

特別寄稿 環境変化に順応する将来パワートレイン技術の方向性*

Direction of the Future Powertrain Technology Adapting to Environmental Changes

古野 志健男
Shigeo FURUNO

1. はじめに

我らの宇宙船地球号は何処へ行く？地球環境問題がクローズアップされてから30年余と久しいが、解決の道は未だ険しい。25年後には世界の人口は90億人に迫り、エネルギー需要の増加、温暖化ガスの増加、オゾン層や森林の破壊、水資源の危機など、この地球号は幽霊船と化してしまう。地球号の中で各国が喧嘩している場合ではない。2035年のエネルギー需要は効率化や代替エネルギーを活用したとしてもさらに約35%増加するとの試算もある¹⁾。従ってCO₂や排出ガスの総量も増加していくので環境問題とエネルギー危機の解決に向け地球号は一つにならなければならない。

周知のとおり世界の自動車業界もそれら大問題を解決すべく30年以上前から大幅な効率向上や桁違いの排出ガス削減を実現してきた。ただ、IEA (International Energy Agency) の2013年報告書によると、運輸部門で2035年には2012年比でさらに16%のCO₂低減が必要 (Fig. 1)²⁾ という。自動車業界は究極を目指した技術開発に移行しているが、難しい局面にきていることも事実である。もちろんCO₂削減を含めた環境改善は自動車だけではなく、発電所等全ての産業界全体の努力が必要なのは言うまでもない。

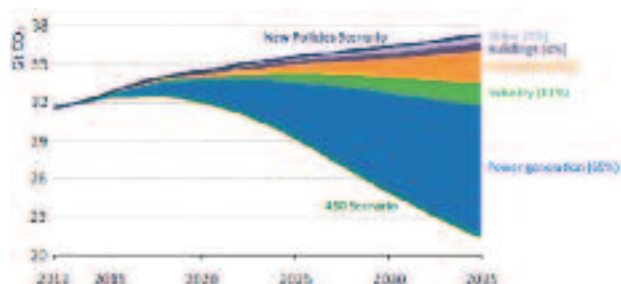


Fig. 1 CO₂低減シナリオ (WEIO-2014)

一方、パワートレイン別販売台数の予測をFig. 2³⁾に示すが、2040年でも内燃機関を有するパワートレインは7割以上も存在するので、これらの燃焼効率向上

がまだまだ重要である。

ここでは、主に小型自動車市場に関わる今後の世界の環境変化の動向と課題を解説し⁴⁾、それらに対応するパワートレインシステムの方向性や各社OEM (Original Equipment Manufacturer) 戦略を探ってみたい。ただし、それらの技術に対し時間軸を定量的に付記して紹介出来ないのでお許し願いたい。

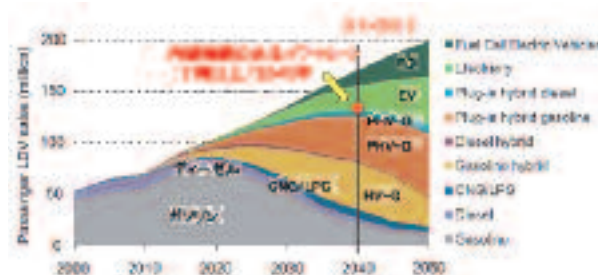


Fig. 2 パワートレイン別販売台数予測

2. クルマを取り巻く環境変化と課題

2.1 エネルギー危機と燃料多様化

東日本大震災以降、世界のエネルギー政策が大きく見直されている。ピークオイルが議論されて久しいが、近年太陽エネルギーに代表される自然エネルギーやシェールガスに代表される新地下資源の活用が急増しており、エネルギー別に需要/供給の最適な振り分けが検討されている⁵⁾。また、社会全体のエネルギー活用の最適化もスマートグリッドで実証されている。クルマ自身としては、ISG (Integrated Starter Generator), HEV, PHEV (Plug-in HEV), BEV (Battery Electric Vehicle) 等、電動化が予想以上のスピードで進んでいる。内燃機関はそれらシステムに融合するために特性を変えながら存在していきだろう。

一方、自動車用燃料は、各国の政策や地域性によりグローバルに多様化し、エタノール系混合ガソリンやバイオ系混合軽油、CNGなどの市場導入は言うまでもなく、近年は石炭から生成されるメタノールを混合し

*2014年8月8日 原稿受領

たガソリンが、中国や米国でも市場導入されている。また、世界的にアンチノック剤としてのMn低濃度添加ガソリンも世界的に市販されており、これらは、エンジンの信頼性や排出ガス成分に問題を生じさせる可能性もあり、技術対応が急務と言える。

燃料中の硫黄濃度低減もグローバルには大きな課題である。燃料中やオイル中に硫黄が存在していると、エンジンシステムの摩耗や腐食、排気系の被毒や硫化物排出など多くの問題を発生させる。そもそも原油には高濃度の硫黄が含まれており石油精製過程でそれらは脱硫されるが、新興国の一部ではまだ高い硫黄濃度となっている。

2.2 温暖化ガスと排出ガスの規制強化

CO₂に代表される地球温暖化ガスは、温室効果ガス (GHG: Greenhouse Gas) とも呼ばれ、他にCH₄, N₂O, O₃, フッ素系化合物などがある。特に、CO₂は、エネルギー危機の観点からも低減の必要性が大きい。

ハワイのマウナロア観測所で測定された大気中のCO₂の平均濃度がFig. 3のように2013年5月9日に初めて400ppmの大台を超えた⁶⁾と発表された。地球温暖化の危険水準である450ppmに一步近づいたとも言われる。クルマ社会でもエネルギー危機も含めCO₂規制の重要性がさらに増していく。

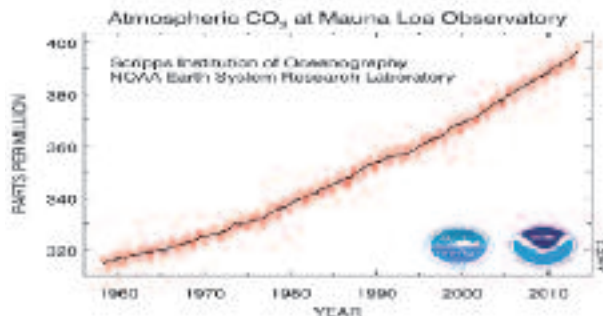


Fig. 3 大気中CO₂濃度推移

Fig. 4⁷⁾ のように各国のCO₂規制は強化され続けている。欧州では2021年までに各OEMは乗用車平均CO₂排出量を95g/km (24.3km/L) 以下を目指さなければならず、また、米国では2025年までの新燃費基準が平均54.5mpg (約23.2km/L: 現状の約2倍) に強化された。日本では2020年の燃費基準は20.3km/Lであるが、さらに厳しい2025年燃費基準も検討されているようだ。それぞれテストサイクルが異なるが、欧州燃費規制がもっとも厳しい。中国でも2013年から燃費の第3段階規制が開始され2016年頃からの第4段階規制の議論もされているし、インドでもCO₂規制化が議論されている。

