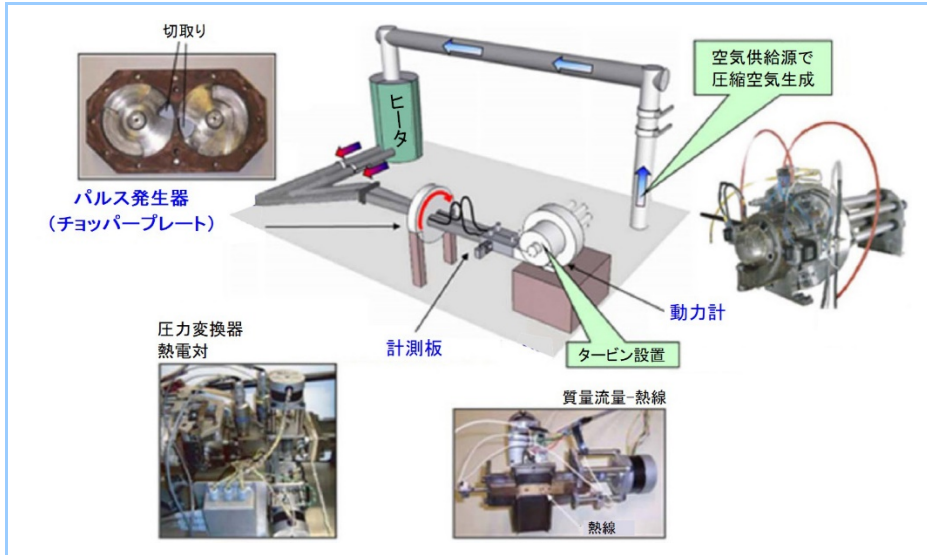


図2 インペリアルカレッジの脈動流タービン試験装置

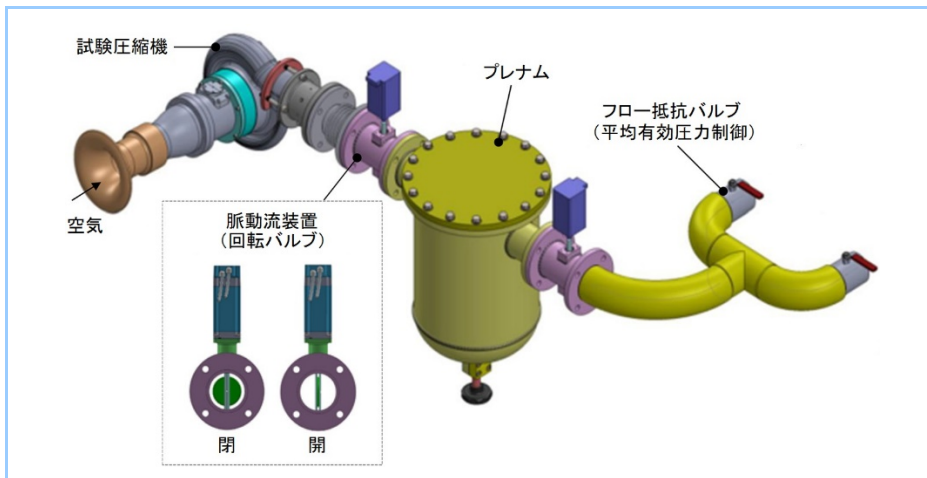


図3 コンプレッサ圧力脈動試験装置

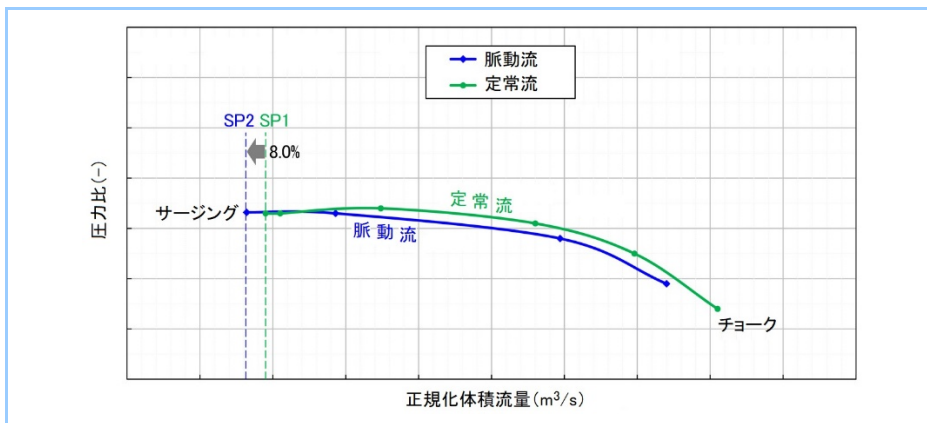


図4 圧力脈動の有無とサージ流量の関係



図5 UTC 設立セレモニー ICL と MHI グループの関係者の集合写真

4. 共同研究組織・体制

長きにわたり ICL とターボチャージャに関するさまざまな共同研究を通して深い関係を築いてきた総合研究所に加え、欧州開発拠点である MTEE、そしてターボ事業部を持つ MHIET が MHI グループ側で主導する形で同大と共同研究組織 (University Technical Centre), MHIET-Imperial Future Boosting Innovation Centre を立ち上げた。また、ICL はマレーシア工科大 (UTM, Universiti Teknologi Malaysia) と共同で、ターボチャージャ技術を始めとして輸送機器の低炭素化技術を開発する研究組織 LoCARTic (Low Carbon Transport in cooperation with Imperial College London) を UTM に設立しており、エンジン試験ベンチを有し、さまざまな検証試験を実施できる体制を持つ。今回、図6に示すようにこれらを束ねるバーチャル組織を立ち上げた。この組織の中で複数のテーマで研究を同時進行させ、定期的なステアリングミーティングを実施することでマネジメントが研究の進捗確認と開発戦略の見直しを行っている。

