

# ENGINE REVIEW

*SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 9 No. 2 2019*

JSAE エンジンレビュー

Report : 自動車技術会 2018 年春季大会

コラム : ディーゼル商用車と大気環境について思う



公益社団法人 **自動車技術会**

- コラム：ディーゼル商用車と大気環境について思う 1  
*Think for Commercial Vehicles and Air Quality*  
細谷 満（編集委員，日野自動車）  
Mitsuru HOSOYA (Hino Motors, LTD.)
- Report：自動車技術会 2018 年春季大会 3  
*Report of the 2018 JSAE Annual Congress (Spring)*  
小酒英範，清水健一，細谷満，西川雅浩，野口勝三（編集委員）  
朝井豪（ヤンマー），石井義範（いすゞ中央研究所），伊東明美（東京都市大学），  
大西崇之（クボタ），北田泰造（三菱自動車工業），瀬尾昌裕（出光興産）

■ JSAE エンジンレビュー編集委員会

委員長：飯田 訓正（慶應義塾大学）

副委員長：村中 重夫（元・日産自動車）

幹事：飯島 晃良（日本大学）

委員：遠藤 浩之（三菱重工業エンジン&ターボチャージャ）

大西 浩二（日立オートモティブシステムズ）

菊池 勉（日産自動車）

小池 誠（豊田中央研究所）

小酒 英範（東京工業大学）

清水 健一（元・産業技術総合研究所）

下田 正敏（元・日野自動車）

鈴木 央一（自動車技術総合機構）

西川 雅浩（堀場製作所）

野口 勝三（本田技術研究所）

平井 洋（日本自動車研究所）

細谷 満（日野自動車）

山崎 敏司（編集）

渡邊 学（JXTG エネルギー）

発行所：公益社団法人 自動車技術会

発行日：2019 年 4 月 25 日

発行人：大下守人（アイシン精機）

〒102-0076 東京都千代田区五番町 10-2

電話：03-3262-8211

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN

Vol. 9 No. 2 2019

## ディーゼル商用車と大気環境について思う

*Think for Commercial Vehicles and Air Quality*



細谷 満

Mitsuru HOSOYA

JSAE エンジンレビュー編集委員

日野自動車（株）

HINO MOTORS, LTD.

1990年代、ディーゼル商用車の排出ガス低減に向けた要素技術の研究開発が進められていた。当時は特に大気質悪化の要因となるNO<sub>x</sub>およびPM（Particulate Matter：粒子状物質）低減に向けた要素研究が主体であり、乗用車と比べ長距離を走行し、信頼性、耐久性を必要とするディーゼル商用車の本命技術は何かということで探索が行われていた。

本コラムではPMに着目して話を進めさせていただく。1990年代末から2000年になると光化学スモッグに加えてナノ粒子が人体に影響するとされ、PM<sub>2.5</sub>（粒子径2.5μm以下の粒子）に注目が高まったことを記憶している。そのころ、ナノレベルサイズの粒子個数を連続的に計測できるカウンターが開発された。それによりディーゼルエンジンから排出されるPM重量とPM粒子径、PN（Particle Number：粒子数）が計測できるようになった。

1990年代のディーゼル用PM低減酸化触媒はPMに含まれる有機溶剤可溶成分（SOF）である未燃燃料や潤滑油成分である炭化水素を酸化低減することは可能であったが、酸化安定性の高い煤（黒煙）成分の低減は困難であった。大気汚染の原因となるPMを重量ベースで低減するために、強力な酸化触媒を使用するとPMは驚くことに2倍、5倍と増加することが確認された。理由としては燃料中の硫黄分が1990年代は500ppmレベルと高く、硫黄分が酸化されサルフェート（硫酸塩）を生成してしまうためであった。そこでサルフェートの酸化を抑制しSOF分のみ燃焼する触媒開発に当時は専念した。触媒メーカーの技術力により、ペースメタルや希土類を使用した触媒が開発され硫黄を酸化することなく、PM中のSOF分を燃焼処理することが可能となり、画期的な進歩を遂げた。PMは30%～40%低減された。

2000年代になるとディーゼル商用車からの煤（黒煙）低減に向け排気システムの開発が活発になった。ここで登場するのがDPF（Diesel Particulate Filter）である。煤は固体であるため酸化触媒を通過するだけでは低減することができず、セラミックス製のDPFで一度捕集し、その後、捕集した煤を燃焼温度まで強制的に昇温し、燃焼処理する必要があった。そのためには強力な酸化力を有する貴金属系触媒の使用と、燃料の低硫黄化が必須であった。燃料については国の主導で自動車業界と燃料業界が低硫黄化の研究を進めており、2005年より硫黄分10ppm以下の燃料が市場に投入された。燃料が低硫黄化されることで2005年より順次、ディーゼル商用車に煤の燃焼再生を行うDPFシステムが導入され、PMを画期的に低減すると共に、粒子数を大幅に低減した。

平成28年度、大気環境基準である微小粒子物質（PM<sub>2.5</sub>）の達成率は、一般環境大気測定局（一般局）において88.7%まで改善されており、ディーゼル車排出ガスのクリーン化が大きく貢献していると思う。ディーゼル商用車において、PM低減技術の要素研究、開発を行い、一方で、排出ガスのもととなる燃料の品質改善によりディーゼル車からのPM排出の大幅な改善が図られた。

現在、国内都心でも大気汚染を感じることは無く、日本の空気は良質になったと感じられる。これは、分野間の協力による技術革新により大気質の大幅改善につながったものと思うのである。今後、分野を超えた取組みにより将来の自動車技術の発展につながることを期待する。

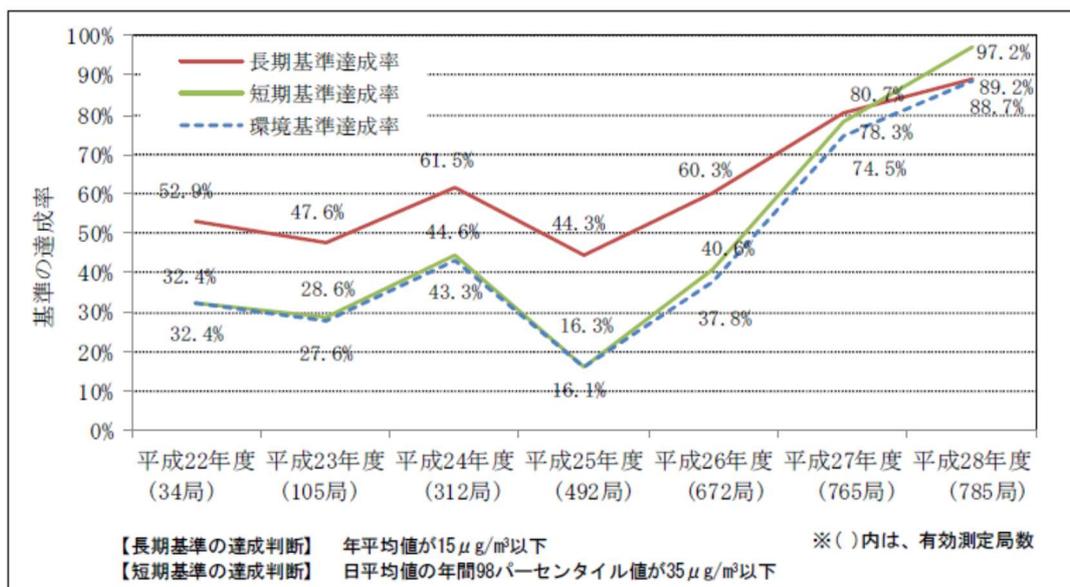


図6-2 一般局における環境基準達成状況の推移

出典：環境省ホームページ 平成28年度 大気汚染状況について 添付資料（大気汚染状況）P. 18より

## 自動車技術会 2018 年春季大会

2018 JSAE Annual Congress (Spring) in PACIFICO YOKOHAMA

主催 : 公益社団法人 自動車技術会  
 会期 : 2018 年 5 月 23 日(水)~25 日(金)  
 会場 : パシフィコ横浜・会議センター

Report: 小酒英範, 清水健一, 細谷満, 西川雅浩, 野口勝三(編集委員)  
 朝井豪(ヤンマー), 石井義範(いすゞ中央研究所), 伊東明美(東京都市大学),  
 大西崇之(クボタ), 北田泰造(三菱自動車工業), 瀬尾昌裕(出光興産)  
 Hidenori KOSAKA, Ken-ichi SHIMIZU, Mituru HOSOYA, Masahiro NISHIKAWA,  
 Katsumi NOGUCHI (JSAE ER Editorial Committee)  
 Go ASAI (Yanmar Co., Ltd.), Yoshinori ISHII (Isuzu Advanced Engineering Center, Ltd.),  
 Akemi ITO (Tokyo City University), Takashi ONISHI (Kubota Corporation),  
 Taizo KITADA (Mitsubishi Motors Corporation) Masahiro SEO (Idemitsu Kosan Co.,Ltd.),

## 1 はじめに

公益社団法人自動車技術会は、2018 年春季大会を、2018 年 5 月 23 日(水)~25 日(金)の 3 日間にわたりパシフィコ横浜(横浜市)で開催し、学術講演会は 454 件の講演と 6141 名の参加登録者で実施された。

## 2 ディーゼル関連

## 2.1 ディーゼル燃焼

OS「先進のディーゼル燃焼・計測・解析技術 I」では、ディーゼルエンジンの冷却損失に関する 4 件の発表があった。この中で、稲垣ら<sup>2-1)</sup>は、ディーゼルエンジンの冷却損失を予測する上で必要な、熱伝達係数に対する予測式に関し実験的に調査した結果について報告している。燃焼室形状の幾何学的相似則に噴霧特性に関する相似性を追加考慮した相似則を用いて、エンジン諸元や運転条件が異なる条件下で計測した冷却損失データと、定容容器内の壁面衝突噴霧火炎における壁面熱流束計測の結果を整理している。得られた結果より、従来のエンジン内壁面熱伝達式ではヌセルト数がレイノルズ数の 0.8 乗に比例するのに対し、レイノルズ数の約 0.4 乗に比例することを示している(図 2-1)。定容容器における噴霧火炎衝突点のみの局所熱流束計測値によるヌセルト数と、エンジン筒内全体からの冷却損失データに基づくヌセルト数の議論が明確に区分されることなく一緒に議論されていることは問題であるが、従来の熱伝達係数の半実験式に対する課題を提示していることは重要である。

内原ら<sup>2-2)</sup>は、直噴ディーゼルエンジンの燃焼室壁面に遮熱膜を形成し、燃焼時の壁表面温度上昇を利用して壁面熱伝達を抑制する手法に対し、ピストン頂部の一部に遮熱膜を形成することで、遮熱領域の違いが冷却損失に与える影響を 3D-CFD と実機試験により調べている。数値解析結果より図 2-2 に示す各領域のうち Area 3, 4, 5 に遮熱膜を形成した場合に冷却損失低減効果と図示仕事向上効果が最も得られることを示した。この領域に対し図 2-3 のように遮熱膜を部分的に形成したピストンと、頂面全体に遮熱膜を形成したピストンを製作し実機試験を行った結果、図 2-4、図 2-5 に示すように部分遮熱の方が、全面遮熱よりも冷却損失低減と図示効率向上効果が高いことを明らかにしている。(小酒)

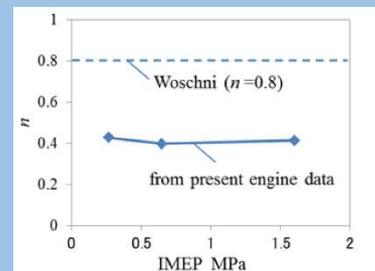


Fig. 2-1 異なる運転条件に対するヌセルト数の実験式におけるレイノルズ数の指数  $n$  の値

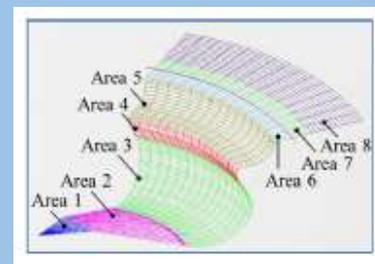


Fig. 2-2 ピストン頂部の遮熱膜形成領域

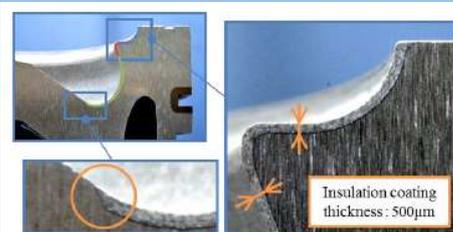


Fig. 2-3 部分遮熱膜形成ピストンの断面

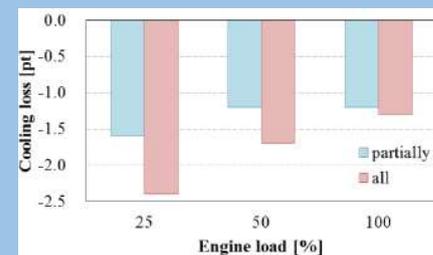


Fig. 2-4 各負荷における全面遮熱と部分遮熱ピストンの冷却損失低減効果の比較

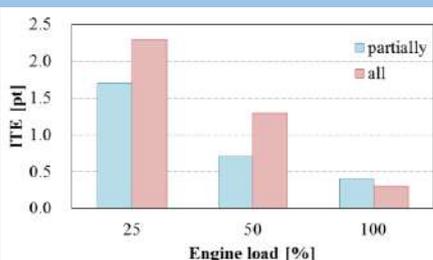


Fig. 2-5 各負荷における全面遮熱と部分遮熱ピストンの冷却損失低減効果の比較

オーガナイズドセッション「先進のディーゼル燃焼・計測・解析技術Ⅲ」では、ディーゼル燃焼におけるPM生成挙動や噴霧シミュレーションに関連する4つの発表があった。

このうち、古川<sup>2-3)</sup>らは、排ガス中のPMの生成過程把握のため、筒内で生成されたPMを採取・分析を実施するとともに燃焼条件や燃料性状がPM生成過程に及ぼす影響について調査した。PAHsおよびすすの生成履歴からフェナントレン、ピレン、ベンゾ(ghi)ペリレンの順に成長しすすが生成すること (Fig. 2-6)、吸気酸素濃度の低下によるすすの排出量の増加はすすの生成促進よりも酸化抑制が支配的要因であること (Fig. 2-7)、アロマ分やナフテン分の多いLCO (分解軽油; Light Cycle Oil) 模擬燃料を用いた場合、PAHsの生成・成長が促進され、すすの生成が増加することを明らかにした (Fig. 2-8)。

また、斎藤<sup>2-4)</sup>らは、簡略化化学反応モデルを構築し、前述の古川らの供試燃料をn-ヘキサデカン、ヘプタメチルノナンのほか、アロマ分を1,2,4-トリメチルベンゼン、ナフテン分をトランス-デカリンの4成分のディーゼルスロゲート燃料で近似させた燃料でのすす・PAHの生成量の計算結果と実験結果を比較・評価を実施した。その結果、化学反応モデルでも熱発生やPAH、すすの生成量を再現出来 (Fig. 2-9, Fig. 2-10)、吸気酸素濃度や燃料性状を変更しても同様に実験結果と計算結果が一致していることを示している。(瀬尾)

オーガナイズドセッション「先進のディーゼル燃焼・計測・解析技術Ⅳ」について明治大学の研究グループは<sup>2-5)</sup>、ディーゼル機関の更なる熱効率向上の方策として後燃え低減に着目し、噴霧先端部に滞留する過濃噴霧混合気塊の生成抑制、並びに空気導入の促進による後燃え低減を狙いとして噴射期間中に噴射率を低減する逆デルタ型噴射率パターンの応用を提案している (Fig. 2-11)。その実現手段として、同研究グループはTIZAC (Tandem Injectors Zapping Activation; 直列2弁瞬時切り替え式) インジェクタ (Fig. 2-12) を開発した。秋山らは、TIZAC インジェクタを用い、逆デルタ噴射による初期噴射率の立ち上がり急峻化 (Fig. 2-13) による熱効率向上、多段噴射時の段階噴射圧力制御 (Fig. 2-14) を実証した。

また相澤ら<sup>2-6)</sup>から、矩形噴射と逆デルタ噴射、それぞれの噴霧火炎の3種 (紫外自発光、紫外吸収、輝炎) 同時高速撮影画像を比較することで、後燃え及び冷却損失低減メカニズムへの影響を調査した報告がなされた。逆デルタ噴射の噴霧均質化による噴霧先端過濃混合気塊の生成抑制 (Fig. 2-15)、並びに噴霧先端到達抑制効果及び熱発生領域の噴霧上流側シフトについて明らかにされた (Fig. 2-16)。それにより、エンジン筒内において高温火炎のピストン壁面への衝突抑制、冷却損失低減に効果を持つことを示唆した。

同グループの研究は、気筒毎に緻密な噴射圧、噴射制御を行うことで燃焼期間の短縮、後燃え低減による熱効率向上を明らかにし、その実現手段として独自にTIZAC インジェクタを開発、提案している点で興味深い。ディーゼル機関の熱効率向上に向けた実現可能な提案の一つとして今後の研究展開に期待する。(大西)

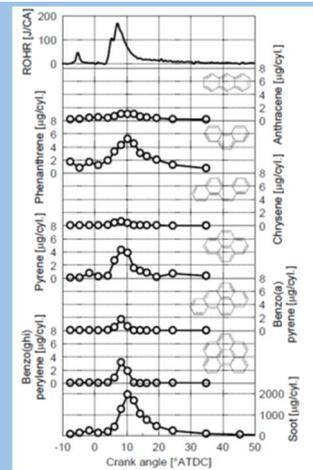


Fig. 2-6 Historical of ROHR, PAHs and soot (JIS#2, Intake O<sub>2</sub> concentration = 20.8%)

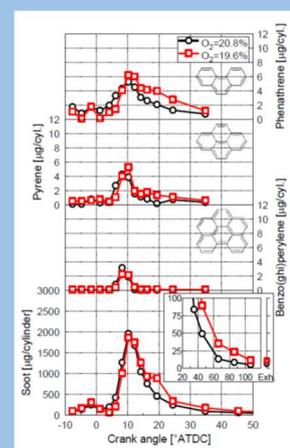


Fig. 2-7 PAHs and soot histories at the intake O<sub>2</sub> concentration 20.8 and 19.6% (JIS#2). Inserted figure shows soot mass after crank angle 20° ATDC and at engine out.