これら各国・地域のCO₂規制強化に対して、いずれも年率約4%の速さで自動車のCO₂排出量を改善していかなければならない⁷⁾。

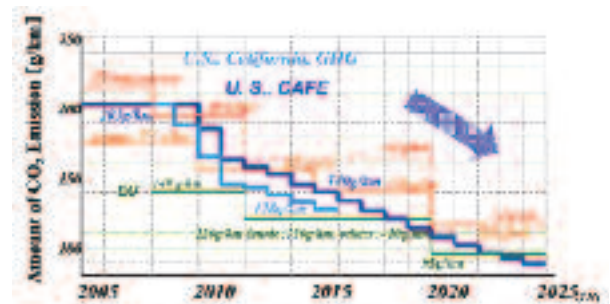


Fig. 4 CO₂ 排気規制強化の動向

N₂OはCO₂の310倍もの温室効果があり、米国ではすでに2012年から規制化されている。ただ、エンジンからの排出量は、車両諸元によっても異なるが温暖化係数を掛けてもCO₂に比べ1~2%オーダーである^{8) 9)}。

次に大気汚染に目をやれば、オゾン, NO_x, PM2.5 (Particulate Matter), PN (particulate Number) などが近年大きな問題としてクローズアップされてきている。

生態系を守る成層圏のオゾン層と異なり、対流圏オゾンは生態系に悪影響を与える。ご存知のように対流圏オゾンは大気汚染の一つであるオキシダントであり、光化学スモッグを引き起こす。日本や中国では季節や時間帯によって環境基準を超えるオゾン濃度が観測されている。グローバルには北半球の対流圏に高濃度のオゾン雲が広範囲に存在、移動しているとの報告¹⁰⁾もある。

NO_xも光化学スモッグ等を引き起こす大気汚染物質であり、特に近年欧州を中心に沿道NO₂のNO_xに対する割合が増加していることが問題視されている¹¹⁾。これは、主に前述のオゾンと車両排出のNOとの反応や、ディーゼル車両に酸化触媒が装着されたことも一因と言われ、NO_xとしてだけではなくNO₂規制も欧州委員会 (EC: European Committee) で検討されている。

PM2.5については、米国、欧州、日本で2009年までに大気環境基準が新設され、発生源や生成過程、健康影響などの研究がされている。PM2.5は、最近中国などでの大気環境問題がメディアに取り上げられ一躍有名になってしまった。発生源は火山の噴火や黄砂など自然界要因と、石炭暖房や火力発電所など人為的要因と多岐に渡っており、組成や挙動も複雑である。

自動車から排出されるPMの一次粒子径はPM2.5より

桁違いに小さく約80nmを中心に $\pm 50\text{nm}$ に分布しており、主な成分はSoot, SOF (Soluble Organic Fraction), サルフェートである。大気中への一次粒子としての寄与は日本では16%¹²⁾で、約6割が大気中での二次生成粒子との報告がある。

それらに対する自動車排出ガス規制強化の一例をFig. 5に示す。日米欧だけではなく世界中でも強化の検討がされている。ここで特記すべき動向は、欧州での2014年からスタートしたEuro6規制の直噴ガソリン車へのPMの粒子数、いわゆるPN規制である。既にディーゼル車のPN規制は2010年のEuro5bから始まっているが、直噴ガソリン車へのPN規制は2014年からは一桁大きい規制値でスタートし、2017年からはディーゼル車と同じ規制値 6×10^{11} 個/kmに強化される¹³⁾。また、北京でも「京6」基準の中でPN規制が施行されるという。これらPN規制に対応しようとする、本来の直噴ガソリン車の燃費、出力、レスポンスの悪化の可能性があり、各社低減技術開発を急いでいる。

2020年頃からさらに厳しい排出ガス規制を狙ったポストEuro6規制もECで議論されており、規制強化は留まるところを知らない。

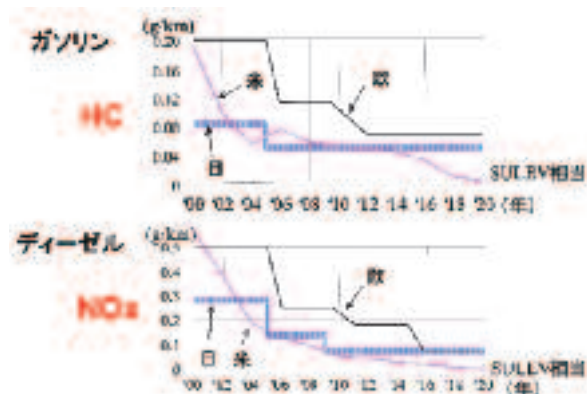


Fig. 5 排出ガス規制強化の動向

2.3 テストサイクルの変化

クルマを取り巻く環境変化の一つに、各国の車両認証時のテストサイクル（走行試験モード）がある。日本では従来の10・15モードから、より実走行に近い高速過渡モードであるJC08モードに2010年から移行した。米国連邦では都市内走行と高速道路走行を合わせた冷間始動モードのFTP75とHWFETが主に採用され、欧州では2000年以降NEDC (New European Driving test Cycle) モードが採用されている。

しかし、現在それが世界的に見直されようとしてい

る。それは自動車の使用状況や道路環境が変化し、世界的に燃費や排出ガスのモードと実走行の乖離¹⁴⁾が大きくなってきているためである。

世界基準調和のテストサイクルとして検討されているのがWLTC (Worldwide harmonized Light duty driving Test Cycle) であり、出来る限り世界を代表する実走行パターンに近づけようとしている。この策定作業が国連のGRPE (Working Party on Pollution and Energy)¹⁵⁾で5~6年前から進められ、2013年度末に走行サイクルと試験手順が承認された。欧州では2017年¹⁶⁾から法規施行の可能性がある。

一方、欧州では、RDE (Real Driving Emissions)¹⁷⁾という実路走行で排出ガスを規制する案を検討している。これは、PEMS (Portable Emission Measurement System) と呼ばれる可搬型排出ガス分析計を車載するものである。こちらでも2017年のEuro6cから施行されることがほぼ決定しているが、実走行条件の変化など含めた再現性、公平性、PEMSの重量増加の担保などをどう構築するのか、施行に向け多くの課題が未だ存在している。PNについては、実路計測が技術的に困難な場合、実路模擬のランダムサイクルをシャーシダイナモメータ上で計測する方式も検討されているが¹⁸⁾、PEMSにPN計測機能付加の可能性が高くなってきているようだ。

3. OEMの将来パワートレイン戦略

3.1 全OEMの動き

前述のような厳しい環境変化に対応すべく、世界のOEMは更なる高効率・クリーン・走りを両立できる魅力あるパワートレインを目指した技術開発を推進している。最新の方向性を探してみたい。

