

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 8 No. 7 2018

JSAE エンジンレビュー

Report : 第 28 回内燃機関シンポジウム

コラム : どこでもドアは自動車に代われるか？



公益社団法人 **自動車技術会**

- コラム：どこでもドアは自動車に代われるか？ 1
Can "DOKODEMO door" replace a vehicle?
菊池 勉（編集委員，日産自動車）
Tsutomu KIKUCHI (NISSAN MOTOR CO., LTD.)
- Report：第28回内燃機関シンポジウム 2
Report of the 28th Internal Combustion Engine Symposium
下田 正敏，西川 雅浩，野口 勝三（編集委員）
佐藤 唯史（ケーヒン），田上 公俊（大分大学），
中野 博紀（三菱重工業エンジン&ターボチャージャ），名田 謙（徳島大学）

■ 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）

奥井 伸宜（自動車技術総合機構）

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）

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：2018年11月22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. 8 No. 7 2018

どこでもドアは自動車に代われるか？

Can “DOKODEMO door” replace a vehicle?



菊池 勉

Tsutomu KIKUCHI

JSAE エンジンレビュー編集委員

日産自動車（株）

NISSAN MOTOR CO., LTD.

子供が幼いころ、ドラえものの道具で一番欲しいものは何かという話をすると、“どこでもドア”は常連だった。ご存じのようにドアを開くと時間や空間を超えて移動できる道具だ。現実的には時間を超えるのは難しいが、空間を移動するのはバーチャル技術が進歩すると疑似的には可能だ。出社は家の机の前に座りボタンを押すだけで一瞬にして3Dのバーチャルオフィスに座っていて、隣に座っている同僚と挨拶をする。出張は不要で相手の会議室のボタンを選択して世界中のメンバーとの会議が開始される。こうなると、もはや通勤、出張や旅行含め自動車や電車等の移動手段は不要になってしまうのであろうか？

オーストリアの哲学者のイリッチは、どんな形態にせよ、人間の場所の移動すべてを「交通」と呼び、人のエネルギーを使う徒歩や自転車などの“自律的移動”と、他のエネルギー源を用いて移動する自動車や鉄道などの“他律的な運輸”に分類した。バーチャルによる疑似移動は第三の分類になるのであろうか。この疑似移動は、遠隔地とのコミュニケーションを人の移動なしに実現するものであり、時間の効率や移動コストの観点からはメリットが多い反面、いつ、どこにいても他人が入り込んでくることには嫌悪感がある。人が行うことの効率を向上することは本当に嬉しいことなのか、失うことはないのか？バーチャルな移動をもの作りの観点から考えてみる。

小生が入社したとき設計は手で図面を書いていった。例えば吸気系の部品を設計するには、クランクシャフトのセンターポイントから、ブロック、ヘッドガスケット、シリンダヘッド等の図面を入手して積み上げて作図する必要があった。そのためにはヘッドガスケットはボルトで締め付けるとどの位の厚さになるのかを考慮したり、シリンダヘッドへ取り付け用のボスを付けるためには、ヘッド内の流れや、鑄造工程を理解したり、振動データを入手して強度計算したりと、多くの専門家とコミュニケーションするための移動が必要であった。結果として自分の部品以外の成り立ちを学び、エンジンや車全体との関係を実体験として理解する機会があった。たとえボルト一本であっても車を作っている関係性の理解を叩き込まれた。

現在はCADにより形状はデータベース化され、作業は格段に効率的になったが上記の自分以外の領域を理解するコミュニケーションの機会が減った。狭帯域な専門家が生まれる要因かも知れない。残念ながら、教科書を読んでも得ることは難しい。

寄り道してバーチャル旅行を考えてみる。自宅で世界各地を巡ることができ、実際に行くことが困難な状況においてはメリットが大きいことはもちろんである。しかし過去の旅行で自分の心に残っていることを振り返ると、潮の香り、太陽のまぶしさ、息も凍る寒さ等、その場所の五感とセットであり、出会った人々とのコミュニケーション、例えば現地の人と一緒にお酒を酌み交わしたことが強く印象に残っている。これは移動や見るという目的以外の間接的に得られるものが旅行体験の幅を広げているものと思う。

“どこでもドア”から話が散らかってしまっただが、バーチャル移動は機能の点では、自動車の代替になるが、前述した移動ともなう間接的な体験の方が大事であることが見直され、リアルな移動は残り続けるというのが結論。古来日本人は師弟関係、匠、道を究める等で表現されるように、もの作りを通じて他者とコミュニケーションし自分を磨いてきた。効率化は良いことだが、そこで空いた時間を直接的でない“横道のコミュニケーション”に時間を費やすことが大切。価値の多様化は必然だが、日本人古来の特徴を失わないようにしたい。

将来は誰にでも入手できる出来あいのバーチャルではなく、むしろ個人の要望にあったオーダーメイドの移動や、物を持つことの価値が高くなっているのではないかと。そのような価値の場を車という移動体を通じて提供しているのかもしれない。

第 28 回内燃機関シンポジウム

－ 磨き上げられるエンジンシステム技術 －

2017 Internal Combustion Engine Symposium

共催：公益社団法人自動車技術会（幹事学会），一般社団法人日本機械学会

会期：2017 年 12 月 6 日（水）～8 日（金）

会場：福岡リーセントホテル

Report: 下田 正敏, 西川 雅浩, 野口 勝三（編集委員）

佐藤 唯史（ケーヒン），田上 公俊（大分大学），中野 博紀（三菱重工エンジン&ターボチャージャ），名田 謙（徳島大学）

Masatoshi SHIMODA, Masahiro NISHIKAWA, Katsumi NOGUCHI (JSAE ER Editorial Committee)

Tadafumi SATO (Keihin Corporation), Kimitoshi TANOU (Oita University), Hiroki Nakano (MHIET), Yuzuru NADA (Tokushima University)

1 基調講演

基調講演 1 として安部静生氏（トヨタ自動車）により「電動化時代を迎えたパワートレイン開発の方向性」，基調講演 2 として山本博之氏により「内燃機関進化による CO2 低減の貢献」と題した時宜を得た二つの講演が行われた。

1.1 基調講演 1 「電動化時代を迎えたパワートレイン開発の方向性」¹⁻¹⁾

図 1-1 にトヨタの基本方針である 2050 年 CO2 90%低減（2010 年比），殆どの車種は HV/PHV にしていく（エンジン存続）考え方を示す。ハイブリット技術は，PHV・EV・FCV の要素技術を含むコア技術であり，EV は PHV よりエンジンを外したものであり，PHV は HV に外部充電機能を追加したものであり，FCV は HV のエンジンを燃料電池に置き換えたものである。

新型プリウス HV の燃費向上の考え方と取組内容を図 1-2，1-3 に示す。トータル 25.2% の改善のうち車両 7%，パワートレ 18%であり，パワートレの燃費向上の内訳は，エンジン効率向上，HV 電気ユニットの損失低減，システムとしての両者の相乗効果であるがエンジンが 28%であり取り分が一番大きい。エンジンの効率改善は，図 1-4 に示すように①エンジンの高タートル化による高速燃焼と EGR 率の拡大 ②2 系統冷却システム等によるヒートマネジメント ③フリクション低減 によるものである。

PHV への展開については，HV システムを備えることで EV の持つ不安を解決しようという ①航続距離不安なし ②専用充電インフラ不要 ③手に届く価格 を狙ったものである。プリウス PHV の実証実験として 2009 年より欧州，中国日本，米国で約 600 台のデータを図 1-5 にまとめる。1 日 2 回充電している場合は年間の燃料削減率は 62%であり，充電回数が少なくなるとプリウス HV の燃費に近づく。初めの目標の CO2 90%削減のためには，

