

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 9 No. 4 2019

JSAE エンジンレビュー

Report : 自動車技術会 2018 年秋季大会

Report : 第 29 回内燃機関シンポジウム

コラム : 平成時代のエンジン進展を振り返って



臨光館/同志社大学提供



公益社団法人 **自動車技術会**

- コラム：平成時代のエンジン進展を振り返って 1
Looking back on the engine development during the Heisei era
 小池 誠（編集委員，豊田中央研究所）
 Makoto KOIKE (TOYOTA CENTRAL R&D LABS., INC.)
- Report：自動車技術会 2018 年秋季大会 3
Report of the 2018 JSAE Annual Congress (Autumn)
 小池 誠，清水 健一，細谷 満，野口 勝三（編集委員）
- Report：第 29 回内燃機関シンポジウム 21
Report of the 2018 Internal Combustion Engine Symposium
 下田 正敏，野口 勝三（編集委員）
 河合 英直（交通安全環境研究所），川野 大輔（大阪産業大学），河原 伸幸（岡山大学），
 島田 敦史（日立製作所），辻村 拓（産業技術総合研究所），林 潤（京都大学），
 永岡 真（豊田中央研究所），中野 博紀（三菱重工業エンジン&ターボチャージャ）

■ JSAE エンジンレビュー編集委員会
 委員長：飯田 訓正（慶應義塾大学）
 副委員長：村中 重夫（元・日産自動車）
 幹事：飯島 晃良（日本大学）
 委員：遠藤 浩之（三菱重工業エンジン&ターボチャージャ）
 大西 浩二（日立オートモティブシステムズ）
 菊池 勉（日産自動車）
 小池 誠（豊田中央研究所）
 小酒 英範（東京工業大学）
 清水 健一（元・産業技術総合研究所）
 下田 正敏（元・日野自動車）
 鈴木 央一（自動車技術総合機構）
 西川 雅浩（堀場製作所）
 野口 勝三（本田技術研究所）
 平井 洋（日本自動車研究所）
 細谷 満（日野自動車）
 山崎 敏司（編集）
 渡邊 学（JXTG エネルギー）

発行所：公益社団法人 自動車技術会
 発行日：2019 年 7 月 31 日
 発行人：大下守人（アイシン精機）
 〒102-0076 東京都千代田区五番町 10-2
 電話：03-3262-8211

ENGINE REVIEW
 SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN
 Vol. 9 No. 4 2019

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 9 No. 4 2019

●コラム

平成時代のエンジン進展を振り返って

Looking back on the engine development during the Heisei era



小池 誠
Makoto KOIKE

編集委員
株式会社 豊田中央研究所
TOYOTA CENTRAL R&D LABS., INC.

「平成」から新しい年号「令和」に移って早や3カ月。私見で恐縮であるが、「令和」最初のエンジンレビュー発刊に際して、平成時代（1989～2019）の自動車用エンジンについて振り返ってみたい。

まず、ディーゼル。乗用車ディーゼルは平成の間に様変わりした。乗用車に過給直噴が使われ始めたのは平成が始まるころであったが¹⁾、1990年代半ばにコモンレール式噴射系²⁾が実用化されると急速に普及し、今や自動車用ディーゼルエンジンのすべてが平成以前のIDI方式からコモンレール式噴射系を搭載した過給直噴エンジンに代わったと言っても過言ではない。

ディーゼルの弱点と言われてきた窒素酸化物と煤のエミッション問題に対しては、後処理システムによる対策が普及した。NOx 浄化には尿素SCR (Selective Catalytic Reduction)、煤・PM (Particulate Matter) 捕集にはDPF (Diesel Particulate Filter) が広く使われるようになった。2015年にディーゼルゲート事件³⁾が起き、社会の信頼を損なったのは誠に残念であるが、この事件を契機に一気に進展したRDE (Real Driving Emission) 規制⁴⁾に対しても、基本的には上記の技術で対応可能と考えられている。

なお、コモンレール、尿素SCRシステムを乗用車に先駆けて実用化したのは商用車である⁵⁻⁶⁾。DPF採用以降、テールパイプから黒煙を排出するトラックは見なくなった。NOxについても、EU-VI対応の大型トラックの実走行NOx (g/km) はEU-VI対応車両に対して、1/20以下まで低減されていることがICCT (International Council on Clean Transportation) から報告されている⁷⁾。ご存知の方も多いと思うが、コモンレールおよびコモンレールを搭載したエンジンシステム、尿素SCR搭載車両を世界に先駆けて実用化したのは我が国である。その他にもPMとNOxを同時低減するDPNRの実用化⁸⁾など、世界を牽引する技術を開発した。

次に、ガソリンエンジン。1996年に日本で直噴ガソリン⁹⁾が実用化されて以降、各自動車メーカーが次々に独自の直噴ガソリンエンジンを実用化した。当初期待された成層希薄燃焼主体のシステムは少なくなったが、自由度の高い混合気形成やノック抑制効果を活かし、今ではガソリンエンジンの高圧縮比化や過給ダウンサイジングを牽引する技術として定着した。自然吸気式の圧縮比は2~3高くなり、圧縮比14のエンジンも現れた¹⁰⁾。

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 9 No. 4 2019

元々自然吸気式が多いガソリンエンジンは、過給直噴技術によってダウンサイジングが大きく進展した。6気筒の4気筒化など、気筒数の減少と合わせて実用燃費が改善し、過給は高出力アイテムというより低燃費アイテムの一つになったのも平成の間に起きた変化と言える。

1997年にはハイブリッドシステム(HV)¹¹⁾が日本で実用化された。エンジンの使われ方が変わり、熱効率に重点をおいたHV用エンジンが開発された。自然吸気ながらアトキンソンサイクルを積極的に使い、40%を超える熱効率を実現したエンジン¹²⁾も登場した。さらに、最近では可変圧縮比エンジン¹³⁾が実用化された。圧縮比の可変幅は8~14で、マルチリンク機構により無段階に変え得る特徴がある。

平成31年間は長いとはいえ、振り返ると多くの技術を世の中に送り出してきた。無論、それ以前に行われた多くの試行錯誤・試験研究があってこそその結果であるが、昭和の終わり、筆者が未だ若かりしころ、エンジン技術者が実現したいと考えていたことはかなり実用化されたのではないだろうか。日本が世界に先駆けて実用化してきた技術も多いことを誇りに思いたい。

令和の時代はどうか？ 上記のような進歩を実現してきたと思うが、環境問題およびそれと結びつきの強いエネルギー問題の解決に対する社会の期待は大きく、それに応じて行かねばならない。平成はBEV(Battery Electric Vehicle)、FCV(Fuel Cell Vehicle)も実用化された時代である。これらとエンジンは対比されているが、これからのエンジンのあり様について見直す機会を与えてくれたと考えることもできる。20世紀の初頭にピカソらによって創始されたキュビズムの背景には写真技術の発達があると言われている。現代美術の動向を作り出した彼らは写真にできないことを追及したのである。

【参考文献】

- 1) https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_the_diesel_car
- 2) Miyaki, M, et al., Development of New Electronically Controlled Fuel Injection System ECD-U2 for Diesel Engines, SAE 910252, 1991.
- 3) EPA's notice of violation of the Clean Air Act to Volkswagen, ICCT Press statement, September 18, 2015.
- 4) 特集:「Real Driving Emission (RDE)」, JSAE Engine Review, Vol. 7, No. 5, 2017。
- 5) 足立, ほか3名, 低公害ディーゼルエンジンの開発 - コモンレール式電子制御燃料噴射装置の性能/排ガス/黒煙に及ぼす影響について -, 自動車技術会学術講演前刷集, 9633865, 1996.
- 6) 日本の自動車技術 330 選 尿素 SCR システム (FLENDs) 公益社団法人 自動車技術会
- 7) NO_x emissions from heavy-duty and light-duty diesel vehicles in the EU: Comparison of real-world performance and current type-approval requirements, ICCT Briefing, December, 2016.
- 8) Nakatani, K, Simultaneous PM and NO_x Reduction System for Diesel Engines, SAE 2002-01-0957, 2002.
- 9) 金子, ガソリン筒内直噴エンジン, 山海堂, 2000.
- 10) <https://www.mazda.com/ja/innovation/technology/skyactiv/skyactiv-g/>
- 11) https://gazoo.com/article/car_history/150116_1.html
- 12) <https://global.toyota/jp/powertrain/engine/>
- 13) <https://www.nissan-global.com/JP/NRC/FIELDS/vct-engine02.html>

自動車技術会2018年秋季大会

2018 JSAE Annual Congress (Autumn)

主催：公益社団法人自動車技術会

会期：2018年10月17日（水）～19日（金）

会場：名古屋国際会議場（愛知県）

Report:小池 誠, 清水 健一, 細谷 満, 野口 勝三（編集委員）

Makoto KOIKE, Hidenori KOSAKA, Ken-ichi SHIMIZU, Masatoshi,

Mitsuru HOSOYA, Katsumi NOGUCHI (JSAE ER Editorial Committee)

1 はじめに

自動車技術会「2018 年秋季大会」は、10 月17 日（水）～19 日（金）の3 日間、名古屋国際会議場にて開催された。視聴できた講演の中で注目された発表をレポートする。

2 SI エンジン関連

2.1 SIP 研究成果

SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）は 2018 年度が最終年度であり、その研究成果が自動車技術会秋季大会でも幾つか発表された。その中で、京都市大学から発表された「同軸型薄膜温度センサの熱流束解析手法に関する研究」²⁻¹⁾について紹介する。壁面熱損失低減は熱効率向上に効果があり、多くの研究・開発の対象となっている。熱流束計測はコンセプトの実験実証やシミュレーションの精度検証に使われることが多く、信頼性が高いことが望まれる。この発表は、しばしば利用される規格化された熱電対材料で構成された熱流束センサと計測対象に合わせて材料選定した熱流束センサの違いについて報告したものである。この中で、実際の構造をベースにした数値シミュレーションを行った結果が図 2-1 のようにまとめられている。黒の”Al alloy only”を真値として見ると、計測対象に合わせて材料選定した熱流束センサ”Sensor B”は各行程の熱流束および全行程の積分とも同等の値を示しているが、そうでない”Sensor A”は異なる結果となることが示されている。熱流束計測の際には注意すべき点であり、信頼性の高い結果を得るには燃焼室壁面と同等材料を用いる必要があることを指摘している。発表では異種材で構成されたセンサ”Sensor A”に対しても真値に近づける解析手法が提案されたが、これには界面の熱抵抗など、まだ考慮すべき点が残されている。（小池）

2-1) 石井、三原；同軸型薄膜温度センサの熱流束解析手法に関する研究、20186145

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 9 No. 4 2019

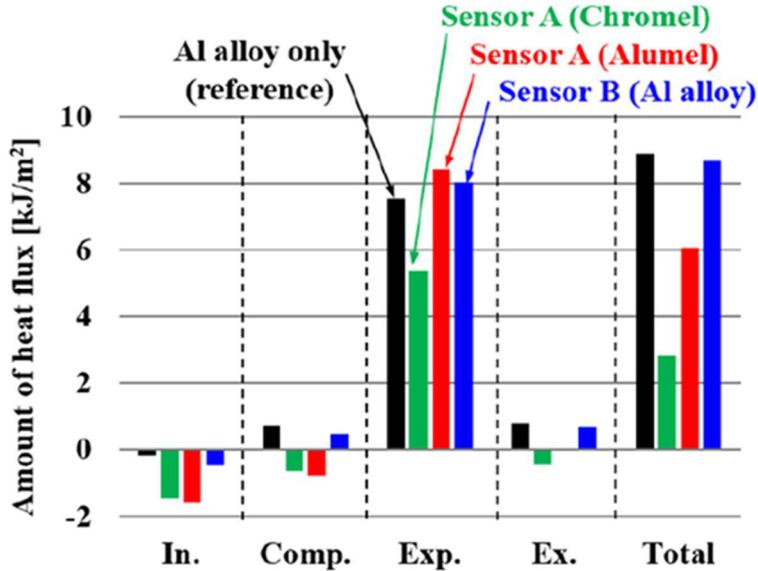


図2-1 熱流束の計算結果

2.2 ガソリンノック

本セッションは、大会の2日目に開催され、ガソリンエンジンの異常燃焼に関する講演が3件行われた。SIPにて三好らによって開発された、ガソリンサロゲート詳細反応機構を用いて計算を行ったもの、低温酸化反応に関するもの等が報告されている。その3講演の中から、ここでは、一つの講演を紹介する。

トヨタの横尾らは、「自動車用火花点火エンジンにおけるノッキング指標に関する研究^{2,2)}」と題して講演を行った。オクタン価の計測方法には、RON (Research Octane Number) と MON (Motor Octane Number) の2種類があり、ガソリンの規格に用いられている。二つの指標と異常燃焼特性との相関は、図2-2に示すとおり、エンジンの運転条件や異常燃焼の種類により異なることが知られている。本研究では、RON と MON が等しい標準燃料 (PRF) と MON が異なる国内ガソリンのサロゲート燃料を用いて、RON と MON の指標の違いを素反応論の視点から説明している。RON の計測条件と MON の計測条件にて詳細反応計算を用いて解析を行い、以下の結果を得ている。RON の計測条件では、低温酸化反応による冷炎が生じることで、表2-1のPRF100はS5Hに対し着火時期が2.3ms早くなったという。MON の計測条件では、RON の計測条件とは違い低温酸化反応による差はあまり生じておらず、その後の着火までの反応速度の影響で、S5Hの着火時期がPRF100に対し4.1ms早くなっている。MON の値が低くなっているS5Hの方が着火しやすい運転条件となっていることが、計算から示されている。そこで、圧力と温度条件に対応するオクタン価の指標を明らかにするために、表2-1の燃料PRF90とS5Rの着火遅れ時間 τ を算出した。

表 2-1 燃料組成

	PRF90	S5R	PRF100	S5H
RON	90	90.8	100	100.2
MON	90	82.9	100	88.8
S (=RON-MON)	0	7.9	0	11.4
Isooctane (C ₈ H ₁₈) [vol.%]	90	29.0	100	31.0
n-heptane (C ₇ H ₁₆) [vol.%]	10	21.5	0	10.0
Methylcyclohexane (C ₇ H ₁₄) [vol.%]	-	5.0	-	5.0
Diisobutylene (C ₈ H ₁₆) [vol.%]	-	14.0	-	14.0
Toluene (C ₇ H ₈) [vol.%]	-	30.5	-	40.0

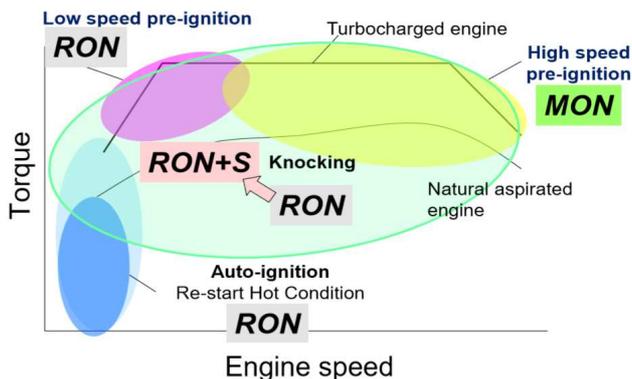


図 2-2 エンジンの異常燃焼とオクタン価の指標

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 9 No. 4 2019

p - T マップ上での比較を図 2-3 に示す。700K から 900K 程度の温度域に着火遅れ時間短縮の傾向が窺われている負の温度領域が見られ、PRF90 の方が S5R に対して大きいことが分かる。算出により得られた PRF90 に対する S5R の着火遅れ時間の差 $\Delta\tau_{\text{RON}}$ を表現する p - T マップ上に、様々なエンジン運転条件で実験により計測した温度圧力履歴を図 2-4 に示す。 $\Delta\tau_{\text{RON}}$ の大きさによって、赤、白、青に色分けを行い、白い領域は PRF90 と S5R の着火遅れ時間がほぼ等しいことを示している。この領域を使用するエンジンのノック指標としては、RON が優れていることを意味している。青い領域は、PRF90 に対して S5R の着火遅れ時間が短く、ノック指標としては MON が優れている。赤い領域は、PRF90 に対して S5R の着火遅れ時間が長くなる領域を示している。この領域では、RON の計測条件よりさらに低温酸化反応の影響を受けていると推定され、ノック指標としては RON や MON だけでは表記できないことを意味している。同じ RON なら低 MON の方がノックに優れているといわれている。過給ダウンサイジングエンジンの結果が、この赤い領域でも同様に推定され、RON に S (Sensitivity, $S = \text{RON} - \text{MON}$) を加味した指標が有効であることを確認出来たと報告があった。RON と MON の二つのノッキング指標に加え S を加味した指標と異常燃焼に関する知見が、素反応論の視点から説明されている。今後、LSPI 等に対する更なる研究に期待したい。(野口)

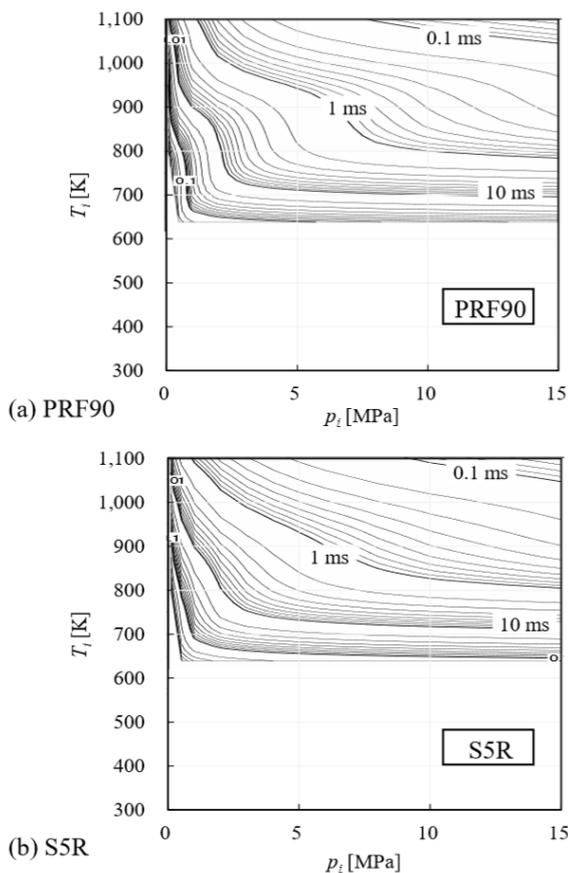


図 2-3 着火遅れ時間 τ p - T マップ

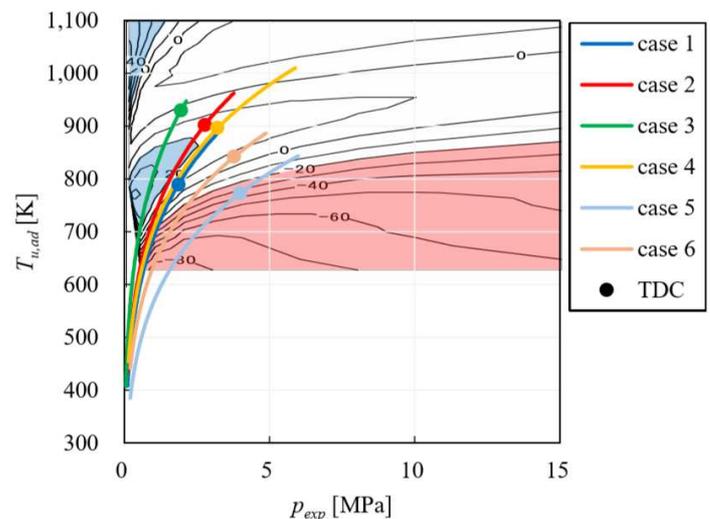


図 2-4 着火遅れ時間の差 $\Delta\tau_{\text{RON}}$ p - T マップ

2-2) 横尾 望, 中田 浩一, 飯田 訓正, 植田 利久: 自動車用火花点火エンジンにおけるノッキング指標に関する研究, 自動車技術会 2018 年秋季大会学術講演会講演予稿集, No. 20186225