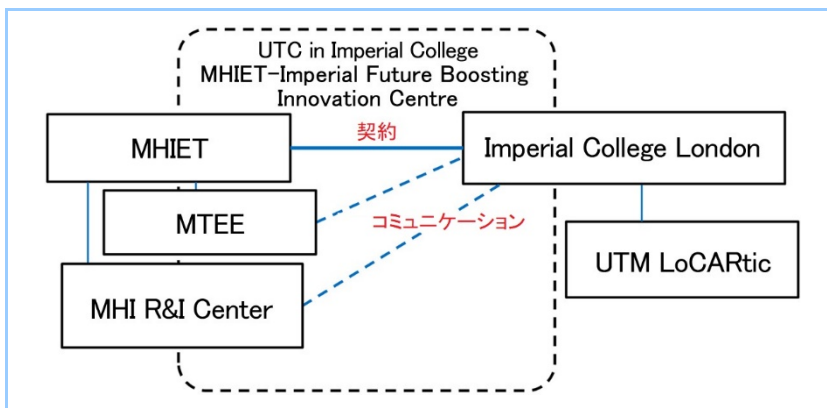


図6 共同研究組織・体制

5. 活動内容

ICL との共同研究では前述の通り、排気脈動下の非定常性能計測や大規模流動解析で流動現象を解明し、高性能な新型タービンやコンプレッサの開発に繋げてきた。現在は技術要求の多様化に対応するため、共同研究のテーマをタービンやコンプレッサの高性能化から過給システム、エンジンシステム、車両システムへと活動範囲を広げている。以下に UTC における研究開発例を紹介する。

ターボチャージャは、エンジンの排気エネルギーでタービンを回すことでコンプレッサを駆動するため、瞬時に吸気側へ空気を供給することができず、過給遅れが発生する。この抑制のために

は、ターボチャージャの過渡応答性能を改善することが有効となり、特にコンプレッサの小流量性能向上が重要となる。そこで、新型コンプレッサカバーを開発し、**図7**のように従来型に対して小流量域の圧力比向上を確認した。この効果をエンジン上で評価すべく、**図8**に示す LoCARitic が保有するエンジン検証試験設備を用いて、点火タイミングを含めた ECU (Engine Control Unit) セッティングを最適化させ、エンジンの加速性能を評価した。その結果、**図9**に示すように、新型コンプレッサの適用により全域で 20-60%以上過渡応答性能が向上した。これはスロットル開度が大きい際に必要な空気密度が増加し、コンプレッサの作動点が高圧力比側、すなわち小流量側に移動したことが要因であると考えられ、新型コンプレッサの効率向上の効果がエンジン加速性能の向上に貢献していることが確認できた⁽³⁾。

