

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 2 No. 3 2012

JSAE エンジンレビュー

< 前編 >

特集 1：自動車技術会春季大会レポート

特集 2：EVS26 レポート

古典を辿る：熱損失の経験式

NEWS & INFORMATION

公益社団法人 自動車技術会・編集会議
JSAE エンジンレビュー編集委員会：編著

< 後編 > 純EVの現状と課題，PHEVの優位性，春季大会
EV,HEV 関連は2012年10月15日発行予定



公益社団法人 **自動車技術会**

コラム●エンジン技術者を目指す若者の芽を摘むな ー純EVか？PHVか？はたまたICEか？ー：小栗 彰／編集委員	1
特集1：自動車技術会春季大会レポート	2
学術講演	2
フォーラム	13
特集2：学会レポート ーEVS26ー	18
古典を辿る：熱損失の経験式（Woschniの式）	20
NEWS & INFORMATION	25

■ JSAE エンジンレビュー編集委員会

委員長： 飯田 訓正 （慶応大学）
副委員長：村中 重夫 （元日産自動車）
幹事： 川那辺 洋 （京都大学）
委員： 井上 香 （堀場製作所）
 小栗 彰 （福井工業大学）
 金子 タカシ （JX 日鉱日石エネルギー）
 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）
 佐藤 唯史 （ケーヒン）
 清水 健一 （産業技術総合研究所）
 下田 正敏 （日野自動車）
 鈴木 央一 （交通安全環境研究所）
 沼田 明 （三菱重工業）
 平井 洋 （日本自動車研究所）
 藤井 厚雄 （本田技術研究所）
 山崎 敏司 （編集）

発行所： 公益社団法人 自動車技術会
発行日： 2012年9月20日
発行人： 新井 雅隆 （群馬大学）
〒102-0076 東京都千代田区五番町10-2
電話：03-3262-8211

●コラム

エンジン技術者を目指す若者の芽を摘むな —純EVか？PHVか？はたまたICEか？—



編集委員
小栗 彰
Akira OGURI

福井工業大学 工学部機械工学科
Department of Mechanical Engineering
Fukui University of Technology

「内燃機関は死なない」…かねてからの持論である。いや、むしろ近年EV、PHVが急速にマスコミに大きく取り上げられるに従い、益々その意を強くしている。ETR(Engine Technology Review)2010.8月号での村中主幹による「オピニオン」:“アフォーダブル”でない“マジョリティ”になれない(ICEはその条件を適えているとの明確な示唆)しかり、昨年11月に金沢工大で開催された機械学会北信越エンジンシステム研究会における交通安全環境研究所の河合首席研究員による講演内容や、同僚の福井工大機械工学科大嶋講師の見解など同様の意見には枚挙にいとまがない。エンジン研究に取り組む人々の一致した見解であろう。世の中の動向に対し折れて簡単に引き下がるなどということは、100年以上の長きに亘り連日連夜労苦を重ねて研究開発に打ち込んで来られた、我々の大先輩であるエンジン技術者の方々への冒瀆ですらある。

最近、エンジンそのものの開発に真正面から取り組んだ成果がマツダ、ダイハツから市場に送り出されていることが、やけに気に入り、その努力に対して感嘆している。その反面、EV、PHVに大きな力を注いでいるように見える大メーカーはこのままの開発の進め方で問題ないのだろうかとの危惧を覚える。

昨年11月、本学で学外から講師の方を招いての講演会が開催された。テーマは「福井に電気自動車の時代がやってくる」。とりまとめはEVに注目する他の学科。ここでその講演者は、地球温暖化の原因はCO₂であり、エネルギー問題への対処は喫緊の課題などお決まりのお題目を延々と並べ尽し、だからこれからはCO₂を出さないEVだと胸を張ってその有用性を滔々と説き続けた。温暖化の原因はCO₂ではないとの意見も相当数(あるいは物理学者の大半か?)あるではないか。若者を、いや一般の方々をも洗脳してはいけない。誤った(とは必ずしも言い切れないのかも知れない)あるいは固定観念化されてしまった表層だけの意見を持ち出してEVのメリットのみを前面に声高に押し出しているように思う。私自身、担当する自動車関連の授業において常日頃、「次世代自動車はEV、PHV、FCVとは限らない。エンジンは生き残り続ける。新しい動力源には必ずインフラ整備の課題がついてまわるのだから」と、この思いを伝えている。また2級自動車整備士を志す学生たちには、「だから整備士になっても喰いつぶぐれはないヨ」と彼らの不安感を払拭させることに心を砕いている、何も知らない学生たちに真の動向を伝えることによって。

肝心のICE研究開発、現状はどうなっているのだろうか？日産は「クリーンディーゼル搭載のX-TRAIL」を送り出して世の反響を探っている。ホンダもアコードに優れたディーゼルを搭載する。ひるがえってトヨタはどうか。鳴り物入りで登場したディーゼル用後処理装置DPNRはすっかりトーンダウンしている。10数年前には「潮流は過給直噴+ダウンサイジング」との掛け声のもと、ガソリン直噴エンジンの研究開発が推進されていたことも思い起こす。それが今では高級車用のエンジンの一部に採用されるに留まり、それにポート噴射との組み合わせ(合計16本のフューエルインジェクタ+制御用ECU)という高価なシステムとなっている。その反面、欧州では上述の潮流を確実に取り込んだVWのTSIに代表される数多くのクルマが走り回っているという(どのくらいお金がかかっているかはわからないが)。「いいクルマをつくらうよ」という社長のスローガンを受けて、こちらあたりで舵を切りはじめて欲しい。「ハチロク」や「VALVE MATICを改良したエンジン搭載カロラのフルチェンジ」では物足りなくて、もっと飛躍的な発展をとげた新エンジンの登場を期待したい。

ここまでICEを応援する雑感を勝手に展開してきた。冒頭でも述べたように元来ICE擁護派の私としてはこの内容に一点の曇りもないと信じる。読者の皆様のご意見は如何であろうか。このあとEV、PHVの技術開発最新状況について詳細な報告がなされることになっているため、私自身食わず嫌いのところがあるかもしれないという謙虚な気持ちで勉強させていただこうと思う。

最後に、5/10 ER委員会後の意見交換の場における飯田委員長のお言葉を借りて、この章をしめくくるとしたい:「エンジン技術者を目指す若者の芽を摘むな」

特集 1：自動車技術会春季大会レポート 学術講演

Report of 2012 JSAE Annual Congress (Spring) in PACIFICO YOKOHAMA

編集委員：佐藤 唯史，下田 正敏，鈴木 央一，川那辺 洋，新井 雅隆，井上 香，金子タカシ，藤井 厚雄
上智大学：鈴木 隆

Tadashi SATO, Masatoshi SHIMODA, Hisakazu SUZUKI, Hiroshi KAEWANABE, Masataka ARAI, Kaori INOUE, Takashi KANEKO,
Atsuo FUJII (JSAE ER Editorial Committee)
Takashi SUZUKI (Sophia University)

日 時：2012年5月23日（水）～5月25日（金）

会 場：パシフィコ横浜（神奈川）

主 催：公益社団法人 自動車技術会

1 先進ガソリン機関技術

「先進ガソリン機関技術 I」では、過早着火やノッキングの理解・抑制を背景とした基礎研究を中心に講演が行われた。その中から 2 件の講演を紹介する。

Wong ら¹⁻¹⁾は、急速圧縮膨張装置（以下 RCEM）を用いて、シリンダ壁温度と吸気の制御を行い、温度成層がノッキング強度に与える影響について調査している。シリンダ壁の温度分布を制御するために、シリンダ壁の縦方向に循環水を流す 8 箇所の流路が設けてあり、図 1-1 に示すように、異なる温度の循環水を流すことによって、シリンダ壁の温度分布 4 パターンが選定されている。本研究では、シリンダ内の混合気流動や温度分布を評価する目的で数値計算も行っており、シリンダ壁の温度分布に沿って、混合気の温度分布が形成されている様子が図 1-2 に示されている。Pattern A の温度分布はほぼ均一だが、Pattern B は点火プラグから対壁に向けて下降する温度分布であり、その逆方向の温度勾配が Pattern C である。また、点火プラグから対壁に向かって、左側から右側に上昇する温度分布が Pattern D である。RCEM によるノッキング強度の実測値は表 1-1 に示す通りであり、点火プラグから火炎伝播の方向に混合気の温度が上昇する Pattern C において、ノッキング強度が最も大きい結果となっている。また、火炎伝播の方向と温度勾配の方向がほぼ直交する Pattern D においてノッキング強度は最も小さく、混合気の温度成層を制御することにより、ノッキング強度の低減が可能であることを実証している。

ピストンのトップランドとシリンダの隙間であるクレビスで、ノッキングが発生する事象を想定し、定容燃焼容器を用いた基礎研究を徳留ら¹⁻²⁾は報告している。図 1-3 に示す定容燃焼容器は、上死点付近のエンジン燃焼室を模擬しており、内径 126mm・高さ 16mm の円柱形を成し、点火装置は容器中心に設置されている。クレビスを模擬した副室は、内径 5mm・長さ 50mm の円柱形であり、定容燃焼容器の外周付近に設けられている。図 1-4 は、定容燃焼容器と副室の測定圧力を示しており、実験条件は初期圧力 0.10MPa・初期温度 297K・水素 100%である。定容燃焼容器でノッキングが発生すると、副室においても必ずノッキングは発生するが、同一の実験条件でも副室のノッキング強度は異なり、興味深い現象が示されている。また、定容燃焼容器の圧力は副室のノッキング強度に影響されない結果を得ているが、副室と比較して定容燃焼容器の体積が非常に大きいため考えられる。今後、実際のエンジンにおける現象観察や、定容燃焼容器で得られた結果との相関について解明されることが期待される。

「先進ガソリン機関技術 II」の講演は、自動車メーカーとサプライヤーで占められ、燃費向

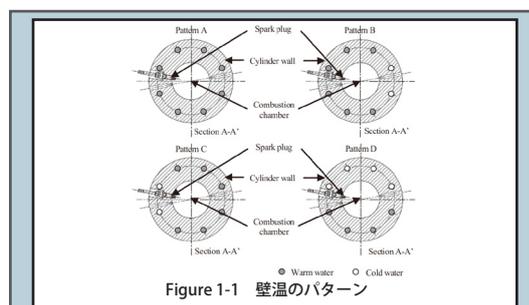


Figure 1-1 壁温のパターン

Table 1-1 圧力上昇率とノック強度

	Pressure rise rate [MPa/ms]	Knocking intensity [MPa]
Pattern A	2.67	0.11
Pattern B	2.56	0.16
Pattern C	3.79	0.47
Pattern D	2.18	0.10

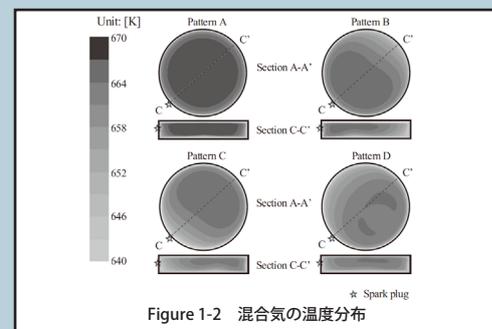


Figure 1-2 混合気の温度分布

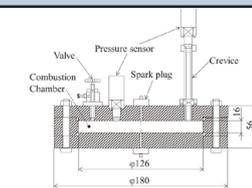


Figure 1-3 定容燃焼容器の概略

上や排気改善を目的とした研究開発が発表された。その中から3件の講演を紹介する。

山本ら¹⁻³⁾は、リアルタイムにエンジン燃焼を制御するシステムを目指して、筒内圧センサを組み込んだ直噴インジェクタを開発し、エンジン制御に応用した結果を報告している。図1-5に示されたインジェクタ先端の断面図より、筒内圧センサは燃料噴射口の周囲に配置されているが、センサがない通常のインジェクタから外径を変更することなく、流量特性を同等にしている。また、燃料噴射口の周囲に配置されているため、センサ温度を150°C以下に保つことを可能にしている。筒内圧センサの構造は、図1-6に示す通り、圧電素子を環状に組み込む構造となっており、圧力伝達部位に塗布された電極材を通じて外部へ結線される。圧電素子には、広い温度範囲で圧電定数の温度依存性が小さいランガタイト系単結晶 $\text{La}_3\text{Ga}_{5.5}\text{Ta}_{0.5}\text{O}_{14}$ を採用しており、基準センサとして供試した Kistler 製 6052B と比較して、±3%以内の出力結果を得ている。この筒内圧センサをエンジン制御に用いた一例として、過給器付エンジンの点火時期制御に適用し、過給圧がオーバーシュートした場合でも、最大筒内圧を設定値以下に抑制できることが例示された。

橋本ら¹⁻⁴⁾は、ガソリン直噴エンジンにおいて、ファンスリット噴霧の噴流を筒内流動の強化に活用して、混合気の均質性と燃焼速度を向上させ、噴霧改良によりPM粒子数とオイル希釈を大幅に低減するコンセプトを発表している。図1-7に示すように、ファンスリット噴霧の下向き噴射角を従来の49°から、吸入空気流に同調できる29°とし、タンブル比を増加させている。その結果、タンブル流が崩壊する圧縮行程後期の乱れ強度が増加し、混合気の均質度が向上すると共に、熱発生速度が増加し、燃焼期間が短縮する効果を得ている。一方、下向き噴射角を小さくすると、シリンダ壁面への燃料付着が増加し、オイル希釈が問題となる。また、噴射時期によるオイル希釈の低減は、PM粒子数の低減とトレードオフの関係にある為、図1-8と図1-9に示す通り、噴孔改良による高微粒化と低ペネトレーション化を図っている。ファンスリット噴霧の改良により、縦ダブルスリット噴霧に対して、PM粒子数とオイル希釈を同時に約50%低減している。また、ポート噴射を併用した場合でも、縦ダブルスリット噴霧に対してPM粒子数を約70%、オイル希釈を約25%低減する結果が得られている。さらに最高噴射圧力を12MPaから20MPaに上昇させることで、燃料付着の低減と高出力化の両立を達成している。

後藤ら¹⁻⁵⁾は、前述のコンセプトで要求されるファンスリット噴霧の改良について、詳細な報告を行っている。噴霧の高微粒化と低ペネトレーション化を図り、燃焼生成物の噴孔詰まりに対する耐性を向上させるために、改良点として、ニードル先端への突起設置、噴孔加工角(テーパ角)の拡大、噴孔長の短縮が図1-10に示されている。図1-11は、ニードル先端の突起長が噴射方向のばらつきとインジェクタの静的流量に及ぼす影響を示しており、突起を長くするほど整流効果が高まり、噴射方向のばらつきを低減させる効果を得ている。しかし、突起を長くしすぎるとサック内の燃料通路が絞られるため、静的流量が低下しない範囲で設定する必要性を指摘している。図1-12には、噴霧長と噴霧の収縮率に及ぼす噴孔加工角の影響が示されており、噴孔加工角を拡大することで、噴霧の運動量が横方向に分散されるため、噴霧長は短縮されている。但し、この効果は徐々に飽和すると共に、噴霧の収縮率が急激に低下するため、噴孔詰まりに対する耐性を悪化させることが指摘されている。図1-13では、ノズル内流れの可視化画像と解析結果が示されており、従来のノズルと噴孔長を短縮したノズルを比較している。可視化画像から、噴孔長を短縮したノズルでは、噴孔入口で発生したキャビテーションを維持したまま噴射している様子が確認されている。また、解析結果より、噴孔長を短縮した噴流の方が、噴孔出口において高い乱流エネルギーを維持している状態が示されている。但し、噴孔長の短縮による高微粒化や低ペネトレーション化の効果は、噴射角のばらつきで制約されることを指摘している。(佐藤)

1-1) Wong SoonFong, 牛田典宏, 窪山達也, 森吉泰生, 近藤卓, 園比呂志: 急速圧縮膨張装置における混合気温度分布がノッキング強度に与える影響, 自動車技術会2012年春季大会, No.29-12 (2012)

1-2) 徳留大樹, 是松孝治: 火花点火機関のクレビス流路で発生するノックの研究, 自動車技術会2012年春季大会, No.29-12 (2012)

1-3) 山本裕司, 赤崎修介, 佐藤岳, 林貴之: 直噴インジェクター一体型筒内圧センサの開発と筒内圧情報を用いたエンジン制御システムへの応用, 自動車技術会2012年春季大会, No.30-12 (2012)

1-4) 橋本晋, 服部文昭, 野村啓, 村瀬栄二: 噴流活用ガソリン直噴エンジンの開発 (第1報),

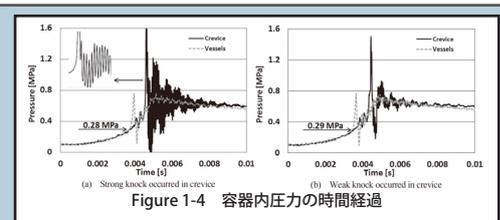


Figure 1-4 容器内圧力の時間経過

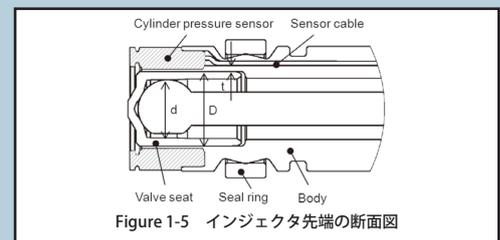


Figure 1-5 インジェクタ先端の断面図



Figure 1-6 筒内圧センサの構造

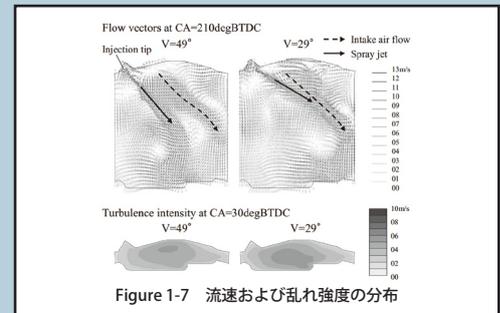


Figure 1-7 流速および乱れ強度の分布

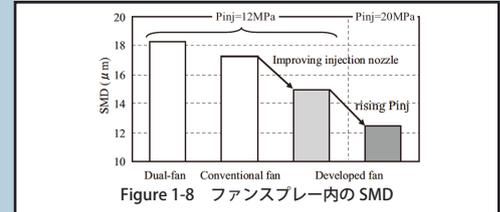


Figure 1-8 ファンスプレー内のSMD

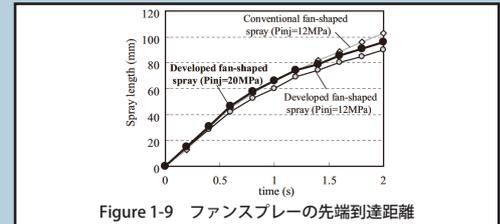


Figure 1-9 ファンスプレーの先端到達距離

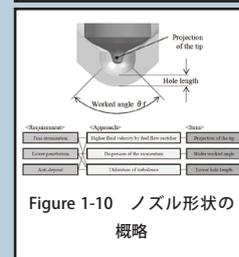


Figure 1-10 ノズル形状の概略

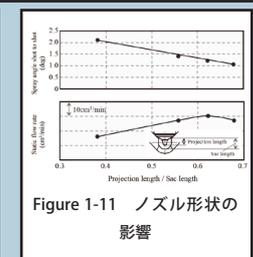


Figure 1-11 ノズル形状の影響

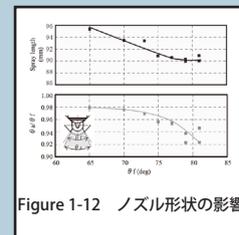


Figure 1-12 ノズル形状の影響

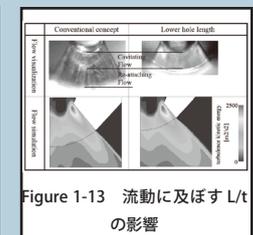


Figure 1-13 流動に及ぼすL/tの影響

自動車技術会 2012 年春季大会, No.30-12 (2012)