2.3 リーンバーン

本セッションは、大会の 2 日目に開催され、リーンバーン SI エンジンの熱効率向上および燃焼解析に関する講演が 3 件行われた。会場はほぼ満席状態となり、活発な質疑応答が行われ関心度の高さが見受けられた。その中から、ここでは、二つの講演を紹介する。

トヨタの竹内らは、「高性能 高効率リーンバーン過給 SI - DI エンジンのコンセプト研究」²⁻³と題して講演を行った。高い熱効率と高性能が高次元で成立するかどうか、市販車開発のデータベースより目標を定め、コンセプト研究を行っている。その目標値は、世界トップレベルの ① 図示熱効率 (SwS) 46 %、性能に関しては、正味平均有効圧 BMEP で ② 低速トルク (LET) 2.3 MPa / 2000 rpm, ③ 最高出力 (RP) 1.9 MPa (103 kW / L 相当) とし、それぞれの λ は

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 9 No. 4 2019

図 2-5 示すとおりである。本研究は、吸排気系やエミッション仮定のため、3.5 L - V6 エンジンを仮想して実施している。エンジン諸元を表 2-2 に示す。2 ステージ過給システム、タンブルフラップによる吸気ポート切り替え、吸気カムには可変リフト&タイミングを用いている（図 2-6）。

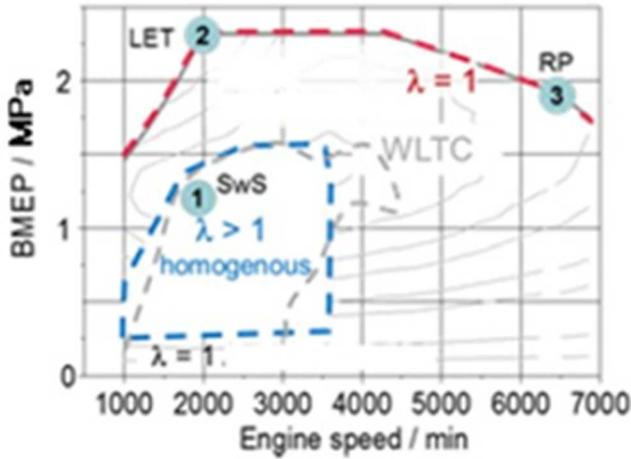


図 2-5 エンジン運転モードと λ (空気過剰率)

表 2-2 エンジン諸元

Bore	85.5 mm
Stroke	101.5 mm
Displacement	583 cm ³ per Cylinder
Compression Ratio	DOE result → 13.5
Valve Systems	4valves DOHC
Intake Cam System	Variable valve Timing & Lift(VVTL)
Exhaust Cam System	Variable Valve Timing (VVT)
Intake Ports	Tumble Flap
Boosting System	2 Stage Turbo System
Ignition System	max 500 mJ
Injection Pressure	50MPa
Fuel	98Ron (EU Premium Gasoline)

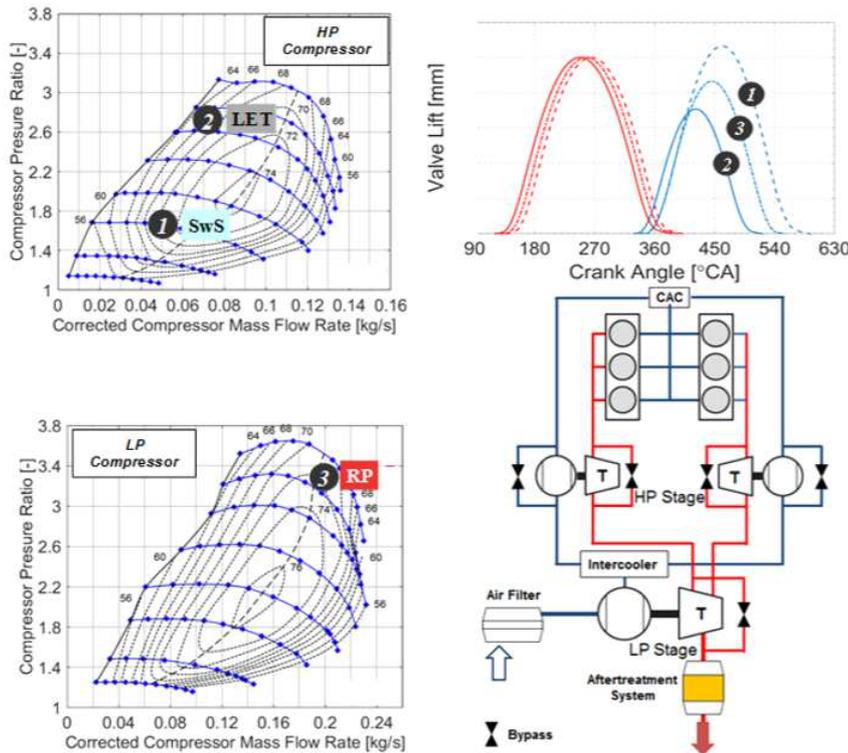


図 2-6 2 ステージ過給システム&カムプロファイルと位相

DOE (Design of Experiment) を用いた計算結果にて最適化を行い、ミラーサイクルを利用することにより、熱効率 46 % 実現のための高圧縮比 13.5 を可能としたとのこと。熱効率最適点 ① (1900 rpm 負荷 1.27 MPa, $\lambda = 1.8$) にて計算では、図示熱効率 46 % を超える結果を得たという。また 0D / 1D 計算で目標達成のために用いた、吸気ポートの流量係数 およびタンブルを実現するために 3D - CFD 計算を実施し、燃焼変動を安定させるために、LES (Large Eddy Simulation) を用いた計算を行っている。そして、実証試験では単気筒エンジンを用いて、シリンダヘッドにエンドスコープを装着し、燃焼の可視化を行っている。試験結果を表 2-3 に示す。② 低速トルクおよび③最高出力に関しては、計算通りに結果を得て目標を満足している。① 熱効率達成については、

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 9 No. 4 2019

$\lambda = 1.8$ のようなリーンでの OD 燃焼モデルの精度が確立されていないことより、実機での最終的な調整も含め熱効率 46 % を実現したと報告があった。図 2-7 に各 λ でのヒートバランスを示す。ストイキ $\lambda = 1.0$ から $\lambda = 1.9$ にリーン燃焼を行うことで、図示熱効率は 39.7 % から 46.0 % へ向上している。ヒートバランスの解析結果にて、 $\lambda = 1.0$ から $\lambda = 1.9$ では、冷却損失が 7.1 % 低減しており、図示熱効率向上の主要因となっていることが分かる。ただし、 $\lambda = 1.0$ では 1.8 % の未燃損失が、 $\lambda = 1.9$ では 4 % 以上存在し、未燃損失改善による取り代が期待できるという。熱効率とエンジンの出力性能は、トレードオフ関係の項目が幾つもある。今回の研究では、タンブルフラップ、過給システム、動弁系システム、A/F 等の可変システムにより、その両者の両立を高い次元で図っている。地球温暖化対応のため、更なる熱効率向上と製品化に期待したい。

表 2-3 試験結果

	Operation Mode	Result	Engine rpm	λ	Boost Pressure MPa(abs.)
①	Sweet Spot (Sws) with High Efficiency	46%	1900rpm	1.90	0.165
②	Low End Torque (LT)	2.3MPa	2000rpm	1.0	0.275
③	Rated Power (RP)	1.9MPa	6400rpm	1.0	0.305

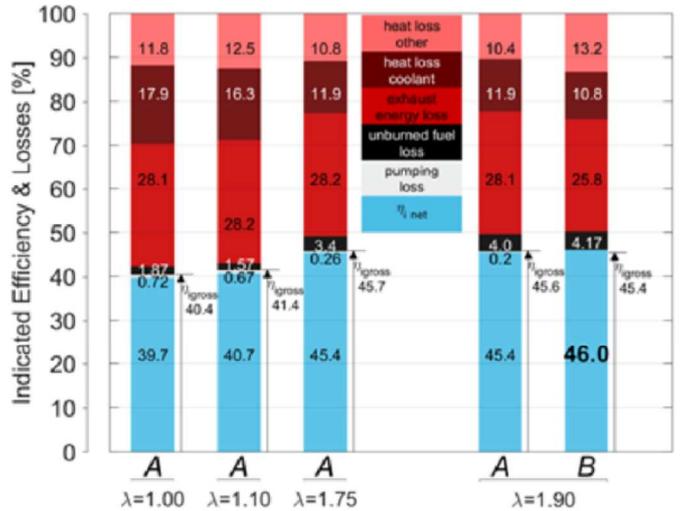


図 2-7 図示熱効率と熱損失

千葉大学の佐藤らは、「混合気の弱成層化によるリーンバーンガソリン燃焼の希薄限界拡大」²⁴⁾と題して講演を行った。著者らは、リーン化に伴うサイクル変動の主要因の一つとして、バルクエンチによる燃焼後半の熱発生変動を考えている。本研究では、そのバルクエンチを低減させるために、混合気の弱成層化燃焼に着目し、リーン限界の拡大および熱効率の向上を目的としている。弱成層化によるサイクル変動抑制のコンセプトを図 2-8 で説明する。通常の成層化燃焼は同図 (a) のように、点火プラグ付近がリッチになるように火炎伝播方向と直交して成層化している。そのため、燃焼後半に火炎がリーン領域に入るとバルクエンチが生じてしまう場合がある。それに対し、本研究の弱成層化燃焼は、同図 (b) のように、火炎伝播方向と平行に成層化し、燃料が濃い領域の既燃ガスが、燃料が薄く火炎伝播速度が小さい領域の火炎面を押すことで、火炎はほぼ左右対称に広がるという。これにより、燃焼後半のバルクエンチを抑制することを狙っているとのこと。図 2-9 に縦方向弱成層化を実現させるために使用した、PFI インジェクタ噴口面を示す。二つの噴口を閉じることで、二つの吸気バルブそれぞれに 6 : 4 の割合で燃料が噴かれる（以下 6 : 4 インジェクタ）。

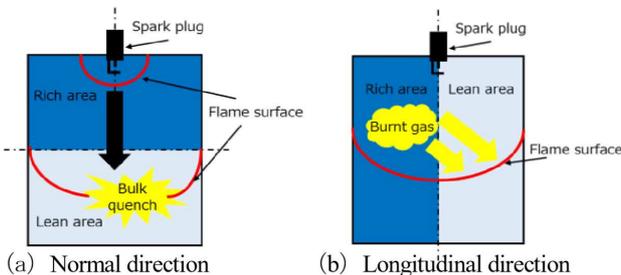


図 2-8 2 種類の混合気成層状態

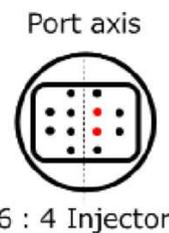


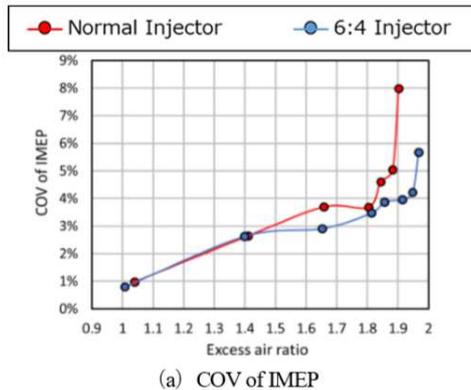
図 2-9 インジェクタ噴口

図 2-10 に空気過剰率に対する、IMEP 変動率および図示熱効率の関係を通常インジェクタと 6 : 4 インジェクタの比較で示す。6 : 4 インジェクタの方がリーン限界が拡大し、図示熱効率の最大値が 0.3point 向上している。また、図 2-11 に示すように、ストイキでは、6 : 4 インジェクタの方が燃焼効率は低いが、リーン化していくと THC が少なく燃焼効率が高くなる。これは、バルクエンチが減少したことを裏付けているという。バルクエンチが発生する燃焼後半の変動解析を行うため、リーン限界付近で両インジェクタの熱発生量比較を行っている。燃焼前半は同じ熱発生パターンであるが、後半の発熱量に差が出るサ

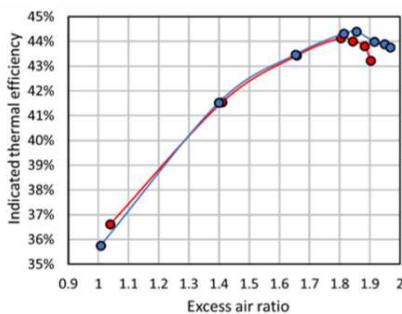
ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 9 No. 4 2019

イクルの変動を比較すると、CA10_{mean}での発熱量65~75JかつCA50_{mean}での発熱量375~385Jのサイクルにて、通常のインジェクタはIMEP変動率2.15%であるのに対し、6:4インジェクタは2.02%と6:4のインジェクタの方が変動が小さい(表2-4)。また燃焼効率に着目すると、燃焼前半が遅いサイクルほど、燃焼効率の変動が大きく、6:4インジェクタによる変動改善効果が大いとい報告があった。これは6:4インジェクタによる縦方向の弱成層化により、仕事に影響を与えるバブルクエンチの発生が抑制されているためと推測している。近年、熱効率向上の技術として、冷却損失の低減研究が盛んに行われている。リーンバーンも比熱比の増大と共に、低温燃焼による冷却損失の低減技術であり、課題として燃焼の不安定や三元触媒のNOx浄化率低下等がある。本研究は、縦方向の混合気弱成層化を活用した、燃焼安定化のための知見となることと思われる。(野口)



(a) COV of IMEP



(b) Indicated thermal efficiency

図 2-10 (a) IMEP 変動率 (b) 図示熱効率

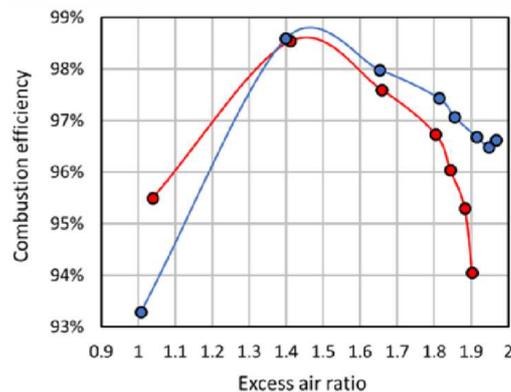


図 2-11 燃焼効率

表 2-4 IMEP, 等容度, 燃焼効率の変動率

		Normal Injector	6:4 Injector
COV _{IMEP} [%]	Total cycles	5.43	4.69
	Cycles of Q@CA10mean=75~85[J] and Q@CA50mean=445~455[J]	1.92	1.92
	Cycles of Q@CA10mean=65~75[J] and Q@CA50mean=375~385[J]	2.15	2.02
	Cycles of Q@CA10mean=25~35[J] and Q@CA50mean=195~205[J]	4.23	3.56
COV _{C.V.D.*} [%]	Total cycles	2.12	2.06
	Cycles of Q@CA10mean=75~85[J] and Q@CA50mean=445~455[J]	0.308	0.230
	Cycles of Q@CA10mean=65~75[J] and Q@CA50mean=375~385[J]	0.453	0.348
	Cycles of Q@CA10mean=25~35[J] and Q@CA50mean=195~205[J]	0.885	0.663
COV _{C.E.*} [%]	Total cycles	1.13	1.01
	Cycles of Q@CA10mean=75~85[J] and Q@CA50mean=445~455[J]	0.318	0.317
	Cycles of Q@CA10mean=65~75[J] and Q@CA50mean=375~385[J]	0.585	0.505
	Cycles of Q@CA10mean=25~35[J] and Q@CA50mean=195~205[J]	1.14	1.03

*C.V.D.=Constant volume degree of combustion

C.E.=Combustion efficiency

2-3) 竹内 一雄, Pawel Luszcz, Philip Adomeit: 高性能、高効率リーンバーン過給SI-DIエンジンのコンセプト研究, 自動車技術会2018年秋季大会学術講演会講演予稿集, No. 20186226

2-4) 佐藤 広直, 森吉 泰生, 窪山 達也, 金子 誠: 混合気の弱成層化によるリーンバーンガソリン燃焼の希薄限界拡大, 自動車技術会2018年秋季大会学術講演会講演予稿集, No. 20186227

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 9 No. 4 2019

3 排出ガス関連

3.1 SCR 触媒

本セッションでは SCR 触媒に関連する報告が 5 件なされた。ここではディーゼル車からの排出ガスが低温時において、更なる NOx 低減に向けた選択的触媒還元 (SCR) の性能改善に着目した取り組みを紹介する。

岡田ら³⁻¹⁾ はディーゼル車の低燃費、クリーン化に向け、エンジンからの排出ガス中の NOx 低減に向けた取り組みを行った。将来に向け、ディーゼル車の更なる低燃費化は重要課題である。燃費改善に向けディーゼルエンジンの効率改善が図られると排気温度が低下することから、低温で NOx を効率良く無害化する必要がある。また、低速走行でディーゼルエンジンが低負荷運転時において排気温度は低く、SCR 触媒による NOx 低減が困難である。この課題に着目した取り組みである。

ディーゼルエンジンからの NOx および PM (パーティキュレート物質：粒子状物質) を低減する排気システムを図 3-1 に示す。DOC (酸化触媒) および PM フィルタで PM を低減し、後流側の SCR 触媒で尿素水を還元剤として選択還元を行うことで NOx を低減するものである。低温では尿素水のアンモニアへの加水分解が律速となって尿素水を噴射できないため NOx が処理できない。そこで、尿素を事前にアンモニアに加水分解する改質器の検討を行った。改良型の改質器の外観を図 3-2 に示す。グロープラグを円形に配置し、熱源を密集させた構造になっている。尿素水をグロープラグで加熱し、流路内で加水分解を行うものである。

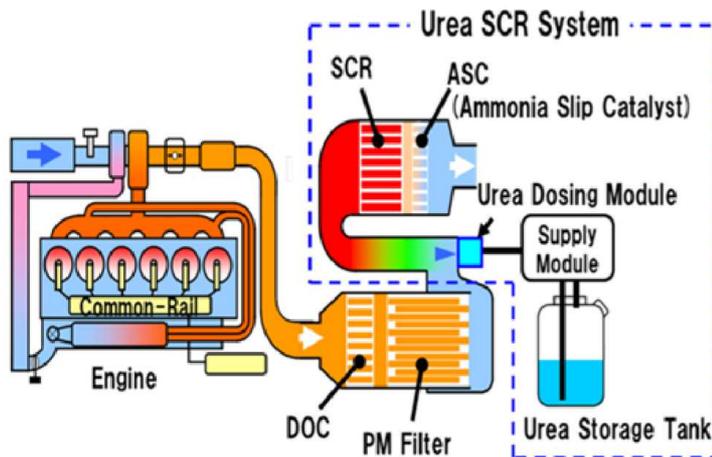


Fig. 3-1 Configuration of Urea-SCR system

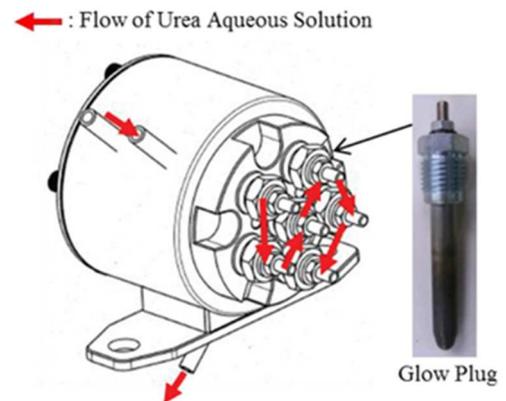


Fig. 3-2 Structure of Second Urea Reformer

エンジン実機において、尿素改質器によるアンモニア生成効率を計測した結果を図 3-3 に示す。改良型の改質器 (Second Urea Reformer) は 90% 以上の尿素のアンモニアへの改質効率を有することを示した。さらに本改質器を使用したエンジン実機で NOx 低減効果の確認試験を行った。図 3-4 に結果を示す。エンジン排気温度 160°C において NOx 低減率が改善された。低温下での NOx 低減は燃費改善及びクリーン化という意味で今後更に重要な技術になるものと考えられる。

