

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 7 No. 6 2017

JSAE エンジンレビュー

Report : 自動車技術会 2016 年秋季大会

第 27 回 内燃機関シンポジウム

—エンジンシステムのイノベーションを目指して—



公益社団法人 **自動車技術会**

- コラム: ● 未来の乗り物: 1
Vehicle in the future
小酒 英範(東京工業大学)
- Report: 自動車技術会 2016 年秋季大会 2
Report of 2016 JSAE Annual Congress, Autumn
遠藤 浩之, 大西 浩二, 清水 健一, 下田 正敏, 西川 雅浩, 野口 勝三, 山口 恭平
(編集委員)
金子 誠(SUBARU), 城戸 章宏(北海道科学大学), 中野 博紀(三菱重工),
- Report: 第 27 回 内燃機関シンポジウム –エンジンシステムのイノベーションを目指して– 13
27th Internal combustion engine symposium
下田 正敏(編集委員), 伊東 明美(東京都市大学), 片岡 秀文(大阪府立大学), 河原
伸幸(岡山大学), 小島 宏一(産業技術総合研究所), 小橋 好充(北海道大学), 座間
淑夫(群馬大学), 橋本 淳(大分大学), 白石 泰介(日産自動車), 高山 敦好(久留米
工業大学), 永野 幸秀(九州大学), 冬頭 孝之(豊田中央研究所), 山崎 由大(東京大
学)

■ 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)
金子 タカシ (JXTG 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)
清水 健一 (元産業技術総合研究所)
下田 正敏 (日野自動車)
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)
山口 恭平 (自動車技術総合機構)
山崎 敏司 (編集)

発行所: 公益社団法人 自動車技術会
発行日: 2017 年 10 月 2 日
発行人: 石山 拓二(京都大学)
〒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. 7 No. 6 2017

●コラム

未来の乗り物

Vehicle in the future



小酒 英範
Hidenori KOSAKA

東京工業大学
Tokyo Institute of Technology

初めて自転車に乗れるようになったころ、それまで徒歩による行動範囲から格段に移動範囲が広がりとても興奮した。徒歩だと遠くに行くことができなかった友達の家に遊びに行ったり、引込線の終点（製紙工場の引込線だった）を確かめるために自転車に乗って友達とプチ「スタンドバイミー」したり、とにかく自転車で見知らぬ通りを走り回るだけで興奮し楽しかった。人の「移動」に対する欲求は、未知なるものを求める欲望とつながっているのではないだろうか。知らないところへ行きたい。知らないものを見たい。より遠くへより早く。大航海時代には、地球上に多くの秘境があり、人は未知なる世界を求めて命を懸けて冒険した。現在、地上から秘境はほとんど消失し、地球に残された秘境は深海くらいであろうか。

数年前に、講義の際に受講生に「もし200万円あったら何に使うか」という質問をしたことがある。複数の学生に聞いたところ、「旅行に使う」という回答が最も多かった。残念ながら「車を購入する」という学生はいなかった。今の若者にとって未知なるものと出会える旅行は魅力的だが、それを実現する道具の一つである車には興味が無いということだろうか。目的とそれを実現するための道具が同等に魅力的であるためにはどうすべきなのか。

30年ほど前にサイバーパンクというSF小説の一派が流行した。電腦空間を闊歩するカウボーイジャンキー、身体を機械化やバイオ技術で改造強化する未来人、小説の内容は忘れてしまったが、まだインターネットが普及していない当時に、現在の情報化社会、IoT、さらにその先の世界を予見するような情景が既に描かれていたことは憶えている。これらの中で描かれた人類の未来像の中には、身体を捨て人格含めて数値化され電腦空間に生きる「電線野郎」なる姿もあった。こうなると、もはや物質的な移動の概念は無くなる。

自動車技術会では、2050年に向けた自動車技術のロードマップ作成が進められている。30年後の世界に「電線野郎」は存在しないよう願うが、人が「移動」に求める価値とそれを具現化する道具としての自動車の姿を予測することは難しい。ただ、今の夢物語が未来をつくるなら、楽しい夢を語り合いたい。

子供のころみたTVアニメの主人公が使っていた乗り物に「流星号」というものがあった（ネットで調べたところ、電子頭脳を搭載したタイムマシンでもあったらしい）。主人公が腕時計型のウェアラブル端末に「流星号、応答せよ、流星号」と呼びかけると、マッハ15で飛来し、まるで主人公に忠実に仕える猟犬のようにふるまい、機体も柔軟で生き物を思わせる「かわいい」乗り物である。忠犬とはいかなくとも、もし、人の意思や感覚に直結したかのような操作が可能な乗り物ができたらどうだろうか。まるで自分の手足のように操作感を感じさせない移動機械があれば、時速100km以上で走り、荒地も楽に走破できる巨人になった感覚を持てるのではないか。1mmの位置の差も感じとり運転制御できるようになるのではないか。受動的な自動運転よりも楽しく自由な移動時間を持てるのではないか。ばかげた夢物語だと笑われるだろうが、新たな価値の創出が求められている今こそ、真剣にばかげた夢を語り合うべきではないだろうか。

自動車技術会 2016 年秋季大会

2016 JSAE Annual Congress (Autumn)

主催：公益社団法人自動車技術会
会期：2016年10月19日（水）～10月21日（金）
会場：札幌コンベンションセンター

遠藤 浩之, 大西 浩二, 清水 健一, 下田 正敏, 西川 雅浩, 野口 勝三, 山口 恭平 (編集委員)
金子 誠 (SUBARU), 城戸 章宏 (北海道科学大学), 中野 博紀 (三菱重工)
Hiroyuki ENDO, Kouji ONISHI, Ken-ichi SHIMIZU, Masatoshi SHIMODA, Masahiro NISHIKAWA, Katsumi NOGUCHI,
Kyohei YAMAGUCHI (JSAE ER Editorial Committee)
Makoto KANEKO (SUBARU), Akihiro KIDO (Hokkaido University of Science), Hiroki NAKANO (MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES)

1 はじめに

自動車技術会「2016 年秋季大会」は、10月19日(水)～21日(金)の3日間、札幌コンベンションセンターにて開催され、学術講演会 講演件数396件、参加者数1859名だった。この中で視聴できた中から注目された発表をレポートする。

2 ディーゼル燃焼

2.1 ディーゼル燃焼

本セッションでは、ディーゼル燃焼に関して11件の講演があり、革新的燃焼技術(SIP)を受けて、高効率化に関する論文が多くみられる。その中でも、高効率化の焦点は発熱量の3割を占める冷却損失の低減に向けられている。今回は冷却損失の低減に向けた計測技術とハード提案に関して1件ずつ論文を紹介させて頂く。

同志社大の巽ら²⁻¹⁾は、「ディーゼル噴霧火炎における壁面熱損失に関する研究(第2報)」と題して講演を行った。定容容器(図2-1)にて、熱電対による温度計測と燃焼動画撮影による画像解析から、火炎の壁面衝突による熱伝達量を計測するとともに、ニュートンの冷却法則中の各物理因子(熱伝達率/接触面積/接触時間/火炎温度/壁面温度)の寄与率を定量化し、律速となる物理因子を特定することに成功している。計測方法は、壁面に等間隔に埋め込んだ熱電対にて熱流速を算出するとともに、輝炎およびOHラジカル発光画像から火炎接触面積の時間積分値、画像相関法を用いて火炎流速、二色法温度解析により火炎温度を算出し、熱収支計算を行っている(図2-2)。試験条件として、定容容器に実機における高負荷運転時を再現し、燃料はノルマルトリデカンを使用している。上記技術をもとに、各報にてショットパラメータを変化させた場合の冷却損失に律速な物理因子を特定するとともに律速因子の相関を把握することを目的としている。第1報はレール圧をパラメータとし、火炎流速(乱れ)が律速であったのに対して、第2報ではパイロット噴射割合をパラメータとし、火炎接触面積の時間積分が律速であることを明らかにしている(図2-3)。いずれも定量的に熱収支が精度良く合っており、信頼性は高いと考えられる。また、論文中に記載はないが、今回の計測方法を用いることで、回転数/負荷/EGR/ショットパターン等条件が異なる如何なる場合でも、冷却損失に律速な物理因子を定量的に計測/把握できるところに有用性があると考えられる。冷却損失は、ニュートンの冷却法則因子を個別に計測することで把握できることを証明したとともに、今後、定容容器からより実機に近い装置での計測に発展出来れば冷却損失の理解が大きく進捗しうると思われるため、今後の発展を望みたい。

新 ACE の渡辺ら²⁻²⁾は、「ディーゼルエンジンの火炎挙動解析に基づく熱発生制御と排気特性の改善」と題して講演を行った。大型ディーゼルエンジンにて最大熱効率を得るには、等容度と冷却損失を両立するサバテサイクルが理想だとしている。定容燃焼/定圧燃焼と異なる熱発生を実現するハードとして、センタインジェクタに加えてキャビティ外壁に2本のサイドインジェ

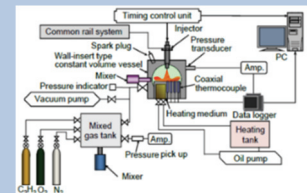


Figure 2-1 実験装置の概略図

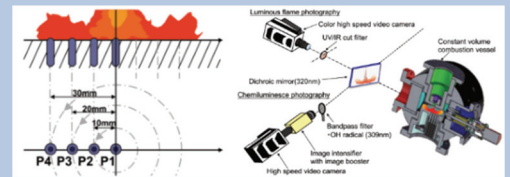


Figure 2-2 計測方法

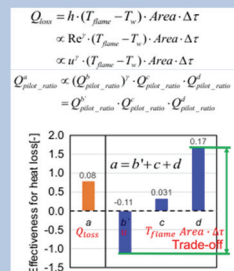


Figure 2-3 試験結果

クタの使用(図 2-4)を提案している(ピストンは噴霧干渉抑制のため中心が深いスプー皿形状を使用している)。上記ハードの利点として、空間的空気利用による低エミッション化も報告しているが、課題として高負荷域で燃焼後期の熱発生率が低下し定圧過程を維持出来ないことを示しており、本報では可視化による燃焼動画と二色温度解析から燃焼後期の熱発生が緩慢となる原因を特定、対策立案とともに改善効果を報告している。燃焼可視化により、サイドインジェクタはセンタインジェクタで利用しきれない中央部の空気を利用できている一方、噴霧の一部がスワールに流されながら壁面付近(既燃部)に存在し、局所入が低くなり/熱発生率の低下/Soot の増大を招いていることを確認した(図 2-5)。これに対して、サイドインジェクタの噴射をスワールと対向させることで中央部に噴霧を分布させる仕様を提案している(図 2-6)。CFD 解析から局所入の改善とスワールを打ち消すことによる流動抑制で冷却損失が低減する結果を示すとともに、実機でも燃焼後半の熱発生率の増大/冷却損失の低減/NOx-Soot トレードオフの改善を達成し、狙い通りの成果が得られたことを報告している(図 2-7)。今回の試験で、中負荷域にて目論見通りの成果を得ることを確認したため、今後、噴霧分布が異なる高負荷での熱効率/排ガスの改善効果を確認して頂きたい。

熱効率 50%達成には、計測技術の向上がキーと考える。サイドインジェクタでは、低流動化とともに燃焼位置を固体面から離すアプローチによって高効率化が実現できることを示した。しかし、これまでの冷却損失に関わる考察は、定性的なもの(またはシミュレーション)が多く、実測による定量的な評価まで踏み込んでいないように思われる。現在に至り、各因子の寄与度を定量的に計測できるレベルにまで計測・解析技術は進んでいる。今後のさらなる計測技術の向上とともに、冷却損失低減に対するアプローチが一般化できれば、熱効率 50%に向けたハード提案もより精度が増すと思われる。(中野)

2.2 DPF

茨城大学、三次らは「凝縮水による DPF 透過アッシュの成分計測」と題して講演を行なった²⁻³⁾。PM の排出低減には DPF が使用されており、破損による捕集機能異常を検出する OBD 用のセンサとして、DPF 前後の圧力差を検出する差圧センサが用いられ、さらに DPF を透過する PM を検出する PM センサが考えられている。今後導入が考えられる PM センサに着目すると、PM センサの外乱要因の一つとして、PM 中に極微量含まれる潤滑油中のアッシュが指摘されている。DPF 後段に装着される PM センサがアッシュの影響を受けることから、アッシュが DPF を透過していると考えられる。本研究は、そのメカニズムをあきらかにするため以下のような実験を行った。

実機から採取されるアッシュは微量であるため、図 2-8 に示すようなエンジンオイルを直接燃焼させ、サイクロンシステムにより回収することが可能なアッシュ加速生成装置を用い、実機相当の模擬アッシュを大量に生成する手法を開発した。燃料に用いたエンジンオイルは CD グレード、粘度 10W-30 の一般的なディーゼルオイルである。オイルの含有成分計測は、高周波誘導結合プラズマ質量分析装置(ICP-MS)を用いた。表 2-1 に示すようにカルシウム、リン、硫黄、亜鉛を含む添加剤が含まれていた。硫黄に関しては蛍光 X 線分析にて、カルシウムと同量の含有を確認した。

アッシュの透過メカニズムを検討するため、実機エンジンを用いたアッシュ透過実験装置を図 2-9 に示す。実機の排気を分離し、3/4 inch のステンレス製配管を通して、フルサイズより切りだしたテストピース DPF に模擬アッシュを堆積させた。

表 2-2 にアッシュ透過実験の四つの条件を示す。条件1は、エンジン排気を用いず、窒素を流し、気体の流れだけで物理的にアッシュが透過するかを明らかにするもの。条件2は配管を 393K に保ち、排気に含まれる水を凝縮させず気相でアッシュを透過させるもの。条件3は、配管を 358K に保ち、排気中に含まれる水が一部凝縮して DPF を透過する条件。条件4は、冷間始動直後の高負荷運転を想定し、条件3と同様の温度条件で、インジェクタから模擬凝縮水を追加し、液相の凝縮水が DPF を透過する条件である。

アッシュ透過実験結果を以下に示す。
条件1の窒素による透過実験では、回収したフィルタを SEM により、捕集された粒子を観察し、EDX による元素同定を行なったが、模擬アッシュに含まれる元素は検出されなかった。

条件2~4の水が含まれる場合の透過実験結果を図 2-10 に示す。要約すると以下のようにまとめられる。条件4においては、1stCT に収集された水に含まれる成分の分析結果より、

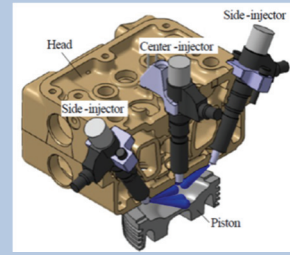


Figure 2-4 インジェクタレイアウト

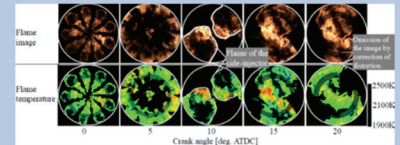


Figure 2-5 火炎画像

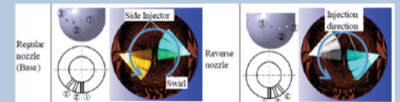


Figure 2-6 ノズル形状の改善

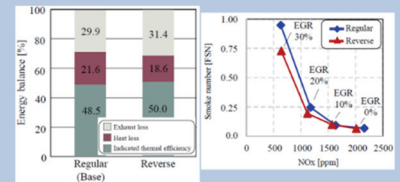


Figure 2-7 試験結果

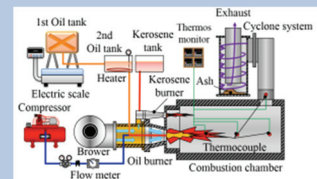


Figure 2-8 アッシュ加速生成装置の概要

Table 2-1 ディーゼル潤滑油の性状

Type	Diesel oil	
Grade	CD	
Viscosity	10W-30	
Components	ICP-MS [wt.ppt]	XRF [wt.%]
B	10-100	-
Ca	1000-10000	0.3
Mg	5-50	-
Mo	50-500	0.02
P	500-5000	0.08
S	-	0.3
Zn	500-5000	0.2