1-5) 後藤守康, 吉丸清考, 加藤典嗣, 松村恵理子:噴流活用ガソリン直噴エンジンの開発 (第 2 報), 自動車技術会 2012 年春季大会, No.30-12 (2012)

2 ディーゼルエンジン関連

2.1 ディーゼル機関

北海道大学大学院の金らは「ディーゼル燃焼を模擬した定容燃焼の燃料着火性および雰囲気酸素濃度に対する依存性」²⁻¹⁾と題して講演を行った。EGR により酸素濃度を低下させると着火遅れが増加して低 NOx・無煙の予混合化ディーゼル燃焼を実現できるが、この燃焼には雰囲気酸素濃度に加えて着火性などの燃料性状が大きな影響を及ぼす事を解析した。実験は容器内に C₂H₄-O₂-N₂ の予混合気を充填し火花点火燃焼により目標とする圧力、温度の雰囲気気を形成し、目標雰囲気酸素濃度 21%, 18%, 15% を実現し、その中にコモンレール噴射系、単孔ノズル (φ 0.3mm) で噴射した。燃料には、3 種類のオクタン価標準燃料等を用い、解析手法としては直接火炎撮影を行うとともに画像 2 色法より火炎温度とストート濃度の指標となる KL 値を求め、指圧線図解析を実施した。これらより

* 雰囲気酸素濃度を低下させると予混合化が進行して高温火炎領域とその出現期間が著しく減少し、ノルマルヘプタンを燃料とした場合には酸素濃度が 15% まで低下すると不輝炎の穏やかなディーゼル燃焼の様態となるが、酸素濃度 18% では低温予混合化が不十分でストートの生成を抑制するまでには至らない。(図 2-1, 図 2-2, 図 2-3)

* 高酸素雰囲気でも燃料の着火性の低下に伴い予混合化が進行して高温火炎および KL 値が減少するが、低酸素濃度に比べて燃焼が急激になる。(図 2-4, 図 2-5, 図 2-6)

本研究の実験条件は、現実の車両用ディーゼルエンジンの条件に近く、このような研究が積み重ねられると将来的に予混合燃焼領域の大幅な拡大や燃焼期間の短縮のアイデアに結びつく可能性があり、今後に期待したい。

群馬大学大学院の落合らは「ディーゼル噴霧における雰囲気気圧力と燃料噴射圧力が混合気形成に及ぼす影響」²⁻²⁾と題して講演を行った。近年のディーゼルエンジンの雰囲気気圧力、噴射圧力は従来と大きく異なっており、それらが燃料噴霧の流動に及ぼす影響について解析するため、時系列 PIV 法を速度分布計測に適用した。得られた噴霧内部の時系列速度分布から、燃料噴霧と周囲空気との混合気形成の状態について解析した。また平均速度分布から、雰囲気気密度と噴射圧力が混合層の形成される位置に及ぼす影響について明らかにした。

実験は常温の窒素ガスを満たした高圧容器にコモンレール式噴射系で、直径 0.17mm の単噴孔ノズルにより JIS 2 号軽油を噴射した。噴霧の成長挙動の観察には影写真法と PIV 法を適用した。雰囲気気圧力は P_a = 0.5, 1.0, 2.0, 4.0 MPa を選定し、噴射圧力は P_{inj} = 60, 90, 120, 150 MPa を選定した。

これらより

* 噴霧幅は、雰囲気気密度と噴射圧力の増加とともに増加した。噴射圧力による噴霧幅の増加は、濃度閾値 10% ではわずかであるが、濃度閾値 80% では強く現れた。(図 2.7)

* 時系列の PIV 解析により、噴霧外縁付近に形成される渦への周囲雰囲気気や希薄な噴霧群の巻き込みが観察された。(図 2.8)

* 気液二相流であるディーゼル噴霧の軸方向速度の半径方向分布をガウス関数で近似させる事ができ、速度分布の特性値として標準偏差を求めることができた。(図 2.9, 図 2.10)

* 混合層 (速度分布において、速度勾配が最大となる位置) は噴霧内部に存在し、雰囲気気密度や噴射圧力の上昇に伴い混合層の位置は噴霧内部へ移行した。(図 2.11)

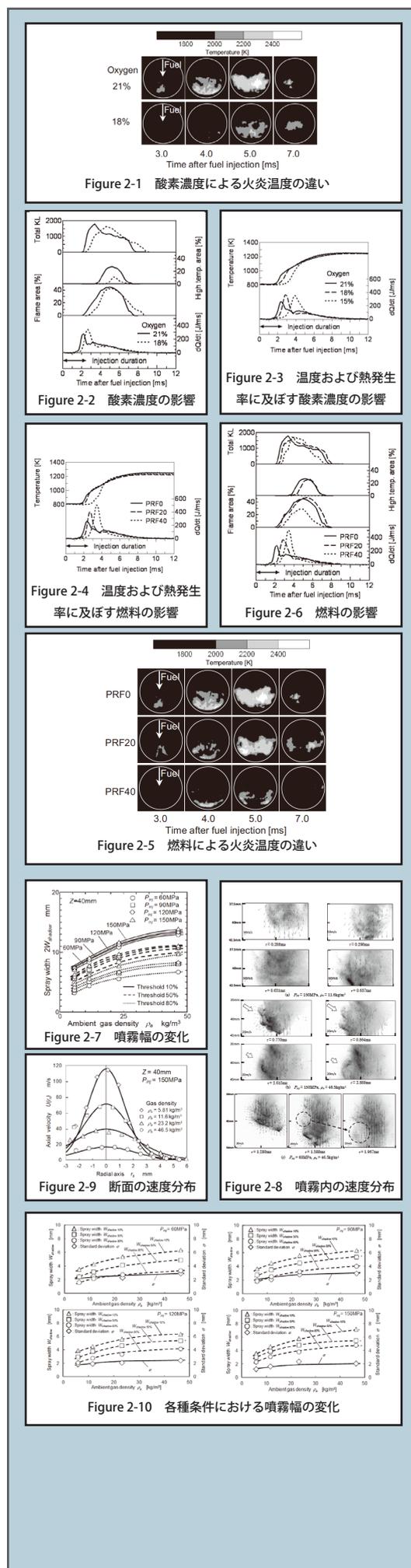
噴霧の全体像を把握しようとした意欲的な研究であり、雰囲気気密度、噴射圧力だけでなくノズルの噴孔径の効果、雰囲気気の温度と圧力の効果の分離などを期待したい。

2.2 先進低公害・高効率ディーゼル燃焼技術

日本自動車部品総合研究所の林らは「等倍モデルによるディーゼルノズル内流れと噴霧燃焼の可視化」²⁻³⁾と題した講演を行った。本研究は等倍モデルのノズル内流れ、特にキャビテーションと混合気形成、噴霧燃焼の関係を追求した基礎的ではあるが重要な課題に真正面から取り組んだ本格的な研究である。

本領域における従来の研究は神本がまとめているように²⁻⁴⁾

* ノズル内流れに関しては、Eifler がガラス製オリフィス内の流れを観察しサック内とオリフィス内にキャビテーションが発生していることを明らかにし、それが噴霧の広がり重要



な働きをすることを見出した。

*インペリアルカレッジ, ウィスコンシン大ではガラス製の拡大モデルを用いノズル内流れを観察しキャビテーションの発生状況をキャビテーション数との関係で整理した。

*インペリアルカレッジの Arcoumanis 等は透明アクリルで 20 倍の 6 噴口ノズルを製作し, ノズル入り口部に発生した剥離流れ中のキャビテーション気泡とサック内に発生した糸状キャビテーションを高速度撮影した。この糸状キャビテーションは隣り合う噴口間をつなぐ線に発生し, 別の噴口に移動することとノズル噴口内に流入して剥離流れ中の気泡と混合することなどを明らかにしている。

本研究は可視化モデルを等倍でノズルを透明アクリル, 石英ガラスで作成し高速度撮影, サック内の PIV 解析, 急速圧縮装置と組み合わせた噴霧燃焼との同時解析を可能にしている(図 2.12, 図 2.13), 従来の研究をすべて総括すると共に, さらに噴霧の安定性, キャビテーションの噴口出口近傍の微粒化に及ぼす役割, 噴霧角, Lift-off Flame Length などに新しい見解を出しうる可能性を秘めており, 今後の発展が非常に期待される。

現時点の本研究のまとめとして

*噴射圧 50Mpa までの条件では, 噴孔入り口部で流れが剥離し発生するキャビテーションより, 噴孔中心軸付近に発生する紐状のストリングキャビテーションの発生頻度が高い。(図 2.14, 図 2.15)

*噴孔出口直下の噴霧角は, ストリングキャビテーションの厚さと関係する。本キャビテーションが発生すると, 広角噴霧となり(図 2.16, 図 2.17) 輝炎の広がりも大きく, 輝炎の発生時期も早く噴孔から輝炎根元までの距離が短くなる。(図 2.18, 図 2.19)

*ストリングキャビテーションは PIV 計測の流れ解析, CFD 解析から噴孔内の旋回流(二次流れ)が発生原因と推定。(噴孔内で旋回流が噴孔壁面に沿って流れるので中心軸上の渦中心部で発生)(図 2.14, 図 2.20, 図 2.21, 図 2.22)

*ストリングキャビテーションがサックを介して他の噴孔とつながる理由は, サック部にも大きな渦が発達し渦中心の低圧場を介して他の噴孔間につながった物と推定。(図 2.21)

キャビテーションの発生を噴射, 噴霧燃焼の不安定要素と捕らえるか, 積極的に活用し微粒化, 噴霧角の拡大に利用しうるかは, 設計方針の根幹に係る問題である。

豊田中央研究所の冬頭らは「ディーゼル燃焼の CO 排出要因解析(第 3 報)」- CO 排出低減方法とその検証²⁻⁵⁾と題して講演を行った。近年のディーゼルエンジンは NOx 低減のため, 高 EGR 率化が進み, その反面筒内燃焼温度が低下し CO の増加が問題になっている。筆者らは, 既報にて輝炎の存在する筒内ディーゼル燃焼場での 2 光子励起 CO-LIF 法を開発し, その計測結果を用い数値計算の精度検証を行った。その上で CO-LIF 計測と数値計算を用いて CO の排出要因解析を解析し, 更に CO 低減策として段つきリップ燃焼室を提案した。それらより

*低負荷時の CO 排出の主要因は, パイロット噴霧/火炎の渦拡散である。パイロット火炎から発生した CO が, メイン噴射の火炎によって酸化されることなく燃え残る。

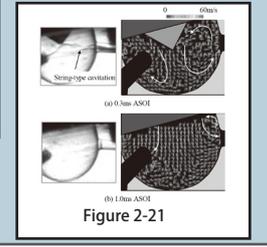
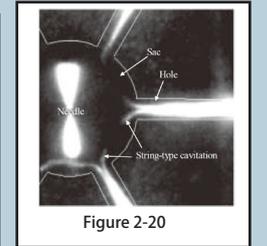
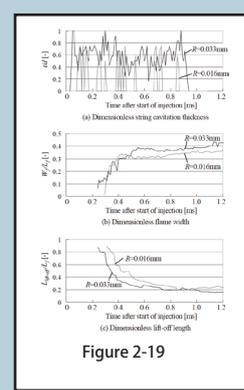
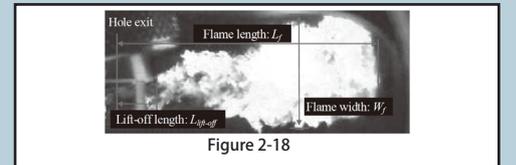
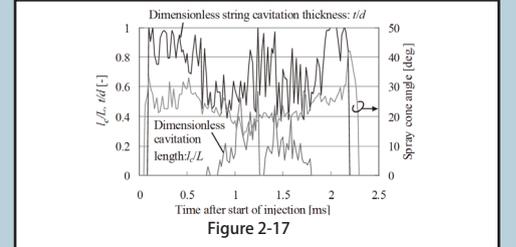
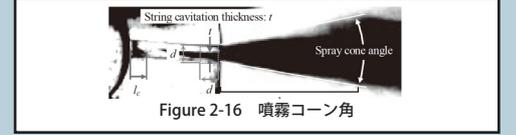
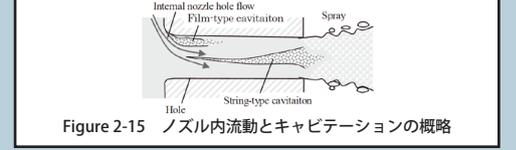
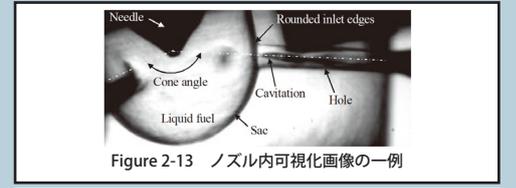
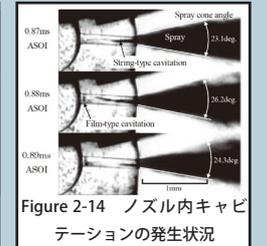
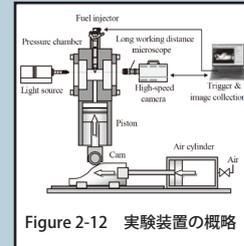
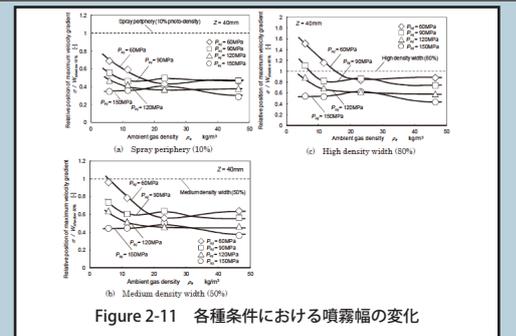
*高負荷時の CO 排出の主要因は, 火炎先端の高温・リッチ領域で酸素不足のため生じた CO が, 十分に混合・酸化することなく膨張し排出されるものと考えられる。

*低負荷時では段つきリップにより圧縮上死点前のスキッシュ流速を大きく低減し, パイロット噴霧の渦拡散を抑制する事で CO を低減できる。

低温燃焼, PCCI 燃焼等を実施すると, CO, 未燃 HC の排出は大きな問題であり排気温度が低いと触媒でも処理が困難で燃焼による大幅な改善が望まれている。そのためこのような解析から多くの対策のアイデアが生まれ, 実用化に結びつくことを期待する。

2.3 先進ディーゼルエンジンシステム制御技術

豊田中央研究所の稲垣らは「サイクルシミュレーションによるディーゼル燃焼の過渡性能予測(第 5 報) - 'バーチャルエンジン適合' を可能にする全運転域での燃焼予測精度の向上²⁻⁶⁾と題して講演を行った。筆者らは, 既報で企画段階でのエンジン設計, エンジン開発全体を支援するツールとして 0 次元ベースのサイクルシミュレーション技術(UniDES)を開発してきた。これまではエミッション規制モードである NEDC での活用を想定してきたため, 精度検証も低・中負荷が中心であった。今後ユーロ 6 以降は高負荷を多用する運転サイクルの導入が議論されており, これまでより広い運転範囲に対してエミッションなどのエンジン性能を予測できるものが必要になる。本研究では予測精度の検証範囲を全運領域に広げ, 全域にわたる燃焼特性を高精度に予測できるモデルを開発し'バーチャルエンジン適合'の可能性



を示した。そのため下記の二つの改善を実施した。

*全負荷における熱発生率が実験に比較し、計算では燃焼後半が過大になりかつ噴射終了の後燃え期間が過小になっているのを、隣接噴霧の干渉モデルを入れ、スワール流によって下流域の隣接噴霧に到達しそれ以降ではスワール方向の火炎発達が阻害するようにして、予測精度を向上した。

* NOxの予測は拡大ゼルドビッチ機構を用いるのが一般的であるが、ディーゼル燃焼では高負荷になるほど、リッチな燃焼ガス雰囲気下においてNOxの還元作用がおり、ゼルドビッチ機構のみで予測される値よりも、実際のNOxは少なくなる事が報告されておりNOx還元モデルを導入した。還元種としては便宜的にCOを用い還元種の仮想的な‘トレーサ’としての役割を果たさせた。

これらにより全運転域において、燃焼騒音、燃費、NOxの高精度那予測が可能になり、PC上で行う‘バーチャルエンジン適合’の実現可能性を示す事ができた。(下田)

【参考文献】

- 2-1) 金 学明, 柴田 元, 小川 英之, 広瀬 敏之, 河野 尚毅:ディーゼル燃焼を模擬した定容燃焼の燃料着火性および雰囲気酸素濃度に対する依存性, 自動車技術会 2012 年春季大会学術講演会前刷集, No.23-12 (2012)
- 2-2) 落合 涉, 座間 淑夫, 新井 雅隆:ディーゼル噴霧における雰囲気圧力と燃料噴射圧力が混合気形成に及ぼす影響, 自動車技術会 2012 年春季大会学術講演会前刷集, No.23-12 (2012)
- 2-3) 林 朋博, 馬崎 政俊, 鈴木 雅幸, 池本 雅里:等倍モデルによるディーゼルノズル内流れと噴霧燃焼の可視化解析, 自動車技術会 2012 年春季大会学術講演会前刷集, No.75-12 (2012)
- 2-4) 神本 武征:ディーゼル燃焼の計測 (p26 ~ 32), Engine Technology, 04 September 1999 (1999)
- 2-5) 冬頭 孝之, 植田 玲子, 服部 義昭, 水田 準一, 秋濱 一弘, 青木 秀樹, 梅原 努, 伊藤 寿記, 川口 暁生:ディーゼル燃焼のCO排出要因解析 (第3報), 自動車技術会 2012 年春季大会学術講演会前刷集, No.75-12 (2012)
- 2-6) 稲垣 和久, 上田 松栄, 高巢 祐介, 谷 俊宏, 瀧 昌弘, 植田 玲子:サイクルシミュレーションによるディーゼル燃焼の過渡性能予測 (第5報), 自動車技術会 2012 年春季大会学術講演会前刷集, No.76-12 (2012)