まず、Table 1に各OEMの最近の主なパワートレイン戦略¹⁹⁾の概要を比較してみた。その全体動向をまとめると、①ガソリンエンジンの高効率化のために過給直噴化と少気筒化も含めたダウンサイジング(DS)²⁰⁾、②小型軽量化のためのモジュール化、③パワートレインシステムの効率最大化のためのエンジン電動化、の流れと言えよう。電動化については、エンジンの補機系の電動化といわゆるハイブリッド化の両方の動きがあり、ISS (Idle Stop/Start System)、ISGからPHEVまで予想以上に早いスピードで特に欧州OEMにて進行している。ディーゼルエンジンもその例外ではない。日本勢も負けられないようにしたいものだ。

Table 1 各OEMのパワートレイン戦略

注目車	
	TNGAエンジン、HEV/プラグイン (THS)、FCEV
	小型直噴直噴、PHEV、BEV
	DI/TEC TURBO、小型ディーゼルエンジン、CNGエンジン、BEV
	高効率過給直噴、次世代SKY-Activ、HCCI/数値 ローターエンジン/3気筒エンジン
	Blue Motion、3気筒過給DS、電装化 (PHEV、BEV)、気筒休止
	3気筒過給DS、インター噴射、直噴化 (HEV、BEV: (5気筒))
	G&D+EV、PHEV、送給直噴成層 (PHEV/中直噴)、VCR
	ECO-Boost、CNGエンジン
	Ecotec、3気筒過給DS、2気筒30/BAS II、Ecotec Turbo diesel
	3気筒過給DS、ロングストローク (R/E1.2)、中央噴射
	新興国で調達、FCV
	Driver-E、運転中直噴射、I-PART (5気筒)

一方、各OEMの共通点は、お客様のニーズの多様化、仕向地の走行環境や各規制に対応した全方位のパワートレイン戦略を取っていくことである。つまり、将来のパワートレインシステムは、さらに高効率化した内燃機関を中心にHEV、PHEV、BEV、FCEV、高効率多段/無段トランスミッション(～10段AT、CVT、DCT: Dual Clutch Transmission)を組み合わせたものである。換言すれば、今後の重要な技術領域は、内燃機関のさらなる高効率化と小型少気筒数化、および電動化の核となるMG (Motor/Generator) とバッテリーの高効率高密度化と言える。一方、重要な市場は中国やインドであり、特に独OEMは周知の通り中国を最重要視していて、メルケル首相の頻繁な訪中含め政府挙げての取組みが行われている。中でもVWの対中戦略は抜け出ているようだ。インドへのOEMやサプライヤーの進出も目覚ましい。

3.2 VW/Audiの技術戦略

VWは、お客様ニーズの多様性への対応とポストEuro6とCO₂95g/kmをクリアするべく、TSI、TDI、TGI、BEV、DSG (DCTの商標)をベースに、ハイブリッド化やBlue Motionなどを組み合わせていくという。また、PHEVを9車種にし、近い将来随時市場投入していくとのこと²¹⁾。

内燃機関では更に燃焼の効率化と少気筒数化し、ガソリン/ディーゼル/CNGで共通化を図っていく。小型乗用車向けの直噴ガソリンエンジンは、3気筒の過給DSエンジンがベースであり (Fig. 6)、2ウェストゲート過給+25MPaの高圧燃料噴射+高タンブル吸気ポート+低フリクション (最大筒内圧12MPa、可変油圧、バランスシャフトレス) で構成されている²²⁾。

Audiでは、次世代ディーゼルエンジンとして250MPaの高圧ピエゾ噴射システムを有し、ターボチャージャと48Vのe-Boosterを付けて近く市場投入するという²³⁾。

3.3 GMの技術戦略²⁴⁾

GMも同様に多様化する市場に対応するために全てのパワートレイン車 (Gasoline, Diesel, HEV, PHEV, BEV, FCEV, CNG) を用意するが、エンジンは小型軽量化 (少気筒数化: 小型車は3気筒過給DSエンジン) +モジュール化し、ガソリン/ディーゼルとも同じラインで生産していくとのこと。直噴ガソリンエンジンのリーンバーン化にはHCCI燃焼コンセプトと尿素水添加無しのSCR (HC-SCR) の採用によりEuro6のNO_x規制に対応可能と言っている。ディーゼルエンジンでは高噴射圧のピエゾインジェクタベースでEcotec

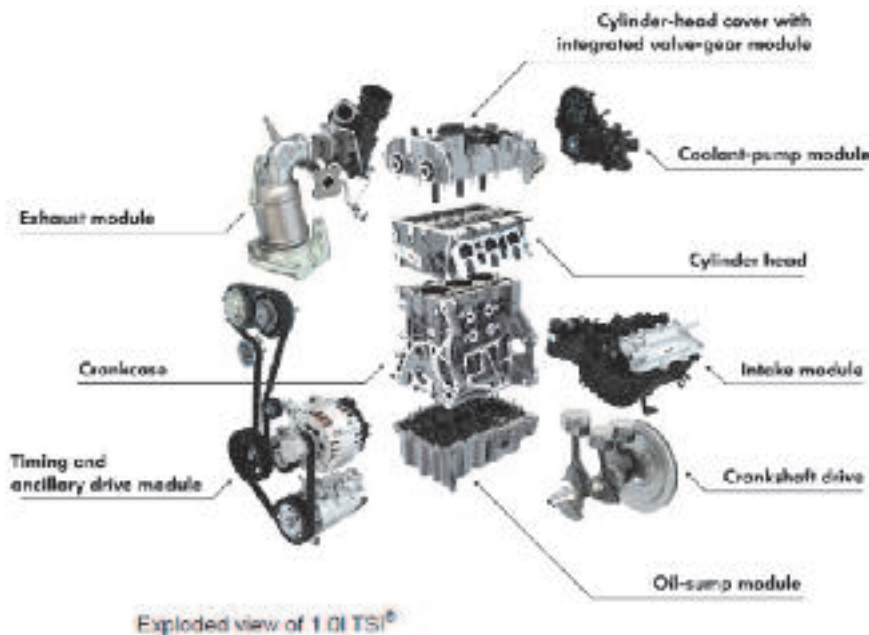


Fig. 6 VWの3気筒エンジン技術

Turbo diesel (1.6L/2.0L) と称しB20対応して米国市場投入を考えている。GMは2020年でのディーゼル車市場の見通しを米国では約10%と上方修正し、グローバル市場では現在の約10%から17%に伸びるとしている。VW (Audi) や現代も同様の見解のようだ。この市場見通しの変化に注目すべきだろう。

3.4 Daimlerの技術戦略^{25) 26)}

Daimlerは、グローバルな多様性に対応するために更なるエンジンの効率化とFun to DriveができるHEVがコア技術で、Gasoline-HEV, Diesel-HEV, Plug-in HEV, BEVを適材適所で投入していくという。直噴ガソリンエンジンでは、ツインスクロール過給+35MPaの高圧燃料中央噴射+VVTがベースモジュールで、オプションによって高機能 (Camtronic, 電動VVT, VCR: Variable Compression ratio12.5~14) を追加する考え。VCRの概要はFig. 7の通りである。やはり、Daimlerでも小型乗用車用には3気筒過給DSエンジンがベースとのこと。また、将来のガソリンリーンバーンコンセプトでは、吸気VVTでNOxを30%低減し、HCCIでNOxを75%低減可能という。