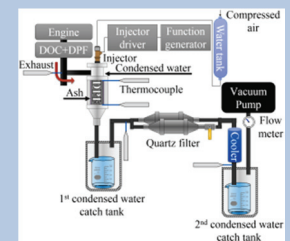


Figure 2-9 アッシュ透過実験装置

Table 2-2 アッシュ透過の実験条件

Experimental number	1	2	3	4
Flow gas	N ₂	Engine exhaust		
Engine speed [rpm]	1200			
Torque [Nm]	60			
DPF inlet temp. [K]	358	393	358	358
Water inj. mass [ml/s]	0	0	0	0.23
Experimental period [s]	300			
Loading mass of ash [g]	10			
Cooler setup temp. [K]	273			
Flow rate [L/min.]	98			
SV ratio [h ⁻¹]	40000			

多量の SO_4^{2-} と Ca^{2+} を検出した。また、ほかの条件より比較的多量の NO_2^- , Cl^- , Na^+ を検出した。これらは、アッシュを堆積させていないDPFを用いた条件2の場合、および水が気体またはごく少量の液相で存在する場合の条件3では検出されなかった量である。一方で 2ndCT に収集された水に含まれる成分は、他の条件と同様であり、凝縮水が増加しても、その傾向は変わらなかった。

以上の結果より、テストピース DPF 中のアッシュは、排気中の水が凝縮し一度に大量に流れ込む場合に、透過することが明らかになった。また、アッシュを堆積させたDPF透過後の水に含まれる主の成分は SO_4^{2-} , Ca^{2+} であり、XRD の計測結果を考慮すると、アッシュの主成分である硫酸カルシウムが凝縮水に溶解し、透過していると考えられる。(遠藤・下田)

【参考文献】

- 2-1) 巽 健, 前田 篤志, 中田 将徳, 小橋 好充, 桑原 一成, 松村 恵理子, 千田 二郎, 自動車技術会 2016 年秋季大会, NO.20166061
- 2-2) 渡辺 裕樹, 岡本 毅, 内田 登, 西島 義明, 自動車技術会 2016 年秋季大会, NO.20166054
- 2-3) 三次 勇太, 武藤 広信, 田中 光太郎, 金野 満, 自動車技術会 2016 年秋季大会, NO.20166305

3 ガソリン関連

3.1 過給・新型 SI エンジン

本セッションは、大会初日の午前中に最初のセッションとして開催され、過給エンジンの技術に関する報告や新型過給エンジンの開発など 6 件の発表があった。朝一番のセッションにも関わらず、会場となった大ホールは、ほぼ満席状態で注目度の高さが、見受けられた。

マツダの山形ら³⁻¹⁾は「過給ガソリンエンジンの低速トルク向上に関する動圧過給技術の研究」と題して講演を行った。エンジンパイプスの活用による低速トルクおよびレスポンスの改善に取り組み、得られた知見として、排気マニフォールドのあり方と実機検証結果について報告している。タービン駆動エネルギーを増加させる方法のコンセプトを図 3-1 に示す。④インナーパイプスは、吸排気オーバーラップを拡大し、新気を吹き抜けさせることでタービン流入量を増加させる方式とし、外部通路は設定しない。図 3-1① η_t 圧力比の項の操作を起点として他のすべての変数項に連鎖的に影響が及び、タービン駆動力の増大が期待できるという。またコンセプトの具現化の為に、エゼクターを利用しており、その排気マニフォールドのエゼクターについて詳細は、後の講演で、マツダの加藤ら³⁻²⁾により「エゼクター効果を利用した排気干渉抑制技術の検討」と題し報告がなされた。検証実験に用いる排気マニフォールドを図 3-2 に示す。各気筒のブランチは最短を狙い 4-3-1 集合としている。太い通路には、流量調整弁を配置しており、低速域ではそれを絞って流速を高め、エゼクター効果を増加させるという。より高いタービン駆動力を得るには、通路断面積が狭い通路をタービンスクロールの内外周のどちらに接続するべきか検討し、内周流入の方が角速度が高く、高いタービン駆動力が期待できると述べている。図 3-3 にエンジン低速域の全負荷性能を示す。A 仕様: 4-1 排気マニフォールド(Base), B 仕様: ツインスクロールターボ(Reference), C 仕様: 流量調整弁付エゼクター排気マニフォールド(Study)を表しており、C 仕様は大幅にトルク性能が向上している。図 3-4 は過渡性能を比較した結果である。1500rpm 固定で、スロットル全開とし評価している。加速初期(100~500ms)のほぼ自然吸気状態でも、C 仕様は 10 ポイント程度の向上が見られる。これはエゼクターによる吹き出し効果により、掃気性が向上したからであると説明があった。新しい掃気技術エゼクターを利用した、興味深い過給技術の研究である。排気マニフォールドのヒートマス低減による、環境性能向上と走りの両立に期待がもたれる。

本田技術研究所の柿沼ら³⁻³⁾は「新型 3.5L V6 直噴ターボエンジンの開発」と題して講演を行った。本稿では、3 モーターハイブリッドシステムと組み合わせ、ミッドシップにレイアウトされた、スーパースポーツカー用エンジンの技術紹介を行っている。高出力 373kW、燃費及び排気ガス規制の対応、軽量コンパクト設計を目標とし、高タンブルポート燃焼技術、HEV 回路一体の高出力対応冷却システム、スイングアーム式コンパクト動弁系、ドライサンプ潤滑システム等を適用したとのこと。表 3-1 に今回の新型 V6 直噴ターボエンジンと従来の V6 NA エンジンの主要諸元を示す。図 3-5 にエンジンの出力・トルク特性を示す。最高出力は 373kW、最大トルクは 2000rpm

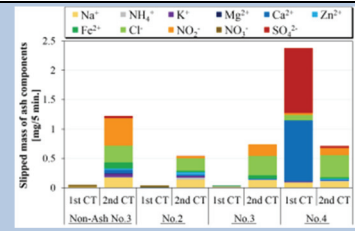


Figure 2-10 表3の実験条件2-4におけるDPFを透過したキャッチタンク(CT)より回収された凝縮水の成分分析結果

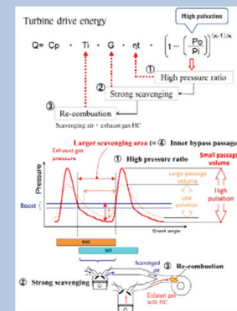


Figure 3-1 タービン駆動エネルギー増加コンセプト

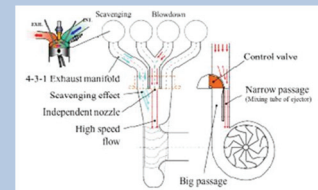


Figure 3-2 流量調整弁付エゼクター排気マニフォールド

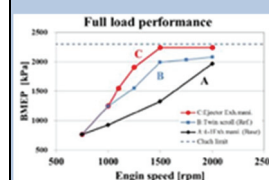


Figure 3-3 全負荷性能

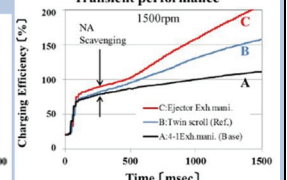


Figure 3-4 過渡性能

Table 3-1 エンジン主要諸元

Engine type	Developed JNC1	Previous JNB1
Cylinder configuration	V6-cylinder	V6-cylinder
Bore x Stroke (mm)	91.0 x 89.5	89.0 x 93.0
Displacement (cm ³)	3493	3471
Intake system	Turbocharged	Naturally aspirated
Bank angle (degree)	75	60
Lubrication system	Dry sump	Wet sump
Crank journal Diameter (mm)	72	72
Compression ratio	10.0	11.5
Valve train	DOHC Hydraulic VTC(IN/EX)	SOHC VTEC/VCM
Number of valves	4 per cylinder	4 per cylinder
Fuel injection type	DI-PI	DI
Max. power(kW/rpm)	373/6500-7500	231/6500
Max. torque(Nm/rpm)	550/2000-4000	370/4700

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 7 No. 6 2017

から 6000rpm まで 550Nm である。また、HEV モータを合わせたシステムトータルの最高出力は 427kW、最大トルクは 646Nm を発揮し、車両の発進加速では同等出力の大排気量 NA エンジンより、優れた加速 G 特性(図 3-6)を得ることができたという。エミッションの低減には、触媒活性化前のエンジン feed ガス量の抑制と触媒の早期活性化が重要である。それらを両立するため高タンブル流動と直噴 2 回噴射を組み合わせ、エアガイドによる成層燃焼(図 3-7)を実現させたという。その最適化により、従来のウォールガイド成層燃焼に対して、ピストン表面の燃料付着量は半分以下に抑制され、点火時期の大幅リタードも可能となった。その結果モードエミッションについては、欧州 Euro6b 及び US ULEV125 を適応可能としたと述べた。また、軽量コンパクト化を図るため、スイングアーム式の動弁系を採用している。本構造は、2008 年 F1 エンジンと類似構造であるという。これによりシリンダヘッドは従来量産 NA エンジンの V6 SOHC と同等サイズのコンパクト化を、DOHC にて達成できたとしている。そして、コンパクト化と低重心化、及び過酷な走行環境下におけるエンジン潤滑を確保するため、ドライサンプシステムを採用し、サーキット走行においても、油圧が確保できる潤滑システムを構築することができたと説明があった。1990 年に動力性能と運転のしやすさを両立させた、ミッドシップ・スポーツカー初代 NSX が量産された。そして、今回ボディとエンジンがともに新規開発され、さらに 3 モータハイブリッドシステムを組み合わせられた。2016 年、走りと環境性能を両立する、スポーツカーとしての新しい価値の提案は興味深い。

日産の伊東ら³⁻⁴⁾は「新型 4 気筒 2.0L 直噴ガソリンエンジンの開発」と題して講演を行った。本稿では、その新型エンジンの熱効率向上、ポンプロスやフリクション低減、及びエンジン制御の変更等の採用技術を紹介している。表 3-2 に新旧エンジンの主要諸元を示す。熱効率向上のため、燃焼室形状の最適化を図り、ノッキング特性の向上を行ったという。HP-EGR による Cooled EGR を採用、EGR バルブは DC モータ式とし、過渡の EGR 応答性の向上を図っている。これにより図 3-8 に示すように、低回転から広い範囲で、EGR ガスを導入することができたこと。また、ポンピングロス低減のため、油圧式に対して 3 倍以上速い VTC 変換速度を持つ、電動 VTC が採用されている。これにより最適なバルブタイミングを遅れなくトレースし、ポンプロスの低減や減速領域での耐エンスト性を向上したという。そしてエンジン本体フリクション低減の他、補機ベルトフリクション低減のため、Dual Arm Tensioner(図 3-9)を採用している。その結果、より低いベルト張力で、ベルト滑りを防止することが可能となり、組み付け張力を前型の 1/3 まで低減し、補機駆動システムのフリクションを -41% @1200rpm 低減できたとしている。北米 SULEV 排気規制に対応させるべく、インジェクタ噴霧改良により、ペネトレーション低減と微粒化促進を両立し、燃料付着量低減によりオイル希釈、PN 低減を行なった。また狭角化の噴霧パターン、燃料噴射タイミングに合わせ、ピストン冠面形状改良(図 3-10)し、点火時期リタード時の燃焼安定性(図 3-11)を維持できるようにしたとのこと。これらの新技術採用により新型エンジンは、モード燃費 7% の改善が出来、北米 SULEV のポテンシャルを得たと報告があった。近年、厳しくなる環境規制に対応する新技術開発が、継続的に進められている。今後さらに、技術で環境改善に貢献できることを期待したい。(野口)

3.2 SI 異常燃焼

本セッションは、大会初日過給・SI エンジンのセッションに続き大ホールで開催され、ノッキングに関する講演が 5 件と過給ガソリンエンジンの課題である LSPI に関係する講演 2 件の合計 7 件の発表があった。講演では、活発な意見交換が行なわれ関心の高さが感じられ、新たな LSPI の起因となる、スパークプラグガスボリュームからの自着火による LSPI などの報告がなされた。今回その LSPI についての報告とノッキングに関する報告の中から 1 件の合計 2 件の講演を紹介する。

日本特殊陶業の岩塚ら³⁻⁵⁾は「スパークプラグからの HSPI・LSPI に関する研究」と題して講演を行なった。スパークプラグが赤熱粒子とは別の要因として、LSPI を引き起こしている可能性があると考え、本研究では、可視化エンジンを用いてスパークプラグからの HSPI・LSPI の発生位置を調査し、その発生要因を検証している。図 3-12 に高回転条件のスパークプラグに起因する、HSPI の撮影結果を示す。点火時期より前に、絶縁体先端より引火する様子が確認できる。図 3-13 に低回転条件のスパークプラグに起因する、LSPI の撮影結果を示す。高回転のようなプラグの赤熱は無く、点火時期より前に、プラグの絶縁体と主体金具間のガスボリュームから火炎が噴出する様子を確かしている。これより、LSPI は絶縁体先端からの通常の HSPI とは異なり、

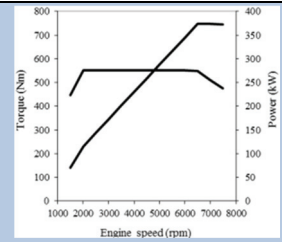


Figure 3-5 エンジン出力性能

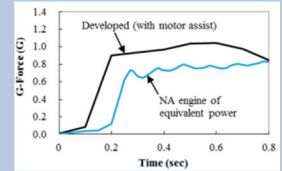


Figure 3-6 加速性能

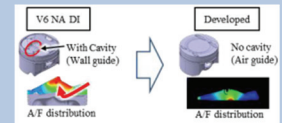


Figure 3-7 成層燃焼コンセプト

Table 3-2 エンジン主要諸元

	新形	旧形
Engine Type	Inline 4	Inline 4
Displacement (cc)	1997	1997
Bore × Stroke (mm)	84 × 90.1	84 × 90.1
Compression Ratio	12.2	11.2
EGR	Internal & External (High Pressure System)	Internal
Cylinder Block	Spire Coated and Mirror Finished Bore	Iron Liner
Valve Train	DOHC 16 Valve with Intake Electronic & Exhaust CVTC	DOHC 16 Valve with Intake & Exhaust CVTC
Fuel Supply System	Direct Injection	Direct Injection
Max. Power (kW/rpm)	110/6000	100/6000
Max. Torque (Nm/rpm)	200/4400	210/4400

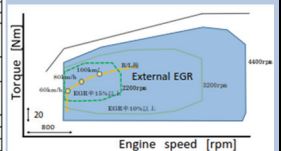


Figure 3-8 EGR 領域

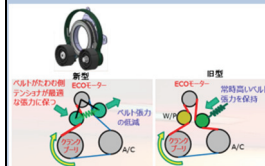


Figure 3-9 新旧ベルトテンショナー

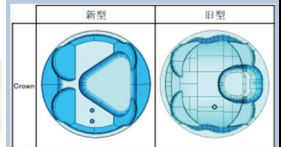


Figure 3-10 新旧ピストン冠面形状

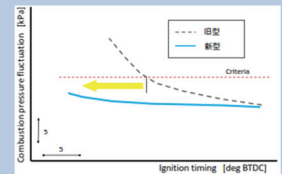


Figure 3-11 燃焼安定性



Figure 3-12 スパークプラグに起因する HSPI の撮影結果



Figure 3-13 スパークプラグに起因する LSPI の撮影結果

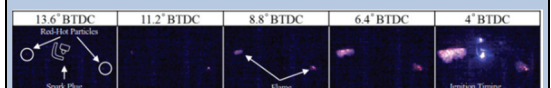


Figure 3-14 赤熱粒子に起因する LSPI の撮影結果

ガスボリューム内に起点が有る着火と確認されたという。図3-14に低回転条件の赤熱粒子に起因するLSPIの撮影結果を示す。このLSPIと図3-13のLSPIは、圧力波形が類似しており、区別は難しく、筒内可視化を行なうことで確認することができたとのこと。試験エンジンによる検証から得られた自着火位置と、CFDのガス温度が高い領域の比較を図3-15に示す。両者の結果は、概ね一致しているとしている。従ってガスボリューム内に滞留した高温ガスが、スパークプラグに起因するLSPIの着火源であると報告した。本発表は新たな起因のLSPIとなるが、発生位置を可視化エンジンとCFDにより明確にし、発生要因を検証している。近年、可視化エンジンとCFDによる、新たな研究、メカニズム解明が盛んに進められている。動画の使用や鮮明な画像等により、新たな知見が更に得られることが期待される。