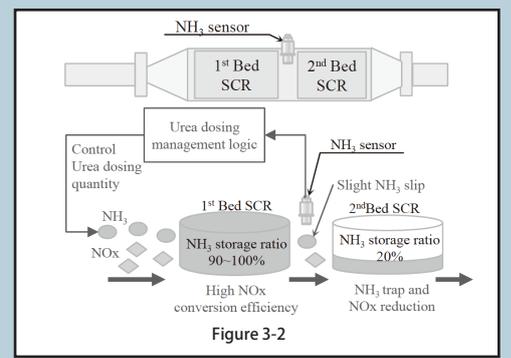
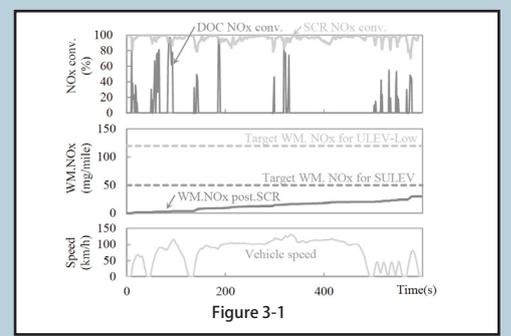
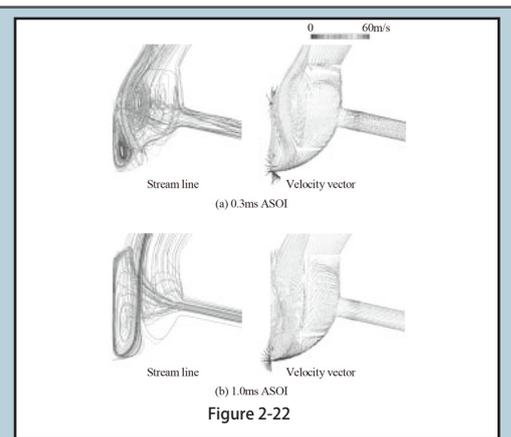
3 ディーゼル制御

3.1 先進ディーゼル排出ガス制御

本田技術研究所松永らは、デルファイオートモーティブと連名で「US LEV-III SULEVのためのスーパークリーンディーゼル技術 (20115267)」³⁻¹⁾と題して講演した。排気量 2.2L の 4気筒ディーゼルエンジンにユーロ VI を想定した DPF + 尿素 SCR の後処理システムを搭載したものが対象であるが、それだけではガソリン車を前提にしたともいえる LEV-III の規制を満足できない。そこで、様々な挑戦的な手法の導入を試みている。

その最大のアイテムは、触媒昇温過程と急加速時の排出ガス量増加時に EGR を増やして「ストイキ制御」を行うことだろう。それにより三元触媒効果を用いて、SCR の浄化率確保が困難な状況での NOx, HC 低減を図っている。市販の日産エクストレイルでは、酸化触媒 (DOC) として三元触媒を使用しているが、ここではロジウムや酸素吸蔵材を使用しない DOC としていた。それでもストイキ (正確にはわずかにリッチで、DOC が吸着した NOx などが補助酸化剤となっていると推測される) 状態での NOx 浄化は可能という。それらの触媒の浄化性能を示すものとして、急加速を含む厳しい走行モードである US06 モードでの NOx 浄化率と積算 NOx 排出量を図 3-1 に示す。ホットサイクルであるため、SCR による浄化率が全体に高いが、急加速時などで一時的に低下する。その状況で「DOC による NOx 浄化率」が高くなっているのが分かる。それで LEV-III の規制を満たす、ガソリン車顔負けの低エミッションを達成した。しかしこの手法が新鮮に感じられるのは、分かっているにもかかわらずデメリットもまた大きいと予想されるため、講演後の質疑応答では、この加速ストイキ制御時のスート生成や燃費影響についての質問が会場から出された。

また、尿素 SCR システムも斬新なもので、3L の SCR 触媒後にアンモニアセンサを取り付け、その後に 1L の SCR 触媒を搭載する。その制御概念を図 3-2 に示す。SCR 触媒には、アンモニアなど還元剤が多く吸着された状態の方が、浄化率が高まる。そこでセンサで微小のアンモニアを検出するレベルまでフィードバック制御で吸着量を高める。後段の SCR 触媒は前段



からスリップするアンモニアをトラップするのが NOx 浄化以上に大きな役割となる。課題に対するアプローチとしては美しさがあるものの、SCR 触媒におけるアンモニア吸蔵量は非常に温度依存が大きく、急激な温度変動などをどのように対処しているのか、など気になる点もある。

全体として「ガソリンエンジンの感覚でディーゼル排気の制御をした」ような、ある意味で潔さを感じさせるシステムといえるだろう。厳しい米国の OBD 基準対応なども含めて、これを製品化まで上げることができるのか注目したい。

3.2 先進ディーゼルエンジンシステム制御

豊田中央研究所稲垣らは「サイクルシミュレーションによるディーゼル燃焼の過渡性能予測（第5報）ーバーチャルエンジン適合を可能にする全運転域での燃焼特性予測精度の向上ー（20115141）」³⁻²⁾と題して講演を行った。ディーゼルエンジンの性能向上に向けた各種新技術が導入されているが、それらを「使いこなす」ための適合作業は非常に膨大になっており、ハードウェア以上に開発コストを押し上げる要因となっている。そこにメスを入れるべく、現場開発者が「あたりをつける」ためのツールとしての簡易シミュレーションの開発を進めており、今回はその第5報となっている。既報では、欧州 NEDC モードを主対象としてきたため軽、中負荷を中心に行ってきたものを、将来の認証モードなどを視野に入れて高負荷も含めた全領域での精度向上を試みている。

高負荷時特有の課題として、噴霧間の干渉を考慮した熱発生率の補正と、「NOx 還元モデル」の導入が挙げられている。後者について、高負荷時には温度から予測するゼルドヴィッチ機構では実際よりも NOx 排出を高く見積もってしまう。その理由をほかの文献から燃料リッチエリアにおける NOx 還元にあるとした。ただし、還元剤となる HC のきわめて複雑な反応経路をプログラムに入れた場合、目的である「簡易な」を実現できない。そこで HC の存在を示唆するものとして（直接還元反応に寄与しない）CO をトレーサとして計算に用いた。負荷を変化させた実機試験との比較結果を図 3-3 に示す。ゼルドヴィッチ機構のみでは表現できない NOx 排出変動を、本手法を用いることで現象を近似できたとしている。

講演後にはデモも実施され、10 秒かそこらのうちに計算した数値だけでなく、熱発生率からトレンドグラフ、燃焼騒音まで結果が示された。その完成度の高さは、当初目的を高いレベルで達成しつつある状況がみてとれ、講演者らの技術の高さとそのようなツールへの要望の強さが垣間見られた。（鈴木）

【参考文献】

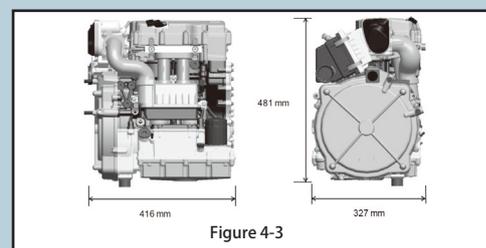
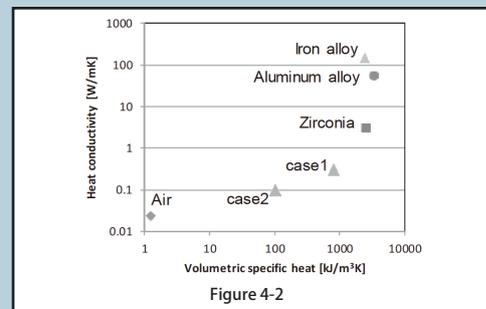
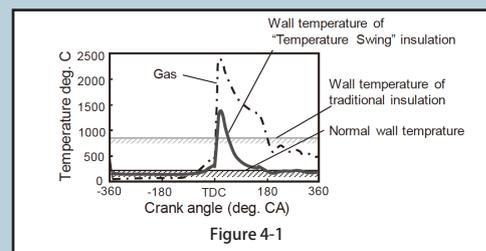
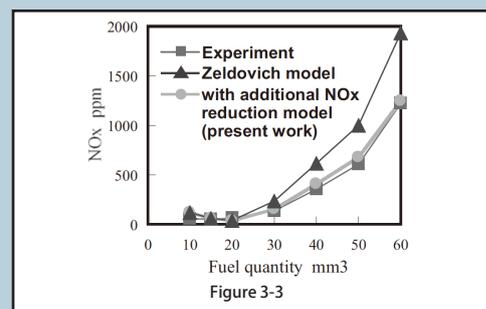
3-1) 松永 英樹, 安井 裕司, 橋本 英史, 佐藤 尚宏, Hans HARDAM, 山田 正俊, 高橋 俊晴, Bart SCHREURS: US LEV-3 SULEV のためのスーパークリーンディーゼル, 自動車技術会 2012 年春季大会学術講演会前刷集, No.51-12 (2012)

3-2) 稲垣 和久, 上田 松栄, 高巢 祐介, 谷 俊宏, 瀧 昌弘, 植田 玲子: サイクルシミュレーションによるディーゼル燃焼の過渡性能予測（第5報）, 自動車技術会 2012 年春季大会学術講演会前刷集, No.76-12 (2012)

4 燃費向上技術

この項目では二つのセッションで9件の発表があった。この中からエンジンに関連する二つの発表について紹介する。まず、豊田中央研究所の小坂らは「壁温スイング遮熱法によるエンジンの熱損失低減」という題で発表を行った⁴⁻¹⁾。これは、通常エンジン筒内からの熱損失を低減するために、セラミック等を用いて遮熱を行うと、熱損失は低減するものの筒内におけるガス温度の上昇を招き、これが吸気効率を悪化や、ノック限界の低下を招くことが知られている。これは、一般に熱伝導率の小さな材料は熱容量も大きく、平均の壁温が上昇するためである。一方、発表者らは、比較的熱伝導率が低く、熱容量の小さな壁材を用いれば、燃焼期間中のみ壁温を上昇させることができる可能性を指摘している。この概略は図 4-1 に示すようであり、これを壁温スイング遮熱法と呼んでいる。こうすれば、熱損失の大きな燃焼期間中だけ熱流束を下げられる可能性がある。これを実現する材料の可能性について、図 4-2 は比熱容量と熱伝導率の平面上に各材料の特性をプロットしたものであり、case1 あるいは case2 のような材料について、3D-CFD あるいはシステム計算を行い、燃費向上効果が見込めることを示した。

マーレジャパンの関口らは「レンジエクステンダエンジンのデザインと開発」と題して講



演を行った^{4,2)}。これは PHEV における発電システム用のガソリンエンジンの提案であり、図 4-3 に示すようなコンパクトな直列 2 気筒である。このエンジンのスペックは表 4-1 であり、乾燥重量 50kg と軽量で、かつ縦にも横に寝かせても搭載可能であるというフレキシビリティがある。さらにこのエンジンを C セグメント、1.6L ガソリンエンジン、5MT および車両重量 1150kg の車両に搭載した際を想定して、性能および排気を測定した結果、十分に実用に耐えうる結果が示された。(川那辺)

4-1) 小坂, 脇坂, 野村, 堀田, 小池, 中北, 川口, 壁温スイング遮熱法によるエンジンの熱損失低減, 自動車技術会春季大会, No. 49-12, 20125270 (2012), 5-10

4-2) 関口, M. Warth, M. Bassett, J. Hall, V. Korte, B. Mahr, レンジエクステンダエンジンのデザインと開発, 自動車技術会春季大会, No. 50-12, 20125068 (2012), 5-8

5 排気成分, 計測

5.1 排気成分 (粒子, ガス) の状態把握 1

PM の新しい計測手法 2 件と燃料噴射の基本的なコンセプトを得るための PM 計測 1 件の発表が行われた。

テラヘルツ (1011Hz ~ 1012Hz) 波の波長は 3mm ~ 0.3mm 程度であり、赤外線 (1013Hz ~ 1014Hz) より波長は長く、波長の短いマイクロ波に分類される電磁波である。この電磁波は光と同様に直進性を示し、セラミックスは透過するが金属などは透過しない。テラヘルツ波のこの性質を利用して DPF 内に堆積しているすすや灰分の計測が可能なのが新しい PM 計測手法⁵⁻¹⁾として紹介されている。

図 5-1 は計測システムを紹介したもので、半導体レーザーの光で駆動するテラヘルツ波の発振器、被測定対象物を通過して減衰したテラヘルツ波の受信器、減衰量と物体の形状をもとに CT により被測定対象内のテラヘルツ波の吸収物質の 3 次元分布を求める解析部から構成されている。DPF に堆積する灰分の代表的なものとして CaCO₃ を取り上げ、すすと CaCO₃ を用いて装置の検定を行った結果が詳しく紹介されている。最後に φ 226 × 230 のコーゼライト DPF について灰分とすすが表 5-1 のように堆積した状態を計測している。図 5-2 はその結果であり、図の上側が DPF の入口端、下側が出口端である。灰分 (a) は出口端付近にのみ堆積している。一方、すす (b) は入口端から出口端に向かって徐々に堆積量が増加しているが、出口端直前では堆積量が少なくなっている。

PM の堆積状態の非破壊計測を目的として研究用の原子炉から導いた熱中性子線を用いてすすの計測を行う試み⁵⁻²⁾も行われている。熱中性子線は核分裂によって放出される高速中性子を減速して物質に吸収しやすくしたエネルギーの低い中性子である。図 5-3 は RTNR (Real-Time Neutron Radiography) の基本システムである。図 5-4 のように物体 (Project) とそれに固定された座標系 (x,y) に対して角度 θ で線量 I₀ の熱中性子線を入射し、減衰を受けた線量 I を検出し、それから投影像 P (ρ, θ) を得る。その後は通常の CT 解析を行う。熱中性子線は金属などもある程度透過するため、金属製の排気管の内壁に堆積しているすすの計測も行えるとしている。しかし得られる投影像の画像コントラストが低くかつ不鮮明のため、種々の画像処理を行ったのち CT 解析を行うことになる。発表された論文はこの画像処理技術に関するものである。しかし、この手法が現実的な技術として内燃機関の排気管内や DPF におけるすすの検出に適用できる可能性は極めて低いと見られる。

燃料噴射の基本的なコンセプトを得るために V6-3L のコモンレール (160MPa) 噴射式直噴ディーゼルエンジンの PM の計測結果の報告⁵⁻³⁾が行われた。この研究では PMP で推奨している PM の個数計測手法以外に、50nm 以下の PM を一次粒子として計測し、パイロット噴射や噴射タイミングの影響を調べている。図 5-5 はその結果であり、図中の棒グラフは 50nm 以下の PM 個数、折れ線グラフは PMP 手法での PM 総個数である。PM の総個数は負荷の高い場合に噴射タイミングの影響を受け、50nm 以下の PM 個数は負荷が低くかつパイロット噴射を行った場合に増加する傾向を示している。論文ではこの理由としてパイロット噴射された燃料が過剰に希釈されて一次粒子としての PM を生成するためと考察している。(新井)

5.2 エミッション計測関係

エミッション計測関連は、「排気成分 (粒子, ガス) の実態把握」 I, II のセッションにて、

Table 4-1

Technical specifications	
Layout	In-line 2-cylinder, 4-stroke, gasoline
Engine displacement	0.9 litres
Bore / Stroke	83.0 / 83.0 mm
Compression ratio	10:1
Valvetrain	SOHC, 2 valve head, roller rocker arms
Fuel injection	Port fuel injection
Engine control	MAHLE flexible ECU
Generator	38 kW water-cooled permanent magnet axial flux generator
Maximum power	30 kW at 4000 r/min
Peak torque	72 Nm between 2000 and 4000 r/min
Emissions target	Euro 6
Dimensions	327 x 416 x 481 mm
Installation angle	Vertical or horizontal
Engine dry weight	50 kg (65 kg with generator)

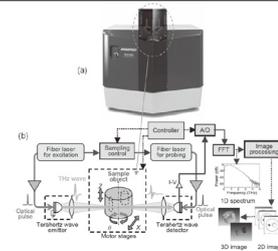


Figure 5-1

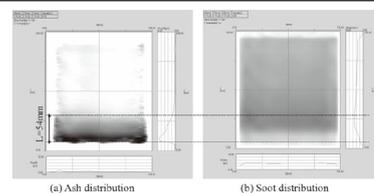


Figure 5-2

Table 5-1

Field sample	return	diameter x length 226 Φ x 230 (mm)	substrate material Cd with catalyst	average concentration of quantity	
				Ash [g/L]	Soot [g/L]
				9.8	4.0

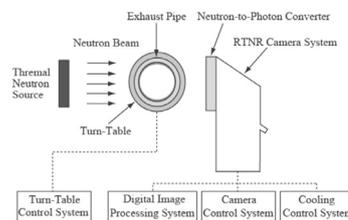


Figure 5-3

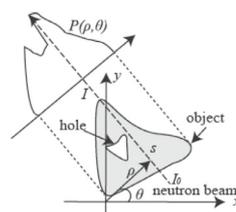


Figure 5-4

Table 5-2

Engine type	4-stroke eVGT CRDI Diesel
Number of cylinder	V6
Bore (mm) x Stroke (mm)	84 x 89
Displacement volume (cc)	2,959
Injection pressure (MPa)	160
Compression ratio	17.5
Max. Power (kW/rpm)	184/3800
Max. Torque (N · m/rpm)	490/2500
Max. Speed (rpm)	4200

トータル7件の発表があった。そのうち5件は粒子成分に関するものである。ここでは、そのうち2件について紹介する。

アドバンテストの西名ら⁵⁻⁴⁾は、テラヘルツ電磁波を用いたCT (Computer Tomography) 装置を応用し、DPFに堆積する粒子の非破壊イメージングを試みた例を報告している。この方法ではSootとAshの区別が可能であり、実測した堆積質量で検量線を引くことで、それぞれの濃度分布を3D画像あるいは断面図として解析できる(図5-6)。実車から取り外した使用済みDPFを実際に解析した結果、SootとAshの分布の違いが観察できたとしている(図5-7)。このような「可視化」が計測に対する要求のひとつであることは明らかで、それが実サンプルで実現できることは興味深い。

国立環境研究所の小林ら⁵⁻⁵⁾は、直噴エンジン搭載ガソリン乗用車を用い、粒子の排出質量および粒径分布を評価した。その結果、過度モードでは直噴エンジン車から明らかなPM排出が認められたと報告している。ただし、排出質量としてはディーゼル乗用車の規制値以下であった。また、直噴エンジン車でのアイドリングストップが粒子排出へ及ぼす影響を検証したところ、アイドリングストップにより粒径が大粒径側にシフトするという現象がみられた(図5-8、5-9)。小林らは、アイドリングストップの有無による燃焼室や排気系の温度変化などが、粒子の生成や凝集に影響している可能性を指摘している。EUでは直噴エンジン搭載ガソリン車への粒子数規制導入が決定しており、今後、このような特性把握が重要になると思われる。(井上)

【参考文献】

- 5-1) 西名 繁樹, 篠原 誠, 竹内 久仁夫:テラヘルツ波CTを使用したPM分布の非破壊イメージング解析, 自動車技術会 2012 年春季大会, No.78-12 (2012)
- 5-2) 松島 宏典, 江崎 昇二, 川上 拓郎, 内村 圭一, Jim Cotton, Glenn Harvel: 中性子3次元CTを用いた炭素煤堆積非破壊計測手法の開発, 自動車技術会 2012 年春季大会, No.78-12 (2012)
- 5-3) Dong-Seop Eom, Seok-Ho Kang, Seong-Wack Lee, Yong-Seok Cho, Sang-Il Kwon: The Effect of Injection Strategy on particulate Matter Formation in CRDI Engines, 自動車技術会 2012 年春季大会, No.78-12 (2012)
- 5-4) 西名 繁樹, 篠原 誠, 竹内 久仁夫:テラヘルツ波CTを使用したPM分布の非破壊イメージング解析, 自動車技術会 2012 年春季大会学術講演前刷集, No.78-12, (2012)
- 5-5) 小林 伸治, 近藤 美則, 伏見 暁洋, 藤谷 雄二, 齊藤 勝美, 高見 昭憲, 田邊 潔: 最新直噴ガソリン乗用車からの粒子状物質排出特性, 自動車技術会 2012 年春季大会学術講演前刷集, No.79-12, (2012)