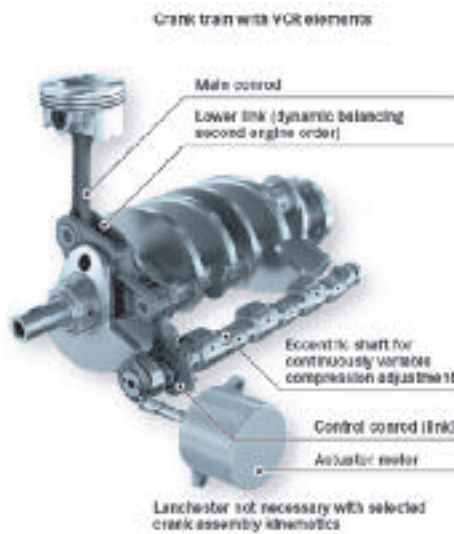


Fig. 7 DaimlerのVCR

3.5 BMWの技術戦略^{27) 28)}

BMWもガソリン/ディーゼルともに気筒当りの燃焼コンセプトをそれぞれモジュラーキットとして共通化し、車両要求に合わせて気筒数を変えていく考え。気筒数違いでは約60%の共通化にし、ガソリン/ディーゼルエンジン間でも30~40%の共通化 (シリンダはアルミブロックで共用) を実現していくという。小型ガソリン車にはやはり3気筒過給DSエンジンをベースにし、溶射ボアや可変油圧など低フリクション技術に

も注力していく方向である。また、レンジエクステンダ付きBEVのi3やPHEVのi8も市場投入している²⁹⁾。

4. 将来ガソリンエンジン技術の方向性

4.1 燃費向上技術

小型乗用車の主流であるガソリンエンジン技術開発は前述のように各OEM間でしのぎを削っているが、各OEMとも最大正味熱効率の目標を異口同音に50% (Fig. 8)³⁰⁾ と言っている。現在市販車の最大正味熱効率はプリウスのエンジンで38.5%であり、目標は非常に高く、向上率としては約30%となる。熱効率向上の主なポイントは、ノック抑制 (圧縮比UP), 比熱比UP, 冷却損失をいかに低減するかである。Fig. 9³¹⁾ にガソリンエンジンでのCO₂低減技術の方向性を示す。ガソリンでの究極技術はノックフリーである。マツダのSkyactiv-G³²⁾ もその1つの流れだろう。ただ、機械圧縮比14を実現したもののノックフリーには至っていないようだ。

最近の注目点は、ノックフリー技術ではないが、前述のように再び可変圧縮比機構 (VCR) が幾つか出てきたことである^{26) 33)}。高負荷域では圧縮比を下げてもノックを回避し、軽負荷域では高くして熱効率を向上する。ただ、過給直噴DSなど様々な技術で軽負荷域の熱効率が改善されると、コスト対効果が目減りすることが課題である。

軽負荷域の燃費は市街地通勤や買い物のようなパターンで重要であるが、周知のとおり軽負荷では正味仕事小さく相対的に種々の損失の割合が大きくなり熱効率が大幅に悪化する。これを改善できる一つのコンセプトが過給直噴DSである。小さい排気量のエンジンで熱効率のいい高負荷域を使い、さらに高負荷域は過給で補う。また、CVT, 電気CVT効果を有するHEV (THS: Toyota Hybrid System), 気筒休止なども同じ狙いで市場に投入されている。

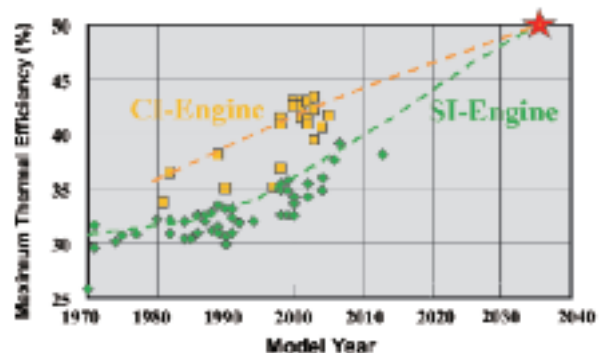


Fig. 8 エンジンの最大正味熱効率

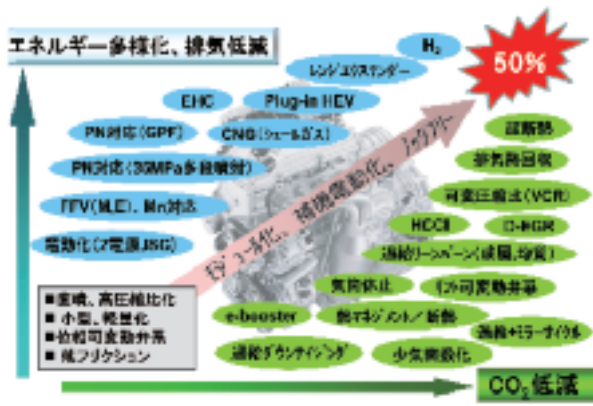


Fig. 9 将来ガソリンエンジン技術の方向性

このようにガソリンエンジンの燃費向上策のポイントは、最大熱効率も含め全運転域（回転×負荷のマップ）の熱効率の大幅向上と、どのような走行パターンでも出来る限り熱効率のいい運転領域を利用出来るようにするかである。従って、究極の目標は、実走行の平均熱効率で50%ではないか。

以上のことを達成するために多くのパワートレイン技術が開発されているので主なものを列挙したい。

ここ1~2年の各OEMの動きを見ると、前述のように過給直噴DSの中でも特に3気筒数化が進んでいて背反であるNVもクリアできている模様。合わせて地道だが低フリクション技術にも真剣だ。3気筒数化も低フリクション化の一つであるが、その他に可変油圧ポンプ、可変冷却水ポンプ、溶射シリンダボア、軽量化（アルミ化、Mg化、CFRP化）などがある。直噴ガソリンエンジンの噴射系は、PN含め排出ガス低減の狙いから中央噴射化と高噴射圧化（～35MPa）が流れのようだ。

将来ガソリンエンジンの方向性の一つとして、過給直噴ガソリンエンジンベースの中央噴射全域リーンバーン（w/EGR）が数社で研究されている。この方向性は、ディーゼルエンジンコンセプトに漸近していくことを意味している³⁴⁾。ただその燃焼コンセプトは、均質リーン、弱成層リーン、HCCIと分かれている。課題のリーン領域でのNO_x低減は、廉価なNO_x触媒や燃焼コンセプトにより最低限の燃費悪化で解決されなければならない。基礎解析ではあるが、弱成層コンセプトでは点火近傍に体積割合で数%ならば濃い混合気を形成してもNO_xを増加させずに燃焼速度を促進できるとの報告がある³⁵⁾。

2013年欧州と2014年日本にそれぞれ投入されたベンツE200（E250）には、排気量2.0Lでピエゾ外開弁中央

噴射の過給直噴リーンバーンエンジンが搭載されていて、軽負荷用と高負荷用の2種類の吸蔵還元触媒（NSC）を有している（Fig. 10）³⁶⁾。ただ、貴金属量はかなり使用されているようだ。

