

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 3 No. 3 2013

JSAE エンジンレビュー

特集：「蘇る日本の乗用車用ディーゼル2」

～将来のディーゼルエンジン用噴射系～

～将来のディーゼルエンジン乗用車用ターボの展望～

～ディーゼル乗用車用触媒と後処理システムの将来像～

～ディーゼル乗用車用触媒と後処理システムの将来像～

レポート：第23回内燃機関シンポジウム

古典を巡る：燃料の着火指標



公益社団法人 自動車技術会

コラム：●内燃機関は生き物である：菊池 勉／編集委員	1
The Engine is Alive	
特集：「蘇る日本の乗用車用ディーゼル2」	
将来のディーゼルエンジン用噴射系／松本 修一（デンソー）	3
Future injection equipment for diesel engine	
将来のディーゼルエンジン乗用車用ターボの展望／前川 昌三， 恵比寿 幹（三菱重工業）	6
Future turbocharger concept for diesel passenger car	
ディーゼル乗用車用触媒と後処理システムの将来像／福間 隆雄（トヨタ自動車）	10
Future vision of catalyst and after-treatment system for PC diesel engine	
最新ディーゼルの健康影響／伊藤 剛（JARI）	14
Health effects of exhaust emission from new technology diesel engine.	
Report: 第 23 回内燃機関シンポジウム	18
小川 英之（北海道大学）， 河崎 澄（滋賀県立大学）， 富田 栄二（岡山大学） 飯島 晃良， 川那辺 洋， 佐藤 唯史（編集委員）	
Report of 23th Internal combustin engine symposium	
古典を巡る：「燃料の着火指標」／柴田 元（北海道大学）	23
Firing index of the fuel	

■ JSAE エンジンレビュー編集委員会

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

発行所： 公益社団法人自動車技術会
発行日： 2013 年 7 月 1 日
発行人： 新井 雅隆（群馬大学）
〒 102-0076 東京都千代田区五番町 10-2
電話： 03-3262-8211

JSAE エンジンレビュー会員限定版のお知らせ

平素より「JSAE エンジンレビュー (JSAE Engine Review)」をご愛読いただきましてありがとうございます。

JSAE Engine Review は、2011年8月20日にWEB版として創刊し、エンジン技術に関心をもたれる方々すべてに一般公開してしてきました。今までに延べ人数で約16,000名の方々に閲覧をいただいております。

本号より一部の専門的記事については、その閲覧をJSAE会員に限定させていただくこととなりました。これは会員への情報提供のサービスの一環として、一般公開版とは別に会員限定版を設けることにしたものです。会員の皆様には、アクセス時に会員番号の入力をいただければ、引き続き無料で閲覧いただけます。

編集委員会では、WEB版 Engine Review へのアクセス動向を把握して、読者が希望する企画、編集に役立てたいと考えております。ご理解をいただければ幸いです。

引き続きのご愛読をお願いいたします。

JSAE エンジンレビュー編集委員長

飯田 訓正

●コラム

内燃機関は生き物である

The Engine is Alive



編集委員
菊池 勉
Tsutomu KIKUCHI

日産自動車（株）
NISSAN MOTOR CO., LTD.

内燃機関に30年以上かかわってきて思うことは、言い古された言葉かもしれないが、内燃機関は生き物であることである。

1) 生命と似て深淵で、すべてを理解しきれない

内燃機関は発明されて100年以上が経ち、成熟し、研究すべき課題はないと思われがちだが、実際には未だに解決できていない現象や、メカニズムさえ分からないことがまだまだある。燃料噴霧の形成過程、異常燃焼の発生過程、軸受けの潤滑等々、それらの解明から新しいブレークスルーが期待できる。ただし人間や動物と同じで、心の中は図りきれないし、かならずしも期待した通りに動いてくれるわけでもない。

したがって、この内燃機関を研究、開発し、自分が思ったように動かせるようにするには、これとコミュニケーションして、親密な関係を構築する必要があるのは人との関係と同じである。人とのコミュニケーションは言語で行うが、内燃機関とは、原理や理論が共通言語である。これを磨きあげるには座学の工学の知識だけでは不足で、経験が不可欠である。人間が本だけ見ていると社会性が育たないのと同じで、内燃機関とコミュニケーションするにはフィジカルな経験が必須である。言葉で「冷たい」ということの定義は理解できるようになるが、触ると冷たいという実体験が必要なのである。エンジンがどのように空気を吸って、燃料がどのように混合して、着火して火炎伝播してゆくかを、あたかもピストンの上に乗ってシリンダの中で起こっている現象を頭の中で想定できる能力が必要である。現在はコンピュータによる解析でシリンダの中の空気や燃料の変化をアニメーションで把握できるが、計算のための境界条件の入力値や、結果をどのように把握して改善策を出すかは、人間であり、経験から得られた本質的なものの理解力が要求される。

2) 時による自然淘汰

先人により内燃機関のいろいろな機構や構造が発明され実用化されてきた。気筒回転エンジン、斜板機構を用いた筒型エンジン、ロータリ弁、フリーピストンガスタービン等枚挙にいとまがない。無駄な機構、無理な原理のものは自然淘汰され現在あるレシプロエンジンに到達している。恐竜が絶滅したような天変地異は、自動車を動かす原動機として見たときの内燃機関には当面起らないと個人的には思っている。

3) 環境に適応、進化する

著者が会社に入ったころはちょうど動力性能向上の盛んなときで、乗用車の過給エンジンが普及し始めていた。その後ほとんどの車種に過給エンジンのバリエーションが存在するまで繁栄したが、排気ガス規制の強化に伴い、急速に淘汰された。最近になって動力性能を維持しながら、天敵である排気ガス規制に対応、さらに燃費技術として進化して再登場している。この進化には過給器のみならず、燃料噴射、燃焼室の冷却、排気低減といった要素技術を磨き続け正常進化した一例と言える。

植物は地面に根を張っているため、環境が悪化しても移動することができないので、環境の変化に応じて柔軟に対応できる環境適応能力を身につけ進化している。しかし現在のような環境が急激に大きく変化する状況においては、むしろ限られた環境に適応すべく高度に進化した種の方が、絶滅する危険性がある傾向にあるとも言われている。内燃機関

は 100 年以上かけて進化し、燃費、排気、CO₂ 等の様々な環境変化に対応すべく粘り強く進化を進めてきた。このことは、人類が高度に進化しすぎた結果、環境の激変を生き延びるだけのたくましさや失いつつあることに対する反面教師にも見えてならない。

襲ってくる環境変化に対して、内燃機関の進化を継続することを止めてはいけない。

4) 長く付き合うと味がでる

友人や、配偶者等、人生と一緒に歩む中で、切磋琢磨したり、喧嘩したり、失敗等を重ねることにより、成長し、良いところも悪いところも分かってくる。しかし、20年30年経っても、お互いに対する新しい発見や驚きがあり、これは一緒に歩んできたからこそ感じられるものであると思っている。技術の研究、開発も同じで、興味と関心を持って継続し、ものごとの本質にたどり着いたものだけが味わえる喜びである。

蒔かないタネは生えない。内燃機関のDNAを継承し、新しい進化に向けてタネを蒔き、育てる若きエンジニアが多く登場することを期待したい。

将来のディーゼルエンジン用噴射系

Future injection equipment for diesel engine

(株) デンソー ディーゼル噴射技術部：松本 修一

Shuichi MATSUMOTO (Diesel Injection Engineering Division, DENSO CORPORATION)

1 序論

近年の急激な地球環境悪化に対して、種々の地球温暖化対策が進められている。このような中、ディーゼルエンジンは燃費が良く、CO₂（二酸化炭素）の排出量が少ないため、地球温暖化防止に貢献する内燃機関として注目されている。このディーゼルエンジンの性能を大きく左右する重要な部品である燃料噴射装置としてコモンレールシステム（CRS）が開発され、今やその主流に位置づけられ、先進国のみならず新興国でも、噴射装置におけるCRS比率は増加しつつある。

また年々厳しくなる排出ガス規制、燃費規制に伴い、燃料噴射の更なる高圧化・高機能化が要求され、このCRSもより高精度化が求められている。またディーゼルエンジンに使用されてきた従来型石油燃料は、2030年ごろをピークに減少し始めるとの予測もあり、燃料の多様化が進むことへの対応も重要となってくる。

これらの市場要求に対応するためには、エンジン燃焼特性に直接影響するCRS、中でもインジェクタへの要求項目は多く、主要な項目だけでも、噴射自由度向上、噴射特性の高精度化、噴霧の微粒化、経時安定性、燃料ロバスト性、エネルギーロス低減による燃費改善、ISS（Idle Stop and Start）での圧力維持、エンジン搭載性などが挙げられ、CRSサプライヤ各社により開発が継続されている。ここでは、ディーゼルエンジン用噴射系の中でも特に重要なコンポーネントの一つであるCRS用インジェクタの将来について、どうあるべきか、我々が考えてきたこと、進めてきたことについて述べる。

2 次世代噴射系へのニーズと実現方針

前述した多くの要求に高い次元で応えることが、次世代噴射系には求められている。これらのうち、主な要求に対してどのように応えていくかについてまとめた結果を図1に示す。この中には、従来より大きな駆動力が必要と考えられる高圧化、従来より小さいアクチュエータの実現など、一見すると矛盾する項目が含まれているが、常識にとらわれずに高い次元でこれらのニーズを成立させることが我々に与えられた責務だと考え、原点に立ち返って開発を推進してきた。以下、これらの要求をどのように実現するかについて、ここでは燃料ロバスト性向上を切り口に述べる。

2.1 燃料ロバスト性向上

多様化する燃料においては、燃料性状の悪いものが存在し、この粗悪燃料が使用されるとインジェクタ内部のデポジット生成付着、摺動部位の磨耗、焼き付き発生、錆発生などによりインジェクタの機能不良となる場合がある。性状の悪い燃料に対してインジェクタのロバスト性を上げる設計手段として、燃料昇温抑制による燃料変質防止や粘性低下の抑制、また燃料流量の低減による磨耗抑制が考えられ、これらを目的とした燃料リークの最小化が有効であると考えられる。尚、燃料リークには、常時摺動部クリアランスから発生している“静リーク（隙間流れ）”と噴射のために作動時のみ発生する“スイッチングリーク（オリフィス流れ）”が存在し、これらリーク燃料は通常リーク配管等を経由してインジェクタから燃料タンクに戻される。

従来のインジェクタでは、高圧になると静リーク、スイッチングリークの増加により、インジェクタ内部温度が上昇する。特に静リーク量は、高圧化によるクリアランスの増加およ

Requirement	Development concept
Better spray characteristics	Increase injection pressure
Higher injection accuracy	Small actuator and control valve placed near the nozzle (purpose; decrease moving mass and sliding portion)
Fuel robustness Fuel efficiency	Minimize fuel leakage (purpose; decrease fuel temperature and actuator size)
Easier installation	Small actuator and control valve

Figure 1 Requirement and development concept

び燃料粘性の低下の影響で加速度的に増加する。この温度上昇は、燃料の劣化（図2）を引き起こし、デポジット生成、錆の発生、添加剤の変質等を引き起こすことが分かっており、可能な限り低減することが望ましい。

またリーク流量の低減は燃料中の微細ダストによる磨耗抑制にも効果もあると考えている。リーク燃料が高速で流れる場合、単位時間当たりの通過微細ダスト量が増加し、磨耗が進行しやすくなる。従来型のインジェクタでは、ダストが想定以上に多い市場において、燃料通路の想定以上の磨耗を経験している。これらの理由からも燃料リーク量の最小化を目標とした。

2.2 燃費改善, ISS化の対応, 搭載性向上

リーク量低減により、高圧ポンプの必要送油量を低減できる（図3）ため、ポンプ駆動エネルギーを低減でき、燃費改善できる。また静リークレスによりエンジン停止中のインジェクタからの燃料漏れがないために、ISS中でも圧力維持し、次回始動性が向上が可能となる。スイッチングリーク量の最小化により、制御弁が取り扱う燃料量が低減できるため、制御弁およびアクチュエータの小型化が可能となり、インジェクタの搭載性向上に貢献する。

スイッチングリーク最小化に向けて、以下のように考える。従来型のインジェクタは図4左図に示すように、噴射中に高圧部から制御室に流れ込み、そのまま低圧部へ流出するリークがある。このリークは機能を持たない無駄なリークであり、ノズルニードルを上昇させるために排出しなければならない燃料量のみが機能上必要なスイッチングリークである。このスイッチングリークの実現には、従来とは異なった新規の制御弁（図4右図）が不可欠である。

2.3 噴射自由度の向上

従来インジェクタでは、ノズルニードル開弁速度は、インオリフィス径とアウトオリフィス径で決まり、ノズルニードル開弁速度は、インオリフィス径で決まるため、噴射設計の自由度が制約される課題があった（図4左図）。噴射自由度の向上のためにはノズルニードルの開閉速度を独立で設定可能な新制御弁（図4右図）が有効である。

2.4 噴射の高精度化

噴射精度を向上させるためには、ノズルニードルの制御性の向上が必要である。アクチュエータおよび制御弁をノズル直上（インジェクタボデー内）に配置することで、ノズルニードルを制御する可動部質量の低減と摺動箇所の削減をして、ノズルニードルの制御性を向上させる。

開発方針を具現化したインジェクタのイメージ模式図を図5に示す。

3 次世代ソレノイドインジェクタ

3.1 新制御弁構造の開発¹⁾

前記方針をすべて同時に実現するための制御弁は、前述の図4右図に示す3WV（3 Way Valve）機能が必要である。駆動力が大きいピエゾアクチュエータを用いたピエゾインジェクタでは既に実現しているが、長寿命であるが駆動力が小さいソレノイドアクチュエータで実現することは従来困難であった。そこで新制御弁には、実構造は2WV（2 Way Valve：シート部1箇所）で、如何に3WV（シート部2箇所）機能を持たせるかが開発のポイントであった。

従来の2WV構造は、2WV作動（開弁→閉弁）により、2WVとアウトオリフィス間の圧力が瞬時に低圧から中圧（=制御室圧）に変化する部位がある。この圧力変化を利用して自動開閉する弁を設計することに着目し、図6に示す構造を考案した。本構造の最大の特徴は、制御室内に配置された制御プレートである。制御プレートは、常時高圧である高圧環状溝、作動条件により圧力変化する制御室、中間室の三つの圧力バランスで作動する。制御弁が作動しない無噴射中は、スプリングにより上側に押し付けられている。制御弁が開弁すると、中間室の圧力が降下するため、制御プレートの位置が保持されたままで、制御室圧が降下するため、噴射が開始する。制御弁が閉弁すると中間室圧が制御室圧と同程度まで上昇するため、高圧環状溝の圧力（作用力）により制御プレートが下降し、高圧環状溝と制御室とが連通し、インオリフィスを通して高圧燃料が制御室に流入し、ノズルニードルが下降し噴射が終了する。

本構造により、ノズルニードル上昇中（開弁作動中）は、制御室は低圧部のみと連通し、またノズルニードル下降中（閉弁作動中）は、制御室は高圧部のみと連通できる構造である。

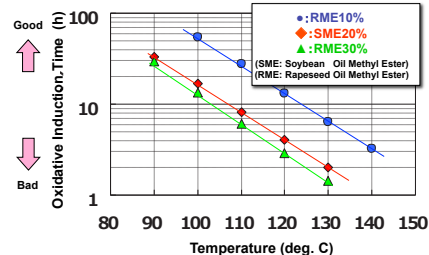


Figure 2 Bio fuel deterioration due to temperature

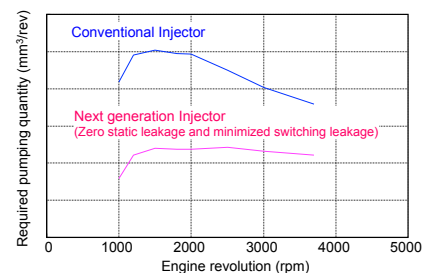


Figure 3 Required pumping quantity

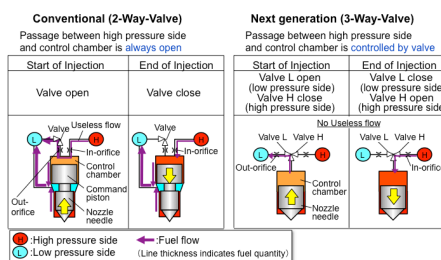


Figure 4 Concept of control valve and needle movement

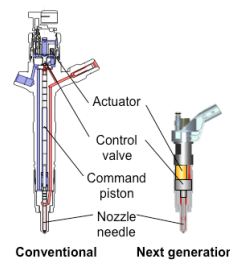


Figure 5 Structure of injector

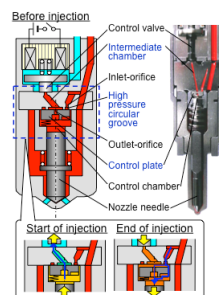


Figure 6 Structure and function of next generation injector

要求噴射圧全域で正常作動させるためには、制御プレートに作用する圧力による力が重要となる。高圧環状溝圧、制御室圧、中間室圧の作用する面積を最適に設計することで、要求体格内で設計成立することを確認した。またこの構造により取り扱うスイッチングリーク量を大幅に低減できたため、アクチュエータと制御弁を小型化することができ、ノズル直上（インジェクタボディ内）に配置すると共に、噴射圧力を従来の200MPaから250MPaに向上することができた。