6 燃料関係

「低炭素社会を担う新燃料」のセッションでは、DMEに関する3件の発表と、バイオ燃料に関する2件の発表があった。滋賀県立大学の河崎ら⁶⁻¹⁾は、「高い低温流動性を有するパーム/ヤシ由来脂肪酸エチルヘキシルのディーゼル燃料特性」と題する講演を行った。図6.1に示すパーム/ヤシ油由来脂肪酸と2-エチルヘキサノールを用いた脂肪酸エステルは、エチル基を側鎖に持つことから低温流動性に優れると共に、ディーゼル燃料油として十分な着火性、酸化安定性、潤滑性を有することを報告している。また、エンジン試験結果では、高セタン価で含酸素燃料であることにより、軽油と同等またはそれ以上の機関性能および排気特性を示した。

燃料の燃焼化学反応に関しては、「HCII」のセッションで、福井大学大学院の酒井ら⁶⁻²⁾が「アルカン燃料分子構造と着火遅れ時間の関係」について、同じく福井大学大学院の安東ら⁶⁻³⁾が「アルカンの反応機構のグローバルな表現」について報告している。また、「先進ガソリン機関技術I」のセッションで、本田技術研究所の橋本ら⁶⁻⁴⁾が「ガソリン燃焼反応モデルの構築」と題する発表を行っている。これらの3件の発表は、いずれも近年進展の著しいガソリンの着火反応機構の最新研究状況を知るのに役立つ。(金子)

- 6-1) 河崎 澄, 渡邊 勇太, 山根 浩二, 近藤 千尋, 狩野 孝明: 高い低温流動性を有するパーム/ヤシ由来脂肪酸エチルヘキシルのディーゼル燃料特性, 自動車技術会 2012 年春季大会学術講演前刷集, No.71-12, (2012)
- 6-2) 酒井 泰行, 浅野 悠介, Mohamad Syawal Bin Ishak, 安東 弘光: アルカン燃料分子構

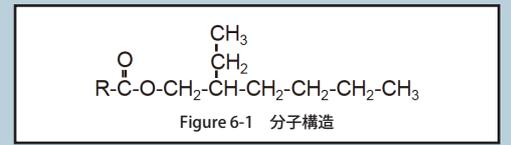
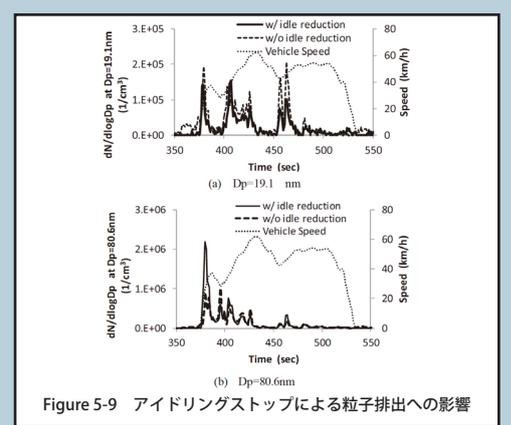
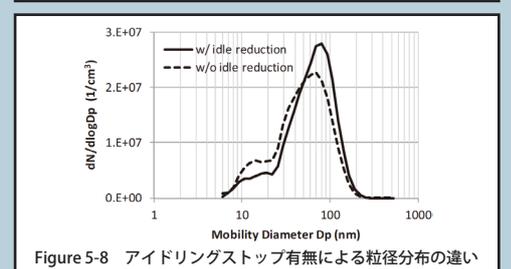
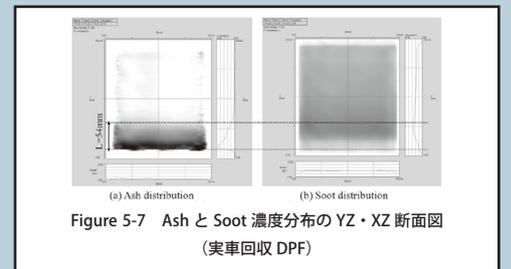
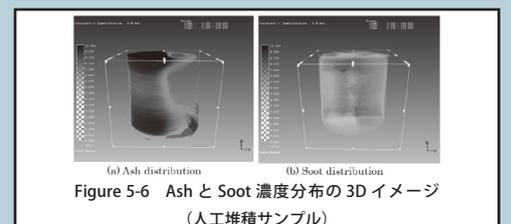
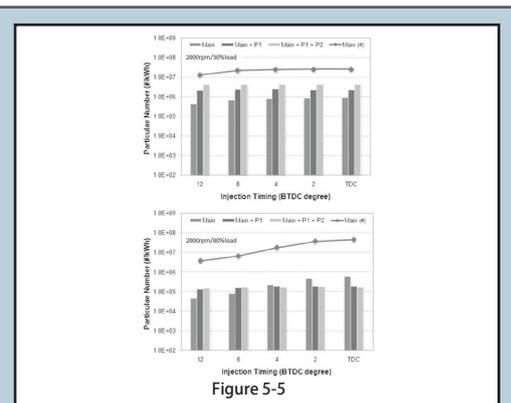


Figure 6-1 分子構造

造と着火遅れ時間の関係, 自動車技術会 2012 年春季大会学術講演前刷集, No.24-12, (2012)
6-3) 安東 弘光, 酒井 康行, 桑原 一成: アルカンの反応機構のグローバルな表現, 自動車技術会 2012 年春季大会学術講演前刷集, No.24-12, (2012)

6-4) 橋本 公太郎, 越 光男, 三好 明, 村上 能規, 小口 達夫, 酒井 泰行, 安東 弘光, 土屋 健太郎: ガソリン燃焼反応モデルの構築, 自動車技術会 2012 年春季大会学術講演前刷集, No.29-12, (2012)

7 トライボロジー関連

トライボロジー関連としては最終日に「エンジン部品・トライボロジー」と「環境性能向上を担う潤滑油」の2セッションで9テーマの報告があった。発表順に内容を紹介する。

7.1 エンジン部品・トライボロジー

ポンピングロス低減として、荻野工業の坊田ら⁷⁻¹⁾は、スイングアームを用いた連続可変リフト&開角+位相の動弁系(図7.1)について報告。特徴としては部品点数を減らし低コスト化することと排気カム側に可変カム位相機構を採用し低リフト時の燃焼安定性を高めるとともに内部 EGR の効果を活用する点である。1 次元燃焼シミュレーションによる燃費効果確認、動的挙動シミュレーションとそれをもとに製作した単気筒ヘッドにて実機挙動評価を行い、開発目標値である 7000rpm までの見通しを得たとのこと。

現代自動車の張ら⁷⁻²⁾は、商用車用ベーンタイプ可変オイルポンプの最適化について報告。吸入口から圧縮室への流路形状を CFD を用い見直し、体積効率と吐出圧力の最適化を実施した。さらに、ベーンの縦横比、油圧によりハウジングの偏心量を調節するスプリングの強さ、ベーン先端のクリアランス、吸入口の形状の 4 項目について実験計画法を用い最適化を実施し、実車の運行条件で燃費を 1.2%改善できたとのこと。

本田技術研究所の川瀬ら⁷⁻³⁾は、摺動面の実測形状を用いたピストンリング摩擦計算を用い、リングパレル形状のフリクションへの影響性について報告。摺動面の詳細形状を考慮し油膜計算をすることでストライベック線図の混合潤滑と流体潤滑を簡易的に切り分け摩擦係数計算を実施(図7-2)。リングの外周摺動面のパレル形状を尖らせることでフリクションが低減できることを計算と実験から示している。

TPR の田牧ら⁷⁻⁴⁾は、デポジット堆積防止性能を向上させた 3 ピースオイルリングについて報告。低フリクション化のためピストンオイルリングをコンパクトにし、追従係数を向上させることで低張力化する傾向があるが、そのためオイルリング内のオイル通路面積およびスラッジ堆積許容空間も減少しスラッジの堆積に不利になってしまう。この解決方法として、CFD を用いオイルの流動性の良いスペーサの形状を検討し、スラッジが溜り難い仕様(図7-3)を提案している。

日本自動車部品総合研究所の市瀬ら⁷⁻⁵⁾は、オイルリング溝内のオイル流れを蛍光剤とトレーサを用い可視化した結果を報告。シリンダヘッドを取り外し、オイルリング部を上部から観察できるようにした単体モータリング装置(図7-4)にてオイル挙動を観察。2 ピースオイルリングにおいてオイルリング窓穴の有無による結果比較により、オイルリング窓穴はバッククリアランスからレール間の流れを生みだし、溝内のオイルの循環性を向上する効果があるとしている。

7.2 環境性能向上を担う潤滑油

トヨタ自動車の竹内、藤本ら^{7-6), 7-7)}は、過給直噴ガソリンエンジンでの異常燃焼(低速プレイグニッション)に対するエンジンオイル着火性の影響について2報に分けて報告。エンジンのダウンサイジング手法として過給直噴エンジンが各社から発表されているが、その課題として、低回転領域の BMEP を高めることによる突発的な低速プレイグニッション(Low speed pre-ignition: LSPI)の発生がトルク向上の制約となっていることが上げられる。発生のメカニズムとしては、ピストンクレビスに溜まったオイルが油滴となって燃焼室内で着火することが原因の可能性が高いということから。第1報ではエンジンオイルの添加剤影響に注目し調査。オイル液滴の自己着火はSTEP1として液滴の蒸発によるガス化、STEP2としてガス化したオイルの酸化反応というプロセスを経ると考えられ(図7-5)、オイルの添加剤はその酸化反応に影響をおよぼすと考察している。Ca系洗浄剤はLSPIを促進、MoDTC、ZnDTPはLSPIを抑制する効果があると報告している。

続いて発表された第2報では、第1報で示唆されたLSPIの発生はオイル蒸発性より酸化反

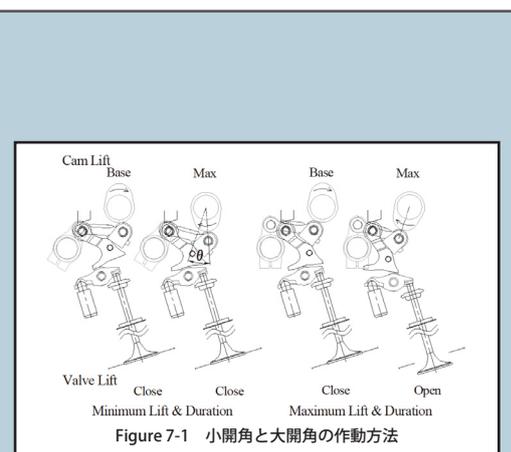


Figure 7-1 小開角と大開角の作動方法

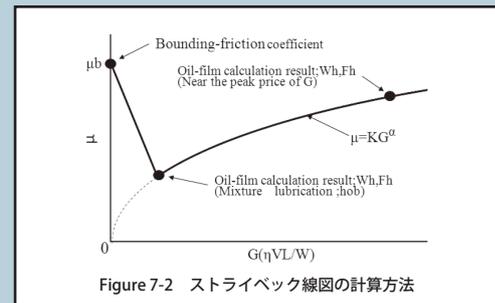


Figure 7-2 ストライベック線図の計算方法

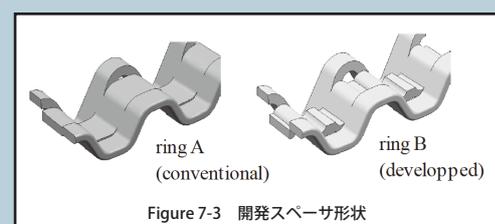


Figure 7-3 開発スペーサ形状

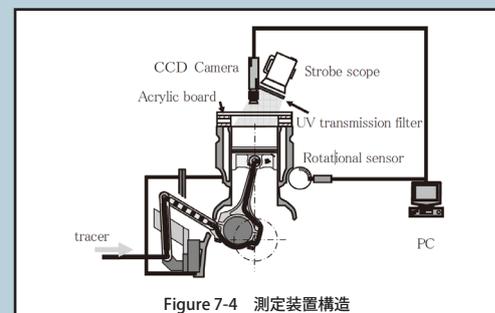


Figure 7-4 測定装置構造

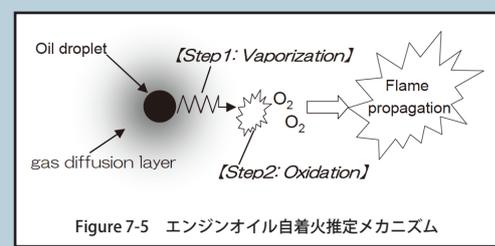


Figure 7-5 エンジンオイル着火性向上メカニズム

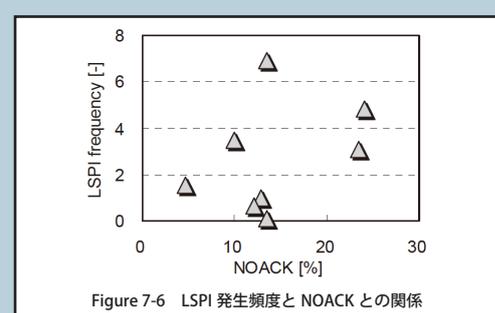


Figure 7-6 LSPI 発生頻度と NOACK との関係

応性が支配的という内容を検証し、また、LSPI 発生頻度と相関の高いオイル着火性評価手法を検討している。基油を変化させ蒸発性を変えて検証した結果、蒸発性との相関が無い(図7-6)ことから酸化反応が支配的と判断。酸化反応性を評価する手法として高压下での自然着火温度示差走査熱量測定(Differential Scanning Calorimetry: DSC)を用いることで、LSPI 発生頻度と高い相関を示す(図7.7)と報告している。持論の報告も含め質疑応答が盛んに行われ、旬なテーマであることがうかがえた。

日産自動車の片山ら7-8)は、DLC(Diamond Like Carbon)コーティングに適した省燃費油の開発について報告。DLCコーティングに使用するFM(Friction Modifier)として無灰系FMとMoDTCとのフリクション特性比較した結果MoDTCが効果的であること、MoDTCの効果は金属系洗浄剤との組合せで変わり、ホウリン酸塩ガラスを形成可能なCaサリシレートが最も効果的であると報告している。

トヨタ自動車の山下ら7-9)は、GF-50W-20の低燃費油の開発について報告。コールドスタート燃費の改善を狙いオイルの低粘度化および混合潤滑領域の摩擦低減するための有機系摩擦調整剤を開発し従来のGF-4オイルに対し1.4%実車燃費を改善したとのこと。(藤井)

【参考文献】

- 7-1) 坊田 純, 熊谷 知久, 藤村 大造, 高山 進, 畑村 耕一: 普及型エンジンを狙った連続可変(リフト&開角+位相)動弁機構の開発, 自動車技術会 2012 年春季大会学術講演前刷集, No.69-12 (2012)
- 7-2) 張 洪雲, 金 泰均, 吉 愚泳, 金 世瑛: 商用車用ペーンタイプ可変オイルポンプ性能の最適化, 自動車技術会 2012 年春季大会学術講演前刷集, No.69-12 (2012)
- 7-3) 川瀬 直和, 松元 一生, 松岡 貴浩: しゅう動面の実測詳細形状を用いたピストンリング摩耗力計算と形状影響予測, 自動車技術会 2012 年春季大会学術講演前刷集, No.69-12 (2012)
- 7-4) 田牧 清治, 鮎沢 紀昭, 中澤 敦, 荒井 亮一郎, 彦根 顕, 大黒 隆: 耐デポジット性能に優れた3ピースオイルリングの開発, 自動車技術会 2012 年春季大会学術講演前刷集, No.69-12 (2012)
- 7-5) 市瀬 茂徳, 岩出 純, 河合 秀敏, 畑 善晴: ピストンオイルリング溝内のオイル挙動計測, 自動車技術会 2012 年春季大会学術講演前刷集, No.69-12 (2012)
- 7-6) 竹内 一雄, 伊藤 雄介, 藤本 公介: 過給直噴ガソリンエンジンでの異常燃焼に対するエンジンオイル着火性の影響調査(第1報), 自動車技術会 2012 年春季大会学術講演前刷集, No.70-12 (2012)
- 7-7) 藤本 公介, 山下 実, 金子 豊治, 竹内 一雄, 伊藤 雄介, 松田 裕充: 過給直噴ガソリンエンジンでの異常燃焼に対するエンジンオイル着火性の影響調査(第2報), 自動車技術会 2012 年春季大会学術講演前刷集, No.70-12 (2012)
- 7-8) 片山 拓也, 奥田 沙知子, 鈴木 理佳, 佐川 琢円: DLC 対応 GF-5 0W-20 省燃費エンジン油の開発, 自動車技術会 2012 年春季大会学術講演前刷集, No.70-12 (2012)
- 7-9) 山下 実, 金子 豊治, 藤本 公介, 平野 聡恒, 伊藤 雄介, 根本 周蔵, 小野寺 康: GF-5 0W-20 低燃費ガソリンエンジン油の開発, 自動車技術会 2012 年春季大会学術講演前刷集, No.70-12 (2012)

8 新しい計測診断技術 I - 燃焼モニタリング -

本田技術研究所の長島ら8-1)は圧電型加速度センサを試作し、等価図示平均有効圧力(等価IMEP)の計測手法について報告した。図8.1に示す出力波形をクランク軸回転速度の第1, 2次周波数成分の振幅と位相を用いて解析した結果、指圧計より算出されるIMEPと加速度センサから算出される等価IMEPの相関係数が定常・過渡時ともに0.99以上であることを示した。また、多気筒エンジンの等価IMEPの計測についても今後の可能性を示した。本田技術研究所の西田ら8-2)は、クランク軸角速度変動から等価IMEPを算出する手法について報告した。この手法はハードウェアの変更が不要であり、コスト削減の観点からも注目される。図8.2(20125175 fig1)に示す膨張行程中に発生する余剰トルクとクランク軸の回転エネルギーの増加が等しいことに着目し、図8.3(20125175 fig10)に示すようにクランク軸角速度差は排気量とIMEPに比例し、クランク軸系の慣性モーメントとエンジン回転数に反比例することを示した。明治大学の荒牧ら8-3)は、力センサと隙間センサではクランク軸回転速度の第1, 2次周波数成分の振幅を、加速度センサでは第1, 2次周波数成分の振幅と位相を用いること