変わり種技術としては、SwRIからDedicated EGRシステムと呼ばれる1気筒分の排出ガスを全量クールドEGRとして他の気筒に再循環させる燃焼コンセプト（Fig. 11）³⁷⁾を提案している、これは従来のEGR効果（ポンプ損失/冷却損失の低減）に加えEGRや水素のノック抑制の効果などによって10%の燃費向上を実現している。水素のノック抑制効果は燃焼反応の基礎実験で報告されている³⁸⁾。本コンセプトは、PSAから2018年頃市場投入する³⁹⁾とのアナウンスもある。

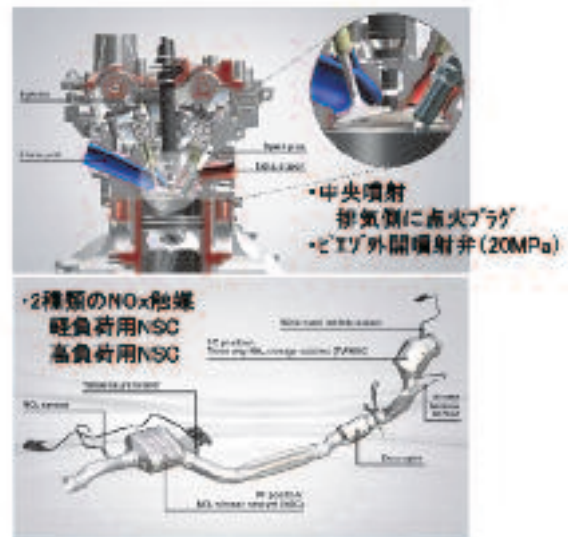


Fig. 10 ベンツE200過給直噴リーンバーンシステム

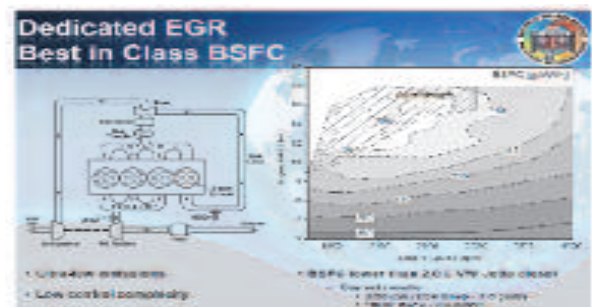


Fig. 11 Dedicated EGRシステム（SwRI）

以上のように、ノック抑制やリーンバーンを実現させるためのエンジン燃焼制御のキー技術としては筒内燃焼圧センサ（CPS）が重要と思われる。

4.2 排出ガス低減技術

ガソリンエンジンの場合、O₂センサやA/Fセンサによって理論空燃比に制御され、三元触媒活性後は非常

に高い排出ガス浄化率（99%以上）が実現できている。換言すれば、三元触媒が活性するまでの低温からの暖機過程の排出ガス低減が大きな開発要素である。さらにガソリンエンジンの熱効率が向上し排気温度が低下していることが、より早期暖機の課題を大きくしている。主な技術としては、早期暖機燃焼制御（排気温度上昇）やヒータ付触媒（EHC）等がある。今回、ガソリン排出ガス低減技術としては、直噴エンジンに対する欧州のPN規制対応に特化して紹介したい。

ディーゼル乗用車へはEuro5bから規制開始されたが、基本的にはDPFが装着されていれば規制値がクリアできている。

前述のように、ガソリン直噴車では、2017年のEuro6cからの第2段階PN規制 6×10^{11} 個/kmに対して非常に厳しい状況にある。主にBASFなど触媒メーカーや部品サプライヤーはガソリン車のPMフィルタ、いわゆるGPF^{40) 41)}の開発を急いでいる。ガソリン車では、ディーゼル車に比べ高回転数で最高出力を取り出すためにGPFによる排気系の圧損が課題である。また、ディーゼルと異なり基本的に理論空燃比での燃焼のため排気系に酸素がなく堆積させたPMをいかに酸化させるかが大きな課題となっている。

一方、GPFを装着しなくてもエンジンからのPNを 6×10^{11} 個/km以下にできるエンジン燃焼方式の研究も各OEMで盛んに行われている。DaimlerやBMWでの研究開発では、現在GPF無しでも同PN規制値をクリアできると報告している。そのコンセプトのキー技術は下記3点。①ガソリン直噴方式を中央多孔噴射としたこと、②燃料噴射圧をさらに高圧化したこと（20～35MPa）、③噴射回数を複数回にしたこと（2～4回噴射/サイクル）である。これらの狙いは、出来る限り直接噴射された燃料噴霧がエンジン燃焼室内部に付着しないようにし、うまく微粒化された燃料噴霧と空気を均質に混合させていくことである。もちろん、吸排気バルブや点火プラグにも付着させたくない。Daimlerのガソリン直噴燃焼コンセプトではWLTCで $PN = 2 \times 10^{11}$ 個/km⁴²⁾、BMWのコンセプトでも耐久走行後のNEDCやWLTCモードでもクリアすると明言している。RDEでも $PN = 8.5 \times 10^{11}$ のレベルとのこと⁴³⁾。各社、出来る限りGPFは使いたくないというスタンスだが、ディーゼルのDPFの時のように、実質構造要件となればGPFが必須となる可能性も存在する。

5. 将来ディーゼルエンジン技術の方向性

5.1 燃費向上技術

現在のディーゼルエンジンは、基本的には熱効率でガソリンエンジンよりも先を走っている。中央直噴ベースの過給全域リーンバーン（w/EGR）で、しかもある程度ダウンサイジング化されている。ただし、周知の通りNOx低減とPM低減の両立が最大の課題であり、そのために本来のポテンシャルよりも低い熱効率を余儀なくされている。Fig. 12⁴⁴⁾に今後のクリーンディーゼルエンジン技術の方向性を示す。NOxとPMの同時低減と燃費向上の両立の一例としては、EGRレスでMBT噴射制御により等容度とPMを同時に改善し、排出NOxは低温活性な尿素SCR⁴⁵⁾でしっかり浄化できるシステムがあるが、実現には至っていない。

一方、従来のEGR燃焼でも、より高負荷高回転域までNOxとPMの同時低減技術が採用されている。例えば、2-Stage Turboシステム、e-Booster（電動過給）+Turboシステム、LPL-EGRシステムなどは、高負荷まで新気を減らさずにEGRを押し込んで低NOx領域の拡大ができ、採用が増えている。また、ディーゼル用の可変動弁系による全域バルブタイミング制御は、領域によって実圧縮比やスワール流を最適化しNOxとPMを抑えて燃費を向上できる。



Fig. 12 将来クリーンディーゼルエンジン技術の方向性

もう一つ大きな燃費向上の方向性は、冷却損失を低減する燃焼コンセプトである。ディーゼルエンジンでは、主に燃料噴流と筒内ガス流動により噴霧火炎が燃焼室壁面に接触することで冷却損失を生じてしまう。これを改善する基本的な方向性は、SV比（燃焼室の表面積/容積）を小さくし、燃料噴霧と空気とのミキシングのためのガス流動を出来る限り抑えるか、噴霧火