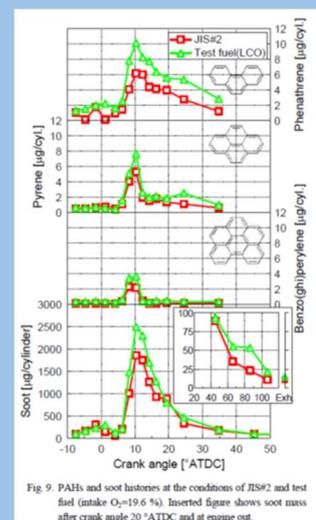


Fig. 2-8 PAHs and soot histories at the conditions of JIS#2 and test fuel (intake O<sub>2</sub>=19.6%). Inserted figure shows soot mass after crank angle 20° ATDC and at engine out.

Fig. 2-8 PAHs and soot histories at the conditions of JIS#2 and test fuel (intake O<sub>2</sub> = 19.6%). Inserted figure shows soot mass after crank angle 20° ATDC and at engine out.

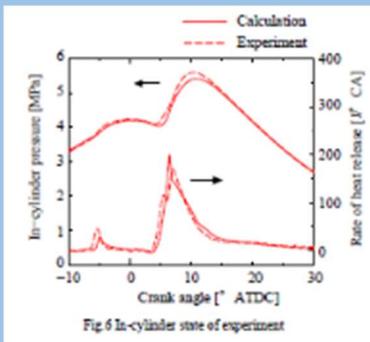


Fig. 2-9 In-cylinder state of experiment

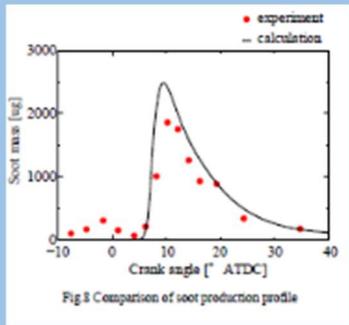


Fig. 2-10 Comparison of soot production profile

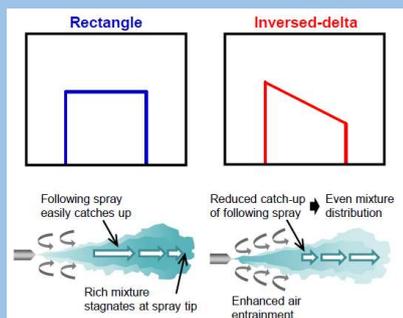


Fig. 2-11 Schematic diagram of formation process of spray tip rich mixture with conventional rectangle injection (left) and targeted reduction of spray tip rich mixture with inversed-data injection (right) in diesel spray flame

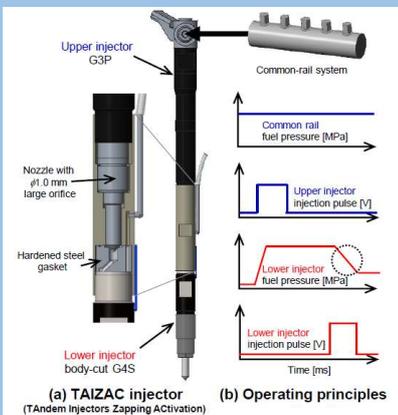


Fig. 2-12 (a) Schematic of TAIZAC (Tandem Injectors Zapping Activation) injector and (b) operation principle to realize inversed - delta injection.

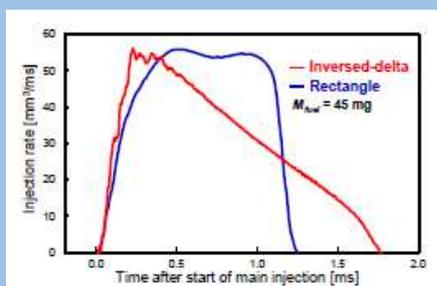


Fig. 2-13 Injection rate profiles for inversed-delta injection using TAIZAC (red) and conventional rectangle injection using G4S (blue) measured with Bosch long tube. Injection conditions:  $\phi 0.12$  mm x 9 holes (8 original radial + 1 additionally drilled axial),  $M_{fuel} = 45$  mg,  $\Delta P_{ing} = 150$  MPa for inversed-delta and 145 MPa for conventional rectangle.

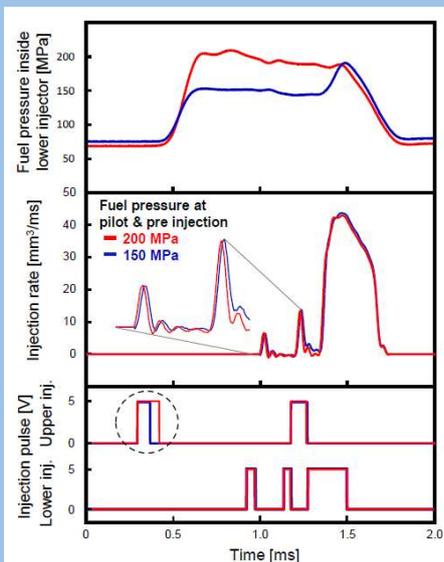


Fig. 2-14 Demonstration of injection pressure modulation among and during multi-injection pulses (low pressure pre-injections and high pressure inversed-delta main injection) by TAIZAC injector. Fuel pressure inside lower injector (top), injection rate (middle) and injection pulse for actuating upper and lower injectors. Injection conditions: rail pressure 200 MPa, pilot and pre injection pressure 200 MPa (red) and 150 MPa (blue),  $M_{fuel} = 1.4$  mg, 1.5 mg and 37.1 mg for pilot, pre and main injection, respectively.

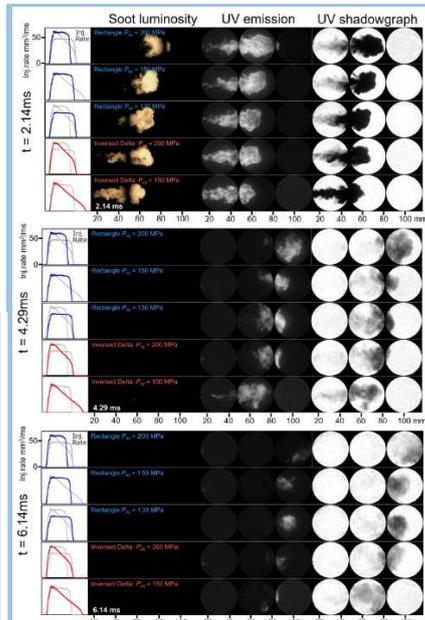


Fig. 2-15 Example high-speed images of soot luminosity (left), UV emission (middle) and UV laser shadowgraph (right) of rectangle- and inversed-delta-injected diesel spray flames at 3 difficult timings corresponding to diffusion combustion peak (top), late combustion (middle) and end of combustion (bottom). Ambient conditions:  $\rho_g = 23.8$  kg/m<sup>3</sup>,  $P_a = 4.8$  MPa,  $T_a = 1050$  K and 17% O<sub>2</sub>. Injection conditions:  $\phi 0.12$  mm orifice and  $m_f = 3.4$  mg.

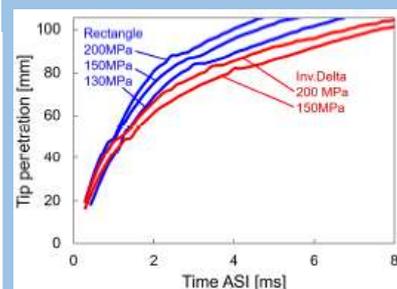


Fig. 2-16 Tip penetration for rectangle and inversed-delta-injected diesel spray flames. Ambient conditions:  $\rho_g = 23.8$  kg/m<sup>3</sup>,  $P_a = 4.8$  MPa,  $T_a = 1050$  K and 17% O<sub>2</sub>. Injection conditions:  $\phi 0.12$  mm orifice and  $m_f = 3.4$  mg.

## 2.2 ディーゼル制御技術

ディーゼルエンジンにおいて環境性能と経済性の両立は恒久的な課題であり、その実現にはエンジン制御技術の高度化が不可欠である。本セッションでは次世代のエアパス系、燃焼系制御に関する5件の講演があり、それぞれ活発な議論が行われた。本稿ではその中で興味深かった3件について紹介する。

豊田中央研究所の森安ら<sup>2-7)</sup>はEGR、VGTを搭載した4気筒ディーゼルエンジンを対象に、実機評価を行うことなく過渡適合を実現する開発手法についての検討を行った。EGRと過給圧は相互に影響しあう事から、特に過渡時のレスポンスと安定性の確保が課題である。最近ではオンボードで給排気過渡挙動を予測演算し、都度最適解を導出する制御手法も開発されているが、逆モデルを使った収束計算を行う場合は計算精度とCPU負荷の増大が問題となる。本研究では、図2-17のように、ある程度精度が保証されたバーチャルエンジンモデルを用いて、制御目標値と制御対象である状態量との関係(順方向モデル)と、順方向モデルを基に得られた、目標状態量とそれを達成するための制御目標値との関係(逆方向モデル)を求め、両者を機械学習させたNN(ニューラルネットワーク)で記述することで、複雑な予測演算することなしに高速かつ高精度な給排気系制御を実現する事を狙いとしている。図2-18、図2-19は順方向、逆方向それぞれのモデル同定結果であり、幅広い入力に対して正確な予測精度が得られていることが分かる。得られたモデルを図2-20に示すエンジン制御器に実装し、実エンジンをを用いた過渡モード運転を行ったところ、概ね良好な過渡制御性を実現することができた。今後はよりダイナミックな要求に対する制御性確立が課題と考えられるが、複雑化するエンジンシステム開発において本研究の取り組みが開発工数低減の有力手段となることを期待したい。

東京大学の山崎ら<sup>2-8)</sup>は、多段噴射によるPCGI(Premixed Charge Compression Ignition)燃焼予測モデルをECU実装可能なレベルに簡略化し、リアルタイムでの燃焼フィードバック制御の実現を目指している。制御対象は離散化した複数のクランク角度における筒内圧(図2-21)とし、目標燃焼プロファイルと一致するように燃焼逆モデルを解き、インジェクタへの最適指示値を演算させている。今回構築したモデルの場合、インジェクタ指示値演算に要する時間は、4段噴射の場合であっても約0.99msと速く(演算周波数200MHzのECUを想定)、サイクル毎の制御演算が十分可能なレベルとなっている。本報では運転中に制御目標の変化によって噴射段数指示値を3段噴射から4段噴射に切り替わった際の違和感(dp/dθの変化率)を最小化する方法についての検討を行い、図2-22のように制御目標値の変化率調整によって違和感を抑制可能であることが報告されている。山崎らの一連の取り組みはエンジン燃焼のロバスト性を向上し、RDE(Real Drive Emission)規制対応など、幅広い運転条件での燃焼最適化実現に貢献すると思われる。

トランストロンの小川ら<sup>2-9)</sup>はクランク角度センサを使用したトルク測定手法に関する報告を行っている。使用過程における燃焼系特性変化を検出する手段として筒内圧センサを用いる方法が一般的であるが、コストと耐久性に課題があるため実用化が進んでいない。本研究では直列4気筒ディーゼルエンジンのピストン-クランク系非線形物理モデルにUKF(Unscented Kalman Filter)を用いたトルク推定手法を適用し、クランク角度信号が

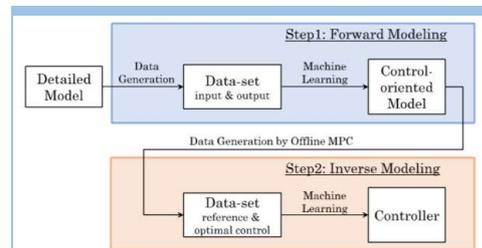


Fig. 2-17 A machine learning based process for an optimal control system design.

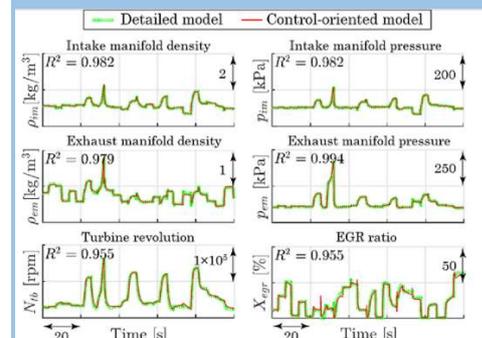


Fig. 2-18 Forward model validation results.

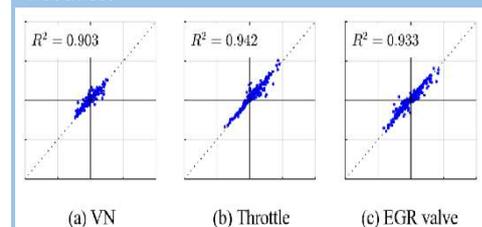


Fig. 2-19 Inverse model validation results

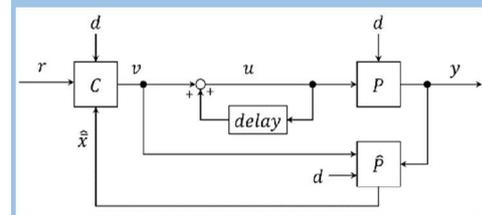


Fig. 2-20 Control system

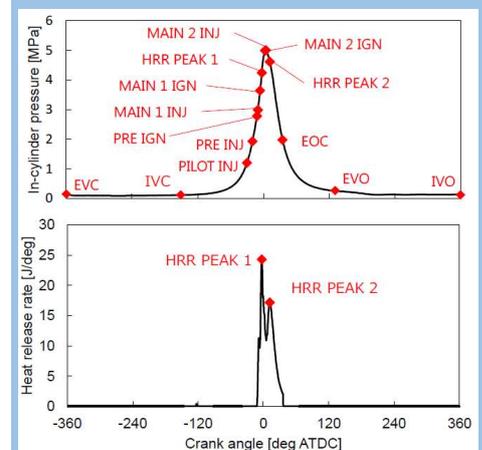


Fig. 2-21 Discrete model for 4 injections

ら各気筒の図示トルクを推定する手段を確立した。図 2-23 にトルク推定手法の概略を示す。トルク推定モデルの同定にあたってはピストンクランク系モデルを想定し、クランク角度、クランク角速度および双方の推定誤差を考慮し、与えられた図示トルクに一致するように確率密度関数を近似させている。図 2-24 は構築したトルク推定スキームを用いて開発されたトルクフィードバック制御ロジックを示す。このロジックでは定常状態で各筒の図示トルクが一様になるようにプレ、メイン、アフタの燃料噴射量を調整させており、疑似的にインジェクタ特性を変化させた検証試験において良好な制御性を確保できることが確認された。このような取り組みは、In-Service Conformity への対応など、パワーソースのライフサイクルコスト低減に向けた幅広い技術に応用できる可能性があるため、今後の研究に注目したい。(朝井)

## 2.4 先進のディーゼル燃焼・計測・解析技術 III

Krammer は、「Engine calibration under Real-Driving Emissions require modelbased development support」<sup>2,2-4)</sup> と題し、欧州で導入された RDE 規制に対応した開発プロセスの提案を行った。RDE 規制においては実路を走行して排ガス計測を行うため、勾配などの道路の物理的条件に加え、渋滞の程度やドライバーの影響を大きく受けるため、従来のような一定の試験条件というものには存在しない。したがって、あらゆる可能性を加味して試験回数を増やし、重点的に適合作業を行うべき箇所、そして改修が必要な箇所を統計的に同定する必要がある。しかしながらこうした作業に必要な数多くの試験を実車・実路で行うことは開発効率を著しく低下させてしまう。

そこで図 2.2-9 のような車両モデルを構築し、加えて試験コースも自動生成してすべてを机上で、自動で行うプロセスを提案した。こうしたプロセスにより NOx 生成量が多い運転条件を算出したのが図 2.2-10 で、このケースでは 1200rpm130Nm 付近が最も NOx 生成量が多く重点的に適合すべき領域ということが明らかとなった。

言うまでもなく、こうしたことが可能となるためには車両モデルの予測精度がある程度保障されている必要があるが、開発プロセスは増加することはあっても減ることはない状況下では、シミュレーションの精度向上と運用方法の開発という努力が今後も活発に続けられることになるだろう。

藤井らは、「2 自由度適応出力フィードバック制御に基づく 3 段噴射ディーゼルエンジン燃焼制御と定常試験による検証」<sup>2,2-5)</sup> と題し講演を行った。現在のディーゼルエンジンは、噴射装置や過給器、後処理装置などの各種デバイスを、マップを用いたフィードフォワード制御にて運用している。しかしデバイスの増加とともにマップ作成の作業が膨大となるとともに、今後利用領域が拡大する可能性がある PCCI 燃焼方式においてはロバスト性の確保のためにこれまで以上の緻密な制御が必要であり、マップ方式フィードフォワード制御では限界がある。