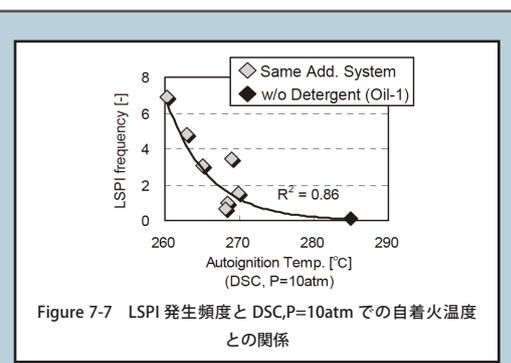


Figure 7-7 LSPI 発生頻度と DSC,P=10atm での自着火温度との関係

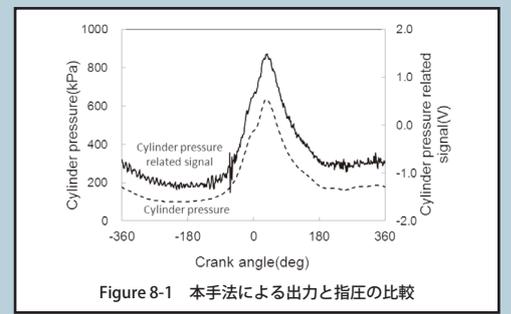


Figure 8-1 本手法による出力と指圧の比較

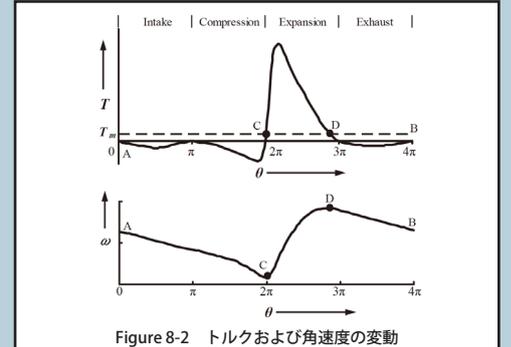


Figure 8-2 トルクおよび角速度の変動

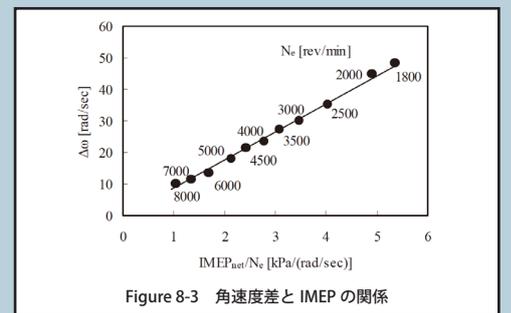


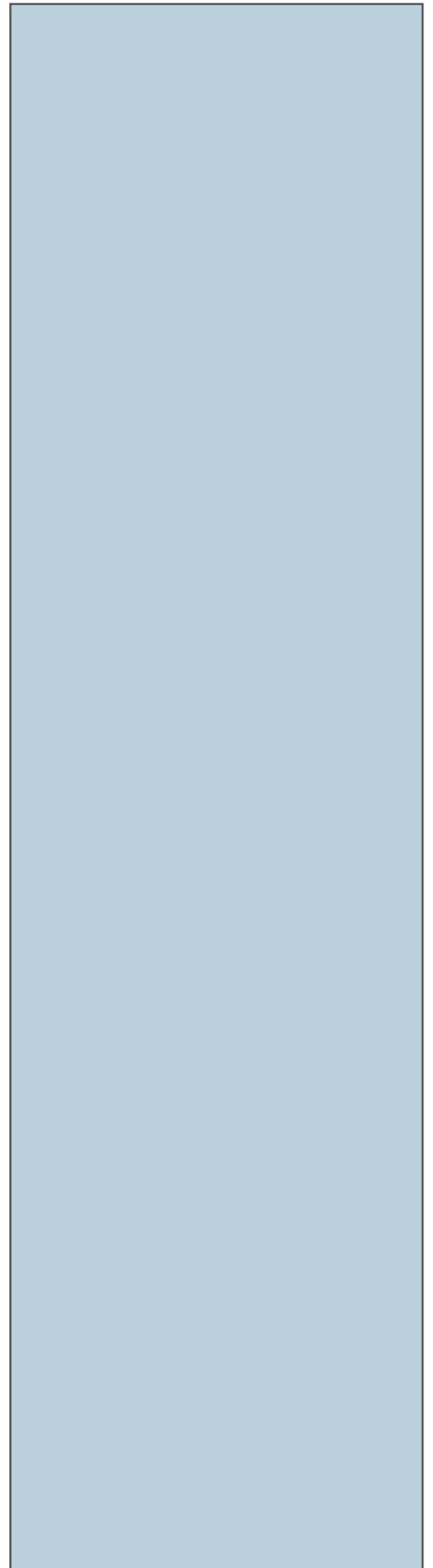
Figure 8-3 角速度差とIMEPの関係

で精度のよい測定が行えることを示した。(上智大・鈴木)

8-1) 長島 慶一, 三浦 啓二, 寺山 敏史, 嶋 原彬, 土屋 一雄: 試作型燃焼モニタセンサによる
等価図示平均有効圧力の計測, 自動車技術会 2012 年春季大会学術講演前刷集, No.17-12
(2012)

8-2) 西田 憲二, 金子 哲也, 高橋 陽一, 青木 宏二: クランク軸角速度変動による図示平均有
効圧力算定システムの開発, 自動車技術会 2012 年春季大会学術講演前刷集, No.17-12 (2012)

8-3) 荒牧 良輔, 土屋 一雄: 筒内圧センサを使わない燃焼モニタリング法について, 自動車技
術会 2012 年春季大会学術講演前刷集, No.17-12 (2012)



特集 1：自動車技術会春季大会レポート フォーラム

Report of 2012 JSAE Annual Congress (Spring) Forums

副委員長：村中 重夫
編集委員：小酒 英範
京都大学：石山 拓二

Shigeo MURANAKA(JSAE ER Editorial Committee)
Hidenori KOSAKA(JSAE ER Editorial Committee)
Takuji ISHIYAMA(Kyoto University)

日時：2012年5月23日(水)～5月25日(金)
会場：パシフィコ横浜(神奈川)
主催：公益社団法人 自動車技術会

1. GIA フォーラム「日本の乗用車用エンジン技術の優位性は維持できるか？」

～産学官エンジンコンソーシアムの必要性について～

と題する GIA フォーラムが 5/24 メインホールで開催された。企画はメーカー 7 社を含む、産学官のメンバーからなる「乗用車用ディーゼルエンジン研究会」である。

プログラムのタイトルからは乗用車用エンジン全般を扱うように思えるが、実際はディーゼルのみが対象である。総勢 10 人の講演から、コンソーシアムの立上げ理由を筆者は以下のように理解した。

- ・国内のディーゼル乗用車の市場規模は非常に小さく、国内生産の多くは欧州等の輸出向けである。このためディーゼル開発部隊の陣容は小さく、欧州メーカーのようにどんどん新エンジンを開発できない。
- ・欧州メーカーは日本と比べ産学官連携がうまくいっており、これが技術開発速度の向上につながり、商品力の高い新エンジンが次々と出てくる。
- ・よってオールジャパンのコンソーシアム活動をやって追いつきたい。

これに対して筆者の見解を述べると、

- ・欧州ではディーゼルシェアがガソリンより高いメーカーもあり、(ガソリン以上の売上高があるから)ディーゼル開発資源は日本より潤沢で多機種開発が可能なのは当然である。
- ・欧州、特に昨今ドイツメーカーの調子がよいのはシュレーダー改革?(法人税率引下げや非正規雇用の増大等)の効果と、ユーロ安でドイツ製造業の競争力が増した結果、売上増→開発投資増→開発速度向上 と理解すべきで産学官連携の良さが主因ではない。
- ・例えば、一社で年間数百万台のディーゼル車を製造・販売する VW に対抗できる体制は発表された「研究会」構想ではまだまだ非力と考えられる。

研究会のビジョンに明記されていないが、フォーラムの話聞いてメーカーの希望を代弁すれば、「日本の産学官の英知を結集した体制を作り、将来課題に対応できるエンジンの要素技術、システム技術を開発し続け、性能・コストの両面で競争力のあるエンジンを出し続けられるようにしたい」となる。しかし、体制案の中にある新エンジンに直接寄与するのが、開発ツールと後処理技術しかない個別ワーキング活動では、とても上述の目標は達成できそうもないと思われる。そこで以下の提案をしたい(独禁法等の国内外の法律に抵触しないとの前提で)。

世界で勝てるエンジン開発の一試案

(名付けて；オールジャパンディーゼルの初期ロット共同開発)

オールジャパンディーゼルの小(1.5Lクラス)、中(2Lクラス)、大(3Lクラス)を主担当会社を決めオールニューエンジンの企画、デジタル試作、評価から実機の性能実験、台上耐久まで1年で終わらせる。目標値、部品設計、システム設計の仕様検討は各社の担当者会議で、それぞれ松竹梅のバリエーションがあっても可。耐久目標未達でも可。材料、公差、表面処理等の入った図面と性能実験結果と耐久結果およびコスト見積り値が成果であり配分する(各社の負担と受益が公平になるよう委員会で調整)。部品メーカーも企画段階から参加した方がよい。この初期ロット成果の商品反映は各社の裁量とする。

全面更新してライフ末期の10年後でも競争力があるエンジンの目標値(性能、重量、サイズ、コスト等)は、各社の現有技術と現状の設計基準や耐久基準のままでは達成できないレベルになり、色々な新技術開発が必要となる。これを全社で分担して、世界一の開発速度を達成しようという考え方である。と言うのは簡単ではあるが、実行しようと思ったら入口論議だけで2-3年かかるかもしれないので、現実的には自薦・他薦で各社の得意な部位・システムの分担を決め、「良いとこ取りオールジャパンエンジン」を1機種やってみて次のステップに進むのが良いと思われる。

高い商品力(いいエンジン)→収益増大→開発投資増(設備、給与等)→学生にとって魅力ある産業→優秀な学生が集まる→同じ人数で高い開発力→初めに戻るのループを回せるように最初にいいエンジンを作るのが本試案の目標である。
研究会で大いに論議してもらいたい。(村中)

2. 自動車技術会春季大会 フォーラム「エコ社会を担う次世代自動車」

自動車技術会春季大会において、同会次世代自動車・エネルギー委員会の企画により「エコ社会を担う次世代自動車」と題するフォーラムが開催された。本稿ではその概要を報告する。

当フォーラムでは、エネルギー消費構造の低炭素化、持続可能化に対応する次世代自動車のパワートレイン技術とエネルギー供給インフラの役割と課題を明らかにすることを目的に、六つの話題提供が行われ、その後パネルディスカッションが開かれた。

話題提供の前半では、エネルギー供給インフラ技術と持続可能な都市構造に関する3件の話題が提供され、休憩をはさんだ後半では、次世代自動車の技術展望に関する3件の話題が提供された。以下に、各話題の概要を記す。

「3.11後に表面化したエネルギー課題」と題し、田二谷正純氏(インフラ・イノベーション研究所)より、東日本大震災後のエネルギー供給の課題について解説がなされた。電力、道路、ガスなどのインフラの危機管理における課題について解説がなされ、今後の課題として、大規模発電への過度な依存からの転換、エネルギーの基軸を原子力に置くことからの転換、火力発電の高効率化と熱電併給などの創エネ・省エネの進展、エネルギーネットワークの脆弱性の改善、電力システムの改革とスマート化、等が指摘された。さらに、道路、電力、ガス等のインフラ網のすべてに冗長性を取り入れることの重要性が示された。

「商品としての電力」と題し、日和崎一郎氏(元帝京大学)より、東日本大震災後の電力システムのあり方に対する提案がなされた。まず、今回の電力危機を40年前の石油危機に対比して、二次エネルギーとしての電力の長所と短所について解説された。次に、電力は公益性が強い生活必需品であり、その供給量と価格の安定性の高さゆえに、市場商品としての性格が弱いことが説明された。震災後、原子力発電への依存度を低減せねばならない状況にあり、これによる供給不足と価格上昇の可能性は、電力の公益性を揺るがしており、これに対する対策としては、電力市場に競争原理を持ち込むことで電力エネルギーの商品性を高めることが有効であると説明された。電力の供給不足の慢性化を前提にするなら、持てる発電能力をいかに全国ベースで最適配分するかが課題であり、この最適化において一次エネルギーの多様性に対応できる電力の特性を生かした供給源の分散が必須であり、その鍵は自由化であることが説明された。最後に、「節電」は今までの思考の単なる延長にすぎず、「脱電力」をキャッチフレーズにして日本の総電力需要量を縮小する政策が必要であると述べられた。

「環境・エネルギー問題と今後の持続可能な都市社会について」と題し、千田二郎氏(同志社大学)より、話題提供がなされた。まず、環境とエネルギー問題の現状と今後について概説され、再生可能エネルギーも含めた電力のベストミックスの可能性、再生可能エネルギー電力のコストと導入見込み量の予測などが紹介された。次に将来の交通システムと自動車エンジンシステムの用途別マッピングに関し、ホロニックエネルギーパスの概念を適用した最

適化について説明がなされた。さらに、持続可能な都市社会の構築に向けた試みの一例として、自然エネルギー発電、電気自動車を組み込んだスマートグリッド、地産地消型バイオマス利用などを取り入れた「けいはんなエコシティ次世代エネルギー・社会システム実証プロジェクト」について紹介された。最後に、今後の、環境・エネルギー問題と低炭素社会における重要な視点として、低炭素社会の実現は3科学（自然科学、社会科学、人文科学）三位一体の総合科学の取り組みであること、自動車を移動体としてとらえる都市・地域内の総合的な低炭素化が必要であることなどが示された。

「今後の電気駆動車の展開と自動車用蓄電池に関する課題」と題し、河合英直氏（交通安全環境研究所）より話題提供がなされた。まず、今後の電気自動車の展開について概説がなされ、電気自動車の航続距離については、近距離通勤用などの准公共交通機関として利用することを主眼とすれば、電気自動車用のバッテリーに対する仕様要求が絞られ、これまでの開発目標が変化し、より効率的なバッテリー開発が期待できると説明された。次に、運輸部門への電力活用の課題として、ユーザーが安心して乗れるための法規基準と工業基準の整備が必要であること、電気駆動車を生かす新たな交通インフラシステムを創出することが重要であることなどが説明された。新たな交通システムとして、環境改善と高齢化社会への対応のために、環境対応車を活用したまちづくりの検討、次世代型路面電車などのモーダルシフトの検討、超小型モビリティを活用した新しい交通システムの検討が必要であることが述べられ、これらの実現により電気駆動車のための「適所」が創造できると説明された。最後に、自動車用リチウムイオン電池試験について、現在検討されている安全性と耐久性に関する試験法について概説された。

「トヨタの次世代車への取り組み」と題し、松本優氏（トヨタ自動車）より話題提供がなされた。石油供給能力と代替燃料供給増加の予測について概説の後、ハイブリッド技術が省石油のために不可欠であること、代替燃料については、いずれも一長一短があり将来の燃料を一つに絞ることは困難であること、二次エネルギーとして電気と水素は供給量の点で優れており有望であるが、電気自動車と燃料電池車については多くの技術的課題があり普及には時間がかかることなどが説明された。次に電気自動車とハイブリッド車の融合であるプラグインハイブリッド車の優位性と特徴について説明された。ハイブリッド車、プラグインハイブリッド車、電気自動車の石油消費量削減効果を、一日当たりの走行距離の頻度分布を基に試算した結果について、電気自動車の75%削減に対し、ハイブリッド車は40%、プラグインハイブリッド車は70%の削減であり、プラグインハイブリッド車は電気自動車に匹敵する省石油効果を有することが説明された。さらに、燃料電池車について展望と取組が述べられ、燃料電池車は航続距離の増加に伴うシステムコストの増加が電気自動車に対し少なく、中距離において優位性があることが説明された。現状の燃料電池車は、実証走行において560kmを、水素タンク約7割の燃料消費量で完走している。また、-30℃の寒冷地試験において、安定した始動・走行を実証している。2015年からセダンタイプの燃料電池車の販売を開始し、2020年以降の普及拡大を目指したコスト削減が推進される。最後に、スマートコミュニティ構築に向けた試みとして、豊田市低炭素社会システム実証実験について紹介された。

「Honda次世代自動車とエネルギーの取り組み」と題し、大津啓司氏（本田技術研究所）より話題提供がなされた。まず、環境・エネルギー問題に対する認識の推移と運輸部門におけるCO₂削減手法の概要について説明された。次に、「Fun」、「環境」、「ベース技術」に分類された目的に対する、次世代自動車のガソリンエンジンとトランスミッションに関する様々な技術が紹介された。次に、2モーターハイブリッドシステムなどのハイブリッド車や電気自動車に関する技術が紹介された。また、次世代モビリティ実証試験として、各地で実施されている、ソーラー充電ステーション、次世代ソーラー水素ステーション、燃料電池車外部出力電源システムなどについて紹介された。次世代パーソナルモビリティ適用の考え方として、都市中心部における超小型モビリティ、都市内部における電気自動車、都市郊外までもカバーするプラグインハイブリッド車と燃料電池車という使い分けが示された。さらに、ITCを活用した取り組みとして、走行中の車両から交通や車両の情報を収集し利用するインターナビ・フローティングカーシステムが紹介された。同システムは、東日本大震災3日後から、東北地方における道路情報を実時間で収集し提供している。また、同システムにより収集された車両運転情報の統計処理により、例えば、急ブレーキ多発ポイントを抽出し、その原因を調査・対策することで事故防止に貢献している。最後に、次世代自動車の実用化には、内燃機関のさらなる効率向上と電力化技術の開発が必要であること、次世代自動車の普及には業界を超えた協力が必要であること等が述べられた。

以上の話題提供の後、企画者の小川英之氏（北海道大学）の司会進行により話題提供者全員が参加したパネルディスカッションが行われた。当セッションでは、電力供給不確実時代と次世代自動車、社会インフラと次世代自動車という二つの論点で討論がなされた。まず司会の小川氏より、2007年当時の新・国家エネルギー戦略に基づいた、2030年の次世代自動車の技術評価について説明がなされ、これらが電力の原子力発電依存度30～40%に基づくものであることが述べられた。震災後では、この条件が成り立たないことを前提に討論がなされた。討論の総括として、電力供給状況にかかわらず電動化を含めた省エネ技術の進展が重要であること、自然エネルギーに対する適切な評価と原発依存度に対する判断が急務であること、次世代自動車有効に機能する社会インフラの整備が期待されること、が述べられた。（小酒）

3. 自動車技術会春季大会 フォーラム「暮らしを支えるディーゼルイノベーション」

このシンポジウムは、自動車技術会ディーゼル機関部門委員会が企画し、「用途別最新技術から見えてくる共通点と課題解決のヒント」という副題が付けられた。ディーゼルエンジンの際立った特徴の一つは、自動車をはじめ、建設機械、鉄道車両、船舶、発電など幅広い用途に使われ、そのサイズと出力が非常に広い範囲に渡ることである。排気ガスをクリーンにしながらも、本来の特質である高い熱効率（低いCO₂排出）を犠牲にすることなく、さらに磨きをかけることは、用途に関わらず共通の課題であるが、これに対応する技術にはそれぞれのエンジンに固有の内容が見られる。このフォーラムでは、こういった技術的な相違点と共通点を理解し、さらなる高効率・低環境負荷化のためのブレークスルー技術の手掛かりを得ることをねらいとして、乗用車、トラック・バス、船舶、建設機械に使用されるディーゼルエンジンの最新技術についての講演と、パネルディスカッションを実施した。講演の概要は下記のようなものである。

友田晃利氏（トヨタ自動車）から、乗用車用エンジン技術の現状と今後の方向性について講演があった。圧縮比の低下、LPL-EGR（低圧ループ排気再循環）の追加、多段燃料噴射などの手立てにより、Euro 6レベルの低排出ガスの下で燃料消費率の改善が可能となったこと（図3-1）、低スワール比や高分散噴霧などの採用により冷却熱損失を低減しさらに燃費を向上できることが述べられ、今後は、後処理装置の高性能化によりエンジン本体の技術を低燃費化に集中させる方向性が示された。