今後、尿素改質器により生成したアンモニア以外の生成物質の解析や、信頼性の確認についての報告を期待したい。

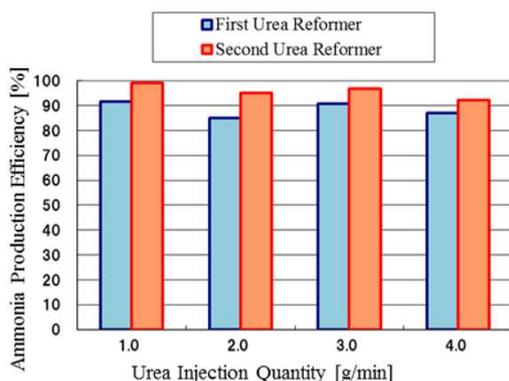


Fig 3-3 Ammonia Production Efficiency Relative to Urea Injection Quantity

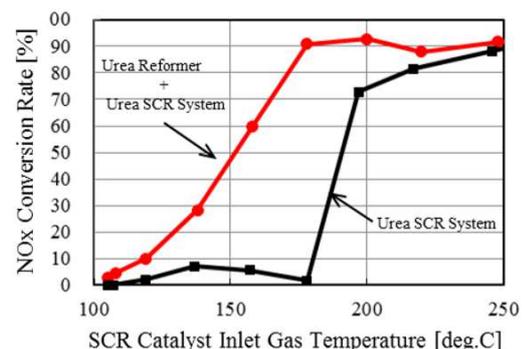


Fig. 3-4 Effect of Urea Reformer on NOx Conversion Rate at Low Temperature

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 9 No. 4 2019

3.2 DPF

本セッションでは DPF（ディーゼルパティキュレートフィルタ）関連の報告が 5 件なされた。ここでは DPF の PM 捕集量の検出の取り組みについて取り上げる。

古山ら³⁻²⁾は狭帯域マイクロ波を用いた DPF 中の PM 堆積量検知技術についての報告を行った。ディーゼルエンジンより排出された PM（パティキュレートマター：粒子状物質）は DPF に捕集される。DPF に捕集された PM は増えていき、ある捕集量になった時点で、昇温による燃焼除去が必要になる。本報告は DPF に捕集された PM の量を 2.4 ~ 2.5 GHz 帯のマイクロ波を用いて、リアルタイムに測定する検討を行った。マイクロ波センサシステムの模式図を図 3-5 に示す。マイクロ波送受信プローブとしてモノポールアンテナを使用している。PM 堆積によるマイクロ波の変化例を図 3-6 に示す。PM の堆積量が大きいほど透過特性（受信強度）が小さくなることを示しており、このスペクトル変化を数値化し、センサの出力としている。さらに、PM の堆積量を推定するため、従来モデル式 (1) を使用していたが、測定精度を高めるため新規 PM 堆積量推定のモデル式 (2) を構築した。

$$\text{モデル式 (1)} : M = \sum_{n,m} c_{nm} \times V^n \times T^m$$

$$\text{モデル式 (2)} : M = -b_1 \{ \log(P(x) - b_2) - \log(b_3 T + b_4) \} \times \exp\left(\frac{b_5}{T}\right)$$

モデル式 (2) は事前にモデル実験を行い、モデルパラメータ $b_1 \sim b_5$ を決定し、受信強度 $P(x)$ と温度 T より、PM 堆積量を推定するものである。検証のためエンジンベンチで従来モデルと新規モデルによる PM 堆積量の比較を行った結果を図 3-7 に示す。実際の PM 堆積量との差は従来モデルでは最大 0.6 g / L であったのに対し、新規モデルでは最大 0.4 g / L となり、誤差は低下し改善された。

PM の堆積量をリアルタイムで把握することは DPF に堆積した PM の燃焼除去のタイミングを決める上で非常に重要であり、PM の燃焼再生インターバルを長くすることで燃費改善にもつながる。更なる精度の改善を期待すると共に、実用化に向けた信頼性についての報告を今後期待したい。

(細谷)

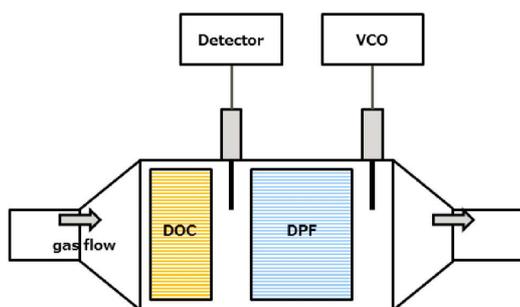


Fig. 3-5 Microwave sensor system

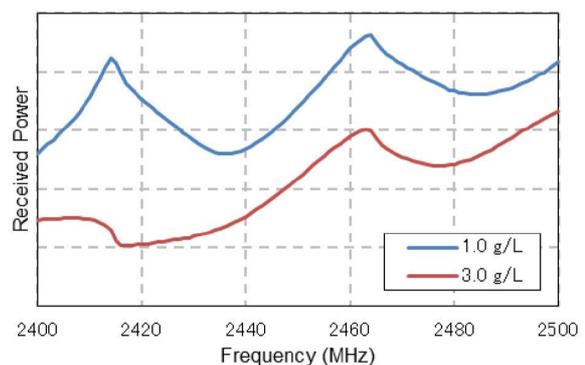


Fig. 3-6 Spectral change depending on PM accumulation

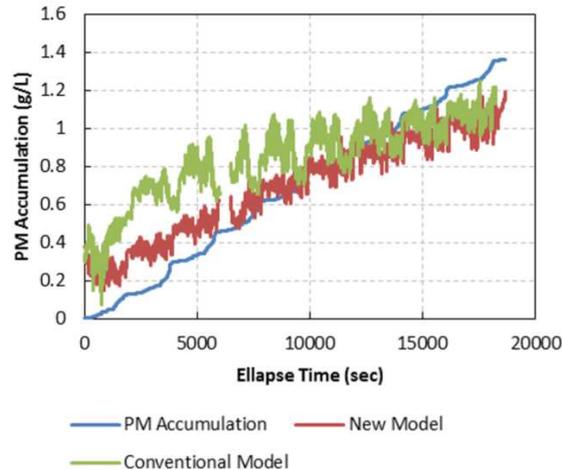


Fig. 3-7 Regression Result of Verification Experiment 2

3-1) 岡田祐一, 磯野成美, 長谷川匠, 井上博史, 平林浩, 佐藤信也: 尿素改質技術の研究, 2018 年秋季大会学術講演会講演予稿集, No. 20186315, 2018

3-2) 古山昌治, 中西輝, 本吉勝貞, 宮原昭一, 今田忠紘, 廣瀬達哉, 渡部慶二: 狭帯域マイクロ波を用いた DPF 中 PM 堆積量検知技術, 2018 年秋季大会学術講演会講演予稿集, No. 20186320, 2018

4 EV・HEV 関連

今大会の電動車両関連セッションは、春季大会の ”xEV ” のようなセッションがなく、HV コントロール、水素・燃料電池 2 セッション、モータ・バッテリーの計 4 セッションにとどまったが、動力伝達系や空調セッションでも関連する発表が行われた。また、テクニカルレビューとしてトヨタ自動車の佐藤広一氏から、同社の駆動用電池の開発の歴史と今後の展望についての紹介があり、多くの立ち見の聴講者が関心の高さであった。内容は会誌で紹介されている。

ここでは既存コンポーネントによる FC バス、市販車のモータ改善、PHEV、BEV 用の暖房に関する発表を紹介し、併せて高効率車の評価に不可欠の 4 輪駆動車用シャシダイナモメータ (2 軸 CHDY) への車両固定法に関する発表の概要を紹介する。

4.1 FC バス

FCV 普及のシナリオとしては、水素インフラへの習熟や利用効率の関係、電動車両内の適材適所の観点から、2000 年代初期には、業務用の大型車両からと言う考え方もあった。現実に乗用車タイプの量産 FCV が入手可能な状況になった今日、実績のあるこれらのコンポーネントを利用した FC バスに関する紹介があった。小川らは、国土交通省大臣認定を取得した 2002 年モデルの FC バスに対して、動力性能と FC の耐久性を大幅に改善した新型 FC バス (表 4-1 に示す新旧の仕様比較からわかる様に、時代は要求から、新型には災害時等を想定した大容量の外部給電機能が追加されている) について紹介した⁴⁻¹⁾。FC は出力が増加するほど損失が増加する傾向があるが、高負荷状態を繰り返すと出力特性そのものが非可逆的に低下する現象がある。FC の触媒の白金は、高電位状態で溶出し、低電位状態で析出する特性があるが、低電位状態で白金表面の酸化皮膜が除去された直後に高電位状態になると白金の溶出が容易になる特性がある。このため、短い周期で高電位/低電位状態を繰り返すと、溶出/析出を繰り返すことで白金粒子径が増大し、反応に預かる有効触媒面積が低下することで反応抵抗が増大し出力が低下する (図 4-1)。

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 9 No. 4 2019

表 4-1 開発FCバスと関連FCバスの仕様の比較

		New FC Bus	2002 model FC Bus
Vehicle	Dimension (L/H/V)	10525/2490/3350mm	10515/2490/3360mm
	Occupant capacity	79 persons	60 persons
	External power supply system	Max. Power 9kW Electric energy 235kWh	No System
Fuel Cell	Type	Polymer electrolyte	Polymer electrolyte
	Output	114kW × 2	90kW × 2
Motor	Maximum output	113kW × 2	80kW × 2
	Maximum torque	335N・m × 2	260N・m × 2
High voltage Battery	Type	Nickel – metal hydride	Nickel – metal hydride
Fuel tank	Number of tanks	10	5
	Storage pressure	70MPa	35MPa

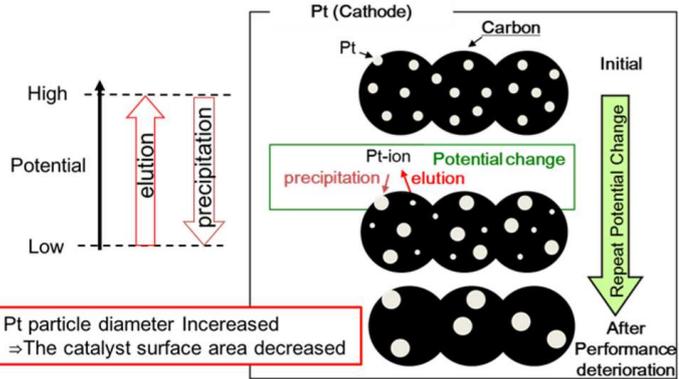


図 4-1 FC の性能低下のメカニズム

路線バスの実走行時の出力の大きさとその頻度分布は、図 4-2 に示すように、乗用車タイプのFCV のそれに比べて高出力状態の出現確率が無視できない。FC の IV 特性は図 4-3 に示すとおりであるので、期待した耐久走行距離走行後の出力低下を抑えるには、FC の下限電圧を乗用車タイプ FCV のそれより高くセットして FC 電圧の変動幅を抑制する必要がある。不足分の出力は、容量を倍にした二次電池で負担する方法をとり、図 4-4 に示すように、二次電池を一基追加した乗用車 FCV システム二基を独立した状態で並列に設置し、モータ出力軸で機械的に接続して必要な出力を実現している。FC と二次電池の負担割合は図 4-5 に示すように 2002 年の FC バスに比べて二次電池の出力負担率が大幅に大きくなっている。長い登坂路走行時や電池温度が高くなった際には電池が負担できない状態が生じるため、そのような状況下では、一時的に下限電圧の設定値を低くセットして FC で出力を賄う。路線バスのモードで走行や登坂路での確認試験の結果、十分実用に耐えることを確認した。ちなみに、一充填走行距離は 200 km を確保できている。

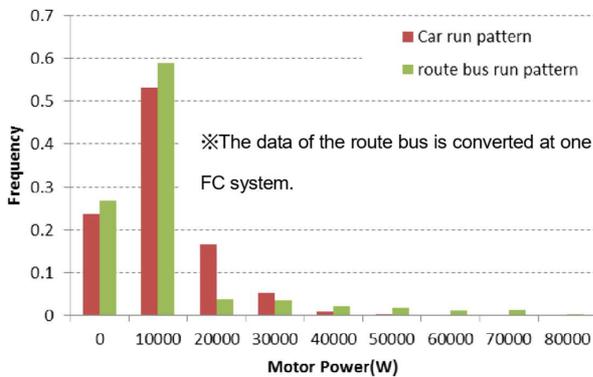


図 4-2 乗用FCV と路線バスの出力分布

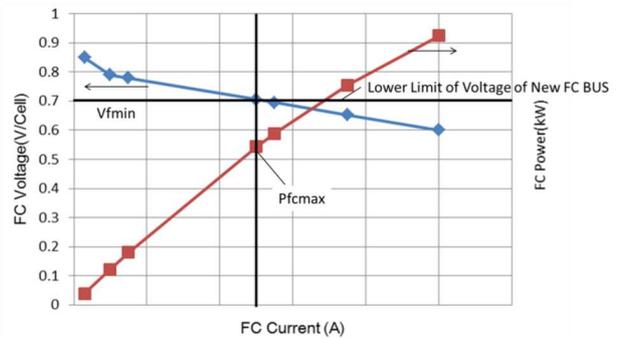


図 4-3 FC の IV 特性と許容される最大出力

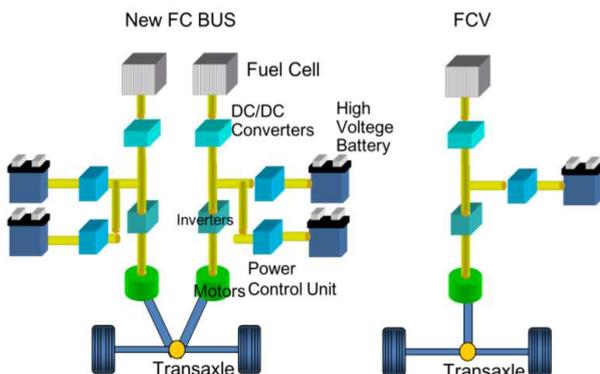


図 4-4 乗用車FCV と開発FCバスのFCシステム

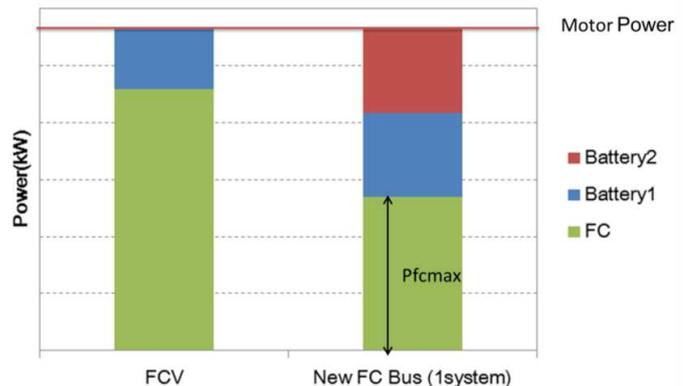


図 4-5 従来型FCバスと開発FCバスの各要素の負担の違い

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 9 No. 4 2019

沢田らは、このFCバスの水素貯蔵システムについて紹介した⁴⁻²⁾。図4-6に示すように、2014年型のFCV用の水素タンク10本を車両の屋根に搭載し、通常の水素インフラで一つの充填口から5本ずつ2系統のタンクに充填し、タンクからは減圧弁とインジェクタを介して各々のFCに供給される。配管が長い上にFCVの5倍の水素をFCVに近い時間で充填する必要があることから、配管の圧力損失と配管曲がり部の抵抗の低減に努め、図4-7に示すとおり、FCVと同等の圧力損失に抑えている。外部充電機能や補機による2系統の水素貯蔵システムのアンバランスを、減圧弁の手前に設けたバイパス路によって修正している(図4-8)。



図4-6 FCバスの水素貯蔵タンクの配置

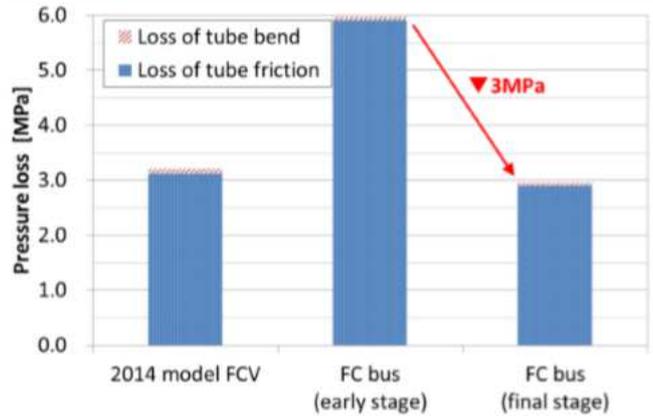


図4-7 水素貯蔵システム内の圧損の比較

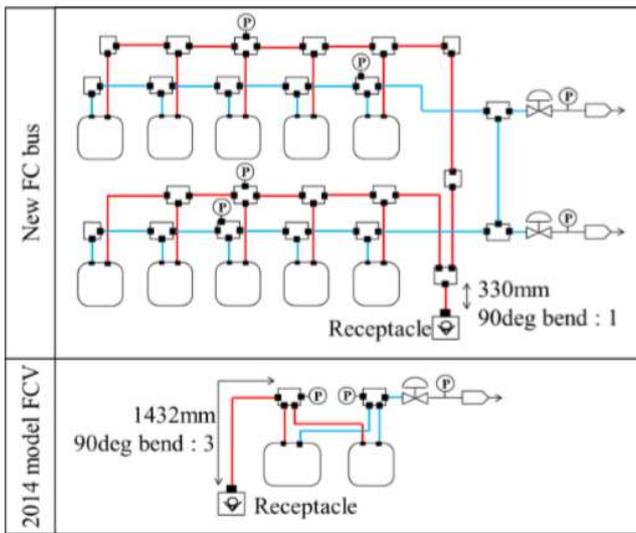


図4-8 水素貯蔵タンクシステムの配管系

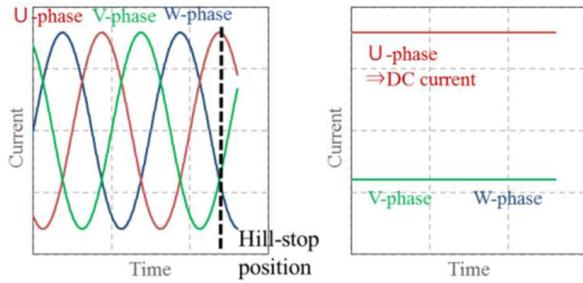
4.2 モーター

純粋なシリーズ型HEVとして、いわゆるe-Powerが登場し、アクセルの操作だけで制動や停止状態を実現できる機能を提供しているが、モータートルクだけで坂路で停車するヒルストップなど、モーターの急激な発熱を伴う動作では、発熱レベルによっては摩擦ブレーキ使用のモードに切り替えるなどしてモーターを保護している。従来、温度の把握に不確かさがあったので安全率を高くとっていたが、大きなトルクを必要とするより重量車への採用ではモーターでの対応の機会が減少する不都合が生じる。室田らは、適切な安全率での運用を実現するために駆動モーターで極低速状態や停車状態を実現する際のモーターの発熱状態をより正確に把握する方法について紹介した⁴⁻³⁾。図4-9は(1)回転中と(2)停止時のモーターの三相のコイルへの電流値で、停止時にはU相だけに直流電流を供給する。ヒルストップで停止状態から極低速で走行する際の各相コイルの温度変化は図4-10に示すように、U相が大きく発熱した後、V相とW相が若干高い状態で安定に推移し、回転時の温度はV,W相間に設置されたサーミスタで十分把握できていることが分かる。図4-11に示すように、モーターコイルの温度をV,W相コイル間の温度、強電系冷却水温度、モーター電流値、モーター回転数を用いて推測する。図4-12に示すように、低回転時のモーターの損失は銅損が大勢を占めるので、銅損に着目した図4-13に示す熱モデルを作成した。このモデルでの推測値の妥当性をモーター単体の試験、コンポーネントレベルでの試験で確認後、車両レベルでも良好な結果を確認した(図4-14)。