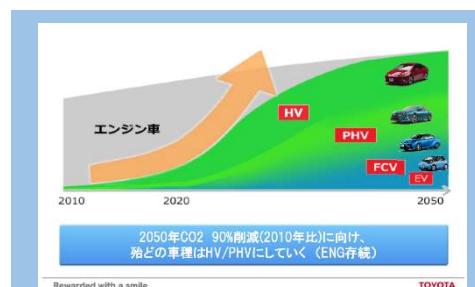


Fig. 1-1 トヨタの環境戦略



Fig. 1-2 HV: 燃費向上の考え方と取組み

内容～燃費寄与率～

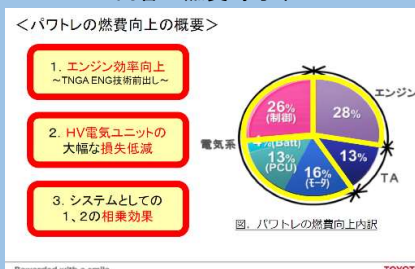


Fig. 1-3 HV: 燃費向上の考え方と取組み

内容～燃費向上概要～

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 8 No. 7 2018

PHV の CO2 排出量は HV に対して半減以下が必要となる。

図 1-6 にガソリン車, HV, PHV, EV のパワートレーンコストの現状をまとめる。PHV, EV は電池コストが大幅の増加するため電池コストの低減が必須となる。そのうえで電動化時代のエンジンに求められるものを図 1-7 にまとめる。HV, PHV 共にエンジンの高効率化, コストダウン, 軽量化, ダウンサイジング, さらにゼロエミッションの技術開発が求められる。(下田)

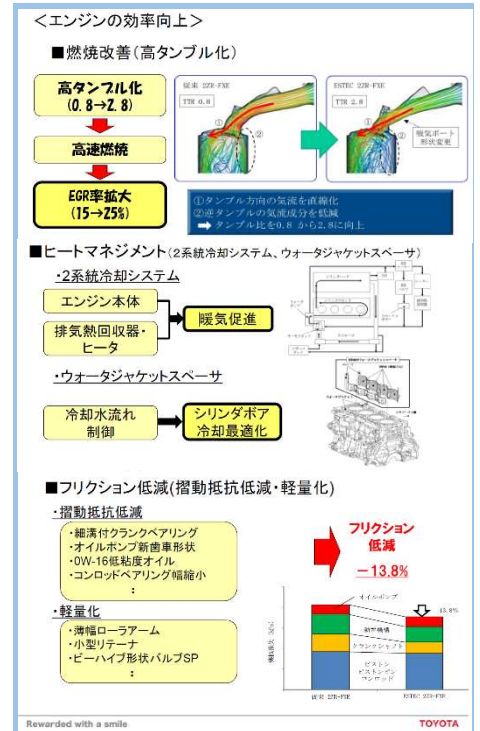


Fig. 1-4 HV: 燃費向上の考え方と取り組み
内容～エンジン効率向上～

Parameter	France	Japan	USA
車両台数	58 台	145 台	65 台
配車開始日	2010.04.15	2009.12.8	2010.06.1
総走行距離	592,234 km	1,262,363 km	595,510 km
年間平均走行距離	19,300 km	9,500 km	13,400 km
総トリップ回数	55,581 回	167,884 回	53,397 回
総充電回数	10,749 回	37,449 回	10,672 回

・データは半年毎の定期点検時に回収
・70/159/73台(仏/日/米)全車両のデータ回収済み
・そのうち走行距離の短い車両(500km以下)を除いた
58/145/65台についてデータ解析

Fig. 1-5 トヨタのPHV展開～プラグインハイブリッド車実証実験～

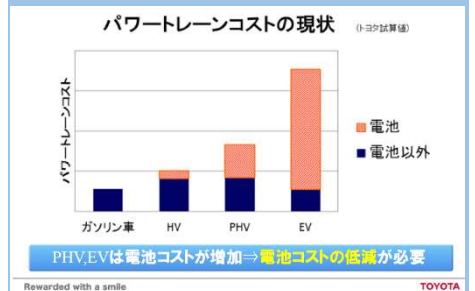


Fig. 1-6 電動化の課題～電池のコスト～

- 【電動化時代のエンジン】**
- <HV>
- ・高負荷域の効率向上
 - ・コストダウン、軽量化、ダウンサイジング
- <PHV>
- ・使用頻度激減
⇒ 画期的コストダウン、軽量化、ダウンサイジング
 - ・ゼロエミッションへの技術開発

Fig. 1-7 将来のHV/PHV用エンジン

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 8 No. 7 2018

1.2 基調講演 2 「内燃機関進化による CO2 低減の貢献」¹⁻²⁾

前講演が車を使用する立場からエンジンの今後を考えたものに対して、本講演は、Well-to-Wheel で CO2 を考えた場合、再生可能エネルギーをどう使うべきかを論じ、その中でエンジンはどうするかを考えたものである。図 1-8 は Well Bellow 2°C に向けた IEA (国際エネルギー機関)、IRENA (国際再生可能エネルギー機関) の提言 : 66% 2°C シナリオであり、効率改善と再生可能エネルギーが重要であることを示している。そのためには、図 1-9 に示すように 2050 年には効率を改善してエネルギー供給を 27% 削減し、65% を再生可能エネルギーにする必要がある。しかし図 1-10 に示すように New Policy Scenario では化石燃料比率が漸減するも 2035 年で 3/4 を占めるので、貴重な再生可能エネルギーは、CO2 低減効果が大きくなるように使うべきである。EV の CO2 低減効果を Well-to-Wheel を検討したのが図 1-11 である。平均電力の CO2 においては、EV はガソリン車より少ないが、個別電力の CO2 においては LNG 発電 EV < ガソリン車 < 石油発電 EV < 石炭発電 EV となる。表 1-1 は内燃機関を進化させた場合の比較で、LNG 火力発電の場合の Well-to-Wheel の CO2 発生量を下回るにはエンジンにおいて CO2 33% 以上の低減が必要になる。これは熱効率 50% 以上改善に相当する。これは図 1-12 に示すように、経済合理性の観点からも、電源のゼロ CO2 化を進めてから、EV の普及を図るのが合理的である。

そこでエンジンの今後の進化の考え方であるが、圧縮着火による超リーンバーンを実現し、さらに熱伝達、熱伝導抑制による冷却損失低減を検討している。前者においては Spark Controlled Compression Ignition (スパークプラグによる点火を制御因子とした圧縮着火) により着火燃焼成立範囲の拡大を目指している。後者においては高応答遮熱による熱効率改善を目指している。今後の進展を期待したい。(下田)

【参考文献】

- 1-1) 安部 静生, 電動化時代を迎えたパワートレイン開発の方向性, 内燃機関シンポジウム基調講演集, 2017
- 1-2) 山本 博之, 内燃機関進化による CO2 低減への貢献, 内燃機関シンポジウム基調講演集, 2017

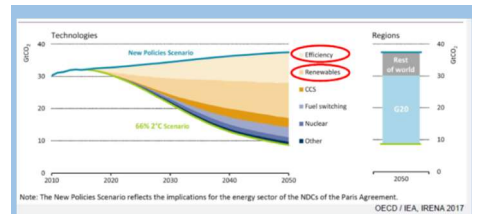


Fig.1-8 Well Bellow 2°C に向けた IEA の提言 : 66% 2°C シナリオ

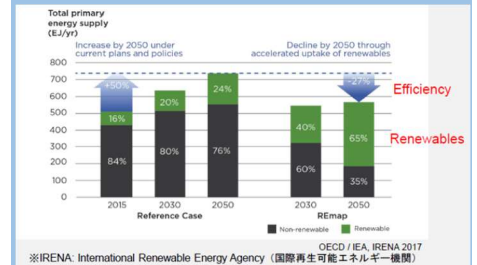


Fig.1-9 グローバルな総一次エネルギー供給 2015-2050

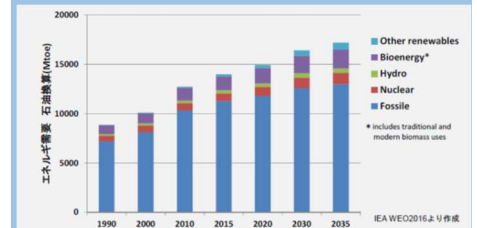


Fig.1-10 New Policy Scenario での世界の一次エネルギー需要

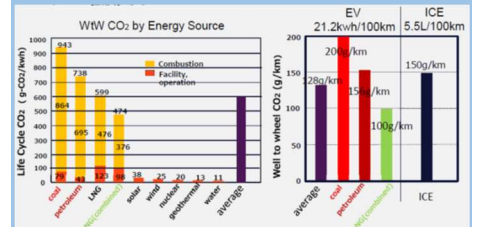


Fig.1-11 EV の CO2 低減効果 : Well-to-Wheel CO2

Table.1-1 内燃機関を進化させた場合の Well-to-Wheel CO2

	ガソリン車	電気自動車 (21.2kWh/100km)		
		石炭発電	石油発電	LNG発電 (Combine)
現状	150	200	156	100
CO2低減効果を最大化する再エネ代替順		石炭発電EV⇒石油発電EV⇒ガソリン車⇒LNG発電EV		
進化時	>33% 低減 < 100	200	156	100
CO2低減効果を最大化する再エネ代替順		石炭発電EV⇒石油発電EV⇒LNG発電EV⇒ガソリン車 先に火力発電を再エネで代替 その間、自動車は高効率内燃機関を使う		