このため近年ではモデルベース制御の導入が検討されており、各種理論に基づく制御系の有用さの評価が MATLAB や GT-Power といったシミュレーション上で行われている。こうした中、本講演では燃焼モデルを用いたフィードフォワード制御と適応出力フィードバック制御を組み合わせた 2 自由度制御系を構築し、ベンチ上での実機の定常試験により有用性の検証が行われた。

噴射装置や過給器、後処理装置などの各種デバイスを、マップを用いたフィードフォ

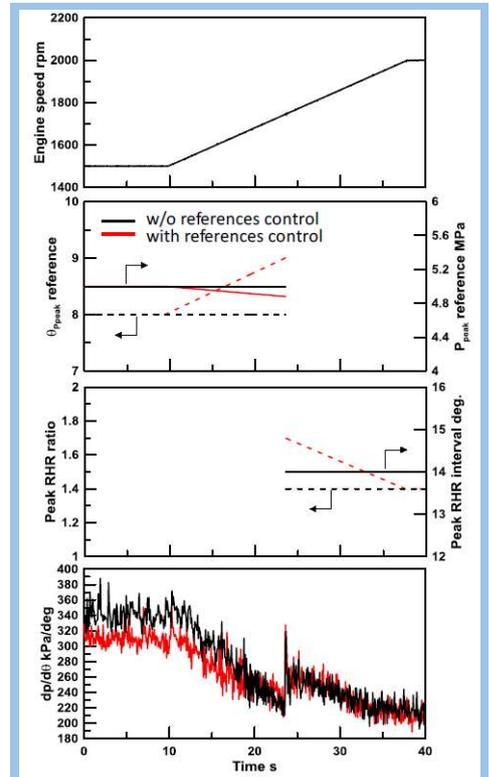


Fig. 2-23 Control experiment from 3 inj. to 4 inj. by changing

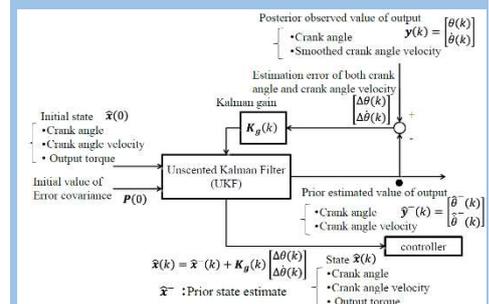


Fig. 2-24 The proposed estimation procedure based on UKF

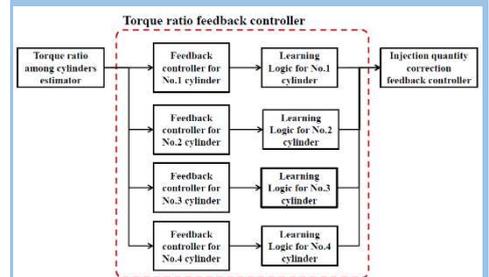


Fig. 2-25 Torque ratio feedback controller in case of four cylinders

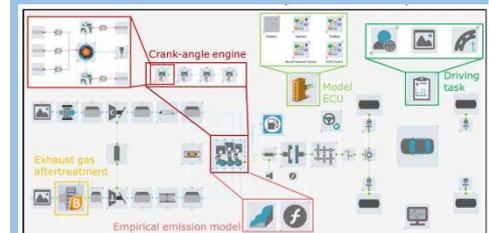


Fig. 2-26 Vehicle system model consisting of engine thermodynamics (left) and mechanical powertrain(right)

ード制御にて運用している。しかしデバイスの増加とともにマップ作成の作業が膨大となるとともに、今後利用領域が拡大する可能性がある PCCI 燃焼方式においてはロバスト性の確保のためにこれまで以上の緻密な制御が必要であり、マップ方式フィードフォワード制御では限界がある。表 2-1、表 2-2 に示されるようなエンジン、実験条件において、プレ噴射量とメイン燃料噴射タイミングを制御して、筒内圧最大圧力時期と筒内最大圧力を一定に制御することが目的である。図 2-27 に示されるように、モデルベース制御であってもフィードフォワード制御のみでは応答速度は速いものの偏差が残ってしまう一方で、図 2-28 に示すように、2 自由度制御を用いて行った制御結果においては早い応答性と小さい定常偏差が両立されていることが確認され、その有用性が実機で確認された。理論が実機に適用され検証されたことは評価に値する。

こうしたシミュレーション技術、制御技術の発展はディーゼルエンジンの今後に必要な不可欠であり、その進展に期待したい。(石井)

### 【参考文献】

- 2-1) 稲垣和久, 水田準一, 野村佳洋, 池戸隆人, 植田玲子, ディーゼルエンジンの噴霧-壁面衝突場に適用できる新しい壁面熱伝達率式の提案 (第 1 報), 自動車技術会 2018 年春季大会学術講演会講演予稿集, 文献番号 20185001
- 2-2) 内原健太郎, 石井森, 中島大, 脇坂佳史, 部分遮熱コーティングによるディーゼルエンジンの冷却損失低減についての研究, 自動車技術会 2018 年春季大会学術講演会講演予稿集, 文献番号 20185004
- 2-4) 齋藤大晃, 古川伸哉, 石井義範, 島崎直基, 石井一洋: ディーゼルエンジン筒内における PM 生成挙動に関する研究 (第 2 報) 自動車技術会 2018 年春季大会学術講演会講演予稿集, 文献番号 20185011
- 2-5) 秋山忍, 遠山義明, 猿渡蒼周, 嶋田奉三, 野口与四郎, 相澤啓哉: ディーゼル機関熱 2 効率向上のための直列 2 弁俊二切替式 (TAIZAC) インジェクタ自動車技術会 2018 年春季大会学術講演会講演予稿集文献番号 20185278
- 2-6) 相澤啓哉, 遠山義明, 秋山忍, ムハマド・ファリーズ, 猿渡蒼周, 嶋田奉三: 逆デルタ噴射ディーゼル噴霧火炎の紫外自発光・紫外吸収・輝炎 3 種同時高速度撮 自動車技術会 2018 年春季大会学術講演会講演予稿集 文献番号 20185279
- 2-7) 森安竜大, 上田松栄, 永岡真, 池田太郎, 西川一明, 野尻沙也香, 松永彰生, 中村俊洋: 機械学習を用いた実機レス最適制御設計プロセス, 自動車技術会 2018 年春季大会学術講演会講演予稿集 文献番号 20185306
- 2-8) 山崎由大, 高橋幹, 酒向優太郎, 金子成彦: ディーゼルエンジンのモデルベースと制御システムにおける負荷領域拡大の検討, 自動車技術会 2018 年春季大会学術講演会講演予稿集 文献番号 20185308
- 2-9) 小川雅俊, 曾根田弘光, 塚田知好, 栗田茂明: アンセンテッドカルマンフィルタを用いたエンジンのトルクばらつき補正制御手法の開発, 自動車技術会 2018 年春季大会学術講演会講演予稿集 文献番号 20185309
- 2-10) Johann KRAMMER: Engine calibration under Real-Driving Emissions require modelbased development support, 自動車技術会 2018 年春季大会学術講演会講演予稿集 文献番号 20185310

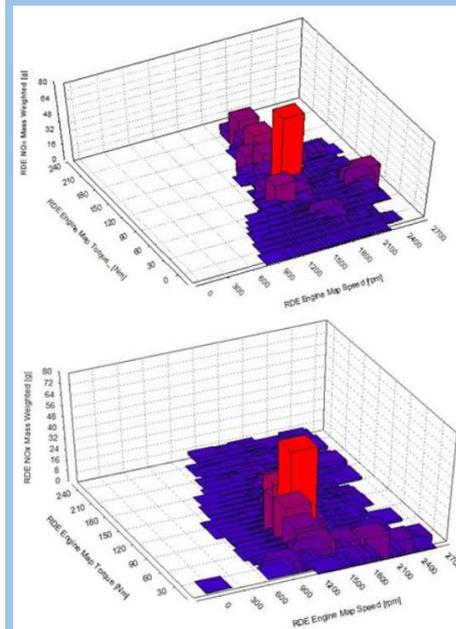


Fig. 2-27 Weighted RDE NOx map: Comparison simulation (Top) vs Measurement (bottom)

Table 2-1. Combustion model's state variables, inputs and outputs

State variables $x_k$	
Temperature of residual gas [K]	
O <sub>2</sub> molar quantity of residual gas [mol]	
CO <sub>2</sub> molar quantity of residual gas [mol]	
N <sub>2</sub> molar quantity of residual gas [mol]	
H <sub>2</sub> O molar quantity of residual gas [mol]	
Inputs $u_{model,k}$	
Total injection quantity [mm <sup>3</sup> /st]	
Pilot injection quantity [mm <sup>3</sup> /st]	
Pre-injection quantity [mm <sup>3</sup> /st]	
Pilot injection timing [deg ATDC]	
Pre-injection timing [deg ATDC]	
Main injection timing [deg ATDC]	
Boost pressure [MPa]	
External EGR ratio	
Fuel injection pressure [MPa]	
Engine speed [rpm]	
Intake manifold temperature [K]	
Outputs $y_k$	
In-cylinder peak pressure [MPa]	
In-cylinder peak pressure timing [deg ATDC]	

Table 2-2. Experimental conditions

Total injection quantity [mm <sup>3</sup> /st]	15
Pilot injection quantity [mm <sup>3</sup> /st]	2
Pilot injection timing [deg ATDC]	-25
Pre-injection timing [deg ATDC]	-15
Boost pressure [kPa]	105
External EGR ratio	0.3
Fuel injection pressure [MPa]	80
Engine speed [rpm]	1500
Intake manifold temperature [°C]	70

2-11) 藤井聖也, 高橋幹, 水本郁朗, 山崎由大, 金子成彦 : 2 自由度適応出力フィードバック制御に基づく 3 段噴射ディーゼルエンジン燃焼制御と定常試験による検証, 自動車技術会 2018 年春季大会学術講演会講演予稿集 文献番号 20185313

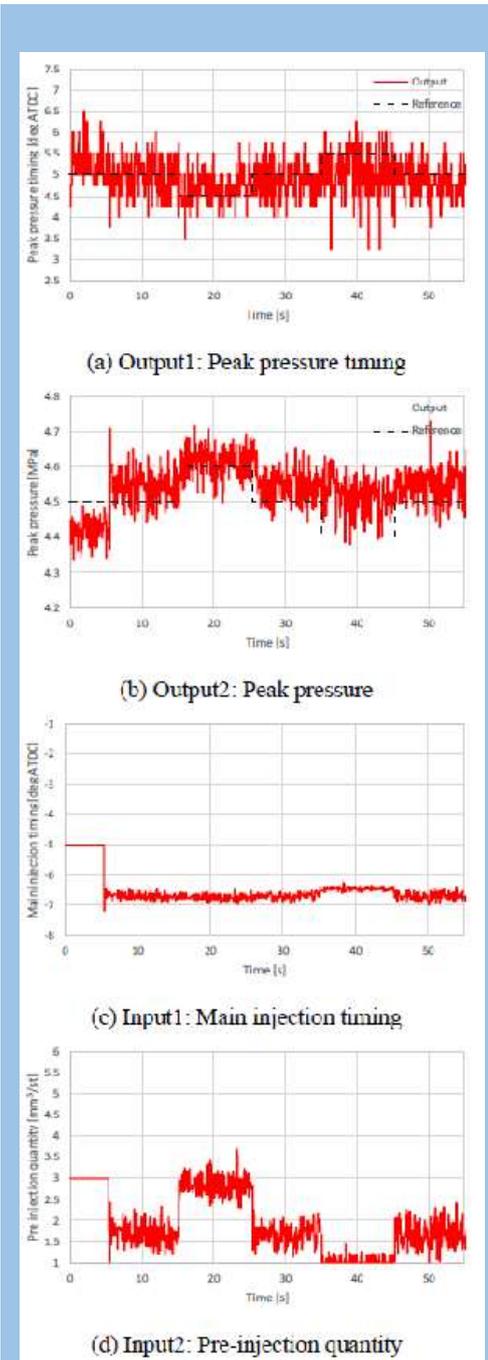


Fig. 2-27 Experimental results with FF control only

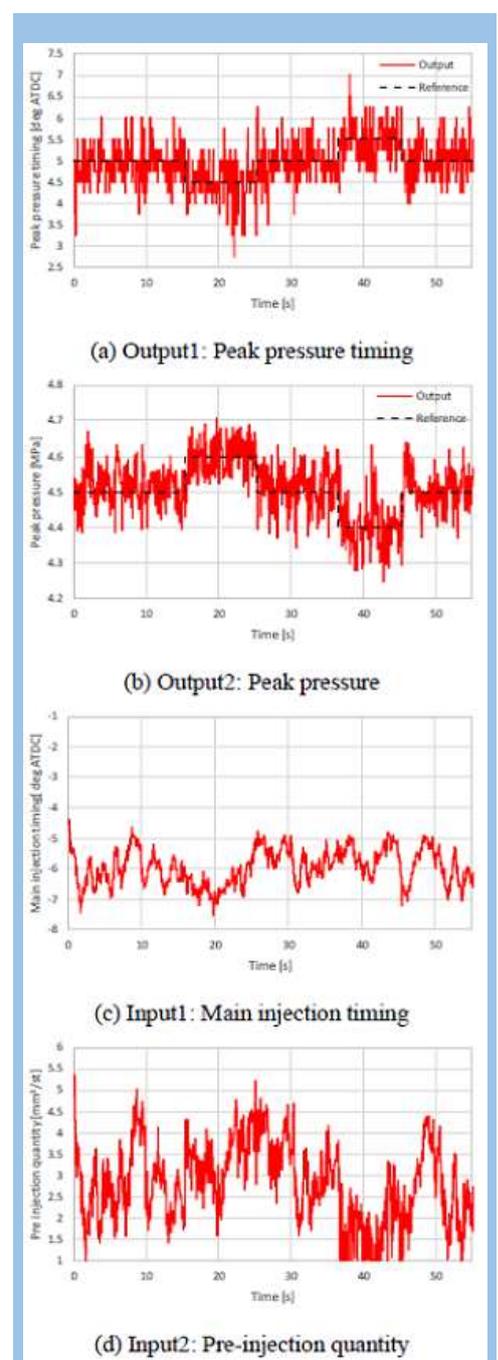


Fig. 2-28 Experimental results with 2 DOF control

## 3. SI エンジン関連

### 3.1 先進ガソリン機関技術IV

本セッションは、大会の二日目に開催され、火花点火に関する講演が3件、ガソリン直噴の高圧化についての講演が3件の合計6講演が行われた。約350名収容の会場はほぼ満席状態で、活発な質疑応答が行われ、本セッションに対する関心の高さが見受けられる。その6講演の中から、ここではガソリン高圧噴射の燃焼技術に関する、二つの講演を紹介する。

マツダの養祖らは、「ガソリン高圧噴射を用いた高圧縮比エンジンの燃焼技術（第3報）—混合気制御による熱効率改善の検討—」<sup>3-1)</sup>と題して講演を行った。圧縮比を17~19まで高め、同時にリーン化により比熱比を適正化すれば熱効率改善が可能である。しかしながら、このような高圧縮比においては、いくつもの課題が存在する。本報では、圧縮比17のガソリンエンジンの高負荷領域における熱効率改善を目的に、未燃損失低減を試みている。さらに、実用化に向けて、広い運転条件についても性能を確認している。混合気分布と燃焼性能の考察のために、可視化エンジンにて燃焼の直接撮影（図3-1）を行い、次に、非燃焼CFD計算による混合気の均質性を評価している。その結果を活用し、インジェクタの噴孔径と噴射角を燃焼室形状に応じて、個別に制御することで、混合気の均質性が向上し、熱効率38.3%を得たという。また、さらなる熱効率の改善のために、主燃焼領域での可燃範囲 ( $8 \leq A/F \leq 18$ ) の燃料量増加をねらい、噴射速度を増加させたCFD検討を行っている。この効果を検証するため、Type2Aインジェクタを新たに試作し実験を行った。図3-2に示すように、Type2Aは、圧縮比17にてスモーク性能を確保しながら、熱効率38.5%を達成し、圧縮比14での38.4%を上回ったと報告があった。また広い運転条件での性能確認として、冷間始動時の点火リタード燃焼評価を行い、2000rpm全負荷 $\lambda=1$ にて、EGR率30%での熱効率改善と安定した運転を確認している。ただし、吸気流動の代わりに噴霧流動を主体にした今回の火炎伝播燃焼においては、高速回転域まで性能を確保するために、2点点火などの複数点火による補助が必要となると説明があった（図3-3）。