4 性能評価結果

4.1 噴射性能確認

新ソレノイドインジェクタと従来ソレノイドインジェクタとの噴射性能比較を以下に示す。

図7は、全リーク量（静リーク+スイッチングリーク）の比較を示す。従来インジェクタの全リークの半分を占める静リークのゼロ化を実現できた。スイッチングリークは、従来比1/3まで削減できた。また時間比例で発生する静リークがゼロであるため、エンジン低速トルク点に代表される高圧低回転時の全リーク量を大幅に低減できた。

図8で示すように、静リーク、すなわちクリアランスの3乗に比例する隙間流れを持たない構造であるために、耐久評価での経時的な磨耗影響が少なく、全リーク量は初期および経時的に非常に安定していることを確認できた。

図9は、噴射率特性の比較を示す。従来ソレノイドインジェクタに対して、開発した新ソレノイドインジェクタは、初期噴射率を現行ピエゾインジェクタ並みに実現していることを確認できた。

4.3 燃料ロバスト性確認

一般に酸化安定性の悪い高濃度バイオ燃料を使用した場合、インジェクタ内部には、バイオ重合デポジットが生成し、摺動部に付着することで摺動抵抗が増加し、噴射性能が変化する場合がある。

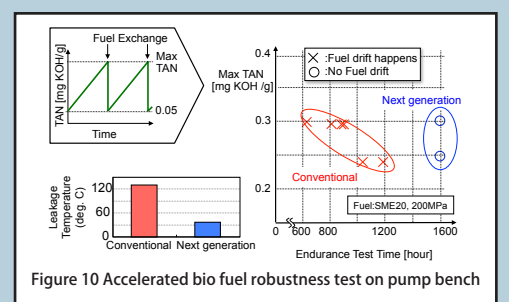
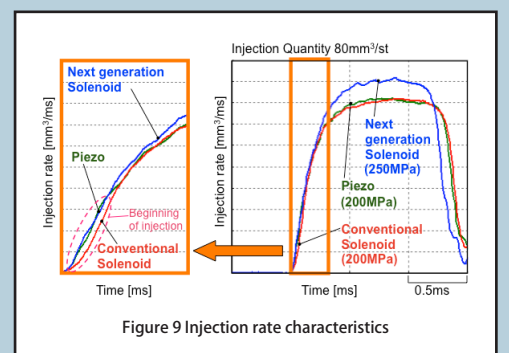
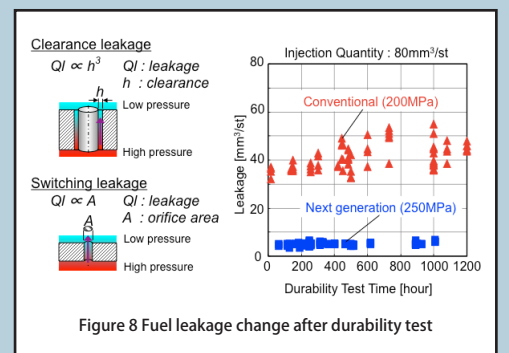
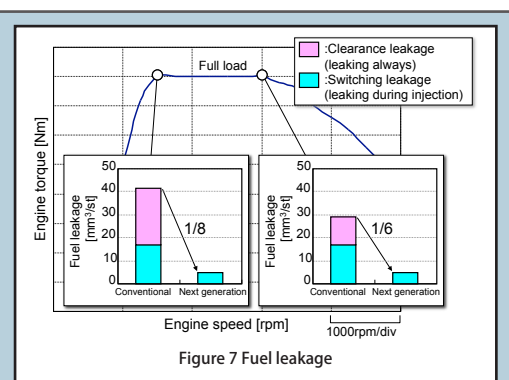
デポジットに対するロバスト性評価結果を図10に示す。特定の運転パターンで燃料の全酸化（TAN）の最大値を管理しながら評価した。従来型のインジェクタに対して、開発した新インジェクタでは、リーク量低減による燃料温度の低下によりバイオ重合デポジットに対するロバスト性が向上していることが確認できた²⁾。

5 まとめ

CRSを構成するインジェクタには、噴射精度の向上、噴射自由度の向上、多様化する燃料へのロバスト性向上などの高い要求がある。これら市場からの要求に答えるために、新しいコンセプトを設定し、このコンセプトに沿った基本構造開発を進め、その結果として、制御プレートを備えた新制御弁構造を採用したインジェクタを開発してきた。このインジェクタは、250MPaの超高压噴射が可能であるとともに、従来品より搭載性の高い構造としながら、画期的な性能向上と燃料ロバスト性の向上を実現するなど、市場ニーズに高い次元で応えており、2013年より量産開始した。また300MPaまで評価可能な噴射系³⁾が既に複数の研究機関に供給されるなど、将来に向けた開発も進んでおり、今後のCRS用インジェクタの主流となり市場に貢献していきたいと考える。

【参考文献】

- 1) Shuichi Matsumoto, Kenji Date and Koichi Yamada : Concepts and Evolution of Injector for Common Rail System, SAE Technical Paper 2012-01-1753
- 2) Toshihiko Omori, Akio Tanaka, Koichi Yamada and Satoshi Bunne: Biodiesel Fuel Effects on Injection System and Establishment of the Evaluation Method, SAE Technical Paper 2011-28-0057
- 3) Yukihiro Shinohara, Katsuhiko Takeuchi, Olaf Erik Herrmann and Hermann Josef Laumen : 3000bar common rail system, MTZ worldwide Edition: 2011-01, Vol72, 4-8



将来のディーゼルエンジン乗用車用ターボの展望

Future turbocharger concept for diesel passenger car

三菱重工業汎用機特車事業本部ターボ技術部ターボ設計一課：前川 昌三
三菱重工業汎用機特車事業本部ターボ技術部：恵比寿 幹

Shozo MAEKAWA (Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., Turbocharger designing section no.1 Turbocharger engineering department General machinery & special vehicles)

Motoki EBISU (Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., Turbocharger engineering department General machinery & special vehicles)

1 はじめに

過給機は、内燃機関（シリンダ内）に排気量以上の圧縮空気を供給し、見かけの排気量・出力を増加させる装置の総称で（図1）、ディーゼルエンジン成立の初期から構造は各種検討・改善されてきた。ところが1970年代のオイルショックを境に、それまで拡大していた車両用過給機の需要が大きくしぼみ、トラックと一部乗用車にのみ過給エンジンが残された状態が長く続いていた。ところが1990年代後半に欧州市場において、燃費・排気ガス規制が強化されるに伴い、ディーゼルエンジン乗用車の需要が再び高まり、EuroIV規制以降はディーゼル乗用車のほぼ100%が過給仕様エンジンとなっている。また、ガソリンエンジン乗用車においても、直噴+過給機による「過給ダウンサイジングエンジン」が新たな潮流となっており、これまでの「出力を得るためのデバイス」から「燃費達成のためのデバイス」に形を変え、ことで新たな活躍の場を広げている。

これまでは欧州の排気ガス規制が先行し、数年遅れて他の地域が同様の規制を適用していたが（図2）、今後はその規制適用時期ギャップが小さくなり、ほぼ同時期に全世界で規制が強化されるものと思われる。

過給機は直接燃費改善・排気ガス浄化を行うアクティブ装置ではなく、エンジン燃焼状態の改善によって燃費改善・排気ガス浄化を支援するパッシブ装置であるため、パワートレイン（エンジン）とのマッチングが重要となる。そのためパワートレインの開発と密に連携してターボ仕様の選定を行うとともに、将来の燃費・排気ガス規制を睨んだ新技術の開発を行っている。今回は主にディーゼルエンジンの排気ガス規制対応技術と共に、これに対応する過給機技術について説明する。

2 ディーゼルエンジンの排気ガス対応技術と過給器の対応技術

(1) EGR (Exhaust Gas Recirculation)

排気ガスの一部を排気側から新気側に戻すことで、シリンダ内部の酸素量が少なくなり、燃焼時の温度が低下することでNOxの排出量が低下する。シリンダの吸気バルブ・排気バルブのオーバーラップ期間を広げることによる内部EGRを別にすれば、通常は排気ガスに戻す配管系を備えている。これまでは単純に新気（上流）側に戻す機構であったが、それだとエンジン吸入温度が大きく上昇して体積流量が増加、結果としてエンジン効率・NOx減少率が低下する問題があった。そのため最近ではEGRクーラを装着することでこの問題を回避している（図3）。EGRはターボに下記のような影響を与える。

- ① 排出ガス温度低下（排気エネルギーの減少）
- ② コンプレッサの必要空気流量減少
- ③ 膨張比の上昇（同一過給圧を発生するための）

タービンの出力は質量流量、流入排気ガス温度、タービン膨張比、タービン効率にほぼ比例する。そのためEGR率が増加して流入排気ガス温度が低下すれば、タービン膨張比が大きくなり、タービン出力が得られない（質量流量、タービン効率を一定と仮定した場合）。結果としてエンジン背圧が増加する傾向にある。また圧縮機側の必要空気量が減少することで、コンプレッサ（インペラ）は小トリム品が必要となる。EGR率を高めるためにはエンジン背圧を高くする必要があり、特にディーゼルエンジンの場合には可変ターボ（VGと呼称）の可変スロット面積を絞って対応している。そのためVGのノズからのウェーク流

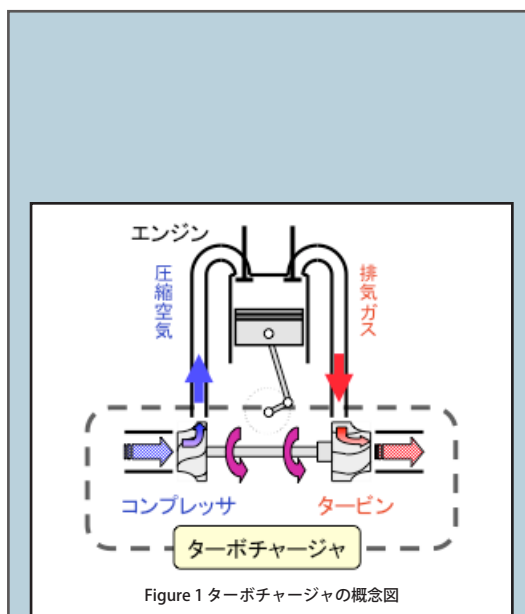


Figure 1 ターボチャージャの概念図

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
EU	Euro IV			Euro V			Euro VI				
USA	Tier 1					Tier 2					
Japan	JP-05						JP-09				
S. Korea	Euro IV			Euro V			Euro VI				
China	Euro II		Euro III			Euro IV					
India	BS2 (= Euro II)					BS3/BS4 (= Euro III / Euro IV)					
S. Africa	Euro II						Euro IV				
Brazil	Euro III		Euro IV			Euro V					
Russia	Euro II		Euro III			Euro IV					

Figure 2 世界の排気ガス規制

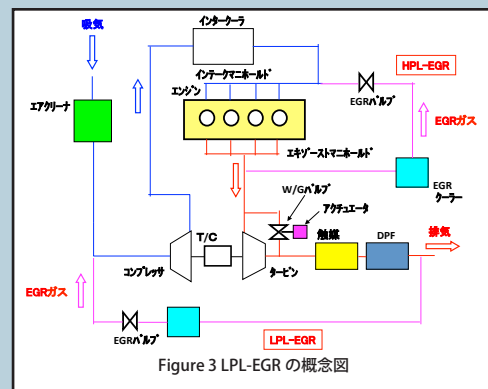


Figure 3 LPL-EGRの概念図

が大きく、タービン動翼に与える励振力が従来エンジンより大きくなり、従来設計品では共振破損の危険性が高まる。そのためタービン動翼はより強固な設計が必要となる。

次期排気ガス規制対応のためには、現状よりも EGR 率をさらに高める必要があるが、過給機によってシリンダ直前の圧力が高くなっているため、インマニ直前に還流排気ガスに戻すことで上げられる EGR 量は限界に近い。そのため、新技術として LPL-EGR (Low Pressure Loop EGR) が注目されている。これはその名の通り、過給機前の低圧領域 (Low Pressure) に還流排気ガスに戻す機構である。EGR 率が高まれば、燃焼が緩慢となって NOx 排出量が低下するメリットと共にシリンダ内部の燃焼温度が大幅に低下するため、タービンへ流入する排気ガス温度が大幅に低下し、タービン側で取り出せる出力が低下する問題は依然としてある。また、コンプレッサ (インペラ) に還流する排気ガスが流入するという点も大きな問題である。これにより

- ①コンプレッサ (インペラ) 吸入空気温度上昇
- ②排気ガス成分 (特に凝縮水) による腐食・摩耗

が懸念される。そのためコンプレッサ (インペラ) 表面は耐食性向上を狙った皮膜処理が必要になる場合がある。逆にタービン側は流入排気ガス温度低下に伴う高膨張比化に対応するため、従来よりスロート面積を絞った仕様が必要となる。結果的に過給機は現状より一回り小型化する。

(2) ミラーサイクル

シリンダを圧縮するためには相応の仕事量が必要となるため、圧縮工程で吸入弁を遅閉じすることで圧縮比に対し膨張比を大きくすることで、エンジンサイクル効率向上を目指すのがミラーサイクルの原理である (図4)。ただしそのままではシリンダ流入空気量が減少するためにエンジン出力が低下する。その不足分を補うのが高効率・高圧縮比の過給機である。過給機に要求されるのは、エンジン低速からの十分な過給効果である。過給効果が不十分であれば、エンジン出力が低下して排気ガス量が減少するため、過給機の効きがさらに悪化する。そのためエンジンとのマッチングが重要となる。

(3) 高圧縮仕様コンプレッサ (インペラ) とワイドレンジ化

前述 (2) ミラーサイクル対応技術にも関係するが、ディーゼルエンジンの場合はシリンダに流入する空気量にほぼ比例してエンジン出力 (トルク) が増加する。そのため、いかに多くの空気をシリンダに押し込むかが重要となる。従来であればコンプレッサ圧縮比は 2.8 ~ 3.2 であったが、最近では実用域で 3.5 前後までの要求がある。かつエンジン低回転域から十分なトルク達成のためには、いわゆるサージ域を広げるワイドレンジ化が必要である。ただしコンプレッサを高圧縮仕様にすれば、実用域での使用レンジが狭くなるという相反する問題が存在している (図5)。そのため、コンプレッサによって高圧縮比を達成させ、ケーシング (ハウジング) によってワイドレンジ化を図るのが一つの解であり、いわゆるケーシングトリートメントもしくは RCC (Recirculation Compressor Cover) と呼ばれる技術が用いられる (図6)。従来は鋳造でこの部分を形成するため、小型のものは製造性が悪く、主に比較的大型のトラック・バス向け過給機に適用されていた。現在、一部を別体構造にすることで、小型でも製造性の良い、乗用車用にも適用可能な構造を検討中である。

(4) 小型大容量タービン

エンジン低回転域からの十分なトルク達成のためには、タービン動翼の慣性モーメント低減も有効である。これは慣性モーメントを低減することで、軸回転数が短時間で増加し、コンプレッサ側の過給圧が増加、エンジン排気ガス量が増加してタービンの仕事量が増加する。これにより短時間でトルクがレスポンス良く上昇する。タービン動翼の慣性モーメント低減方法としてはタービン動翼の斜流化も一つの解であるが、タービン効率が低下し、レスポンス向上効果が限定的となる場合がある。タービン動翼を大容量化してタービン動翼を一回り小型化することも有効である。

(5) 電気制御式アクチュエータ

従来は負圧もしくは正圧によりダイヤフラム式のアクチュエータを駆動、過給機の回転数制御・出力制御を行ってきた。しかしながら、厳しくなる排気ガス規制に合致するためには、エンジン燃焼状態の最適化のために過給機の動作を制御することが要求されるようになっ

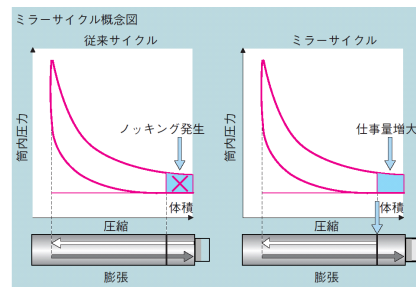


図2 ミラーサイクル概念図
圧縮比を抑えることでノッキングを抑え、膨張比を大きくすることでサイクル効率を向上させる技術。

Figure 4 ミラーサイクル概念図

三菱重工技報 vol. 45 #1 (2008) より引用

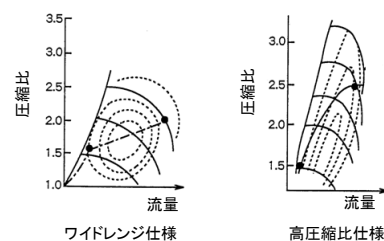


Figure 5 コンプレッサマップ

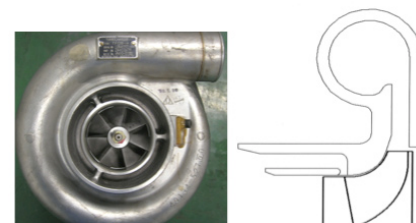


Figure 6 ケーシングトリートメント

た。そのため、アクチュエータも電気制御式が多く採用されている。特に可変容量ターボの場合、トルク、背圧、EGR量を細かく制御し、高い動力性能と環境性能の両立を狙うため、電制アクチュエータを搭載するケースが増えてきた。

またウェストゲート仕様の場合では、触媒活性化時間短縮化のために、エンジン起動直後にウェストゲート弁を開放し、排気ガスをタービンバイパスして下流に流すことで触媒活性化時間を短縮することが可能である。このような目的のためエンジンの作動如何にかかわらずウェストゲートをコントロールできる電制アクチュエータが有効である。