日本エネルギー経済研究所開発のエネルギー最適化モデルを使ってマツダ試算

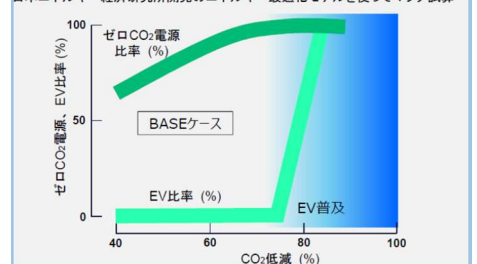


Fig. 1-12 経済合理性の観点からの提言

2 CI 機関

CI 機関 3 では、4 件の講演があり、SIP の掲げる熱効率 50% の実証に向け、多くの報告がなされた。その中から、等容度の改善を狙った 2 件の報告を紹介させて頂く。どちらも、製品化を視野に入れ、等容度と背反となる事象をしっかりと考慮し、トレードオフの改善としてまとめられている。また、いずれもシミュレーションをもとに現象を理解し、設計パラメータを制御しながら、トレードオフの改善を実証している。

北大の天沼ら²⁻¹⁾は、「遺伝的アルゴリズムを用いた予混合化ディーゼルエンジンの燃焼騒音と熱効率の最適化」と題して講演を行った。等容度と騒音のトレードオフ改善に向けて噴射の多段化を提案している。事前にシミュレーションを用いて、理想的な熱発生モデルを提案するとともに、実機では多変数のショットパラメータに対して遺伝的アルゴリズムを用いて最適化する手法を適用した。機械的に最適化した熱発生パターンが、シミュレーションにて提案した理想的な熱発生モデルと一致することを示し、理論の妥当性を証明している。

試験機は、コモンレール式 85×96.9mm の単筒エンジン(図 2-1)。筒内圧の周波数特性に、コヒーレント法にて予め計測した構造減衰を考慮して、燃焼騒音の評価を行っている。評価ポイントは、実機の中低負荷を想定し、IMEP 0.7MPa(2000min⁻¹)としている。事前シミュレーションでは、噴射の多段化と燃焼の長期化の効果をそれぞれ比較している。噴射の多段化では低周波域(4000Hz 以下)に噴射段数-1 個の反共振点ができる消音スパイク効果を確認し(図 2-2)、燃焼の長期化では高周波域(4000Hz 付近)の騒音低減を確認している(図 2-3)。これらの結果から、理想的な熱発生モデルとして、両特性を組合せた 5 段噴射かつ中央段の発熱量が多い熱発生パターンを提案している(図 2-4)。次に、実機では、熱効率と騒音の評価関数をもとに遺伝的アルゴリズムを用いて多変数のショットパラメータを最適化する手法を適用した。その結果、機械的に最適化された熱発生パターンが、シミュレーションをもとに提案した熱発生モデルと一致することが示され、理論の妥当性を確認した(図 2-5)。定量的な結論として、噴射段数を 2 段から 5 段に増やしショットを最適化することで、熱効率同等で燃焼騒音を-8.7dBa も低減できることを実証している。トレードオフの改善効果が大きいことに加えて、多入力/多出力となる複雑なディーゼル燃焼のキャリブレーションに機械的最適化を適用した手法も興味深い。事前シミュレーションによってカラクリを得ているため、特殊解となりやすい機械的に最適化されたショットパラメータの物理的意味も理解することができている。一方で、今回は熱効率と騒音を評価関数としたが Soot の悪化が気になる。排ガスを含めた評価関数とした場合のトレードオフ改善も確認して頂きたい。

京大の堀部ら²⁻²⁾は、「メイン噴射分割によるディーゼル機関の熱効率向上」と題して講演を行った。等容度と冷損のトレードオフ改善による熱効率向上を目指し、メイン噴射の分割を提案している。実機でメイン噴射の分割割合を調整した場合に、熱効率が向上することを実証するとともに、現状の CFD 解析に対する課題を考察し、モデル化に伴う基礎データの重要性を説いている。

試験機は、コモンレール式噴射を用いたボア×ストローク 85×96.9mm の単筒エンジン(図 2-6)である。等容度と冷損の最適化のために、パイロット、プレ噴射に続くメイン噴射を一

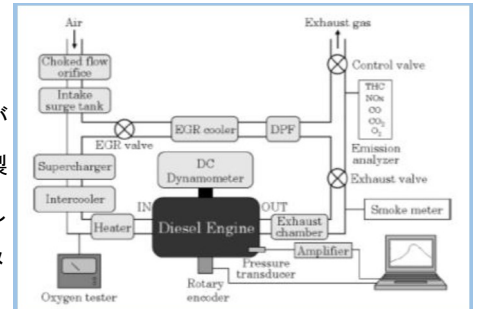


Fig. 2-1 試験機

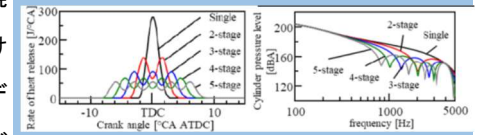


Fig. 2-2 燃焼騒音特性(多段噴射) [sim.]

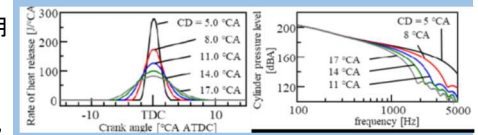


Fig. 2-3 燃焼騒音特性(燃焼の長期化) [sim.]

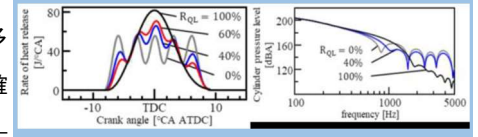


Fig. 2-4 理想的な熱発生パターン[sim.]

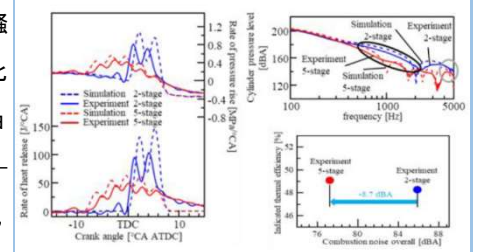


Fig. 2-5 最適化試験結果

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 8 No. 7 2018

定の割合で2段に分割しインターバル0で噴射している(図2-7)。また、熱動定解析を行うとともに、CFD解析にはAVL FIREを用いている。評価ポイントは、実機の中高負荷を想定し、IMEP 1.4MPa(2250min⁻¹)としている。実機にて、メイン分割時の後段噴射量を2, 4, 6, 8mg/injと増やしていくと、熱効率は向上する(図2-8)。熱動定解析より、後段噴射量を増加させるにつれて、等容度は低下するが、冷損が大きく低減し、熱効率が改善していることが確認できる。結果として、メイン噴射分割割合の最適化により熱効率は0.4%向上することを実証した。また、初期のCFD解析にて定性的な傾向が再現しなかった課題に対して、少量噴射の噴射率立上り/立下り時の噴霧拡がり角が大きくなることに着目し、メイン後段噴射の噴霧拡がり角のみ拡大した結果、実験結果をより再現しモデル精度を向上させている(図2-9)。しかし、完全に実測結果を再現できていないことから、少量噴射における噴霧の基礎データの充実を求めている。CFD解析における熱効率に感度の大きいインプットを特定することは、実機における律速な設計パラメータを見極めることに繋がるので、今後もモデル精度の向上を進めて頂きたい。

両報告とも、噴射の多段化(分割)というアイデアを提案し、トレードオフの改善を実証している。ディーゼル燃焼の各種トレードオフの改善に、インターバル0の多段噴射がキになる可能性が高い。いずれの報告とも、製品化に向けたポイントは、様々な環境変化やばらつきがある量産機において如何に熱発生を緻密にコントロールできるかにあると感じる。東大の高橋ら²⁻³⁾は「ディーゼルエンジン制御モデルにおける燃料噴射段数の拡張」を報告し、多段噴射時の熱発生をオンボードで推定するモデルを提案しており、燃焼制御の自由度を向上させるとともに、多段噴射の実用化をサポートしている。理想的な燃焼モデルを追究するとともに、同時に制御モデルも構築し、高効率エンジンの製品化を目指したい。(中野)