上記第3報に引き続き、マツダの山川らは、「ガソリン高圧噴射を用いた高圧縮比エンジンの燃焼技術（第4報）—部分負荷運転時の燃焼性能の検討—」<sup>3-2)</sup>と題して講演を行った。本報では高圧縮比エンジンにおいて、高比熱比燃焼を実現する各種希薄燃焼方式を試験し、熱効率を最大化する手法を検討している。圧縮比17におけるガソリンエンジンの熱効率は、 $\lambda=5$ 近傍において最大値を取ると予測される。希薄燃焼方式の比較を行うため、ここでは、希薄SI燃焼、高圧噴射を用いた希薄SI燃焼、HCCI燃焼の3種類の燃焼方式を評価している。図3-4に、1000rpm、噴射量6.0mg/str (IMEP≒200kPa)の部分負荷における各種燃焼方式の図示熱効率と燃焼安定性の比較結果を示す。また理論的な熱効率改善曲線を破線で示している。希薄SI燃焼では、 $\lambda=1.3$ が安定限界だが、高圧噴射を用いることで $\lambda=2.4$ まで安定燃焼が可能となる。高圧縮比化された供試エンジンでは、部分負荷においても自己着火が発生するが、希薄化のためにノッキングとはならない。この現象を積極的に用いることで、燃焼の緩慢化を抑制し、燃焼安定性を改善させることが可能となると考えている。HCCI燃焼では、 $\lambda=5$ までの運転が可能であり、希薄条件においては自己着火燃焼が有効だとしている。しかしながら、その時の熱効率は、理論的な改善幅に対して大きな差が存在することが分かったという。その改善効果が低い原因を明らかにするため、熱効定を実施している（図3-5）。HCCI燃焼は、他の方式と比較して未燃損失が悪化する。その

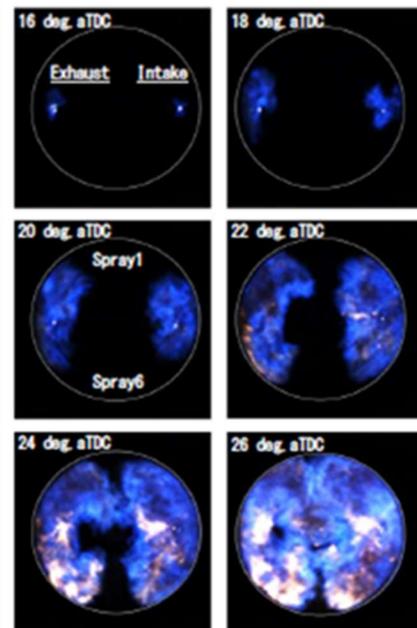


Fig. 3-1 ベースインジェクタの火炎伝播

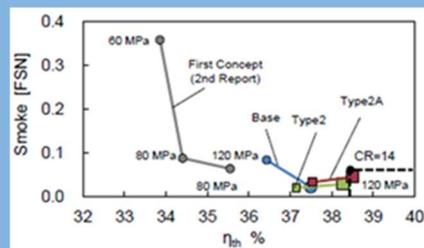


Fig. 3-2 熱効率とスモーク性能

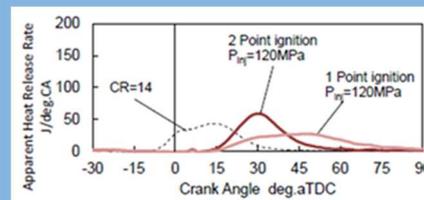


Fig. 3-3 1点点火と2点点火の熱発生率

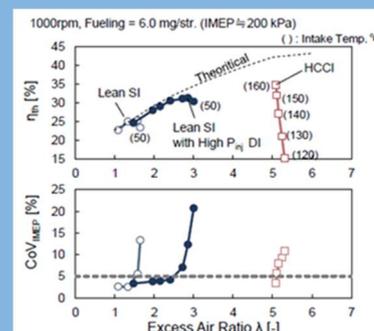


Fig. 3-4 各種燃焼方式の図示熱効率と燃焼安定

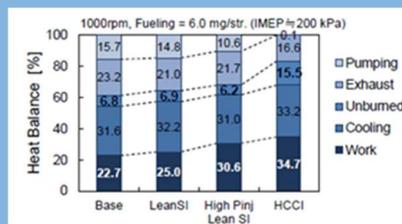


Fig. 3-5 各種希薄燃焼方式の熱効定

原因は、燃焼最高温度が 1500K を下回る低温化による、CO 酸化反応の凍結と推察している。これを回避するには、内部 EGR による筒内温度の昇温および排気未燃成分の再燃焼が有効と考えている。その改善策として、Negative Valve Overlap (NVO) 方式と Positive Valve Overlap (PVO) 方式を検討し、CO 起因の未燃損失と熱効率を比較した結果を図 3-6 に示す。PVO 方式では EGR 率 70% まで改善が持続し、CO 起因の未燃損失低減に応じた熱効率改善が得られている。また図 3-7 に燃焼方式の比較を行った空気（ガス）過剰率に対する図示熱効率のトレンドを示す。PVO 方式では、熱効率 41.3% となり、供試エンジンにおいて高圧縮比化、高比熱比化による熱効率改善効果を最大化することが可能になったという。図 3-8 に常用回転域（2000rpm）における圧縮比 14 のエンジンと本エンジンコンセプトの図示熱効率の比較を示す。中負荷および全負荷については、既報において評価した高圧噴射 SI 燃焼の性能を引用し、無負荷相当から中負荷域までは、本報 HCCI 燃焼の PVO 方式による運転結果である。結果として、本エンジンコンセプトは高負荷域の性能を悪化させることなく、部分負荷の広い領域で熱効率を改善可能であると報告があった。高圧噴射 SI 燃焼と HCCI 燃焼を組み合わせることで、高圧縮比エンジンにおける大幅な熱効率改善の可能性が確認されている。今後の実用化と更なる正味熱効率向上に期待したい。

(野口)

### 3.2 先進ガソリン機関技術 V

本セッションでは、シリンダヘッド吸気ポートに関する講演が 4 件、筒内圧センサと熱流束センサのセンサ関連の講演が 2 件の合計 6 講演が行われた。会場はほぼ満席状態で、注目度の高さが見受けられる。その 6 講演の中から、ここでは、吸気ポートタンブル流の質を評価する手法についての講演を紹介する。

SUBARU の中山らは、「ガス流動制御を用いたガソリンエンジンの熱効率向上」<sup>3-3)</sup>と題して講演を行った。本研究では、Laser Doppler Velocimetry: LDV の多点計測によりタンブル流の流速分布を把握し、そこからタンブル流の質を評価する手法を開発している。そして、ガス流動改善を起点とした希釈・希薄燃焼限界向上による熱効率最大化に取り組んでいる。供試した可視化単気筒エンジンと流動制御用の Tumble Generation Valve: TGV システムを図 3-9 に示す。タンブル流の質に着目し、フローパターンによって乱流特性がどのように変化するか調査したという。Particle Image Velocimetry: PIV により計測されたボア断面でのフローパターンを図 3-10 に示す。図 3-10(a) の Case-A では、タンブル流が圧縮 TDC まで旋回中心を保持し減衰するのに対し、図 3-10(b) の Case-B では、330deg. ATDC において旋回中心は燃焼室壁面排気側へ移動し、圧縮 TDC では排気から吸気方向の二次流れとなって、負の流速が残存する。LDV 計測より求めた流速割合  $R_{T0}$  が、幾何的に求めた上限と下限の範囲に有れば、タンブル崩壊過程でも二次流れを生じ辛くなるという。表 3-1 に供試した三つのケースの LDV3 点計測によるタンブル流の質指標を示す。目標値に入っているのは、Case-1 である。圧縮 TDC のボア断面での流速分布を図 3-11 に示す。Case-1 では、一律正流速分布となっており、二次流れが生じていない。指標目標値を外れた Case-2 では、ボア中心で流速が反転し  $\omega$  方向に、Case-3 では逆  $\omega$  方向の二次流れを生じている。次に、発火試験を行った際の EGR 限界と燃焼安定性の関係を図 3-12 に示す。タンブルの質が良い Case-1 が、最も EGR 限界が向上できている。以上よりタンブル流の質指標は、タンブル流の減衰過程を評価する指標として用いることができ、希薄・

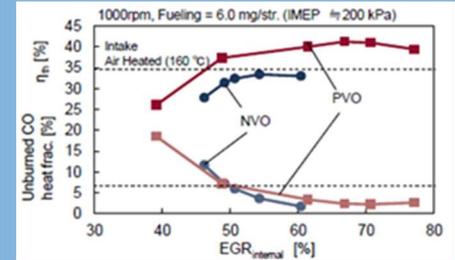


Fig. 3-6 CO 起因の未燃損失比較

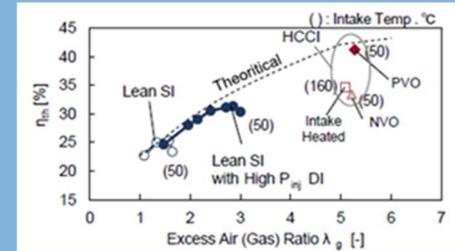


Fig. 3-7 図示熱効率のトレンド

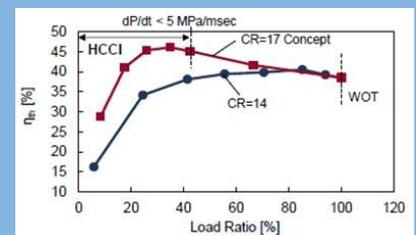


Fig. 3-8 図示熱効率の比較

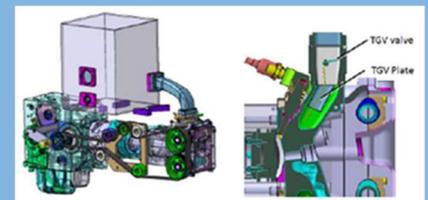


Fig. 3-9 可視化単気筒エンジンとTGVシステム

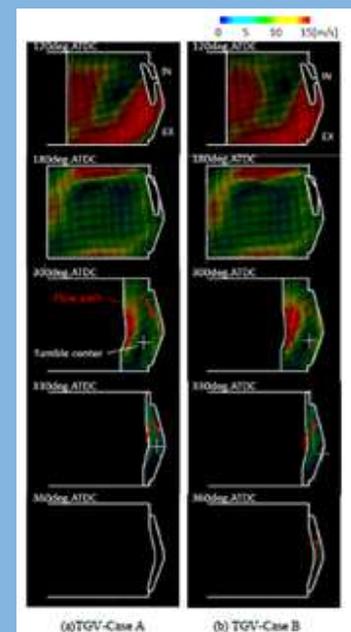


Fig. 3-10 フローパターン(PIV計測)

Table 3-1 タンブル流の質指標

$R_{T0}$		Case-1	Case-2	Case-3
$72 \leq R_{T0} \leq 100$ [%]	Front	87.2	115	-2.2
	Rear	93.5	137	28.4
	Average	90.3	126	13.1

希釈燃焼限界向上に有効である事が分かったとしている。今回得られた技術を投入し、実施した試験の結果を図 3-13 に示す。過給希薄燃焼条件では、 $\lambda=1.82$  にて安定した燃焼を実現し、図示熱効率 45.7% が達成可能であることを確認したと報告があった。今後の更なるリーン化と熱効率向上に期待したい。(野口)

### 3.3 SI 燃焼

「SI 燃焼」のセッションでは 5 件の発表があり、永野(九州大)ら<sup>3-4)</sup>が「ノッキングは連続した自着火現象で瞬時でない(速度がある)こと」を可視化試験で明らかにした発表が注目された。この発表は、 $n-C_7H_{16}$ (ノルマルヘプタン)- $O_2$ -Ar (アルゴン) 予混合気を使い、可視化装置内の両端で点火することにより、両端から進行する火炎で圧縮された未燃予混合気が自着火する様子の撮影画像(図 3-14)と、指圧(図 3-15)の観察から自着火に速度があることを明確に示したものである。図の $\zeta$ は Ar の希釈率を示す。ノッキング強度は発生時の未燃予混合気の量と自着火の速度で決まるが、この研究では未燃ガスの量を揃えることにより自着火の速度の影響のみを示したことが巧みで、図 3-15 のように Ar で希釈すると圧力振幅からノッキングが小さくなっていることが分かる。現在のエンジン開発ではノッキングが発生しないように点火進角を決めているが、欧州メーカーを中心に多少のノッキングを許容してまで燃費を高める算段をしているので、これからは自着火の速度を下げてもノッキングの強さを抑えることも研究課題に挙がってくると考えられ、時流に合致した発表である。

また、中野ら(日本工業大)<sup>3-5)</sup>の 2 件の発表は、壁面近くで「消炎」したガスを 2 次元ガスクロマトグラフィ(GCxGC)で分析することにより、燃焼の化学反応経路で発生する炭化水素の成分を特定しようとするものである。この発表では、ノルマルヘプタン( $n-C_7H_{16}$ )やイソオクタン( $iso-C_8H_{18}$ )の燃焼過程で図 3-16 のような化学種が出現している結果を示している。燃焼化学反応では、三好や酒井による反応理論に基づく研究が先行しており、この研究成果が反応途中に出現する化学種の同定に貢献することを期待している。(北田)

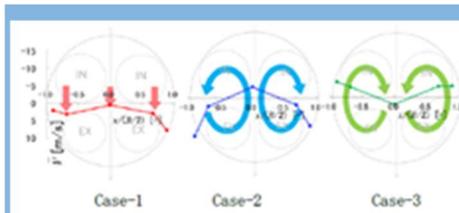


Fig. 3-11 TDC での二次流れパターン



Fig. 3-12 EGR 限界と燃焼安定性

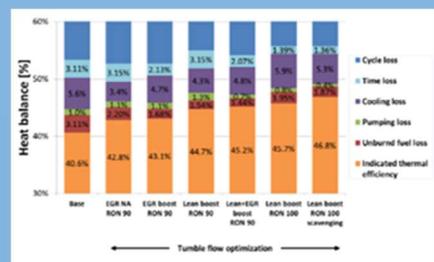


Fig. 3-13 図示熱効率

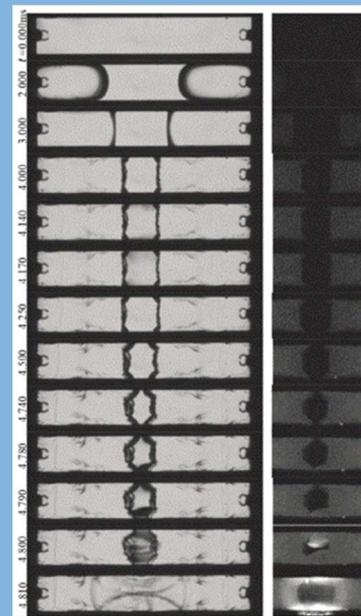


Fig. 3-14 Schlieren images and direct images ( $\zeta=0\%$ )

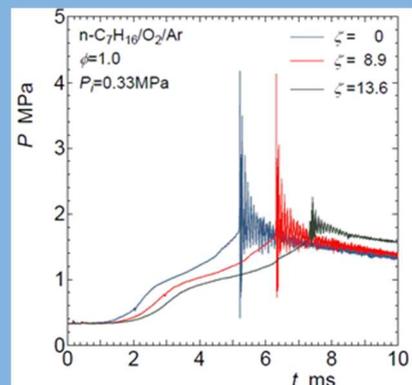


Fig. 3-15 Pressure histories

## 【参考文献】

- 3-1) 養祖隆, 神長隆史, 長野高皓, 藤川竜也, 山川正尚: ガソリン高圧噴射を用いた高圧縮比エンジンの燃焼技術 (第3報) —混合気制御による熱効率改善の検討—, 自動車技術会 2018 年春季大会学術講演会講演予稿集, No. 20185291
- 3-2) 山川正尚, 神長隆史, 養祖隆, 長津和弘, 藤川竜也, 長野高皓: ガソリン高圧噴射を用いた高圧縮比エンジンの燃焼技術 (第4報) —部分負荷燃焼時の燃費性能の検討—, 自動車技術会 2018 年春季大会学術講演会講演予稿集, No. 20185292
- 3-3) 中山智裕, 加藤真亮, 武藤涼: ガス流動制御を用いたガソリンエンジンの熱効率向上, 自動車技術会 2018 年春季大会学術講演会講演予稿集, 文献番号 20185295
- 3-4) 永野幸秀, 河野健太, 西田亮介, 山崎涼太, 北川敏明: 定容容器を用いた燃焼実験によるノック発生過程およびノック強度に関する検討, 自動車技術会 2018 年春季大会学術講演会講演予稿集, 文献番号 20185347
- 3-5) 中野道王, 稲毛基大, 高澤悟: 飽和炭化水素の分子構造が予混合 SI エンジンの排気成分に及ぼす影響, 自動車技術会 2018 年春季大会学術講演会講演予稿集, 文献番号 20185349

## 4. 排気後処理

### 4.1 排気触媒システム I (DPF)

本セッションでは DPF (Diesel Particulate Filter) に堆積したアッシュ, PM (Particulate Matter) の堆積予測, デポジットに関連した報告が 7 件なされた。そのうちの 5 件が自動車用内燃機関技術研究組合 (AICE) で実施した研究に関するものだった。その中で DPF に堆積したアッシュの堆積推定に着目したテーマについて取り上げる。

薄井ら<sup>4-1)</sup>はディーゼル車の排気後処理システムに取り付けられた DPF に堆積したアッシュの堆積形態を非破壊で定量的に解析する検討を行った。DPF 内に堆積したアッシュの量を把握するには従来, 電子天秤による重量計測で行われてきたが, X 線 CT (Computed Tomography) を用いて透過減衰率が物質の密度によって異なる性質を利用することで, アッシュのかさ密度および堆積量の分布を定量的に計測する手法を検討した。

X 線 CT 出力画像の解析方法を図 4-1 に示す。アッシュ堆積前後の DPF の X 線 CT 撮影を行い, 複数の断面画像のセット (画像スタック) の差分をとることで, 輝度データを入力する。事前に準備した密度輝度の校正曲線により輝度から密度に変換することで, アッシュの密度分布, 堆積量分布を求めるものである。異なった密度のアッシュサンプルから CT 出力画像の輝度値を測定し, 近似曲線を密度輝度値校正曲線として作成した。(図 4-2)

計測法の検証を行うため, パーナ式 PM 発生器 (DPG: Diesel Particulate Generator) を用いて, 炭化ケイ素 (SiC) 製の DPF テストピースにアッシュを堆積させた。アッシュ堆積時の X 線 CT 画像を Fig. 4-3 に示す。DPF の壁面に堆積したウォールアッシュと排出ガス下流端に堆積したプラグアッシュが X 線 CT 画像により確認された。また, ウォールアッシュとボトムアッシュの分布画像を図 4-4 に示す。白色部分がアッシュの堆積を示している。従来は, 破壊しないと確認できない分布画像である。

DPF アッシュの X 線 CT の輝度データより, DPF の強制再生を繰り返したときのアッシュ堆積量分布を計測した結果を図 4-5 に示す。ウォールアッシュが成長していき, 強制再生後においてアッシュのボトムへの移動が確認された。

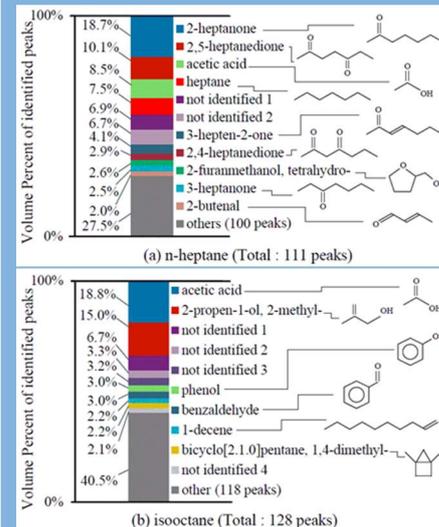


Fig. 3-16 5 Volume percent of major products.