(6) 触媒活性化時間短縮

ディーゼルエンジンにおいてもガソリンエンジンと同様、エンジン始動時の触媒活性化時間の短縮が要求されるケースが出てきている。このためにはタービンハウジングのヒートマス低減が有効である。鋳造法案の改良により鋳物肉厚の低減が可能で、現在、2mm程度の肉厚が可能となっている。また、板金化によりタービンハウジングを製作することも可能であるが、複雑な形状のため、高い技術が必要である。板金タービンハウジングは、耐久性、コスト低減、品質の向上が課題である。図7は従来の鋳物と板金で作ったタービンハウジングでタービン出口の温度上昇時間を計測した結果である。このようにタービンハウジングの板金化は触媒が活性化温度に上昇するまでの時間を短縮するのに有効である。

(7) 電動過給

これまで、ターボチャージャが過給に使うことができるのは、唯一排出ガスのエネルギーのみであり、各社は知恵を絞り、如何に排出ガスエネルギーを効率的に過給圧に変換するかということを考えている。特に、排出ガスエネルギーの低いエンジン低速での定常トルク、過渡応答性の向上は難しい課題である。そこで、過給のために不足するエネルギーを外部から供給することにより、必要な過給圧をレスポンス良く供給するという考えの下、当社では電動2ステージ過給システムの開発を進めている。これは、通常の2ステージターボにおいて、高圧若しくは低圧側のターボチャージャを、モータでラジアル型コンプレッサを駆動する電動スーパーチャージャに置き換えたものである。図8にそのシステム図を示す。

また、図9に過渡応答性をシングルターボ、2ステージターボ、電動2ステージターボで比較した結果を示す。

また、電動2ステージターボは通常の2ステージターボに比べ、背圧が低下する点においても燃費的に有利であり、ヒートマスの低減という効果もある。電動による過給は電気を使うためエネルギー管理が重要である。当社の試算ではシングルターボのダウンサイジングエンジンに対し、さらに21%ダウンサイジングを行い、電動2ステージシステムで同等の動力性能を発生させた場合、発電に要するエネルギーを差し引いても8%程度の燃費向上効果があると予想される。今後、車両の電源電圧の見直し等で電気エネルギーの回生効率を向上させるという動きもあり、将来は電動過給を用いた燃費改善も一つの選択肢となると考える。

3 将来予想されるディーゼルエンジンに対する対応技術

ガソリンエンジンに比べ熱効率が高く、燃費の良いディーゼルエンジンの課題は排出ガスのクリーン化である。近年のディーゼルエンジンは高圧噴射、多段噴射、高過給、EGR、後処理等の技術革新により、この技術的課題をクリアしつつあり、ポスト新長期規制、EURO6等日米欧の排出ガス規制におけるNOx規制値は既に現状ガソリンエンジンと同等レベルとなっている。しかしながら、近年ガソリンエンジンの燃費は直噴化+過給ダウンサイジング、可変動弁、クルドEGR等の技術により大幅に改善している。このため、ディーゼルエンジンの特徴であった燃費の優位性が相対的に低下してきていると言える。また、燃費という面ではHVとも競争する。もちろん、日本のように市街地走行が多い場合、HVは燃費において優位であるが、欧州のような長距離移動においては、依然ディーゼルエンジンが優位である。しかしながら、HV、ガソリンエンジンに対する燃費の優位性は近年縮まってきているといえる。このような状況の中で、予想されるディーゼルエンジンの進化の方向性およびそれに対して必要と思われる主な技術を示す。

(1) HV、ガソリンエンジンとの対抗上、排ガスを低減しつつ、コストの徹底的な低減

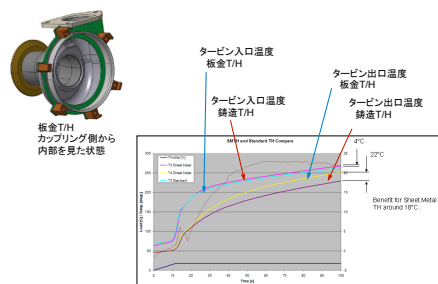


Figure 7 鋳物と板金によるタービン出口での温度上昇時間の比較

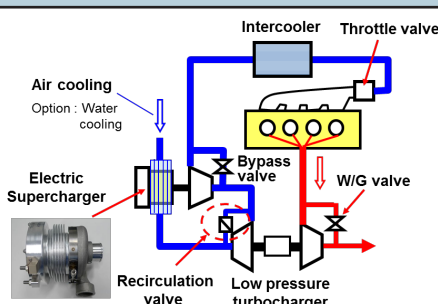


Figure 8 電動2ステージ過給システム

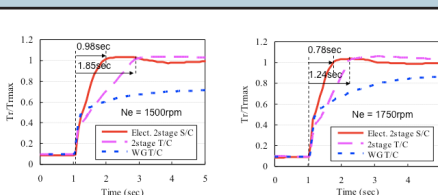


Figure 9 電動コンプレッサの効果 (過渡応答性の比較)

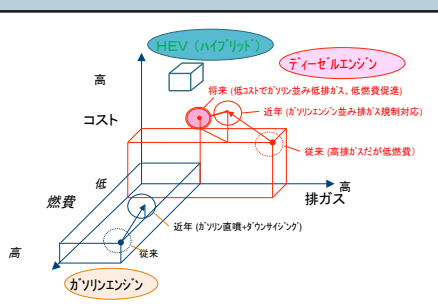


Figure 10 将来予想されるディーゼルエンジンの方向

- ①大容量 EGR + 高圧過給により NOx 触媒廃止
- ②さらなるエンジンのダウンサイジング
- ③過給機の軽量, 低熱容量, 低コスト化

(2) ディーゼルエンジンの本質である燃費の徹底的な追求

- ①さらなるエンジンのダウンサイジング
- ②過給機効率の向上
- ③排熱回収

(3) ディーゼルエンジンの大きな優位性である高ドライバビリティの徹底追及

(高レスポンス, 低速高トルク)

- ①多段過給
- ②電動過給
- ②過給機の過渡応答性向上

図9はディーゼルエンジン, ガソリンエンジン, HVにおける, 近年および将来予想される位置付けを示したものである。

このようなディーゼルエンジンの進化を実現するためには過給機の進化も不可欠である。今後, 過給機には下記のような機能が求められると考えられる。括弧内は機能を達成するための代表的な過給機関連技術である。

- ・高 EGR 対応技術 (可変容量ターボ)
- ・LPL-EGR 対応技術 (耐腐食コーティング, デポジット付着防止)
- ・高圧過給 (多段過給, 電動過給等他の過給機との多段化)
- ・高効率 (コンプレッサ, タービン空力性能, 機械損失低減)
- ・ワイドレンジ (コンプレッサ, タービン作動レンジ拡大)
- ・過渡応答性 (TiAl タービン, Mg コンプレッサ, ボールベアリング)
- ・触媒活性化時間短縮 (板金タービンハウジング, 電動ウェストゲート)
- ・電動過給 (電動スーパーチャージャ, 電動アシストターボ)
- ・排気エネルギー回生 (ターボジェネレータ, ターボコンパウンド, ヒートエキスパンダ)

将来のディーゼルエンジンにはこれらの技術の多くが採用されていくと考えられる。しかしながら, ガソリンエンジンとの対抗上, 大きなコストアップは認められず, 各技術のコストパフォーマンスを見極め, 最適な技術を採用することが重要である。

4 おわりに

ディーゼルエンジンは燃費の良さと走る楽しさとのバランスで欧州の一部の国で一時はガソリンエンジンを超えるような普及率を示していた。しかしながら, ここにきてガソリンエンジンの過給ダウンサイジングによる燃費低減, 低速トルクの向上によるドライバビリティの改善が進み, コストの比較的安い過給ガソリンエンジンに注目が集まってきている。過給ダウンサイジングガソリンエンジンのトルク特性はディーゼルエンジンのそれに近く, 近年の急速な普及は裏を返せばディーゼルエンジンの素性の良さが改めて確認されたとも言える。ディーゼルエンジンと過給技術は非常に相性が良く, 今後も過給技術の進歩はディーゼルエンジンの進歩に大きく貢献すると考える。例え HV であっても, 車両の燃費向上には内燃機関の効率向上が効果的である。過給技術はそのために有効な技術の一つと言える。コンプレッサ, タービンの空力性能, 機械損失の低減等基礎性能の向上と, 電動過給のような新しい過給コンセプトの組み合わせにより, 今後もお客様であるエンジンメーカーの厳しい要求を満たすべく, 過給技術を進化させていきたい。

ディーゼル乗用車用触媒と後処理システムの将来像

Future vision of catalyst and after-treatment system for PC diesel engine

トヨタ自動車：福間 隆雄

Takao FUKUMA (Toyota Motor Corporation)

1 概要

燃費が良く走りやすいクリーンディーゼル乗用車の魅力は、欧州のみならず日本国内でも再認識されつつある。一方で図1に示すように欧州では、自動車の排気ガス規制をユーロ5まで進めてきたが、実際の走行移動（例えば図1や図3のCommon Artemis Driving Cyclesのような走り方：CADCで表記）で排出する窒素酸化物NOxや二酸化窒素NO2は排出ガス試験法で定めた試験サイクル（Transient Cycle）の計測値との相関が低いとの報告¹⁾があり、ユーロ6に加えてユーロ6+では規制値の強化が求められている。その対策として、従来よりも高性能なNOx触媒システムが必要とされ、同時にコスト増加の抑制が求められている。

ここでは、以上の背景から2013年頭において乗用車ディーゼルエンジンが直面するNOx対策を中心とした技術課題に絞り、数々の新技術開発の取り組みを自動車メーカーやサプライヤー、研究所各社の最新の公開情報からレビューするとともに、将来の展望に繋げてみたい。

2 現状と課題

今後のディーゼルエンジンの後処理システムに求められる基本機能は、エンジン燃焼から排出される4成分の（イ）HC、（ロ）CO、（ハ）NOx、（ニ）PM（（ホ）PN含む）を浄化することであるが、取り巻く状況の変化から主に以下の四つの課題を抱えている。

課題1 排気温度の低下

シリンダ内の平均空燃比がリーンで燃焼するディーゼルエンジンの排気温度は、ガソリンエンジンに比べて本来低く、特にエンジン負荷の低い領域での排気浄化は本質的な課題の一つである。そしてエンジンの燃費改良に伴い、エンジンの排気温度はさらに低下する傾向にあり、アイドル状態では100℃を下回る場合もある。そのため後処理装置の触媒活性を保つために、触媒中の貴金属を増加したり、アフター噴射（膨張行程前半で噴射）による排気熱の供給により排気温度を上昇させ、あるいはポスト噴射（膨張行程後半で噴射）による未燃HCを触媒に供給する等の方策が必要とされ、結果としてコスト増加や燃費悪化を招きやすい。図2にCO₂が2割削減した場合の尿素SCR触媒の温度低下の様子を示す。SCR触媒の活性温度はおよそ200℃以上なので、DPF下流に尿素SCR触媒を車両の床下に設置した場合、活性温度に至る時間が掛かり、より高い浄化性能を発揮する上での課題になっている。

課題2 ユーロ6+の要求

近年の排出ガス試験法では、実際の車の使われ方に即した試験方法の検討が進められている。国連による2020年に導入予定の世界統一乗用車排出ガス試験法の中のWLTC(Worldwide harmonized Light duty Test Cycle)試験サイクルや、欧州委員会による2017年に導入予定のRDE(Real Driving Emission)試験法である。試験法の詳細は検討中であり未確定であるが、エンジン仕事量は従来のNEDC(New European Driving Cycle)に比べて数倍増加し、後処理装置またはシステムへの要求も低温から高温までのより広い温度範囲で高い浄化性能が求められ、特にNOxに関しては従来よりも高性能なNOx触媒システムの使用が必要になると考えられている。図3は現行NEDCとWLTCを検討するのに参照されているCADCとの使用工

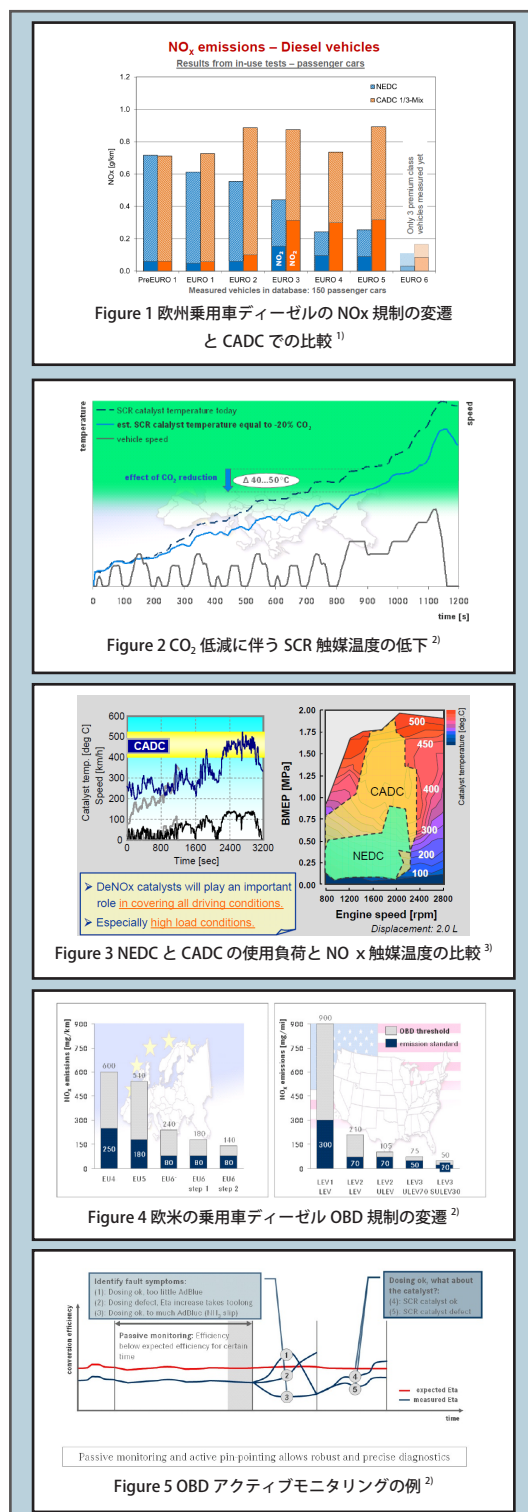


Figure 1 欧州乗用車ディーゼルのNOx規制の変遷とCADCでの比較¹⁾

Figure 2 CO₂低減に伴うSCR触媒温度の低下²⁾

Figure 3 NEDCとCADCの使用負荷とNOx触媒温度の比較³⁾

Figure 4 欧米の乗用車ディーゼルOBD規制の変遷²⁾

Figure 5 OBDアクティブモニタリングの例²⁾

ンジン負荷と NOx 触媒温度の関係を示したもので、CADC ではエンジン全負荷までを使い、触媒温度は 500℃以上に達することが分かる。

課題 3 OBD (On-Board Diagnostics) 規制強化に対応した排気システム構築

図4は欧州と米国のOBD クライテリアの変遷を示す。例えば欧州2017年のユーロ6ステップ2では、NOx 規制値が 80mg/km に対し、140mg/km を超える場合は故障検出が必要になる。図5は、NOx 触媒の故障診断の例を示す。NOx センサで検出した浄化率が設計期待値より低い場合、パンプモニタリングを所定期間経過した後に、還元剤(尿素など)をピンポイントで増加させるアクティブモニタリングを行い、その挙動で、(I)還元剤の供給量が過小、(II)供給装置が動いていない、(III)供給量が過剰、その後(IV)SCR 触媒正常、(V)触媒異常、などを短期間に判断するとしている。

一方で高性能な NOx 触媒を活用してエンジンの燃費を向上させる方策が検討されている。図6は NOx と燃費のトレードオフの例を示す。燃料噴射時期の遅延や EGR 増加等によりエンジン排出 NOx を 55%低減する手法よりも、高性能 NOx 触媒を導入して浄化率を 75%まで上げた方が、同等の NOx 排出量での燃費が 4%も改善することを示している。今後の NOx 触媒システムは、より高い浄化率の実現と共にシステムの故障を精度良く検出する OBD の機能が求められると考えられる。

課題 4 開発コストの抑制

以上述べたように、今後のディーゼルの NOx 触媒システムは、排気温度の低下を背景に、低温から高温まで幅広い温度域で高い浄化機能を発揮し、エンジン本体と練成した燃費の悪化を極力抑制したシステム設計が求められる。さらにシステムを目標のエミッション、燃費、燃焼騒音、トルクレスポンスなどに適合させる為に、非常に多くのパラメータを効率よく最適化することが必須になってきている。

3 次世代の NOx 触媒システムの開発状況

3.1 NOx 触媒の使い分け

図7に現在量産されている吸蔵還元型 NOx 触媒 NSR (LNT, NSC と称す) と尿素 SCR のエンジン排気量に対するコストの比較例を示す。NSR は貴金属を介して一時アルカリ金属塩として NOx を吸蔵し、リッチスパイク時に放出、還元するため、白金などの貴金属を必要とする。大きなエンジン排気量では、NOx 処理量の増加に応じて触媒容積が増えるため、コストも比例して増加する。一方尿素 SCR の場合は、尿素を加水分解したアンモニアを銅などの卑金属に吸着させ NOx を選択還元させるので、貴金属は必要としない反面、尿素水タンクや圧送ポンプ、尿素添加ノズルなどの固有部品が必要とされるので、インシヤルコストが掛かる。しかしエンジン排気量の増加に対してコストの上昇は緩やかなので、二つのシステムがコストバランスする排気量がある。図7の例では 2.4L で交差する試算になっている。このコストバランス点は、前述の WLTP や RDE の規制動向により、変動する可能性がある。