日産の井上³⁻⁶⁾は「燃焼室冷却の最適化による耐ノック性と熱効率改善」と題して講演を行なった。ノック特性に最も影響度の高い指標は、点火時(20BTDC)の筒内平均混合気温度であると、それに影響を与えるエンジン各部位ごとの寄与を解析している。さらに熱効率改善のための燃焼室冷却の方向性を示したとのこと。単気筒エンジンを用いた、各パラメータのノック特性確認実験結果を図3-16に示す。この図より20BTDC筒内平均混合気温度が、ほかのパラメータよりノック特性に強い影響を持つことが確認されたとしている。次にその温度への影響要因調査を行ない、CFDによる、混合気が各部位から受ける受熱量履歴の解析結果を図3-17に示す。各部位からの受熱量は、吸気行程中に増加し、筒内温度と壁温が逆転する圧縮行程で減少する。シリンダヘッド付随部品からの筒内への熱伝達積算量(赤枠内)が多く、吸気ポートが40%程度と高い割合を占めている。また、単独部品としては、ライナおよびピストンからの受熱量が多い。暖機状態(水温86°C)での吸気ポート壁面温度は、冷却水温度よりも低い。つまり、吸気ポートは常に加熱を受けているため、吸入空気受熱低減には断熱化による効果が高いという。熱効率改善を考えた場合、エンジン壁温低減はノック改善があるものの、逆に冷却損失増大、油温低下等による摩擦損失の増大を招く恐れがある。図3-18に壁温低減による図示熱効率を示す。全体の壁温を低減するケース①と、ライナ壁温低減を含まないシリンダヘッドのみ低減するケース②の二つで検討している。-60degCまでの壁温低下であれば、いずれのケースも図示熱効率は向上する。しかし摩擦損失影響を考慮した正味熱効率(図3-19)は、-30degC以上壁温を低下させると、油温低下による摩擦損失悪化が大きく、正味熱効率改善の効果が大きく失われている。すなわち壁温低減と油温の維持を両立する技術との組み合わせが、効果的であるという。最近、開発されたエンジンには、シリンダヘッドは冷却し、シリンダブロック側は温める技術がよく採用されている。エンジン各部の温度を最適にコントロールする熱マネージメントは、熱効率向上の為、ますます重要になると思われる。(野口)

3.3 エンジン制御

本セッションはエンジン制御がテーマであったが、燃焼を深く掘り下げた研究や開発プロセスの改善、最新制御理論とその応用など多岐にわたる講演が行なわれた。

トヨタ自動車・浦野らは「熱効率最大化に向けた燃焼制御法の研究」³⁻⁷⁾と題し、燃焼限界付近でも燃焼を成立させる制御を提案した。質量燃焼割合に着目し点火時期~10%燃焼点をA/Fへ、50%燃焼点を点火時期へフィードバックさせ(図3-20)、精密かつロバスト性に優れた手法であること実証した(図3-21)。

FEV ジャパン・熊谷らは「希薄燃焼エンジンのモデルベース開発プロセス」³⁻⁸⁾と題して、超希薄燃焼エンジンの開発プロセスを提案した。蓄積したデータベース(図3-22)から、開発の初期に吸気ポートと燃焼室形状、燃料噴霧のパターンのレイアウト設計を行い出戻りの少ない開発を可能とした。

日野自動車・二宮らは「モデルベースを用いた尿素SCR制御開発」³⁻⁹⁾と題して、モデルベース制御の適用例を報告した。マップベースの制御よりも最適な尿素噴射が可能となり高いNOx浄化性能を達成できた(図3-23)。

セッションを通じ各々離れた研究に見えたが目指すゴールはどれも同じ、互いの研究が刺激・高め合い理想のエンジンが早期に実現することを期待する。(金子)

3.4 ガソリン噴霧・エバポレータ

ガソリン直噴エンジンでは、粒子状物質の排出を抑制するために、噴射した燃料のシリンダ壁面への付着と不均質な混合気の発生を防止することが重要である。

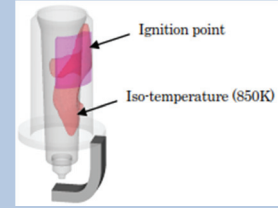


Figure 3-15 試験エンジンの自着火位置とCFDによるガス温度が高い領域の比較

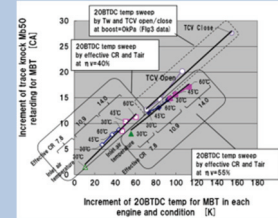


Figure 3-16 20BTDC 筒内混合気温度とノックリタード量の関係

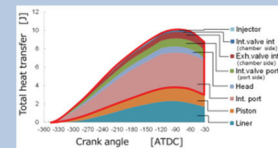


Figure 3-17 各部位からの受熱量履歴

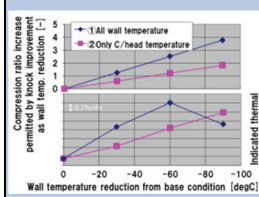


Figure 3-18 壁温低減による図示熱効率

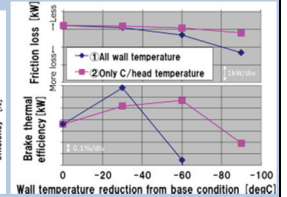


Figure 3-19 摩擦損失影響を考慮した正味熱効率

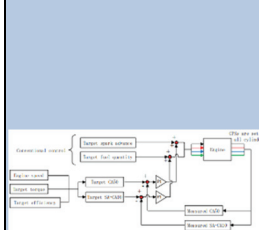


Figure 3-20 New controller structure based on CPS

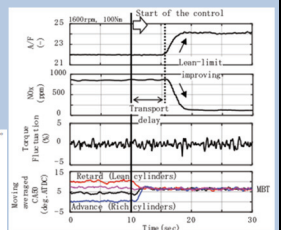


Figure 3-21 Effect of the new controller (test bench)

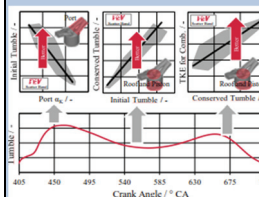


Figure 3-22 Charge motion design (CMD) process of FEV

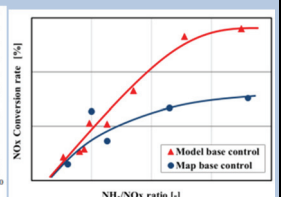


Figure 3-23 Comparison of NOx conversion rate between model base control and map base control

植木ら³⁻¹⁰⁾は、高圧噴射がガソリン直噴インジェクタの噴霧に及ぼす影響を高温・高圧雰囲気チャンバ内でスリット噴霧を壁面に衝突させて評価した(図 3-24)。燃圧が高くなると空気の噴霧へのエントレインメント流速が増加する(図 3-25)。同時に燃料が壁面に付着する面積は減少し、燃料液膜の蒸発速度が増加する。

シリンダ壁面やピストン冠面への燃料付着を抑制するために、1 サイクル間に複数の噴射を行なうことが効果的である。そのためには、インジェクタの最小噴射量を減少させる必要があるが、インジェクタの閉弁タイミングには個体ばらつきが大きく、安定した最小噴射量を実現することは簡単ではない。

石ら³⁻¹¹⁾は、この課題に取り組んだ。インジェクタの閉弁タイミングと、目標噴射量を実現するための開弁電流供給時間の間には線形な関係があることを見出し(図 3-26)、この関係に基づいてインジェクタの個体ばらつきを吸収できる駆動電流の学習制御を構築した。結果として、インジェクタの最小噴射量を 50%低減することができた。

岩室ら³⁻¹²⁾は、デュアル MPI システム(2 個の吸気弁それぞれに独立したインジェクタを備えるポート噴射システム)における噴霧設計について発表した。ポート噴射システムで問題になる高速・高負荷運転時の PM 排出個数を抑制するには、吸気弁開弁時噴射で気流の影響を受けにくく、かつシリンダ壁面に付着しにくい微粒化噴霧が有効であると結論づけた。実車評価の結果、デュアル MPI 搭載車はシングル MPI 車と比較して WLTC モードにおける PM 排出個数が大幅に減少した。デュアル化により噴射期間が半減し、混合時間が長く取れることも PM 抑制の一因である。

八百幸ら³⁻¹³⁾は、ポート噴射エンジンの冷間始動時における HC の排出量を低減することを目的に、可視化エンジンで始動 1 サイクル目の筒内観察を行ない、燃料液滴径の時間的・空間的な分布を測定した。その結果、吸気ポート壁面および吸気弁に付着した燃料が吸気弁隙間から液膜状で筒内に流入し、その後液滴に分裂することを確認した。排気弁早閉じて吸気弁開時の筒内圧縮空気のポートへの吹き返し流を利用することにより、燃料が筒内に流入するタイミングを遅らせることができ、燃料が液膜状で筒内に流入することもなくなる(図 3-27)。この手法により、始動時 HC を 20 秒積算値で 25%低減することができた。

自動車から排出される揮発性有機化合物(VOC)はテールパイプからの排出に加え、ガソリン自動車の燃料配管や燃料タンクから蒸発するものがある。深川らは、日本国内におけるガソリン自動車からのエバポエミッションの量を推計した。燃料タンクや燃料配管からの染み出しと、キャニスタの破瓜の両方を考慮した蒸発ガス量の式を自動車の走行パターン調査結果と組み合わせて推計した結果、従来の推計法より約 1 割増加した結果を得た。今後市場の実態を正確に把握しながら、より多くの要素を考慮に入れることで、さらに精度の高い推計結果が期待できる。(大西)

【参考文献】

- 3-1) 山形 直之, 藤井 幹公, 矢野 康英, 横田 和也, 青木 理, 檜原 和晃, 山本 博之: 過給ガソリンエンジンの低速トルク向上に関する動圧過給技術の研究, 自動車技術会 2016 年秋季大会学術講演会講演予稿集, No.20166133
- 3-2) 加藤 二郎, 山形 直之, 中村 光男, 松本 隆雅, 惣明 信浩, 寿美 眞治, 古閑 達也, 田中 伸彦: エゼクター効果を利用した排気干渉抑制技術の検討, 自動車技術会 2016 年秋季大会学術講演会講演予稿集, No.20166134
- 3-3) 柿沼 隆, 都知木 博一, 古俣 誠二, 舟根 匠: 新型 3.5L V6 直噴ターボエンジンの開発, 自動車技術会 2016 年秋季大会学術講演会講演予稿集, No.20166135
- 3-4) 伊東 輝之, 岸 一昭, 清水 雅之: 新型 4 気筒 2.0L 直噴ガソリンエンジンの開発, 自動車技術会 2016 年秋季大会学術講演会講演予稿集, No.20166136
- 3-5) 岩塚 知宏, 津荷 俊介, 加納 大, 井上 芳樹, 森 清輝: スパークプラグからの HSPILSPI に関する研究, 自動車技術会 2016 年秋季大会学術講演会講演予稿集, No.20166143
- 3-6) 井上 尊雄, 今岡 佳宏, 白石 泰介, 野田 徹: 燃焼室冷却の最適化による耐ノック性と熱効率改善, 自動車技術会 2016 年秋季大会学術講演会講演予稿集, No.20166137
- 3-7) 浦野繁幸, 永井正勝, 加古純一: 熱効率最大化に向けた燃焼制御法の研究, 自動車技術会 2016 年秋季大会, No.20166172
- 3-8) 熊谷知久, Patrick Hoppe, Stefania Esposito, Max Mally, Bjoern Franzke, Bastian

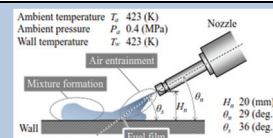


Figure 3-24 スリット噴霧の壁面への衝突評価

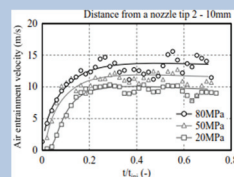


Figure 3-25 エントレインメント流速の増加

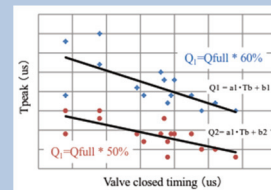


Figure 3-26 開弁電流供給時間の関係

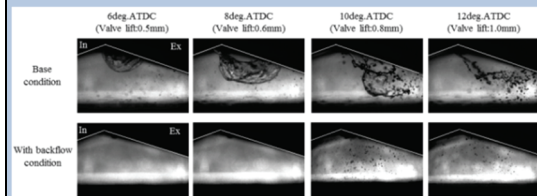


Figure 3-27 筒内圧縮空気のポートへの吹き返し流の観察

Morecinkowski, Tolga Uhlmann, Matthias Thewes, Johannes Scharf, Philipp Adomeit: 希薄燃焼エンジンのモデルベース開発プロセス, 自動車技術会 2016 秋季大会, No.20166173

3-9) 二宮弘之, 堤宗近, 成田洋紀: モデルベースを用いた尿素 SCR 制御開発, 自動車技術会 2016 秋季大会, No.20166174

3-10) 植木 毅, 後藤 守康, 柏崎 貴司, 松村 恵理子, 千田 二郎: 高圧雰囲気場におけるガソリン直噴インジェクタノズルの噴霧特性解析, 自動車技術会 2016 秋季大会, No.20166232

3-11) 石 浩雲, 青野 俊宏, 草壁 亮, 豊原 正裕, 向原 修: インジェクタ個体差検知による最小噴射量の低減技術, 自動車技術会 2016 秋季大会, No.20166234

3-12) 岩室 誠, 川戸 晃一, 鮫島 徹, 田口 靖英, 柴田 仁, 戸田 翔大: デュアルインジェクション (Dual MPI) システムの新噴霧コンセプト開発, 自動車技術会 2016 秋季大会, No.20166235

3-13) 八百幸 誠二, 塚越 崇博: PFIエンジンの冷間始動時における筒内粒径解析, 自動車技術会 2016 秋季大会, No.20166236

4 バイオ燃料・アルコール

本セッションは、大会最終日の午前に開催され、6 件の講演が行われた。その中から 3 件の講演について、以下のとおり紹介する。

金沢工業大学大学院の杉本ら⁴⁻¹⁾による、「エタン混合燃料による減圧沸騰の効果が予混合ディーゼル燃焼に及ぼす影響」と題する講演では、加圧によって液化可能なエタンを軽油に混合し、ディーゼルエンジンに対して用いた場合、減圧沸騰の効果によって得られる性能改善について紹介された。減圧沸騰による燃料噴霧の性状改善についてはこれまで多くの研究者によって試みられてきたが、当該論文では、軽油に対してエタンを 65%まで混合することによって、新しい知見を得ている。図4-1に示すように、エタン混合割合が60%以上で減圧沸騰が確認でき、この効果によってNO_xとスモークの同時低減が実現すると共に熱効率の改善も得られている。図4-2に示すように、最適燃料噴射タイミングはエタン混合割合が60%以上で大幅に進角していることから、燃焼が予混合化していることが推察される。予混合圧縮着火の燃焼制御についての示唆を与え得る研究で、今後が期待できる。