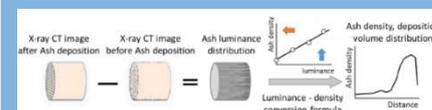


Fig. 4-1 Quantification of Ash deposited in a DPF

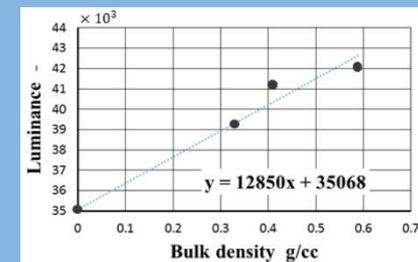


Fig. 4-2 Density-Luminance calibration curve

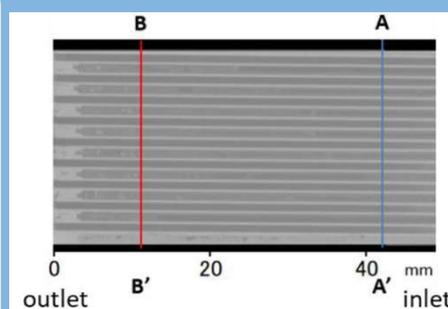


Fig. 4-3 Sectional view of DPF axial direction

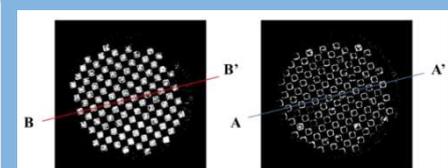


Fig. 4-4 Ash luminance data extracted by the difference processing

電子天秤で計測した結果と X 線 CT により見積もった結果を図 4-6 に示す。10~30%の誤差で、堆積分布を計測できていることが確認された。DPF の非破壊でアッシュの分布を把握でき、重量を計測せずに X 線 CT により堆積重量を把握できる手法を確立したことは画期的である。

本報告は DPG による加速したアッシュ堆積の解析検討であったが、エンジン実機で堆積したアッシュの解析、検証が今後期待される。(細谷)

## 排気システム II (SCR 等)

本セッションでは選択還元触媒 (SCR) 関連の報告が 3 件された。ここでは SCR の低温性能改善について取り上げる。

岡島ら<sup>4-2)</sup>はディーゼル重量車において更なる排出ガス低減が求められている観点から、排出ガス温度が 180°C 以下の低温域での NOx 浄化の取り組みを行った。最近導入された認証モード WHTC (World Harmonized Transient Cycle) のコールドスタート試験に着目し、低温での NOx 浄化性能改善について検討を行った。

エンジン排気システムの概要を図 4-7 に示す。ディーゼルエンジンに取付けられた選択還元触媒 (SCR: Selective Catalytic Reduction) システムは酸化触媒 (DOC: Diesel Oxidation Catalyst), 触媒付きフィルター (CSF: Catalyzed Soot Filter), SCR 触媒とアンモニア酸化触媒 (ASC: Ammonia Slip Catalyst) の構成において CSF と SCR 触媒の間に電気ヒータ付触媒 (EHC: Electrically Heated Catalyst) を配置したものである。EHC は炭化ケイ素 (SiC) 基材の担体 (1.5L) に銅ゼオライト系 SCR 触媒をコーティングしたもので、SiC 基材に電流を流すことで触媒温度とガス温度の昇温が可能である。これにより、尿素の加水分解によるアンモニアの生成と NOx の還元を行うものである。

試験結果として WHTC コールドスタート試験の区間 II において電力 0.18 kWh を供給することで平均ガス温度が約 140°C まで上昇し (図 4-8), 尿素当量比 3 で尿素水を噴射することで、NOx 浄化率が 0% から 25% まで向上した (図 4-9)。この結果から EHC を用いた触媒床昇温は 100°C~200°C の低温域での NOx 浄化性能の向上に有効であることが分った。

排出ガスのゼロエミッション化に向け、更に低温域での排出ガス低減に向けたニーズが高まっていくものと考えられ、本論文はその第一歩と考えられる。ハイブリッドエンジンとの組み合わせによる EHC-SCR 触媒等の電気エネルギーを活用した新技術の提案も今後は期待したい。(細谷)

## 【参考文献】

4-1) 薄井陽, 大橋禅, 森本溪, 草鹿仁, 福間隆雄, 北村高明, 松野真由美, 武田好央, 木下幸一: ディーゼルパティキュレートフィルタ内のアッシュ堆積・輸送に関する研究 (第一報)-X 線 CT 撮影によるアッシュ堆積密度分布の定量化-, 2018 年春季大会学術講演会講演予稿集, 文献番号 20185393

4-2) 岡島利典, 永田誠, 決得倭人, 草鹿仁, 奥井伸宜, 山口恭平: SCR 触媒床昇温による低温域 NOx 浄化特性改善に関する研究, 2018 年春季大会学術講演会講演予稿集, 文献番号 20185399

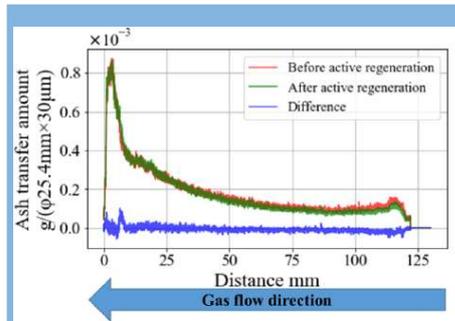


Fig. 4-5 Amount of movement of ash in

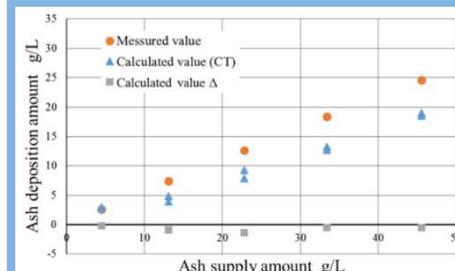


Fig. 4-6 Ash deposition amount

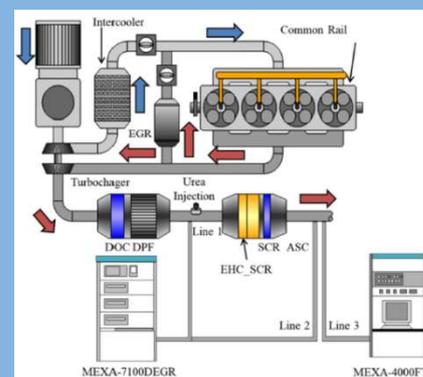


Fig. 4-7 Experimental apparatus and aftertreatment system layout

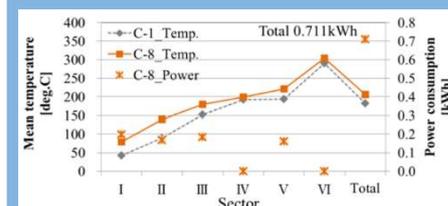


Fig. 4-8 Mean temperature of EHC\_SCR outlet gas in each sector and Power consumption

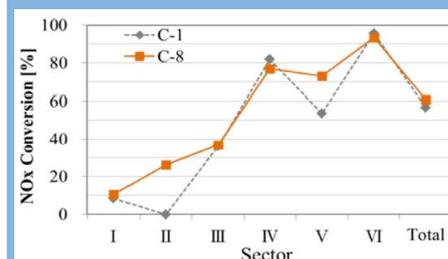


Fig. 4-9 WHTC cold deNOx performance

## 5. エンジン計測関連

### 5.1 新しい計測診断技術 I

国連欧州経済委員会 (UN-ECE) の下、PMP (Particle Measurement Programme) がエンジン排ガス中の固体粒子数 (PN) 計測法を構築したのを受け、欧州にて PN の規制が始まっている。2011 年から乗用車及び小型商用車について、ディーゼル車・直噴ガソリン車を対象に、粒子径 23 nm 以上の PN を定置型 PN 計測システムによるシャシダイナモ試験にて規制している (Euro 5c)。また、2017 年 9 月からは、車載型排ガス計測システム Portable Emissions Measurement System (PEMS) による RDE (Real Driving Emissions) 試験にて、実走行時の PN 規制も開始された (Euro 6b)。PN に関して近年注目されている事項の一つが、現在は対象外となっている粒子径 23nm 以下 (Sub-23 nm) の固体粒子の計測の要否である。主な理由は、もちろん人体への健康影響への懸念である。ここでは、「新しい計測診断技術 I (エンジン計測技術)」セッションのトータル 5 件の講演発表のうち、実路走行時の Sub-23nm 粒子を含む PN 計測に着目した 2 講演を紹介する。

堀場製作所の近藤ら<sup>5-1)</sup>は、「定置型及び車載型の粒子個数計測システムに粒径分布が与える影響」と題した発表を行った。定置型 PN 計測システムおよび車載型 PN 計測システム (PEMS-PN) によるシャシダイナモ試験結果の差異に関する校正課題を明確にした上で、PEMS-PN の検出下限を変更して、実走行条件における Sub-23 nm PN 計測への適用可能性を検証している。具体的には、CPC 内部の温度設定を変更することによって、PEMS-PN の検出下限をより微小な粒子径 (Sub-23 nm) に調整することが可能であることを示している。PEMS-PN の構成を図 5-1 に示す。このシステムは、主に 1 次希釈器、分級器、加熱触媒 (HCS : Hot Catalytic Stripper)、2 次希釈器および凝縮粒子カウンタ (CPC : Condensation Particle Counter) から構成されている。CPC の粒子径検出下限を 23nm 以下にすると、前処理サンプリング部における微粒子損失がより大きくなるため、PN 計測システム全体の検出効率の特性が粒子径に対して急峻となるという結果を得ている (図 5-2)。また、加熱蒸発管の代わりに HCS を用いることによって、高濃度の揮発性粒子の再凝縮させることなく除去できることを示唆している (図 5-3)。直噴ガソリン車を使用した PN 計測試験では、特定の条件において、検出下限を下げた車載型システムの Sub-23 nm の PN 測定値が定置型システムの測定値よりも高くなるという結果が得られた (図 5-4)。

AVL ジャパンの中村らは、「自動車や航空機から排出されるサイズ 23nm 以下を含む粒子の個数測定における計測機器の課題」と題した発表を行った。計測機器の課題に焦点を当て、排ガスの採取・希釈方法および Sub-23 nm 粒子個数測定方法について記載している。また、1.8L 直噴エンジン車で WLTC を走行した際の Sub-23m 排出割合を、3 種類の排ガス後処理システム①Three Way Catalyst (TWC)、②TWC + Gasoline Particulate Filter (GPF)、③4 Way Catalyst (4WC) で比較試験している (図 5-5)。(西川)

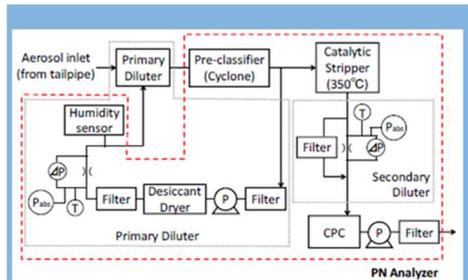


Fig. 5-1 Configuration of PEMS for solid particle number

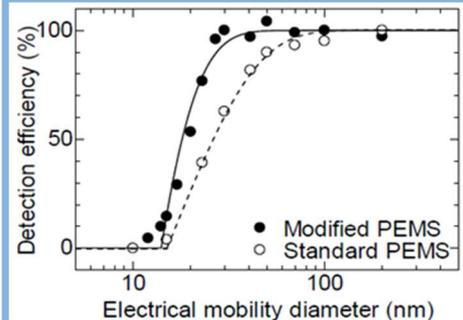


Fig. 5-2 System detection efficiencies comparing different lower detection limit settings of the CPC

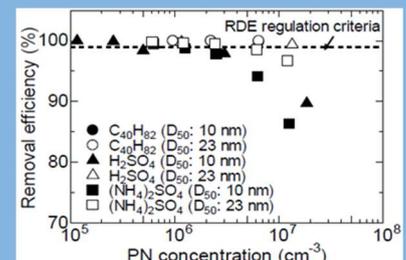


Fig. 5-3 Volatile particle removal efficiencies of the sample handling system equipped with a heated evaporation tube

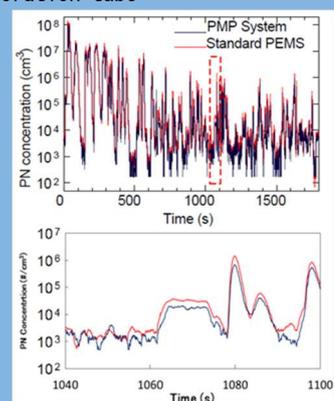


Fig. 5-4 Comparison of PN concentrations determined by the PMP system and the standard PN-PEMS during a WLTC by a vehicle equipped with a direct injection gasoline engine (above) and enlarged dashed area (below).

#### 【参考文献】

- 5-1) 近藤謙次, 金勢穎, 羽野成視: 定置型及び車載型の粒子個数計測システムに粒径分布が与える影響 2018 年春季大会学術講演会講演予稿集, 文献番号 20185174
- 5-2) Kazuki Nakamura, Waldemar Linares Rodriguez, Christos Dardiotis, Athanasios Mamakos: Instrumentation Challenges for Measuring Sub-23 nm Particle Number

Emissions from Transportation Sources 2018JSAE Annual Congress Proceedings  
(Spring) NO. 20185173

## 6. トライボロジー

### 6.1 潤滑油・潤滑技術およびトライボロジー

本セッションは燃料潤滑油部門委員会により企画されたオーガナイズドセッションである。昨今の燃費向上に対する強い要望は、ダウンサイジングターボに代表されるように、エンジンの摺動面をより過酷に変化させた。その上に摺動面には摩擦低減やそれにより増加しがちなオイル消費の低減が要求されており、これらのための技術には高い関心が寄せられている。そのため本セッションにも多くの聴講者が集まり、立ち見が散見されるほどであった。ここではエンジンのオイル消費やシリンダの摩耗さらにはそれらの解析のための新しい測定手法などについて発表があった。

東海大学の倉江、北嶋、畔津およびTPRの田牧、南郷から<sup>6-1)</sup>は、ガラス製のシリンダーを有する可視化エンジンにおいて、フォトクロミズムを用いてピストン周りの「オイル挙動を計測した結果が紹介された。フォトクロミック色素（ここではスピロピラン）を溶解させた潤滑油に紫外光を照射すると色素の分子構造が変化し休講スペクトルが変化するため着色する。この着色された部分は時間の経過に伴い元の状態須名和日無色透明となる。ガラス製シリンダの中で上下運動するピストンの所定の位置に紫外線を照射し着色させることで、その部分に存在する潤滑油の挙動を観察することができる。しかし、運転中のエンジン内でこれを観察する上で、着色部の視認性は決して高くない。視認性を上げるためには着色前後の画像を比較して差を表示する等の手法が考えられる。本研究では、図6-1に示す測定システムを使用して、着色された色の波長を含まない波長で撮影された写真と着色部の色の波長も含んで撮影された写真を同時に撮影し比較するという巧妙な手法をとっている。ピストン周りからの映像は、図中のImage splitting opticsの部分で、2波長帯に分岐されて撮像される。図6-2はスロットル全閉時のトップリング合口付近における油膜挙動を測定した例であるが、着色された合口付近のオイルが燃焼室に向かって移動している様子が分かる。一方、スロットル前回は、図6-3に示すように、当該部のオイルに大きな動きはないことも示されている。今回の測定は、油温30℃という限られた条件下での測定であった。今後は、よりエンジン実働状態に近い条件下での測定結果が発表されることを期待したい。（伊東）

### 6.2 エンジン潤滑と要素技術

「潤滑油・潤滑技術およびトライボロジー」に引き続き開催されたこのセッションでも、引き続きエンジンの燃費向上のための技術が取り上げられていた。

日産自動車からは可変圧縮比エンジンを支える要素技術について3件もの発表があった。

中村、茂木、大熊から<sup>6-2)</sup>、可変圧縮比を可能とするマルチリンク式クランク機構の開発に関する発表があった。話題になっているのですすでにご存じの方も多いかと思うが、この技術は、ノッキングが起きやすい高負荷時には低圧縮比で、ノッキングの起きにくい低・中負荷時には高圧縮比で運転することを可能とするものである。その仕組みを図6-4に示す。コンロッド大端部はL-リンクと呼ばれる部品的一端に取り付けられている。L-リン

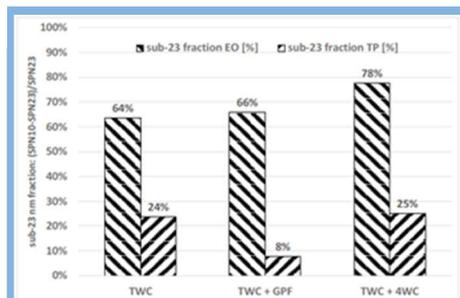


Fig. 5-5 Sub-23 nm SPN fractions at EO and TP among three ECS configurations.