3.2 アンモニアを還元剤とする SCR 触媒の現状と将来

図8にここ数年で乗用車用に普及したボッシュ製尿素 SCR システムと触媒レイアウトを示す。DPF 再生性の確保のため、一般的には DPF がエンジン排気マニホールドに近い上流に配置され、その下流に尿素混合空間を介して SCR 触媒が配置される。図9に浄化システムと、尿素供給システムを乗用車に搭載するためにコンパクトに纏めた例を示す。

この技術は、課題1で示した燃費改良に伴う排気温度の低下の影響を受けるため、現在は DPF に SCR 機能を合体した SCR on Filter (以下 SCRf と称す) の開発が盛んである。図10に DPF 下流の SCR と SCRf との燃費の比較例を示す。DPF 下流配置の SCR の場合は暖機のための燃費悪化が避けられないが、SCRf では暖機の必要性が減少し、むしろ暖機後の浄化性能を活かして燃費改善ができる新たなメリットを有している。

SCRf はウォールフローフィルタとしての PM と PN の制御性と、NOx 触媒としてのアンモニア吸着性や NOx 還元性が必要になり、DPF 基材と触媒コート技術、耐熱性の高いコート材料の開発が進んでいる。図11は高孔率の DPF 基材により多くの SCR 触媒を支持させると、圧力損失を同等にして低温側の浄化率が向上できることを示している。

SCRf の実用上の課題は、限られたエンジンルームへの搭載である。特に SCRf 上流のエンジンとの間で尿素を噴射し、触媒に均一に分配する必要がある。図12に CAD / CFD による

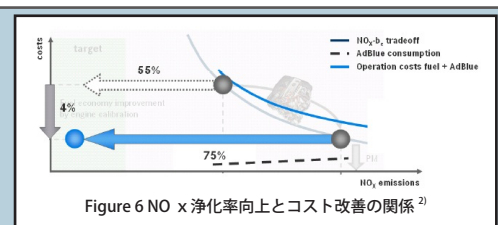


Figure 6 NOx 浄化率向上とコスト改善の関係²⁾

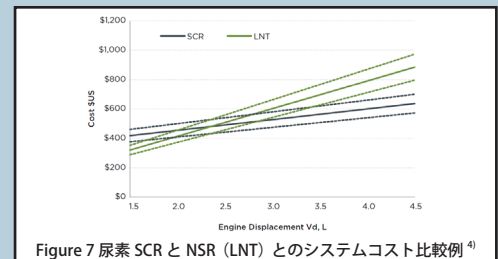


Figure 7 尿素 SCR と NSR (LNT) とのシステムコスト比較例⁴⁾

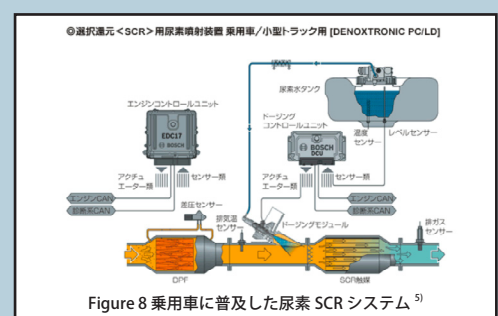


Figure 8 乗用車に普及した尿素 SCR システム⁵⁾

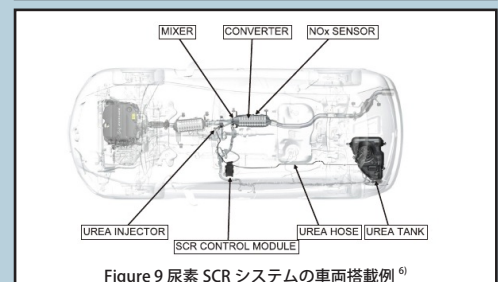


Figure 9 尿素 SCR システムの車両搭載例⁶⁾

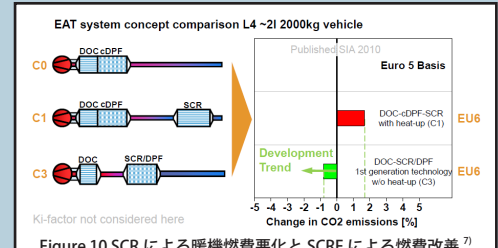


Figure 10 SCR による暖機燃費悪化と SCRf による燃費改善⁷⁾

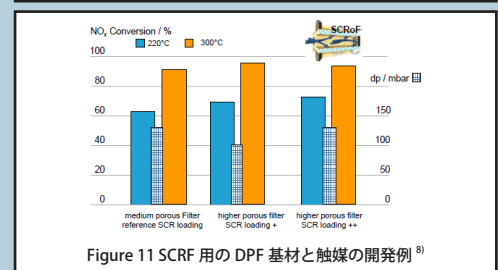


Figure 11 SCRf 用の DPF 基材と触媒の開発例⁸⁾

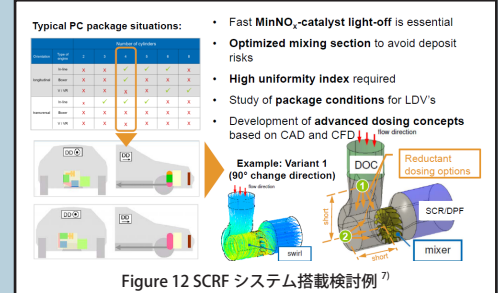


Figure 12 SCRf システム搭載検討例⁷⁾

尿素の分散状況を解析した例を示す。ターボの下流でL字、またはコの字の排気流路を構成し、尿素水噴射と排気流との混合分散を最適設計する必要がある。図13はシステムの構成例であり、酸化触媒の後端に加水分解触媒をコートし、背面から尿素噴射を行いアンモニアを発生させ、外側にUターンした排気流と混合しながらSCRFに流入させている。

さらに尿素水の代わりにアンモニアの金属塩をボトルに充填して、排気管に直接アンモニアを供給する方式の検討も進んでいる。図14に約140℃の排気温度からアンモニアの直接供給が可能になる例を示す。ボトルの搭載性及び交換利便性などが普及の鍵と期待されている。

SCR触媒システムの開発は、ほかにも多くの研究開発が行われているが、誌面制約から限られたSCR触媒の開発事例を紹介した。

3.3 NSR触媒の現状と将来

エンジンの燃焼そのものでNOxの還元剤(CO, H₂, NH₃など)を作るNSRシステムは、自動車への尿素水補充を必要とする尿素SCRシステムに比べ、搭載スペースに余裕がない小型の乗用車に対して特に適性が高く、またコストバランス的にも有利である。約150℃からNOxを吸蔵できるので低温浄化性能は尿素SCRより高く、硫黄被毒からの再生処理を適正な温度で実施し、触媒性能劣化を抑制すれば400℃以上まで浄化性能が得られる。ここではWLTCやRDEへの適用を目的に開発中の触媒やシステムを紹介する。図15と図16に各々、ユーロ6対応に対応した尿素SCR搭載車(床下にSCR触媒)およびNSR搭載車のNEDCとWLTCの試験サイクルの興味ある結果を示す。各図a)によると両システムともWLTCでは触媒温度が早期に暖機されるので、NEDCよりも浄化率が高い。これを各図b)に示すように運転領域毎に分けて比較すると、暖機過程にあるフェーズ1ではNSRの優位性が見て取れる。活性温度に入るフェーズ2以降では反対にSCRの方が安定した浄化性能を示している。

NSRの高温性能に関して、次の幾つかの進展がある。図17は触媒自体の吸蔵還元性能の改善により450℃での浄化性能を貴金属の増加なしに25ポイント増加し、併せて700℃以下の硫黄脱離性も向上させ、実用性を高めている報告があり、触媒自体の改良によりNSR基本性能向上は今後も続くと思われ。

もう一つの進展は、新しいNOx還元方法のDiAirである。DiAirはNSRシステム改良過程で発見された。図18にNSR下流にあるDPFのPM再生中にNSR床温600℃以上でNOxが98%浄化される事例を示す。この極めて高い浄化率はNSR上流に配置する燃料添加弁で所定の周期と噴射率で燃料添加を行うと発現する。図19にその還元メカニズムを示す。貴金属を介してアルカリ担体に吸着したNOxが触媒上に添加された燃料のクラッキング体と反応して還元性中間体を生成する。これがNOxを選択還元する機構と解析されている。前述の触媒性能に加えて、より高温までNOx浄化性能を拡張しうる機能としてDiAirシステムの量産化が期待されている。

4 今後の展望

将来の低炭素社会において、Fun to Drive(運転する楽しみ)を提供するディーゼル乗用車を共栄させるには、低温から高温まで幅広い温度域にて優れた浄化性能を示すNOx触媒システムをリーズナブルなコストで成立させることが必須条件であろう。次世代のNOx後処理システムにおいては、NOxを削減するに留まらず、これまでNOx低減のために失われてきたエンジンの燃費さえも改善するポテンシャルを有している。これが実現すれば近い将来、エンジン減筒やハイブリッド技術と組み合わせ、小型乗用車の普及が進むものと期待する。

しかしその早期実現のために技術開発の高度化、高速化が求められる。今後はモデルベース開発手法や開発ツールの活用拡充のみならず、個社単独では開発困難な技術領域のコンソーシアム推進¹³⁾も効果を発揮すると期待する。

【参考文献】

- 1) M. Rexeis, S. Hausberger : Graz University of Technology, NOx-Emission trends from EU1 to EU6, Session_0, 12MinNOx_Proceedings
- 2) A. Mackensen, T. Braun, F. Duvinage : Daimler, Future diesel emission control technologies. The tension between legislation and customer benefits, Session_1, 12MinNOx_Proceedings
- 3) M. Inoue, T. Fukuma, Y. Bisaiji and K. Yoshida : Toyota, DiAir: The new deNOx system for future emission compliance, Proceedings of Aachen colloquium, p.237-254, 2011.

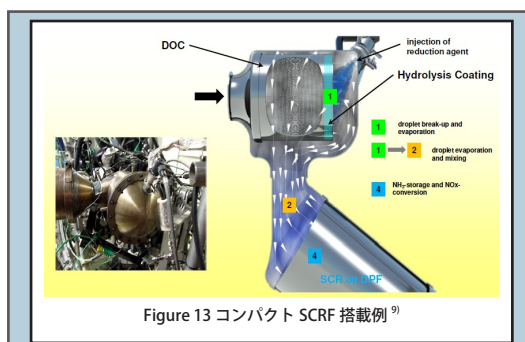


Figure 13 コンパクト SCR 搭載例⁹⁾

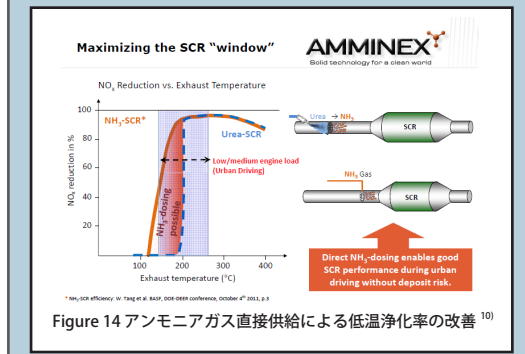
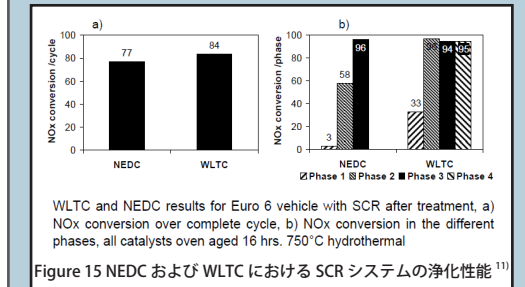
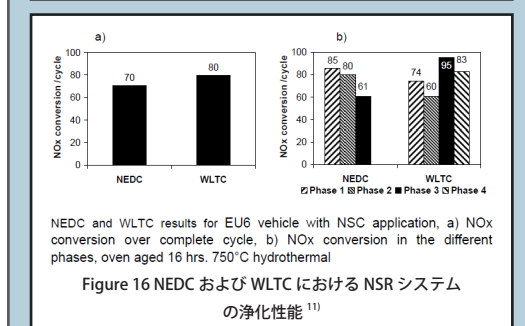


Figure 14 アンモニアガス直接供給による低温浄化率の改善¹⁰⁾



WLTC and NEDC results for Euro 6 vehicle with SCR after treatment, a) NOx conversion over complete cycle, b) NOx conversion in the different phases, all catalysts oven aged 16 hrs. 750°C hydrothermal

Figure 15 NEDC および WLTC における SCR システムの浄化性能¹¹⁾



NEDC and WLTC results for EU6 vehicle with NSR application, a) NOx conversion over complete cycle, b) NOx conversion in the different phases, oven aged 16 hrs. 750°C hydrothermal

Figure 16 NEDC および WLTC における NSR システムの浄化性能¹¹⁾

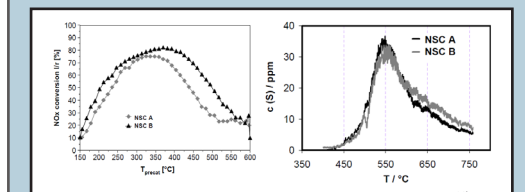


Figure 17 NSR 触媒の高温性能、硫黄脱離性の改善例¹¹⁾

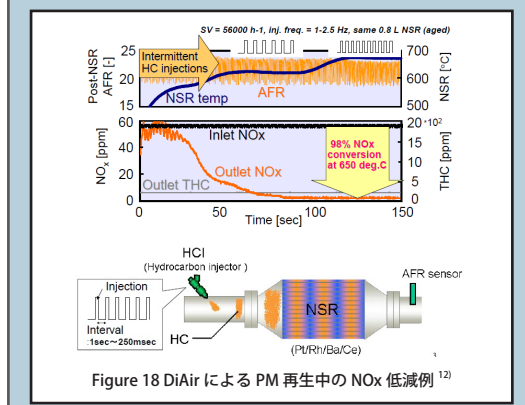
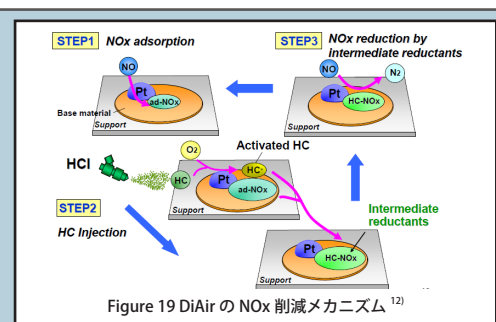


Figure 18 DiAir による PM 再生中の NOx 低減例¹²⁾

- 4) F. P. Sanchez, A. Bandivadekar and J. German, icct, Estimated Cost of Emission Reduction Technologies for light-duty vehicles, www.theicct.org. Mar.2012
- 5) ロバートボッシュ社 : <http://www.bosch.co.jp> より
- 6) 石原 力, 富田 吉昭, 吉田 博: マツダ, マツダ CX-7 搭載の乗用車用尿素 SCR システムの開発, 自動車技術会シンポジウム 20104158, No.20-08 P6, 2010.
- 7) F. Bunar, S. Schrade, O. Friedrichs, L. Kraemer : IAV, Applying SCR/DPF to passenger cars, Session_6, 12MinNOx_Proceedings
- 8) S. Stiebels, T. Neubauer, T. Mueller-Stach, BASF, Smart catalyst technologies for future automotive emission control, Session_6, 12MinNOx_Proceedings
- 9) R. Brueck, M. Brugger, K. Mueller-Haas : EMITEC, Layout and application of ultra-compact metal catalyst based SCR systems for close coupled engine applications, Session_4, 12MinNOx_Proceedings
- 10) T. Johannessen, Amminex : 3rd generation SCR system: Solid storage and direct ammonia gas dosing, Session_7, 12MinNOx_Proceedings
- 11) I. Grissted, S. Franoschek, M. Seyler, R. Hoyer, H. Noack, S. Basso and W. Mueller, Umicore : Proceedings of Aachen colloquium, p.1143-1162, 2012.
- 12) K. Yoshida, Y. Bisaiji, M. Inoue, K. Umamoto, T. Fukuma : , Toyota, A study of the NOx reduction mechanism for improving the performance of DiAir, Session_2, 12MinNOx_Proceedings
- 13) 大聖 泰弘 : まずエンジンより始めよ。非競争領域における産学官の連携を目指して, 自動車技術 Vol.67, No.02, P2-3, 2013.