早稲田大学大学院の山口ら⁴⁻²⁾による、「燃料改質による圧縮着火エンジンの高効率化に関する研究」と題する講演では、ディーゼルエンジンのEGR配管の途中に燃料改質インジェクタを配置し、高温のEGR中に燃料を一部噴射して、水素をはじめとする改質ガスを生成させ、ERGと共に吸気中に導入して使用した際の効果を数値シミュレーションした結果について紹介された。図4-3に示すように、ノルマルヘプタン燃料を改質した場合、最も多い成分はカーボンであり、次いで水素、メタン、一酸化炭素の順となる。カーボンは配管内に堆積することが懸念されるため、改質器におけるカーボンの生成を抑制可能な改質触媒が必要となる。一方、図4-4に示すように燃焼シミュレーションによれば、NO_xは増加するものの、スートと総合効率は若干改善することが示された。

首都大学東京の首藤ら⁴⁻³⁾による「水素社会における自動車用エネルギーキャリアとしてのメタノール」と題する講演では、水素エネルギーを利用した循環型社会の構築に向けて、水素キャリアとしてのメタノールの実力について紹介された。表4-1に示すように、水素輸送の手法として、常温で加圧して液化したアンモニアを用いるのが最も高い水素貯蔵密度が得られるが、常温常圧ではメタノールの水素貯蔵密度が最高となり、水蒸気改質を用いれば更に高くなること、メチルシクロヘキサン(MCH)などの有機ハイドライドの水素貯蔵効率はさほど高くないことが説明された。メタノールから水素を取り出す際の理論電圧は0.016Vであり、水電解の理論電圧1.235Vに比べて大幅に低く、低電力での電解が可能であることも紹介された。(城戸)

【参考文献】

4-1) 杉本 彬良, 小橋 好充, 加藤 聡, 長沼 要, 伊藤 貴政, 川北 晋一郎, 森島 信悟, 近藤 和吉, エタン混合燃料による減圧沸騰の効果が予混合ディーゼル燃焼に及ぼす影響, 自動車技術会 2016 秋季大会, No.20166256

4-2) 山口 恭平, 喜久里 陽, 草鹿 仁, 大聖 泰弘, 燃料改質による圧縮着火エンジンの高効率化に関する研究, 自動車技術会 2016 秋季大会, No.20166257

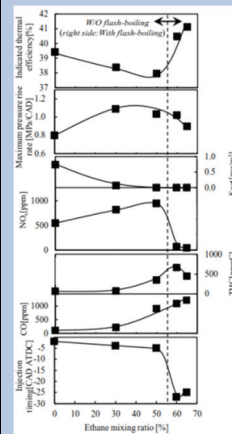


Figure 4-1 エタン混合割合 60%以上での減圧沸騰

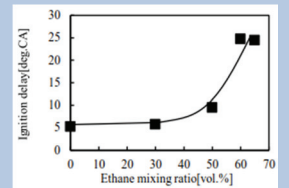


Figure 4-2 最適燃料噴射タイミングの進角

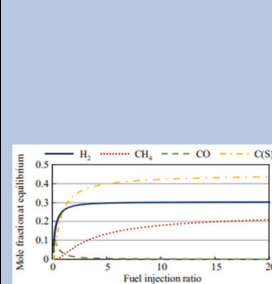


Figure 4-3 ノルマルヘプタン燃料を改質した場合の成分

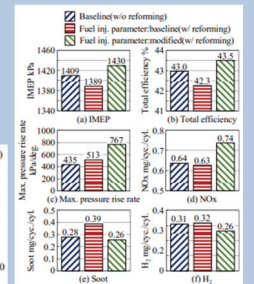


Figure 4-4 燃焼シミュレーション

Table 4-1 水素貯蔵密度の比較

Hydrogen carrier	Hydrogen storage density (kg _{H₂} /m ³)
Liquid hydrogen (0.1MPa, 20K)	70.6
Methanol (0.1MPa, 293K)	98.98 (148.46 with steam reforming)
Ammonia (1MPa, 293K)	107.0
Toluene-MCH	47.4

4-3) 首藤 登志夫, 水素社会における自動車用エネルギーキャリアとしてのメタノール, 自動車技術会 2016 秋季大会, No.20166259

5 エミッション計測関連

世界各国で自動車の排出ガス規制が強化されているにもかかわらず、欧州の大気中 NO_2 濃度が 1995 年以降ほぼ横ばいになっており、大気環境の改善効果は実感しにくいのが現実である。また、2015 年 9 月、認証試験時のみ排出ガスを低く抑制する不正ソフトが米国で問題となったのを発端に、国内においても実路走行時の排出ガス性能に対する関心がにわかに高まっている。今回は、「ディーゼル後処理・排ガス計測」セッションのトータル 7 件の講演発表のうち、実路走行時の NO_x 排出に着目した 2 講演を紹介する。

交通安全環境研究所の小澤⁵⁻¹⁾らは、「ディーゼル乗用車の実路走行時における NO_x 排出量変動要因の一考察」と題した発表を行なった。走行環境や車両条件等の因子が NO_x 排出量に及ぼす影響を解析するのを目的に、 NO_x 後処理触媒を装着していない小型ディーゼル乗用車に車載型排出ガス分析計 PEMS (Portable Emissions Measurement System) を搭載し(図 5-1)、シャシダイナモメータ試験と実路走行試験を実施した結果を報告している。シャシダイナモメータ試験において実路走行試験時の試験車重量を設定し、エアコンを使用した条件で試験をした場合、認証試験条件に対して約 55% の NO_x 増加が確認された。これは、実路走行においても同様に NO_x 排出量が増加する可能性を示唆している。また、実路走行試験計測結果から速度と加速度に対する NO_x 排出量マップ(図 5-2)作成し、JC08 モードなど他の車速パターンの NO_x 排出量を予測計算した。予測値は実測値とよく一致しており、実路走行における NO_x 排出量への影響因子としては速度と加速度が支配的であると述べている。

千葉大学の金⁵⁻²⁾らは、「ディーゼル乗用車における実路走行時 NO_x 排出性能の予測手法に関する基礎検討」を発表した。ディーゼルエンジンからの NO_x 排出量を予測する手法については、これまで様々な研究が行なわれている。予測モデルは、Zeldovich 機構などの詳細な物理・化学式を含む物理モデル、物理モデルに対して実験データによる統計モデルを組み合わせた物理・統計モデル、エンジンの実測データに基づいた統計モデルに分けられる。そのいずれにおいても EGR 率などのエンジン計測データが必要であり、様々な車両からの NO_x 排出量を簡便かつ効率的に評価することは困難であった。そこで、より一般的な変数を用いて NO_x 排出量を予測するモデルの構築を行い、その精度を検証した結果を示している。説明変数に速度、加速度、加速度二乗項を用いて構築した予測モデルは、実路走行時の NO_x 排出量と相関が見られる(図 5-3)。しかし、道路勾配や高速走行を含む条件を対象にした場合は、予測精度が低下した。市街地でなおかつ道路勾配の影響が小さい条件での走行結果を基に予測モデルが構築されているため、今後の課題と言える。

欧州では、乗用車及び小型商用車を対象に、2017 年 9 月からいよいよ RDE (Real Driving Emissions) 規制が開始される予定である。同様の規制は日本においても検討されており、評価方法の確立が急がれる。(西川, 山口)

【参考文献】

5-1) 小澤 正弘, 山口 恭平, 水嶋 教文, 鈴木 央一, 金 尚明, 窪山 達也, 森吉 泰生: ディーゼル乗用車の実路走行時における NO_x 排出量変動要因の一考察, 自動車技術会 2016 秋季大会, No.20166393

5-2) 金 尚明, 森吉 泰生, 窪山 達也, 松本 脩, 小澤 正弘, 山口 恭平, 水嶋 教文, 鈴木 央一: ディーゼル乗用車における実路走行時 NO_x 排出性能の予測手法に関する基礎検討, 自動車技術会 2016 秋季大会, No.20166394

6 EV・HEV 関連

今大会の電動車両関連セッションは、駆動用モータ関連 2, EV/HEV システム関連, EV/HEV 用要素関連と FC 関連 2 の計 6 セッションに加えて、ソーラカーセッションで関連発表があったが、モータに関する興味深い発表が幾つかあったのでそれを中心に紹介する。あわせて CO_2 削減の興味深いテーマについても紹介する。

電動車両の駆動モータは小型・軽量で高い出力と効率求められるため、最大エネルギー積(BHmax)が大きいネオジウムなど希土類磁石が用いられるが、高温環境での減磁を避ける



Figure 5-1 PEMS setup for test vehicle

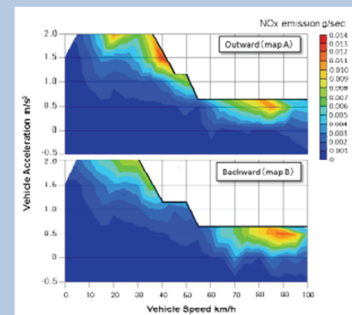


Figure 5-2 The map of NO_x emission based on RDE data

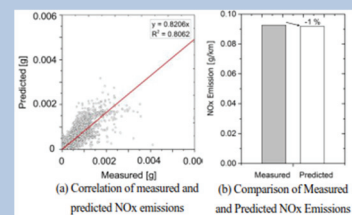


Figure 5-3 Results of real driving emissions

必要から重希土類の磁性材料を添加して保持力を高める方法がとられている。しかし、重希土類材料の埋蔵量が少なく、しかも偏在していることから、コストを含めて資源リスクが高く、駆動モータの普及のネックの一つになり得る。相馬ら⁶⁻¹⁾は、重希土類材料を使用しない方法について検討し、従来の HEV 用モータに置き換えに成功した重希土類フリーのモータについて述べた。手法は、①重希土類なしで高い保持力を持つ磁石の開発と、②十分でない保持力の磁石にもかかわらず減磁がおきないように、運転中の反磁界を低減する磁気回路の工夫、の二つで構成される。

保持力の高い微細な結晶の磁石を得るために図 6-1 上段の単結晶粉末を常温で着磁後焼結する従来の方法に代わって、熔融合金を急冷して超微細結晶の薄板を生成し、この薄板を砕いた原料磁粉を圧粉体に成形し、これを熱間で塑性加工・配向する方法をとった(同図下段参照)。これによって従来の製法による重希土類を添加した磁石と同等の保持力を確保している。

磁気回路の工夫によって反磁界を抑制するために、ロータに図 6-2 示すような V 字型磁石配置を選択し、主磁束の短絡を制御するセンターリブ(図中の A)の長さ、フラックスバリア(図中の B 部)の磁石角部近傍のコア突出し量、フラックスバリア外周側の梁の厚みを調整すると等価な小穴群の配置(図中の C: センターリブ部の梁を廃止したことによるロータの強度不足から C 付近の肉厚低減ができないため)について磁場解析に依って最適値を求めている。センターリブの長さを長くすると図 6-3 のようにトルクと減磁の限界値が変化するためセンターリブ長を 0.6mm とし、同様に、B 部に関しては図 6-4 のトルクと減磁限界値のトレードオフの関係から 1.25mm を選択した。また、小穴の配置も図 6-5 の結果から Model 1 を選択し、既存モータと同等のトルク特性と減磁耐力を確認している。さらに、小穴による磁束変動低減の効果でコギングトルクが図 6-6 のように低減される効果も確認できたとしている。

駆動用モータとして一般的な永久磁石同期モータ(PMSM)は、永久磁石を利用しているために界磁電流が不要であるが、高トルクが不要な低負荷状態や高回転域では永久磁石による鎖交磁束が過多となり鉄損増加の一因となっている。このため、①磁石の着磁状態の制御や、②ステータに鎖交する磁石磁束が受動的に変化する漏れ磁束(可変漏れ磁束, VLF)を利用する方法で、必用に応じて磁石磁束量を可変して、鉄損の抑制と弱め界磁電流の低減によって駆動モータの効率を改善する方法が検討されてきた。松浦ら⁶⁻²⁾は、②の VLF に関して、逆円弧型磁石を採用することで、従来、漏れ磁束生成のために必用となった深い磁石埋め込みによって生じていた各種制約を解消して効率と出力の向上ができることを示した。

逆円弧型磁石を適用した VLF モータは図 6-7 のように磁極間に三つのフラックスバリアを設けて磁石表面から裏面への漏れ磁束を抑制しつつ、隣接磁極への短絡磁路を持ったもので、磁石はロータ外径方向に凸にセットされている。可変漏れ磁束特性が磁石端部の埋め込み深さに依存することが知られているので、矩形磁石を用いて、埋め込み深さ bw による漏れ磁束特性の変化を有限要素解析(FEA)により求め(図 6-8)、この結果から最大の変率率が得られる bw=4mm を決定している。埋め込み深さをこの値で固定した状態で逆円弧型磁石の曲率を変化させ磁石中央部の深さ(図 6-9 の cw)と q 軸インダクタンスの関係を FEA で求めた。q 軸インダクタンスの低減によって出力が向上するので、図 6-10 の結果から cw を最小にセットする選択が好ましいことが分かる。この結果、磁石の曲率半径は、ロータの機械的強度が確保できる cw の最小値に対応する r=27mm となる。この値でセットされた逆円弧型磁石による VLF モータの優位性を、従来の矩形磁石による二つの VLF モータ(磁石端部の埋め込み深さ bw=4.0mm を優先した VLF-A と、q 軸インダクタンスを優先した bw=1.4mm の VLF-B)との FEA 解析に依る比較で検討した。可変漏れ磁束特性を図 6-11 に、負荷の変化による磁束変化を図 6-12 に示すように、逆円弧型磁石により従来の VLF モータを上回る 22%の可変磁束幅が得られている。可変磁束機能のある VLF-A と比較すると、最大トルクは同等であるが、最高出力では 6%改善されている。効率は図 6-13 に示すとおりで、逆円弧型磁石によって、低出力、高回転域での効率が改善されていることが分かる。これらのことから、実用的な可変漏れ磁束モータの製作が可能になったとしている。

ホイールハブモータ(ホイールインモータ)は、コンパクトで、かつ、さまざまな駆動方式に対応可能なことから注目されているが、車両のばね下重量の増加等の懸念から大量普及には至っていない。これは、車両の走行状態の全域をカバーするだけの駆動系に仕上げた際の重量に課題がある場合が多いことも一因となっている。山本らと森田ら^{6-3), 6-4)}は、小容量の二つの

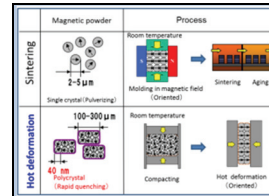


Figure 6-1 磁石の製造方法の比較

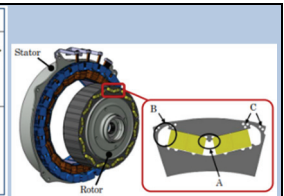


Figure 6-2 開発モータの概要と磁石周辺の修正部

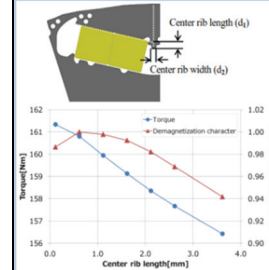


Figure 6-3 トルク、減磁特性へのセンターリブ長の影響

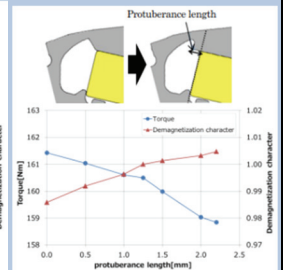


Figure 6-4 トルク、減磁特性への突き出し長さの影響

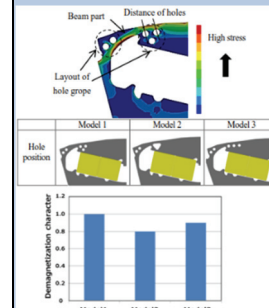


Figure 6-5 小穴の減磁特性への影響

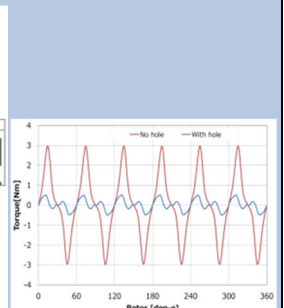


Figure 6-6 コギングトルクの改善効果



Figure 6-7 逆円弧型磁石による可変漏れ磁束モータの改善点

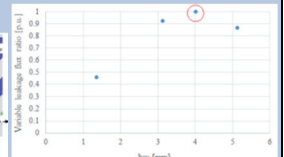


Figure 6-8 漏れ磁束の変化量と bw の関係

(a) 漏れ磁束短絡路の設計自由度の向上
(b) q 軸インダクタンスの低減



Figure 6-9 磁石の曲率半径に関するモデル

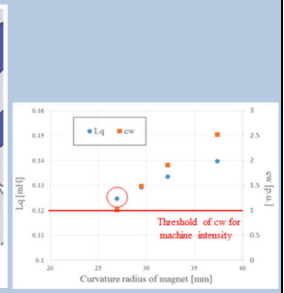


Figure 6-10 磁石の曲率半径と q 軸インダクタンスの関係

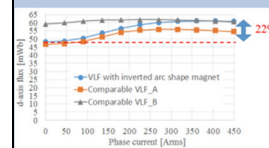


Figure 6-11 3種のVLFの可変漏れ磁束特性

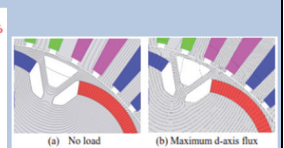


Figure 6-12 逆円弧磁石VLFの磁束の変化

(a) 無負荷時
(b) 最大磁束(高出力時)