島崎直基氏（いすゞ中央研究所）からは、商用車用エンジンの技術展望について講演があった。クリーンディーゼル技術研究の一例として、革新的次世代低公害車総合技術開発（NEDO, 2004～2008）の概要が紹介され（図3-2）、高膨張比、高等容度、冷却熱損失低減、排気熱回収、新燃焼法などの技術によりいっそうの低燃費化が図れることが示された。また、CO₂低減のための技術の一つとして、DMEトラックの実証試験結果が紹介された。将来的には、車両の 카테고리（大きさと航続距離）によっては電動化や新燃料の利用が進む方向であるが、商用車における内燃機関の重要性は維持されるとの見方が示された。

遠藤 真氏（日野自動車）の講演では、商用車パワートレイン技術の現状と将来について述べられた。自然吸気からターボ過給、さらにインタークーラ付きターボ過給の採用が進むといったパワートレインの変遷が説明され、最近では、ダウンサイジングと低回転・高トルク化が低燃費化のための主要技術であることが示された（図3-3）。今後の要求として、低CO₂とともに発電機能の要望があり、スマートグリッド、スマートコミュニティのツールとして商用車を位置づけるニーズがある。将来、小型トラックでは電動化が進むが、航続距離が長く、発停が比較的少ない大型トラックでは電動化の急な進展はなく、ディーゼルパワートレインのさらなる燃費向上が基本になるとの予測が示された。

飯島 正氏（アイ・ピー・イー）の講演では、建設機械用エンジンにおけるTier 4規制対応技術の内容が説明された。建機用エンジンは搭載される車両それぞれに使用される回転速度・トルクの範囲が大幅に違う、負荷変動が非常に激しいなどの特異な事情が紹介された。Tier 4 interimへの対応では、コモンレールシステムの噴射圧力上昇、噴射段数の増加、新型燃焼室、高効率EGRクーラ、可変ノズルターボ、連続再生ディーゼルパーティキュレートフィルタ（DPF）などの技術が採用された。Tier 4 finalに対しては、選択還元（SCR）触媒が採用される予定である。浄化効率の向上と小型化の両立、NRTC（Non Road Transient Cycle）に対応する尿素水噴射制御、尿素水インフラ整備などの課題がある（図3-4）。

若月祐之氏（三菱重工業）より、船用大型2サイクル低速ディーゼルエンジンの技術動向について講演があった。典型的なエンジンの例としては、シリンダ径・行程が、850mm・

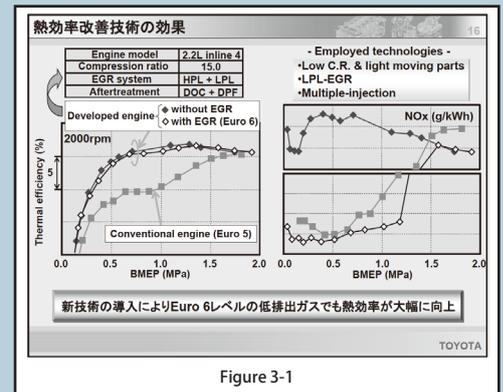


Figure 3-1

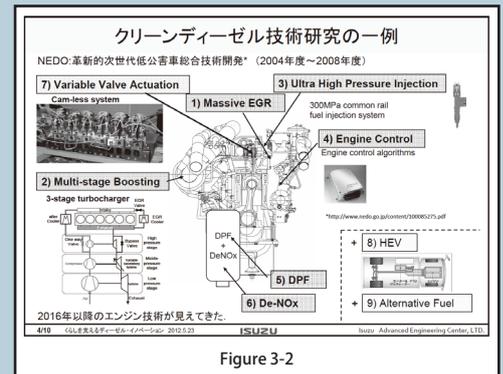


Figure 3-2

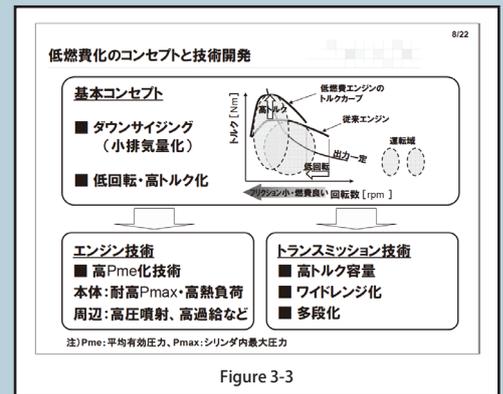


Figure 3-3

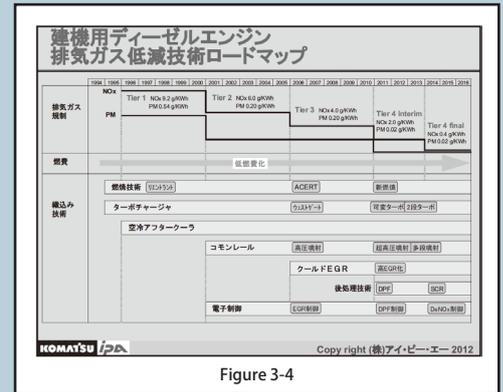


Figure 3-4

3150mm, 正味平均有効圧力 17bar, 回転速度 76rpm である。ジャケット冷却水損失がわずか 5% しかないことを示すエンジンのヒートバランスの例が示され、静圧過給、高効率過給機の採用、ロングストローク化など、これまでの熱効率改善の歴史が紹介された (図 3-5)。現在の最重要課題は、国際海事機関 (IMO) の排気ガス規制への対応と CO₂ 排出低減の両立である。NO_x の低減方法として、EGR およびアンモニア水を使う SCR 触媒の技術が解説され、重質燃料を使用することから、EGR システムには排気ガス中のばいじんなどを除去するスクラバーの設置が必要なこと、SCR においては、過給機下流の低い排気温度のもとで効率良く NO_x を除去する技術が必要なことなどが示された。

講演が終わった後、講演者をパネリストとし、筆者の司会で、「究極の熱効率・環境性能を目指して～各種エンジンの先端技術から学ぶ～」と題してパネルディスカッションを行った。ここで行われた議論の主な内容を以下に紹介する。

(1) 機関諸元の選択について

・エンジンによって圧縮比、ボア・ストロークなどの設定の考え方は異なるのか？

ここでは主に圧縮比の設定の考え方と動向について議論があった。乗用車用エンジンでは、講演の中で述べられたように低圧縮比化の方向にあり、圧縮比を 14 まで低下させた製品の例もある。商用車、建設機械、船舶用エンジンでは、これまでは筒内最高圧力の上昇とともに、圧縮比を高くしてきたが、燃焼室空間の確保、NO_x 抑制、摩擦損失の低減、部品コスト低減などの要求から、これからは低下する方向との見方が共通している。ただし、これは低いほど良いということではなく、要求の水準により適正値があるということである。その意味で、むしろ現状よりも圧縮比を高く取り、高い熱効率を達成できる素地を作っておいてから、排気ガスと熱効率の改善技術を磨いてゆくとする見解が示されたことは興味深い。

・大型エンジンの熱効率が高い理由について

ディーゼルエンジンの熱効率最高記録 (正味 55%) を持つ船用エンジンの技術を分析するべく議論があった。船用 2 サイクルエンジンに特有の技術としては、スワール順方向に複数のサイドインジェクタから噴射を行う方式、上部の限られた部分しか冷却していないシリンダライナ、静圧過給、超ロングストロークによる低い燃焼室 S/V (表面積 / 容積) 比、などである。特に、冷却熱損失が少ないことについては、低い S/V 比はもちろんのこと、主として燃焼室の中央部で燃焼が行われ、燃焼室壁に高温部が接触するのが避けられることが寄与していると考えられる。これは、他のエンジンにおいて、噴霧の到達距離、空気流動の調整や燃焼室形状の工夫により冷却熱損失が低減できることに通じる。

静圧過給の採用により 70% を優に超える過給機効率を実現していることも高い熱効率の大きな要因と思われる。広い回転速度・負荷の範囲で使用される乗用車用エンジンにおいて低回転速度・低負荷での熱効率は過給機効率に依存している。ただし、大容量の排気タンクを備える静圧過給方式を車両用のエンジンに適用することは、加速性能の点から困難であろう。

(2) 廃熱回収および電動化によるプラント効率向上の技術は広がるか？

乗用車用エンジンでは負荷・回転速度変動が大きく廃熱回収に向いていないことや、コストの面から大幅な電動化に限界があるので、エンジン本体の熱効率向上が基本である。商用車用では特に大型のエンジンで廃熱回収の検討が行われているが、回収したエネルギーを直接動力に変換するよりも、電力などに変換して蓄積することが肝要である。建設機械でも、油圧ショベルにおいて、上部構造の旋回運動を制動する際のエネルギーを電力回収するなどの電動化が進んでいる。また、船舶においては、ハイブリッドターボ過給機による発電、太陽電池等の利用により荷役に使う電力や停泊時の船内電力を供給するエンジン発電機の使用頻度を抑え排気ガスの放出を減らすなど電動化の動きが盛んである。

(3) 機関要素技術 (噴射系, 吸排気系) および後処理技術に対する期待

噴射系については、乗用車用エンジンでは、特に微量の多段噴射を精度よく行うことが要求され、商用車用および建設機械用エンジンにおいては、さらなる高噴射圧化 (~ 300MPa) をリークレスで達成することが期待されている。船用エンジンにおいても、重質燃料対応のコモンレールシステムや、スライド弁など噴射率制御を可能とする噴射系の要求がある。

過給機など吸排気系については、乗用車用エンジンでは特に低回転速度・低トルクでの過給機効率の改善が望まれ、商用車用のエンジンにおいても過給機効率の向上と可変動弁系の利用が期待されている。後処理技術に対しては、どのエンジンでも共通して浄化効率の向上、特に触媒活性化温度の低下が期待されている。

限られた時間でのパネルディスカッションで、十分掘り下げた議論ができたとは言えないが、異分野同士の交流をこれから先も続ける価値があると感じた。(石山)

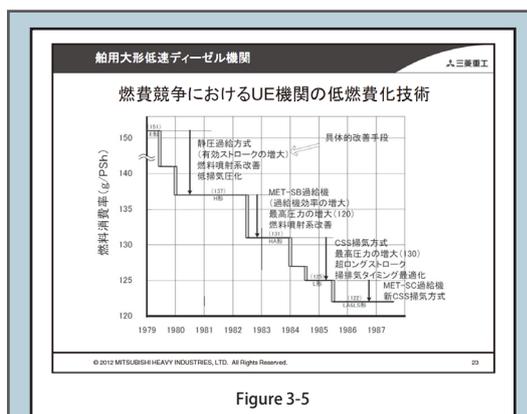


Figure 3-5

特集 2 : EVS26

Report of EVS26

独立行政法人国立環境研究所 地域環境研究センター 主任研究員：近藤 美則
 公益財団法人豊田都市交通研究所 研究部 主任研究員：加藤 秀樹
 電気自動車普及協議会 主席研究員：唐鎌 圭彦

Yoshinori KONDO (National Institute for Environmental Studies), Hideki KATO (Toyota Transportation Research Institute),
 Yoshihiko KARAKAMA (Association for the Promotion of Electric Vehicles)

日 時：2012年5月6日（日）～5月9日（水）
 会 場：L. A. Convention Center (California)
 主 催：THE WORLD ELECTRIC VEHICLE ASSOCIATION

1 EVSとは

Electric Vehicle Symposium (EVS) は、世界電気自動車学会 (World Electric Vehicle Association : WEVA) が主催する電動車両分野における世界最大の国際シンポジウムである。三つの地域団体 (EDTA: Electric Drive Transportation Association (米国), AVERE : European Association for Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicles (欧州), EVAAP : Electric Vehicle Association of Asia Pacific (アジア太平洋)) が順番に事務局を務め、ここ数年では1年半毎にシンポジウムが開催されている。今回、参加した EVS26 は、米国の EDTA が事務局を務め、ロサンゼルスで開催された。なお、閉会セレモニーでは、事務局から 500 人以上の事前登録者があったと報告されていた。(図 1)

2 EVS26 の概要

シンポジウムの企画として、レクチャーセッション (口頭発表)、ダイアログセッション (ポスター発表) に加えて、三つのテーマに分かれたワークショップ、自動車メーカーをはじめ電動車両にかかわる 120 以上の様々な企業・団体による展示会、16 の企業・団体が車両を提供した電動車両試乗会等が、5月6日から9日までの4日間にわたって行われた。レクチャーセッションは 45 のセッションに分かれ、200 件以上の発表が行われた。1セッションは 90 分間で 4～5 件の発表があり、1件当りの発表時間は発表件数に応じて 12 分～15 分間、Session Chair (座長) の裁量で質疑は発表毎またはセッション最後にまとめて行われた。ダイアログセッションは、2 日間に分けて行われ、合計 230 件以上の発表があった。90 分間の対話時間が設けられており、発表者がポスター前に立ち、参加者と議論が行われた。(図 2)

3 発表論文

レクチャーセッションおよびダイアログセッションを合わせた発表論文全体について、発表題目を元に著者が整理した結果、分野毎の関心は、車両全体に関わるものが約 18%，駆動系、市場、政策はおおの約 15%，電池は約 12%，充電設備などのインフラが約 10% となった。発表件数は前回の中国開催の EVS25 とほぼ同様であるが、関心としては車両にかかわる発表が大幅に減る一方、市場、政策、インフラに関する発表が増加した。電池は若干減少したが、燃料電池は前回同様、約 5% を占めていた。なお、プラグインをキーワードとする発表は全体の約 1 割を占め、関心の高さが伺われた。(図 3)



Figure 1 EVS26 の会場のコンベンションセンター

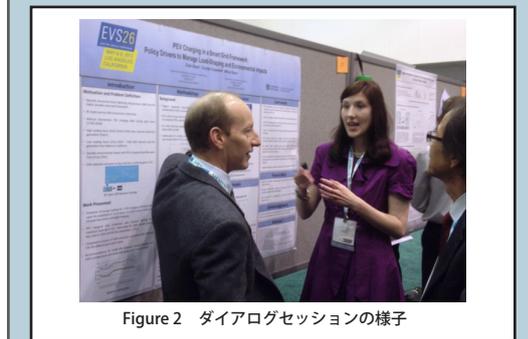


Figure 2 ダイアログセッションの様子

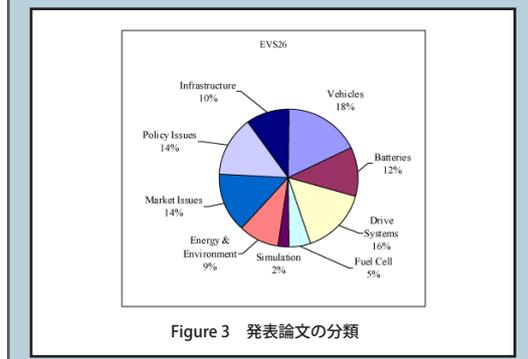


Figure 3 発表論文の分類

4 展示会

前回 (EVS25) と比較すると、会場の規模は約 1/4 で、出展数や目立つ展示が少なく、会場の雰囲気もどこか醒めていた。前回の EVS25 の熱気は、電気自動車だけで 40 社近くが出展していたほかならぬ開催地中国が作り上げたもので、EVS25 は中国国内向けの中国企業のためのシンポジウムだったと言えよう。日本の自動車関連企業からの出展もあり、車両としては、FIT EV (ホンダ)、iMiev (三菱)、LEAF、LE CONCEPT (日産、INFINITI)、CT F SPORT (LEXUS)、PRIUS α、PRIUSc (日本名: AQUA)、PRIUS PHV、RAV4 EV (トヨタ) 等が展示されており来場者の関心を集めていた。(図 4)

さらに、新しい技術の展示として SIEMENS 社のブースでは、高速道路に架線を引き、パンタグラフを搭載したトラックが電力の供給を受けながら走行する eHighway というシステムが展示されていた。パンタグラフ自体は新しい技術ではないが、車両前方バンパに搭載したセンサが架線を検知し、高速で走行しながらパンタグラフの昇降、車両左右移動に追従した位置調整を行っている様子が映像で流されていた。なお、前回の EVS で極めて多くの展示がなされていた小型 EV、2 輪や 3 輪の一人乗り電動車両については、数社が展示しているのみであった。

インフラに関しては、前回の EVS25 と同様に、充電スタンドに関する展示が目立った。新しい技術の展示としては、PluglessPower 社のブースに展示されていた乗用車の無線充電方式がある。無線充電方式は、日本でも早稲田大学等による研究開発、実証実験が行われており、実用化と普及が期待されている。(図 5)

また、日本が提案し現実の市場ではリードしている CHAdeMO 方式に対抗したコンボ方式の充電装置が展示会場の奥まった場所で展示されていた。コンボ方式とは、「コンバインド・チャージング・システム」と呼ぶ新規格であり、米独連合が 5 月 7 日 EVS にて規格を公表した。このコンボ方式は、レクチャーセッションでも該当するセッションがあり、発表後に会場から「この規格ができたということは CHAdeMO の終わりと考えていいのか」という問いに対し、連合側からは「しばらくは共存するだろうが、いずれはひとつに統一」という見通しが示された。さらに、展示会で数社が展示していた無線充電方式について、「将来の標準規格となるだろうし、できるだけ早く規格化の作業を進めなくてはいけない。ただその際にも、有線充電方式の国際規格が基本となる」と付け加えられた。

5 試乗会

電動車両の試乗会では、16 の企業・団体から 20 台以上の試乗車両が提供されていた。著者の見ている限りでは、試乗に際して混雑はなく、のんびりしたものだ。電動自転車、3 輪 EV、スクーター EV 等の個人用小型 EV の展示・試乗は 2 社程度しかなく、前回米国で開催された EVS23 (アナハイム) より格段に少なくなっていた。なお、試乗会場横では、テスラモータ社の電気自動車に対して、男性 2 名による電池パック交換作業のデモンストレーションが行われていた。(図 6)

6 おわりに

過去の EVS の開催頻度を見ると、大阪で行われた EVS13 (1996 年 10 月) までは 2 年に 1 回の頻度、米国ロングビーチで開催された EVS20 (2003 年 11 月) までは毎年、その後は次回のスペイン・バルセロナ (2013 年 11 月) までは約 1 年半毎に開催されている (予定中も含む)。開催間隔を技術進歩や EV 等に対する関心度とするならば、多様な可能性を確認する熱狂的な時期は過ぎ、実市場を見据えたビジネスとしての EV 開発・普及に移行しつつある時期にきたと思う。今回の EVS26 ではどこか醒めた感じがしたが、それにはカリフォルニア ZEV 規制という、ただちに、しかし地域限定的に対応しなければならない、規制の存在が影響しているかもしれない。



Figure 4 トヨタ自動車のブースの様子



Figure 5 PluglessPower 社の非接触充電器



Figure 6 試乗会場横での電池交換のデモンストレーション

古典を辿る：熱損失の経験式（Woschni の式）

Report of Empirical Formula for Heat Loss Prediction in Internal Combustion Engines

千葉大学：窪山 達也

Tatsuya KUBOYAMA (Chiba University)