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 9 No. 4 2019

ただ、このモデルは回転数に依存する鉄損などを考慮しない極低速時のモデルであるので、図 4-15 に示すように極低速のみをカバーし、その他の領域ではセンサの情報切り替えて使用する。両者を頻繁に行き来するような場合に、推定値が実測値から乖離することがあるので、推測値をセンサー値へ一定の緩和時間を持って漸近させることで不都合を解消している。



(1) Normal driving condition (2) Hill-stop condition

図 4-9(1) 回転時と (2)停止時の各相の電流波形

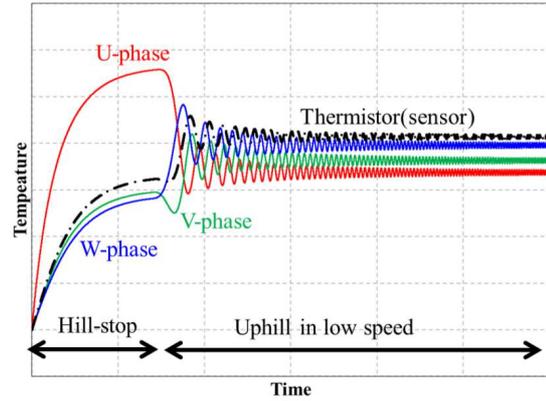


図 4-10 ヒルストップから走行開始時の各コイルとサーミス

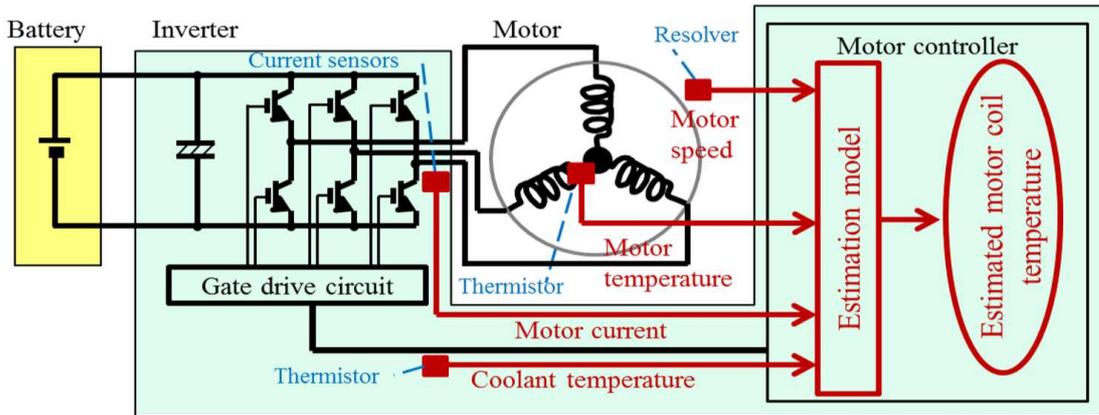


図 4-11 コイル温度推定モデルとそのパラメータ検出器

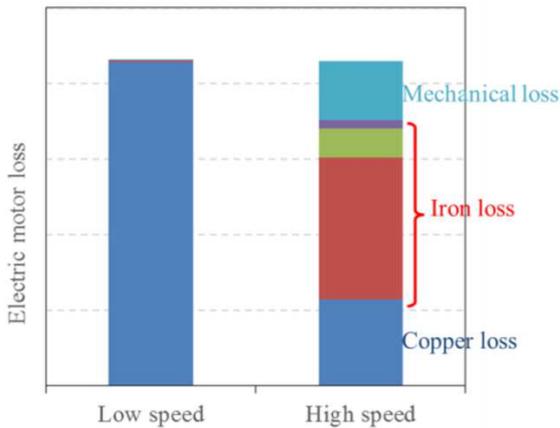


図 4-12 モータ損失要因とその比率

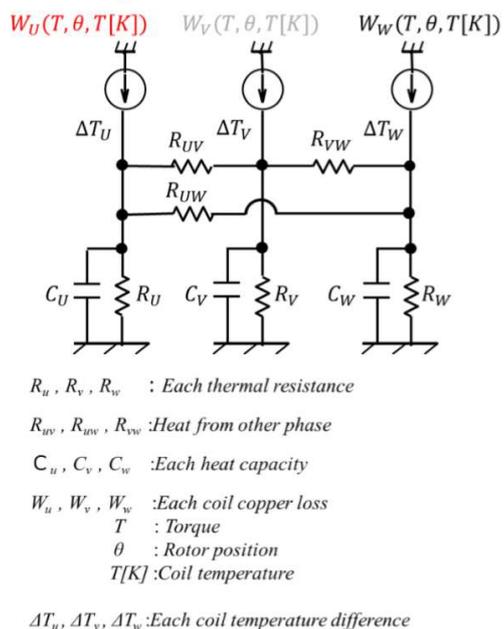


図 4-13 コイル温度推測のための熱モデル

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 9 No. 4 2019

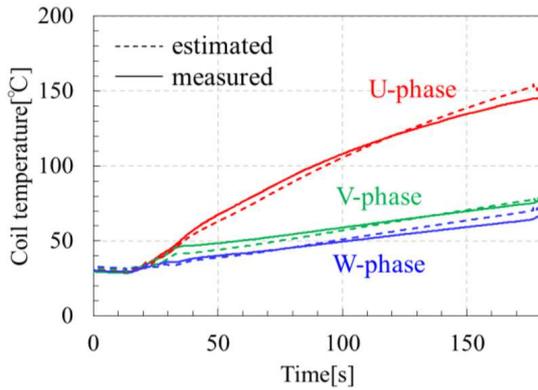


図 4-14 車載レベルでのコイル温度推定値の確認結果

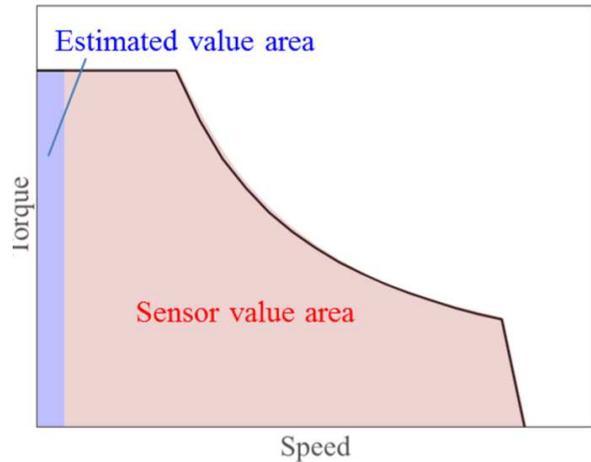


図 4-15 コイル温度評価元 (センサー温度/推測温度) の選択マップ

駆動用モータでは高い耐熱性と保持力を実現するために重希土類を磁石に添加するのが一般的であるが、資源の偏在などによる不安があるので重希土類を使用せずに同等の効果を得る検討が行われている。マイルドHEV用としては希土類磁石フリーモータの実績があるが、マイルドHEV用に比べてトルクで2倍、出力が6倍のストロングHEV用への検討について青木らが紹介した⁴⁻⁴⁾。基本的には同社が開発した技術による微細化ネオジウム磁石による高保磁力をベースに、磁気回路と冷却システムの改善によって実用的な耐熱性と高保磁力を確保して十分な耐減磁特性を実現しようとするものである。対象とするモータの位置づけが分かる仕様を表 4-2 に示す。

磁気回路での対応は、磁石厚みを増大してパーミアンスの向上を図ったがロータの空隙拡大による機械的強度の問題からバランスをとった選択となっている(図 4-16)。Br (残留磁束密度) の増大によるトルク電流特性の向上等と合わせ効果で耐減磁特性を24%向上した。また、従来の冷媒滴下式ではコイル冷却後の熱せられた冷媒が磁石を冷却するので効果が薄かった。そこでシャフト内部に冷媒の通路を設け磁石も積極的に冷却する方法を採用し(図 4-17)、磁石温度を23%低減できた。

表 4-2 開発モータと関連モータの仕様の比較

	i-DCD	i-MMD	
		Conventional motor	Developed motor
Type	IPMSM	IPMSM	IPMSM
Number of poles	6	6	6
Coil turns	55	72	72
System voltage[V]	173	700	650
Maximum motor power[kW]	22	135	135
Maximum motor torque[Nm]	160	315	315
Volume[L]	2.57	3.47	3.47
Max Speed[rpm]	7300	13000	13000
Br[T]	1.35	1.33	1.35
Hcj[kA/m]	1500	2190	1500

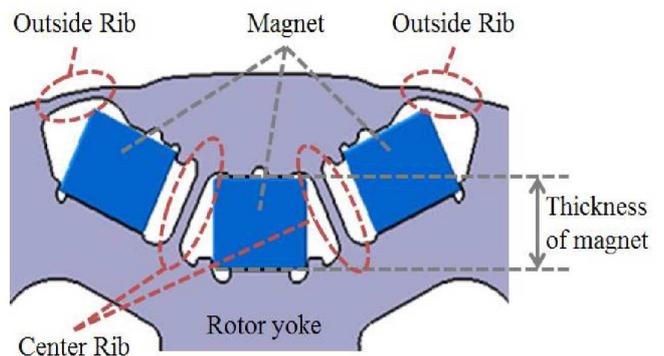


図 4-16 開発モータのロータの構造

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 9 No. 4 2019

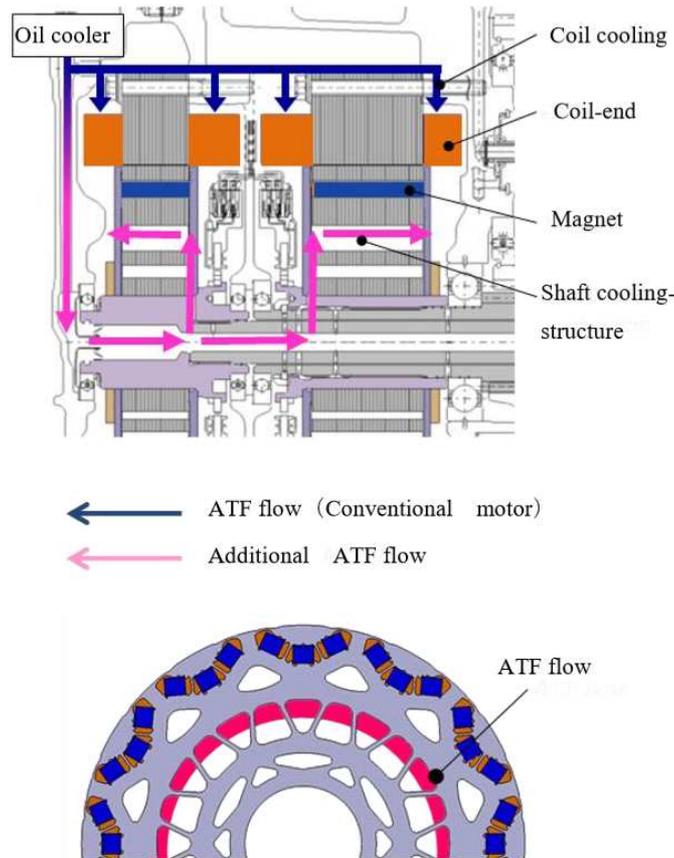


図 4-17 開発モータの冷却方法

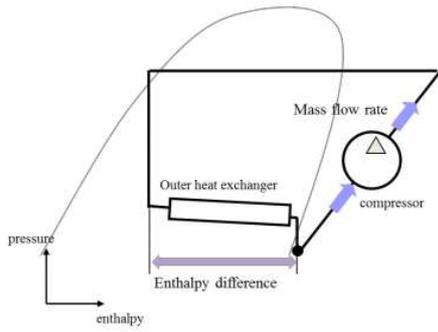
4.3 ヒートポンプ暖房の成立性

電動車両は走行時の効率が良好であるため、エンジンのようにロスによる廃熱が少ないので暖房に必要なエネルギーが問題になる。HEV や PHEV の場合は冷間時の充電負荷を大きくなるように設定する等の工夫で、エンジンの暖機に要する時間を短縮することで、暖房の早さと全体の効率の改善が期待されている。しかし、BEV には熱源がないので、冬季に電熱ヒータを使用すると一充電走行距離が 30 % 以上も短くなる例が報告されている。冬季の暖房は BEV にとって重要な課題の一つである。2017 年春季大会での発表であるが、小林らから冬季の外気温が低い状態で十分な効率を確保することを目標に、高効率の（電動）ヒートポンプシステムの提案があった^{4,5)}。外気温度が氷点下のような低温環境下では吸入冷媒の密度が低下することにより冷媒の質量流量が低下し、その結果、室外熱交換器での吸熱量やコンプレッサでの仕事量が低下し暖房能力が低下する。そこで小林らは、高圧の冷媒を 2 段階に膨張させ、その中間圧で気液分離してガス冷媒を戻すガスインジェクションサイクルによって、コンプレッサの仕事量の改善と室外機への無駄なガス冷媒の混入を防ぐことで室外機での吸熱量の改善を図るガスインジェクション暖房を自動車用として実現する試みを紹介している（図 4-18）。自動車用として成立させるため、気液分離機能と 2 段階目の絞り機能、流路切り替え機能を一体化して図 4-19 に示すコンパクトな“統合弁”とした。ガスインジェクションサイクル時には、統合弁に入った冷媒は遠心分離されて液冷媒は下方から室外熱交換器へ供給され、ガス冷媒は上方からコンプレッサに戻される。同サイクル以外の場合は、冷媒は全て下方に流れるが、その切り替えは下部の 2 方向弁で行われ、上部のバルブはガスインジェクションサイクル時にできる絞り部で生じる差圧によって作動する。除湿動作時には冷却と同時に再加熱もヒートポンプシステムが担うため、再加熱の能力も調整可能である必要がある。この目的で室外機に能力調整機能を付与する方法についての提案もあるが紙面の都合で省略する。ベンチ試験の結果、従来の電気ヒータによる暖房に比べて、暖房モードで 63%、除湿モードで 60%の改善が確認された（試験条件等は図 4-20、図 4-21 を参照）。

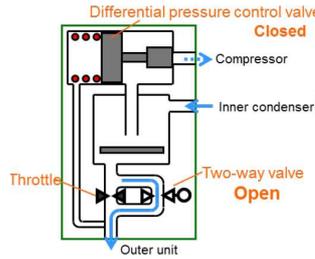
ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 9 No. 4 2019

<Typical refrigeration cycle>



<Non gas-injection cycle>



<Gas-injection cycle>

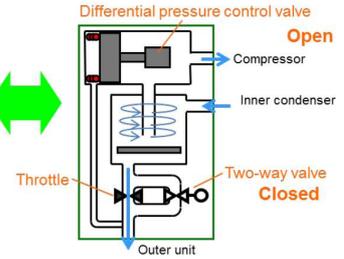
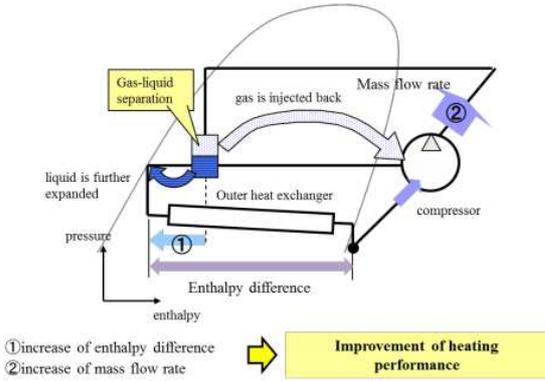


図 4-19 気液分離ユニット (統合弁) の構造

<Gas-injection heating cycle>



Ambient temp.:5°C
 OHE wind speed:1m/s
 HVAC inlet air temp.:11°C
 HVAC inlet air flow volume:200m³/h
 Heating Performance:3.0 kW

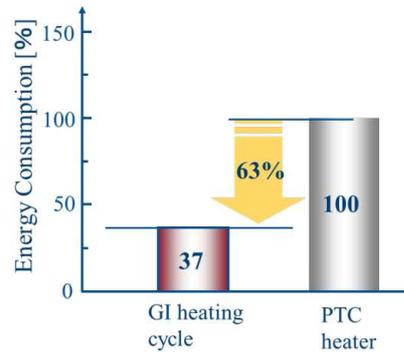


図 4-18 標準的なヒートポンプとガスインジェクションヒートポンプのP-h線図

Ambient temp.:20°C
 OHE wind speed:2.2m/s
 HVAC inlet air temp.:20°C
 HVAC inlet air flow volume:120m³/h
 HVAC inlet air relative humidity:70%

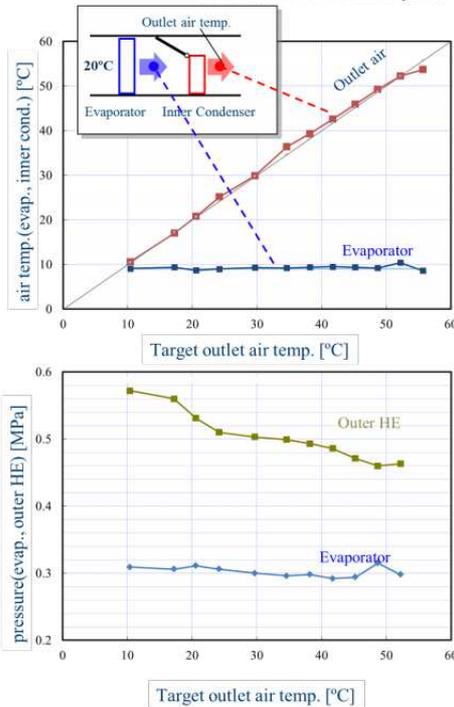


図 4-20 ガスインジェクションヒーターポンプのエネルギー消費改善率

図 4-21 提案システムの除湿モードのエネルギー消費改善率

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 9 No. 4 2019

これに対して、今回、角田らは自動車用エアコンの標準となっている低圧の冷媒での実用ヒートポンプの可能性について検討した結果を紹介している⁴⁶⁾。普及している建物用ヒートポンプエアコンが高圧冷媒（HFC-32）を使用しているのに対して、自動車用のエアコンは車体とエンジン回りの振動を吸収するために一部ゴム配管がある関係で低圧冷媒（R134a）が使用されているが、冷房に特化した最適化が図られているのが現状である。図 4-22 は両冷媒の単位体積当たりの潜熱量で、R134a で HFC-32 と同じ能力を出すには倍以上の冷媒体積を流す必要があることを示している。同様に、暖房の場合は冷房に比べて大きな冷媒体積が必要となるので、これに対応したコンプレッサや配管が必須となる。気温が -20°C での暖房運転の成立性を種々の仮定の下に検討し、暖房時の条件に適した大容量のコンプレッサを使用することで実現の可能性があることを示し、大容量化によって効率が悪化するにもかかわらず、消費電力はヒータに比べて十分小さいことが確認できたとしている（図 4-23）。ラフな検討ではあるが、実現可能性を示唆するもので、この分野の活性化を期待したい。