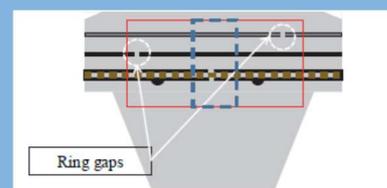


Fig. 6-1 Schematic of piston and visualization field.

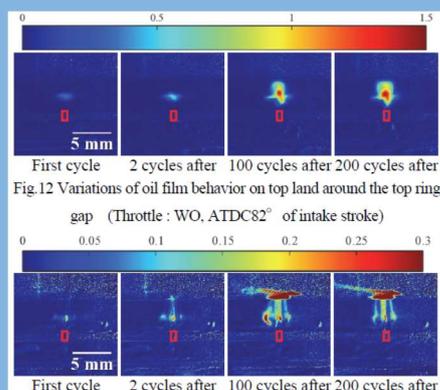


Fig. 6-2 Variations of oil film behavior on top land around the top ring gap (Throttle: Close, ATDC82° of intake stroke)

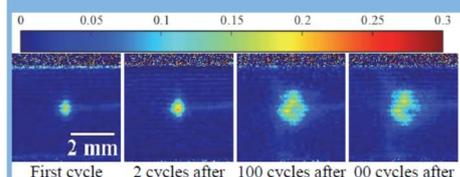


Fig. 6-3 Variations of oil film behavior on center of top land (Throttle: WO, ATDC73° of intake stroke)

クを中心の穴は軸受となっており、この部分がクランクピンに取り付けられる。L-リンクのもう一端にはC-リンクと呼ばれるコンロッド状の部品の小端部が取り付けられ、C-リンクの大端部はコントロールシャフトに取り付けられている。コントロールシャフトはクランク状になっており、この角度を図6-5に示すアクチュエータにより変化させることでL-リンクの角度を変化させ、圧縮比を変更している。クランクシャフト等に対するコントロールシャフトの位置はトルク変動に影響を与えるため、図6-6に示すような配置が検討され、図6-7に示すようなトルク変動の計算評価を経て決定されている。

上述の可変圧縮比を可能とするマルチリンク式クランク機構では、この原理により、各軸受に作用する荷重が通常のクランク機構より大きくなる。限られたスペースでこれを成立させるため、日産自動車の浜田、小林、小柳、大同特殊鋼の安東、池内精工の児玉、サンノハシの本間<sup>6-3)</sup>は、高強度ボルトの開発に取り組んでいる。過度に高強度化されたボルトでは、遅れ破壊が発生することが知られている。これは鋼材に侵入した水素が結晶粒界に集まり、亀裂が生じることで発生する。組成域締結用としては1400MPa級までが実用化されているが、この研究では1600MPaの実用化を目標としている。これを実現するために、まず結晶粒界上にフィルム上に形成されるセメントタイトが遅れ破壊を助長している点に着目し、焼き戻しを高温で行うことにより、図6-8に示すように、セメントタイトを球状に分散させることを狙った。高温焼き戻しでも十分な強度を確保するため、高C、高Si鋼をベースとし、焼き戻しなんか抵抗を高めるためにSi、Cr、Moを複合添加する等の工夫がなされている。これにより製作されたサンプルの水素の侵入しやすさがSCM440と比較されている(図6-9)新たに製作されたサンプルAは100°C付近の環境での水素の侵入量がSCM440よりも大幅に低減できていることが分かる。このような取り組みは、今回のマルチリンク式クランク機構のみならず、幅広い分野でエンジン部品の小型化に貢献できるものと思われる。

アート金属工業の國安、山口、新美、下川からはピストンスカート部にレーザ加工によりクロスハッチ形状を施した場合の摩擦に関する研究が発表された<sup>6-4)</sup>。ピストンの摩擦損失低減はエンジンの燃費向上に対し一定の寄与度を持つ。摩擦損失を低減するには、ピストンスカート部の表面粗さ低減が有効であるが(図6-10)、一方で粗さを低減したピストンでは焼き付きが発生しやすいことが知られている。そのためピストンスカートには旋盤による条痕加工が施されている。ここで紹介された技術は、表面粗さを低減させたピストンスカートにレーザ加工により図6-11に示すようなクロスハッチ加工を施すことにより、摩擦損失低減と耐焼き付き性を確保を両立させたものである。このクロスハッチを施したピストンの摩擦力を表6-1の上段に示す一般的な条痕加工を施したピストンと比較している。図6-11に浮動ライナー装置により測定された摩擦力波形を示す。図より圧縮上死点および排気上死点前後でクロスハッチは顕著な摩擦低減効果を示している。排気上死点前後はピストンスカートをシリンダに押付ける側圧が小さい時期であり、ここで効果が現れていることから、このピストンは常にシリンダとのクリアランスがマイナスであることがうかがわれる。さらに下死点前後では効果が見られないことから、クロスハッチは潤滑油が潤沢でない場合に効果を示したものと考えられる。また耐焼き付き性についても試験が行われており、図6-13に示すように、クロスハッチは従来の条痕加工よりも優れた結果を示している。どうやらピストンスカート状の溝は単に潤滑油を保持できれば良いというものではないという点が興味深い。このことは、ピストンスカート上の溝形状の最適化により、さ

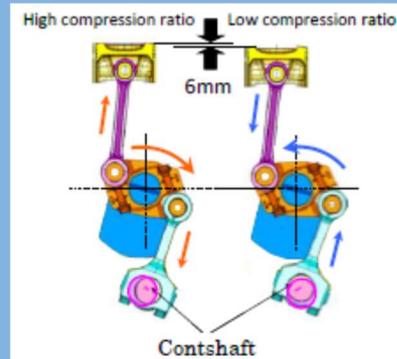


Fig. 6-4 The change of compression ratio

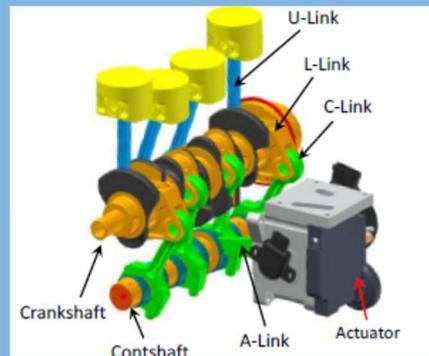


Fig. 6-5 Components of VCR system

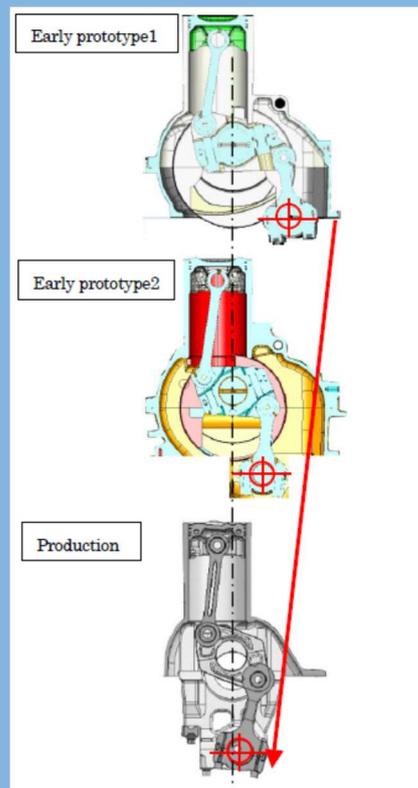


Fig. 6-6 The arrangement of control shaft

らに耐焼き付き性などの向上の可能性があることを示唆していると考えられる。(伊東)

【参考文献】

- 6-1) 倉辻風樹, 北嶋一慶, 畔津昭彦, 田牧晴治, 南郷哲哉: 可視化エンジンを用いたピストン周りのオイル挙動計測—フォトクロミズムを用いた可視化手法による低温低速条件における検討—2018年春季大会学術講演会講演予稿集, 文献番号 20185415
- 6-2) 中村勝敏, 茂木克也, 大熊悟: 動的挙動解析を活用した可変圧縮比エンジン VC-T 用マルチリンク式クランク機構の開発 2018年春季大会学術講演会講演予稿集, 文献番号 20185420
- 6-3) 浜田孝浩, 小林大介, 小柳貢士, 田辺孝司, 安東知洋, 児玉等, 本間友範: マルチリンク機構向け高強度ボルトの開発 2018年春季大会学術講演会講演予稿集, 文献番号 20185422
- 6-4) 國安篤史, 山口一守, 新美拓哉, 下川渡: クロスハッチ形状を用いたピストンスカート部低フリクション技術の開発 2018年春季大会学術講演会講演予稿集, 文献番号 20185419

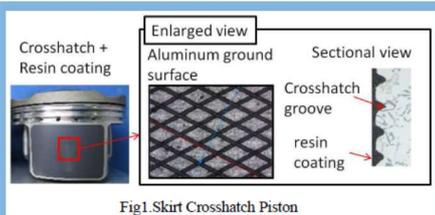


Fig. 6-11 Skirt Crosshatch Piston

Table. 6-1 Engine Specifications

Engine Type	Single cylinder, 4 stroke SI gasoline engine
Bore × Stroke(mm)	Φ80.5 × 97.63

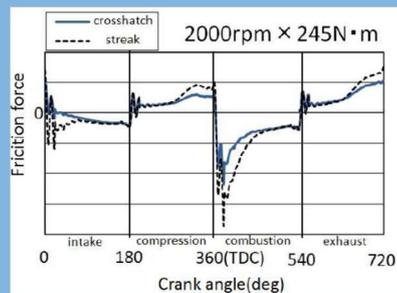


Fig. 6-12 Comparison of friction

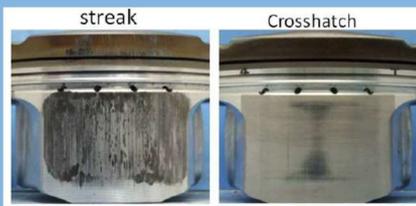


Fig. 6-13 Piston skirt appearance of after test force

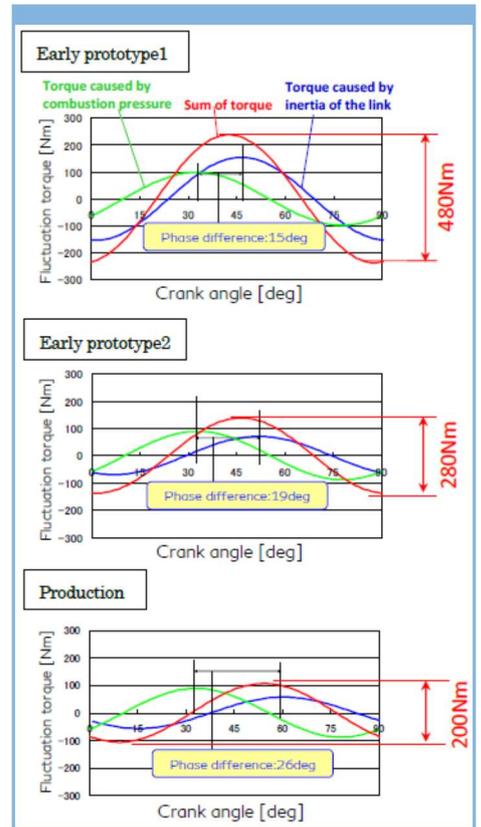


Fig. 6-7 The transition of 4th fluctuation torque

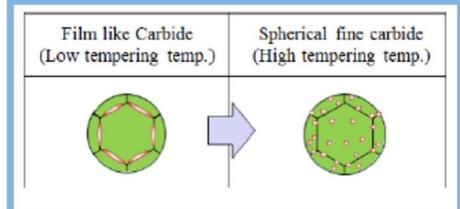


Fig. 6-8 Outline of cementite microstructure after tempering

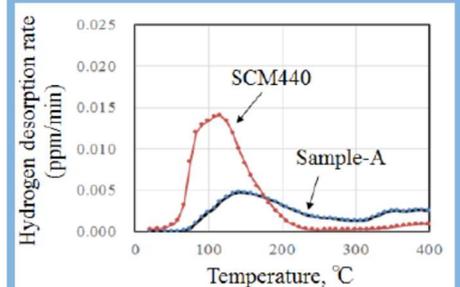


Fig. 6-9 Hydrogen desorption curve

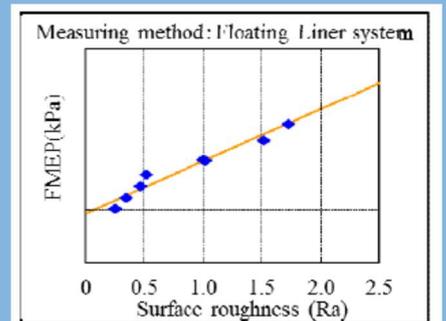


Fig. 6-10 Relationship of surface roughness and FMEP

## 7. EV・HEV 関連

今大会の電動車両関連セッションは、電動車両関連 ”xEV” 3セッション、燃料電池システム関連、パワーエレクトロニクス、走行中給電、各1セッションの計6セッションのほか、熱マネジメント、自動車制御とモデリング(2セッション)、動力伝達系、環境・エネルギー資源などのセッションでも関連する発表が行われた。今回は、独の部品関連メーカーからコスト対効果に着目したPHEVの駆動系の改善に関する発表が目についた。ここではこれらと環境対応車に関する発表、市販車両に搭載の電池の寿命に関する発表を紹介し、併せて非接触充電に関する興味深い発表の概要を紹介する。

ICEVの製造を禁止しEVの普及を図る政策をとるいくつかの動きが見られるが、EVのCO<sub>2</sub>排出量は発電の方法に依存するため、電力ミックスの如何によっては低減効果がない点が危惧されている。畑村は、EVが大量普及した際のCO<sub>2</sub>排出量の推測方法について、持続可能エネルギーに関する最近の議論をベースに述べ、より現実的で詳細な推測方法について入手可能な既存情報を引用しながら紹介した<sup>7-1)</sup>。環境政策論のトレンドを含めて体系的に紹介されており、環境対応車の評価時の課題の理解に有用であると考えられる。

従来は、Fig. 7-1に示す経産省の環境対策車のCO<sub>2</sub>排出量試算例のように、使用されている電力システムの加重平均のCO<sub>2</sub>排出量をベースに削減効果を試算していたが、実際の効果の推測に必須である、持続可能エネルギーを議論するGHGプロトコルで定められた「新たな負荷の増減に対応して増減する発電源(マージナル(限界)電源と呼ぶ)による試算」を採用し、これに必要な電源別の受電端でのCO<sub>2</sub>排出係数(Fig. 7-2参照)を電中研のCO<sub>2</sub>排出量原単位データ(発電所の建設から廃棄までを含む)から求めている。

一方、燃費ラベル値の乖離が課題となっている環境対応車の実用時のCO<sub>2</sub>排出量に関して、民間機関が行った、日米で市販されている代表的な環境対応車のe燃費データ(極端なデータを排除)とJC08燃費値、EPAラベル値の相関を比較(Fig. 7-3)し、エアコン使用や低外気温、高負荷など実走行に近い条件を含むEPAラベル値が実用燃費をよく表していることを示した。この結果に基づき、米国で市販されている環境対策車のEPAラベル値を用いて日本でのWell to WheelのCO<sub>2</sub>排出量を算出している(Fig. 7-4参照)。ここで、Well to Tankの燃料別CO<sub>2</sub>排出量はFig. 7-1のベースになった2011年のデータを、電力のCO<sub>2</sub>排出係数にはFig. 7-2の値を使用し、燃料については採掘以降廃棄物処理までを、発電所については建設から廃棄までのCO<sub>2</sub>を考慮している。さらに、EVに関しては電池寿命を15万kmと見積もって電池の製造にかかる排出量も加味している(EV、FCVは各々二つの代表的な電気、水素製造法について試算)。Fig. 7-4から、EVのCO<sub>2</sub>排出量は発電形態に大きく依存するので環境対応車の比較にはマージナル電源の特定が重要であるとしている。

一日の電力需要はFig. 7-5の例(環境省の2030の予測)に示す様に変化するが、夜間充電を前提とすると短期的なマージナル電源はコストの高い石油火力となる。この例(5月の快晴時)では昼間に大幅な余剰電力が生じるが、この時間にEVに充電しても余剰がある場合は太陽光発電が、曇天などで余剰がない場合は天然ガス火力が短期的なマージナル電源となる。一方、EVの需要増に対応した長期的なマージナル電源は、設備を増設する場合は設備投資と廃棄の費用を含めたコストが高い電源となるが、現存の設備の運用でまかなえる場合は設備投資なしでコストが高い電源となるとしている。