炎が燃焼室壁に接触しないようにするかである。この具体策のキー技術が超高压高微粒化噴射弁（～300MPa）によるマルチ噴射制御やオープン燃焼室（Fig. 13）⁴⁶⁾であり、各社開発を急いでいる。

また、低燃費パワートレインシステムとして近年欧州OEMからディーゼルHEVも商品化され⁴⁷⁾、各社で開発もさかんになってきている。高コストシステムではあるが、絶対的な車両燃費の低減と走りを実現できるコンセプトである。

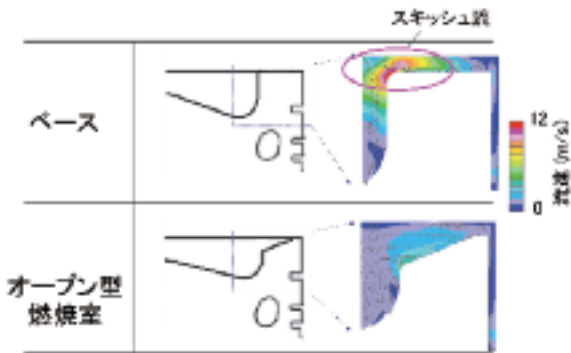


Fig. 13 オープン燃焼室（ディーゼルエンジン）

5.2 NOx低減技術

ここでは、ディーゼルエンジンの排出ガスエミッションの大きな課題の1つであるNOx低減技術について簡単に紹介したい。

ご存知のようにディーゼルエンジンからのNOx排出量はガソリンに比べ非常に少ないが、酸素過剰雰囲気下の排気系では三元触媒によりNOxを還元できないため、いくつかのNOx浄化システムが実用化、あるいは開発されている。実用化されているのは、尿素水添加方式の選択還元触媒（SCR）システムとNOx吸蔵還元触媒（NSR, LNT）システムである。どちらも、一長一短がありさらに進化させる開発が行われている。尿素SCRシステムでは、尿素水ではなくてアンモニアガスを直接噴射するシステム⁴⁸⁾やDPF一体のSCRシステム⁴⁹⁾が、またNSR系システムでは、DiAir（Diesel NOx aftertreatment by Adsorbed intermediate reductants）と呼ばれる高温域（600℃）までNOx浄化能力の高いシステム（Fig. 14）^{50) 51)}が、それぞれ研究開発されている。また、それらSCRとNSR（LNT）のコンバインシステム⁵²⁾も今後の方向の1つであろう。ここで重要な制御技術としては、それらNOx浄化システムの最適制御やOBD検出のためにNOxセンサがあり、すでに多数採用されている。

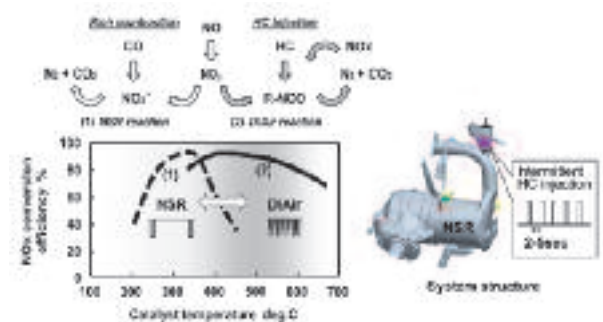


Fig. 14 DiAirコンセプトと浄化性能

5.3 PM, PN低減技術

世界中のディーゼル乗用車にはDPFが標準装着されている。これらDPFは、基本的にPMをフィルタに堆積させ、ある量になれば強制的に酸化再生させるものであるが耐久性信頼性に課題もあり、基材も含めそれらに関する技術開発が多く行われてきた。その結果、高耐熱性でSoot Mass Limitが向上できるSiC基材のDPFがディーゼル乗用車では主流になっている。

今後、Euro6のPM規制4.5mg/kmやポストEuro6のさらなるPM排出量規制を考えると、今後OBD対応としてPMセンサも必須になってくるだろう。

6. その他のパワートレイン技術の方向性

6.1 ハイブリッドシステム

ハイブリッド化は低燃費や低排気エミッションのために有効だが、欧州OEMではそれらの狙いよりも走り（レスポンスや加速感）の向上が本命のように思われる。従って、HEVの方式や適合の考え方は走りを重視したものである。なぜなら、欧州ではアウトバーンでの追い越しやラウンドアバウトなどでレスポンスが重要視される走行環境であるためだろう。

また、パワートレインの電動化の究極として欧州OEMがBEVを強く訴求しているが、それらは技術広報が主な狙いで、将来的にはPHEVが電動化車両のメインではないだろうか。ただ、BEVもPHEVも電力ミックスを考慮したLCAでCO2低減効果を議論すべきなのは言うまでもない。

6.2 トランスミッション

パワートレインシステム効率の最大化のためには、トランスミッションとエンジンの融合が不可欠である。前述のように、クルマの要求出力に合わせ出来る限りエンジンの熱効率のいい運転領域であるエンジン回転数と負荷となるよう変速線を適合する。それを実

現するためにCVT，電気CVT効果を有するハイブリッドシステム，10段変速などの多段AT，DCT（DSG）などが組み合わせられる．ATでは燃費向上のために車両こもり音を小さくしつつ，いかにロックアップ回転数を下げられるかが開発要素となっている．一方，前述のように少気筒数化がトレンドであり，例えば3気筒過給DSの回転変動低減にはトランスミッションにDMF（Dual Mass Flywheel）^{53）}が有効かも知れない．2011年に市場投入されたSkyactiv-DのトランスミッションにはDMFが採用されている^{54）}．

また，燃費向上策として，エンジン気筒休止制御とかコースティングの走行制御でもトランスミッションとの協調が不可欠である．2014年に市販されたVWのGolf7^{47）}では，気筒休止制御と7段湿式DSGをうまく適合していて全く違和感がなかった．さらにコースティング制御もDSGでうまく実現しているようで相性がいい．

6.3 燃料電池（Fuel Cell）

トヨタから2014年11月に独自開発のFCEVミライが市販されることが7月にプレスリリースされた．斬新な新車種に搭載され，一度の水素充填で700km走行できるという^{55）}．2本の水素タンクを有し，充填圧70MPaで約80Lの容積だと約5kgの水素量となる．これで700kmの航続距離ということは水素の単位質量当りの低位発熱量がガソリンの約2.7倍であることを考えると，FCシステムのTTWは単純計算で平均約60%と高い効率を実現していることになる．5kgの水素をガソリン換算すれば約107km/Lの燃費とも言える．水素を太陽エネルギーなどの再生可能エネルギーから生成すればエネルギー危機やCO₂低減という観点からも将来1つのパワートレインの位置を確保していくだろう．ホンダや現代からも，2015年に市場投入の可能性が報道されている^{56）}．既に両社からリース販売は行われた．他のOEMでは幾つかのOEM間での共同研究で開発を急いでいる．