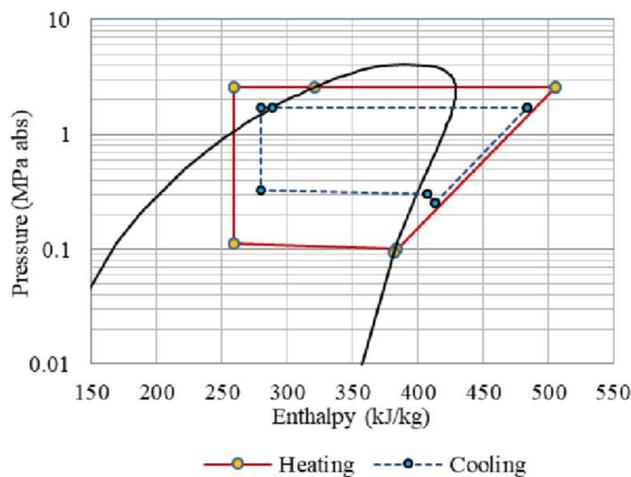


図 4-22 冷媒の単位体積当たりの潜熱の温度依存性

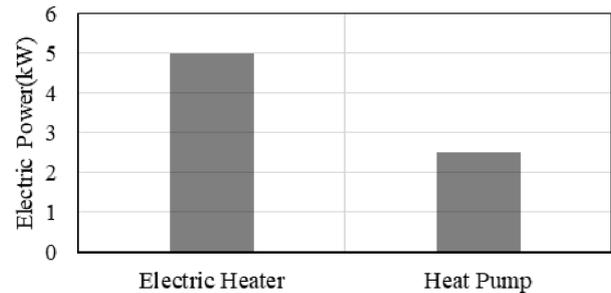


図 4-23 ヒートポンプの電力消費の改善度

4.4 EVのシャシダイナモメータ試験

電動車両に直接の関係はないが、従来から回生制動の評価や e 四駆等、駆動輪の多い車両の評価に不可欠とされてきた 2 軸シャシダイナモメータ（CHDY）の運用時の車両の固定基準に関する 2 件の発表があった。2 軸 CHDY での試験では、車両の固定方法の適否によって、生じる誤差に大きな差が生じることが知られており、走行時の効率が良好な電動車両の評価には致命的な問題である。

小川らは 2 軸 CHDY 試験時の車両固定基準を定める JASO を作成するために実施した試験をもとに、モード走行時の仕事量に車両拘束条件が与える影響について紹介した⁴⁷⁾。表 4-3 に示す 7 種類の車両固定方法について BEV を用いた 1) モード試験（走行抵抗設定済み）（車両駆動電力量で評価）、2) 惰行試験（走行抵抗設定済み）（ALR）、3) CHDY 側からのモード試験（ASR）を実施しその際の各仕事の大きさで固定条件を評価している。各々の相互の関係を図 4-24 に示す（ただし、三者でタイヤにかかる力の大きさや方向が異なるので、各要素のカバー域の正確性については不詳）。試験は電池の初期状態が SOC=80% と 60% の 2 種類について実施し、車両駆動電力量は、試験期間全体の積算値と車両が駆動状態での電力量を積算したものの 2 種類で評価している。駆動電力での評価結果は図 4-25、図 4-26 に示すように、駆動時のみで評価したものも全体での評価と同じ傾向を示している。ただ、4 点支持で張力バランスのとれていないものが、駆動仕事が一番小さい点には疑問が残る。ALR での評価を図 4-27、図 4-28 に、ASR での評価を図 4-29、図 4-30 に示す。縦軸の表示範囲が駆動電力量での図と異なるので評価が難しいが、図中の誤差の表示は皆、駆動電力量での評価とほぼ同じ傾向であることが分かる。このことから、ALR と ASR での評価の妥当性が、車両駆動力仕事での評価で確認できたとしている。試験基準を決めるための試験であるので、各試験の実施件数と各試験毎のばらつきが不明である点や、各試験の初期条件の管理方法、試験の実施順序等試験データの質についての詳細な記述がない点など、多少気になる点が残った。

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 9 No. 4 2019

表 4-3 車両の固定方法と条件

No.	Fixation pattern	Remark
1	4 points chain	Managed chain tension
2	2 points chain	Managed chain tension
3	Bar Diagonal	Managed vehicle position
4	Torque Box	-
5	Wheel Hub	Managed vehicle position
6	4 points chain	Imbalanced
7	2 points chain	Imbalanced

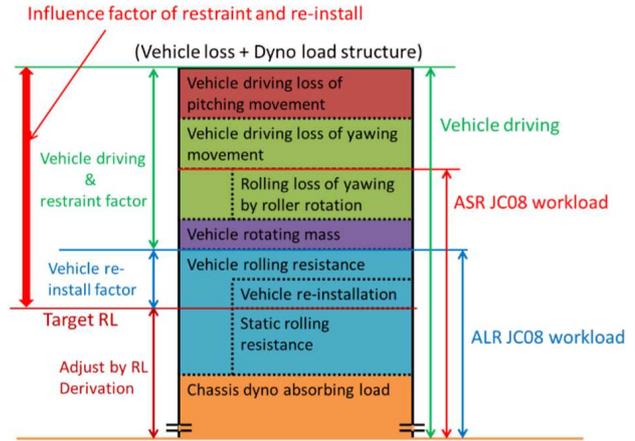


図 4-24 誤差要因と評価方法のカバー域

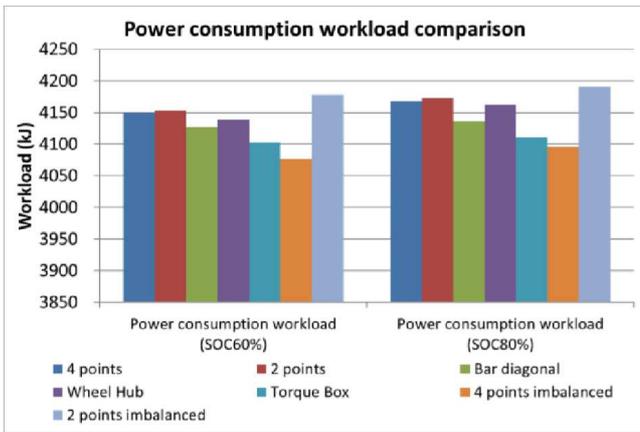


図 4-25 消費電力量での評価結果

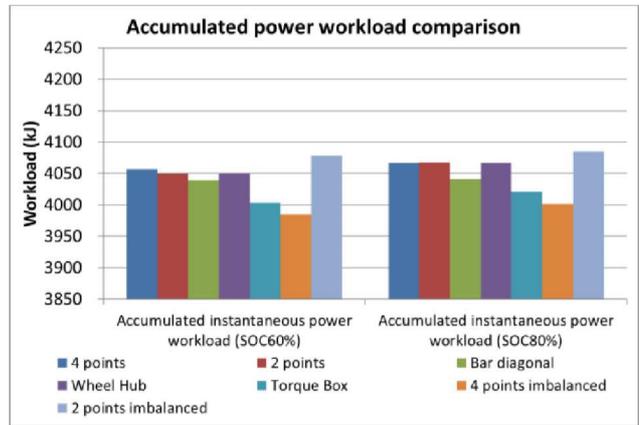


図 4-26 駆動時のみの電力量での評価結果

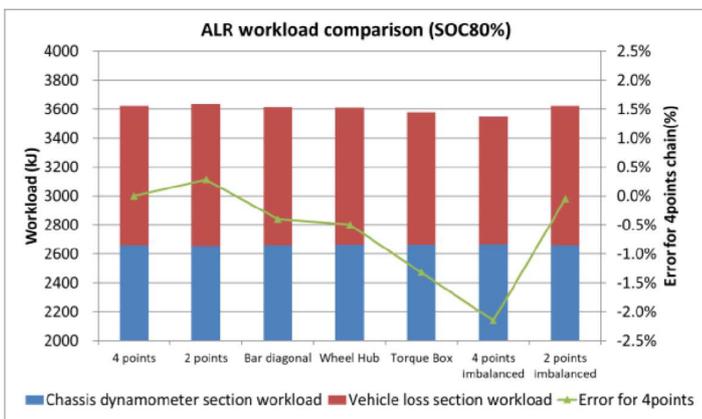


図 4-27 ALR による評価結果 (SOC: 80%)

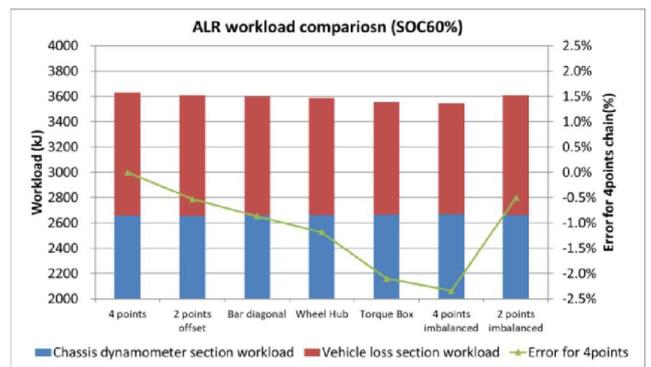


図 4-28 ALR による評価結果 (SOC: 60%)

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 9 No. 4 2019

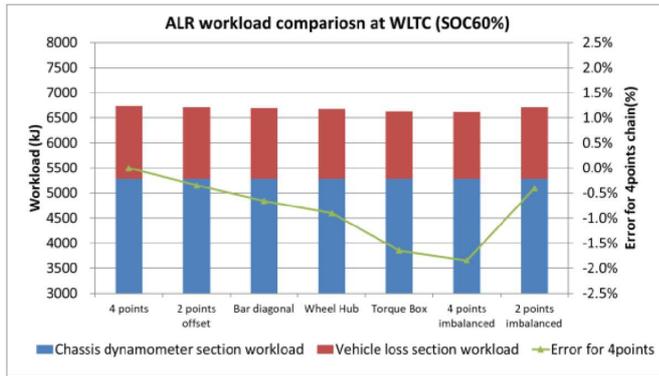


図 4-29 ASR による評価結果 (SOC: 80%)

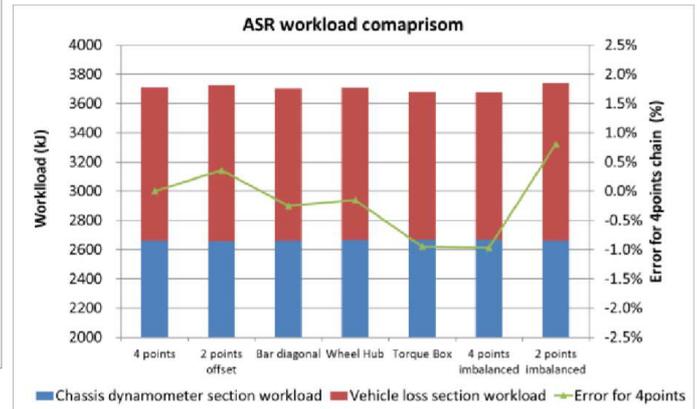


図 4-30 ASR による評価結果 (SOC: 60%)

井上らは、2 軸 CHDY 試験現場で様々な車両固定法が利用されている現状に対応して、JSAE シャシダイナモ試験法分科会が準備して制定された車両拘束とその評価法に関する JASO E016 のねらいとその要点を紹介した⁴⁻⁸⁾。車両固定方法としては、図 4-31 に示す 4 タイプとその派生（例えば 4 点牽引の派生である 2 点牽引や 3 点牽引）を対象としており、機差の解消など試験の精度を保证するための考え方、手順、注意事項などについて触れている。（清水）

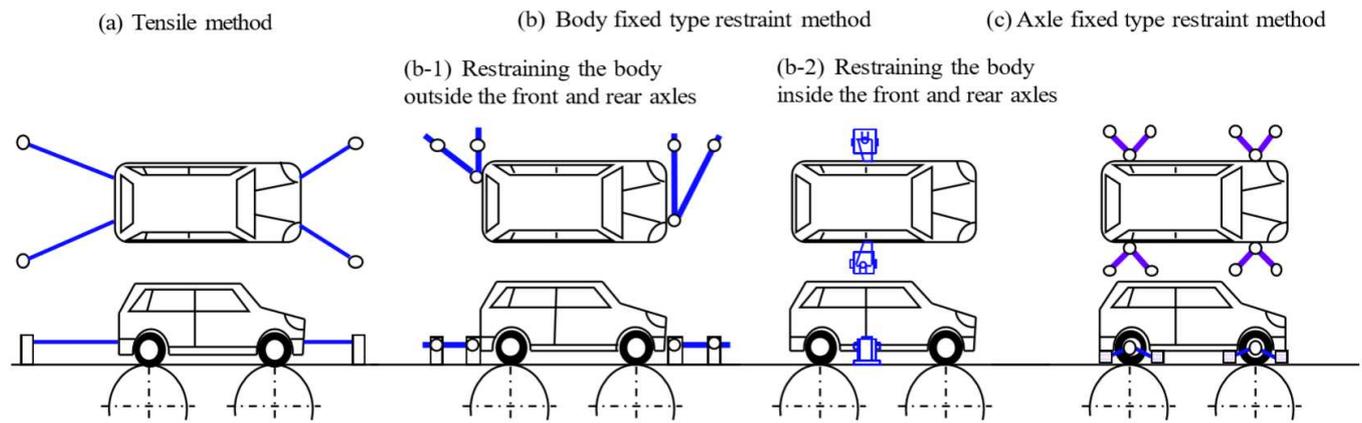


図 4-31 2 軸CHDY への種々の固定方法

- 4-1) 小川朋宏, 山中富夫, 馬屋原健司, 井漕好博: 新型燃料電池バスのFCシステムの開発, 自動車技術会 2018 年秋季学術講演会講演予稿集, No. 20186074
- 4-2) 沢田 豊, 近藤政彰, 木下真介, 後藤荘吾, 横山幸秀: 燃料電池バス用高圧水素貯蔵システム開発, 自動車技術会 2018 年秋季学術講演会講演予稿集, No. 20186069
- 4-3) 室田浩平, 森 智章: 電動パワートレイン用駆動モータの極低速時温度推定技術開発, 自動車技術会 2018 年秋季学術講演会講演予稿集, No. 20186168
- 4-4) 青木忠信, 伊東悠太, 内藤友和, 平西 亨: 高出力モータへの重希土類フリー磁石適用技術, 自動車技術会 2018 年秋季学術講演会講演予稿集, No. 20186169
- 4-5) 小林寛幸, 谷畑拓也, 遠藤義治, 林 浩之: PHEV/BEV 用高効率ヒートポンプシステム, 自動車技術会 2017 年春季学術講演会講演予稿集, No. 20175436
- 4-6) 角田 功, 鷺足純哉, 江口政将: EV 社会に向けた低圧冷媒でのヒートポンプ暖房成立性, 自動車技術会 2018 年秋季学術講演会講演予稿集, No. 20186195
- 4-7) 小川恭広ほか: 4WD シャシダイナモメータ上での車両拘束状態がモード走行仕事に与える影響, 自動車技術会 2018 年秋季学術講演会講演予稿集, No. 20186266
- 4-8) 井上 勇ほか: 四輪駆動車用シャシダイナモメータにおける車両拘束及びその評価法を規定した JASO E016 のねらいと要点, 自動車技術会 2018 年秋季学術講演会講演予稿集, No. 20186267

第29回内燃機関シンポジウム —サステイナブルエンジンシステムを目指して—

2018 Internal Combustion Engine Symposium

開催日： 2018年11月26日(月)～28日(水)
会場： 同志社大学新町キャンパス 臨光館3F/尋真館3F
企画： 一般社団法人日本機械学会
共催： 公益社団法人自動車技術会

Report: 下田 正敏 野口 勝三 (編集委員)

河合 英直 (交通安全環境研究所), 川野 大輔 (大阪産業大学), 河原 伸幸 (岡山大学), 島田 敦史 (日立製作所),
辻村 拓 (産業技術総合研究所), 林 潤 (京都大学), 永岡 真 (豊田中研), 中野 博紀 (三菱重工エンジン&ターボチャージャ)
Masatoshi SHIMODA, Katsumi NOGUCHI (JSAE ER Editorial Committee)
Terunao KAWAI (ntsel), Daisuke KAWANO (OSAKA SANGYO UNIV.), Nobuyuki KAWAHARA (OKAYAMA UNIV.), Taku TSUJIMURA (AIST),
Atsushi SHIMADA (Hitachi Ltd.), Jun HAYASHI (KYOTO UNIV.), Makoto NAGAOKA (Toyota Central R&D Labs.),
Hiroki NAKANO (Mitsubishi Heavy Industries Engine & Turbocharger)

1 はじめに

2018年11月26日から28日にかけて、同志社大学 新町キャンパスにおいて第29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「サステイナブルエンジンシステムを目指して」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「エンジン燃焼技術を振り返って今わかること」

'80～'90年代に内燃機関にかかわるコア技術に対して第一線で活躍してきた研究者4名に、当時を振り返ってもらうだけでなく、現在になって何が明らかになっていて、何が未だ解明されていないのかを整理することにより、これからのエンジン研究に対して考えていくべきことを探る事を目的に企画された。

日本工業大学の中野道王先生から、当時行なわれておられた自着火発生時期に関する詳細な実験に基づく研究成果が示された。現在の進んだ計算能力と化学動力学によるモデリングの進歩により、あたかもすべての反応が解明されたかのような錯覚を抱かせるが、現象を詳細に観察すればまだまだ未解明な部分も多い。現在、中野先生が鋭意取り組んでいる緻密な実験に基づくエンジン内燃焼生成物の詳細分析による研究は、実際の内燃機関内部での現象と詳細化学反応によるモデリングのさらなる発展を結びつける大きな一助となる。

マツダの漆原友則氏より、ガソリン希薄燃焼技術の変遷について自動車メーカー各社の技術をまとめ、わかりやすく紹介された後、現在までに明らかになったスワールやタンブル等の筒内流動の性質が説明された。今後明らかにすべきは、燃焼のサイクル変動抑制法、そして希薄燃焼の負荷範囲拡大のために必要となる混合気成層化と低NO_x化の両立であると示された。

愛知工業大学の西島義明先生より、現在のディーゼルエンジンに欠かすことのできない噴射系技術であるコモンレールシステムについて、その黎明期よりの研究開発状況が詳しく示された。この講演に対して会場の複数の大型車メーカー技術者より、高圧噴射系の登場により現在のディーゼル機関が得た多大なメリットに対して具体的な事例を挙げながら謝意が表された。

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 9 No. 4 2019

新エイシーの内田登氏より、将来のディーゼルエンジンには定期的熱効率改善が必要であり、そのための燃焼制御について詳細な検討と最新の研究成果が示された。再度燃焼改善技術を丁寧に考えていくことで、壁面熱損失の低減とサイクル効率の改善という、多くの人が古く検討し尽くしたとされているような極めて基礎的な事柄について、本質的にはまだ誰も説明できていないという事が指摘された。エンジン燃焼研究の今後への警鐘として、現象ばかりを追いかけてエンジンをシステムとして考えない危険性と、逆に、進展著しいシミュレーション技術に弄ばれ、計算結果を盲信してしまい現象の本質を見落とす危険性が示唆された。高熱効率でなければエンジンは生き残れないという危機感を共有しながら、古くからのエンジン燃焼に関する知見を振り返り、理解しながらも、既存のエンジン設計条件による制約に縛られない革新的発想が必ず必要になるという内田氏の主張は、本フォーラムの主題でもある温故知新にふさわしい物であった。(河合)

3 CI

3.1 CI 機関

CI 機関 1 では 3 件の講演があり、SIP の掲げる熱効率 50% 実現に向けた報告が行われた。等容度向上、冷損失低減、排損低減とアプローチは様々だが、今回は、高レール圧(350MPa)、高噴射率といったハード視点から熱効率改善を狙った報告を紹介する。トレードオフとなるエミッションの影響も考慮しながら、熱効率改善を実証し、律速な設計パラメータを提示している。