最新ディーゼルの健康影響

Health effects of exhaust emission from new technology diesel engine

一般財団法人 日本自動車研究所 エネルギー・環境研究部健康影響グループ グループ長：伊藤 剛

Tsuyoshi ITO (Japan Automobile Research Institute)

1 はじめに

近年のディーゼルエンジン技術の進展は排気中の汚染物質を劇的に低減し、大気環境の改善、地域の公衆衛生の向上に大きく寄与していると考えられている。一方で、2012年6月、世界保健機関（World Health Organization；WHO）の外部組織である国際がん研究機関（International Agency for Research on Cancer；IARC）は、ディーゼル排気の発がんリスクを、これまでの“グループ2A”「人に対しておそらく発がん性がある」から、“グループ1”「人に対して発がん性がある」に分類したと発表したⁱ。最近ではクリーンなイメージが定着しつつあるディーゼルエンジンの排気は、今もまだ重大な健康問題を抱えているのだろうか。ここでは、これまでのディーゼル排気の影響研究の歴史を振り返り、最新のディーゼル排気の影響研究について紹介する。

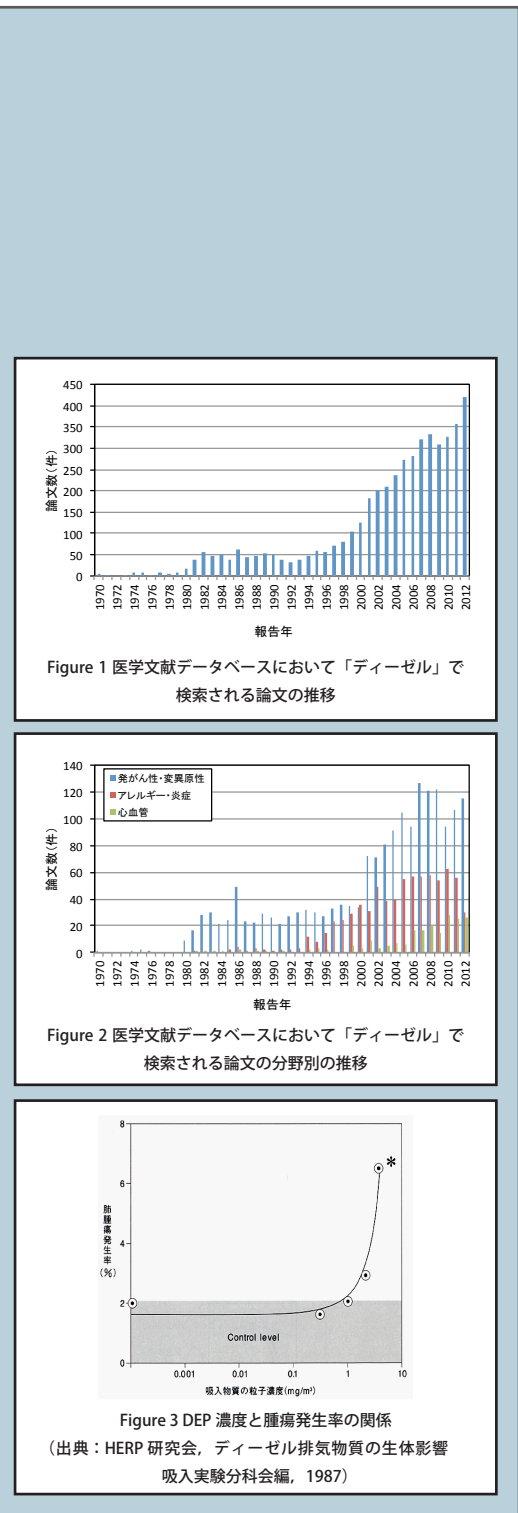
2 ディーゼル排気の影響研究の歴史

ディーゼル排気の影響に関する論文は、古くは1940年代から散見される。初期の注目すべき論文としては、1950年代に報告された疫学研究が挙げられる。Raffleは、病気を理由にロンドン交通局を45～64歳で退職した男子従業員の職種別に肺がんの粗罹患率を1950年から1954年にかけて調べたところ、バス整備士において高い傾向を示すことを報告しているⁱⁱ（ただし、この結果では一般住民の死亡率と比較して差はなかった）。

さらに、これまで記録として公式に残されているディーゼル排気と健康に関する研究報告の推移を、改めて客観的に把握することを目的に、米国国立医学図書館の国立生物医学情報センターが運営する医学・生物学分野の学術文献検索サービスであるPubmed（<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed>）により調査した。表題または概要に「diesel」の単語を含む論文を検索し、その数を年代毎に集計した。その結果、1941年以降で4720件の論文が該当した（図1、2012年11月27日現在）。1990年代前半にわずかに減少した時期も見られるが、1990年代後半以降、現在に至るまで増加が続いている。

この4720件の論文から、発がん性・変異原性「キーワード：cancer or mutagen* or carcinoge*（“がん”または“変異原”または“発がん”）」、アレルギー・炎症「キーワード：allerg* or inflammat* or asthma（“アレルギー”または“炎症”または“喘息”）」、心血管「キーワード：cardio* or vascul* or heart（“心臓”または“血管”または“心臓”）」に関する論文を検索した。その結果、1980年代から発がん性・変異原性に関する論文は報告されており、三つの分野の中ではその研究の歴史が最も古く、数も多かった（図2）。日本自動車研究所（JARI）も1980年代にディーゼル排気の影響について研究した。その研究成果により、環境基準よりもはるかに高濃度のディーゼル排気のラットの生涯にわたる吸入曝露が腫瘍発生率をわずかに高めたが、現実的な環境濃度ではディーゼル排気曝露は影響を及ぼさないことが明らかになったⁱⁱⁱ（図3）。

1990年代の後半ごろからアレルギー・炎症に関する報告が多く見られるようになった。ディーゼル排気の吸入曝露が抗原により誘発されるアレルギー性気道炎症を増悪することが複数の論文で指摘されている^{iv v}。JARIもまた1990年代後半にはスギ花粉症に及ぼすディーゼル排気の影響について研究しており、高濃度の排気曝露がマウスのアレルギー性炎症反応を亢進することが示唆された。ただし、その影響は大気中に常在する土埃の曝露による影響と差がないという結果であった。



2000年代になると心疾患に関する論文が増加した。1993年にDockeryらは、大気中微小粒子状物質(PM_{2.5})の濃度が高い都市ほど呼吸器および心血管系疾患による死亡率が高いことを米国6都市調査の結果から示したvi(図4)。その後、この研究結果を支持する報告が相次ぎ、呼吸器よりもむしろ心血管系へのPM_{2.5}の影響がとくに問題視され(表1)、1997年に米国環境保護庁(US Environmental Protection Agency; US EPA)がPM_{2.5}の大気質基準を定めた(米国は2012年12月にPM_{2.5}基準値[年平均]を15から12 μg/m³に見直した。日本は2009年9月に15 μg/m³に定めた)。ディーゼル排気粒子は粒径が2.5 μm以下であり、PM_{2.5}の範疇に含まれることから、ディーゼル排気の影響に対する関心が高まり、2000年以降に研究が急増した。Millsらは、心筋梗塞患者にディーゼル排気を吸入曝露させたところ、心電図に虚血性心疾患に関連する異常が認められることを報告したvii。そのほかにも、動脈硬化や血液凝固など心血管系疾患にかかわる様々な研究が報告されている。

最近では、超微小粒子は肺に留まらずに全身に移行することが指摘されており、呼吸器・心血管系のみならず生殖系や中枢神経系への影響に関する研究も増加している。Levesqueらは、ラットへのディーゼル排気の曝露が脳の炎症性サイトカインの産生を亢進し、神経炎症を誘導すると報告しているviii。

このように、ディーゼル排気の影響に関する研究は発がん性から中枢神経影響に至るまで多岐にわたり数多く報告されており、現在もなお活発に研究されている。

3 最新のディーゼル排気の影響研究

1980～2000年頃に数多く実施されたディーゼル排気の吸入曝露による健康影響研究で使用されたエンジンの多くは、現在のディーゼルエンジンのような排気後処理装置は装着されていなかった。現在の街中を走行しているトラックやバスのディーゼルエンジンにはDPFなどの後処理装置が装着されており、排気は著しく改善されている。これらのことから、従来のディーゼル排気の影響研究の結果を基に、現在のディーゼル排気の影響を説明することは適切ではない、という指摘がある。その一方で、既知の有害物質を低減するための新技術が、これまでの排気に含まれていなかった新たな有害物質を生み出す可能性についても否定できず、新しい技術が公衆の健康に影響を及ぼさないことを保証することには慎重であるべきである、という指摘もある。これらの意見を受け、米国の研究財団であるHealth Effects Institute (HEI)は、最新のディーゼル排気の影響研究(Advanced Collaborative Emissions Study; ACES)を2006年より進めている。ACESは、Phase 1, Phase 2, Phase 3の三つの部分から構成されている。Phase 1は米国の2007年規制適合エンジンの排気特性解析と健康影響研究のためのエンジン選定、Phase 2は2010年規制適合エンジンの排気特性解析、Phase 3は2007年規制適合エンジン(DPF装着)の排気曝露の影響研究である。

Phase 3の健康影響研究の計画では、2012年末までラットの24ヵ月間または30ヵ月間のディーゼル排気の慢性曝露による発がん性試験が実施され、その後、最終的な報告書がまとめられる予定になっており、これまでに12ヵ月間の曝露試験の結果が報告されているix x xi xii。この研究では、ラットとマウスにディーゼル排気を曝露し、血液検査血液学、血清生化学的検査、気管支肺胞洗浄、肺の細胞増殖、組織病理学の解析により、その影響を評価している。これらの結果、肺の炎症と酸化ストレスに関する指標が曝露によりわずかに変化した。一方、発がんに関連する遺伝毒性として、小核試験とコメットアッセイを実施したが、排気曝露による変化は認められなかった(図5)。

JARIでも、平成17年排出ガス規制(新長期規制)適合ディーゼルエンジン(DPF装着)の排気曝露の影響研究を2006～2011年度にかけて実施した。この研究では胎仔および新生仔への排気の影響が、喘息、生殖機能、中枢神経機能に影響を及ぼすかどうか評価した。これらの結果では、ディーゼル排気の影響によって遺伝子やたんぱく質の分子レベルでは鋭敏に変動していると思われる因子が散見されたものの、機能的あるいは病理学的な症状のレベルでは明確な変化は認められなかったxiii,xiv,xv,xvi,xvii(図6, 7, 8)。

ACESも我々の研究も、DPFを装着したエンジンを用いており、過去の研究とほぼ同様の実験条件であるにもかかわらず、結果的に粒子の曝露濃度が極めて低濃度であった。両研究において最新のディーゼル排気の影響による健康影響が観察されなかった最も大きな要因は、排気中の粒子の低減効果と考えられた。

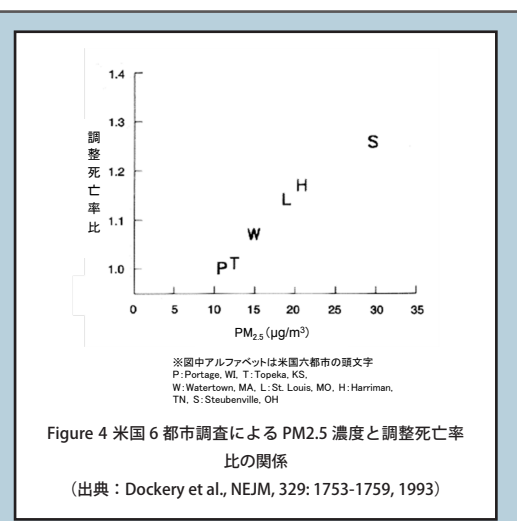
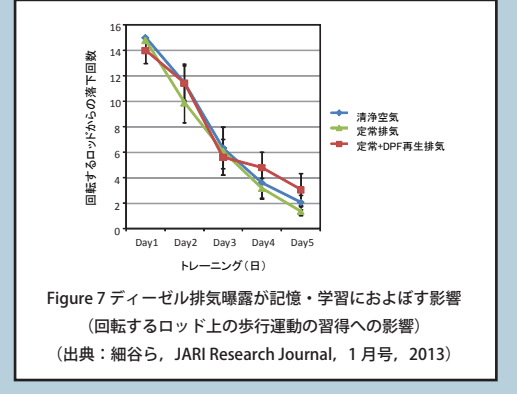
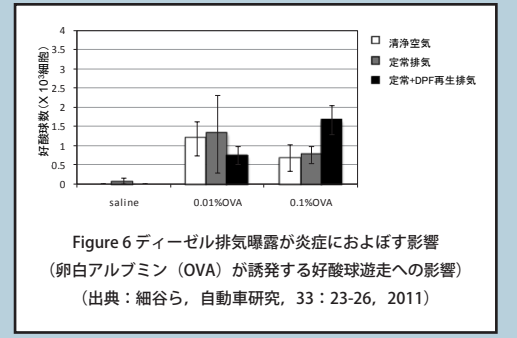
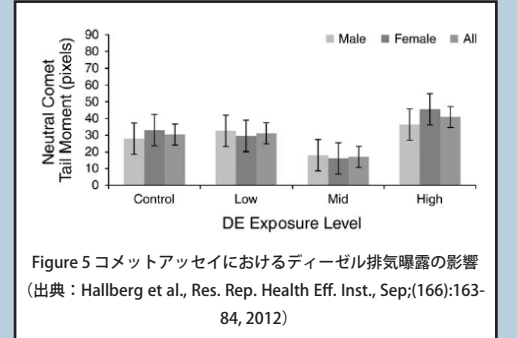


Table 1 PM_{2.5}の短期/長期曝露と健康影響の関係

曝露期間	Size Fraction	Outcome	Causality Determination
短期曝露	PM _{2.5}	Cardiovascular Effects	Causal
		Respiratory Effects	Likely to be causal
		Mortality	Causal
長期曝露	PM _{2.5}	Cardiovascular Effects	Causal
		Respiratory Effects	Likely to be causal
		Mortality	Causal
		Reproductive and Developmental	Suggestive
		Cancer: Mutagenicity, and Genotoxicity	Suggestive

(出典: Integrated Science Assessment for Particulate Matter, US EPA, 2009)



4 IARCにおけるディーゼル排気の発がんリスクの議論

IARCは、2012年の6月にフランスのリヨンに国際的な専門家を招き、1週間にわたる会議を開催し、その結論として、ディーゼル排気の曝露が肺がんに対するリスクの増加と関連するという十分な証拠を得たと判断し、ディーゼル排気を「人に対して発がん性がある」(グループ1)に分類した、と発表した。IARCは1988年にディーゼル排気を、「人に対して恐らく発がん性がある」(グループ2A)に分類していたが、1998年以降、ディーゼル排気を分類見直しの優先度の高いものとして推奨していた。2012年3月に報告された、地下鉱山労働者における職業曝露に関する大規模な米国国立癌研究所/国立労働安全衛生研究所の研究により、ディーゼル排気を曝露された鉱山労働者では肺がんによる死亡リスクが増加することが示され、これを根拠の一つとしてグループ1へ見直しされた xviii xix。

IARCの発がんリスクに関する分類の基準について表2に示す。IARCは発がん性の評価を人と実験動物における証拠の強さ(科学的知見の明確さや信頼性)に基づいて分類している。今回、ディーゼル排気が分類されたグループ1は、人における証拠と実験動物における証拠が「十分(sufficient)」な場合に適用される。つまり、この判定は発がん性に関する科学的証拠の確からしさを分類したものであり、発がん性の強さを評価したものではない。言い換えれば、グループ1に分類された因子が、グループ2Aや2Bに分類された因子よりも危険であることを必ずしも意味するものではない。IARCが自ら説明しているように、この発がんリスクの分類は、ある因子について法律や規制を勧告することを目的としたものではないのである。

今回新たにディーゼル排ガスの発がん性を示す明確な根拠とした研究は、鉱山労働者に関する疫学研究であった。IARCで議論するディーゼル排気は、トラックやバスに限らず様々なディーゼルエンジンを対象としており、また、旧型と新型のエンジンの区別もしていない。一方、2012年のHEIの年次総会では、新技術のディーゼルエンジン(New Technology Diesel Engines; NTDE)と古いディーゼルエンジン(Traditional Diesel Engines; TDE)の排気のリスクを区別する必要があると研究者らは強く主張した。NTDEの排気粒子濃度はTDEよりも明らかに低いのみならず、両者の構成成分も明らかに変化しており、排気の影響を評価するにはこの違いを考慮しなければならないと指摘された。

5 今後の健康影響研究

排気後処理装置などの自動車技術の進歩により、自動車がかかわる健康影響の問題が改善の方向に進んでいるであろうことは、国内外の最新の研究成果を見れば明らかである。しかし、自動車が生活の一部となり、社会生活と切り離すことができない状況では、自動車の安全および安心にかかわる問題は、今も私たちの大きな関心事の一つであり、過去の問題として片付けることはできない。そのため、今もなお数多くのディーゼル排気の影響研究が実施され、様々な議論が続いている。たとえば、米国は温暖化ガスの排出抑制およびエネルギー政策によりバイオ燃料の使用を促進しようとしているが、バイオ燃料の使用による排気の影響など、自動車がかかわる健康影響について私たちが知らないことはいまだに多い。このように自動車がかかわる健康影響研究に終着点はなく、今後も継続的に取り組んでいかなければならない。

【参考文献】

i Benbrahim-Tallaa L, Baan RA, Grosse Y, Lauby-Secretan B, El Ghissassi F, Bouvard V, Guha N, Loomis D, Straif K; International Agency for Research on Cancer Monograph Working Group. Carcinogenicity of diesel-engine and gasoline-engine exhausts and some nitroarenes. *Lancet Oncol.* 2012 Jul;13(7):663-4.

ii Raffle PA. The health of the worker. *Br J Ind Med.* 1957 Apr;14(2):73-80.

iii HERP 研究会, ディーゼル排気物質の生体影響 吸入実験分科会編, 1987

iv Takano H, Ichinose T, Miyabara Y, Shibuya T, Lim HB, Yoshikawa T, Sagai M. Inhalation of diesel exhaust enhances allergen-related eosinophil recruitment and airway hyperresponsiveness in mice. *Toxicol Appl Pharmacol.* 1998 Jun;150(2):328-37.

v Hashimoto K, Ishii Y, Uchida Y, Kimura T, Masuyama K, Morishima Y, Hirano K, Nomura A, Sakamoto T, Takano H, Sagai M, Sekizawa K. Exposure to diesel exhaust exacerbates allergen-induced airway responses in guinea pigs. *Am J Respir Crit Care Med.* 2001 Nov 15;164(10 Pt 1):1957-63.