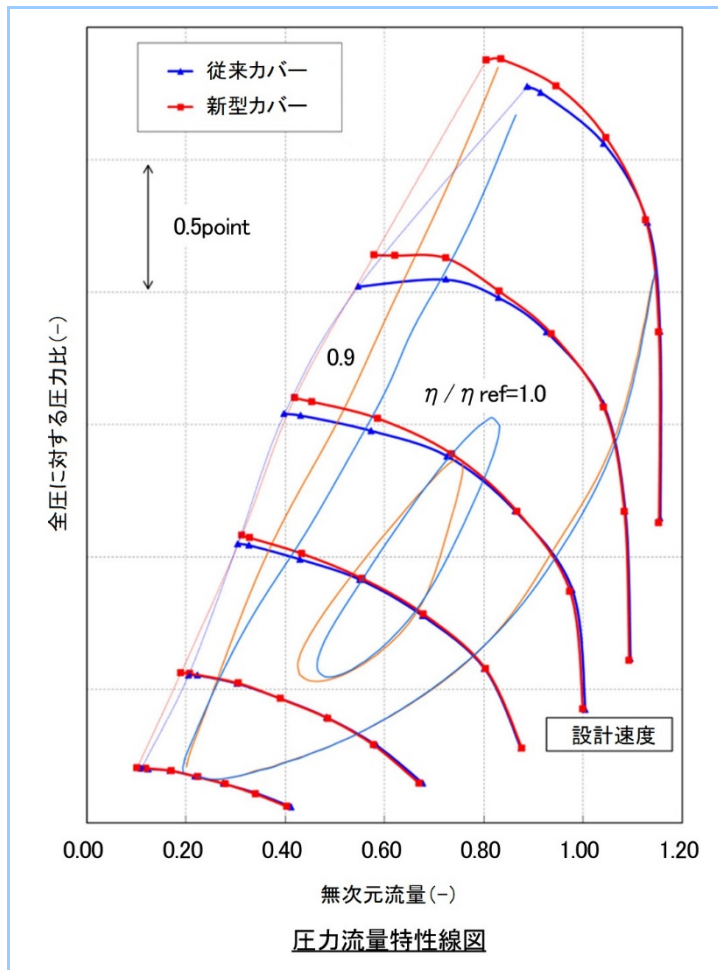


図7 コンプレッサ単体性能試験結果



図8 LoCARitic のエンジン試験設備

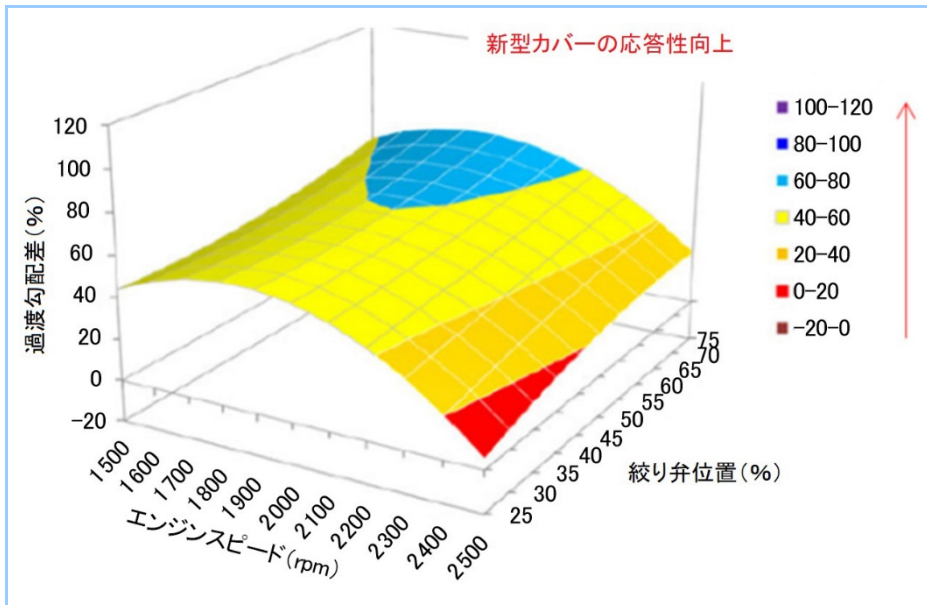


図9 エンジン加速性能試験結果(90%トルク到達までの傾き比較)