東工大の佐藤ら³⁻¹⁾は、「超高压燃料噴射がディーゼル燃焼の燃焼期間およびヒートバランスに及ぼす影響」と題して講演を行った。試験機は、コモンレール式ボア×ストローク：85×96.9mmの4気筒エンジン(図3-1)。運転点は、IMEP1.44MPa、2250min⁻¹として実機の高負荷を設定。二つのコモンレールを使用し、最大350MPaの超高压噴射を実現した。インジェクタは噴口径と噴口数により噴射率が異なる3種類を用意し、ピストンはトロイダルキャビティ径違い2種類とリップ付1種類の計3種類を用意、それぞれを組合せ5通りの条件にて試験を実施した(図3-2)。試験結果より、高噴射圧化(150MPa→350MPa)は、いずれのピストン、インジェクタの組合せでも、燃焼期間が約10deg短縮した結果(図3-3、図3-5)、等容度が向上し、図示熱効率が約1.5~2.0%向上している(図3-6)。対して、ノズル流量を増加した場合は、噴射期間が短縮し燃焼重心が進角するものの、後燃え期間が長期化し、全体の燃焼期間は変わらず(図3-4、図3-5)、図示熱効率も改善しない結果が得られた(図3-6)。燃費改善の観点から、ノズル流量を増加する場合は、燃焼モデルとセットで設計しないとミスリードを招くことを示している。また、キャビティ形状が、熱効率およびエミッションに与える影響も非常に大きい。3種類のピストン間で、燃焼期間が $\Delta\theta\sim 8\text{deg}$ 異なり、熱効率も $\Delta\eta\sim 1.0\sim 1.5\%$ 異なる。レール圧増減時のSoot感度もピストン毎に傾向が異なり、ピストンAでは高レール圧化でSootが悪化している。京大の田口³⁻²⁾も同セッションで、数mmのキャビティ寸法違いで、Sootが $\Delta 80\%$ 変化する実験結果を報告している。キャビティ形状は、熱効率、エミッションの観点から、律速条件となることを示しており、十分な形状最適化後に、高噴射圧を採用しなければ、高噴射圧化の効果を活かせないことが示唆される。高噴射圧化で、図示熱効率が約1.5~2.0%向上することを実証した成果は大きい一方で、メカロスや補機損失を含めたBMEPで高熱効率を達成できるかどうか、および、等容度向上のトレードオフとなるPmaxや騒音を考慮して改善効果が示せるかどうか気になる。

熱効率を最大化するためには、ハード側のアプローチのみでも、高噴射圧化、高噴射率化、高圧縮比化などいくつかの選択肢が取れる。自由度が増す一方、背反として、最適システムを設計する難しさも顕在化してきている。さらに、熱効率のほか、エミッション、騒音、耐久性、応答性と、量産エンジンでは、すべてのトレードオフを成立させるシステムを、限られた時間、コストの中で設計しなければならぬ。その解決策(ポーリングの1番ピン)となりうるのが、CAEを駆使したモデルベース開発(MBD)であると感ずる。MBDは既に実用域であるが、今後、ますますハード、制御ともに複雑化する。今後も、緻密な計測に基づくメカニズムの解明およびモデル化を進めて頂きたい。(中野)

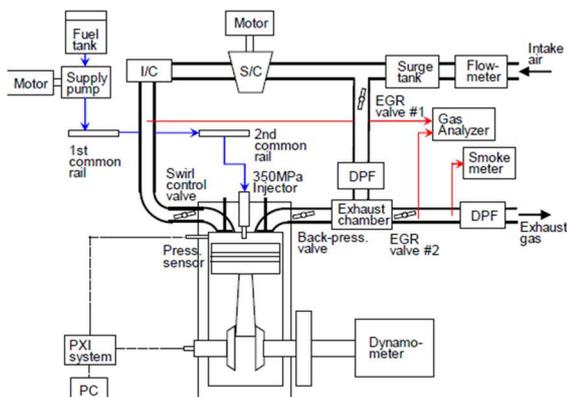


Fig. 3-1 試験機

	Piston A Cavity diameter: $\phi 71$	Piston B Cavity diameter: $\phi 60$	Piston C Cavity diameter: $\phi 60$	
Piston type: Toroidal type				
Nozzle specification	$\phi 0.123 \times 7$	$\phi 0.123 \times 7$	$\phi 0.123 \times 7$	$\phi 0.104 \times 10$ $\phi 0.114 \times 10$

Fig. 3-2 試験条件

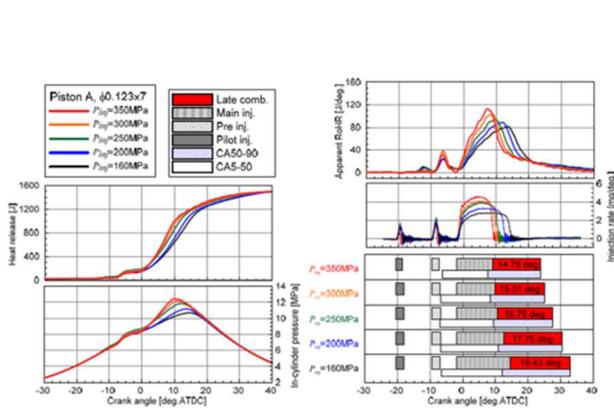


Fig. 3-3 試験結果(ノズル圧変更)

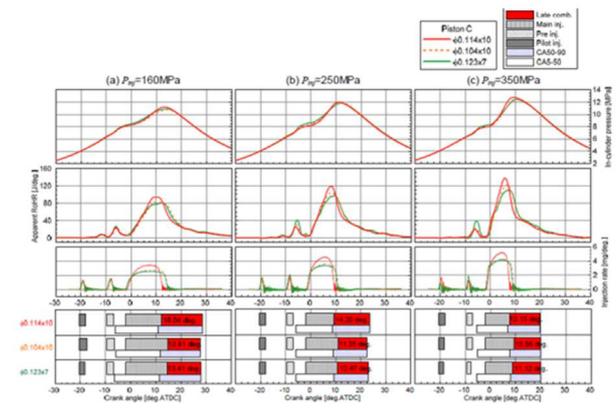


Fig. 3-4 試験結果(ノズル流量変更)

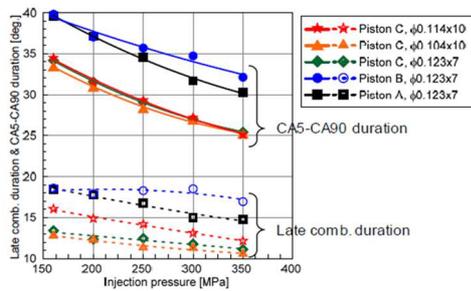


Fig. 3-5 試験結果(燃焼時期比較)

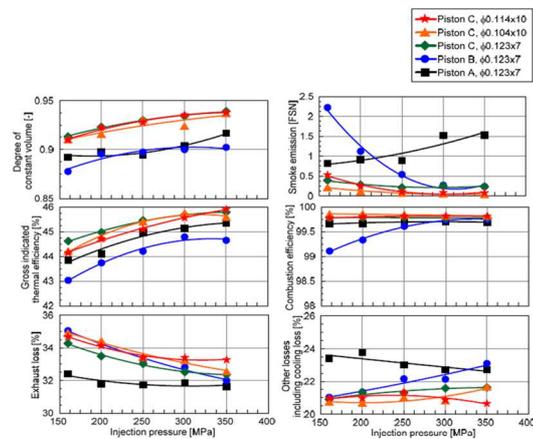


Fig. 3-6 試験結果(ヒートバランス, エミッション)

CI 機関(1)–(5)の中より、印象に残ったCI 機関(2) 36 「燃焼室形状と霧雰気密度がディーゼル燃焼に及ぼす影響」とCI 機関(1) 2 「超高压燃料噴射がディーゼル燃焼及びヒートバランスに及ぼす影響」を取り上げ両者の関連性について述べてみたい。

日野自動車、船山らは「燃焼室形状と霧雰気密度がディーゼル燃焼に及ぼす影響」と題して講演を行った。³⁻³⁾ 筆者の経験では、SANDIA 研の lift-off 長 (set-off 長) と σ (着火までに導入される空気量の、理論必要空気量に対する割合) が実測にもとづくモデルであるため、ディーゼル燃焼を論じる時に各種のパラメータの影響度を予測するのに現状の最適な手法であると考えてきた。これに対してトヨタ中研の冬頭らが、多噴口ノズルの場合には、各噴霧相互の影響により逆流が発生し、噴霧に既然ガスの巻き込みが起り lift-off 長が減少することを指摘した。本論文はさらに、準定常噴霧火炎の最大 Soot 量位置 (L_s) を解析、定義して、燃焼室壁面への衝突が L_s より手前で起きるか、 L_s の下流で起きるかに黒煙の生成、酸化に大きな影響を及ぼすことが示された。燃焼室衝突の効果については、後者の方が黒煙について大きなアドバンテージがある。

SANDIA 研のこのモデルは、高温高压容器のフリーな場での単噴口噴霧火炎の解析がベースになっているので、上述したような多噴口ノズルや実機の場合には修正が必要と考える。また同時に、このモデルの考え方は、準定常噴霧に近いものであり乗用車ディーゼルには適合が難しく、大型車のディーゼルには合っているように考えられる。この SANDIA 研の研究では、着火性の異なる燃料によっても lift-off 長が変化することが観察されており、燃料性状の化学的なフィードバックが噴霧燃焼にかかっていることが予測され、今後の発展が期待される。

また東工大、佐藤らは「超高压燃料噴射がディーゼル燃焼およびヒートバランスに及ぼす影響」と題して講演を行った。³⁻⁴⁾ 本研究は、噴射圧力、ノズル噴口径、燃焼室形状の広範囲のパラメータがディーゼル燃焼、ヒートバランスに及ぼす影響を解析した精緻な研究である。しかし解析手法がまだ研究初期のため、熱発生率の1次解析にとどまっており、超高压噴射の本質を突いているとは言い切れない。高压噴射に立脚した燃焼モデル、仮説による2次解析が必要であり、前論文でできていたような解析と組み合わせてみることを提案したい。それにより超高压噴射のディーゼル燃焼に及ぼす影響がより明確になるものと思われる。(下田)

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 9 No. 4 2019

【参考文献】

- 3-1) 佐藤 進, Pop-Paul Ewphun, 長澤 剛, 小酒 英範, 第29回内燃機関シンポジウム, No. 2
- 3-2) 田口 智喜, 岸上 稜, 包 智超, 堀部 直人, 川那辺 洋, 石山 拓二, 第29回内燃機関シンポジウム, No. 3
- 3-3) 船山悦弘, 吉富和直, 石井森, 中島大, 冬頭孝之: 燃焼室形状と雰囲気密度がディーゼル燃焼に及ぼす影響, 第29回内燃機関シンポジウム, 2018
- 3-4) 佐藤進, Pop-Paul Ewphun, 長澤剛, 小酒英範: 超高圧燃料噴射がディーゼル燃焼およびヒートバランスに及ぼす影響, 第29回内燃機関シンポジウム, 2018

4 SI 機関

SI 機関1 では5件の講演があり, 熱効率向上のための要素技術として, 多重衝突パルス噴流圧縮を用いた研究, 水噴射を活用したスーパーリーンバーンや排熱回収による燃料改質, 直噴ガソリンエンジン用インジェクタの分裂モデルの検討について報告がされた。中でもエンジンの高効率化に重要となる2件について取り上げる。

東京工業大学の倉倉⁴⁾は, 「スーパーリーンバーンSI エンジンにおける筒内水噴射による熱効率向上に関する研究」と題して講演を行った。λが2以上のスーパーリーンバーン条件において, 筒内に直接水を噴射し, 温度を成層化する技術を用いた熱効率向上手法を検討した(図4-1)。水蒸気をピストン壁面近傍に配置することで, 水噴射によるノック抑制と冷却損失を低減しつつ, 燃焼速度低下を抑制することが狙いである。

スーパーリーンバーンを実現するために, SIP「革新的燃焼技術」における共用単気筒SI エンジンを使用し, 高圧縮比(13以上), ロングストローク(ストローク/ボア比1.5以上), 点火強化(60mJの点火コイルを20個連結)手法を用いて, 試験を実施した。2000min⁻¹, IMEP= 1100kPa, λ= 2.0の条件にて水噴射により点火時期を4deg進角化でき, それにより等容度が向上し, 図示熱効率を改善した(図4-2, 4-3)。また, 熱流束解析の結果からも水噴射により冷却損失が低減することを確認している(図4-4)。等容度向上と冷却損失低減を同時に実現しており, これは筒内直接水噴射による熱効率向上効果であると推測する。

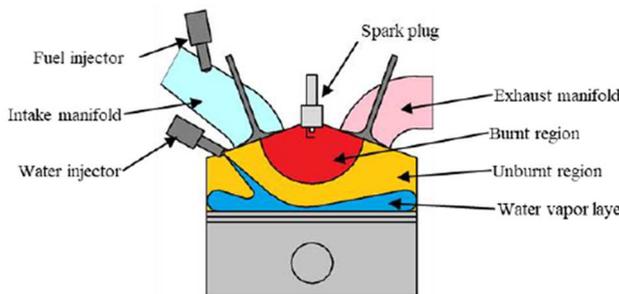


Fig.4-1 水噴射による冷却損失削減手法

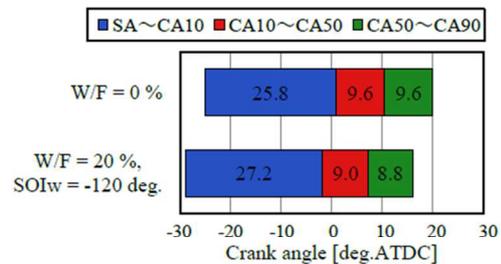


Fig.4-2 水噴射時の熱発生タイミング

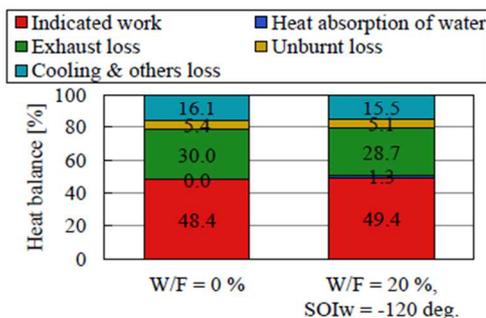


Fig. 4-3 水噴射時のエネルギーバランス

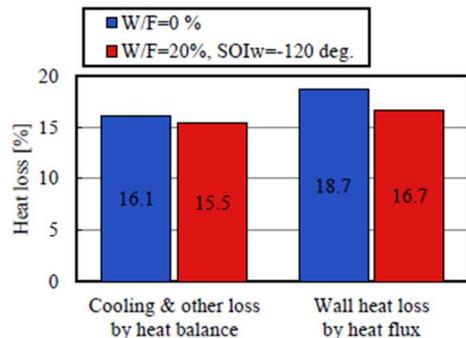


Fig.4-4 エンジンヘッドからの熱流束

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 9 No. 4 2019

また図 4-1 の成層化コンセプトの効果を確認するために筒内水噴射時期による燃焼タイミングの違いについて検討し、圧縮行程前半に噴射することでノック抑制と筒容度向上の実現を確認した(図 4-5)。また、圧縮行程前半に水を噴射した際の筒内の水分布を散乱光撮影で確認し(図 4-6)、-60deg. ATDC のタイミングで弱い散乱光がピストン上面に分布し、その後、点火時期付近である-30deg. ATDC では散乱光が見えないことから、蒸気化した水がピストン上面に分布していると推測している。水噴射時期を遅角化すると、点火時期においても十分な蒸気化が難しく、燃焼が悪化(緩慢化)し、逆に水噴射時期を進角化すると、水蒸気が筒内に均一分布され、成層化が難しくなるとのことである。

最後に種々の空気過剰率で水の噴射時期を最適化した試験を行い、その結果、水噴射なし条件での図示熱効率 48.7% に対し、水噴射ありは図示熱効率 50.1% を実現している(図 4-7)。そのときのエネルギー収支結果では、排気損失は 1.2%、冷却損失が 1.0% 減少している。更なる冷却損失低減のために、シリンダブロックやピストンの材料や構造面を含めた検討など、今後の発展を期待する。

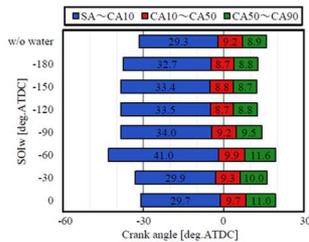


Fig.4-5 水噴射時期の燃焼タイミングへの効果

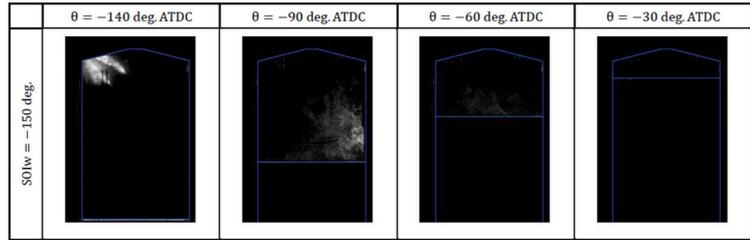


Fig.4-6 筒内の水分布

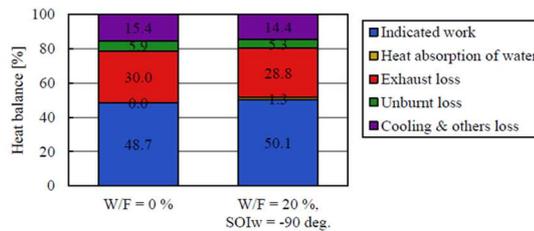


Fig.4-7 最大熱効率点でのエネルギー収支比較

北海道大学の小川ら^{4,2)}は、「ガソリンエンジン EGR 系内水蒸気改質反応の燃料種依存性」と題して講演を行った。ガソリンエンジンの EGR 配管に燃料改質用の改質器を搭載し、改質による化学的排熱回収と、水素生成による希薄混合気条件下での高速燃焼を狙ったシステムを想定した。この講演では、エンジンの排気の一部に改質器を搭載し、その改質器に種々の燃料を供給した改質試験を実施した(図 4-8)。エンジンの実排ガスを使つての改質試験のため、その改質試験データは興味深い。実験条件は $SV = 4.0 \times 10^4 \text{ h}^{-1}$ 、S/C 比 = 2.3、触媒出口温度は 973K にて実施している。高速燃焼に重要となる水素の発生量を各燃料の H/C で整理している(図 4-9)。水蒸気改質を想定した予測線の傾きに近いことから、排ガス中の水蒸気を使った改質が実現できていると推測する。シクロヘキサンの脱水素反応については考慮しているが、その他、副反応についても検討をお願いしたい。

燃料の供給熱量に対する水素生成量を整理した結果(図 4-10)によると、燃料の供給量に対する水素生成量は計算値と同じ傾きとなるとのことである。この試験のように改質器に熱量が十分与えられる条件(改質器出口温度一定)では、燃料供給量による水素発生量の制約性は、燃料成分に大きく依存しないことを示している(アルコール成分は除く)。実際のエンジンでは、改質器に供給される排熱と燃料改質の吸熱量の収支が重要となることから、そのような検討など、今後の発展を期待する。(島田)

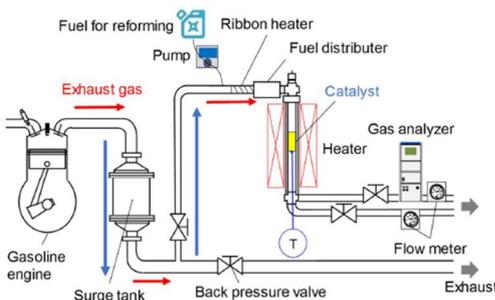


Fig.4-8 エンジンの排気を活用した改質試験

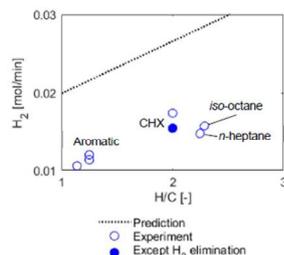


Fig.4-9 燃料のH/C比と水素発生量の比較

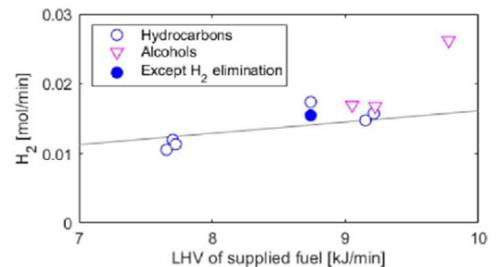


Fig.4-10 供給量と水素発生量比較

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 9 No. 4 2019

SI 機関(2) は、大会の二日目に開催され、SI 機関の燃焼解析および燃焼効率向上に関する講演が5件行われた。ここでは、その中から興味深い一つの講演を紹介する。