モータを遊星歯車で結合して、モータの直並列運転に近い方法で広い負荷域をカバーするホイールハブモータシステムを提案した。図 6-14 に示す構造で、同軸上に設置した二つのモータのロータ内に、シングルピニオン遊星歯車とダブルピニオン遊星歯車、ワンウェイクラッチ (OWC) で構成された変速機を内蔵している。図 6-15 のブロック図に示すように、二つの遊星歯車のサンギヤはモータ A 上の共通の軸上にあり一体で回転する。シングルピニオン遊星歯車のリングギヤと、ダブルピニオン遊星歯車のキャリアは、モータ B と連結されて一体で回転する。シングルピニオン遊星歯車のキャリアはワンウェイクラッチで一方方向の回転のみが可能になっている。この図は Low モードでモータ A、B が逆回転方向に逆トルクの状態でもトルク制御されており、OWC が係合されるため、A、B 両モータのトルクの和が減速機に入力される。

これに対して図 6-16 に示すモータの回転方向では OWC が係合されないため、シングルピニオン遊星歯車のリングギヤとサンギヤの経路が断たれ、減速ギヤの入力軸には両モータの回転数の和が入力される。これは High モードで、アクセルからの要求トルクでトルク制御されるモータ A に対して、モータ B は A の速度を目標値とする速度追従制御が行われる。後退の場合は図 6-17 の回転方向で High モードに準じた動作となる。しかし、厳密には OWC の係合/非係合がトルクによるので、両モータの回転数差によってモードが図 6-18 のように決まり、High モード等でのモータ回転速度の制御にはこの領域を考慮した制御が必要となる。試作したモータの性能を表 6-1 に、寸法等を表 6-2 に示す。

省エネに関して大局的な観点からの検討に関する発表もあり、興味深い。紙面の関係で、これらに関しては詳細な解説は割愛し、概要のみの紹介にとどめる。

CO₂ 対策の一つとして、電気自動車に太陽光発電による電力を利用する PV&EV スマートシステムが提案されている。しかし、電気自動車は CO₂ 削減に有効とされつつも、電池価格、航続距離、電池切れの不安など課題が多い。また、空調使用時、特に暖房使用時に、航続距離が大幅に低下することも大きな課題となっている。そこで専用のエンジンで空調機を駆動することで電力での空調機駆動より総合的な効率を高め、余った動力で発電することによって EV の走行可能距離を向上させる「車載空調機の動力源と走行に必要な電源を統合化した」AI-EV (Air-conditioner Integrated Electric Vehicle) が提唱されている。広瀬ら⁶⁻⁵⁾は、空調機用小型エンジンの排気量が EV の実用性能に与える影響等と、AI-EV の優位性について述べた。さらに、家庭や事業所でのエネルギー需給調整システムとしての実力についても触れた。

AI-EV は図 6-19 に示すようにバッテリー駆動 EV にエアコンとエアコン駆動用の小型エンジンを搭載したもので、このエンジンのプーリにベルト掛けされた発電機によって駆動用電池の補充電が可能である。図 6-20 に示すように、エンジンを効率のよい状態で連続運転し、余剰動力で発電した電力は駆動用電池へ補充電される。空調機の数学モデルを作成し、この妥当性を市販軽自動車用空調機のベンチで確認し、このモデルをベースに EV と二つの AI-EV (排気量が 160cc のエンジンと 120cc のエンジンの 2 種) の走行可能距離を試算している (図 6-21 参照)。車両とエアコンの条件は表 6-3 に示すとおりで、いずれも 24kWh の電池を搭載し、外気温 32°C の真夏で室内の初期温度が 60°C の条件である (EV としては暖房での効果が重要であると考えられるが…)。巡航速度が高くなるほど走行可能距離の差が縮まるが、都市内走行に相当する 30km/h では、AI-EV の優位性が際立つとしている。

また、レジャーなどの遠出 (巡航速度 50km/h) を想定した際の遠出が可能な距離についても試算し、EV (図 6-22) が 120km (片道 60km; 出先での急速充電を想定すると 96km (0.8 × 120km) が可能であると推測されるが…) であるのに対し、120cc エンジンを搭載した AI-EV (図 6-23) では出先での 5 時間の駐車中の充電を前提とすれば往復約 300km (片道 150km) が可能であるとし、AI-EV であれば都心から日光、富士山などの主要観光地までの走行が可能としている。

エネルギー需給調整システムについて、ソーラシステム (PV)、給湯器 (HP)、EV、AI-EV の組み合わせ方による CO₂ 削減効果についても試算し、PV+EV (48%) や PV+HP (19%) に対して、三つを組み合わせた PV+HP+EV では 79% と効果が拡大すること、EV を AI-EV に置き換えた場合も 76% と効果があることを示しているが、投資の回収効果の点では EV によるものが 4% であるのに対し AI-EV によるものは 7.3% で、経済面で有利であるとしている。

EV の CO₂ 削減効果は、電力ミックスに大きく依存するため、太陽電池パネルによる発電を利用する PV&EV スマートシステムの意義は大きい。定地型の PV の出力を充電する方法が一般的であるが、充電の煩雑さや制約から、オンボートのソーラの有効性に着目した同じグループ

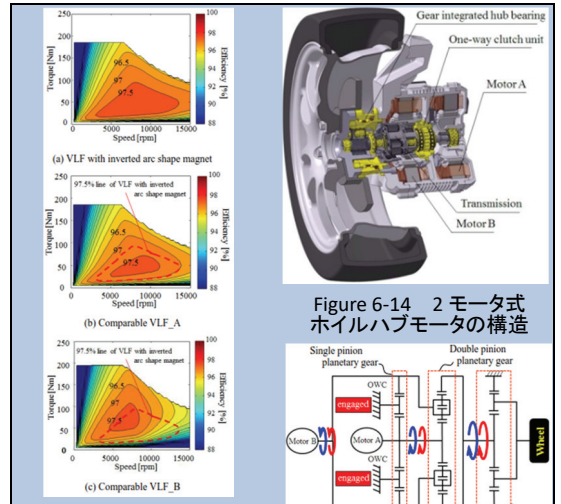
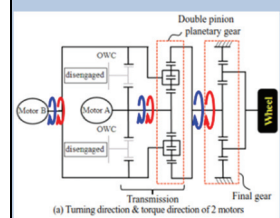


Figure 6-14 2 モータ式ホイールハブモータの構造

Figure 6-13 3 種の VLF の効率マップ

(a) 逆円弧型磁石による VLF
(b) 比較用 VRF A (可変優先)
(c) 比較用 VRF B (出力優先)

Figure 6-15 ハブモータのブロック図 (Low モード)



(a) Turning direction & torque direction of 2 motors

Figure 6-16 ハブモータのブロック図 (High モード)

Figure 6-17 ハブモータのブロック図 (後退モード)

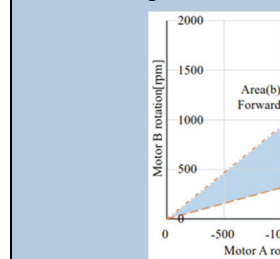


Figure 6-18 各モードの領域マップ

Table 6-1 ハブモータの主な仕様

Item	Value
Max power	22 kW
Max torque (Low mode)	850 Nm
Max torque (High mode)	400 Nm
Max vehicle speed	135 km/h

Table 6-2 ハブモータの主な寸法

	Motor A	Motor B	One-way clutch
Low mode	CW	CCW	Engaged
High mode	CW	CW	Disengaged
Reverse mode	CCW	CW	Disengaged

*The left wheel is seen from the driver's seat

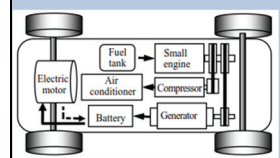


Figure 6-19 AI-EV のシステム構成

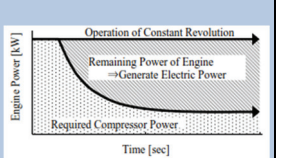
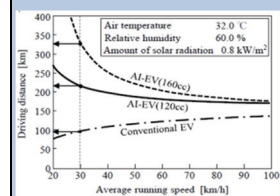


Figure 6-20 AI-EV のエンジン出力の利用イメージ

Table 6-3 検討に使用した車両とエアコンの条件

	[EV]	[AI-EV]
Battery Capacity	24 kWh	24 kWh
Battery Usable Range	20-100 %	20-100 %
Power Consumption Rate	9.1 km/kWh	8.9 km/kWh
Cruising Speed (City area)	30 km/h	30 km/h
Cruising Speed (Leisure)	50 km/h	50 km/h
Engine Displacement	-	120 cc
		160 cc
[Air Conditioning]		
	Cooling	Heating
Outside air	Air temperature 32 °C	5 °C
	Relative humidity 60 %	80 %
Amount of solar radiation	800 W/m ²	0 W/m ²
Outlet temperature	10 °C	5 °C
target inner temperature of the cabin	25 °C	18 °C
COP	4.4	4.7

Figure 6-21 EV と AI-EV の巡航速度と航続距離の関係



の3件の発表があった。既存のPHEVの外部充電部を太陽電池発電システムに置き換え、自然エネルギーによる電力のみを使用するもの(Solar Hybrid Vehicle, SHV)を想定している。木村ら⁶⁻⁶⁾は、同グループで実施してきた、すべての乗用車を大・中容量の太陽電池搭載車両に置き換えた際のwell to wheel CO₂削減率に関する経験をベースに、低容量の太陽電池を搭載した車両を想定したCO₂削減可能性について検討した。日照環境や走行傾向等についてはインターネット・モニタ調査による5000台分の情報を収集し、これとその地域の気象データを組み合わせ、国内各地に導入した際のメリットの定量化を図った。乗用車全体がSHVに置き換わった際の、ソーラによる電力で走行する比率(≒CO₂削減率)は、図6-24に示すとおり、搭載ソーラの出力と搭載電池容量が大きくなるほど高くなるが、搭載電池容量には搭載ソーラ出力値(ex. 1000W, 500W, 250W)に対応した必要充分値(ex. 4kWh, 2kWh, 1kWh)があり、CO₂削減率の期待値も各々、10%, 19%, 30%となると推計し、SHVに高いポテンシャルがあると結論づけている。

原ら⁶⁻⁷⁾は、前述の3レベルのSHVとICEV, HEV, PHVS(EV走行距離の小さいPHEV), PHVL(EV走行距離が長いPHEV)のライフサイクルコストとCO₂削減効果についての分析結果を紹介した。PHVSはコスト最小で、長距離ユーザに最適であるが、CO₂価格が低い段階では短距離ユーザにとっても最適である。SHVはPHVSに次ぐ位置づけで、EVの普及が何らかの要因で進まない場合は、SHVの費用対効果が高いことからCO₂削減に有効であるとしている。SHV内での優劣はCO₂価格や走行距離に依存するが、木村らの推計を裏付ける結果となっている。

浦部ら⁶⁻⁸⁾は、木村らが有効とした小規模のソーラについて、実際の車両搭載位置と得られる電力量の関係を把握するために、市販PHEVに図6-25に示すように16枚の太陽電池モジュールを搭載し、夏から冬までの約100日間の発電量を計測した試験の結果について述べた。期間中の日射量と全太陽電池セルの発電量の推移を図6-26に示す。発電量の期間中最大値、最小値、平均値とこれらに対応するEV走行換算値は表6-4に示すとおりで、車両全面を利用すれば平均で1日14km強を自然エネルギーで走行できることが分かる。(清水)

【参考文献】

- 6-1) 相馬 慎吾, 白土 英治, 藤代 智:重希土類フリーHEV用モータの磁気形状研究, 自動車技術会 2016年秋季学術講演会講演予稿集, No.20166008
- 6-2) 松浦 透, 加藤 崇, 谷本 勉, 佐々木 健介:逆円弧型磁石を用いた可変漏れ磁束モータの効率化・高出力化, 自動車技術会 2016年秋季学術講演会講演予稿集, No.20166009
- 6-3) 山本 慎, 松田 靖之, 大池 充, 森田 竜峰, 郡司 大輔:2モータ式ホイールハブモータを搭載した実験車両とその走行評価, 自動車技術会 2016年秋季学術講演会講演予稿集, No.20166010
- 6-4) 森田 竜峰, 山本 慎, 大池 充, 松田 靖之, 郡司 大輔:2モータ式ホイールハブモータの制御手法の開発, 自動車技術会 2016年秋季学術講演会講演予稿集, No.20166012
- 6-5) 広瀬 拓, 中川 二彦, 千阪 秀幸:空調機統合型電気自動車の評価, 自動車技術会 2016年秋季学術講演会講演予稿集, No.20166362
- 6-6) 木村 和峰, 工藤 由貴, 佐藤 彰倫:Solar Hybrid Vehicleの総合評価(第1報)太陽電池搭載によるCO₂排出削減可能性評価, 自動車技術会 2016年秋季学術講演会講演予稿集, No.20166128
- 6-7) 原 卓也, 木村 和峰, 佐藤 彰倫:Solar Hybrid Vehicleの総合評価(第2報)ライフサイクルコスト・CO₂の比較分析, 自動車技術会 2016年秋季学術講演会講演予稿集, No.20166129
- 6-8) 浦部 心一, 木村 和峰, 工藤 由貴, 佐藤 彰倫:車載太陽電池の発電量推移, 自動車技術会 2016年秋季学術講演会講演予稿集, No.20166130

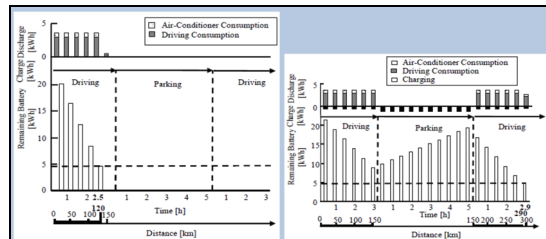


Figure 6-22 EVの走行距離に対する消費電力と電池残量の変化
Figure 6-23 AI-EVの走行距離に対する消費/発電量と電池残量の変化

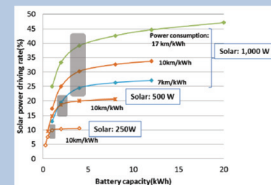


Figure 6-24 ソーラパネルの定格出力と電池容量をパラメータとしたソーラの寄与度(CO₂削減率)



Figure 6-25 ソーラモジュールの搭載状況

Table 6-4 1日あたりの発電量とこれによる走行可能距離

*: EV走行電費を7.0kWh/kWhで換算した時の推定距離		
	Power generation (kWh/day)	EV mode range* (km)
Maximum	4.23	29.6
Minimum	0.10	0.7
Average	2.09	14.6
Standard deviation	1.11	7.77

