

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 6 No. 2 2016

JSAE エンジンレビュー

レポート特集:

2015 Powertrains, Fuels and Lubricants International Meeting

自動車技術会 2015 年秋季大会

JSAE Annual Congress (Autumn)

第 26 回内燃機関シンポジウム

26th Internal Combustion Engine Symposium



公益社団法人 **自動車技術会**

- Report : 2015 Powertrains, Fuels and Lubricants International Meeting 1
遠藤 浩之, 小池 誠, 西村 知江子(編集委員)
河崎 澄(滋賀県立大学), 小橋 好充(北海道大学)
Hiroyuki ENDO, Makoto KOIKE, Chieko NISHIMURA (JSAE ER Editorial Committee)
Kiyoshi KAWASAKI(University of Shiga Prefecture),
Yoshimitsu KOBASHI(Hokkaido University)
- Report : 自動車技術会 2015 年秋季大会 7
2015 JSAE Annual Congress (Autumn)
清水 健一, 下田 正敏, 野口 勝三(編集委員)
伊東 明美(東京都市大学), 五十嵐 龍起, 津曲 一郎(日野自動車),
平岡 賢二(三菱重工業)
Ken-ichi SHIMIZU, Masatoshi SHIMODA, Katsumi NOGUCHI (JSAE ER Editorial
Committee)
Akemi ITO(Tokyo City University), Tatsuki IGARASHI, Ichiro TSUDA(Hino Motors),
Kenji HIRAOKA(Mitsubishi Heavy Industries)
- Report : 第 26 回内燃機関シンポジウム 16
26th Internal Combustion Engine Symposium
小酒 英範, 下田 正敏, 野口 勝三(編集委員)
佐藤 進(東京工業大学), 川野 大輔(交通安全環境研究所),
小笹 俊博(大阪電気通信大学)
Hidenori KOSAKA, Masatoshi SHIMODA, Katsumi NOGUCHI (JSAE ER Editorial
Committee)
Susumu SATO(Tokyo University of Technology), Daisuke KAWANO(National Traffic
Safety and Environment Laboratory), Toshihiro OZASA(Osaka Electro-Communication
University)

■ 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)

大西 浩二 (日立オートモティブシステムズ)

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)

清水 健一 (元産業技術総合研究所)

下田 正敏 (日野自動車)

西川 雅浩 (堀場製作所)

野口 勝三 (本田技術研究所)

平井 洋 (日本自動車研究所)

山口 恭平 (自動車技術総合機構)

山崎 敏司 (編集)

発行所: 公益社団法人 自動車技術会

発行日: 2016年8月10日

発行人: 石山 拓二 (京都大学)

〒102-0076 東京都千代田区五番町 10-2

電話: 03-3262-8211

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN

Vol. 6 No. 2 2016

2015 Powertrains, Fuels and Lubricants International Meeting

September 1-4, 2015

(August 31: Pre-registration & Welcome Party)

Kyoto TERRSA

Kyoto City in Japan

JSAE/SAE

遠藤 浩之, 小池 誠, 西村 知江子 (編集委員)

河崎 澄 (滋賀県立大学), 小橋 好充 (北海道大学)

Hiroyuki ENDO, Makoto KOIKE, Chieko, NISHIMURA (JSAE ER Editorial Committee)

Kiyoshi KAWASAKI (University of Shiga Prefecture), Yoshimitsu Kobashi (Hokkaido University)

1 官産学連携研究

今回京都で開催された SAE PF&L には、政府や公的機関、産学連携体制の資金に基づく研究結果が幾つか報告されている。Acknowledgments や Abstract からそれと分かる欧米の報告を表 1-1 に示す。ドイツ産学連携 FVV (Research Association for Combustion Engines) から 3 件、ドイツ研究振興協会 DFG (German Research Foundation) から 6 件、イギリスの EPSRC (Engineering and Physical Sciences Research Council) から 4 件、アメリカ政府系資金研究から 8 件の発表あり、そのほか ECN (Engine Combustion Network) の研究成果 6 件が報告されている。なお、ECN の幾つかは DoE (USA, Department of Environment) がスポンサーになっている。

表 1-1 に示した 24 件は DICI (Direct Injection Compression Ignition Engine) と DISI (Direct Injection Spark Ignition Engine) に分けられる。その数はそれぞれ 12 件あり、ポート噴射エンジンを対象としたものはない。欧米と比較すると、欧州の方が DISI を対象にしたものが多い。近年 DISI が増加しつつある欧州市場と対応していると思われ、興味深い。欧米ともに PM に関する研究が多くを占めており、研究テーマに多く採り上げられている噴霧研究も PM 抑制のためと位置付けている。ECN では共通のノズルおよび試験条件を決めているので、関係する Paper を一緒に見ておくべきである。ガソリン用噴射ノズルについては、Delphi 製 8 孔ノズルの噴霧が計 3 個所で測られている^{1-10,11)}。米国グループからの報告¹⁻¹¹⁾では、X 線と光学撮影による噴口形状測定結果の違いと、同じ噴霧でも光学系の設定や処理によって噴霧角に違いが出ることが示されている。ディーゼル噴霧の Spray-A を対象にした研究¹⁻¹²⁻¹⁵⁾では同じ噴霧に対して計算結果と計測結果を複数の Paper から知ることが可能である。ECN には計測する際の光学系、処理条件の標準化が進められるとともに、シミュレーションを行う場合に検証基準となる噴霧データの構築が期待される。