自動車用エンジンでは起動時や過渡時の高性能化が製品の環境性能向上にとって重要である。例えば、ターボチャージャに関しては、エンジン冷間始動時の触媒活性化時間短縮の観点で、タービン下流の熱マネジメント技術がエンジンの排出ガス浄化に寄与する⁽⁴⁾。ターボチャージャの内部は図 10 に示すように、タービン、コンプレッサ、軸受、潤滑油及び冷却水など複数の熱源があるため、全体を考慮して各部の非定常伝熱状態を予測し、性能への影響を評価する必要がある。この課題を解決するための熱移動および脈動を考慮した過渡性能シミュレーション手法の開発にも ICL と取り組んでいる。

エンジンの開発段階におけるエンジンとターボチャージャの最適なマッチングの実現は良好な過渡性能と低燃費化を達成する上で重要であるとともに、開発期間の短縮に繋がる。一般的にエンジンモデルはターボチャージャの過渡的な挙動を考慮しない代わりに準定常として扱う。この従来の手法は定常状態のエンジン性能は適切に予測できるが、過渡的なエンジン性能を正確に予測するには課題がある。ターボチャージャの過渡的な挙動を評価するための非定常低次元モデルに関しては、旧来より多くの研究がなされている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。しかしながら、これらのモデルを1次元エンジンモデルに統合して詳細な分析を実施した例は未だ少なく、十分な知見が得られていないのが現状である。上記の課題を解決するために、排気脈動下のエンジン性能を瞬時に予測し、お客様のエンジンに応じて最適なターボチャージャを提案するため、図 11 に示すようにエンジン1次元シミュレーション手法の開発に取り組んでいる。