【参考文献】

- 2-1) 天沼泰将, 岡本雄樹, 山本航平, 柴田元, 小川英之, 小橋好充, 第28回内燃機関シンポジウム講演論文集, NO. 20178024
- 2-2) 堀部直人, 包智超, 平山一樹, 横山卓司, 川那辺洋, 石山拓二, 第28回内燃機関シンポジウム講演論文集, NO. 20178016
- 2-3) 高橋幹, 酒向優太郎, 山崎由大, 金子成彦, 第28回内燃機関シンポジウム第講演論文集, NO. 20178079

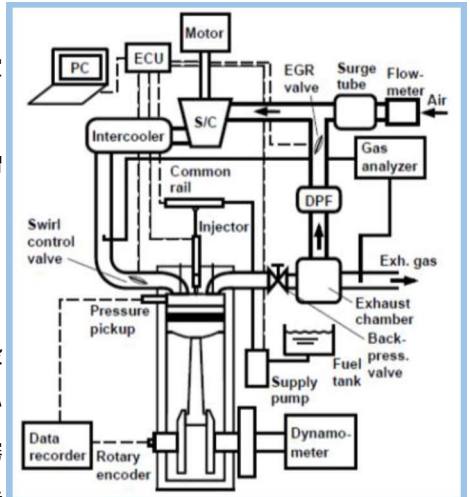


Fig. 2-6 試験機

Name	p160	p200	p270	p270A	A2	A4	A6	A8	DA
Inj pressure [MPa]	160	200	270	270	270	270	270	270	270
Inj quantity [mm ³ /cyl]	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
P160 timing [°ATDC]	-20.3	-	-	-	-	-	-	-	-
P200 timing [°ATDC]	-	-20.3	-	-	-	-	-	-	-
P270 timing [°ATDC]	-	-	-20.3	-	-	-	-	-	-
1 st quantity [mm ³ /cyl]	42.4	41.7	41.5	40.8	39.9	39.9	34.9	31.7	31.7
1 st timing [°ATDC]	-1.5	-	-	-1.5	2.1	4.1	5.8	8.7	6.8
2 nd quantity [mm ³ /cyl]	-	-	-	-	10.6	10.4	10.1	8.9	6.8
2 nd timing [°ATDC]	-	-	-	-	-	-	-	-	2.0
Main quantity [mm ³ /cyl]	-	-	-	-	-	-	-	-	14.6
Main timing [°ATDC]	-	-	-	-	-	-	-	-	18.9
IMEP [MPa]	11.6	14.0	15.8	18.2	19.2	19.1	18.1	19.2	18.9
Intake O ₂ conc. [%]	19.3	19.0	18.7	18.2	18.1	18.0	18.1	18.0	18.0

Fig. 2-7 噴射条件

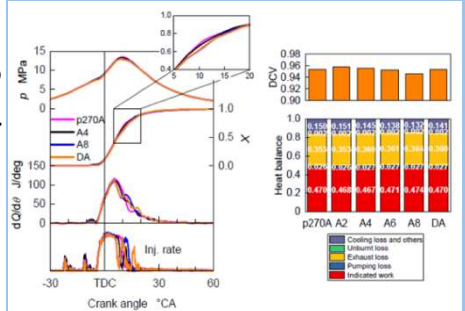


Fig. 2-8 試験結果

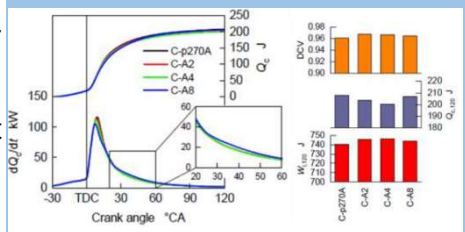


Fig. 2-9 CFD解析結果

3 排気後処理

ディーゼルエンジンから排出されるNOx低減技術として、尿素水を車両に搭載し、その加水分解により生じるNH₃を還元剤としてNOxを選択的に還元する尿素SCR(Selective Catalytic Reduction)システムが近年導入されている。このシステムでは、未燃HCや硫黄等による触媒の被毒や触媒性能低下が問題となる。高度で複雑な尿素SCRシステムを短期間で、より高性能かつ効率的に開発するためには、開発工程の初期段階における数値シミュレーションの活用が有効と考えられる。今回は、「排気後処理」セッションのトータル6件の発表のうち、尿素SCRシステムのシミュレーションおよびモデル化に着目した2件を紹介する。

北海道大学の小祝らは、「アンモニア-SCR反応モデルの構築と炭化水素の触媒阻害影響」³⁻¹⁾と題した発表を行った。サロゲートガスを用いた粉末触媒試験由来の触媒特性(頻度因子、活性化エネルギー)を入力することで、様々な触媒構造や使用条件へ応用できるモデルを開発し、サロゲートガス試験結果とモデル計算結果を比較することでその有効性を検証した。手段として、サロゲートガスをリアクタ内の粉末ゼオライト触媒に導入し(図3-1)、前後でのガス組成の変化より算出した反応量から反応速度定数を得、そのアレニウスプロットから活性化エネルギーおよび頻度因子を求めている。また、シンプルな化学反応スキームとなるよう、Olssonらの手法を参考にモデルを改良し、表3-1に示すNH₃吸脱着反応(R1)、NH₃酸化反応(R2)、Standard-SCR反応(R3)を適用している。従来モデルにおいて課題としていた高温時のNH₃酸化反応を考慮したことで、モデル自体の精度も向上したとしている。ハニカム触媒を用いたサロゲートガス試験およびモデル計算値におけるNOx浄化率は、いずれも、触媒コート量(100 g/L、150 g/L)によらず、触媒床温度150°Cから250°Cにおいて増加し、300°C付近でピークをとり、350°C以上で減少した(図3-2)。このようにモデル計算値は実験値とよく一致しており、本モデルの有効性が示唆されている。

いすゞ中央研究所の大堀らは、「アンモニアスリップ触媒のプラントモデル構築検討」³⁻²⁾と題した発表を行った。排出ガス中のNOxを浄化するSCR触媒では、過剰に供給された尿素が原因となってNH₃スリップが生じる。その処理のため、SCR触媒の下流にNH₃スリップ触媒(ASC)を設置した場合、副生成物としてNOxやN₂Oが生成されてNOx浄化率が低下することが懸念される。そのため、NH₃酸化過程でこれらの副生成物を生じにくい、SCR触媒と貴金属触媒を複層化したASCが提案されている。筆者らは、ASCの高精度な物理モデルの構築を目的として、貴金属合金触媒上のNH₃酸化反応のモデル化と遺伝的アルゴリズムを用いた反応速度定数の同定手法を紹介している。4つの反応(表3-2)から構成されるNH₃酸化モデルを構築し、頻度因子や活性化エネルギーについては、最適化ツールとNH₃酸化モデルの連成による最適化計算により同定している。反応速度定数については、実験結果に対するNH₃酸化モデルでのシミュレーション結果の差を目的関数とし、それが最小になるように遺伝的アルゴリズムで同定している。図3-3に示されるように、得られた反応速度定数によるシミュレーション結果は実験値とよく一致しており、ASCの設計に重要なSV(Space Velocity)や貴金属担持量の影響も高い精度で予測できている。遺伝的アルゴリズムを用いた反応速度定数の同定法は、活性化エネルギーをアレニウスプロットから導き出すことが困難な場合や、平衡および副反応が影響する複雑な反応系にも適応できるな

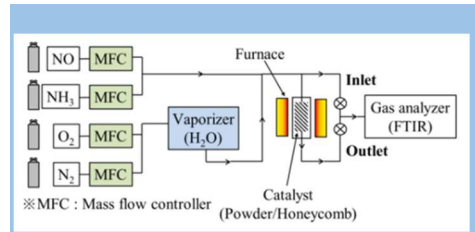


Fig. 3-1 Experimental setup of surrogate gas test

Table 3-1 Reactions and rate expressions for NH₃-SCR kinetic model

No.	Reaction	Chemical reaction formula	Reaction rate
R1	NH ₃ adsorption / desorption	NH ₃ + S1 ⇌ NH ₃ -S1	$r_1 = k_1[NH_3] \theta_{S1} - k_2 \theta_{NH_3-S1}$
R2	NH ₃ oxidation	4NH ₃ -S1 + 3O ₂ → 2N ₂ + 6H ₂ O + 4S1	$r_2 = k_2 \theta_{NH_3-S1} \theta_{O_2}$
R3	Standard-SCR	4NH ₃ -S1 + 4NO + O ₂ → 4N ₂ + 6H ₂ O + 2S1	$r_3 = k_3 \theta_{NH_3-S1} \theta_{NO}$