DFG の支援で行われる "Tailor-Made Fuels from Biomass" は Cluster of Excellence の一つとして実施されている研究である。WtW (Well to Wheel) の観点から運輸セクターの CO₂ 排出を削減する試みは、現在ガソリン代替としてエタノール、ディーゼル代替として FAME (Fatty Acid Methyl Ester) が主流となっているが、次の進化を目指したプロジェクトがドイツで進められていることがわかる。燃料/燃焼技術の協調により CO₂ の課題を克服し、エンジンを使い続けていこうという意気込みが感じられる。今回報告されているのは、2-butanol を脱水素して得られる 2-butanone の燃焼特性⁵⁾ と含酸素燃料ディーゼル燃焼に対する OPN (Oxidation Potential Number) という指標の導入⁴⁾ である。OPN は燃料中の酸素割合と煤生成との関係を調べた宮本らの研究結果²⁵⁾ をさらに発展させたものと考えられる。興味深い結果が報告されているが、実用された時を考えると、一時的かもしれないがエタノール、FAME を含めた多種類の燃料が市場に混在することになり、益々厳しくなる排気規制と両立させるのは容易でないと考えられる。一方、同じ運輸部門の航空機でもバイオマスからの燃料製造が検討されているが、こちらは現燃料と同品質の燃料製造が必須条件となっている。製造コストや効率、原料確保面の課題は大きいかもしれないが、インフラ、新燃料に対応したエンジン開発の必要性などを含めると、どちらが良いかの総合的な判断は難しく、まだ合意がなされているとは思えない。重要な問題であるから、さらなる可能性検討とともに多方面の専門家を含めた議論がこれからも必要であろう。

近年、新しい計測法に関する報告は少なくなっているが、York らの研究²²⁾ は医療分野の技術導入を試みている点で興味深い。今回の SAE では、MRI (Magnetic Resonance Imaging) を DPF に

適用し、セル内の流速分布測定を行った結果が報告された。直噴ディーゼル単筒エンジンの排気の一部を直径 26 mm長さ 155 mmの SiC 製小型 DPF に導いて PM を堆積させ、オープンで水分を除去した後、5x5 チャンネル、長さ 10 mmのサンプルを切り出し、中央の 3x3 チャンネルを計測部位としている。核磁気共鳴(NMR)のために Sulfur hexafluoride (SF6) を添加したガスを流し、長手方向 10 断面の流速を測定した結果が報告されている。図 1-1 は MRI により測定した長手方向の流速分布であり、上流側 P1 断面から下流側 P10 断面までの変化が示されている。中央と四隅のセルが流入セルでその他が流出セルである。図中白枠で囲まれた流入セルの中央断面速度を図 1-2 に示す。P1 から P9 に向かって速度が小さくなっていくのは、隔壁から流出側セルにガスが流れるためであるが、煤堆積量が多くなるにつれて急速に下流側の流速が小さくなるのが報告されており、DPF の後側に煤が堆積するためとしている。現在は小サンプルであり、水分除去などの手順が必要であるが、将来、エンジン搭載状態で流速分布が測定できるようになれば、新たな知見が得られると期待できる。(小池)