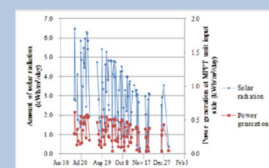


Figure 6-26 収集期間中の日照量と発電量の変化

第 27 回 内燃機関シンポジウム —エンジンシステムのイノベーションを目指して—

27th Internal combustion engine symposium

共催：日本機械学会（幹事学会）、自動車技術会
会期：2016年12月5日（月）～12月7日（水）
会場：東京工業大学 蔵前会館（東京都目黒区）

下田 正敏（編集委員）、伊東 明美（東京都市大学）、片岡 秀文（大阪府立大学）、河原 伸幸（岡山大学）、
小島 宏一（産業技術総合研究所）、小橋 好充（北海道大学）、座間 淑夫（群馬大学）、橋本 淳（大分大学）、
白石 泰介（日産自動車）、高山 敦好（久留米工業大学）、永野 幸秀（九州大学）、冬頭 孝之（豊田中央研究所）、
山崎 由大（東京大学）

Masatoshi SHIMODA (JSAE ER Editorial Committee), Akemi ITO (TOKYO CITY UNIVERSITY), Hidefumi KATAOKA
(Osaka Prefecture University), Nobuyuki KAWAHARA (OKAYAMA UNIVERSITY), Hirokazu KOJIMA (aist), Yoshimitsu
KOBASHI (HOKKAIDO UNIVERSITY), Yoshio ZAMA (GUNMA University), Jun HASHIMOTO (OITA UNIVERSITY),
Taisuke SHIRAIISHI (NISSAN), Atsuyoshi TAKAYAMA (KURUME INSTITUTE OF TECHNOLOGY), Yukihide NAGANO
(KYUSHU UNIVERSITY), Takayuki FUYUTO (Toyota Central R & D Labs), Yudai YAMASAKI (The University of Tokyo)

1 はじめに

2016年の末、12月5日から7日にかけて、東京工業大学において第27回 内燃機関シンポジウムが日本機械学会と自動車技術会の共催にて開催された。今回のテーマは「エンジンシステムのイノベーションを目指して」とされ、各種フォーラムと学術講演会が開かれた。本レポートでは参加者から注目を集めたテーマについて報告する。すべてを網羅できていないことはご了承ください。

2 フォーラム

2.1 エンジン制御研究開発から始まる新たな展開

シンポジウム 2 日目、午前「エンジン制御研究開発から始まる新たな展開」と題したフォーラムが開催された。リアルワールドでの性能向上、燃料多様性、さらには膨大になった適合作業コストの削減が求められる内燃機関において、制御技術がますます重要となってきている。2014年から始まった SIP (Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program) 革新的燃焼技術でも 4 課題のうちの一つにエンジン制御を据え、産学、学学連携、また熱・燃焼工学と制御工学といった異なる分野の連携体制が組まれている。このような状況のもと、現状のエンジン制御技術に関する情報を共有し、今後の性能向上、分野発展に向けた課題について議論することを趣旨とし、4 名が登壇、話題提供と討論を行った。

産での開発と共に、計測自動制御学会を中心に学会活動も精力的に行われているテクノバの大島氏からはエンジン制御を俯瞰し、制御論から整理を頂き、エンジン制御の現状紹介に加え、状態予測の大切さ、また、運転条件によってパラッキ特性が変化することなどへの対応が未解決であることが紹介された。慶應義塾大学の大森教授からは、SIP の一環として取り組んでいるディーゼルエンジンを対象とした FB (feedback) 誤差学習制御の成果の紹介があった。学習により FB 制御器のゲインを変化させるのではなく、FF (feedforward) 制御器を適応することで、安定性を保ったまま制御性能を改善できることが示された。また、身近な例によって制御の仕組みを分かりやすく紹介された。上智大学の申教授からは、ガソリンエンジンを対象に、MPC (Model Predictive Control) の解法に収束計算を用いた計算負荷の少ない計算手法、物理に基づく制御則の構築手法が紹介された。また、モデルを用いない統計制御、極値探索法が実機のサイクル変動抑制に有効に働いた結果の紹介があった。マツダの志茂氏からは、クリーンディーゼルエンジン SKYACTIV-D に導入されている燃焼制御技術が紹介された。物理モデルを基盤に、絶対値予測のためにパラメータに統計式などを用いた種々の Gray box モデル

が説明され、また、物理に基づくモデル構築は、制御に役立つのみでなく、現象の理解が進み、更なるアイデアの基盤ともなるとの説明があった。

これまで国内においてはエンジン制御を、エンジン燃焼と制御の両方の立場で集って議論する場がほとんどなかった。本フォーラムで、エンジン燃焼制御に最新の制御理論を適用することでの性能向上の可能性が示されるとともに、既に確立されている量産制御への新たな手法導入時の課題について初めて討論が行われた。これを機にエンジン燃焼専門家はモデルの提供、制御専門家はエンジン燃焼の物理の理解を深め、歩み寄ることで、エンジンシステムとしての更なる路上性能上につながることを期待したいと思う。(山崎)

マツダ、志茂²⁻¹⁾は「新世代クリーンディーゼルエンジン SKYACTIVE-D における燃焼制御技術」と題して講演を行った。乗用車用ディーゼルに特有な低圧縮比をもちいた ALTERNATIVE な燃焼を実現し、トータルとしての低燃費、低排出ガスを狙ったものである。低圧縮比コンセプトは、高過給、高 EGR 下では筒内燃焼の外乱影響を受けやすいので燃焼制御技術によるロバスト性確保が必須になる。状態量予測モデル(バーチャルセンサ)として、壁温予測モデル、筒内温度予測モデル、筒内 O₂ 濃度予測モデル、筒内圧力予測モデルを持ち、予測モデルによるフィードフォワード制御を実現している。

燃焼制御の全体像としては、エンジンの作動域を複数に下記のように分割し

- ・PC 燃焼の時は着火時期制御: Arrhenius 式と Livengood-Wu 積分を組み合わせて制御因子を着火遅れ予測モデルによって、過渡において着火時期を精度よく制御できる。

- ・PC 拡散型燃焼の時はつなぎ制御: 幅広い EGR レンジにおいて、吸気酸素濃度に応じて最適な多段噴射パターンを選択することで連続的に制御できる。

- ・拡散型燃焼の時はプレ燃焼制御: プレ燃焼効率の非線形な特性およびそれらを支配している物理要因を考慮したプレ発熱量予測モデル(近接パイロット、遠隔パイロットの調整)に寄って、過渡においてプレ噴射量を精度よく予測できる。

このように、研究のフレームワークのしっかりした、燃焼と制御が一体となった素晴らしい成果であり、乗用車ディーゼルにおいて PCI 燃焼を十分に使いこなしている。トラック用の大型ディーゼルエンジンにおいても同一のコンセプトを追及したが、低圧縮比の Alternative 燃焼の道を選択せず、燃費のために圧縮比を大幅に下げられなかった。それ自体は間違っていないが、結果として PCI 燃焼の範囲が Pme で 2-3kg/cm² までが限度であり、さらに乗用車と比較して、重量車のテストモードに対する PCI の NOx 低減効果の Weighting-factor が低いため、二重の意味で PCI 燃焼に大きく踏み出すことができず小規模な採用にとどまった。PCI 燃焼の成立には、本講演のような燃焼の制御の工夫と同時にハードの工夫が必要である。PCI 燃焼を成立させるハードの必須の改善点として

- ・長時間運転時の酸化触媒、DPF の HC 被毒
- ・EGR クーラの汚れ、つまり、酸化触媒の必要性
- ・凝縮水の処理
- ・多段噴射による線図係数の悪化

等が挙げられる。これらを含めて総合的な討議の場を持ちたいものである。(下田)

2.2 進化を続ける計測技術

群馬大学の座間²⁻²⁾は「超高速 PIV 計測によるガソリンノズル近傍の噴霧流動解析」と題して講演を行った。最大 1000 万フレーム/秒で撮影可能な超高速カメラを用いた超高速時系列 PIV を直噴ガソリンエンジンの噴霧速度計測に適用することで、従来の計測が困難であった噴孔近傍の速度計測が可能となった。6 噴孔ノズルの 1 噴孔からの噴霧で計測された時系列速度場の例を図 2-3 に示す。図 2-4 には噴霧軸方向最大速度の時間による減衰をグラフで示す。噴霧軸方向の最大速度の減衰傾向は雰囲気密度によらず三つの領域(A,B,C)に分類でき、領域 A は液柱または液塊が観察され速度の減衰がほぼ無い。速度の減衰が現れる領域 B では分裂が進み液糸や液滴が観察される。さらに速度が減衰する領域 C ではほぼ液滴のみ観察され微粒化が完了している。このように噴霧速度と微粒化過程との関連性を示すことができる。本計測結果は SIP「革新的燃焼技術」で進められているシミュレーションモデルの構築に利用されるとのこと。計測と計算の両面での発展が期待される研究である。(冬頭)

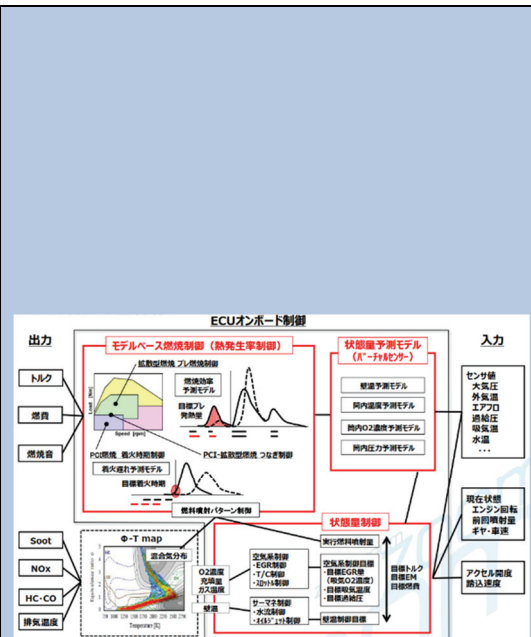


Figure 2-1 モデルベース燃焼制御について

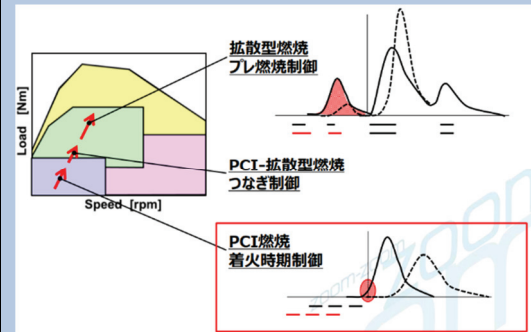


Figure 2-2 SKYACTIVE-D 燃焼制御技術

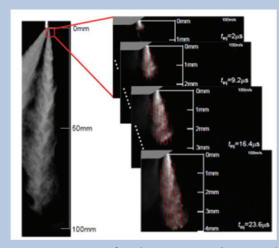


Figure 2-3 時系列 PIV 計測の例

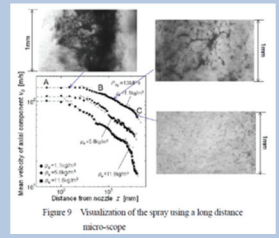


Figure 2-4 噴霧軸方向速度の減衰傾向と噴霧観察

【参考文献】

- 2-1) 志茂大輔, 第 27 回内燃機関シンポジウム前刷集, フォーラム 1-④(2016)
- 2-2) 座間淑夫, 第 27 回内燃機関シンポジウム前刷集, フォーラム 2-①(2016)

3 CI

3.1 CI 機関

東海大・畔津らは、「ディーゼル燃焼におけるすすの生成酸化に関する検討(燃料噴射期間の影響)」と題した講演を行った。ディーゼル機関の高負荷運転時には燃料噴射期間中の着火が不可避であり、噴霧拡散燃焼におけるすすの生成酸化と NO_x 排出特性を理解することが重要である。そこで、本研究では、定容容器において噴霧火炎先端部の崩壊過程とすす生成酸化過程を詳細に検討している。図 3-1 に画像二色法による KL 値の二次元分布を示す。火炎先端部に着目すると、噴射期間が短い 0.6 ms を除いて、すす塊の成長は 1.5 ms 程度で終了し、その後は先端部が崩壊しながらすすの酸化が進行する。図 3-2 に半径方向に積分した KL 値の軸方向分布を示す。噴射期間によらず、ピークの高さ、位置ともに同様に分布していることから、先端部のすすは 0.6 ms 以前の初期の噴射燃料によって生成され、その後には噴射された燃料は準定常的な生成、酸化過程を経ると考えられている。また、本研究では噴射期間を長く(18 ms)することで、準定常状態におけるすすの生成酸化過程も調べられている。準定常状態においては、一般に雰囲気気密度が高くなると、KL 値分布がノズルに近づく。図 3-3 に示すように、この横軸を和栗の運動量理論から求めた空気過剰率とすると、雰囲気気密度の差がほとんどなく、空気過剰率 1 強で KL 値が最も高くなる。さらに、積分 KL 値の時間的変化 $d(KL_{int})/dt$ をすすの生成酸化速度の指標として、これを積分 KL 値の一次元分布と燃焼ガスの速度から求める方法を提案している。この計算結果を図 3-4 に示す。横軸を空気過剰率 λ とした(f)は $\lambda=1$ 付近がすすの生成と酸化の境目となること、横軸を時間とした(e)は、すすの生成が速く、酸化が緩慢に進行することを示しており、すすの生成酸化過程を直感的に理解できる有用な方法である。(小橋)

池村らは、「多段噴射ディーゼルエンジンの簡易燃焼モデルを用いた制御システム」と題し、PCCI 燃焼を想定した離散化燃焼モデルを組み込んだフィードフォワード制御器を設計、実機試験によってその性能評価を行った結果について報告した³⁻²⁾。燃焼モデルのイメージ図を図 3-5 に示す。モデルの入力には各段の燃料噴射条件、回転数、吸気条件を設定し、出力には筒内圧力ピーク時期とピーク値を設定している。離散化点間の変化は、離散点で得られる情報で代表させて演算した熱力学の諸式、L-W 積分、反応速度式等を用いて評価している。図 3-6 に、メイン噴射時期とプレ噴射量を変化させたときの、筒内圧力履歴の実験結果とモデルによる予測結果を示す。予測値は実線で示す実験値をよく予測できている。次に、制御量を筒内圧力ピーク位置、ピーク値、操作量をメイン噴射時期とプレ噴射量とした 2 入力 2 出力制御器を設計している。図 3-7 に、実機試験における各制御量の目標値と計測値、各操作量の時間変化を示す。図から、十分な精度で制御量を目標値に近づけられていることが確認できる。演算負荷についても、量産 ECU へ実装可能なほどに軽量であることが確認されている。(橋本)

3.2 噴霧

東京工業大学 Shinabuth らは“Liquid Vaporization Characteristics of Diesel Spray at High Pressure Conditions”と題し、ディーゼル噴霧の蒸発過程に関する知見を得ることを目的に噴霧の可視化を行い、その調査結果を報告した³⁻³⁾。計測は、急速圧縮膨張装置(RCEM)によって窒素を圧縮して作成した非燃焼高温高压雰囲気中へ燃料を噴射して形成される噴霧を対象に行った。RCEM はエンジンを用いる場合よりも計測の自由度が高く、残留ガスなどの要素を排除しながらエンジン内に近い環境を作ることができるものの、定容容器に比べれば光学計測の自由度は限られる。この研究では、図 3-8 の光学系を図 3-9 のガラスを用いて構築することによって、噴霧全体の分布を得るためのシャドウグラフと液相の分布を得るための Mie 散乱光撮影の同時撮影を実現している。一台の光源、一台の高速度カメラ、かつ、一方向からのみ筒内に光学アクセスできる状況下で二種類の可視化計測を同時に行っている点が計測技術としての工夫であり興味深い。計測対象の雰囲気気条件は温度 565-927K、圧力 0.8-8.7 MPa と幅広く、図 3-10 は温度、圧力の大幅に異なる噴霧を計測し比較した結果である。雰囲気気温度、圧力が低い条件 G ではシャドウグラフと散乱光の分布がほぼ等しく、蒸発がほとんど進行して