S1: active site k: rate constant [X]: the molar concentration θ_i : coverage of component i of specie i

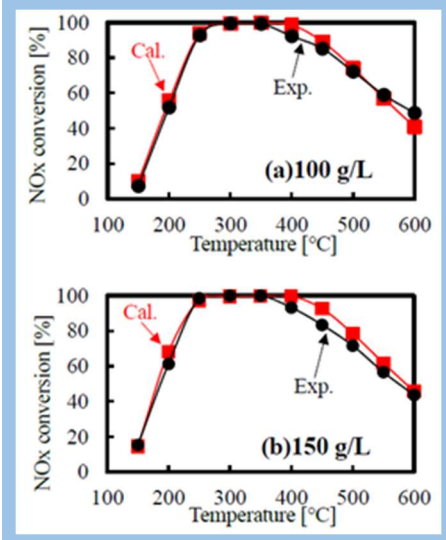


Fig. 3-2 NOx conversion of the calculations and surrogate gas catalyst supporting amount tests of (a) 100 g/L and (b) 150 g/L

Table 3-2 NH₃ oxidation model

No.	Reaction	Reaction formula	Rate expression
R1	NO oxidation	2NO + O ₂ ⇌ 2NO ₂	$r_1 = k_1 (C_{NO} C_{O_2}^{1/2} - C_{NO_2} / K_{eq})$
R2	NH ₃ oxidation to NO	4NH ₃ + 5O ₂ → 4NO + 6H ₂ O	$r_2 = k_2 C_{NH_3}^{1/2} C_{O_2}$
R3	N ₂ O formation	4NH ₃ + 4NO + 3O ₂ → 4N ₂ O + 6H ₂ O	$r_3 = k_3 C_{NH_3}^{1/2} C_{NO} C_{O_2}$
R4	NH ₃ oxidation to N ₂	4NH ₃ + 3O ₂ → 2N ₂ + 6H ₂ O	$r_4 = k_4 C_{NH_3}^{1/2} C_{O_2}$

$k_i = A_i \exp(-E_i/RT)$ r_i : reaction rate E_i : activation energy ΔG : Gibbs free energy of NO oxidation
 $K_{eq} = \exp(-\Delta G/RT)$ C_i : gas i concentration T : temperature ΔH : Enthalpy of NO oxidation
 $k_{eq} = \exp(-\Delta H/RT)$ A_i : reaction rate constant E : pre-exponential factor ΔS : Entropy of NO oxidation
 A_i : frequency factor K_{eq} : equilibrium constant

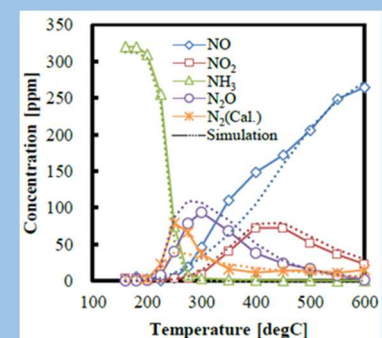


Fig. 3-3 Test result of Synthetic Gas Bench (c) NH₃ + O₂ test

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 8 No. 7 2018

ど、実用的かつ有効な手法であるといえる。(西川)

【参考文献】

3-1) 小祝隆太郎, 永島渉, 柴田元, 小川英之, 清水研一, 中坂佑太, 草鹿仁: アンモニア-SCR 反応モデルの構築と炭化水素の触媒阻害影響, 第 28 回内燃機関シンポジウム講演論文集, No. 20178053

3-2) 大堀鉄平, 岡耕平, 藤井 謙治, 大角和生, 板垣裕, 石川直也: アンモニアスリップ触媒のプラントモデル構築検討, 第 28 回内燃機関シンポジウム講演論文集, No. 20178014

4 SI 機関

SI 機関 1・2 では, 主に直噴ガソリンエンジンの粒子状物質 (PM) に関する研究や, 希薄混合気の火炎核形成・燃焼特性などの基礎的な研究が発表された。その中から 2 件の講演を紹介する。

丸山・相澤ら⁴⁻¹⁾は, 直噴ガソリンエンジンにおける PM 排出過程の理解と, その予測モデルに必要な実験データベースの構築を掲げ, 混合気形成から燃焼・すす粒子生成までの過程を時系列で調査している。なお, 本報では局所的にリッチな混合気が燃焼して生成されるすす粒子を, 壁面に付着した燃料からプール燃焼で生成されるすす粒子と区別し, パルクすす粒子と定義している。図 4-1 に示す可視領域において, 筒内燃焼場を観察した直接写真が図 4-2 である。5~16° ATDC にかけて可視領域の下部でパルクすすの輝炎が観察され, 非燃焼場における紫外レーザの影写真で, 別途観察されたリッチな混合気の領域におおむね一致すると述べている。また, 可視領域上部の点火プラグ付近で観察される輝炎は, すす粒子の堆積が実験後に観察されたことから, 付着した燃料がプール燃焼したものと推察している。図 4-3 は, 266nm の紫外レーザと 445nm の可視光レーザを用いて, 同時撮影された影写真である。観察視野は, 図 4-1 に示す可視領域の左側下部である。燃料蒸気は, 13° ATDC~TDC にかけて紫外レーザの影写真でのみ観察されるが, すす粒子は両方の影写真で確認できることから, すす粒子の影を画像処理によって除去できれば, 燃焼場における燃料蒸気の定量化が可能になると見込んでいる。計測手法や画像処理の更なる進展と, より詳細な現象の解明を期待したい。

筒内流動の強化による安定した希薄燃焼の運転域拡大を背景に, その実現に必要な知見を得る目的で, 渡邊・河原ら⁴⁻²⁾は火花放電挙動から初期火炎核形成までの現象理解に取り組んでいる。図 4-4 は, 圧縮膨張機関を用いて点火プラグ近傍を可視化した時系列画像であり, 当量比の影響を比較している。なお, ここで点火時期は-15deg. ATDC に固定され, 点火プラグ近傍の流動場は同程度としている。当量比 0.8 においては, ブレークダウン後 0.1~0.2ms の間で初期火炎核が形成され, 比較的早期に火炎伝播している様子が確認できる。一方で, 点火プラグ近傍の流動により放電チャンネルが伸長された後に, 初期火炎核が形成されるサイクルも観察されると述べている。当量比 0.78 および 0.75 では, ブレークダウン後に放電チャンネルが伸長され, その下流周辺から火炎伝播が始まり, 放電の終了と共に上流へも伝播する過程を捉えているが, 図中のサイクル以外に, 可視領域を超えて, 更に放電チャンネルが大きく伸長される場合も確認されている。当量比 0.70 で示している結果は, 放電チャンネルが余り伸長されずに, 初期火炎核が確認できているが, 大半のサイクル

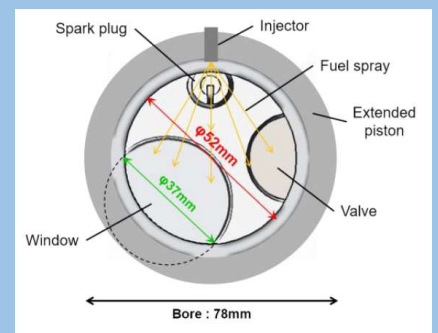


Fig. 4-1 Schematic of bottom view field

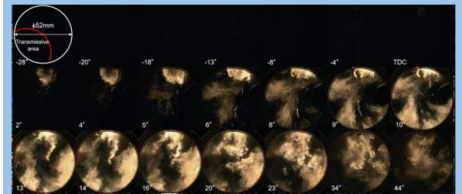


Fig. 4-2 Example high-speed direct photographs of soot luminosity for bulk combustion