電源構成が、A)現状の通念どおり経済性で決まる場合、B)CO<sub>2</sub>削減を重視または適切な炭素税を導入する場合、C)省エネ計画達成が困難な際は原発を追加する場合について、

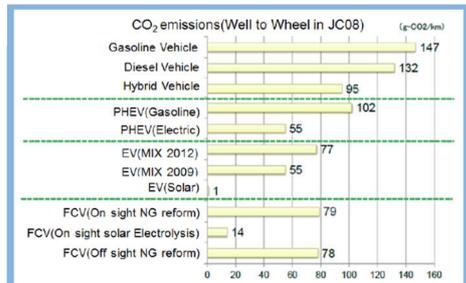


Fig. 7-1 環境対応車の CO<sub>2</sub> 排出量推定値の例

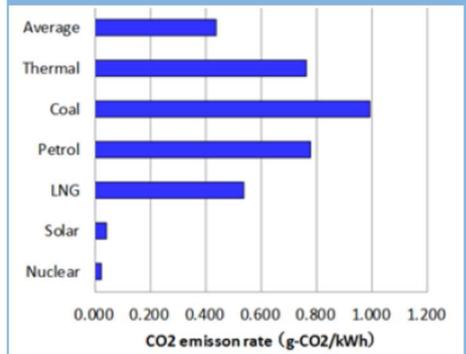


Fig. 7-2 電源別の受電端の CO<sub>2</sub> 排出係数

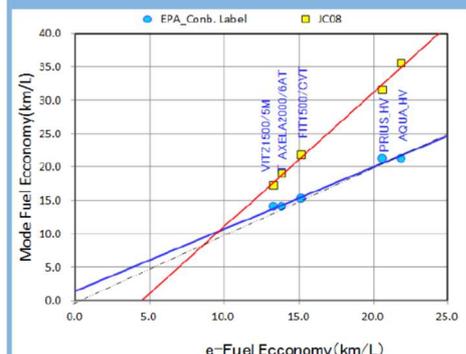


Fig. 7-3 燃料経済性の実測値と二つの公称値の相関関係

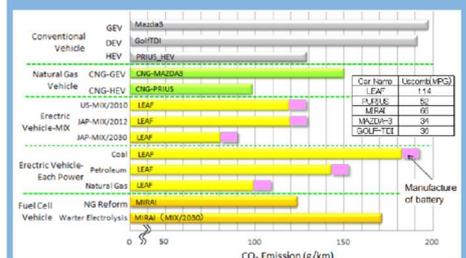


Fig. 7-4 EPA ラベル値から推測した環境対応車の CO<sub>2</sub> 排出量

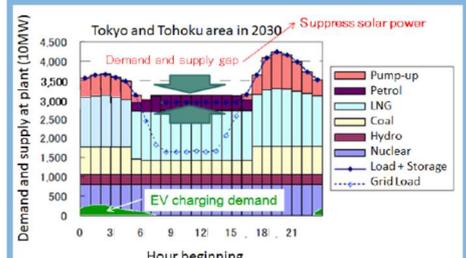


Fig. 7-5 5月の快晴日の電源別の発電量の推移

充電状況が前述の3形態に対するマージナル電源と排出量係数は Table 7-1 の様になり、CO<sub>2</sub>削減を優先するにはEVに代えてHEV普及が有利な場合があることや、屋間の余剰な再生可能エネルギーの範囲で充電できるような台数に普及を抑制する必要性などを提起している。クリティカルな仮定もあるため結果が大幅に変わる可能性も無視できないが、一つの指標として興味深い。

Continental Automotive のSabzewariらはCセグメントクラスPHEV用のコスト対効果に優れたパワートレインを提案した<sup>7-2)</sup>。コストと効率を優先するには、変速機を用いて小さめの枠のモータで広い負荷範囲をカバーするのが一般的で、DCT (Double Clutch Transmission) にモータを組み込んだP2型や、ICEによる駆動車軸(AT)とモータによる駆動軸を持ったP4型、遊星歯車による動力分割型 (Fig. 7-6 参照) などが代表的である。提案のターゲットの概要は Table 7-2 のとおりで、変速ショックのないAT仕様、AER (All Electric Range) 50km以上、最高速130km/h (EV駆動時)、160km/h (HEV駆動時) 以上を満たしたうえでP2、P4型PHEVより大幅に低いコストを目指している。Fig. 7-7に示す様に、ICE寄りのP1 (SG, Starter/Generator) 簡素化された変速機、P3 (駆動用モータ) 等で構成されており、P1、P3とも誘導機を採用してコストダウンを図っている。この構成はパラレル、シリーズ、スプリットの3動作が可能であるので、ICEとP3による大出力、EV走行、レンジエクステンダ動作が出来る。変速機はICE側に4速、P3側は固定速で、最大の特徴は、後退ギヤ、発進機能要素、シンクロメッシュ機構を削除してドッグクラッチを採用してコストダウンを図っている点である。変速時はP3が必要トルクの半分をカバーすることでトルクストールのない変速を可能にすると同時に、ドッグクラッチのスリーブをアクチュエータで操作する際に“準備“、“コンタクト“、“挿入“の3アクションで操作速度を調整することで、ショックのない早い変速を実現している (シミュレーションで最適値を求め実機で確認)。他のシステムとのコストの比較を、P2、P4、スプリットの他に発進用クラッチを持ったベンチマーク1と提案のシステムのモータをPSMに代えたベンチマーク2 (Fig. 7-6 参照) の間で実施した。結果はFig. 7-8に示すとおりで、提案のシステムのコストが低いとしている。

前述のように、高効率化と小型軽量化の観点から、小型実用HEVやEVでは変速機と小型モータを組み合わせる例が多いが、この変速機にCVTを利用する発表が2件あった。BoschのMakinoらは、高効率化とダウンサイジングを目的に開発した駒押しさえのベルトを一本にしたブッシュベルト式CVTを紹介し、様々な形式のHEVにこれを導入するシミュレーションによってCVTによるHEVシステムの最適化について述べた<sup>7-3)</sup>。Fig. 7-9に示す様に、エレメント (駒) をベルト状にガイドするLoop set beltを二本から一本にし、駒が隣接する駒を押しさす際のガイド突起の形状工夫などによって摩擦等の機械損低減を図り、従来のダブルベルト式に比べて広い変速域で効率の改善がなされている (Fig. 7-10 参照)。ベルトの曲率が小さい範囲で使用が可能になったことから、同一の変速カバー域 (RC=7) で従来より体積比で12%、モータで一般的なRC=4までの使用なら50%の削減が可能となった。

HEVの構成は、Fig. 7-11に示す様に、モータの位置によってP0~P4とSP1 (シリーズパラレル)、SP2 (動力スプリット型) に分類されるが、これらの構成にこのCVTを採用した際の効率等をシミュレーションによって求めている。検討したシステムをFig. 7-12に、シミュレーションに用いたモータ等の仕様をTable 7-3に、モータの効率をFig. 7-13に示す。検討システムのDH-CVT (dedicated hybrid Transmission) はP3-CVTのCVT

Table 7-1 EVの充電デマンド毎のCO<sub>2</sub>排出係数

Scenario	Charge Condition	Marginal Power	Emission Factor	
A	Economic Principle	night	Thermal	0.76
		daytime w/o surplus	LNG	0.54
		daytime with surplus	solar	0.04
		night with storage	LNG	0.54
B	CO <sub>2</sub> Reduce First	night	coal	0.99
		daytime with surplus	solar	0.04
		daytime w/o surplus	coal	0.99
		night with storage	coal	0.99
C	Add Nuclear	all cases	nuclear	0.02

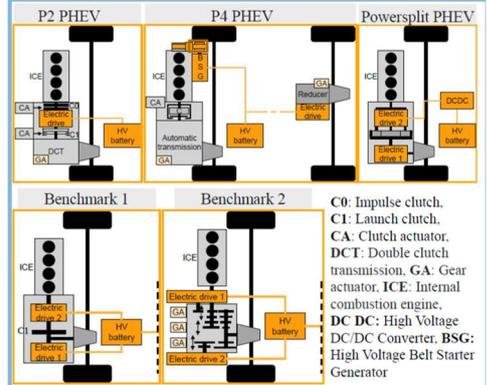


Fig. 7-6 PHEV用の代表的なパワートレイン

Table 7-2 ターゲットPHEVの主な仕様

Component	Characteristics
Internal combustion engine	MPI, 4 cylinder, naturally aspirated, 80 kW, 140 Nm, 3-way catalyst, flywheel with damper
Electric traction drive	Induction machine, 195 Nm, 55 kW peak, 17,500 rpm, liquid-cooled
Starter generator	Induction machine, 50 Nm, 20 kW continuous, 18,000 rpm, liquid-cooled
HV Traction battery	Li-Ion pouch, 108-S-1-P, 25 Ah, 10 kWh, 335 V < U <sub>dc</sub> < 450 V, liquid-cooled
Dedicated hybrid transmission	4 speed transmission, one fixe gear ratio, electric shaft synchronization, no reverse gear, no launch element

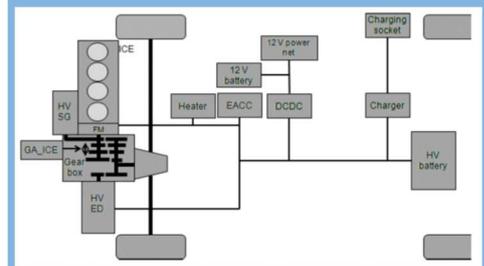


Fig. 7-7 提案するPHEV用のパワートレイン

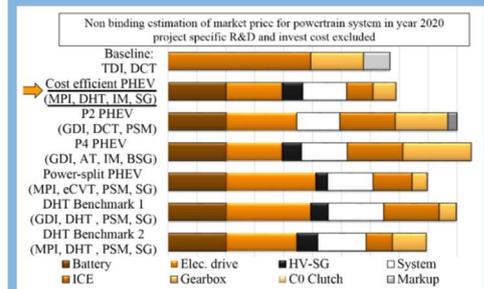


Fig. 7-8 パワートレインのコスト比較

出力、モータ、ホイール出力の各軸にサン、リング、キャリアの各ギヤを対応させて遊星歯車を挿入したもので、E-CVT（プリウスのTHSに代表される電機系の制御で残り2軸の変速比を連続的に調整するもの）を構成している。各システムをNEDCモードとWLTCモードで評価している。Fig. 7-14, Fig. 7-15に示すHEV状態とEV状態でのエネルギー消費率の結果から、駆動出力をCVTで変速して車軸に供給する場合の効率が良いことが推測できる。さらに、Fig. 7-16, Fig. 7-17に示す加速の評価とコストの評価を加味するとDH-CVTが総合的に有利であるとしている。

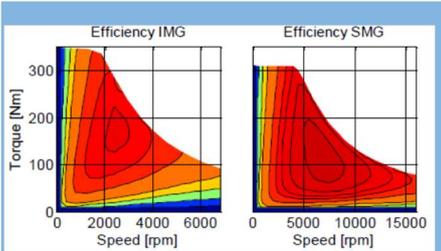


Fig. 7-13 シミュレーションに使用したモータの効率

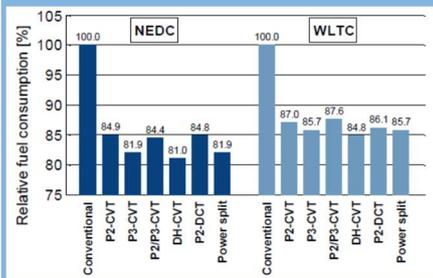


Fig. 7-14 HEVモードでの燃費の結果

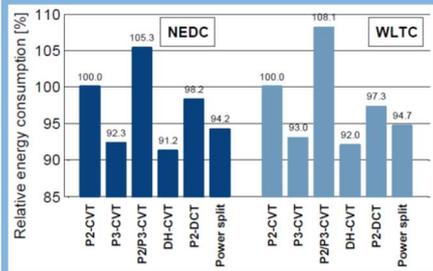


Fig. 7-15 EV走行モードでの燃費結果

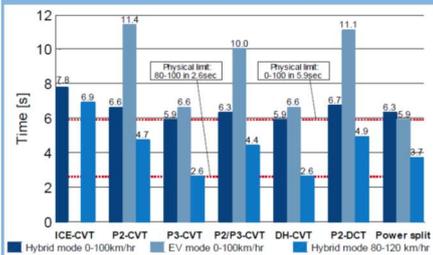


Fig. 7-16 加速性能の評価結果

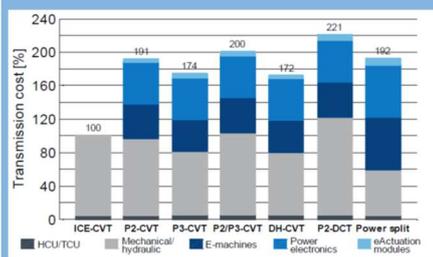


Fig. 7-17 変速部分コスト推定結果

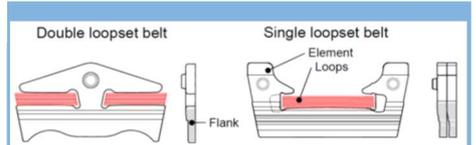


Fig. 7-9 double loop set (左) と single loop set (右)

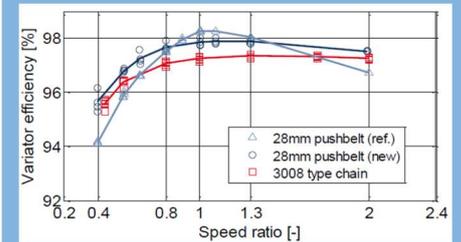


Fig. 7-10 各 loop set の効率試験結果

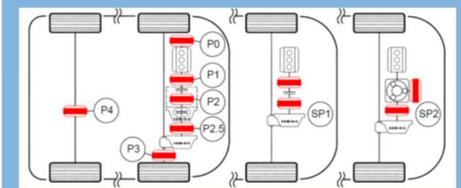


Fig. 7-11 HEVのモータの位置による分類

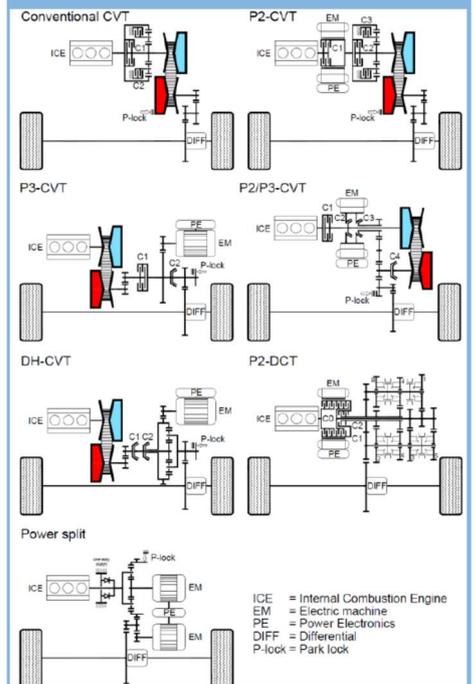


Fig. 7-12 評価を実施したHEVの形式

Table. 7-3 シミュレーションに用いた仕様

Vehicle		IMG machine	SMG machine			
Body type	SUV					
Curb weight	1600 [kg]					
<b>Engine</b>						
Type	D1TC 1.25L					
Power	99.0 [kW]					
Torque	239.0 [Nm]					
<b>E-motors</b>						
Type	Dimensions [mm] x [mm]	Peak power [kW]	Continuous power [kW]	Peak torque [Nm]	Continuous torque [Nm]	Max speed [rpm]
IMG	290x105	74	50	350	211	7800
SMG	220x214	151	93	311	170	16000
MG1	scaled	83	51	171	93	10000
MG2	scaled	151	93	311	170	16000

類似の発表が清水らからあった<sup>7-4)</sup>。CVTはプル式(チェーン)であるが、実測データを基にしたシミュレーションによって、EVのモータにCVTを付与した際の効率を求め、CVTなしでの効率が97.4%程度以下ではCVTを付与すると効率が改善すること、RC(変速のカーブ範囲)を広げるほどその効果が低下することを明らかにしている。

バッテリーは使用(または保存)によっていくつかの性能が低下するが、中でも容量低下は一充電走行距離の低下をまねき、電池の寿命を決定する重要な値である。これらの性能低下は使用条件に依存する部分が多いもののICEVに比べて市場での使用実績(特に同一電池での)が極めて少ないため実使用時の使われ方との関係が明らかになっていない面があった。齊藤らは、国産の量産BEVの使用済み/使用中電池に関する二つの調査を紹介した<sup>7-5)</sup>。一つは、Table 7-4に示す使用環境の異なる市場から電池を回収し、残存容量の測定をしたうえで解体し、容量低下の原因分析したもので、車両に搭載されたテレマティック機能で収集された電池の使用過程の情報(電池温度、SOC、積算放電容量)を用いて求めた推定残存容量(充放電サイクルによる劣化と保存劣化に分けて推測するシミュレーションモデルによる)と実測値を比較し、推測方法の妥当性を確認している(Fig. 7-18, Fig. 7-19参照)。また、解体の結果から、寿命劣化の引き金としては種々のものがあるものの、最終的に容量減少の原因は、負極上でのLi消費であることが判明した(Fig. 7-20参照)としている。もう一つは、この結果を基にした、使用中の車両のテレマティック情報を用いた使用過程車の電池の寿命予測に関するもので、各車の推定残存容量の履歴を求め、これらを統計的に処理することで、任意の経過年数での残存容量のばらつきを把握することが可能としている(Fig. 7-21)。