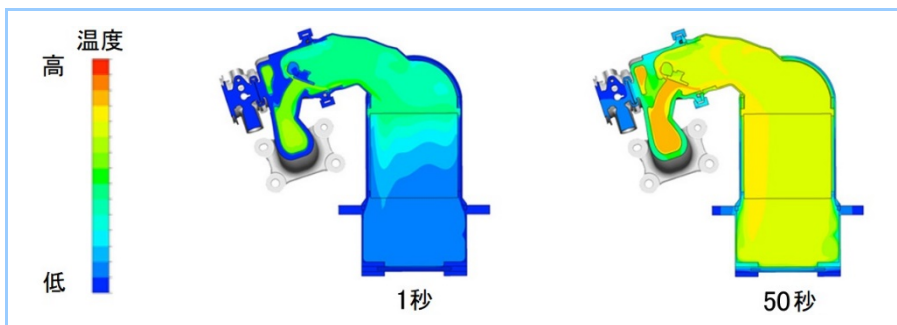


図10 冷間始動時のタービンの非定常CHT(Conjugate Heat Transfer)解析結果

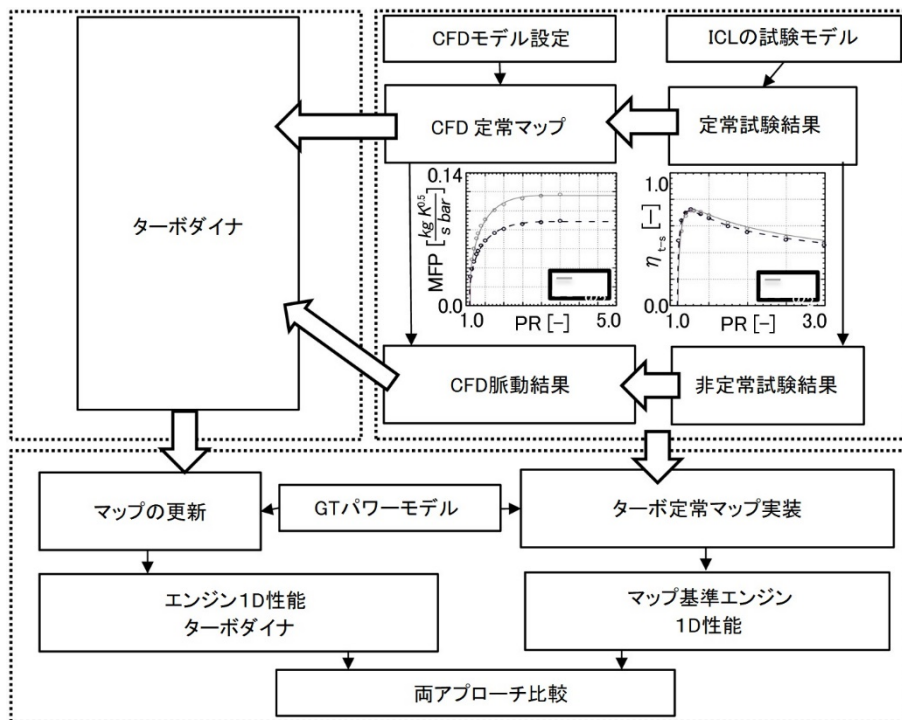


図 11 タービン非定常性能を考慮したエンジン性能評価手法の開発フロー

近年、直噴過給エンジン用にダブルエントリータービンの採用ニーズが高く、特に4気筒エンジンや6気筒エンジンに用いることでエンジン排気から生じる脈動エネルギーを利用し、排気行程の気筒間の排気干渉を低減し、ポンプ損失を低減する利点がある。図 12 に示すようにダブルエントリータービンは、スクロールが軸方向に配置されているツインスクロールタービンと周方向に配置されているダブルスクロールタービンがあり、近年までこれら二つの形式のタービンの性能特性の比較が広く議論されてきた。ダブルスクロールタービンの流量制御機構として図 13 のスクロールコネクションバルブ (SCV: Scroll connection valve) が使われており、エンジン低回転数域では分割流路の性能特性を実現しつつ、高回転数域ではバルブを開くことでシングルスクロールに近い性能特性を得ることができる。これにより、大流量でのエンジン性能を犠牲にすることなく、小流量での性能を両立させてエンジンとターボチャージャのマッチングを改善できる。しかしながら高温の排気ガス脈動環境下で使用されるゆえに性能・信頼性の両立が難しく、これを解決するための開発にも取り組んでいる。

高過給圧/高応答性による車両の燃費改善に向けて、当社では電動コンプレッサを開発しており、更に通常の2ステージターボに対し、高圧もしくは低圧側のターボチャージャを電動コンプレッサに置き換えた電動過給システムの開発⁽⁷⁾を行ってきたが、電動過給システムではエンジンとバッテリーのエネルギーマネジメントが重要である。そこで乗用車のパワートレインの開発動向やハイブリッドシステムなど車両の電動化を見据え、車載電源性能、高電圧化及びエネルギー回生効率を考慮した車両システム全体のモデリング手法の開発に取り組んでいる。図 14 にハイブリッド自動車の車両全体の解析・制御モデルを示す。今後は開発が盛んとなっているミラーサイクル、リーン燃焼等のエンジンの燃費改善手法と組み合わせ、車両システムの最適なエネルギーマネジメントの提案に繋げたい。