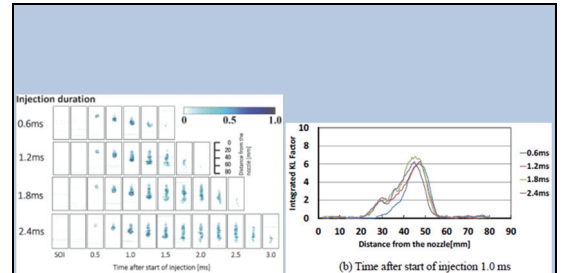


Figure 3-1 画像二色法による KL 値の二次元分布

Figure 3-2 半径方向に積分した KL 値の軸方向分布

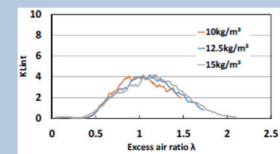


Figure 3-3 運動量理論から求めた空気過剰率

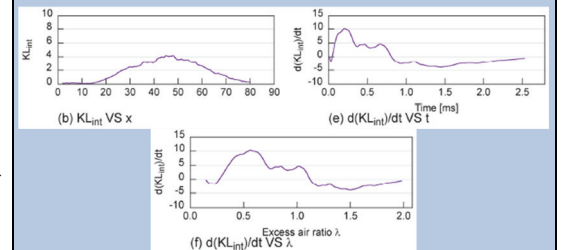


Figure 3-4 積分 KL 値の一次元分布と燃焼ガスの速度計算結果

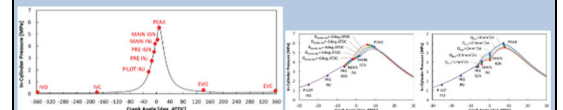


Figure 3-5 燃焼モデルのイメージ図

Figure 3-6 筒内圧力履歴の実験結果とモデルによる予測結果

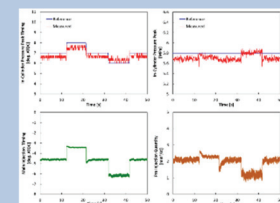


Figure 3-7 各制御量の目標値と計測値、各操作量の時間変化

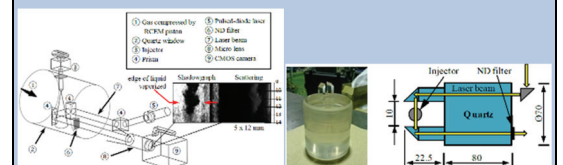


Figure 3-8 急速圧縮膨張装置光学系

Figure 3-9 急速圧縮膨張装置使用ガラス

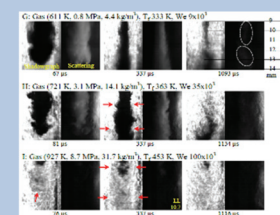


Figure 3-10 温度、圧力異なる噴霧を計測結果

いないことがわかる。温度圧力ともに高い条件 H でも液相は広く分布するものの、さらに高めた条件 I では液相長さは非常に短く、その周囲と下流に混合気が分布することがわかる。相変化を伴いながら発達するディーゼル噴霧において蒸発挙動を捉えることは重要であり、今後の解析にも期待したい。(小島)

【参考文献】

3-1) 畔津 昭彦, 西山 雄峰, 佐々木 工典, 落合 達也, 葛山 裕史, 梅原 努, 冬頭 孝之: ディーゼル燃焼におけるすすの生成酸化に関する検討(燃料噴射期間の影響), 第 27 回内燃機関シンポジウム, 講演番号 19(2016)

3-2) 池村 亮祐, 山崎 由大, 金子 成彦: 多段噴射ディーゼルエンジンの簡易燃焼モデルを用いた制御システム, 第 27 回内燃機関シンポジウム, 講演番号 59(2016)

3-3) Dittapoom SHINABUTH, Susumu SATO, and Hidenori KOSAKA: Liquid Vaporization Characteristics of Diesel Spray at High Pressure Conditions, 第 27 回内燃機関シンポジウム講演論文集, 講演番号 108(2016)

4 SI 機関

4.1 SI 機関

SI 機関(1)では、リーンバーンガソリンエンジンにおいて関心の高い燃焼のサイクル変動に関する研究が 2 件講演された。

楯村(千葉大学大学院)ら⁴⁻¹⁾は「リーンバーンガソリン機関における燃焼のサイクル変動解析」と題して講演を行った。リーンバーン条件下では、初期燃焼の緩慢化により等容度が低下したサイクルが当該サイクルの IMEP 低下を引き起こすことがサイクル変動増大の主要因であることは周知であるが、本研究ではタンブル強化した 4 気筒ガソリンエンジンを用いて、サイクル毎の燃焼解析を実施した結果(表 4-1, 表 4-2), リーンバーンでは等容度が 90%以上のサイクルにおいて、等容度が同じサイクルの IMEP 変動率がストイキ条件と比較して増大することを示した(図 4-1)。加えて、等容度が同じサイクルにおける冷却損失と燃焼効率が IMEP に与える影響を解析し、その要因が燃焼効率の変動であることを示した(図 4-2)。リーンバーン燃焼のサイクル変動低減に向けて、点火強化やタンブル強化による初期燃焼の改善に加え、CA50 以降の燃焼後半の火炎伝播にも着目し、燃焼効率の変動を抑制することの必要性を提唱した。

鄭(慶応大学大学院)ら⁴⁻²⁾は「火花放電のパターンがリーンバーン SI エンジンにおける燃焼のサイクル変動に及ぼす影響」と題して講演を行った。ロングストローク(Stroke Bore ratio 1.5)を採用した単筒エンジン、タンブル流動強化アダプタ、点火コイルを 10 個用いた強力火花放電装置(コイルを直列に 2 個接続したものを並列に 5 組設置)(図 4-3)を使用しリーン燃焼限界を調査した。タンブル流動強化および放電エネルギーの増大(10 Coils w/ Tumble Adapter)により θ_{ig} -5%燃焼期間, 10-90%燃焼期間, および燃焼効率のサイクル間変動が抑制され、リーン燃焼限界(COV of IMEP \leq 5%)が空気過剰率 1.9 程度まで拡大された(図 4-4)。加えて、5 組の点火コイルに一定の放電開始間隔を与えて放電パターンを変化させ、放電パターンが燃焼特性に及ぼす影響を評価した結果(図 4-5), IMEP 変動率を最小にする最適な放電パターンが存在する結果を示した(図 4-6)。今後、放電電流と放電時間各々の効果の切り分け、および、放電電圧波形から推定されるサイクル毎の放電ギャップ部のガス流速を含めた解析を期待したい。(白石)

SI 機関(2)の 4 件の講演のうち、2 件は Dedicated EGR に関する研究で、残りの 2 件は火炎伝播に関する研究であった。そのなかから、九州大学の永野ら⁴⁻³⁾による「定容器による希薄・EGR 条件下におけるイソオクタン予混合乱流火炎の火炎伝播特性に及ぼす乱れのスケールの影響の検討」を紹介する。

永野らは、希薄・EGR 条件下において、乱れのスケールが乱流燃焼特性に及ぼす影響を明らかにするため、定容燃焼容器内に乱流特性が異なる乱流場を生成し、容器中心より外側に伝播する火炎の様子をシュリーレン像撮影および容器内圧力の計測を行っている。乱流場は、同一の乱れ強さ u' において乱れの空間積分スケール L_r が異なっている。各乱れ強さにおける火炎伝播確率 P_c と燃焼期間をそれぞれ図 4-7 と図 4-8 に示す。乱れ強さが大きい場合、乱れのスケールが小さい条件(Case S)の方が火炎伝播確率は小さくなっている。一方、乱れ

Table 4-1 燃焼解析試験諸元 1

Engine type	4-cylinder 4-cylinder
Bore*Stroke	$\phi 80.5\text{mm} \times 88.3\text{mm}$
Displacement volume	1.797cc
Compression ratio	13.0
Tumble ratio	0.8
Valvetrain system	DOHC 4valve
EGR System	Cooled EGR
Fuel Supply System	Port Injectors
Fuel	Regular gasoline(RO91)

Table 4-2 燃焼解析試験諸元 2

Conditions	Low load
Engine speed	1600[rpm]
IMEP	390[kPa]/A/F=14.3(MBT)
Fuel Flow (const.)	3.2 [L/h]
Air fuel ratio	14.3 \rightarrow lean limit
Intake temp	300 [K]
FVC timing	124 [deg BTDC]
Cooling water temp	360 [K]
Lab. oil temp	360 [K]

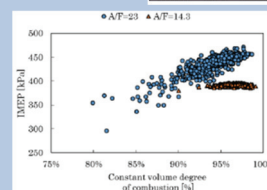


Figure 4-1 IMEP 変動率の増大

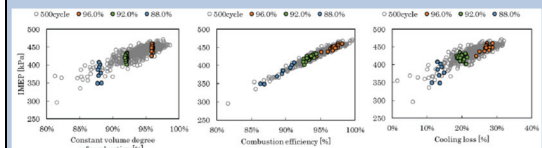


Figure 4-2 燃焼効率の変動

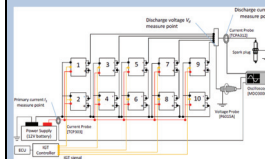


Figure 4-3 強力火花放電装置

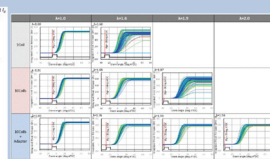


Figure 4-4 リーン燃焼限界の拡大

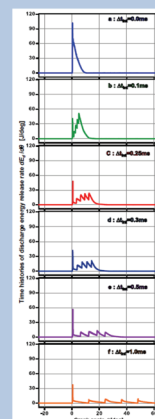


Figure 4-5 放電パターンが燃焼特性に及ぼす影響

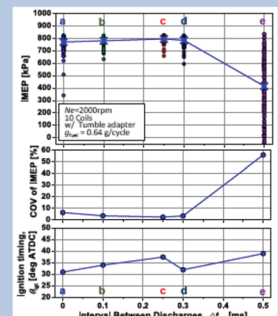


Figure 4-6 IMEP 変動率を最小にする最適な放電パターン

強さが小さい場合、Case S の方が燃焼期間は短くなっている。図 4-9 に乱れ強さが小さい場合のシュリーレン画像を示す。Case S では、火炎伝播初期から微細なしわが火炎面に形成され、火炎面積の増大による乱流燃焼速度の増大により、燃焼期間が短くなることを明らかにしている。(片岡)

SI 機関(3)で石井(京都大学)⁴⁻⁴⁾らは、「火花点火燃焼における点火栓近傍の流動が初期火炎形成に及ぼす影響」と題して講演を行った。本研究は、点火栓近傍の乱流特性と燃焼速度の関係を明らかにすることを目的とし、急速圧縮膨張装置(RCEM)における火花点火燃焼過程を対象に粒子画像流速測定法(PIV)による筒内流動の計測と燃焼実験を行っている。図 4-10 に RCEM の燃焼室の概略および可視化領域を示す。PIV 計測の結果、図 4-11 に示すように、筒内は数 mm 程度のスケールをもったランダムな流動が支配的となっていることが分かる。燃焼状況の異なる 3 条件について、点火時期における点火栓近傍の流動特性を調査し、流動と燃焼過程の関連について検討を行っている。図 4-12 に筒内圧力 p 、熱発生率 $dQ/d\theta$ および燃焼率 MFB のクランク角 θ 経過を示し、図 4-13 に点火栓を中心とする半径 r に対する平均速度ベクトルの大きさ u_a および変動ベクトルの大きさ u_s の変化を示す。燃焼速度の速いものほど $r=5\text{mm}$ 付近の変動ベクトルの大きさ u_s の値が大きくなるという結果が得られている。これらの結果から点火線近傍のおおよそ 5~6mm 程度の範囲における局所的な速度変動が大きいほど燃焼速度が大きくなり、燃焼期間の変動はこの局所変動速度のサイクルごとの変動に起因していることが述べられている。(永野)

4.2 点火

本セッションでは、火花点火機関に用いられる点火技術、CFD 技術、可視化結果などが報告されていた。ここでは、可視化エンジンに取り付けた点火計測用渦流室における高気流高希釈条件での点火過程の可視化結果に関して紹介する。

「高気流・高希釈条件での点火現象の詳細解析」と題し、佐山(豊田中央研究所)ら⁴⁻⁵⁾により火花放電ならびに火炎挙動の可視化が行われている。著者らは社内に所有するディーゼル用 3 方向可視化エンジンのトップビュー窓部に点火計測用渦流室を装着した(図 4-14)。この渦流室は、Herweg らが用いたディスク型の側室⁴⁻⁶⁾を参考に作成している。連絡孔の流路幅は主室に近づくにつれ狭くなっており、気流を増速させる効果を期待している。今回は報告されていなかったが、将来的には LIF や PIV などのレーザ計測が適用可能な構造となっている。質疑応答でも議論になったが、この連絡孔があることで、点火時の電極間流速は 65m/s を実現しているが、乱れはそれほど大きくないことを理解した上で可視化結果をみる必要がある。点火装置への供給電圧は 12V で、コイル充電時間とコイル数を変えて点火エネルギー 65 mJ, 100 mJ, 200 mJ を設定している。点火回路 2 次側の電流電圧波形計測には電流プローブ(Tektronix P6015)、電圧プローブ(Tektronix TCP303)を用い、サンプルレートは 1 MHz として実施している。可視化と火花放電電流・電圧を同時計測することで非常に興味深いデータを提示することが可能になっている。

原稿中では、渦流室内の燃焼の全体像も示しているのので、参照されたい。ここでは、本研究の主眼である点火過程の詳細解析に関して言及する。火花放電ならびに燃焼火炎の可視化と火花放電電流・電圧を同時計測していることで、放電路の短絡現象、放電吹き消えと再放電、などの発生タイミングと電流・電圧波形との関係を図 4-15 で示している。また、図 4-16 に点火エネルギー毎の短絡と放電吹き消え・再放電の発生タイミングを示している。ここで重要なことは、「放電路の短絡と放電の吹き消え・再放電の識別は放電路の長さが短縮された直前に電流値の急激な低下(放電吹き消え)がみられるか否かで行った」ことにある。火花放電の吹き消えと再放電に加え、短絡現象を加えることで、火花放電挙動を精緻に整理している。特に、「高気流条件では放電路の伸張中に放電路の短絡と再放電が起きる。放電期間前半では放電路の短絡が支配的で放電後半では再放電が支配的となる。点火エネルギーが減少するにつれて再放電が開始するタイミングは早期化し、点火エネルギーによっては絶縁破壊後すぐに放電吹き消え・再放電を繰り返す」現象は火花放電挙動を理解する上で非常に重要な知見である。

また著者らは、燃焼火炎の可視化結果において、点火プラグ背後で火炎核が保炎されたサイクルと保炎されていないサイクルを比較している。図 4-17 ならびに図 4-18 を用いて火花放電挙動と保炎の関係性を「電極への保炎の有無は初期燃焼期間とサイクル間の燃焼変動の大きさに強い影響を及ぼす」として説明している。著者らが説明している「高希釈化が進むと放電初