6.4 ガスエンジン

内燃機関であるが，LPG，CNG，水素など燃料の多様化という観点から地産地消でニーズが高い．特に，CNGは政治的な方針もあり東南アジアやインドで拡大中である．北米などでは，大型商用車のディーゼルエンジンにCNGシステムの後付けの改造をしてランニングコストを下げているトラックも多い．北米ではシェールガスの商業化によりCNGの可採埋蔵量が大幅に増えているものの，あまりクルマ用には広がっていない

ようだ．拡大しても，グローバルには数%の市場だろう．

一方，FCEV市場拡大により水素ステーションのインフラが整って来れば，水素内燃機関も再検討されるべきだと思う．昔からBMWは液体水素タンク仕様の水素エンジン車を投入してきた．ただ，水素内燃機関の大きな課題は，水素の層流燃焼速度が桁違いに速く，火炎は高温で燃焼室壁面での境界層も薄く冷却損失が多いことである．従って，自着火温度が高いもののディーゼルのような噴霧拡散燃焼が熱効率的には興味深い．

また，日本発のジメチルエーテルの自動車用エンジンへの活用もHCCIなどの燃焼コンセプトとともに研究されているが，調量精度などから普及は難しいのではないかと．

7. まとめと展望

我ら宇宙船地球号の難破を回避し未来を存在させるために，今こそ全乗組員が一致団結して難題を解決していくべきではないだろうか．

今後、グローバルに強化されていく自動車の排出ガス規制強化のキーワードは，WLTC，RDE，PN，燃料多様化，GHG（CO₂，N₂O）である．それらに対応していくパワートレインシステムとして電動化が進んでいくが，将来モビリティのパワートレインのコア機関として，内燃機関もさらに効率化，クリーン化など進化させていかなければならない．加えて，MGやバッテリーの高効率高密度化も重要な課題である．一方，モビリティとしての楽しさであるFun to Driveも決して疎かにしてはならないので，それらを両立していくことがもっといいクルマ創りではないかと思う．

遅ればせながら，日本政府も自動車の将来内燃機関の更なる効率化やクリーン化に本格的に力を入れ始めたことは画期的なことである．内閣府は総合科学技術・イノベーション会議の中でSIPの1つに革新的燃焼技術というテーマを採択した．また，経産省は自動車技術会発のAICEに参画し，それぞれ年当たり億単位の研究支援を決定している．いずれも将来内燃機関研究に関する産学官連携であるが，欧米に比べ内燃機関や燃焼に関する日本の科学技術力不足の危機感を温度差無く共有化して推進していくべきであろう．欧州ではFVV，米国ではDoEを中心に産学官連携でそれぞれ内燃機関研究が推進されている．

我ら宇宙船地球号は何処にいく？この答えは我々乗組員自身の手の中にあるのだろう．

<参考文献>

- 1) IEA: World Energy Outlook 2012 Presentation to Press
<http://www.worldenergyoutlook.org/media/weowebbsite/2012/PresentationtoPress.pdf>
- 2) World Energy Investment Outlook 2014
- 3) R. H. Jones: Pathways to a Clean Energy System A Clean energy future, is it still possible?, IEA Energy Technology Perspectives 2012
- 4) 古野志健男：グローバルに進む排出ガス規制強化と対応するパワートレイン技術，自動車技術09, vol.67 (2013)
- 5) ExxonMobile : The Outlook for Energy : A View to 2040, P6 (2013)
- 6) National Oceanic and Atmospheric Administration Earth System Research Laboratory
http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/#mlo_full
- 7) 国土交通省 自動車燃費目標基準について 他
http://www.mlit.go.jp/jidosha/jidosha_fr10_000005.html
- 8) 依田公一ほか：ガソリン車におけるN₂O排出挙動解析と計測技術の検討,自動車技術会2010年秋季大会学術講演前刷集, No.109-10 (2010)
- 9) 鈴木央一ほか：自動車から排出される亜酸化窒素の排出傾向について－最近の技術革新による排出特性の変化－, 交通安全環境研究所 フォーラム 2011 (2011)
http://www.ntselsel.go.jp/forum/2011files/1108_1135.pdf
- 10) J. Ziemke, et al. : NASA/GSFC A Long-Term Data Set of Tropospheric Ozone Column : Status, Availability and Long-Term
http://www.iagos.fr/web/IMG/pdf/tuesday_ziemke.pdf
- 11) Cristina Guerreiro, et al. : ETC/ACC Technical paper 2010/19, (2010)
http://acm.eionet.europa.eu/reports/docs/ETCACCTP_2010_19_NO2_trends.pdf
- 12) 日本自動車工業会：PM_{2.5}微小粒子状物質 SPMからPM_{2.5}へ, p.40 (2011)
- 13) Delphi: Worldwide Emissions Standards, p.17 (2012)
<http://delphi.com/pdf/emissions/Delphi-Passenger-Car-Light-Duty-Truck-Emissions-Brochure-2012-2013.pdf>
- 14) 日本自動車工業会 環境レポート2012
http://www.jama.or.jp/eco/wrestle/eco_report/pdf/eco_report2012.pdf
- 15) 石井素：世界統一乗用車排出ガス試験法（WLTP gtr）の検討状況について, 交通安全環境研究所, フォーラム2011
http://www.ntselsel.go.jp/kouenkai/h24/kouenkai24_gaiyou.pdf
- 16) EUROPEAN COMMISSION
 COMMISSION STAFF WORKING DOCUMENT
 Progress Report On the 2013 Activities of the World Forum for Harmonisation of Vehicle Regulations (UNSE WP.29)
<http://ec.europa.eu/DocsRoom/documents/5421/attachments/1/translations/en/renditions/native>
- 17) N. Steininger: Towards completing Euro6/VI in the lab and for the real world, 19th TAP2012 (2012)
- 18) Dr.Pierre Bonnel: Cleaner road Vehicles: How are European regulations addressing Real Driving Emissions? Green Week Conference
http://ec.europa.eu/environment/archives/greenweek2013/sites/default/files/content/presentations/5-4_bonnel.pdf
- 19) 古野志健男：ガソリンエンジンの歩みと将来の方向性, 第23回内燃機関シンポジウム, 基調講演, p.24 (2012)
- 20) Motor Fan illustrated Vol.70
- 21) M. Winterkorn: Driving the Future: Volkswagen Group's Solutions for Sustainable Mobility, 34th International Vienna Motor Symposium (2013)
- 22) F. Eichler, et.al: The New 1.0l 3-Cylinder TSI, 35th International Vienna Motor Symposium (2014)
- 23) I. Kutschera, et.al: The opportunities for powertrain provided by the 48V electrical system, 34th International Vienna Motor Symposium (2013)
- 24) S. Kiefer: General Motors Powertrain Solutions for a Complex Marketplace, 35th International Vienna Motor Symposium (2014)