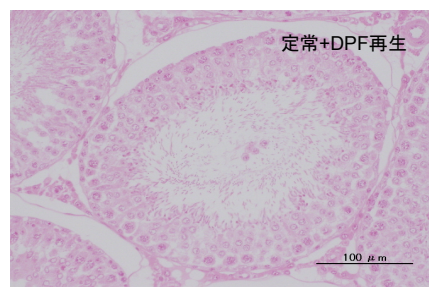


Figure 8 ディーゼル排気曝露が精巣におよぼす影響 (ラットの精巣への影響 [HE染色])

(出典: 細谷ら, JARI Research Journal, 1月号, 2013)

Table 2 IARCによる発がん性の分類 (2012年11月7日現在)

分類	発がん性	分類された因子の例
グループ 1	人に対して発がん性がある	ホルムアルデヒド、タバコ、アルコール飲料、紫外線、ディーゼルエンジン排気など(合計109種)
グループ 2A	人に対して恐らく発がん性がある	PCBなど [合計65種]
グループ 2B	人に対して発がん性があるかも知れない	クロロホルム、ニトロー、ガソリンエンジン排気、超微細炭塵など(合計217種)
グループ 3	人に対する発がん性を分類できない	カフェイン、水銀、お茶、コレステロールなど(合計500種)
グループ 4	人に対して恐らく発がん性はない	カプロラクタム(ナイロンの原料) [1種]

(出典: <http://monographs.iarc.fr/ENG/Classification/index.php>)

- vi Dockery DW, Pope CA 3rd, Xu X, Spengler JD, Ware JH, Fay ME, Ferris BG Jr, Speizer FE. An association between air pollution and mortality in six U.S. cities. *N Engl J Med.* 1993 Dec 9;329(24):1753-9.
- vii Mills NL, T?rnqvist H, Gonzalez MC, Vink E, Robinson SD, S?rderberg S, Boon NA, Donaldson K, Sandstr?m T, Blomberg A, Newby DE. Ischemic and thrombotic effects of dilute diesel-exhaust inhalation in men with coronary heart disease. *N Engl J Med.* 2007 Sep 13;357(11):1075-82.
- viii Levesque S, Taetzsch T, Lull ME, Kodavanti U, Stadler K, Wagner A, Johnson JA, Duke L, Kodavanti P, Surace MJ, Block ML. Diesel exhaust activates and primes microglia: air pollution, neuroinflammation, and regulation of dopaminergic neurotoxicity. *Environ Health Perspect.* 2011 Aug;119(8):1149-55.
- ix McDonald JD, Doyle-Eisele M, Gigliotti A, Miller RA, Seilkop S, Mauderly JL, Seagrave J, Chow J, Zielinska B; HEI Health Review Committee. Part 1. Biologic responses in rats and mice to subchronic inhalation of diesel exhaust from U.S. 2007-compliant engines: report on 1-, 3-, and 12-month exposures in the ACES bioassay. *Res Rep Health Eff Inst.* 2012 Sep;(166):9-120.
- x Bemis JC, Torous DK, Dertinger SD; HEI Health Review Committee. Part 2. Assessment of genotoxicity after exposure to diesel exhaust from U.S. 2007-compliant diesel engines: report on 1- and 3-month exposures in the ACES bioassay. *Res Rep Health Eff Inst.* 2012 Sep;(166):125-57.
- xi Hallberg LM, Ward JB, Hernandez C, Ameredes BT, Wickliffe JK; HEI Health Review Committee. Part 3. Assessment of genotoxicity and oxidative stress after exposure to diesel exhaust from U.S. 2007-compliant diesel engines: report on 1- and 3-month exposures in the ACES bioassay. *Res Rep Health Eff Inst.* 2012 Sep;(166):163-84.
- xii Conklin DJ, Kong M; HEI Health Review Committee. Part 4. Effects of subchronic diesel engine emissions exposure on plasma markers in rodents: report on 1- and 3-month exposures in the ACES bioassay. *Res Rep Health Eff Inst.* 2012 Sep;(166):189-223.
- xiii 伊藤剛, 細谷純一, 辺見愛, 田村久美子, 中島徹, 最新ディーゼル排気の胎仔・新生仔期曝露がマウスの喘息におよぼす影響 (1) ディーゼル排気暴露実験, 自動車研究. 2011;33 (5): 15-18.
- xiv 辺見愛, 細谷純一, 田村久美子, 石井幸雄, 伊藤剛, 最新ディーゼル排気の胎仔・新生仔期曝露がマウスの喘息におよぼす影響 (2) 肺の発育に関する評価, 自動車研究. 2011;33 (5): 19-22.
- xv 細谷純一, 辺見愛, 田村久美子, 石井幸雄, 伊藤剛, 最新ディーゼル排気の胎仔・新生仔期曝露がマウスの喘息におよぼす影響 (3) 炎症・免疫系に関する評価, 自動車研究. 2011; 33 (5): 23-26.
- xvi 細谷純一, 辺見愛, 古根村綾乃, 田村久美子, 伊藤剛, 最新ディーゼルエンジン排気の胎仔・新生仔期曝露がラットの生殖・繁殖系に及ぼす影響, JARI Research Journal. 2013; 1月号.
- xvii 細谷純一, 辺見愛, 古根村綾乃, 田村久美子, 成田年, 伊藤剛, 最新ディーゼルエンジン排気の胎仔・新生仔期曝露がマウスの中枢神経系に及ぼす影響, JARI Research Journal. 2013; 1月号.
- xviii Michael D. Attfield, Patricia L. Schleiff, Jay H. Lubin, Aaron Blair, Patricia A. Stewart, Roel Vermeulen, Joseph B. Coble, Debra T. Silverman. The Diesel Exhaust in Miners Study: A Cohort Mortality Study With Emphasis on Lung Cancer. *J Natl Cancer Inst* 2012;104:1?15
- xix Debra T. Silverman, Claudine M. Samanic, Jay H. Lubin, Aaron E. Blair, Patricia A. Stewart, Roel Vermeulen, Joseph B. Coble, Nathaniel Rothman, Patricia L. Schleiff, William D. Travis, Regina G. Ziegler, Sholom Wacholder, Michael D. Attfield. The Diesel Exhaust in Miners Study: A Nested Case?Control Study of Lung Cancer and Diesel Exhaust. *J Natl Cancer Inst* 2012;104:1?14
- xx <http://www.healtheffects.org/Slides/AnnConf2012/Wall-SunPM.pdf>

Report: 第 23 回内燃機関シンポジウム

Report of 23th Internal combustion engine symposium

日時：2012.10.31 ~ 11.2

場所：北海道大学

幹事学会：日本機械学会

共催学会：自動車技術会

レポート：小川 英之（北海道大学），河崎 澄（滋賀県立大学），富田 栄二（岡山大学）

飯島 晃良，川那辺 洋，佐藤 唯史（編集委員）

Hideyuki OGAWA (Hokkaido Univ.), Kiyoshi KAWASAKI (The Univ. of Shiga Pref.), Eiji TOMITA (Okayama Univ.)
Akira IJIMA, Hiroshi KAWANABE, Tadashi SATO (JSAE ER Editorial Committee)

1 はじめに

第 23 回内燃機関シンポジウム（幹事学会：日本機械学会，共催学会：自動車技術会）は「世代を超えたエンジンシステムへの再挑戦」をメインテーマとして，2012 年 10 月 31 日（水）～ 11 月 2 日（金）に北海道大学学術交流会館にて開催され，284 名の参加で盛会のうちに終えることができた。一般講演は 3 室 21 セッションにて合計 86 編の講演発表が行われ，2 件の基調講演に加えて，先端内燃機関フォーラムでは各方面の最新技術に関する 5 件の講演，そして今後の産学連携の重要性の認識から「内燃機関共同研究へ第一歩」と題したパネル討論会が行われた。本大会は，今後も毎年開催される内燃機関に関する国内最高峰の定期シンポジウムとしてさらなる発展が期待される。

なお，次回，第 24 回内燃機関シンポジウムは，2013 年 11 月 26 日（火）～ 28 日（木）に，神戸大学で開催される予定である（第 23 回内燃機関シンポジウム 要旨・プログラム集 掲載の開催案内より）。

ここでは，全体のごく一部であるが，聴講した講演を中心に概要を報告する。

2 概要

2.1 基調講演

シンポジウム初日に，古野志健男氏（日本自動車部品総合研究所）より，『ガソリンエンジンの歩みと将来の方向性』と題した基調講演 I があった。この講演では，まず自動車用ガソリンエンジンの進化の歴史と，自動車を取り巻く環境の変化について解説がなされた。さらに，最高熱効率 50% を達成するためのガソリンエンジン技術として，システム系，燃焼系，可変動弁系，点火系などの最新技術が系統的に紹介されるとともに，排気熱回収の重要性も示された。

本内燃シンポジウムにおいて 11 月 2 日に行われた基調講演 II では，豊田中央研究所の中北清己氏より「ディーゼル燃焼解析からの学び」と題して講演がなされた。これは氏が長年にわたって行ってきたディーゼルエンジンにおける低エミッション化，高効率化に関する研究を大きく四つに分けて解説されたもので，「噴射率の制御」では，早期パイロット，近接パイロット，主噴射の噴射率制御に関する研究内容が示された。さらに，「噴霧と気流の関係」，「低温燃焼に関して」および「低熱損失型の燃焼系に関して」という構成で講演がなされた。この中から幾つか紹介させていただくこととする。

はじめに，「噴射率の制御」における早期パイロットに関して，パイロット噴射時期が早期になればシリンダライナに燃料が付着する場合があります問題となる。この際，噴射圧力と噴射量がこの付着量に大きく影響を与える可能性があり，一般には噴射量が少なければ付着量も減るように考えられるが，これに対して氏らはこの付着量を詳細に検討することにより，最



Photo 2.1 古野志健男氏（日本自動車部品総合研究所）



Photo 2.2 中北清己氏（豊田中央研究所）

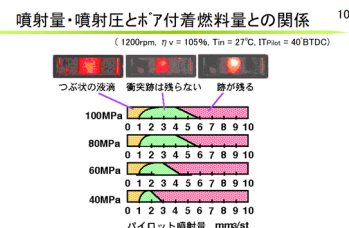


Figure 2.1 パイロット噴射における最適化

適噴射量が存在することを見いだしている。図 2.1 はその詳細を示したものであり、パイロット噴射量が少なすぎる場合は液滴の粗大化により壁面附着が増え、多い場合には噴霧貫徹力が大きくなりやはり付着量が増える。すなわち、付着量を最小にするパイロット噴射量が存在することとなる。また、マルチパイロット噴射により壁面附着を低減できることも定量的に示された。

つぎに、「噴霧と気流の関係」について、スモーク限界当量比は燃焼室全域に混合気配分できるかどうかで決まるという結果を導き出している。これは噴霧により供給される運動量とスキッシュの運動量の比でシンプルに整理することができ、図 2.2 に示すようにそれぞれの代表速度を V_{sp} 、 V_s とすると図のようにスモーク限界当量比が整理できることを示している。

また、「低熱損失型の燃焼系に関して」については、壁面熱損失を低減するために低流動を利用し、これに小径、多穴噴霧および低圧縮比を組み合わせることによって、それぞれが持っている問題点をうまく相互補完できることを示した(図 2.3)。以上をとおして、ディーゼル燃焼を捉えるためには、複雑な現象の組み合わせである燃焼過程の主因子や切り口を見つける「勘」どころと、いわゆるよく知られた「常識」や得られた結果にとらわれすぎない柔軟性が必要であると結ばれている。

・基調講演の資料は以下からダウンロードできます。

- ▶ 古野志健男：ガソリンエンジンの歩みと将来の方向性 ―世代を超えたエンジンシステムへの再挑戦―
- ▶ 中北清己：ディーゼル燃焼解析からの学び

2.2 先端内燃機関フォーラム

大会 2 日目には、『先端内燃機関フォーラム ―さらなる燃費改善を目指して―』(司会：近久武美氏(北海道大学))が開催され、自動車メーカー各社より最新の燃費改善技術について紹介がなされた。講師と講演題目は表 2.1 のとおりである。安岡氏(日産)からは、同社製 NOTE に採用された、摩擦低減技術、ダウンサイジング過給技術、高圧縮比化のための冷却技術などを中心に紹介がなされた。大平氏(スズキ)からは、従来車比 22%の燃費(km/L)改善を達成した同社製ワゴン R に関して、制動回収システム、アイドリングストップシステムを中心に紹介がなされた。足立氏(トヨタ)からは、ハイブリッド用ガソリンエンジンにおいて、熱効率 45%を達成するための方向性としてロングストローク化、30%を越える Cooled EGR、リーン NOx 触媒を併用した EGR システム、などの導入が紹介された。中井氏(マツダ)からは、同社製 SKYACTIV-D の燃費向上技術について紹介があった。島崎氏(いすゞ中研)からは、商用車用ディーゼルエンジンの熱効率向上に向けたダウンサイジング技術、排気熱回収技術について紹介がなされた。全体を通して、ガソリンとディーゼルが競い合うように着実に進化している現状が実感できるフォーラムであった。

2.3 パネル討論会；内燃機関共同研究へ第一歩

大会最終日のテクニカルセッション終了後に、『内燃機関共同研究へ第一歩 ―現状と今後の課題―』(司会：大聖泰弘教授(早稲田大学))と題したパネル討論会が開催された。この企画は、第 22 回内燃シンポの公開討論会『内燃機関の共同研究体制の可能性』を踏まえて自動車技術会の中に設置された「内燃機関共同研究推進委員会」が、今までの活動状況を報告し、現在抱えている課題とその解決策を討議し、広く意見を交換する機会とすることを目的に開催された。表 2.2 に示すように、まず産官学の立場から報告がなされた後、パネルディスカッションが開かれ、内燃機関共同研究の今後の展開に関して活発な討論が行われた。

2.4 懇親会

懇親会は、大会 2 日目の夕刻にアスペンホテルの宴会場において盛大に行われた。宮本登先生(北海道大学名誉教授)による乾杯のご発声で会は始まり、後半には、日本および世界の最新・旧車の名前などを 4 択で当てるクイズが催された。(河崎・川那辺)

2.5 開催概要のまとめ

シンポジウム全体を通して、3 月の講演募集開始から当日の会場運営まで、終始円滑に行われた。ご尽力頂いた方々に深く感謝したい。内燃機関シンポジウムは、第 20 回以降、毎

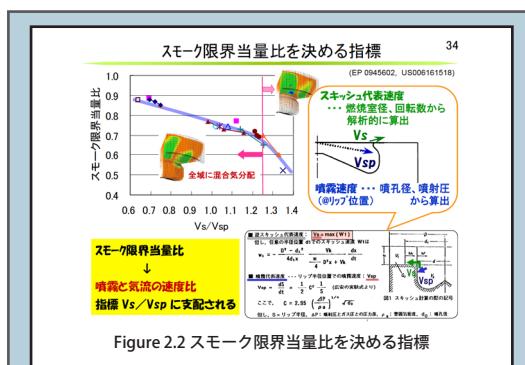


Figure 2.2 スモーク限界当量比を決める指標

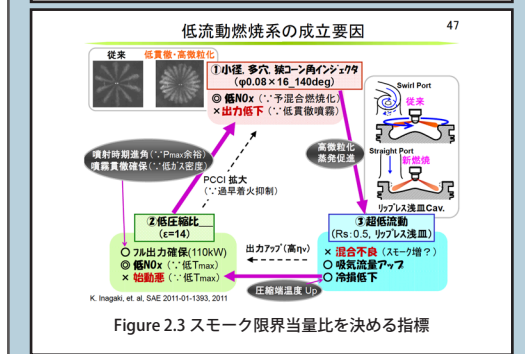


Figure 2.3 スモーク限界当量比を決める指標

Table 2.1 先端内燃機関フォーラムの演題

ガソリンエンジン熱効率向上技術の展望 安岡 正之氏(日産自動車)
軽自動車の燃費向上技術と課題 大平 哲也氏(スズキ)
トヨタ ハイブリッド用4気筒ガソリンエンジンシリーズ 足立 昌司氏(トヨタ自動車)
マツダディーゼルエンジン SKYACTIV-D の燃費向上技術と将来 中井 英二氏(マツダ)
将来の商用車用ディーゼルエンジン燃費向上技術とその課題 島崎 直基氏(いすゞ中央研究所)

Table 2.2 パネル討論会での講演題目

活動経緯 自動車技術会共同研究推進委員会委員長 新井 雅隆(群馬大学)
共同研究の重要性と今後の活動の枠組みおよび展開計画 神本 武征(東工大名誉教授)
企業側からの期待および推進上の課題(1) 大津 啓司(本田技術研究所)
企業側からの期待および推進上の課題(2) 杉山 雅則(トヨタ自動車)
企業側からの期待および推進上の課題(3) 藤田 貴也(日産自動車)
行政側からの期待および推進上の課題 石井 孝裕(経済産業省自動車課)