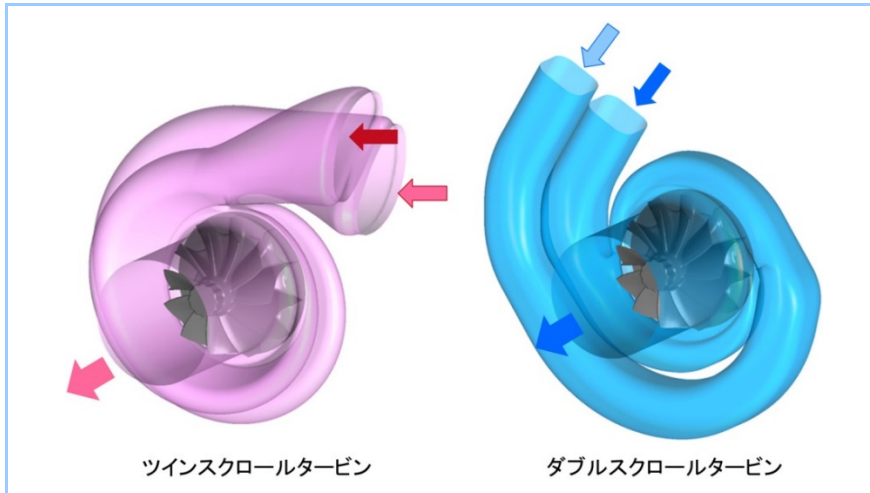


図 12 ダブルエントリータービンの構造の比較

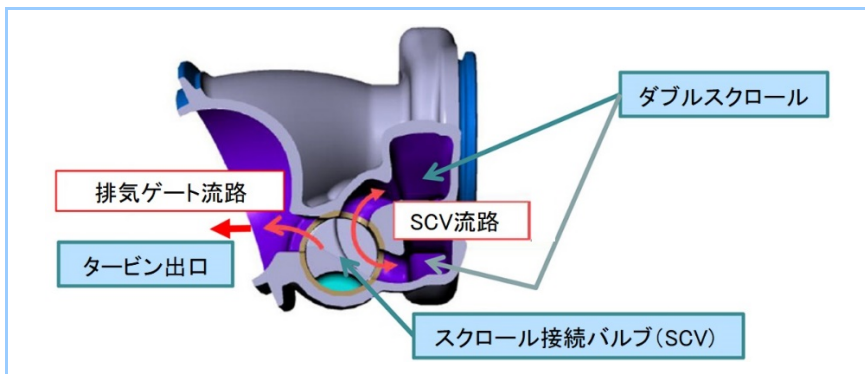


図 13 ダブルスクロールタービン SCV の断面図及び機能説明

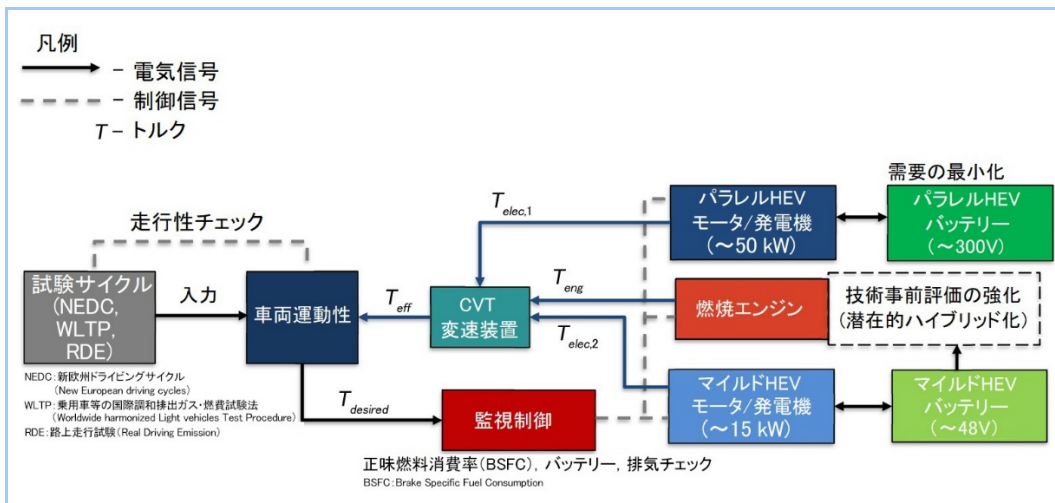


図 14 ハイブリッド車における車両システムモデルの構成

6. まとめ

ICL とは、かつては単一の共同研究から始まり、研究テーマの数を増やし成果を上げていくことで MHI グループとパートナーシップを持つ土壌ができた。パートナーシップは研究成果に留まらず、MTEE から若手エンジニアを ICL に送り込み、ターボチャージャに関する研究で博士号を取得するなど人的交流にまで発展させた。今回立ち上げた UTC も 前述の通り、要素技術、ターボチャージャ全体技術、そして変化の著しい乗用車のパワートレインの開発動向や車両の電動化を見据え、パワートレインや車両全体システムまで研究開発の範囲を広げている。この組織を持つことにより各拠点間で一体感のある開発が可能となり、その連携の成果が得られている。今後も UTC を活用して欧州発の三菱ターボチャージャ技術を世界に発信していく。

参考文献

- (1) 横山隆雄他:自動車用高性能ターボチャージャを実現する排気脈動下タービン高効率化技術, 三菱重工技報 Vol. 55 No.2 (2018)
- (2) 富田勲他:吐出圧力変動を伴うターボチャージャ用遠心コンプレッサの複雑内部流れ場の解明, 三菱重工技報 Vol. 56 No.2 (2019)
- (3) M. S. Chiong et al, "On-Engine Performance Evaluation of a New-Concept Turbocharger Compressor Housing Design", SAE Technical Paper 2020-01-1012 (2020)
- (4) Kitamura T. et al, "Study on Analytical Method for Thermal and Flow Field of a Turbocharger With the Catalyst Unit", ASME Turbo Expo, GT2019-90451
- (5) M. S. Chiong et al, "Assessment of Cycle Averaged Turbocharger Maps Through One Dimensional and Mean-Line Coupled Codes", ASME Turbo Expo, GT2013-95906
- (6) T. Cao et al, "A Low-Order Model for Predicting Turbocharger Turbine Unsteady Performance", Proceedings of ASME Turbo Expo, 2014
- (7) 安乗一他:自動車向け電動2ステージターボシステムの開発, 三菱重工技報 Vol. 52 No.1 (2015)