Table 7-4 使用地域とそこでのサンプル数

Region	US			Japan	Total
	Arizona	California	Tennessee		
Number of vehicles	5	2	8	8	23
Number of plot	35	4	20	10	69

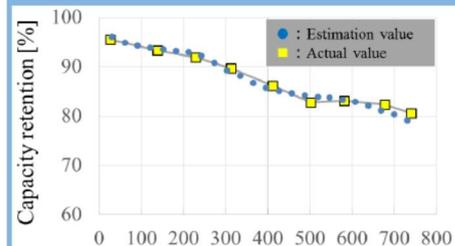


Fig. 7-18 充放電サイクル毎の推測容量と実容量変化

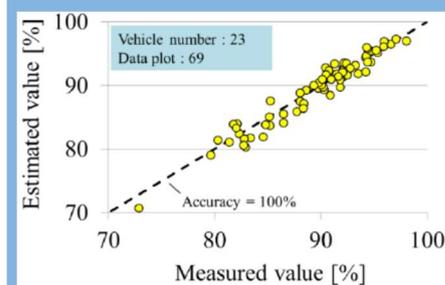


Fig. 7-19 電池寿命の推測値と実データの相関

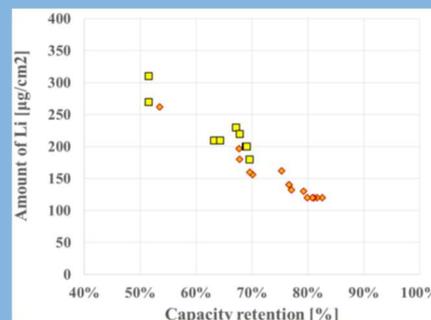


Fig. 7-20 容量変化とLiの量の関係

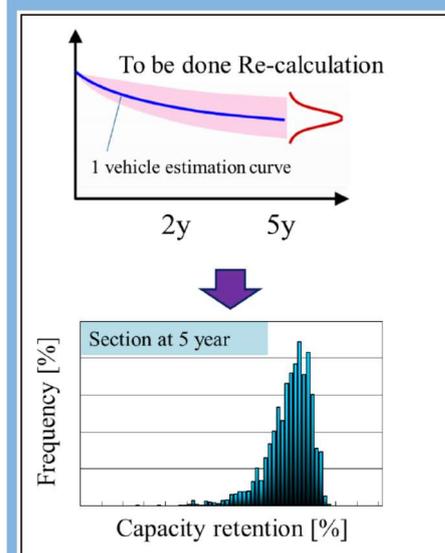


Fig. 7-21 電池劣化の分散の把握

同様の目的の発表が坪倉らからあった<sup>7-6)</sup>。市販のHEVに搭載された記録機能から車両整備時に車両とLiB(Liイオン電池)の使われ方に関する情報を収集し、その時点のLiBの状態に関する情報とセットにした大量データから実際の残容量の推移(Fig. 7-22)を求めている。この実測値と設計時に見積もった性能劣化の予測ラインに乖離があることから、次の設計に実測値を生かす方法について論じた。

BEVへの搭載電池量はコストや重量の増加というマイナス面があるため、これを補う非接触充電に関して様々な興味深い発表があった。紙面の都合で、概要の紹介にとどめる。

北条は、ライフサイクルでのCO<sub>2</sub>排出量の65%を個人用自動車占める(Fig. 7-23)が、個々の利用頻度が低く生産/運用の双方で効率面からの問題点を指摘している<sup>7-7)</sup>。車両形態別でみた10万kmあたりのCO<sub>2</sub>排出量(Fig. 7-24)から、BEVの一充電走行距離を大きくすることは不利であり都市内走行を前提とした小容量の電池にとどめ、高速道路は走行中給電による運搬用EVに積載して移動するシステム(Fig. 7-25)を提案している。運搬用EVの目指す仕様の概要はTable 7-5に示すとおりで、高速道路を制御された形で隊列走行することを前提としており、同一部分を行走することで出来る轍に相当する部分を鉄などの低摩擦材料で舗装した低ミュー路とし走行抵抗を低減すると同時に、加速等の摩擦の必要な状況ではこのレーンをまたぐ形で走行を考える等、高効率化を図るとしている。このシステムのライフサイクルにおけるCO<sub>2</sub>排出量はFig. 7-26に示す様にICEVの約半分、BEV1の約20%減となるとしている。壮大な計画であるが、二昔前に計画された、高速道路の路側帯を無人の貨物車を隊列走行させるプロメテウス計画が実現していない理由の精査が必須のように考える。

郡司らは、同じくBEVの電池搭載量を低減する手法として、交差点手前の信号待ちや徐行をする区間を利用して、この区間にだけ設置した非接触充電器で効率的に充電する方法について提案した<sup>7-8)</sup>。実際の道路での走行データを基に充電器の配置あり/なしでの車両搭載電池のSOC変化をシミュレーションで求め、停止線手前の30m程度で送電電力15kW程度の給電区間を設けることで搭載電池のSOC変化をほぼゼロに出来るとしている。シミュレーションの例をFig. 7-27に示す。黄色マーク部分が充電エリアで、この例では充電なし(赤)の4.46Wh消費に対して充電あり(青)でも0.74Wh消費している。

保田らは、PS共振式非接触充電器を用いて複数の車両に同時給電可能なシステムを提案した<sup>7-9)</sup>。想定している使用法はFig. 7-28に示す様に一台の高周波電源で何台かの車両に充電するもので、受電機能(二次コイル)のある車両が適切な位置に駐車した際のみ路面側の一次コイルに給電される。Fig. 7-29は3台用の一次コイルのうちの一つに車両の二次コイルが対向している例で、各一次コイルに直列接続されているZsatのインピーダンスがFig. 7-30に示す様にインバータ電流の大きさと高/低の二値をとることでスイッチングされる。Zsatは具体的にはFig. 7-31に示す様に可飽和リアクトルとその制御電流生成回路で構成されている。プロトタイプでの試験から、待機状態(off状態)では、一次コイルの中央部に置いた鉄製やアルミ製の空き缶の温度上昇を抑制できる電流レベルであることを確認しており、更に使用する一次コイルに金属異物がある場合もこのZsatを遮断用SWとして流用でき、システムの簡略化が可能である。

磁界共鳴式の非接触充電器が普及した際に、路面に放置された金属異物が発熱する危険があるので、充電前に危険な異物を検出することが必須となっている。橋本は危険な異物としてどこまでを検出すれば良いかを明らかにする目的で、コイル間に置いた金属物の温度をMaxwellの方程式を摂動的に解く方法で求め、温度上昇量と形状、配置の関係など

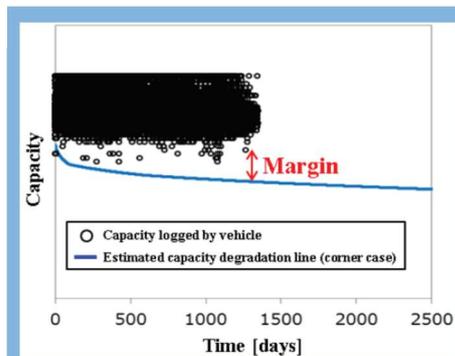


Fig. 7-22 big data から求めた残容量のプロット

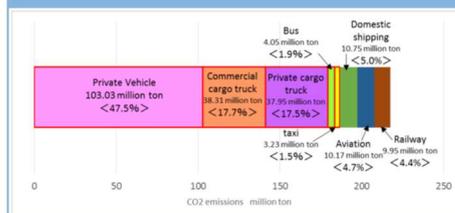


Fig. 7-23 我が国の運輸セクターのCO<sub>2</sub>排出量

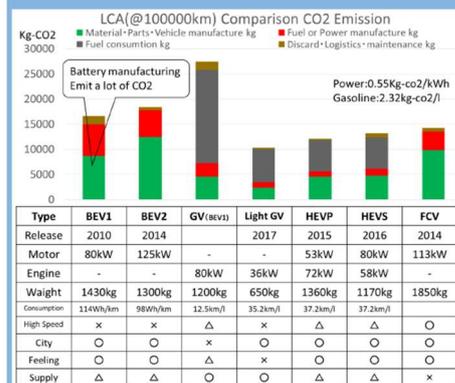


Fig. 7-24 各車の10万キロ走行時のLCA

Table. 7-5 運搬用EVの達成目標

Type	BEV1	BEV2	GV(BEV)	Light GV	HEVP	HEVS	FCV
Release	2010	2014	-	2017	2015	2016	2014
Motor	80kW	125kW	-	-	53kW	80kW	113kW
Engine	-	-	80kW	36kW	72kW	58kW	-
Weight	1430kg	1300kg	1200kg	650kg	1360kg	1170kg	1850kg
Consumption	114Wh/km	98Wh/km	12.5m/l	35.2m/l	37.2m/l	37.2m/l	37.2m/l
High Speed	x	x	Δ	x	Δ	Δ	○
City	○	○	x	○	○	○	○
Feeling	○	○	Δ	x	○	○	○
Supply	Δ	Δ	○	○	Δ	Δ	x

Maximum Speed	200km/h	Next-generation highway
Cruising Speed	160km/h	Maximum speed of conventional train
Rated Output of Motor	100kW	Air Cooling Same power as New Transit
Maximum Output of Motor	150kW	Short time.
Kind of Motor	Induction Motor SRM	Efficiency priority as highway cruising premise. (Inertial Operation by non-energized.) Rare earth less
Maximum Receiving Capacity	100kW	Trade-off between battery capacity
Battery Cap.	2kWh	Confluence to power supply lane
Lifespan	10 years 5 million km	1500km at 1day Operating rate:0.5 (12 hours) at average speed 125km/h
Size	2.5×7 to 8×2.0	W×L×H(m) Same size as New Transit
Weight	1500kg or less	Power/Weight 0.1kW/kg
Price	About 20 million yen (Same Price as the bus)	Highway in Japan, About 9200km. Up and down two-lane. The Carrier EV are required 50,000 units at the average vehicle spacing 400m, ⇒Cost of about 1 trillion yen in Japan

が実験結果とほぼ一致することを確認した<sup>7-10)</sup>。温度上昇が形状や配置によらず磁界強度の1.6~2乗で上昇することを始め、発熱量の上昇を理解するのに役立つ情報が得られたとしている。(清水)

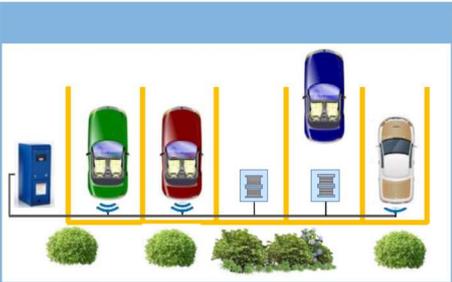


Fig. 7-28 駐車場で充電イメージ

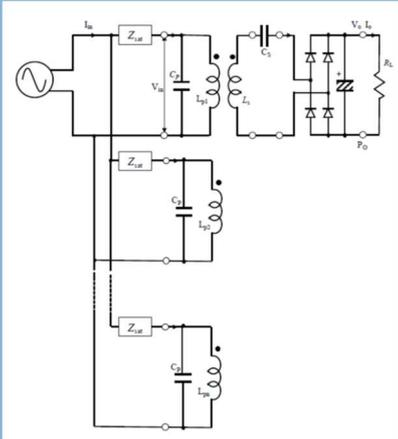


Fig. 7-29 複数同時給電システムのブロック図

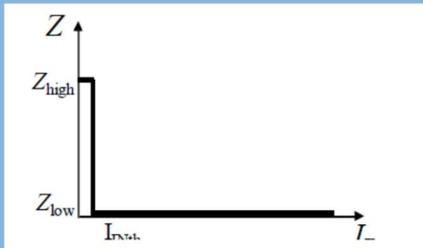


Fig. 7-30 受動要素部品 Zsat の特性

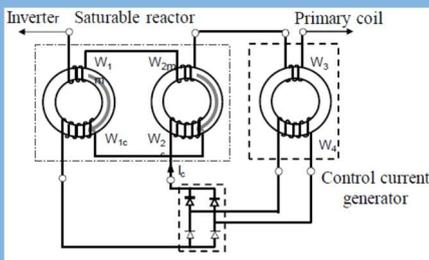


Fig. 7-31 Zsat の詳細

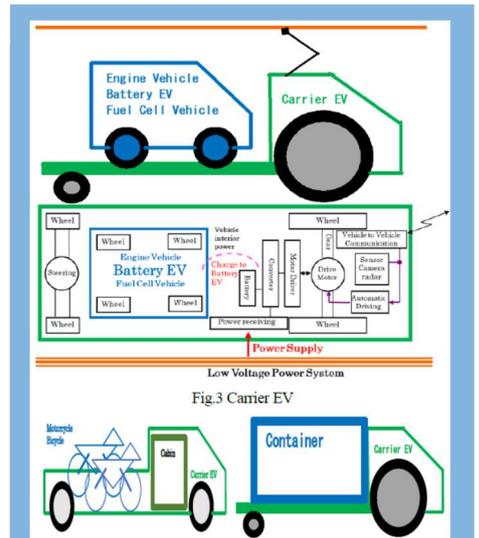


Fig. 7-25 運輸用EVの概要

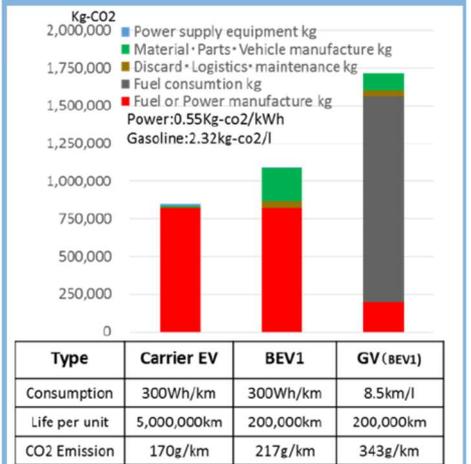


Fig. 7-26 運輸用EVとBEV, GVのLCA比較

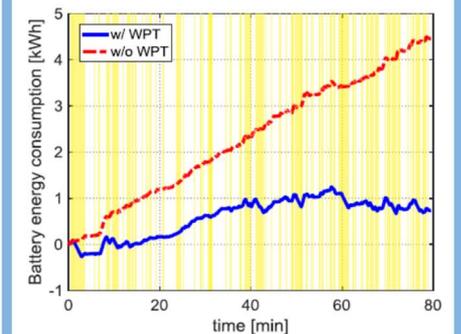
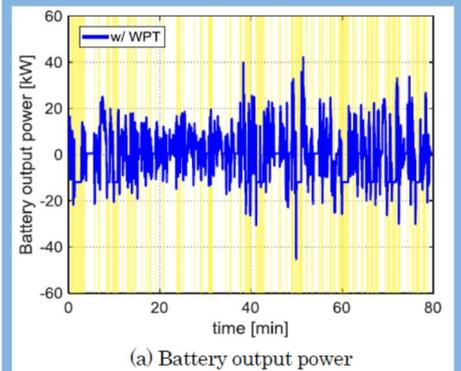


Fig. 7-27 シミュレーションによるSOC変化の例

## 【参考文献】

- 7-1) 畑村耕一：電気自動車 (EV) の走行に伴う発電所からの CO<sub>2</sub> 排出量とカーボンニュートラル走行を実現するための条件，自動車技術会 2018 年春季学術講演会講演予稿集，文献番号 20185382
- 7-2) Dr. Kiarash Sabzewari, Oscar Sarmiento, Dr. Eduardo Quintero, Mario Saborio, Andreas Riedel: Cost efficient powertrain for plug-in hybrid electric vehicle, 2018JSAE Annual Congress Proceedings (Spring), 20185444
- 7-3) Hideki Makino, Francis Van der Sluis, Gert-Jan Van Spijk, Lue Romers, Markus Kunze: Optimized electrification with the pushbelt CVT, 2018JSAE Annual Congress Proceedings (Spring), 20185318
- 7-4) 清水修, 澤出憲昭, 大畑俊和: チェーン式 CVT による電気自動車用パワートレイン高効率化の検討, 自動車技術会 2018 年春季学術講演会講演予稿集, No. 20185436
- 7-5) 斉藤治之, 斉藤宗実, 村田英則, 三浦 環, 杉田喜徳, 枚田典彦, 新田芳明: 電動車両駆動用電池の耐久性能設計及び劣化現象解析, 自動車技術会 2018 年春季学術講演会講演予稿集, 文献番号 20185437
- 7-6) 坪倉英裕, 宮下拓也, 川村雅之: ビッグデータと統計手法を用いた車両用 Li-ion 電池の性能設計最適化プロセスの構築, 自動車技術会 2018 年春季学術講演会講演予稿集, 文献番号 20185022
- 7-7) 北条善久: 高速道路における車両運搬 EV への走行中給電システムの検討, 自動車技術会 2018 年春季学術講演会講演予稿集, 文献番号 20185093
- 7-8) 郡司大輔, Bodriquez Lopes Ricardo, 人見尚弘, 向井善也, 下村洋輔, 松田靖之, 居村岳広, 藤本博志: 走行中ワイヤレス給電の市街地道路への展開に関する基礎検討, 自動車技術会 2018 年春季学術講演会講演予稿集, 文献番号 20185095
- 7-9) 保田富夫, 福島喜博: 複数車両への同時給電可能なワイヤレス給電システム, 自動車技術会 2018 年春季学術講演会講演予稿集, 文献番号 20185439
- 7-10) 橋本俊哉: 非接触充電における金属異物の発熱量の最大値に関する研究, 自動車技術会 2018 年春季学術講演会講演予稿集, 文献番号 20185440