Photo 2.3 パネル討論会の様子

年開催することが JSAE および ES 部門にて合意されており、次回の第 24 回は「熱効率向上を支えるエンジンシステム技術」と銘打ち 2013 年 11 月 26 日から 11 月 28 日の 3 日間の日程で、神戸大学にて開催されるので、こちらにも是非ご参加頂きたい。(富田)

2.6 委員会組織

委員長 小川英之 (北海道大学)、副委員長 富田栄二 (岡山大学)、幹事 柴田元 (北海道大学)、田部豊 (北海道大学)、河原伸幸 (岡山大学)、小酒英範 (東京工業大学)、川那辺洋 (京都大学)、河崎澄 (滋賀県立大学)、志賀聖一 (群馬大学)、城戸章宏 (北海道自動車短期大学)、北川浩史 (北海道工業大学)、他 委員 18 名 (大学 3 名、企業・研究所 15 名)

3 ガソリン機関

今回の内燃機関シンポジウムにおいても、更なる熱効率の向上や燃焼改善を目指し、ガソリンエンジンに関する研究が盛んに発表された。その中から 5 件の講演を紹介する。

大平ら¹⁾は、エンジンのノック現象を解明する基礎研究として、矩形断面の定容燃焼容器内を一次元的に火炎伝播させ、未燃ガスの温度-圧力履歴が着火に及ぼす影響を調査している。図 3.1 では、 $n-C_7H_{16}/O_2/Ar$ 混合気の初期温度を変化させて、火炎伝播させた際の圧力履歴が示されており、初期温度 480K のみ自着火に至り (図中の■印)、大きな圧力振動が発生している。一方、その他の初期温度では自着火まで至らずに、火炎伝播が完了している (図中の●印)。図 3.2 は $n-C_7H_{16}/O_2/Ar$ 混合気の着火遅れを逆数で表しており、詳細反応機構を用いた化学反応計算により求められ、温度と圧力で整理されている。この図中に、実験で得られた定容燃焼容器内の圧力履歴と、未燃ガスが火炎伝播により断熱圧縮されると仮定して容器内圧力から算出した温度履歴を重ねると、初期温度 520K と 550K では、未燃ガスの温度-圧力履歴が着火遅れの長い領域を通過しており、大きな圧力振動が発生した初期温度 480K と比較して、自着火の発生が抑制されたと推察している。一方、初期温度 480K の着火遅れが、430K や 450K ほど短縮していないことから、未燃ガスの温度分布を一樣と仮定して着火遅れを算出することの限界を指摘しており、今後の課題として局所の未燃ガスに焦点を合わせた観察や分析の必要性を述べている。

HCCI の実用化を目指し、窪山ら²⁾はブローダウン過給を用いた HCCI 燃焼から、通常の SI 燃焼へ切り替える手法の構築を試みている。尚、HCCI 燃焼では、吸気行程における排気弁動作によりブローダウン過給を行っており、SI 燃焼へ切り替える基準は、この排気弁動作を停止した時期としている。図 3.3 は 1 次元シミュレーションによる吸気圧力の時間変化を示しており、吸気スロットルの動作速度によらず、目標のスロットル開度に到達してから吸気圧力が目標値に到達するまでに、およそ 3 サイクルの応答遅れが生じている。従って、単純な燃料供給量の切り替えと吸気スロットルの操作のみでは、SI 燃焼へ切り替えた直後の希薄燃焼は避けられず、NOx 排出量の増加が懸念される結果となっている。この懸念に対して、図 3.4 では燃料供給量を定常の SI 燃焼における要求量よりも増加させる効果を示しており、SI 燃焼切り替え後の 3 サイクルのみ、要求量の 115% まで増加させると、三元触媒後の NOx 濃度は増加しない結果を得ている。また、この際の供給量増加に伴う負荷増大は、点火時期を遅角することで抑制できるとしている。尚、会場からは燃料消費の悪化やスート排出の懸念が指摘されたが、要求量の 115% まで増加させても量論比程度であり、大きな問題にはならないとの認識を述べている。

高橋ら³⁾は、HCCI 燃焼の効果として、燃焼温度低下による冷却損失低減の可能性を追求する為、HCCI 燃焼の希薄可燃限界と自着火温度に及ぼすオゾン添加の影響を調べている。図 3.5 は、HCCI 燃焼の運転が可能な空気過剰率の範囲を示しており、失火による希薄可燃限界は、オゾンを添加することで大幅に拡大している。特に、スロットル開度の調整により筒内の圧縮圧力を低下させた場合に、オゾン添加の影響が顕著であり、HCCI 燃焼の低温化が可能であることを示唆している。また、図 3.6 は、自着火までの筒内圧力と筒内温度について、オゾン添加の有無を比較しており、同一の空気過剰率および自着火時期の運転条件においては、オゾンを添加することで、自着火時の温度を約 30K 低下させ、筒内圧力を約 0.6MPa 低下させることが可能であると述べている。尚、燃焼温度の低下による CO や THC の排出増加が憂慮されるが、どちらの排出濃度もオゾン添加により低減している。詳細化学反応計算を用いた検討から、前者は単に失火抑制による温度上昇で酸化促進されたことが要因であり、後者は高温酸化反応前における RO_2 ケミストリーの活性化が主要因との考えを示している。



Photo 2.4 車名当てクイズで盛り上がる懇親会

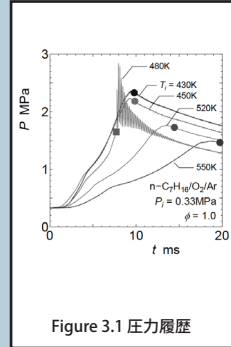


Figure 3.1 圧力履歴

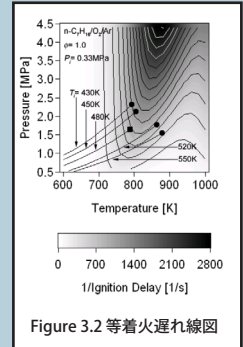


Figure 3.2 着火遅れ線図

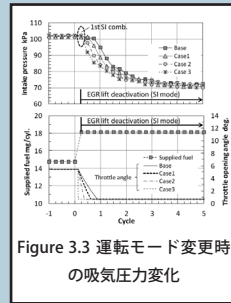


Figure 3.3 運転モード変更時の吸気圧力変化

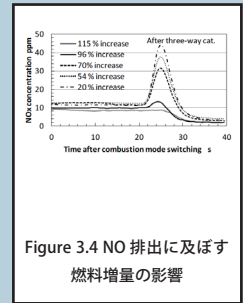


Figure 3.4 NO 排出に及ぼす燃料増量の影響

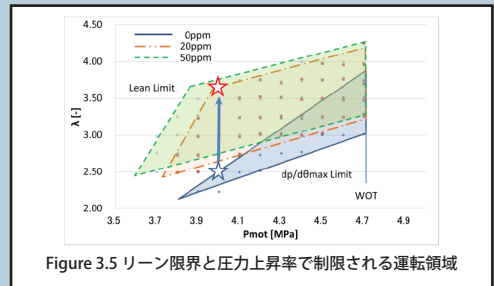


Figure 3.5 リーン限界と圧力上昇率で制限される運転領域

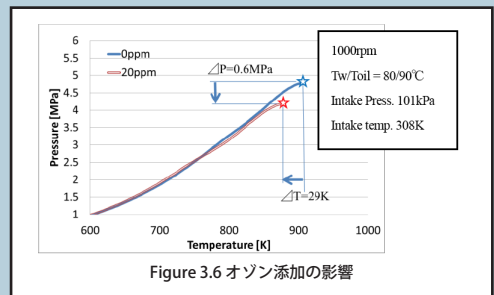


Figure 3.6 オゾン添加の影響

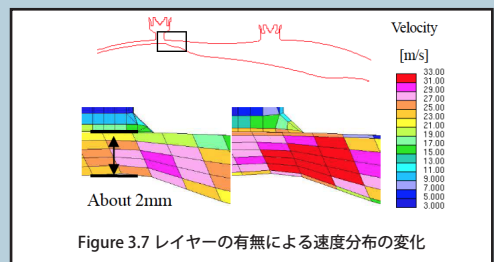


Figure 3.7 レイヤーの有無による速度分布の変化

ロータリエンジンの熱効率向上に影響を及ぼす因子として、中島ら⁴⁾は燃焼室内の流動とプラグホールからの火炎放出に着目し、流動や燃焼の解析精度を向上した事例について紹介している。図 3.7 (図 10) は、ロータリセスのトレーリング側で発生するスキッシュ流速の分布であり、等間隔の 5 層メッシュで構成した解析結果と、壁面 1 層目に厚さ 0.15mm のメッシュを追加した解析結果を比較している。厚さが約 2mm となるスキッシュエリアでは、境界層に相当するメッシュを追加することで、壁関数モデルの影響を抑制し、流速の解析精度を向上させている。また、図 3.8 (図 18) はトレーリング側のプラグホール内における温度分布であり、解析結果に及ぼすメッシュサイズの影響を比較している。点火時期におけるプラグホール内流動の乱流積分スケールに対して、小さいメッシュサイズを選定することで、(b) に示すように皺状火炎の表面積は拡大している。これが支配因子となり、乱流燃焼速度が増大して、プラグホールからの火炎放出時期が精度良く解析できると結論付けている。

湯本ら⁴⁾は、二輪車の排ガス規制強化を見据え、混合気形成と燃焼の現象を把握する必要性から、異なる噴射仕様のインジェクタを用いた調査を実施している。図 3.9 (図 7) は、図示平均有効圧の変動率に及ぼす噴射開始時期の影響を示しており、噴霧軸がポート壁面に向いている System A (SMD120 μm) と System C (同 30 μm) は、噴射開始時期に拘らず変動率はほぼ一定である。一方、噴霧軸がバルブに向いている System B (同 130 μm) では、吸気行程中に噴霧がバルブへ到達する噴射開始時期において、変動率が大幅に増加している。図 3.10 に示されたポート内の様子から、System B のインジェクタを用いた場合、粒径の大きい噴霧がバルブ近傍へ到達しており、吸気工程中では直接筒内へ流入する為、混合気形成が不均一になり、火炎伝播が阻害されることで、図示平均有効圧の変動率が増加すると結論付けている。(佐藤)

- 1) 大平哲也, 永野幸秀, 宇山有, 北川敏明: 定容燃焼容器を用いたノックの基礎的研究, 第 23 回内燃機関シンポジウム講演論文集, 講演番号 B1-03 (2012)
- 2) 窪山達也, 森吉泰生, 畑村耕一, 山田敏生, 高梨淳一, 浦田泰弘: ブローダウン過給 HCCI ガソリン機関の燃焼モード切り替えに関する研究, 第 23 回内燃機関シンポジウム講演論文集, 講演番号 B1-04 (2012)
- 3) 高橋巧朋, 清未涼, 村上康, 山下洋幸: オゾン添加によるガソリン HCCI の低温燃焼特性, 第 23 回内燃機関シンポジウム講演論文集, 講演番号 B1-13 (2012)
- 4) 中島聖, 山本亮, 横畑英明, 香川良二, 村瀬英一, 森吉 泰生: ロータリエンジンにおける詳細素反応を用いた流動・燃焼解析技術の構築, 第 23 回内燃機関シンポジウム講演論文集, 講演番号 B1-05 (2012)
- 5) 湯本美樹, 加藤昇一, 飯田実: 二輪車におけるポート噴射の混合気形成・燃焼への影響, 第 23 回内燃機関シンポジウム講演論文集, 講演番号 B1-06 (2012)

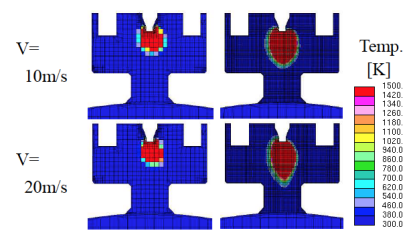
4 エンジン燃焼: SI, HCCI, ディーゼル

4.1 筒内圧センサを用いた燃焼制御技術の開発とその効果¹⁾

筒内圧センシングによる自由度の高い燃焼制御の実用化をめざし、図 4.1 に示すような筒内直噴ガソリンインジェクター一体型の筒内圧センサを開発し、その有効性が調べられている。2L, 4 気筒エンジンに当該センサを用い、最大筒内圧 P_{max} 制御、50%質量燃焼 (MFB) 時期制御試験をした。 P_{max} をモニタし、それが既定の数値をオーバーしないように、点火時期遅角を行うことで、 P_{max} の制御が可能であることが示されている。また、気筒間で、最適な MFB が異なることから、筒内圧センシングにより各気筒の目標 MFB に制御した結果、JC08 モード燃費が 3% 向上したと報告されている。

4.2 定容燃焼容器を用いたノックの基礎的研究 (伝播火炎とエンドガスにおける化学反応の観察)²⁾

SI 機関におけるノッキングの発生原因である自着火とそれによる圧力振動の発生の基礎的特性を理解するため、定容容器内での火炎伝播と自着火実験を実施している。燃焼室形状を図 4.2 に示す。自着火を誘発させるため、燃料に n-heptane/O₂/Ar 混合気を用いている。火炎伝播と末端ガスの自着火を、撮影速度 100,000 fps のシュリーレン法と 20,000 fps の直接光撮影で調べた。ノッキング時の測定波形とシュリーレン撮影画像を図 4.3 に示す。自着火前の $t = 7.0 \text{ sec}$ 付近で、 dP/dt が増加している。同時に、火炎面からエンドガスに向かい、密度変化が生じる。その後、自着火発生と思われる大きな密度変化とともに、 dP/dt が急増



(a) Mesh size = 0.5mm (b) Mesh size = 0.1mm
Figure 3.8 メッシュサイズの影響

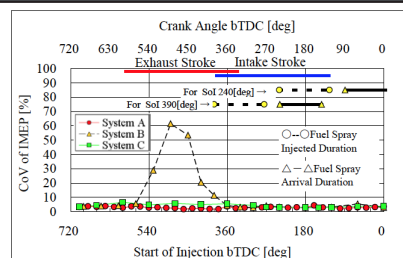
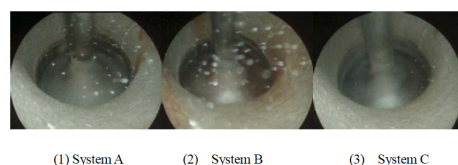


Figure 3.9 燃焼安定性に及ぼす噴射開始時期の影響



(1) System A (2) System B (3) System C
Figure 3.10 吸気バルブまわりの噴霧の様子

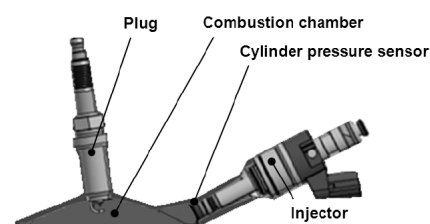


Figure 4.1 直噴インジェクター一体型指圧センサ

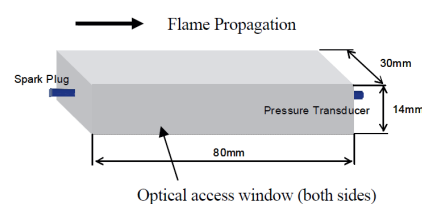


Figure 4.2 燃焼室形状

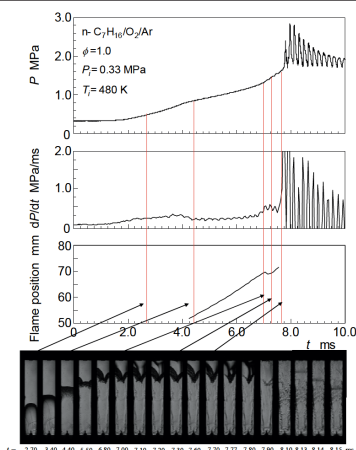


Figure 4.3 ノッキング時の測定波形とシュリーレン画像

する。

4.3 筒内温度成層化による火花点火式ガソリン機関のノッキング強度低減³⁾

本研究は、SI 機関において末端ガスの自着火が起こっても、強いノックに発展させない方法について調査している。シリンダ内混合気の温度成層化がノッキングに及ぼす影響を、急速圧縮膨張装置を用いた燃焼実験によって調査している。図 4.4 (図 3) に、温度分布の与え方を示す。燃料に n-butane を用いた際の、各条件での測定波形を図 4.5 (図 7) に示す。明確な圧力振動が観測されている "B" と "C" は、いずれも末端ガスの温度分布が小さいと考えられることから、末端ガスに温度むらを与えることで、ノック強度が低減可能と報告されている。

4.4 HCCI 燃焼における燃料濃度の不均質性が局所の発光強度履歴に及ぼす影響⁴⁾

HCCI 機関において、層状給気が筒内の局所的な火炎発光挙動に及ぼす影響について、可視化エンジンを用いた燃焼観察と、反応数値解析によって調査している。燃料にジメチルエーテル (DME) を用い、均一と層状給気での可視化画像を図 4.6 (図 6) に、測定波形を図 4.7 (図 7) に示す。図 7 では、筒内の二次元的な発光像を 265 領域に分割し、その領域から選んだ局所の発光強度記されている。層状給気の場合、火炎は筒内で時空間的に分散して生じていることが明確に確認できる。

4.5 予混合化ディーゼル燃焼における騒音影響因子の特定とその低減⁵⁾

予混合化ディーゼル機関は高負荷時に急峻な燃焼が生じることで、騒音等の問題を招き、負荷が制限される。通常、燃焼の急峻さを評価するのに「圧力上昇率」を使用することが多いが、本研究では、筒内圧解析に加え、騒音計による音の解析を実施した (図 4.8 (図 2))。過給、EGR 及びその組み合わせが、騒音に及ぼす影響を実験的に調べた。その結果、騒音は最大圧力上昇率以外にも、燃焼期間及び熱発生率最大値の影響が大きいと報告されている。(飯島)