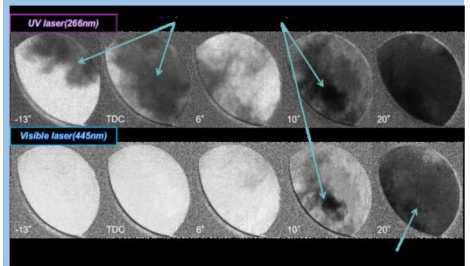


Fig. 4-3 Comparison summary of simultaneously taken high-speed UV and visible laser shadowgraphs for bulk combustion

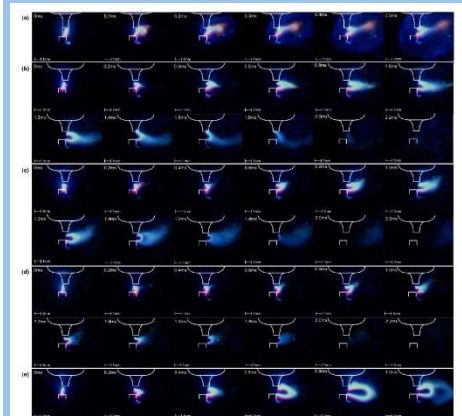


Fig. 4-4 Result of visualization from side view. (a) $\phi=0.8$, (b) $\phi=0.78$, (c) $\phi=0.75$, (d) $\phi=0.70$, (e) $\phi=0.60$

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 8 No. 7 2018

今後の燃料技術領域の発展に期待したい。

SI 機関 4 のセッションでは、高圧縮比エンジンの燃焼技術に関する講演が 2 件、サイクル変動に関する講演が 2 件の合計 4 講演があった。その中から燃焼技術（第 1 報）（第 2 報）の 2 件について紹介する。

藤川（マツダ）らは、「ガソリン高圧噴射を用いた高圧縮比エンジンの燃焼技術（第 1 報）-高圧噴射による可能性検討-」⁴⁻⁸⁾と題して講演を行った。ガソリンエンジンでは、理論熱効率 $\eta = 1 - (1/\epsilon)^{\kappa-1}$ が圧縮比と比熱比で表されるように、この二つの制御因子が重要である。図 4-9 の計算結果にあるように、比熱比が高まるリーンな状態も含めて俯瞰すると、圧縮比 17~20 辺りが熱効率の理想値となる。本報は、圧縮比を理想値まで高める時に課題となる異常燃焼に対し、高圧噴射を用いて回避する燃焼技術コンセプトを立案している。異常燃焼とはブレイグニッション、ノッキングで、いずれも燃料の自着火現象である。混合気が高温高压にさらされる時間を短縮（燃料噴射開始時期の遅角化）することで回避できる。そのため、短時間で混合気形成を完了する機能が要求される。さらに、ノッキングに対しては、筒内の乱れにより、自着火する前に火炎伝播を終了させる急速燃焼が効果的で、強い乱れを生成する機能が必要となる。シミュレーションでの検討結果、高圧噴射により以下の二つの機能を満たすことができれば、圧縮比を 17 まで高めても、低速全負荷で圧縮比 14 並の熱効率を得る可能性があることが分かったという。

①短時間で混合気を形成する機能

噴射開始から約 1.75ms 以内で蒸発し混合気形成完了

②強い乱れを生成する機能

吸気ポートにより生成される乱れ強さの約 2.75 倍

噴霧が、上記①②の機能を有しているか、噴霧単体試験にて検証を行っている。図 4-10 に蒸発割合の時間推移を示す。噴射圧 80~120MPa で噴射すれば、1.5ms でほぼ蒸発を完了しており、上記①を満足している。図 4-11 に各噴射圧における噴射開始からの時間と乱れ速度成分を示す。ポートで生成される乱れの 2.75 倍（上記②）を満たすのは、噴射開始から 1.5ms 後の噴射圧 80~120MPa であるという。これらの結果から噴射圧力 80MPa 以上の高圧噴射は、圧縮比 17 で異常燃焼を回避して、圧縮比 14 と同等の熱効率を実現できる可能性が有ると報告があった。

第 1 報に引き続き、神長（マツダ）らは、「ガソリン高圧噴射を用いた高圧縮比エンジンの燃焼技術（第 2 報）-単気筒エンジンによるコンセプト検証-」⁴⁻⁹⁾と題して講演を行った。本研究では、前報において検証した、高速混合、乱れ強化の機能を実際のエンジンに適用することで、高圧縮比エンジンにおける異常燃焼回避の実現性と、燃焼の基本的な特性を明らかにすることを目的としている。本実験における燃料噴射と点火時期の設定の考え方を図 4-12 に示す。燃料噴射と点火の間隔を限界まで短縮した状態（燃料輸送限界と定義する）において、ノッキング発生限界まで噴射と点火時期を進角したポイントを最良運転点と考えることができるという。本研究では、このセット方法に基づいてエンジン性能を評価している。図 4-13 に各噴射圧の最良運転点における熱発生率とその時の噴射開始・終了時期 (SOI・EOI)、点火時期と燃焼重心位置 (Mb50%) を示す。比較として圧縮比 14 の現行型の吸気行程噴射による結果も破線で示している。高圧の圧縮行程噴射は、現行型エンジンの燃焼に比較して燃焼期間が大幅に短縮されており、噴射圧力の上昇に応じてその効果

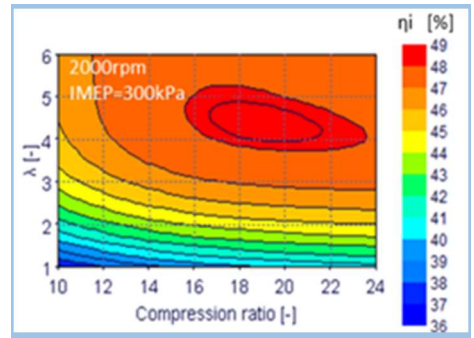


Fig. 4-9 ガソリンエンジン熱効率 map

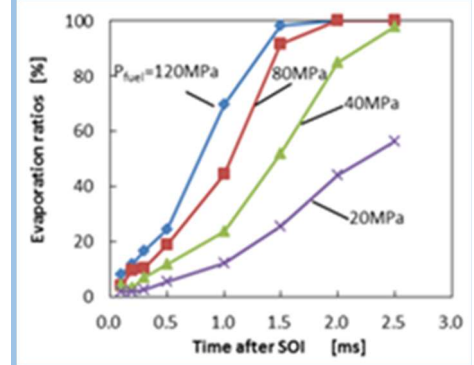


Fig. 4-10 蒸発割合の時間推移

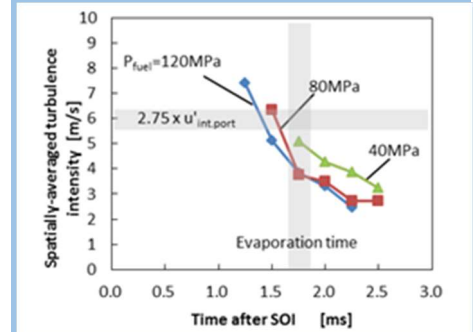


Fig. 4-11 噴射開始からの時間と乱れ速度成分

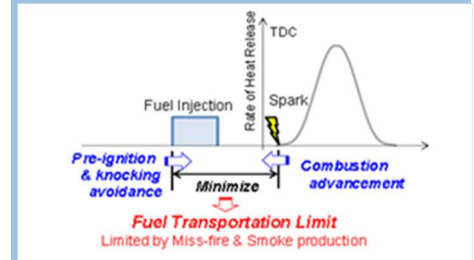


Fig. 4-12 燃料噴射と点火時期の設定の考え方

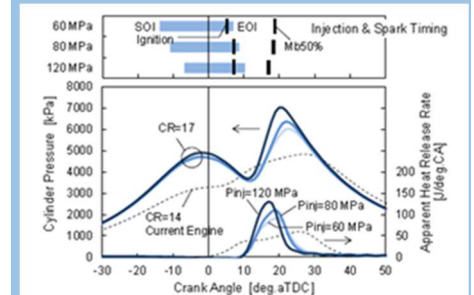


Fig. 4-13 各噴射圧による熱発生率

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 8 No. 7 2018

は顕著になるという。前報での予測通り、乱れの強化による火炎伝播速度の増加が得られているためと考えている。また、噴射圧力が高圧であるほどノッキングが緩和され、燃焼重心の進角が可能となっている。これは、高圧噴射により、噴射速度が向上し、エンドガスの反応時間が短縮された結果と推測されるとのこと。同時にスモークも噴射圧に応じて改善が確認でき、混合の促進が実現できているという。ただし、圧縮比 14 の現行型エンジンの燃焼と等容度が同等であるにもかかわらず、熱効率が低い結果となっている。この原因を明らかにするため、熱勘定とポアスコープを用いた筒内の燃焼状態の観察を行っている。その観察の結果、ピストン表面の広範囲で液膜を起因とする輝炎が観察され、これが後燃え損失として、未燃損失の大きな割合を占めることが分かったという。改善のため衝突噴霧の可視化実験を行い、衝突距離の拡大と噴孔諸元の適正化を行っている。熱勘定結果を図 4-14 に示す。未燃損失の改善により、図示熱効率は 2.1% 改善している。超高圧縮比エンジンに本燃焼技術を適用することで、高負荷域の出力、燃費を悪化させることなく、軽負荷の熱効率を改善させることが、可能になると報告があった。高圧縮比 17 のガソリンエンジンに対し、ディーゼルエンジンのような燃料の超高圧噴射を用いた、ガソリンエンジンとしてまだ実用化されていない燃焼方式である。実用化エンジンにおいて、リーン化により比熱比を適正化した場合の正味熱効率が興味深く感じられる。(野口)