1. はじめに

近年、内燃機関に対しては徹底した熱効率の向上と排気の浄化が求められている。熱効率の向上や、排気後処理システムの浄化効率に配慮した排気温度管理の指針を得る際には、サイクルの熱勘定（エネルギーバランス）を解析することが基本になる。サイクルあたりに供給される燃料の発熱量は図示仕事、熱損失、排気エネルギーに配分される。このうち、図示仕事と排気エネルギー（作動ガスの内部エネルギー変化）については、測定した筒内圧力履歴から熱力学的に求めることができる。熱損失に関しても、サイクル全体のエネルギーバランスを考えて、供給燃料の総発熱量から図示仕事と排気エネルギーを差し引くことで求めることができるが、ここで得られる熱損失はサイクル全体の総量であり、クランク角度ごとの熱損失（熱損失の時間履歴）を筒内圧力の測定値から直接得ることは難しい。シリンダ壁面における熱流束を直接測定すれば、熱損失の時間変化を得ることができるが、内燃機関内の壁面熱流束は、壁面上に不均一な分布を示すと同時に、非定常に変化することが知られており、空間、時間分解能に優れた計測が求められる。このため、測定した筒内圧力履歴を用いて、燃焼室壁面における平均的な熱伝達率を簡易に予測する実験式が Woschni^{(1),(2)}, Nusselt⁽³⁾, Eichelberg⁽⁴⁾, Annand⁽⁵⁾ ら数多くの研究者によって提案されてきた。これらの推算式は、現在でもエンジン試験における燃焼圧力解析や、0次元サイクルシミュレーションにおいて広く利用されている。本稿では、熱伝達率予測式の中でも使用されることの多い Woschni の式を取り上げ、Woschni が予測式を提案した原論文を振り返り、燃焼室内の熱伝達率予測式の成り立ちについて見ていく。

2. Woschni の式

2.1 Woschni の式の成り立ち

まず、Woschni は、シリンダ内の熱伝達の基本現象に強制対流熱伝達を仮定し、乱流対流熱伝達の一般的な相似則を適用することでエンジンシリンダ内の Nusselt 数および熱伝達率 h を (1) 式、(2) 式の形で表現した。ここで、作動ガスの密度、粘度、熱伝導率を圧力 P と温度 T の関数として与えている。

$$Nu = C \cdot Re^m \quad (1)$$

$$h = C \cdot d^{m-1} \cdot P^m \cdot w^m \cdot T^{0.75-1.62m} \quad (2)$$

C は実験定数である。Re 数にかかる乗数 m には、定常乱流熱伝達における一般的な値である 0.8 を適用した。 d は代表長さで、他の予測式と同様にシリンダボアの直径が用いられている。 P , T はそれぞれ作動ガスの圧力と温度を表す。 w は代表速度であり、筒内の平均的なガス流速に相当する。モータリング運転や吸気・排気・圧縮行程など、燃焼の影響が無い範囲では、筒内流動はピストン移動に関連付けて考えることができる。Woschni は、シリンダ内の平均ガス流速（代表速度） w をピストンの平均速度 c_m に比例すると仮定し、比例定数 C_1 を導入することで (3) 式のように与えた。圧縮行程においては、吸気行程中に生じたガス流動、乱れが急速に減速する。このため、筒内の平均流速はピストン速度に近いと考えられるが、吸気行程においては、吸気バルブから吸入空気が高速で流入するので、筒内の平均的なガス流速はピストン速度に比べて大きくなる。しかし、この流入速度もピストン速度に比例すると考え、行程毎に異なるガス流速の影響を考慮するため、吸排気行程と圧縮膨張行程においては別々の係数 C_1 が適合されている。

$$w = C_1 \cdot c_m \quad (3)$$

一方、燃焼開始以降の熱伝達においては、ピストン移動により誘起されるガス流動の効果に加えて、燃焼に起因する乱れの増大、急峻な圧力上昇による温度境界層の圧縮、壁面付近の作動ガスの温度勾配の非定常な変化などが、壁面熱伝達に影響を及ぼす。Woschni の式で

は、これらの燃焼に起因する熱伝達影響因子の効果を表現するために、代表速度項に燃焼起因のガス流動項 w_c が付加 ((4) 式) されており、燃焼の効果を表す項 w_c をモータリング運転時の圧力 (P_0) とファイアリング運転時の筒内圧力 (P) の差の関数として (5) 式のように表した。燃焼開始以降の熱伝達率についても、定常乱流熱伝達を仮定して導出した予測式 (2) の形で与え、(2)~(5) 式を合わせて燃焼の効果を含めた熱伝達率予測式として (6) 式のようにまとめた。すなわち、Woschni の式では、燃焼が熱伝達に与える主な影響を燃焼によって誘起されるガス流動に代表させ、熱発生による圧力上昇の形で予測式に反映させている。

$$w = C_1 \cdot c_m + w_c \quad (4)$$

$$w_c = C_2 \frac{V_s \cdot T_1}{P_1 \cdot V_1} \cdot (P - P_0) \quad (5)$$

$$h = 110 \cdot d^{0.2} \cdot p^{0.8} \cdot T^{-0.53} \left[C_1 \cdot c_m + C_2 \frac{V_s \cdot T_1}{P_1 \cdot V_1} \cdot (P - P_0) \right] \quad (6)$$

以上が最初の提案式であるが、後に Woschni 自身により C_1 にスワールの影響を付加した修正式が提案されている⁽²⁾。

$$C_1 = 6.18 + 0.417 \cdot \frac{c_u}{c_m} \quad (\text{For gas exchange period}) \quad (7)$$

$$C_1 = 2.28 + 0.308 \cdot \frac{c_u}{c_m} \quad (\text{For the rest of cycle})$$

ここで、 c_u は筒内ガスの周方向流速、 c_m は平均ピストン速度を表す。

また、ディーゼル燃焼においては、燃焼の過程で生成されるすす粒子からの輻射熱伝達の寄与も大きいことが知られている。予測式の中には、対流熱伝達と輻射熱伝達を区別するものもあるが、Woschni の式において両者は区別されていない。

以下に、Woschni の式の成り立ちについてまとめる。

- ・ Woschni の式は、定常乱流熱伝達の仮定のもとに構築された式である。
- ・ 筒内の熱伝達における代表速度が平均ピストン速度に比例することを仮定し、実験定数 C_1 を導入して、未知の筒内ガス流動をピストン平均速度に関連付けている。
- ・ 燃焼に起因する熱伝達率に関する全ての影響因子の効果を一括して燃焼によるガス流動および乱れの増大として代表速度項に含め、モータリング運転時とファイアリング運転時の筒内圧力の差として反映させている。

Woschni は単気筒エンジンを使った系統的な実験を行い、これらの仮定の妥当性を検証するとともに実験定数を適合していった。次節では、Woschni が実施した実験について紹介する。

2.2 Woschni の実験

Woschni は、単気筒試験機関を用いて定常流試験、非燃焼 (unfired) モータリング試験、燃焼 (fired) 試験を順番に行い、吸排気行程、圧縮行程、燃焼期間を含む膨張行程のそれぞれの行程について、構築した熱伝達率予測式の仮定の妥当性を検討し、式中の実験定数を適合していった。まず、燃焼の影響が含まれない非燃焼 (unfired) のモータリング試験を行うことで、燃焼の影響が無い場合について、定常熱伝達の仮定、代表速度と筒内のガス流動を関連付ける実験定数 C_1 について検討した。図 1 に Woschni が実験に使用した 4 ストローク単気筒エンジンの概要を示す (機関の諸元は詳述されていない)。最初に作動ガスの圧縮と膨張の影響が含まれない吸気・排気行程の熱伝達率について調べている。この実験では、図 1 における "Combustion Chamber" で加熱した空気をエンジンに供給しながら、エンジンが一回転する間 (クランク角度で 360 度の期間) に吸気弁、排気弁を一回ずつ開閉させて、吸気行程と排気行程の 2 行程のみでエンジンを駆動させた。すなわち、準定常的に吸気と排気のみを繰り返し、冷却水および潤滑油に吸収された熱量、出力、筒内圧力、時間平均的なシリンダ壁面温度を計測することで、吸気・排気行程における熱損失量を求めている。ただし、このようにして計測した熱損失量には、吸気ポートや排気ポートなどシリンダ外での損失熱量が含まれる。シリンダ外での熱伝達の影響を排除するために、非燃焼のモータリング実験に先立ち、シリンダヘッド単体を用いた定常流試験を行い、シリンダ外部での熱伝達率をレイノルズ数 (Re) とバルブリフトの関数として求めている。定常流試験結果からシリンダ外部 (吸排気ポート壁など) における熱損失量を予測し、吸・排気のみを繰り返す 2 行程モータリング運転時の熱損失総量から差し引くことでシリンダ内部での熱損失量だけを抽出することができる。図 2 に実験結果を示す。図は、ピストン速度 c_m 、作動ガスの圧力 p と温度 T を

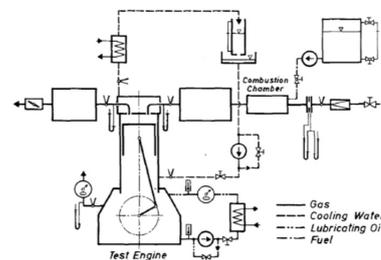


Figure 1 Scheme of test equipment
(Figure 6 in the reference [1])

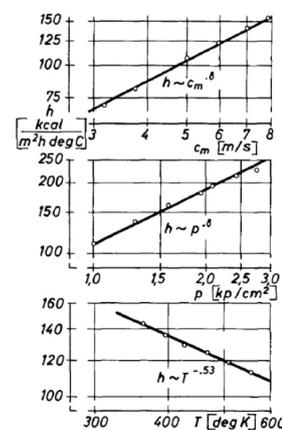


Figure 2 Heat transfer coefficient during scavenging period
(Figure 7 in the reference [1])

実験パラメータとして独立に変化させ、各々のパラメータの変化に対する熱伝達率 h の感度を調べた結果である。図より、吸排気行程の熱伝達においては、定常管内乱流熱伝達を仮定し、熱伝達率が Re 数の 0.8 乗に比例すると仮定することで、ピストン平均速度、圧力、作動ガス温度の変化に対する平均熱伝達率の変化の傾向を良く表現できることがわかる。また、提案式を用いた推算熱損失量が熱損失量の測定結果と一致するように、定数 C_1 (代表速度とピストン平均速度を関連付ける定数) が適合され、 $C_1 = 6.18$ と定められた。

次に、圧縮と膨張行程を含めた 4 行程のモータリング運転試験を実施し、吸排気行程のみの 2 行程試験と同様に、 Re 数にかかる乗数 $m = 0.8$ の妥当性が検証され、圧縮・膨張行程における熱伝達率に対する代表速度を与える定数 C_1 が適合された。この実験では、圧縮・膨張行程を含む 4 つの行程を含めてエンジンをモータリング駆動して計測される熱損失の総量から、シリンダ外部での熱損失量 (定常流試験結果より)、吸排気行程における熱損失量 (吸排気 2 行程モータリング試験より) を差し引き、圧縮と膨張行程中の熱損失量のみを抽出している。吸気行程中に生ずる強いガス流動、乱れは圧縮行程には減衰し、圧縮・膨張行程中の平均ガス流速はピストン速度に近づく。熱伝達率予測式の定数 C_1 は、吸排気行程における定数よりも小さく $C_1 = 2.28$ が与えられている。また、圧縮行程、膨張行程においては吸気・排気行程よりも作動ガスの圧力と温度の時間変化が大きいため定常乱流熱伝達の仮定から逸脱することが懸念されるが、定常乱流熱伝達式を用い、乗数 $m = 0.8$ を適用することで、ピストン平均速度 c_m や吸気圧力 P_L の変化に対する熱伝達率 h の変化を良く表現できることが示されている (図 3 参照)。前節で紹介した通り、以上の非燃焼試験において適合された定数 C_1 については、スワールの影響を付加する形で修正式 (7) が提案されている⁽²⁾。

非燃焼のモータリング運転時の熱伝達率予測式を適合した後、燃焼 (fired) 運転試験が実施された。燃焼運転においても、吸気と排気、および圧縮行程の熱伝達に対して燃焼の影響は無い。したがって、これらの行程における熱伝達率に対しては、非燃焼時の推算式がそのまま適用できると考えられる。よって、ここでは燃焼開始以降の平均熱伝達率について検討された。燃焼運転試験において、熱損失の総量はエネルギーバランスを考慮して、供給燃料の総発熱量から図示仕事と内部エネルギーの変化分を差し引くことで求められる。他方、非燃焼のモータリング試験で構築した熱伝達率予測式 (2) に燃焼運転時の圧力、温度を適用することでも熱損失量を推定することができる。ただし、この場合には、熱伝達率に対する燃焼の影響が考慮されない。図 4 には、吸気圧力を変化させた場合について、燃焼運転時のエネルギーバランス法による計測熱損失量と、モータリング運転において構築された予測式 (2) に燃焼時の筒内圧力の測定値を適用して求めた推算熱損失量の比較が示されている。図中の Q_{TH} は吸気および排気ポート壁 (シリンダ外部) での熱伝達量、 Q_{SC} 、 Q_{COMP} はそれぞれ吸排気行程と圧縮行程におけるシリンダ壁面への熱伝達量を表し、モータリング試験で得られる予測式から得られる。 Q_E がモータリング時の熱伝達率予測式を使って求めた膨張行程中の熱損失量 (図の破線) で、 Q_{C+E} がエネルギーバランス法により実測した膨張行程における熱損失量 (図の実線) である。図より、非燃焼時の熱伝達率推算式を用いると (Q_E)、燃焼運転時の熱損失 (Q_{C+E}) を過少に評価することがわかる。 Q_{C+E} と Q_E の差が、燃焼が熱伝達に与える影響を表す。燃焼の効果として w_c を付加した (6) 式から得られる熱損失量が実測値 (Q_{C+E}) に一致するように定数 C_2 を定め、 $C_2 = 3.24 \times 10^{-3}$ と定められた。 w_c 中の定数 C_2 は燃焼時と非燃焼時の熱損失の差から与えられたものである。したがって、予測式の形の上では、ガス流動・乱れの増大という形で燃焼の影響が表現されているが、ガス流動の効果だけでなく、非燃焼サイクルと燃焼サイクルの熱伝達の差を生じさせる全ての要因の効果が反映されていることになる。

以上のように、Woschni の実施した検証実験の範囲では、少なくとも燃焼が影響を及ぼさないと考えられる吸気、排気、圧縮行程については、圧力や温度の非定常性の影響は少ないように見受けられる。代表速度については、シリンダ内のガス流動は、基本的にはピストン移動に誘起されると考えられるので、代表速度を平均ピストン速度に関連付けて与えることは合理的であると考えられるが、燃焼室形状や吸気ポート形状が変われば、新たに実験定数を適合する必要がある。これらガス流動に影響を及ぼす形状因子の効果を特定のエンジンで適合した実験定数を使って評価することはできない。また、スワールやタンブルなどの吸気行程中に生成されるガス流動は、排気行程においては減衰しているものと思われるが、両行程の熱伝達率を一括して取り扱っている点に注意する必要がある^{(8),(9)}。燃焼期間中の熱伝達率の増大については、定性的な傾向を表現する方法として、燃焼による熱発生に起因する圧力上昇 (モータリング圧力と燃焼圧力の差) により予測式に反映させている。このことは、言い

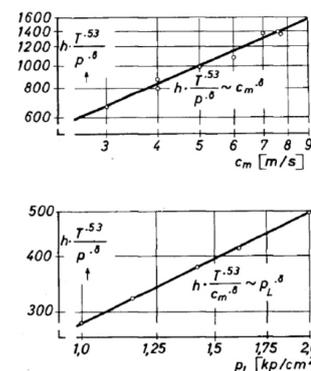


Figure 3 Related heat transfer coefficient during compression and expansion strokes (Figure 8 in the reference [1])

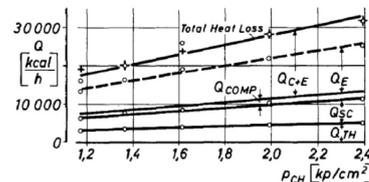


Figure 4 Heat balance of the fired engine (Figure 9 in the reference [1])

換えれば、燃焼の効果は筒内圧力を通じて反映させることしかできず、燃焼に起因する熱伝達に対する影響因子について、物理的な意味に基づく表現がなされていないことに注意されたい。また、熱損失の総量を実験的に求めるために、筒内圧力の測定値から図示仕事と内部エネルギー変化を求めている。作動ガスの内部エネルギー変化を筒内圧力から解析する手法は種々あるが、本実験で採用した手法や精度について明確でないこと、解析手法によっては熱損失量の計測結果の大きな誤差要因となることにも留意する必要がある。Woschniの式は、各行程ごとの予測熱損失の総量（積分値）が計測結果と一致するように実験定数が調整されたものであり、クランク角度ごとの熱伝達特性（熱伝達率の時間変化）について実験的に検証された式ではない。クランク角度ごとの熱伝達率を与える式ではあるが、基本的には熱損失の総量を推定する実験式と捉えるべきと考える。

3. Woschniの式の検証例

3.1 シリンダ内平均熱伝達率の検証

Woschniの式を用いて推算される熱損失が実測値と合わないとの指摘は多い。本節では、Woschniの式を用いて予測される熱伝達率を実測結果と比較した例を紹介する。

榎本ら⁽⁶⁾は、自然給気の直接噴射式ディーゼル機関に、薄膜型の熱電対を多数取り付けシリンダ内壁面上の局所熱流束を測定し、燃焼室内の平均熱伝達率を実験的に求めている。すなわち、ピストン頂面14点、ピストントップランド16点、ピストンキャビティ内15点、シリンダヘッド9点、シリンダライナ35点、吸排気バルブ10点（測定不能の1点を含む）の合計100点（測定は99点）の局所熱流束と瞬時壁面温度を測定し、シリンダ内の平均熱流束、平均壁面温度の時間変化を求めている。これらとともに、筒内圧力の計測結果から熱力学的に求めた作動ガスの平均温度を用いて、シリンダ内の平均熱伝達率を求めた。図5に、測定した平均熱伝達率とWoschniの式による予測熱伝達率の比較を示す（回転数1200rpm、全負荷、TDC着火）。まず、Woschniの式による予測熱伝達率の定量的な予測精度に着目すると、予測熱伝達率は実測値と比較して、圧縮行程においては低く、燃焼開始以降、膨張行程においては高い。そして、膨張行程の末期にかけて実測値との差異は小さくなっている。熱伝達率の時間変化に着目すると、着火後に熱伝達率が急峻に上昇するタイミングや熱伝達率が最大となる時期など、時間変化に関する定性的な傾向は、実測値の傾向を概ね再現できているように見受けられる。図6は、筒内平均熱伝達率の1サイクル間の平均値を比較した結果である。着火時期とエンジン回転数の変化に対する熱伝達率の変化が示されている。“Present”が実測結果、“Woschni”がWoschniの式による予測熱伝達率を示す（“Eichelberg”はEichelbergの式(4)による予測熱伝達率）。総じて見ると、Woschniの式はサイクル平均の熱伝達率を過大評価しているが、着火時期や回転数に対する熱伝達率の定性的な変化は再現されている。

Woschniの式において、ガス流動の効果は、基本的にはピストン平均速度により評価されるため、クランク角度によらず一定である。しかし、圧力と温度については、クランク角度ごとの値が用いられる。図5の結果によれば、Woschniの式で与えられる予測熱伝達率は、測定したクランク角度ごとの熱伝達率の変化の傾向を概ね再現している。このことから、エンジンシリンダ内の熱伝達率のクランク角度ごとの変化に対しては、ガス流動のクランク角度変化が及ぼす影響は小さく、筒内圧力および温度の変化の方が支配的な要因となっていることが示唆される。また、Woschniの式において、熱伝達率に対する筒内ガス流動の効果は機関回転数（ピストン速度）を通して表現され、燃焼が及ぼす効果は、燃焼による熱発生に起因する筒内圧力上昇によって反映されている。従って、図6に示されるように機関回転数、および着火時期などの熱発生パターンに直接的に影響を及ぼすパラメータについては、これらのパラメータの変化に伴う熱伝達率の定性的な変化の傾向は、Woschniの式で評価することが可能であると考えられる。