- 1) 岩垂光宏, 山本裕司, 林貴之: 筒内圧センサを用いた燃焼制御技術の開発とその効果, 講演番号 B1-01 (2012)
- 2) 大平哲也, 永野幸秀, 宇山有, 北川敏明: 定容燃焼容器を用いたノックの基礎的研究, 講演番号 B1-03 (2012)
- 3) 森吉泰生, 窪山達也, Wong Soon Fong, 近藤卓, 園比呂志: 筒内温度成層化による火花点火式ガソリン機関のノッキング強度低減, 講演番号 B1-09 (2012)
- 4) 都留史嗣, 尾崎恭平, 鄭棟元, 飯田訓正: HCCI 燃焼における燃料濃度の不均質性が局所の発光強度履歴に及ぼす影響, 講演番号 B2-03 (2012)
- 5) 芝池悠志, 牛島大興, 柴田元, 小川英之: 予混合化ディーゼル燃焼における騒音影響因子の特定とその低減, 講演番号 A3-08 (2012)

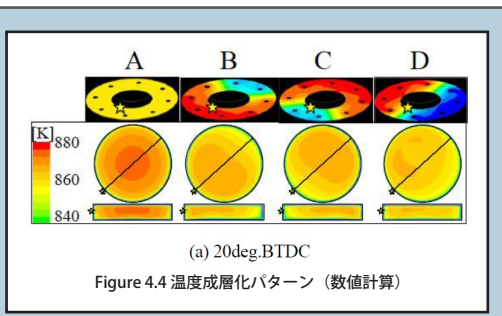


Figure 4.4 温度成層化パターン (数値計算)

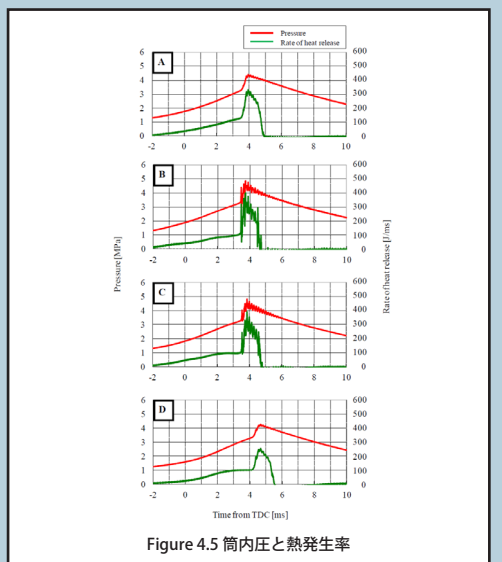


Figure 4.5 筒内圧と熱発生率

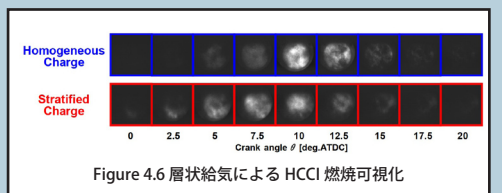


Figure 4.6 層状給気による HCCI 燃焼可視化

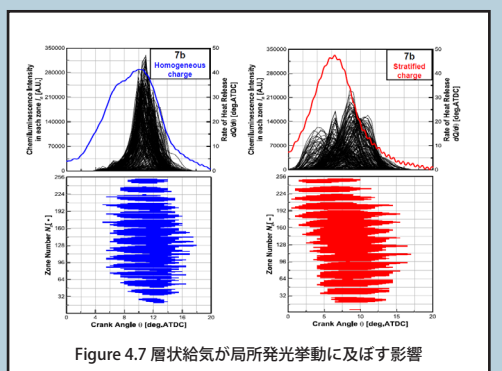


Figure 4.7 層状給気が局所発光挙動に及ぼす影響

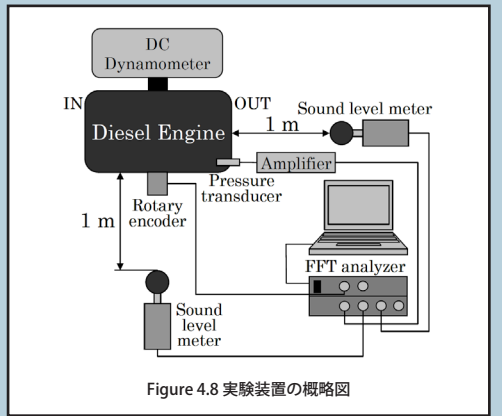


Figure 4.8 実験装置の概略図

古典を巡る ～燃料の着火指標～

Firing index of the fuel

北海道大学大学院工学研究院：柴田 元

Gen SHIBATA (Faculty of Engineering Division of Energy and Environmental Systems, Hokkaido University)

1 従来の燃料着火性指標

エンジンで使用される燃料の着火性指標にはオクタン価とセタン価があり、計測には CFR エンジン (Cooperative fuel research) と正標準燃料 (PRF: Primary reference fuel) が用いられる。オクタン価計測用の PRF 燃料はオクタン価 0 と定義されたノルマルヘプタンとオクタン価 100 と定義されたイソオクタン (2,2,4 トリメチルペンタン) の 2 種類の炭化水素から構成されており、イソオクタンの容積%がその正標準燃料のオクタン価を表わす。例えば PRF70 燃料とはノルマルヘプタン 30 容積%とイソオクタン 70 容積%が混合された燃料で、この燃料を「オクタン価 70 の正標準燃料」と定義する。オクタン価には自然吸気エンジンを想定したリサーチ法オクタン価 (RON: Research octane number) と過給のような吸気が加熱された状態を想定したモータ法オクタン価 (MON: Motor octane number) がある。CFR エンジンにはエンジンの高周波振動を拾うノッキングメーターが取り付けられている。図 1 に CFR エンジンで実際にオクタン価を計測する方法を示す¹⁾。同一圧縮比でオクタン価の異なる燃料 A, B をノッキングさせると自己着火領域におけるエンドガス mp 量が異なる。CFR エンジンでは両者の着火状態がノックメーター値で 50 になるように圧縮比を調整し、事前に PRF 燃料で得られている圧縮比とオクタン価の関係 (検量線) から燃料 A および燃料 B のオクタン価を得ている。

セタン価計測では PRF 燃料にノルマルセタンとヘプタメチルノナンが用いられ、副室式燃焼室をもつディーゼル CFR エンジンでオクタン価と同様の手法で計測される。

オクタン価はガソリンノッキングのし難さを表す指標であり、オクタン価の高い燃料ほど自己着火し難いことを意味する。一方、セタン価はディーゼルノッキングのし難さを表す指標であり、セタン価の高い燃料ほど自己着火しやすいことを意味する。従ってオクタン価の高い燃料はセタン価の低い燃料ということになるが、ガソリンと軽油の沸点分布の違いやガソリンエンジンとディーゼルエンジンで着火する雰囲気条件が異なることから、実用上、別々の指標として使われている。

2 着火性研究から見たオクタン価の意味

RON と MON を計測する吸気温度のように着火雰囲気条件が変わると炭化水素の着火性が炭化水素毎に変化するため、図 2 に示すように RON と MON の分布は直線的に変化しない²⁾。

また、RON と MON はあくまでもノルマルヘプタンを 0、イソオクタンの着火性を 100 としたときの「相対的な指標」であり絶対的なものではない。当量比近辺で非常に短時間に生じる自己着火現象がガソリンエンジンのノッキングであるのに対し、混合気を希薄化して時間をかけて燃焼したのが HCCI 燃焼であると位置づけることができるため、燃料の着火性の研究はガソリン HCCI エンジンの燃焼研究で大きく発展した。図 3 は筆者らが考案した HCCI エンジンの熱発生率から炭化水素のオクタン価を求める方法である¹⁾。ベース 82.5%にノルマルヘプタンまたはイソオクタンを 17.5 容積%添加した燃料 K07, K09 をある一定の条件で HCCI 運転したときに高温酸化反応が 20%発熱したときのクランク角度がそれぞれ -9.57, -2.71CA ATDC で、これらのクランク角度をオクタン価 0, 100 と置き換える。ここでベースガソリンにノルマルペンタンまたはトルエン 17.5%添加した燃料で高温酸化反応が 20%発熱したときのクランク角度がそれぞれ -6.37, -1.70CA ATDC であるとき、先ほどの 0-100 の目盛りより、オクタン価 48 および 115 を得ることができる。

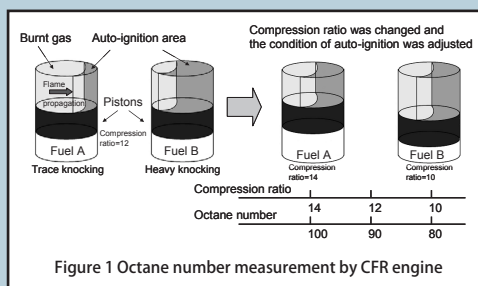


Figure 1 Octane number measurement by CFR engine

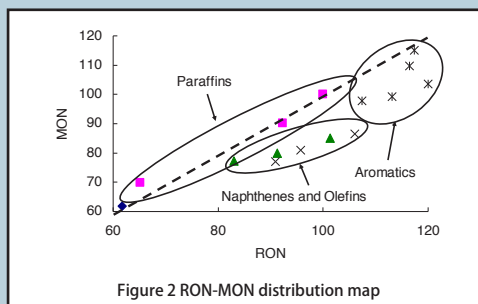


Figure 2 RON-MON distribution map

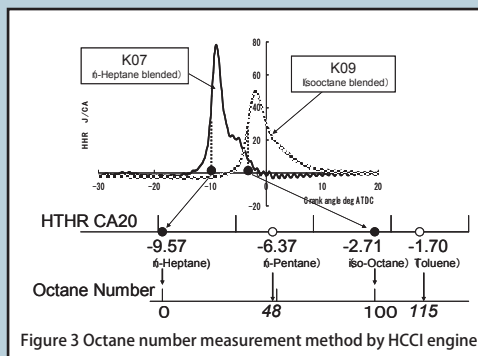


Figure 3 Octane number measurement method by HCCI engine

吸気温度により低温酸化反応の発熱が変化する特性を利用して、吸気温度 50℃、80℃、100℃、150℃、180℃の 5 条件で HCCI エンジンを用いて図 3 の手法で各炭化水素のオクタン価を計測したものが図 4 である³⁾ この図で RON および MON の相関を取ると、RON はこの HCCI エンジン条件で吸気温度 150℃付近での着火性に相当し、MON は吸気温度 200℃以上の着火性に相当する。吸気温度 150℃では低温酸化反応性が僅かに残っており、吸気温度 200℃以上では低温酸化反応は全く存在しない。従って、RON とは低温酸化反応が僅かに存在する条件での炭化水素の着火性であり、MON とは低温酸化反応が全く存在しない条件（高温酸化反応だけしかない条件）での炭化水素の着火性であると考えられる。

3 オクタンインデックスとは何か？

HCCI の着火性を研究していた Kalghatgi 氏らのグループは、リサーチ法オクタン価とモータ法オクタン価を組み合わせた次式に示すオクタンインデックス (OI) を発表した^{4), 5)}。

$$OI = (1 - K) \times RON + K \times MON \quad (1)$$

OI: Octane index RON: Research octane number MON: Motor octane number

この式中の K はエンジンの種類と着火雰囲気条件により求まる定数である。数種類の燃料で実験を行い、K の値を変化させてエンジン性能とオクタンインデックスとの相関が統計的に最も高いときの K の値を求める。得られた K 値が 0 近辺の数値をとればリサーチ法オクタン価の計測条件に近い条件で、また K 値が 1 近辺の数値をとればモータ法オクタン価の計測条件に近い条件（吸気をかなり加熱した燃焼）でそれぞれ燃焼していると考えられる。つまりすべての着火条件を 0-100 の目盛りで常に置き換えて、K 値で着火状態を考えようとしているのがオクタンインデックスである。先に述べたとおり、RON と MON の違いは低温酸化反応性の有無であることから、Kalghatgi 氏の提唱するオクタンインデックスの K 値は「その着火条件では低温酸化反応性がどれくらい存在しているか」を表している。すなわち、

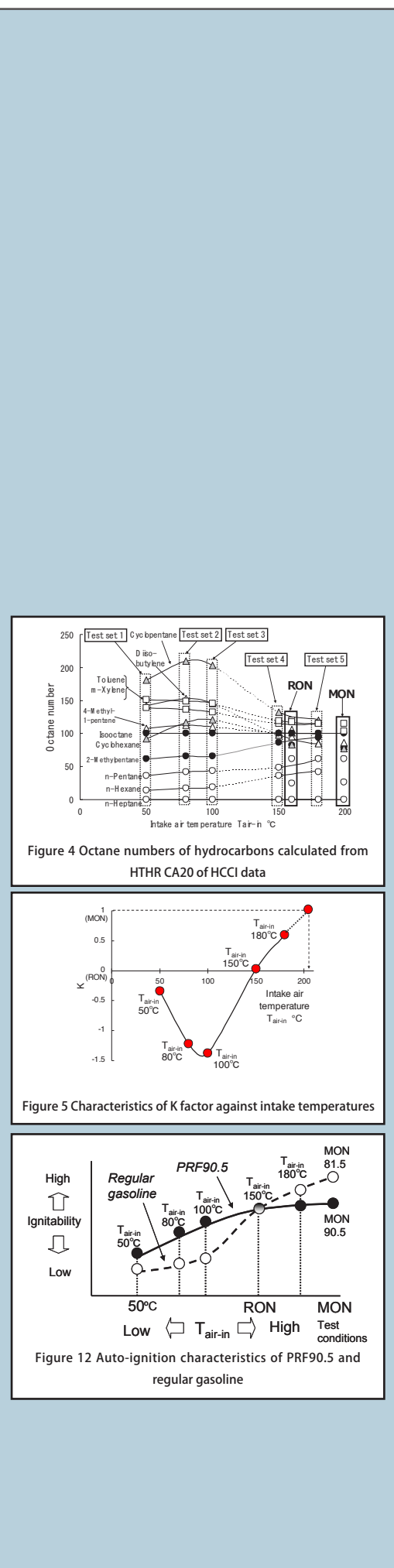
- K ≤ 0: 低温酸化反応とインヒビターが存在する条件での炭化水素の着火性
- 0 < K < 1: 微小な低温酸化反応が存在する条件での炭化水素の着火性
- 1 ≤ K: 低温酸化反応に依存しない高温酸化反応の炭化水素の着火性

を示している¹⁾。数種類の燃料でオクタンインデックスの K 値を求めれば、どのような雰囲気場で燃焼しているかを簡易的に求めることができる。

過給エンジンや HCCI エンジンの燃焼は CFR エンジンによる RON の計測条件とは異なる雰囲気場で燃焼しているため、市販レギュラーガソリンの RON が同じであっても燃料組成の違いにより熱発生履歴が異なるという課題がある。図 4 の各吸気温度条件 (T_{air-in}=50, 80, 100, 150, 180℃) において K 値を計算したのが図 5 で、この値を元にオクタン価 90.5 のレギュラーガソリンと PRF90.5 の着火性を比較した模式図が図 6 である³⁾。図 6 において吸気温度 150℃の条件では PRF90.5 もレギュラーガソリンも同じ着火性を示すが、吸気温度 150℃以下では PRF90.5 燃料のほうが着火性が高く、吸気温度 150℃以上では逆にレギュラーガソリンのほうが着火性が高いことを示している。これは高温側の MON の計測条件においてレギュラーガソリンの MON が 81.5 である事実からも裏づけられる。このように炭化水素の着火性は雰囲気状態で変化するもので、オクタン価やセタン価が燃料の着火指標として万能でないことを示している。

4 新しいエンジンに即した着火指標の重要性

どの給油所でハイオクガソリンを給油してもオクタン価に差異はないが、最新の過給ガソリンエンジンでは CFR エンジンで計測される着火条件と大きく異なるため、燃料を構成する各炭化水素の影響を受けブレイグニッション現象を引き起こす。また HCCI エンジンでも市販のレギュラーガソリンによってエンジンの性能が異なるという課題がある。エンジンの発展は着火の制御の歴史でもあり、今後次世代の新型原動機の市場導入を図るためには、そのエンジンに適した燃料を開発し、新たにそのエンジンに適合した簡便な燃料の着火性指標の導入が必要となる。



【参考文献】

- 1) Shibata, G., and Urushihara. T., : Auto-Ignition Characteristics of Hydrocarbons and Development of HCCI Fuel Index, SAE Technical Paper 2007-01-0220, 2007
- 2) Shibata, G., Oyama, K., Urushihara, T. and Nakano, T., : The Effect of Fuel Properties on Low and High Temperature Heat Release and Resulting Performance of an HCCI Engine, SAE Technical Paper 2004-01-0553, 2004
- 3) 柴田元, 漆原友則:炭化水素の自己着火特性と燃料のHCCIインデックスの考え方(第2報), 自動車技術会論文集 20074788, Vol.38, No.6, PP53-58, 2007
- 4) Kalghatgi, G., : Fuel Anti-Knock Quality-Part I, Engine studies, SAE Technical Paper, No. 2001-01-3584, 2001
- 5) Kalghatgi, G., : Fuel Anti-knock Quality-Part II, Vehicle Studies-How Relevant is Motor Octane Number in Modern Engines?, SAE Technical Paper No. 2001-01-3585, 2001