ダイハツの黒木らは、「3次元SI燃焼計算を活用したノッキング発生個所のサイクル変動評価(第1報)」⁴³⁾と題して講演を行った。シミュレーションでノッキングを再現するには、複数サイクルにわたる計算を実施し、サイクル間の変動も含めた評価が必要である。本研究では、計算時間の短縮のためRANSモデル、詳細なノッキング挙動予測のため詳細化学反応モデルを用いて、複数サイクルの3D燃焼シミュレーション計算を行い、ノッキング発生個所の予測を試みている。また実機での筒内輝度分布測定を行い、得られたノッキング発生個所との比較検証を行っている。3D燃焼シミュレーションにより得られた各サイクル、同クランク角における火炎形状(2000K等温面)を比較した結果を図4-11、図4-12、図4-13に示す。8.3degATDC(図4-11)では、火炎面から離れた箇所、新たに火炎面が発生している様子が見られ、着火が吸気、Rear側に起きている。その0.4deg後(図4-12)では、上述の火炎面が成長している。その後、排気側でも新たな火炎面が発生するが、いずれもそれまでに吸気側で異常燃焼が確認されるサイクルに限られている。以上の事から排気側の異常燃焼は、吸気側の急激な燃焼による圧力波により引き起こされた、SWACER(Shock Wave Amplification by Coherent Energy Release)ライクな挙動が筒内で起こっていると考えている。図4-13において、排気側で急速な燃焼が起きているが、その範囲が比較的広いことから、これがノッキングの主要な反応とみられるという。実機では、AVL社製VisioKnockセンサを用いて、筒内の輝度分布より、ノッキング発生個所の同定を試みている。実機でのヘビーノックについて、ピークの発生した回数を方向毎にまとめた結果を図4-14に示す。最も高頻度にピークが発生した箇所は、排気側のわずかにRear側に集中しており、3D燃焼シミュレーションの図4-13と良く一致すると報告があった。RANSモデルと、詳細化学反応モデルを用いて、3D燃焼シミュレーションを実施し、可視化処理によりヘビーノックの発生過程を解明している。さらに、ノッキングの発生しやすい箇所を明確にしており、本シミュレーションは、ノック改善に貢献する事と思われる。

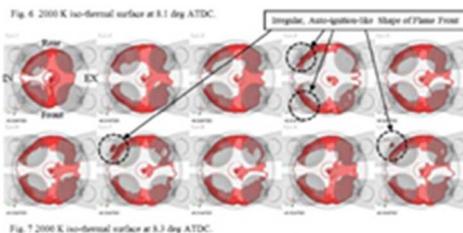


Fig.4-11 2000K 等温面 at 8.3degATDC

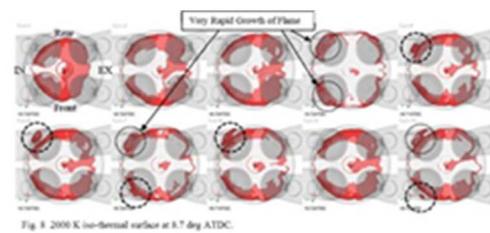


Fig.4-12 2000K 等温面 at 8.7degATDC

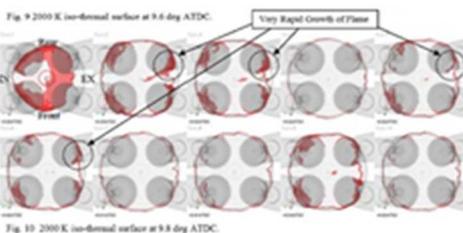


Fig.4-13 2000K 等温面 at 9.8degATDC



Fig.12 Direction distribution of the brightness peak considered as a heavy knock.

Fig.4-14 輝度ピークの発生方向分布

SI 機関(3) は、大会の最終日に開催され、SI 機関の燃焼解析で特にすす排出に関する講演が、合計3件行われた。それらは、薄皿を用いたプール燃焼装置、圧縮膨脹機関、単気筒直噴エンジンとそれぞれ違った実験装置を用いて行われている。ここでは、その中からサロゲート燃料を用いた単気筒直噴エンジンによる報告を紹介する。

千葉大学の熊らは、「燃料性状が直噴ガソリン機関の暖気過程における排出微粒子に及ぼす影響」⁴⁴⁾と題して講演を行った。筒内直接噴射式ガソリン機関では、粒子状物質の排出量が多いことが問題視され、特にコールドスタートから暖気過程において、質量濃度、数濃度ともに多いことが知られている。本研究で

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 9 No. 4 2019

は、すす生成モデルを検証するために、サロゲート燃料を用いた場合の実機からのすす排出特性を調査することを主眼としている。実験には、排気量 404.6cm³、圧縮比 9.55 の単気筒直噴ガソリンエンジン（表 4-1）を用い、表 4-2 に示すような実験条件にて、冷却水温度と燃料噴射時期がすす排出特性に及ぼす影響を調べている。暖気過程を模擬するため、冷却水温は、8°C から 80°C まで変化させたという。また燃料には、市販のハイオクタン価ガソリンおよび iso-octane, n-heptane, Toluene の 3 成分で構成されるサロゲート燃料を用いて、その排出特性を比較している。図 4-15 に燃料噴射時期に対する、排出すす濃度（縦軸対数）の変化を示す。吸気行程前半、および圧縮行程後半の燃料噴射時期とした場合に、排出すす濃度が増大し、冷却水温度が低いほど排出すす濃度が高くなっている。一方、吸気行程後半から圧縮行程前半において燃料を噴射すると、排出すす濃度は低く、また冷却水温度が排出すす濃度に与える影響は少ないという。燃料噴射時期が吸気行程前半および圧縮行程後半の場合には、ピストンが TDC 位置付近にあり、燃料がピストンに衝突し液膜を形成する。その液膜燃焼が、排出微粒子の増大を招くと考えている。また、3 成分で構成するサロゲート燃料は、市販ガソリンに比べ排出すす濃度が低い方が、燃料噴射時期や冷却水温度の変化に対する、排出すす濃度の定性的な変化を模擬できていると報告があった。近年、ガソリンエンジンでも粒子状物質の排出量が注視され、欧州で PN 規制が導入される等、関心事項である。燃料噴射時期は、排出すす濃度以外にも燃焼安定性、ダイリューション、ノッキング等に影響し、トレードオフ関係のものも多く、多段噴射も含めた最適化に費やす時間は多大である。モデル構築が時間短縮に貢献する事を期待される。（野口）

Table 4-1 エンジン諸元

Type	4-stroke, 4-valve single cylinder
Fuel injection system	Side-mounted direct injection
Displacement	404.6 cm ³
Bore × stroke	φ79.7 × 81.1 mm
Compression ratio	9.55

Table 4-2 実験条件

Engine speed	1200 rpm
Intake air temperature	30 °C
Fuel injection pressure	10 MPa
IMEP_gross	0.7 MPa
CA50	9 deg. ATDC
Excess air ratio	1.0
Intake air pressure	81.0–86.6 kPa (abs.)
Start of fuel injection (SOI)	-320 ~ -90 deg. ATDC
Coolant temperature	8 ~ 80 °C
Oil temperature	22 ~ 74 °C

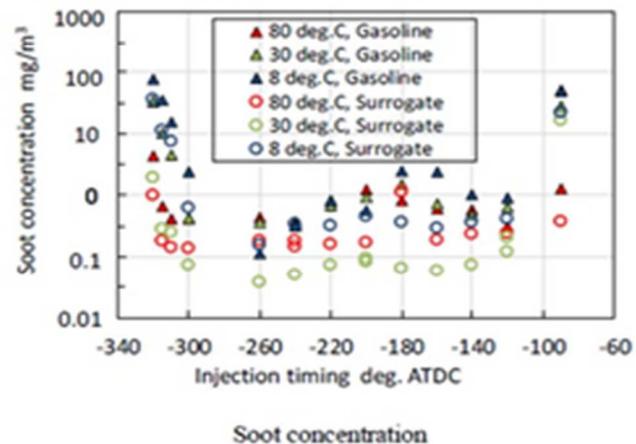


Fig. 4-15 燃料噴射時期に対する排出すす濃度

【参考文献】

- 4-1) 大倉優一, 長澤剛, 山田涼太, 佐藤進, 小酒英範: スーパーリーンバーン SI エンジンにおける筒内水噴射による熱効率向上に関する研究第 29 回内燃機関シンポジウム講演論文集, 講演番号 13 (2018)
- 4-2) 小川佑世, 小橋好充, 柴田元, 小川英之: ガソリンエンジン EGR 系内水蒸気改質反応の燃料種依存性第 29 回内燃機関シンポジウム講演論文集, 講演番号 15 (2018)
- 4-3) 黒木 志典, 島 祐太, 小野 泰久, 芹澤 毅: 3 次元 SI 燃焼計算を活用したノッキング発生個所のサイクル変動評価 (第 1 報), 第 29 回内燃機関シンポジウム講演論文集, 講演番号 46 (2018)
- 4-4) 熊 仔, 窪山 達也, Gupta Ankur, 森吉 泰生, 武田 拓也, 秋濱 一弘, 橋本 淳: 燃料性状が直噴ガソリン機関の暖気過程における排出微粒子に及ぼす影響, 第 29 回内燃機関シンポジウム講演論文集, 講演番号 81 (2018)

ENGINE REVIEW

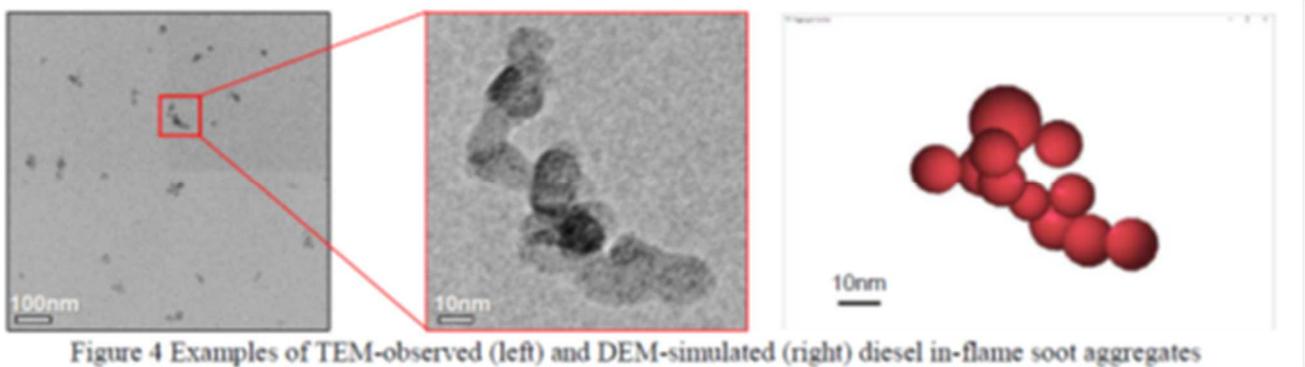
SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 9 No. 4 2019

5 数値計算

数値計算（2）のセッションは5件の講演でその中からPMの挙動シミュレーションに関する1件の講演を紹介する。

松平・相澤らは離散要素法（DEM）を用いたすす粒子のブラウン凝集過程のシミュレーションを試みた。⁵⁻¹⁾ これまでに蓄積したディーゼル噴霧火炎内から直接採取したすす粒子の透過型電子顕微鏡解析結果と、DEMの市販ソフトによる結果を比較した。シミュレーション結果からの凝集体旋回半径、フラクタル次元等の算出には、実験と同様の画像定量解析法により算出した。凝集体の外観および旋回半径、フラクタル次元について、シミュレーション結果は実験結果を概ね再現できた（下図）。ただし、凝集体の形状の再現には粒子間法線力モデルと接線力モデルの適切な定数設定が重要とのこと。また、今回の報告では表面成長や酸化による粒径変化は考慮されていない。

DEMではモーメント法やセクショナル法のような質量等価な球形状ではなく二次粒子のモルフォロジーも含めたより直接的かつ動的なシミュレーションが可能となるため、今後の進展に期待したい。（永岡）



【参考文献】

5-1) 松平武士, 佐藤良海, 丸山智久, 今市健太, 奥居幸, 相澤哲哉, 離散要素法(DEM)によるすす凝集過程のシミュレーション, 第29回内燃機関シンポジウム講演論文集, No. 23.

6 計測診断

計測診断（1）では、流れ場、温度、すす堆積量のレーザを用いた非接触計測技術が3件報告された。その中から、排気ガスの時系列温度計測に関する一件の講演を紹介する。

中谷ら⁶⁻¹⁾は、エンジンの1サイクルにおける時間応答性の高い排気ガス温度計測を目的として、レーザ干渉法を適用した。本計測では、まず異なる2波長のダイオードレーザから発振された光を合成し、ビームスプリッタを用いて参照光（計測対象を通らない光路）と計測光（測定対象を通る光路）を分離し（図6-1, 図6-2）、再度ビームスプリッタを通して重ね合わせる。その後、異なる2波長のバンドパス光干渉フィルタをつけた高速度ラインセンサカメラによって計測し、計測光の干渉縞と参照光の干渉縞から温度を算出している。本手法では、異なる二波長のレーザを用いることで、干渉縞の移動量が一波長以内であること（計測精度が保たれていること）を確認しており、高速度ラインカメラを用いることで時間分解能を向上させている。

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 9 No. 4 2019

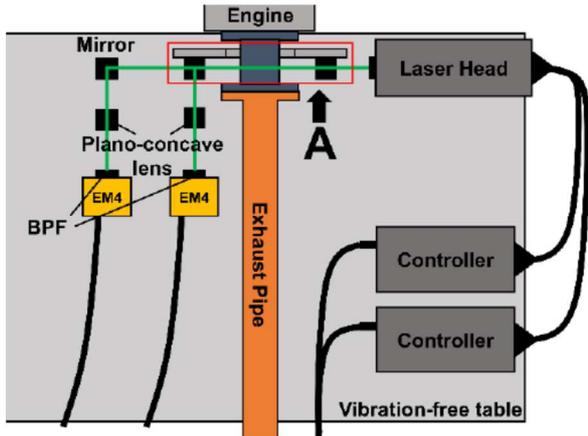


Fig 6-1 Schematic diagram of experimental devices

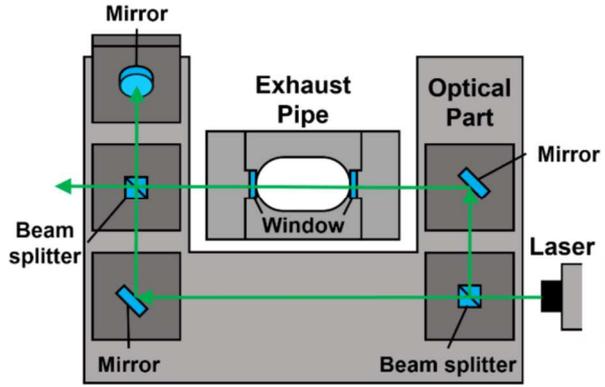


Fig 6-2 Schematic diagram of the optical system

本計測手法では、得られた干渉縞（図 6-3）の時間履歴から温度の時間履歴を得るが、初期温度の設定が必要となり、初期温度によっては現実性の低い温度履歴を得ることが示された。一方で、初期温度を適切に与えることで、高時間分解能で排気ガスの温度履歴計測が行えることが明らかとなった（図 6-4）。今後の予定として、本計測手法によって計測された温度履歴の妥当性の評価や計測手法の運転条件適用範囲の検証を挙げている。（林）

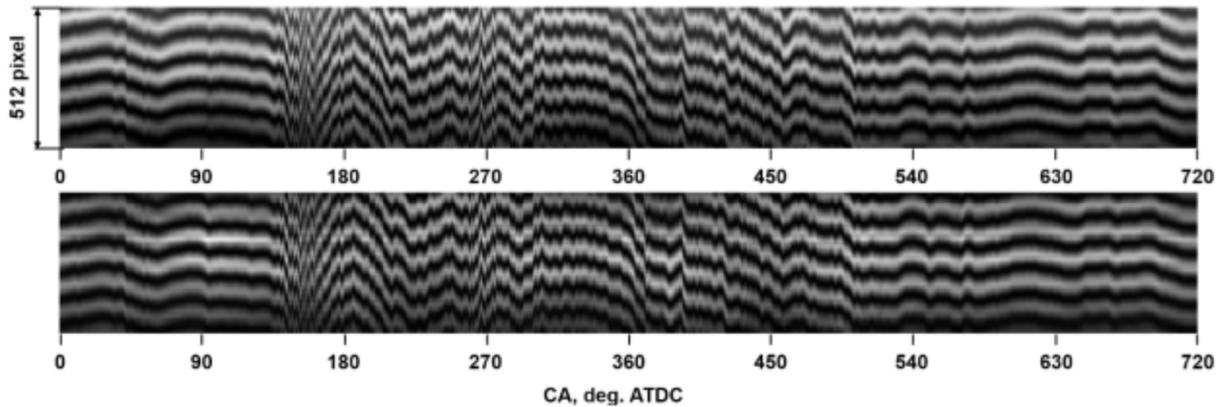


Fig 6-3 Fringe image (one cycle in continuous combustion; upper $\lambda_1=515$ nm, lower $\lambda_2=561$ nm)

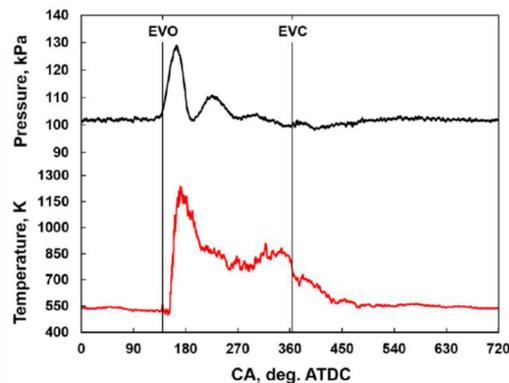


Fig 6-4 Temperature history (combustion cycle)

【参考文献】

6-1) 中谷俊介, KIM Yungjin, 河原伸幸, 富田栄二, 二波長型レーザー干渉法を用いたエンジン排気ガス温度履歴の計測, 第29回内燃機関シンポジウム講演論文集, 講演番号09.