【参考文献】

- 4-1) 丸山智久, 塚本崇通, 佐藤良海, 宮下和也, 近藤克文, 相澤哲哉: 紫外・可視レーザー影写真による GDI 筒内混合気・燃焼・すすの時系列可視化, 第 28 回内燃機関シンポジウム講演論文集, No. 20178060
- 4-2) 渡邊匡惟, 河原伸幸, 富田栄二: 高速度カメラを用いた初期火炎核形成過程の可視化, 第 28 回内燃機関シンポジウム講演論文集, 講演番号 21 (2017), No. 20178026
- 4-3) 酒井 康行, 三好 明: ガソリンサロゲート燃料簡略反応機構の構築, 第 28 回内燃機関シンポジウム講演論文集, 講演番号 59, No. 20178019 (2017)
- 4-4) 三好 明, 酒井 康行: ガソリンサロゲート詳細反応機構の構築, 自動車技術会 2017 年春季大会学術講演会講演予稿集, No65-17, pp. 1722-1727, 20175311 (2017)
- 4-5) SIP「革新的燃焼技術」ガソリン燃焼チームウェブサイト, <http://sip.st.keio.ac.jp/>
- 4-6) 宮元 敬範, 横尾 望, 中田 浩一, 小島 健, 青木 剛, 渡邊 学: エンジンの燃焼促進を実現するための燃料の分子構造の研究, 第 28 回内燃機関シンポジウム講演論文集, 講演番号 60 (2017) No. 20178018
- 4-7) Daishi Takahashi, Yasushi Yoshihara, Tetsuo Omura, Koichi Nakata: Combustion Development to Realize High Thermal Efficiency Engines, SAE Technical Paper, 16PFL-0709/SAE 2016-01-0693 (2016)
- 4-8) 藤川 竜也, 原田 雄司, 養祖 隆, 山川 正尚: ガソリン高圧噴射を用いた高圧縮比エンジンの燃焼技術 (第 1 報) -高圧噴射による可能性検討-, 第 28 回内燃機関シンポジウム講演論文集, 講演番号 63 (2017) No. 20178067
- 4-9) 神長 隆史, 長津 和弘, 養祖 隆, 藤川 竜也, 長野 高皓, 山川 正尚: ガソリン高圧噴射を用いた高圧縮比エンジンの燃焼技術 (第 2 報) -単気筒エンジンによるコンセプト検証-, 第 28 回内燃機関シンポジウム講演論文集, 講演番号 64 (2017) No. 20178068

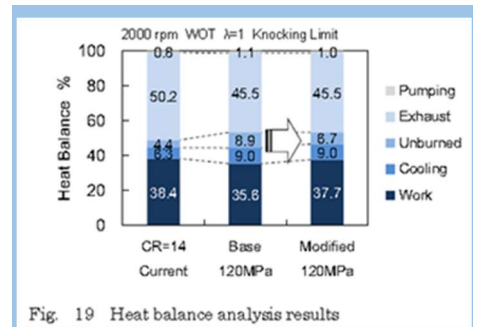


Fig. 19 Heat balance analysis results

Fig. 4-14 熱勘定結果

5 ガス機関

本セッションでは、ガス機関1・2で合計8件の講演があった。その半数がガスエンジンの特徴である副室式点火燃焼に関する研究であった。ここでは副室からの噴流と主室の燃焼の定量的相関を調べた興味深い研究を紹介する。

徳島大の山下⁵⁻¹⁾は、「天然ガス希薄燃焼エンジンの副室より噴出する既燃ガス噴流進展の解明」の題目で、新たに開発した副室直噴式CNGエンジンの報告がなされた。図5-1に新たに開発された副室直噴式CNGエンジンの燃焼室を示す。図のように燃焼室は副室を備え、その中にインジェクタと点火プラグが配置されている。

本研究では、副室式エンジンの性能向上のため、副室直噴式エンジンを模擬した定容燃焼器内の燃焼実験から、副室諸元と既燃ガス噴流の進展速度の関係、および既燃ガス噴流が燃焼期間に与える影響を明らかにしている。図5-2に副室からの既燃ガス噴流の進展速度と各種燃焼期間 (FDD, CD, HRPT) の関係を、異なる各種噴口数や噴口径に対して示す。図より進展速度が速くなると、燃焼期間が短くなること分かる。

このように副室噴流の進展速度が主室の燃焼現象に大きな影響を及ぼしていることから、本報では進展速度を予測する因子として、副室容積 V 、孔径 D 、孔数 n 、ボア径 D_B に基づき以下で示される噴流強度 G を定義し、その影響を調べている。

$$G = \frac{4V}{n\pi D^2 D_B}$$

図5-3に噴流強度と既燃ガス噴流の進展速度の関係を示す。図から噴流強度が高くなると進展速度は増加することがわかる。図5-2から進展速度と燃焼期間の間には明確な相関があるため、噴流強度は副室諸元を決定するための重要な指標になると結論付けられている。本研究結果は副室設計の重要な指針となりうることから、さらなる研究が望まれる。

(田上)

【参考文献】

5-1) 山下 裕都, 名田 謙, 木戸口 善行, 賀谷 龍, 中野 秀亮, 小林 慎一: 天然ガス希薄燃焼エンジンの副室より噴出する既燃ガス噴流進展の解明, 第28回内燃機関シンポジウム講演論文集, 講演番号71 (2017) No. 20178038

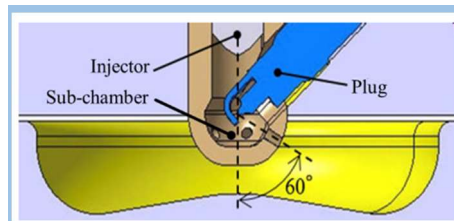


Fig. 5-1 Cross-sectional schematics of combustion chamber

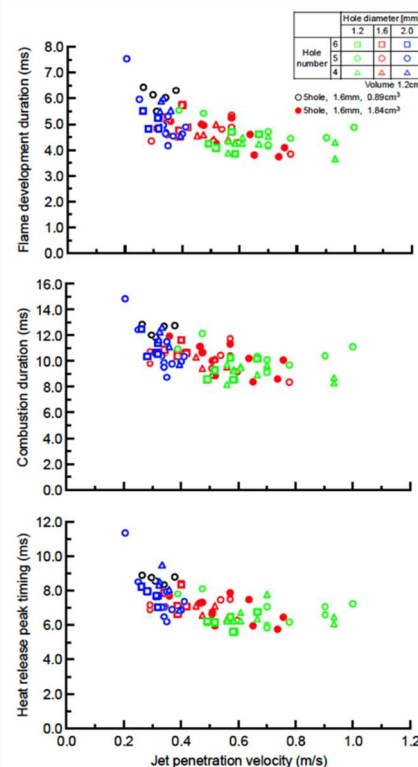


Fig. 5-2 Effects of jet penetration velocity on characteristic times of flame development duration (a), combustion duration (b), heat release rate peak timing (c)