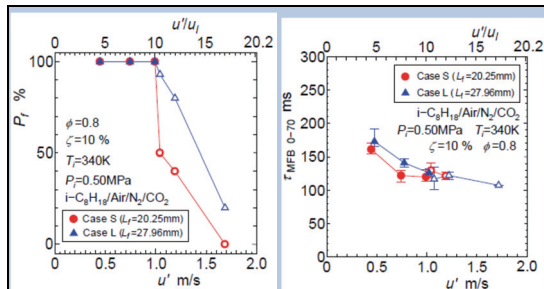


Figure 4-7 火炎伝播率 Pf

Figure 4-8 燃焼期間

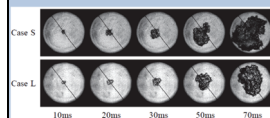


Figure 4-9 乱れ強さが小さい場合のシュリーレン画像

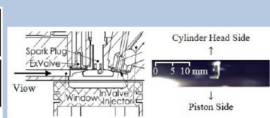


Figure 4-10 RCEM の燃焼室の概略と可視化領域

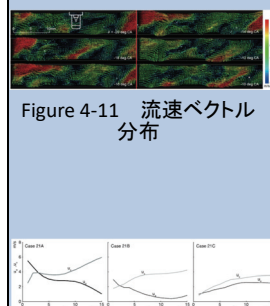


Figure 4-11 流速ベクトル分布

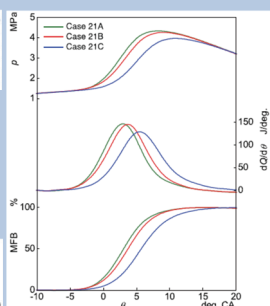


Figure 4-12 熱発生立ち上がり時期と燃焼期間の例

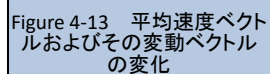


Figure 4-13 平均速度ベクトルおよびその変動ベクトルの変化

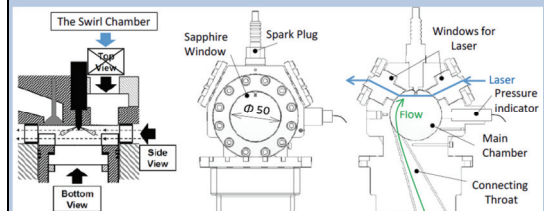


Figure 4-14 点火計測用渦流室

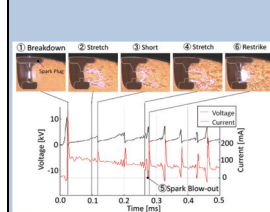


Figure 4-15 火花放電の可視化と火花放電電流・電圧との関係

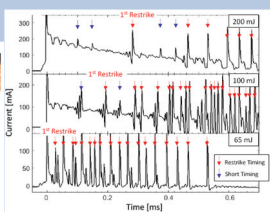


Figure 4-16 点火エネルギーと火花放電電流との関係

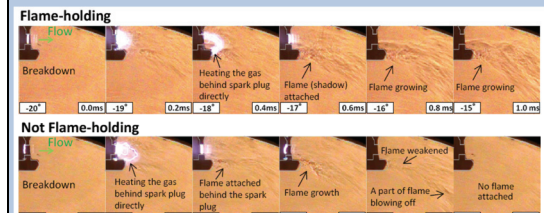


Figure 4-17 火花放電ならびに初期火炎核のシャドウグラフ撮影結果(A/F20)

期に火炎が電極背面に一時的に付着するが、付着した火炎の大部分は放電期間後半に下流に流されるため保炎に至らなくなる」という現象は高気流・高希釈条件での点火現象を理解する上で有益な知見である。ただし、前述しているように連絡孔があることで流速は高いが乱れは大きくなっていないことを理解しておく必要がある。実際の希薄燃焼エンジンでは、流速が高いことに加え、乱れも大きくなることから、整流板の設置等で乱れの影響を調査する研究への発展を期待したい。(河原)

【参考文献】

- 4-1) 楯村 俊希, 窪山 達也, 森吉 泰生, 金子 誠, 山田 敏生: リーンバーンガソリン機関における燃焼のサイクル変動解析, 第 27 回内燃機関シンポジウム講演論文集, 講演番号 5 (2016)
- 4-2) 鄭 棟元, 佐々木 耕作, 菅田 健志, 横森 剛, 飯田 訓正: 火花放電のパターンがリーンバーン SI エンジンにおける燃焼のサイクル変動に及ぼす影響, 第 27 回内燃機関シンポジウム講演論文集, 講演番号 6 (2016)
- 4-3) 永野幸秀, 森田理喜, 福田洋介, 野小生晃, 北川敏明, 定容容器による希薄・EGR 条件下におけるイソオクタン予混合乱流火炎の火炎伝播特性に及ぼす乱れのスケールの影響の検討, 第 27 回内燃機関シンポジウム講演論文集, 講演番号 11 (2016)
- 4-4) 石井 大, 川那辺 洋, 塩路 昌宏: 火花点火燃焼における点火栓近傍の流動が初期火炎形成に及ぼす影響, 第 27 回内燃機関シンポジウム講演論文集, 講演番号 14 (2016)
- 4-5) 佐山 勝悟, 木下雅夫, 政所 良行, 冬頭 孝之: 高気流・高希釈条件での点火現象の詳細解析, 第 27 回内燃機関シンポジウム, 講演番号 53
- 4-6) Herweg, R., and Maly, R. R. "A Fundamental Model for Flame Kernel Formation in S.I. Engines", SAE Technical Paper (1992), No. 922243.

5 トライボロジー

5.1 潤滑

潤滑(3)では 3 件の講演が行われ、その中から 1 件の講演について紹介する。山本(東海大学)ら⁵⁻¹⁾は、「ボア変形を有するシリンダとピストンリングの動的接触解析」と題して講演を行った。本研究は、ボア変形を有するシリンダに対するピストンリングの動的追従性を調査することを目的として、ペナルティ法による動的接触解析を行う方法について検討されたものである。解析モデルの概要は図 5-1 に示すものであり、有限要素法による解析を行い、ピストンリングはグリーン歪により幾何学的非線形性を考慮した 8 節点のアイソパラメトリック体要素を用いてモデル化、ピストンリングとシリンダライナおよびリング溝との接触にはペナルティ法による接触解析が適用されている。ピストンリングの鉛直方向の動的挙動は、図 5-2 で示す条件で表現されており、図 5-3 の条件を元に計算される。静的接触解析ではピストンリングの呼び径を 40.25mm とし、非接触が発生する時のボア変形の振幅について報告されている予測式と比較すると、図 5-4 に示すようにいずれの予測式よりも小さな値となっている。動的接触解析ではピストンリングの呼び径を 43mm とし、クランク回転数を 3000rpm、5 サイクルの解析では、図 5-5 に示すように変形はリングの半径方向に任意に拡大している。この解析では、ガス背圧や接触面の摩擦については考慮されておらず、これらを考慮した解析方法についての報告が期待される。(高山)

5.2 摩擦特性

ピストン、ピストンリング、軸受といった摺動部品に適切なテクスチャリング加工を施すことにより、摩擦力の低減を可能とした事例が数多く報告されている。しかしテクスチャリング加工には高いコストを要するものが多く、その削減が課題である。

宇佐美ら⁵⁻²⁾は「微細断続切削による表面テクスチャが付与されたエンジン部材の摩擦特性」で、機械的な切削加工により摺動面にマイクロディンプルを付与する手法を紹介している。図 5-6 に示すように円錐形状を有する工具の一部に円弧状の刃先を設けることで、切削加工によるテクスチャリングを可能としている。これにより加工された表面の様子を図 5-7 に示す。これはピストン材料に一般的に用いられる AC8A に加工したもので、この事例では、開口径は 250 μm 、深さは 5 μm となっている。ボールオンディスク型の摩擦試験装置で測定された摩擦

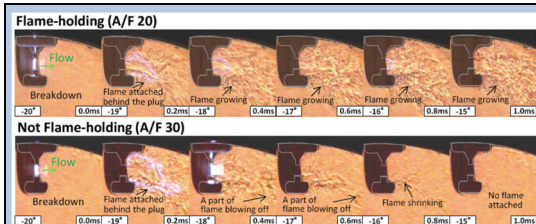


Figure 4-18 火花放電ならびに初期火炎核のシャドウグラフ撮影結果

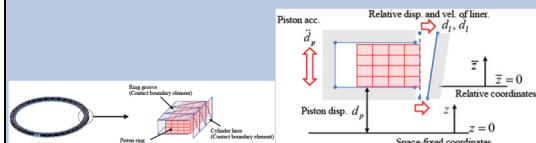


Figure 5-1 解析モデルの概要

Figure 5-2 ピストンリングの鉛直方向の動的挙動

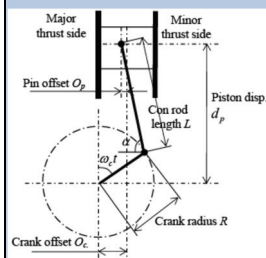


Figure 5-3 ピストンリング動的挙動の条件

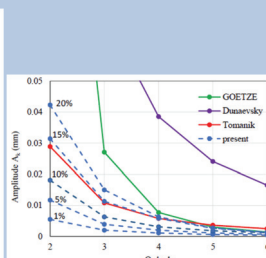


Figure 5-4 ボア変形の振幅の予測式との比較

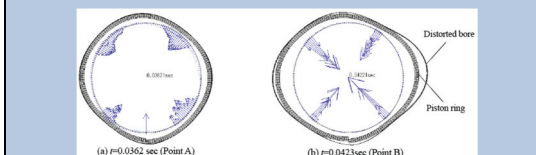


Figure 5-5 リングの半径方向の変形拡大

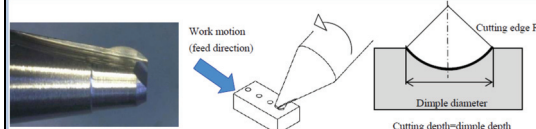


Figure 5-6 テクスチャリング加工用切削工具

係数を図 5-8 に示す。この加工により施されたディンプルは、摩擦係数低減に効果的であることが示されている。

この手法を用いれば、例えばピストンであれば、スカートプロフィール加工の一貫としてテクスチャリングが可能であり、コスト面でも実現可能性の高い摩擦低減方策として考えることができると思われる。(伊東)

【参考文献】

- 5-1) 山本 憲司, 落合 成行: ポア変形を有するシリンダとピストンリングの動的接触解析, 第 27 回内燃機関シンポジウム, 講演番号 41 (2016)
- 5-2) 宇佐美 初彦, 佐藤 寿樹, 神田 保之, 西尾 悟, 本田 知己, 三原 雄司: 微細断続切削による表面テクスチャが付与されたエンジン部材の摩擦特性, 第 27 回内燃機関シンポジウム, 講演番号 34 (2016)

6 計測・診断

神戸大学の中野⁶⁻¹⁾らは「多噴孔ノズルのキャビテーションとステレオ PIV」と題して、拡大ノズルのサック内部においてストリングキャビテーションが形成される時の流速分布をステレオ PIV で計測した結果を報告した。アクリル製の拡大ノズルと屈折率を等しくしたヨウ化ナトリウム水溶液を用い、液中に多量に混在するマイクロバブル(20-90 μm)をトレーサ粒子とした。図 6-1 にストリングキャビテーションが生じるノズルニードル低リフト時の速度ベクトル分布計測結果を、図 6-2 には低リフト時と高リフト時の z 方向速度分布を示す。これらの速度分布により、ストリングキャビテーションが発生している周りに顕著な渦流れが形成されていることが分かる。3 噴孔ノズルでのストリングキャビテーションについては他にも実ノズル内での可視化例や X 線計測での可視化例が報告されているが、ストリングキャビテーションの周囲の三次元流速分布を定量計測した事例はなく、ストリングキャビテーションの発生機構を解明するのに有効な計測結果と思われる。今後の進展が期待される。(冬頭)

【参考文献】

- 6-1) 中野裕晃, Pratama Raditya Hendra, Prasetya Rubby, 三輪誠, 松原佳之, 宋明良: 多噴孔ノズルのキャビテーションとステレオ PIV, 第 27 回内燃機関シンポジウム前刷集, 論文番号 83 (2016)

7 代替燃料

帝京大学 森ら⁷⁻¹⁾は軽油と廃食油ベースのバイオディーゼル燃料(BDF)を供試燃料とし、排出ガス、粒子個数濃度(PN)並びに、粒子径分布に及ぼす DPF の材質の影響について詳細に検討している。供試 DPF の材質は、SiC とコージライトの 2 種類を選定し、気孔率と平均気孔率は SiC よりコージライトの方が大きい(表 7-1)。また、酸化触媒(DOC)を DPF と組み合わせた後処理装置により、DOC が PN や粒径分布に及ぼす影響についても詳細に調査している。本研究から得られた知見は以下のとおりである。

* 気孔率と平均気孔率の大きなコージライト-DPF は SiC-DPF と比べ PN 低減率が劣る。また、コージライト-DPF に DOC を装着すると DPF 単独の場合と比べると PN が軽油で 2.8 倍、BDF で 22 倍も増大する(図 7-1)。

* 気孔率が大きい DPF では DOC によるナノ粒子生成の影響を大きく受け、Tail Pipe からの PN が増大する。またその増大傾向は軽油より BDF の方が大きい(図 7-2)。

本報告内で指摘されているが、上記の知見から DPF の材質(仕様)に合わせた DOC との最適設計が必要であることが示唆され、今後の後処理装置の設計指針に役立つ知見である。さらに、DOC 装着による PN が増大する理由について、そのメカニズムの解明は学術的な観点からも興味深く今後の研究の進展に期待したい。(座間)

【参考文献】

- 7-1) 森 一俊, 川瀬 順, 鈴木 隆一, 反町 浩二, 江口 邦久: ディーゼルエンジンに装着される DPF の材質が排ガス、スートおよびナノ粒子に及ぼす影響研究, 第 27 回内燃機関シンポジウム前刷集, 論文番号 97 (2016)

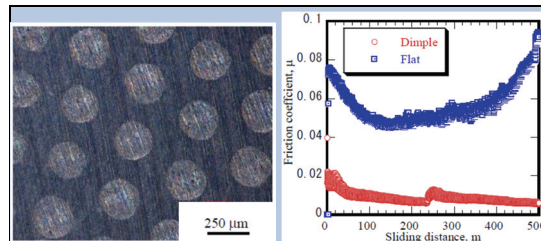


Figure 5-7 切削によりテクスチャリングが施された表面 Figure 5-8 テクスチャリング(ディンプル)による摩擦係数低減効果

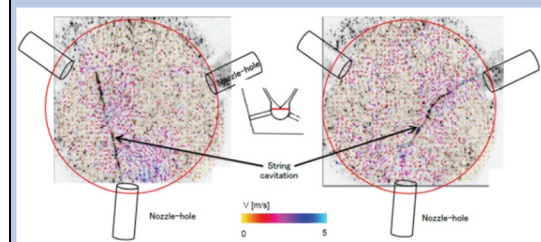


Figure 6-1 低リフト時の流速ベクトル分布

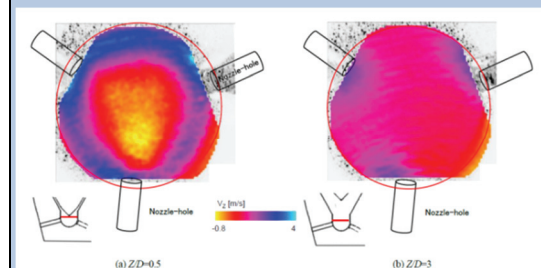


Figure 6-2 z 方向流速分布

Table 7-1 SiC とコージライトの気孔率と平均気孔率

Code(Manufacture)	SD021(IBIDEN)	C-611(NGK)
Porosity(%)	42	59
MPS(μm)	11	18
Structure(mil/cpsi)	16/200	12/300
Wall thickness(mm)	0.4	0.3
Density(kg/L)	0.83	—

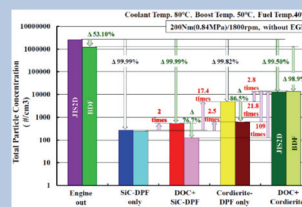


Figure 7-1 コージライト-DPF と SiC-DPF の PN 低減率

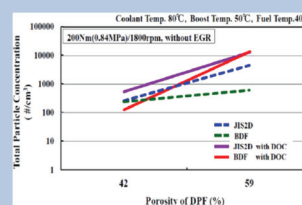


Figure 7-2 Tail Pipe からの PN 増大率