3.2 局所熱伝達予測への適用とその妥当性

次に、Woschniの式を適用して推算した局所熱伝達率を実測した局所熱流束から求めた局所熱伝達率と比較した研究例について紹介する(7)。図7に、直接噴射式ディーゼル機関のピストン頂面における2つの測定点（図8のA点とB点）について、着火時期を変化させた場合のWoschniの式による局所熱伝達率の推算値(α_{gc})と実測値(α_{ge})の比較を示す。Woschniの式については、スワールの影響を考慮した修正式(2)が使われている。また、Woschniの式を用いて局所熱伝達率を推算する際に、温度、圧力については3次元数値解析結果から得

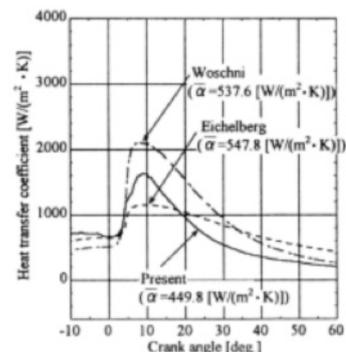


Fig.10 Comparison of global heat transfer coefficient (1200rpm, Full load, Ignition timing TDC)

Figure 5 Comparison of global heat transfer coefficient (1200 rpm, Full load, Ignition timing TDC) (Figure 10 in the reference [6])

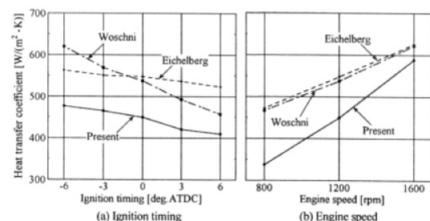


Fig.11 Comparison of time-averaged global heat transfer coefficient at various conditions

Figure 6 Comparison of time-averaged global heat transfer coefficient at various conditions (Figure 11 in the reference [6])

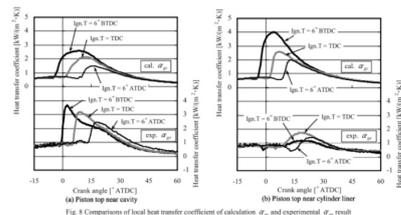


Figure 7 Comparisons of local heat transfer coefficient of calculation α_{gc} and experimental α_{ge} result (Figure 8 in the reference [7])

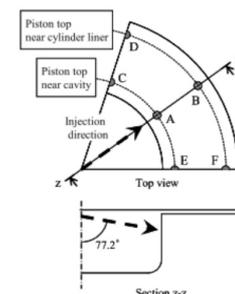


Fig. 8 Location of local gas temperature sampling points of piston top near cavity and near cylinder liner

Figure 8 Location of local gas temperature sampling points of piston top near cavity and near cylinder liner (Figure 5 in the reference [7])

られる局所的な値が用いられている。局所熱伝達率の計測値については、局所熱流束と局所壁面温度の測定値、および3次元数値解析による局所ガス温度を用いて求められた値である。図を見ると、A点においては熱伝達率波形の位相、着火時期の変化に対する定性的な傾向など、実測値に対する再現性はある程度見られる。しかし、Woschniの式で得られる熱伝達率の方がなだらかな時間履歴を示している。一方、B点においては、定量的にも定性的にも実測結果との差異が著しい。Woschniの式は、式の成り立ちから熱伝達現象の局所性を配慮した予測式ではない。例えば、ガス流動が熱伝達に与える影響はピストン平均速度によって反映されており、燃焼の影響については筒内圧力により反映されているが、ピストンの平均速度や筒内圧力の影響は基本的には燃焼室内の位置によらず均等に作用する。ここに紹介した結果に示されているように、Woschniの式を用いて燃焼室内の局所的な熱伝達状態を議論することは難しい。

4. おわりに

本稿では、筒内圧力履歴の測定値を用いて簡易的にシリンダ内の平均熱伝達率を予測する実験式として代表的なWoschniの式を取り上げ、実験式の成り立ち、および式を構築する際に実施された実験について著者の解釈を含めながら概説した。また、Woschniの式による熱伝達率の予測精度を検証した研究例を紹介し、Woschniの式の適用範囲、使用する際に注意が必要と思われる点について述べた。以上について、より詳細は原文を読まれることを推奨する。Woschniの式は定常乱流熱伝達の仮定を基礎として構築された実験式であり、代表速度（筒内ガス流動）は平均ピストン速度により反映される。このため、熱伝達率に対するガス流動の効果はクランク角度によらず一定の効果を及ぼし、熱伝達率のクランク角度変化は筒内圧力と温度の変化によって特徴づけられることとなっている。また、対象とする機関が異なれば、平均ピストン速度と筒内流動を関連付ける実験定数が異なる。燃焼による熱伝達率の増大効果については、熱発生に起因する圧力上昇によって反映されており、燃焼が壁面熱伝達に及ぼす影響について、物理的な意味に基づいて表現された形ではない。Woschniの式を用いることで、クランク角度ごとの熱伝達率が得られるが、式の妥当性、実験定数については、各行程ごとの熱損失の総量（積分値）の計測結果に基づき検討されており、式から予測される熱伝達率、あるいは熱損失のクランク角度履歴（時間変化）については妥当性を検証されたものではない。これらを踏まえ、Woschniの式は基本的には熱損失の総量を推定する実験式と捉え、また目的や対象とする機関に応じて式中の実験定数を適切に与えた上で用いるべきと考える。

参考文献

- [1] Woschni, G., "A Universally Applicable Equation for the Instantaneous Heat Transfer Coefficient in the Internal Combustion Engine", SAE Technical Paper, No. 670931, 1967.
- [2] Woschni, G., "Die berechnung der wandverluste und der thermischen belastung der bauteile von dieselmotoren", MTZ, vol. 31, No. 12, pp. 491-499, 1970.
- [3] Nusselt, W., "Der Wärmeübergang in der Verbrennungskraftmaschine", V. D. I. Forschungsheft, 264, 1923.
- [4] Eichelberg, G., "Some New Investigation on Old Combustion Engine Problems", Engineering, pp. 463-446, 547-560, 1939.
- [5] Annand, J., D., "Heat Transfer in the Cylinders of Reciprocating Internal Combustion Engines", Pfoc. Inst. Mech. Eng., Vol. 177, No. 36, 1963.
- [6] 青木, 江見, 島野, 榎本, "内燃機関の燃焼室壁面における熱伝達率に関する研究", 自動車技術会論文集 vol. 41, No. 2, pp. 365-370, 2010.
- [7] 江見, 青木, 木村, 榎本, "内燃機関の燃焼室壁面における熱伝達率予測式に関する研究", 第22回内燃機関シンポジウム, 2011.
- [8] 西脇, 嶋本, "吸, 排気過程のシリンダ壁平均熱伝達率 (第1報, 駆動運転時の吸気過程について)", 日本機械学会論文集 (B), Vol. 45, No. 391, pp. 404-415, 1979.
- [9] 西脇, 嶋本, "吸, 排気過程のシリンダ壁平均熱伝達率 (第2報, 駆動運転時の排気過程について)", 日本機械学会論文集 (B), Vol. 45, No. 392, pp. 581-588, 1979.

NEWS & INFORMATION

Audi R8 e-tron, 電気自動車として世界記録を樹立●アウディ

アウディが年末に発表する予定の電気自動車, 電気駆動システムを搭載した量産モデル Audi R8 e-tron が, ニュルブルクリンクの北コースで, 全長 20.8km のサーキットを 8 分 09.099 秒で周回し, EV としてラップタイムの新記録を樹立した。内燃エンジン仕様の最速タイムは 515kW (700PS) のアウディ V8 ガソリンエンジンが搭載されていたグンパートアポロスポーツは, 7 分 11.57 秒だった。Audi R8 e-tron の電気駆動システムは, 搭載される電気モータの最高出力と最大トルクは 280kW, 820Nm であり, 発進直後からリヤホイールに 4900Nm を超えるトルクを伝達する。Audi R8 e-tron は, 0 ~ 100km/h を 4.6 秒で加速。通常, 最高速度は 200km/h に制限されているが, 今回の記録更新では 250km/h まで許容されていたことだけが変更点だった。R8 e-tron に搭載されるリチウムイオンバッテリーは 49kWh を蓄える能力を持っており, 約 215km を走行することが可能。さらに, バッテリー形状を「T 型」として, 乗員コンパートメントとリアアクスル間のセンタートンネルに搭載し, コースティング (惰性走行時) および制動時に, エネルギー回生による充電が行われる。Audi R8 e-tron のボディはアルミニウムを主要素材として, 一部にカーボンファイバー強化プラスチック (CFRP) が使われている。バッテリーを搭載しながら車両重量は 1,780kg に抑えている。

アウディ ジャパン (株) : <http://www.audi.co.jp/jp/brand/ja.html>



電気自動車として世界記録を樹立した Audi R8 e-tron

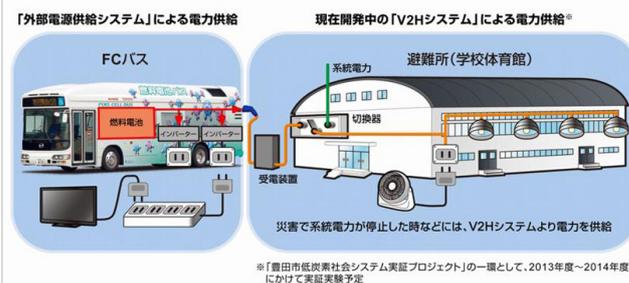
燃料電池バスの外部電源供給システムを開発●トヨタ自動車

トヨタ自動車は, 燃料電池バス (FCバス) の燃料電池で発電した電力を家電製品などに供給できる外部電源供給システムを開発した。このシステムは, 中部国際空港, 東京都心~羽田空港間, 豊田市内などで運行している燃料電池ハイブリッドバス「FCHV-BUS」をベースに開発したもので, 車内に交流電力 (AC100V, 1.5kW) を出力するコンセントを 2 箇所設置し, 最大出力 3 kW の電力を供給する。家電製品などに 3 kW で連続して電力供給する場合, 100 時間以上使用する能力を有している。FCV は電気自動車 (EV) などに比べ大容量の電力供給が可能であり, 中でも水素搭載量が多い FCバスは, 災害時の避難所などでの移動電源車として活用が期待されている。今回開発した外部電源供給システムを搭載した FCバスは, 9月2日に実施される愛知県・豊田市総合防災訓練の「非常時電源供給訓練」において, 防災本部テント内の情報モニタに電力を供給する。

さらにトヨタは, FCバスから建物の電気配線を通じて電力を供給する V2H システムの開発も進めており, 最大出力 9.8kW で, 連続約 50 時間の電力供給能力を目指している。この供給量は, 学校体育館における照明電力の約 5 日分に相当する。今後は, 経済産業省の「次世代エネルギー・社会システム実証事業」として採択されている「豊田市低炭素社会シス

テム実証プロジェクト」の一環として, 2013 年度から 2014 年度にかけて, 災害時に避難所となる施設への電力供給を想定した実証実験を行う予定。

トヨタ自動車 (株) : <http://toyota.jp/>



外部電源供給システムによる電力供給および V2H システムの電力供給のイメージ

新型「ノート」を発表●日産自動車

日産自動車は, 新型「ノート」を 9 月 3 日より全国一斉に発売した。新開発の直噴ミラーサイクルエンジンにエンジンの回転数に合わせて街中などの低速運転領域では過給をカットするなど, 高効率スーパーチャージャーを搭載した「HR12DDR」エンジンと, 空気に優れた軽量ボディを組み合わせることで, ガソリン登録車クラスナンバー 1 の低燃費 25.2km/L (JC08 モード) を達成している。同車のパワートレインは, 「HR12DDR」エンジンに加えて「HR12DE」エンジンをラインアップし, 全車に副変速機付エクストロニック CVT (無段変速機) を搭載, 2WD 車にはアイドリッグストップを設定した。

日産自動車 (株) : <http://www.nissan.co.jp/>



新型エンジンを採用した新型「ノート」

「セレナ S-HYBRID」を発売●日産自動車

日産自動車は, 「セレナ S-HYBRID」を 8 月 1 日より全国一斉に発売した。今回, 「セレナ」に採用した S-HYBRID (スマートシンプルハイブリッド) は, 従来から搭載している ECO モータのエネルギー回生発電量と出力を高め, 補助原動機化し, 蓄電容量を高めるためのサブバッテリーをエンジンルームに追加するシンプルでコンパクトなハイブリッドシステム。ハイブリッドシステムのすべてをエンジンルームに収めることで, クラス最大の室内空間や使い勝手の良いシートアレンジはそのままに, クラス No.1 の低燃費 (15.2km/L:JC08 モード燃費/2WD) を実現している。

日産自動車 (株) : <http://www.nissan.co.jp/>

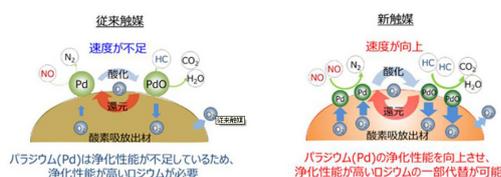


S-HYBRID の新型「セレナ」

貴金属使用量を大幅に低減する新触媒を開発 ● Honda

Honda は、触媒に使用される貴金属の一つであるロジウムの使用量を50%低減した新触媒を開発した。この新触媒を米国で2012年9月19日に発売する北米仕様の新型「アコード」から採用し、順次拡大する。触媒に使用されるプラチナ、ロジウム、パラジウムなどの貴金属は、世界の自動車生産台数の増加と世界的な排出ガス規制の強化を背景に、今後も需要の高まりが予想されているが、Honda は、すでにプラチナを全く使用しない触媒を実用化し、北米仕様の現行アコードより採用している。この新触媒では、排出ガスの還元浄化性能に優れたロジウムの一部を、酸素の吸放出速度を高めたパラジウムに代替することで、現行アコードに対してロジウムの使用量を50%低減、貴金属の総使用量としても22%低減した。これにより世界有数の厳しい排出ガス規制である米国カリフォルニア州の低公害車基準LEVII法規のSULEVカテゴリーに適合させながら、新触媒のコストも37%削減した。

本田技研工業（株）：<http://www.honda.co.jp/>



貴金属使用量を低減した新触媒のイメージ

「フィット EV」が日本最高電費性能を達成 ● Honda

Honda は、EVの「フィット EV」のリース販売を、自治体や企業に向け8月31日より開始した。フィット EVは、1997年にリース販売した「Honda EV Plus」を原点とし、現在のハイブリッドカーや燃料電池電気自動車の研究開発で培った技術を注ぎ込み開発したものだ。この度、国土交通省から、JC08モードの交流電力量消費率（電費）で106Wh/km、一充電走行距離で225kmという、EVとして日本最高の電費性能の認可を取得した。高効率な電動パワートレインと20kWhのリチウムイオンバッテリーにより、この認可となった。

新型「ワゴン R」を発売 ● スズキ

スズキは、新型「ワゴン R」を9月6日より、新型「ワゴン R スティングレー」を9月19日より発売した。新型「ワゴン R」、「ワゴン R スティングレー」は、「軽ワゴン低燃費 No.1 新世代エコカー」を開発コンセプトとし、環境に配慮しながら、さらに便利で楽しいクルマを目指す、スズキの新技术の総称「スズキグリーンテクノロジー」の下に、開発した技術を集結させた。今回の「ワゴン R」がその第一弾となる。新型「ワゴン R」、「ワゴン R スティングレー」には、「ENE-CHARGE(エネチャージ)」、「新アイドリングストップシステム」、「ECO-COOL(エコクール)」などの低燃費化技術や軽量化技術を盛り込んでいる。NA(自然吸気)エンジン搭載車(2WD)で28.8km/Lの低燃費を実現し、また、ターボエンジン搭載車(2WD)も26.8km/Lの低燃費を達成しているエンジンはR06A型。スズキ（株）：<http://www.suzuki.co.jp/>



低燃費性能を向上させた新型「ワゴン R」

2012年パリモーターショーでプラグインハイブリッドEVシステム ● 三菱自動車

三菱自動車は、9月27日（木）〔一般公開は29日（土）〕から10月14日（日）まで、フランスパリの市のパリエキスポで開催されるLe Mondial De L'Automobile 2012（通称：パリモーターショー）において、同社が新たに開発した電気自動車（EV）派生の「プラグインハイブリッドEVシステム」を搭載した新型「アウトランダー PHEV」（参考出品車）を出展する。7月にロシアで販売を開始し、9月には欧州でも販売を始める新型「アウトランダー」をベースに、三菱自動車が独自に開発したEV派生型の「プラグインハイブリッドEVシステム」を搭載。2013年初めに市販を予定している。長距離移動ニーズの高い中型乗用車クラス以上のカテゴリー向けに新開発した「プラグインハイブリッドEVシステム」は、外部からの充電（自宅や外出先など）による電力や、減速時のエネルギー回収によってガソリンを節約した走行ができ、従来のエンジン車を大きく凌駕する複合燃料消費率61km/L以上（JC08モード）と、エンジン車同等の航続可能距離880km以上（JC08モード）を目標としている。プラグインハイブリッドEVシステムはEV走行モード、シリーズ走行モード、パラレル走行モードの三つの走行モードを走行状況やバッテリー残量に応じて、最適な走行モードを自動選択する。大容量12kWhリチウムイオン電池の搭載により、EV走行モードだけでも55km以上（JC08モード）走行可能であり、日常生活のほとんどをEVとして使用できる。また、スイッチ操作によりエンジンで発電し、停車中・走行中に電力を蓄えることができる「バッテリーチャージモード」を設定。蓄えた電力はEV走行モードで使用するほか、車載コンセント（国内向けに設定）から最大1500Wまで出力することもでき、外出先や非常時における各種家電製品等への電力供給を長時間可能とする（電池が満充電の場合、一般家庭の約1日分の電力供給が可能）。急速充電コネクタ（国内向けに設定）を介して家庭と自動車をつなぐことで、自動車を蓄電池として使用する将来のスマートグリッド対応も考慮している。

三菱自動車（株）：<http://www.mitsubishi-motors.co.jp/>

新型グローバルコンパクトカー『ミラージュ』を発売 ● 三菱自動車

三菱自動車は、新型グローバルコンパクトカー「ミラージュ」を8月31日（金）から発売した。新型「ミラージュ」は、「先進国における環境対応車」と「新興国におけるエントリーカー」というニーズを両立させたグローバルコンパクトカー。生産拠点であるタイに続き、アセアン諸国、日本に投入した後、欧州、豪州などへと順次展開する予定。日本で発売する新型『ミラージュ』は3グレード構成とし、全車に新開発1.0L3気筒MIVECエンジンと新型INVECS-III CVTを搭載。「G」「M」では、AS&G、減速エネルギー回生システム、高効率オルタネータ、インテリジェントバッテリーセンサーなどの低燃費化技術を採用。アイドリングストップ機能「オートストップ&ゴー（AS&G）」などの搭載により、ガソリンエンジン登録車トップの27.2km/Lを実現。平成27年度燃費基準+20%を大幅に上回った。「E」ではアイドリングストップ機能非採用ながら、多岐にわたる軽量化や徹底した走行抵抗及び空気抵抗の低減など基本技術の追求により23.2km/Lを実現。平成27年度燃費基準+10%を達成した。



新型コンパクトカー「ミラージュ M」