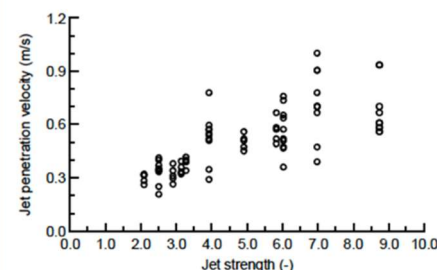


Fig. 5-3 Correlation between normalized jet strength and jet penetration velocity

6 圧力振動・騒音

本セッションでは、エンジンの振動、騒音に関して3件の講演があった。ここでは新たな試みとして、異常燃焼の発生予測に統計的な手法を取り入れた試みを紹介する。

東京大の高居ら⁶⁻¹⁾は、「統計分析を用いた過給副室式ガスエンジンのシリンダ内圧力振動メカニズムの解明」の題目で、副室式ガスエンジンにおける圧力振動の発生メカニズムの解明を行っている。具体的には「統計分析手法を用いた燃焼の分類、感度解析およびFFT解析による異常燃焼の特徴把握、副室内燃焼の物理モデル構築による異常燃焼の原因究明、ニューラルネットモデル構築による運転前段階での異常燃焼発生予測」を行っている。図6-1に通常燃焼、ノッキング、異常燃焼の圧力波形の例を示す。本報で定義される「異常燃焼」は副室点火燃焼に特有の現象であり図のようにノッキングよりも早いクラック角で発生しており、本現象の原因はまだ分かっていない。

図6-2に本研究の統計手法の流れを示す。図のように各サイクルに対して「通常燃焼」「ノッキング」と「異常燃焼」のサイクルが区別して判別されている。本報では各カテゴリに区分されたサイクルに対して感度解析、FFT解析をおこない、異常燃焼への影響因子やその特徴の明確化が検討されており、その結果に基づき、副室筒内燃焼モデルが提案され、検証されている。

最後に本報ではニューラルネットワークを用いた統計モデルにより運転条件から各燃焼の発生割合を予測するモデルが提案されている。

図6-3と図6-4にそれぞれ異常燃焼サイクルとノッキングサイクルの予測モデル精度を示す。図から高い精度で異常燃焼とノッキングを予測できていることがわかる。本予測モデルの精度が上がれば、ガスエンジンの性能向上に大きく寄与できる可能性があることから、今後のさらなる研究が期待される。(田上)

【参考文献】

6-1) 高居明弘, 山崎 由大, 金子 成彦, 佐古 孝弘, 高島 良胤: 統計分析を用いた過給副室式ガスエンジンのシリンダ内圧力振動メカニズムの解明, 第28回内燃機関シンポジウム講演論文集, 講演番号79 (2017) No. 20178039

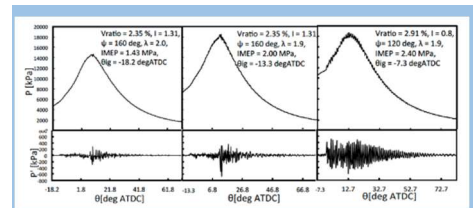


Fig.6-1 Example of raw and filtered pressure data
(left: normal, middle: knock, right: abnormal)

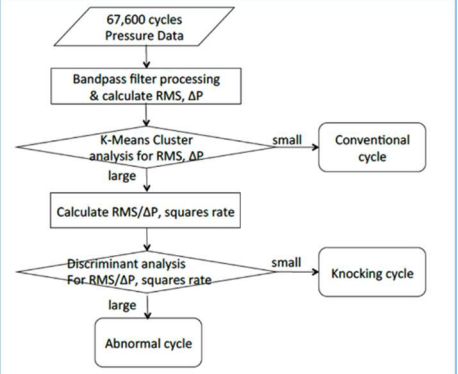


Fig.6-2 Process of statistical analysis

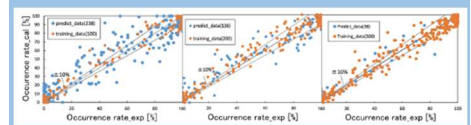


Fig.6-3 Result of statistical model for abnormal cycle
(training data number: left:100, middle:200, right:300)

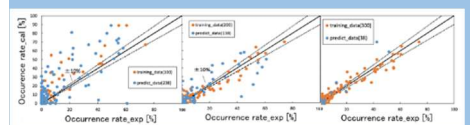


Fig.6-4 Result of statistical model for knocking cycle
(training data number: left:100, middle:200, right:300)

7 計測診断

本セッションは計測技術およびシミュレーションに関するセッションであり、4件の講演があった。このうち3件がSIP関連である。今回、SIPで開発中のシミュレーションソフトウェアHINOCAに関する2件の講演を紹介する。

HINOCAは密度ベース解法による非定常計算が可能であり、RANSとLESを選択できる。また、直行格子を採用しており、境界の複雑形状はImmersed Boundary法を用いて表現される。このため、格子生成が容易であることが特徴である。現在、各研究機関においてHINOCAに搭載する、噴霧、火炎伝播、点火および壁面熱伝達に関するサブモデルを開発中である。今回の講演では、Accordエンジンの二つの仕様の吸気ポートを対象にRANSとLESを行い(図7-1)、流動の予測精度の検証が発表された。乱流モデルはそれぞれRNG k-εモデルとWALEモデルである。

RANSから得られた結果⁷⁻¹⁾は、バルブリフトに対する流量計数とタンブル比の変化、および二つの異なる吸気ポート形状の差を定性的に再現できている。一方で、LESの流動の再現性⁷⁻²⁾はRANSに比べて良好であることが示されている。得られた流量計数は実験値と良く一致しており(図7-2)(NO.37, Fig.7)、タンブル比の予測結果は、RANSよりも実験値に近い値を示している(図7-3)(NO.37, Fig.8)。熱損失や火炎伝播に関する今後の検証においても、高い精度が期待できる結果である。(名田)

【参考文献】

7-1) 宮井 大輝, 安田 章悟, 武田 寿人, 神長 龍一, 桑原 匠史, 南部 太介, 溝淵 泰寛: RANS版HINOCAのエンジンポート定常流計算 2017内燃機関シンポジウム講演論文集, 講演番号36 No.20178072

7-2) 神長龍一, 宮井大輝, 安田章悟, 武田寿人, 桑原匠史, 南部太介, 溝淵泰寛, : LES版HINOCAのエンジンポート定常流計算 2017内燃機関シンポジウム講演論文集, 講演番号37 No20178070

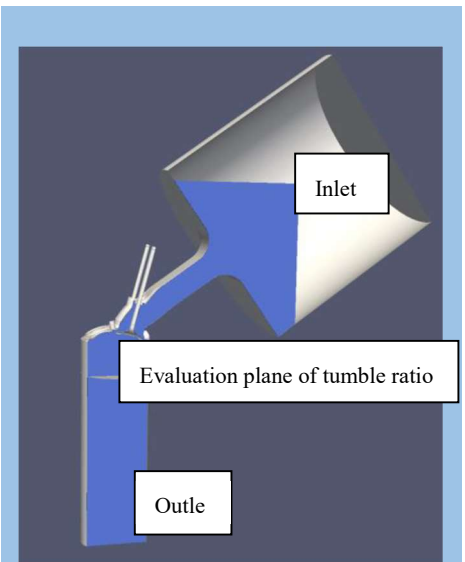


Fig.7-1 Original CAD shape and computational region

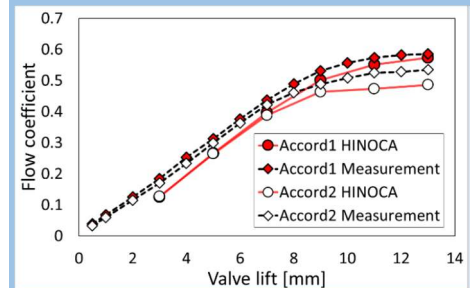


Fig.7-2 The difference in flow coefficient between two intake ports for various valve lifts. HINOCA reproduces the same trend of the difference as the measurement

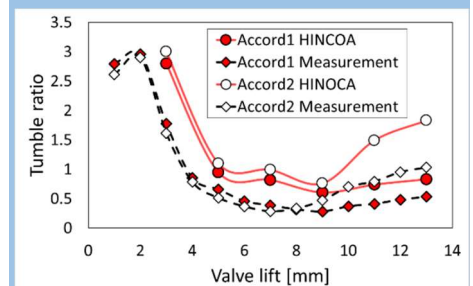


Fig.7-3 The difference in tumble ratio between two intake ports for various valve lifts. HINOCA reproduces the same trend of the difference as the measurement.