- 25) T. Weber: The Future Belongs to Diversity: Tailor-made Products for Successful Mobility Solutions, 34th International Vienna Motor Symposium (2013)
- 26) E. Rau, et. al: Variabilities on Gasoline Engines and Their Future Potentials, 35th International Vienna Motor Symposium (2014)
- 27) N.Ardey, et. al: The New BMW 3-Cylinder and 4-Cylinder Diesel Engines with TwinPower Turbo Technology, 35th International Vienna Motor Symposium (2014)
- 28) F.Steinparzer, et. al: The New BMW 3-Cylinder and 4-Cylinder Petrol Engines with TwinPower Turbo Technology, 35th International Vienna Motor Symposium (2014)
- 29) H.Diess: BMW i3 and BMW i8 Contemporary Drivetrains for New Sheer Driving Pleasure, 35th International Vienna Motor Symposium (2014)
- 30) 古野志健男：ガソリンエンジンの歩みと将来の方向性，第23回内燃機関シンポジウム，基調講演，p.31 (2012)
- 31) 古野志健男：ガソリンエンジンの歩みと将来の方向性，第23回内燃機関シンポジウム，基調講演，p.33 (2012)
- 32) 長谷川裕一ほか：CX-5 SKYACTIV-Gのエンジン技術，2012年マツダ技報，P3
http://www.mazda.co.jp/philosophy/gihou/pdf/2012_No002.pdf
- 33) T. OKourfer, et al.: Conceptual layout and Thermodynamic Potential of a Variable Compression Ratio for Modern Diesel Engines, 35th International Vienna Motor Symposium (2014)
- 34) 古野志健男：ガソリンエンジンの歩みと将来の方向性，第23回内燃機関シンポジウム，基調講演，p.62 (2012)
- 35) S. Furuno, et. al: Lean Combustion Characteristics of locally Stratified Charge mixture: Basic Studies of In-vessel Combustion Ignited Laser, JSAE9537925, JSAE Review 16 (1995)
- 36) G. Vent, et. al: The New 2.0l Turbo Engine from the Mercedes-Benz 4-Cylinder Engine Family, 21st Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology 2012
- 37) SwRI:Introduction to SwRI's Dedicated EGR Concept, DEER2012 (2012)
- 38) 品川知広他：ガソリン機関のノッキング特性におよぼす水素添加の影響，自動車技術会論文集36巻4号p15～20 (2005)
- 39) Green Car Congress: PSA to commercialize SwRI-developed Dedicated-EGR technology (2013)
- 40) K. Harth, et al.: Catalyzed Gasoline Particulate Filters: Integrated Solutions for Stringent Emission Control, 34th International Vienna Motor Symposium, Vol.2, p.215 (2013)
- 41) B. Kern, et al: The Next Generation of Exhaust Gas Aftertreatment for Gasoline DI-Engines, an Appropriate Measure for Meeting the Challenge of EC6c Legislation?, 35th International Vienna Motor Symposium (2014)
- 42) R. Kemmler, et al: the Lean-Combustion Gasoline Engine-A Concept with Global application, 34th International Vienna Motor Symposium (2013)
- 43) C. Schwarz, et al.: BMW Twin Power Turbo Gasoline Engine Technology-Enabling Compliance with Worldwide Exhaust Gas Emissions Requirements, 34th International Vienna Motor Symposium, Vol.1, p.34 (2013)
- 44) 高岡俊文：トヨタにおける次世代パワートレインの考え方，自動車技術会春季大会フォーラム，13FORUM-10, p25 (2013)
- 45) NEDO 平成16～18年度成果報告書 革新的次世代低公害車総合技術開発/革新的後処理システムの研究開発 2011/3/18公開
http://www.nedo.go.jp/library/seika/shosai_201103/20110000000190.html
- 46) 河野正顕他：高分散噴霧と筒内低流動を利用したディーゼル燃焼における冷却損失の改善，JSAE Paper No.20115191
- 47) H.-J. Neuber: Performance and Efficiency: Future Drivetrain Technologies in the Volkswagen Group, 35th International Vienna Motor Symposium (2014)
- 48) T.Johannessen:3rd Generation SCR System Using Solid Ammonia Storage and Direct Gas Dosing:Expanding the SCR window for RDE-, DEER-2012
- 49) B. Oladipo, et al.: Simplification of Diesel

- Emission Control System Packaging Using SCR Coated on DPF, DEER-2008
- 50) Inoue, et al.: Di-Air: The New deNOx System for Future Emission Compliance, 20th Aachen Colloquium (2011)
- 51) Takao Fukuma, et al.: Toyota's development strategy for diesel passenger car after-treatment technology, 35th International Vienna Motor Symposium (2014)
- 52) J. Gerhardt, et al.: Denoxtronic 5 and other Bosch System Solutions to Meet "Post EU6" Emission Requirements, 34th International Vienna Motor Symposium, Vol.2, p.193 (2013)
- 53) DMF Schaeffler
http://www.schaeffler.jp/content.schaeffler.jp/ja/products_services/lukproducts/dampers/zms_sv/zms_sv.jsp
- 54) マツダ技報 NO.31 (2013) 白橋 他, SKAY-ACTIV-D ノック音開発
http://www.mazda.com/jp/technology/gihou/pdf/2013_No017.pdf
- 55) トヨタ ニュースリリース 2014年6月25日 TOYOTA FCV
<http://newsroom.toyota.co.jp/jp/detail/3274916/>
- 56) HONDA FCX CLARITY FCXの歩み 2013年11月12日
<http://www.honda.co.jp/news/2013/4131112.html>
 HYUNDAI TUCSON FUEL CELL
<https://www.hyundaiusa.com/tucsonfuelcell>

<著者>



古野 志健男
(ふるの しげお)
(株) 日本自動車部品総合研究所
専務取締役

略歴：

- 1982年3月 国立豊橋技術科学大学大学院電気電子工学専攻修士課程修了
- 1982年4月 トヨタ自動車工業(株)入社 同年7月工販合併 東富士研究所配属
- 2000年1月 トヨタ自動車(株) エンジン制御システム開発部 主査
- 2005年1月 トヨタ自動車(株) 第2パワートレーン開発部 部長
- 2012年6月 (株) 日本自動車部品総合研究所 転籍 常務取締役
- 2013年6月 (株) 日本自動車部品総合研究所 専務取締役

専門分野：

- ・ガソリンエンジン燃焼(リーンバーン, 成層直噴)
- ・ディーゼルエンジン燃焼
- ・エンジンシステム先行開発全般
- ・燃焼レーザー計測技術, 燃焼可視化解析技術

所属学会, 公的委員歴：

- ・日本燃焼学会 理事(2005~2013), 監事(2014~)
- ・日本機械学会 代表会員(2009~2012)
- ・日本機械学会 論文校閲委員(2001~2, 2005~6, 2008~2009)
- ・日本機械学会 論文編修委員(2010)
- ・自動車技術会 代議員(2014~)
- ・可視化情報学会 代議員(2005~2014)
- ・国立豊橋技術科学大学 経営協議会理事(2013~), 学長選考委員(2013~)
- ・内閣府SIPサブプログラムディレクター(SPD)(2014~)

受賞/表彰等：

- ・自動車技術会 技術開発賞受賞(2001)
- ・自動車技術会 フェロー(2008)
- ・日本機械学会 エンジンシステム部門技術業績賞(2012)