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 9 No. 4 2019

7 エンジン制御

エンジン制御(1), (2)では合計6件の発表がなされた。そのうち、5件がディーゼルエンジン、1件がガソリンエンジンを対象とした研究であった。ここでは、エンジン制御モデルのパラメータを走行時に自動適合する手法を検討した研究を紹介する。

東京大学の曹らは、これまでに著者らが構築してきた多段噴射を想定したディーゼルエンジンの物理に基づく制御モデルを対象に、物理モデルであっても存在するモデルパラメータを、路上での運転条件に応じて自動的に適合する手法について検討した。⁷⁻¹⁾本研究で対象とした燃焼モデルは、図7-1に示すように、バルブ開閉時期、燃料噴射時期、燃料着火時期、筒内圧力が最大に達する時期などを離散化し、これらの時期での圧力値を推定するものである。この離散化燃焼モデルにおけるモデルパラメータを適合するアルゴリズムとして、バックプロパゲーション (BP) 法を用いたニューラルネットワーク (NN) を適用した。図7-2に示すように、エンジンにおけるある実測値とモデルの予測値の誤差が0となるように、モデルパラメータの値を調整した。定速運転、加速運転、高速運転を含む運転パターンの実験データを取得し、これを利用して自動適合のシミュレーションを行った際のモデルの出力結果とモデルパラメータの履歴を図7-3に示す。自動適合を用いないモデルに比べ、自動適合を用いた方がメイン着火時期および圧力ピーク時期の予測値が目標値に追従しており、幅広い運転条件でモデルの予測精度が向上したことがわかる。(川野)

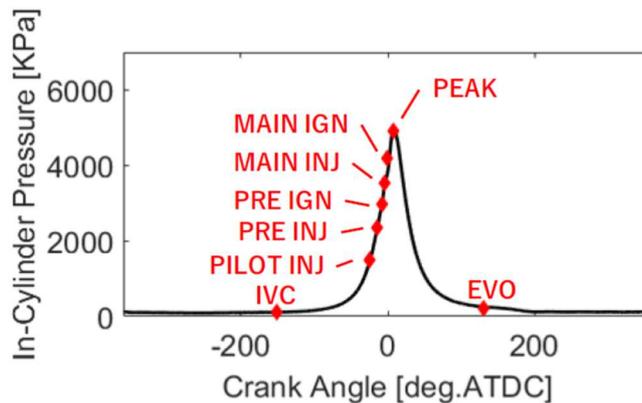


Fig. 7-1 Discretion of engine cycle

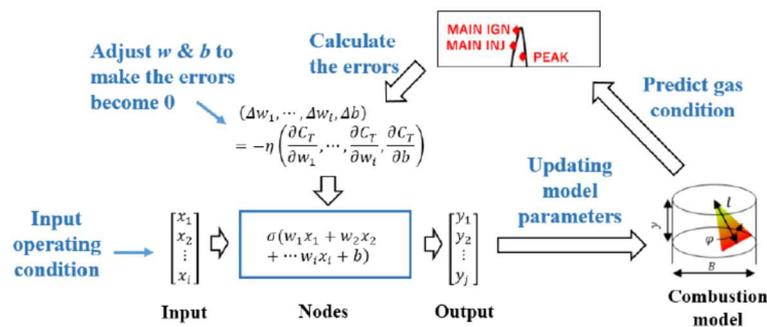


Fig. 7-2 The flow of automatic adaption

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 9 No. 4 2019

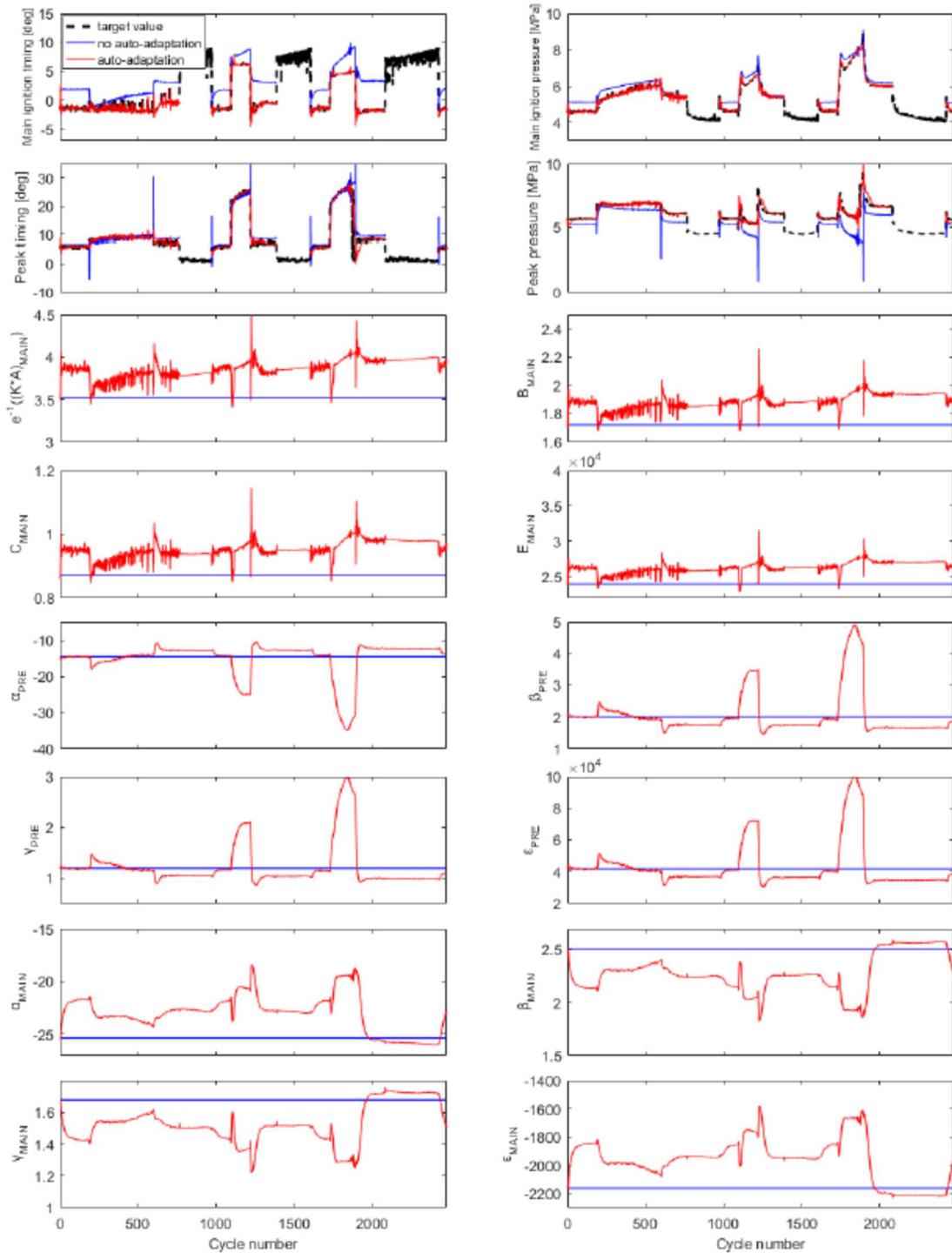


Fig. 7-3 Prediction results of the models and history of model parameters

【参考文献】

7-1) 曹 家楠, 高橋 幹, 山崎 由大, 金子 成彦 : 走行時におけるエンジン制御モデルの自動適合の検討, 第29回内燃機関シンポジウム, 講演番号62

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 9 No. 4 2019

8 ガソリン噴霧

本セッションでは、火花点火機関に用いられるガソリン噴霧に関するインジェクタ磁気回路、噴射システム、壁面衝突する噴霧、ガソリン噴霧の蒸発特性に与える燃料性状の影響などが報告されていた。ここでは、高速応答・微小噴射を実現するインジェクタ磁気回路およびガソリン燃料噴射システムにおける多段噴射時の微小燃料質量噴射の燃焼挙動に関して、紹介する。

「高速応答、微小噴射を実現するガソリンインジェクタ磁気回路の新構造」⁸⁻¹⁾と題し、草壁らによりインジェクタ内部の磁気回路の効率化技術を紹介している。特に、インジェクタへの通電を停止してから弁体が閉弁するまでの応答遅れ時間の短縮に着目し、応答性を妨げる要因の分析を行っている。図8-1において、インジェクタの開弁および閉弁動作を詳細に説明している。ガソリンエンジンでは、EUR06 排気規制から導入された粒子状物質の個数 (PN: Particulate Number) 規制に対応するためには、1回の燃焼に必要な燃料噴射を複数回に分割し、混合気の均質性向上と燃料の壁面付着を抑制することが重要となる。しかし、エンジンの高出力化に対応するためにインジェクタの流量を大きくする必要があり、最小噴射量は増加する傾向にある。本研究では、弁体挙動の応答性向上により最小噴射量の低減を目指しており、手段として静的磁気吸引力の向上および磁気回路の応答性向上を検討している。磁気密度等の解析モデル (図8-2) を構築し、応答性の支配要因を明確化している。コアとよんでいる部分の内径側に残留する磁束があり、その磁束を低減することが重要としている。そのため、新しい構造を考案し、磁気抵抗低減による磁気吸引力の向上効果、磁気的な応答遅れの改善効果を検証している。これらにより、最小噴射量が従来比で46%低減していることを確認している。

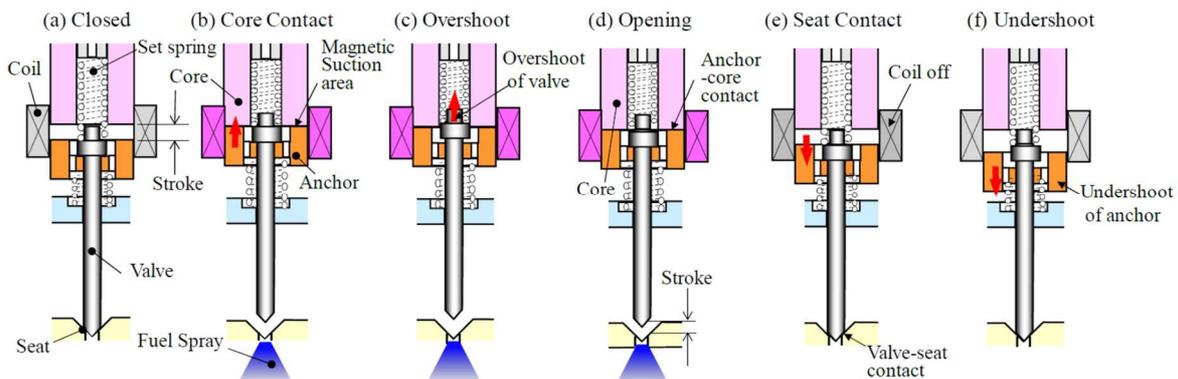


Fig.8-1 Valve behavior of injector

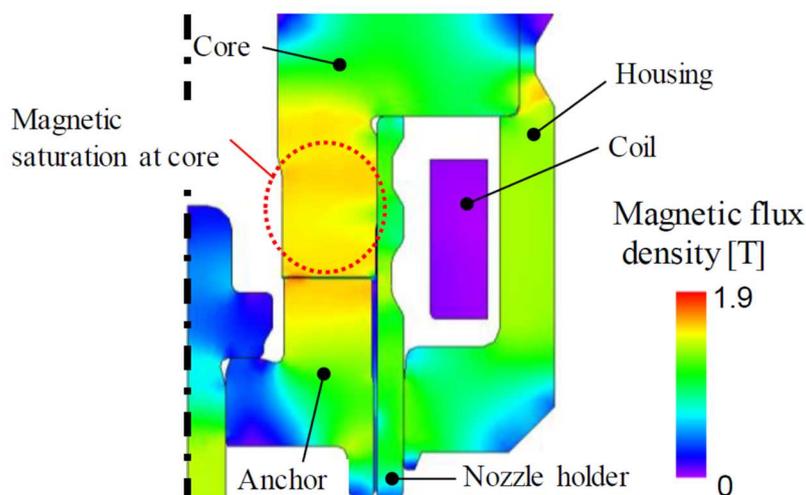


Fig.8-2 Magnetic flux density of static magnetic field

「ガソリン直噴システムの多段噴射における微小 q 噴霧の開発 (第2報)」⁸⁻²⁾と題し、葛原らにより報告されている。第1報としては自動車技術会2018年秋季大会において、ガソリン直噴システムの多段噴射制御における微小噴射時の噴霧特性向上に関して報告している。本報では、著者が独自に開発した筒内可視化手法による燃焼解析を行っている。噴霧性能向上の着眼点を明確化し、第一報で提案した噴孔前流路高さの最適化と噴孔への流れ込みの効率を追求し

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 9 No. 4 2019

たインジェクタ内部構造に関して、説明している。まず、燃料噴射圧力を 20, 35, 60MPa とした場合の、燃焼可視化画像、図示平均有効圧力の変動分ならびに噴霧の代表特性を考察している。図 8-3 には、量産エンジンにおける燃焼解析が可能な可視化システムを示しており、有用なものである。微小燃料噴射量の特性的考察を踏まえ、図 8-4 に噴孔近傍での燃料速度、流れ場に着目したコンセプト（著者らは、High flow コンセプトと説明している）を提案している。3 種類の噴孔近傍の流れ場を変更したインジェクタを試作し、噴霧・流れ解析を可視化と CFD により実施し、噴霧特性、燃焼挙動を評価している。著者らが提案している High flow コンセプトにより、微粒化と同時にノズル前端での残留燃料を低減できることを確認している。このコンセプトを用いたインジェクタは、着火直前の微小燃料噴射に対応し、微小 q 噴霧の燃焼挙動は、輝炎での燃焼を大幅に低減しており、ノズル先端に残留する燃料による後燃え輝炎も同時に低減できている。（河原）

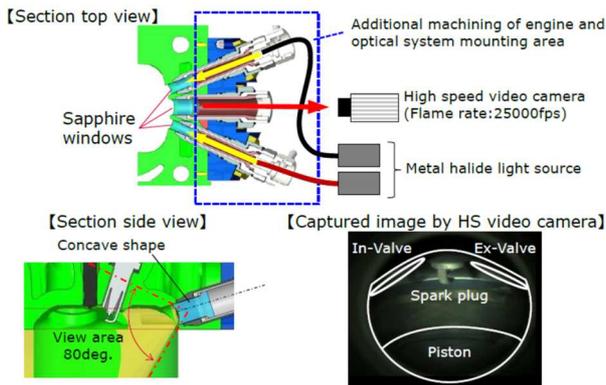


Fig.8-3 Combustion visualization system

	Base	Base(-50%)	High flow
Flow path height toward injection hole	Base	-50%	-50%
Flow coefficient of injection hole inlet	-	-	High flow
No rapid expansion in flow path	-	+	+
Small sac volume	-	+	+
Space sufficient for flow direction changing toward nozzle hole	+ Large space	-	+ Avoidance of flow separation
Nozzle design image			

Fig.8-4New Nozzle Design Concept

【参考文献】

- 8-1) 草壁 亮, 安部元幸, 三宅威生: 高速応答、微小噴射を実現するガソリンインジェクタ磁気回路の新構造, 第 29 回内燃機関シンポジウム, 講演番号 75
- 8-2) 葛原浩司, 鬼頭孝範, 青柳賢司, 柴田 仁, 安藤彰浩: ガソリン直噴システムの多段射における微小 q 噴霧の開発 (第 2 報), 第 29 回内燃機関シンポジウム, 講演番号 76

9 着火・燃焼

本セッション着火・燃焼では 4 件の発表があり、いずれも SI 機関に供する燃料や添加剤に関する研究発表であった。広島大学 三好による「ニトロメタン混合燃料の SI 燃焼特に関する反応解析 (講演番号 NO. 33)」⁹⁻¹⁾ は、ニトロメタン (NM) の添加により SI 機関の燃焼速度を向上し希薄限界を拡張する可能性を示した既往の実験的検討に対し、詳細化学反応機構からその効果を解明することを目指した研究であり、大変興味深かった。図 9-1 のように、neat NM の層流燃焼速度と当量比の関係は、ガソリンサロゲート (S5R) と全く異なるものの、NM を S5R に添加しても S5R の燃焼速度にほとんど影響しない。一方、図 9-2 のように自着火特性については、NM における C-N 結合解離エネルギーが C-C 結合解離エネルギーよりはるかに小さいことから、800K 程度より高温側で NM の分解反応が進むことで自着火遅れを明確に短縮することが示された。これにより、僅かな NM の添加でも S5R の燃焼を活発化させることが示され、燃焼速度の促進効果が層流燃焼速度のみならず自着火特性の効果を含む可能性が示唆された。なお、本セッション全体を通し、非常に活発な質疑応答が為されたことから、聴講者の関心の高さがうかがえた。(辻村)

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 9 No. 4 2019

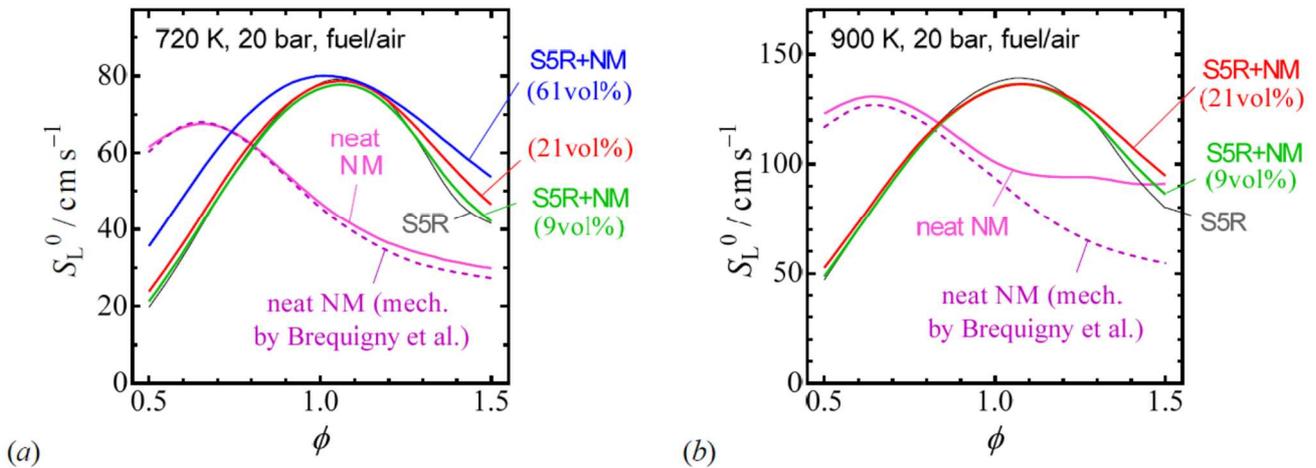


Fig. 9-1 Calculated laminar flame propagation velocities of air mixtures of nitromethane, gasoline surrogate (S5R), and nitromethane blended with S5R. (a) 720 K, 20 bar. (b) 900 K, 20 bar.

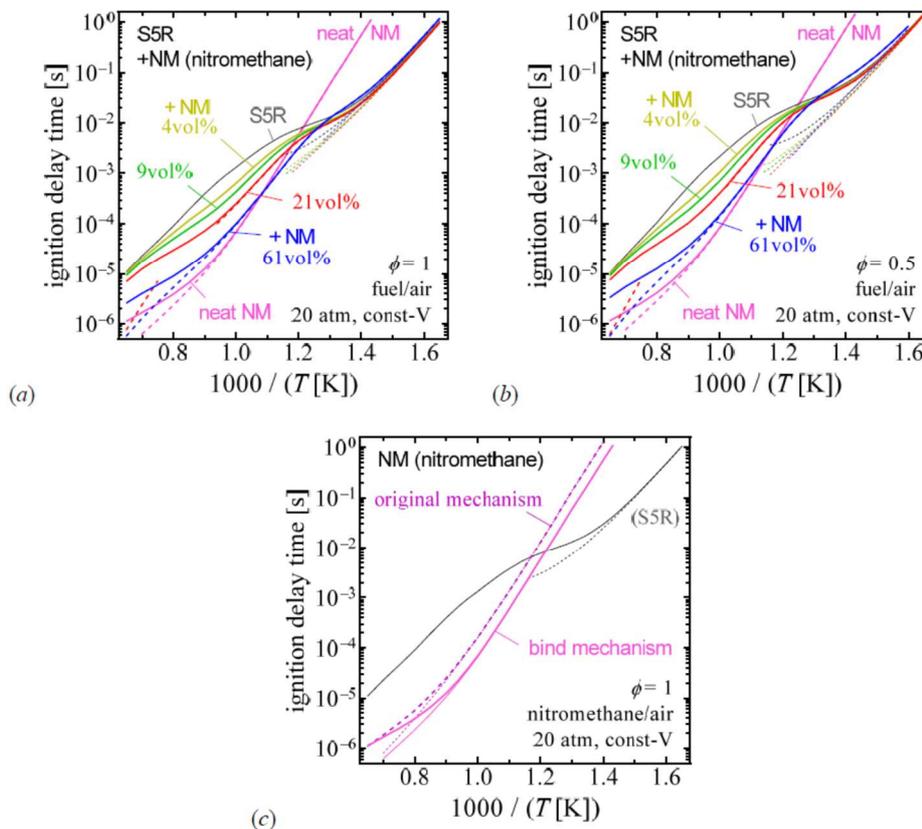


Fig. 9-2 Calculated constant-volume ignition delay times of air mixtures of nitromethane and blends with gasoline surrogate S5R. (a) $\phi = 1.0$, 20 atm. (b) $\phi = 0.5$, 20 atm. (c) comparison with original model

【参考文献】

9-1) 三好 明: ニトロメタン混合燃料のSI 燃焼特性に関する反応解析, 第29回内燃機関シンポジウム, 講演番号33