表 1-1 産学連携や公的資金に基づく発表

参照	SAE No.	スポンサー	対象	研究対象	内容	備考
1	2015-01-2043	FVV, DFG	DICI	オイル希釈	基礎計測	後期噴射
2	2015-01-1947	FVV	DISI	燃料	LPG	過給 DS
3	2015-01-1888	FVV	DISI	PM 生成	要因調査	単筒エンジン
4	2015-01-1934	DFG	DICI	燃料	含酸素	Taylor-Made Fuels from Biomass
5	2015-01-1956	DFG	DISI	燃料	2-butanone	Taylor-Made Fuels from Biomass
6	2015-01-1801	DFG	DICI	燃料	Ethanol+ 軽油, 2燃料 CI	Taylor-Made Fuels from Biomass
7	2015-01-1919	DFG	DICI	燃料	FAME, GTL	
8	2015-01-1907	DFG	DISI	ケルビス燃焼	計測+LES	
9	2015-01-1899	DFG	DISI	噴霧	2噴霧干渉	
10	2015-01-1902	ECN	DISI	噴霧	LIF 計測	Spray-G
11	2015-01-1894	ECN	DISI	噴霧	データ比較	Spray-G
12	2015-01-1828	ECN, DoE	DICI	噴霧	Lift-off 長	Spray-A,B
13	2015-01-1844	ECN, DoE	DICI	噴霧	RANS/LES	Spray-A
14	2015-01-1850	ECN, DoE	DICI	噴霧	X-Ray	Spray-A
15	2015-01-1849	ECN,ARC, USN	DICI	PM 生成	TPDF モデル	Spray-A
16	2015-01-1834	DoE	DICI	噴霧	X-ray	
17	2015-01-1796	DoE	DICI	エンジン性能	ガソリン+ディーゼル2燃料 CI	HD
18	2015-01-1804	DoE	DISI	既燃ガス	成分分析法	
19	2015-01-1992	DoD	DICI	PM 性状	揮発性計測	SERDP
20	2015-01-1830	DoA	DICI	着火遅れ	低温	HD
21	2015-01-1877	EPSRC	DISI	PM 生成	始動過渡	火炎可視化
22	2015-01-2009	EPSRC	DICI	DPF	流れ計測	MRI 法
23	2015-01-2019	EPSRC	DISI	PM 生成	燃料改質	H2 影響
24	2015-01-1903	EPSRC	DISI	噴霧	特性比較	レーザードリル加工

DS; Down-sizing, RANS; Reynolds-Averaged Navier-Stokes, LES; Large Eddy Simulation
 TPDF; Transported Probability Density Function, HD; Heavy Duty
 SERDP; Strategic Environmental Research and Development Program
 DoD; Department of Defence, DoA; Department of Army

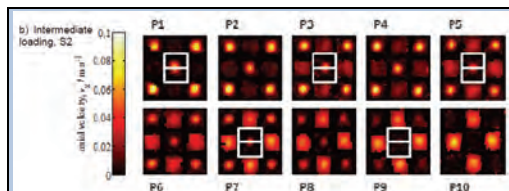


Figure 1-1 DPF 内のセル方向流速イメージ像 (中程度の PM 堆積状態)

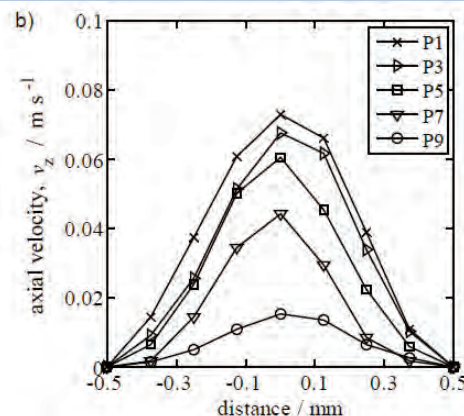


Figure 1-2 中央セルのセル方向流速分布 (図 1-1 の白四角中央線部分)

ARC; Australian Research council, USN; United States Navy

【参考文献】

- 1-1) K.Seel, M. A. Reddemann, T. Baltaci, R. Kneer, Impact of lubricating oil films on spray-wall interaction, SAE 2015-01-2043
- 1-2) M. Krieck, M. Günther, S. Pischinger, U. Kramer, M. Thewes, Effects of LPG fuel formulations on knock and pre-ignition behavior of a DI SI engine, SAE 2015-01-1947
- 1-3) M. Bertsch, T. Koch, A. Velji, H. Kubach, Thermodynamic and optical investigations on particle emissions in a DISI engine at boosted operation, SAE 2015-01-1888
- 1-4) B. Graziano, B. Heuser, F. Kremer, S. Pischinger, H. Rohs, The Oxidation Potential Number: an Index to Evaluate Inherent Soot Reduction in D.I.Diesel Spray Plumes, SAE 2015-01-1934
- 1-5) J. Beeckmann, R. Hesse, L. Cai, H. Pitsch, A. Heufer, Y. Yang, 2-Butanone Laminar Burning Velocities – Experimental and Kinetic Modelling Study, SAE 2015-01-1956
- 1-6) B. Heuser, F. Kremer, S. Pischinger, H. Rohs, B. Holderbaum, T. Körfer, An experimental investigation of dual-fuel combustion in a light duty Diesel engine by in-cylinder blending of ethanol and Diesel, SAE 2015-01-1801
- 1-7) T. Vogel, S. Riess, M. Wensing, A comparison of worldwide fuels and their effects on combustion under constant volume vessel conditions, SAE 2015-01-1919
- 1-8) P.Janas, Mateus D. Ribeiro, A. Kempf, M. Schild, S. A. Kaiser, Penetration of the flame into the top-land crevice – Large-eddy simulation and experimental high-speed visualization, SAE 2015-01-1907
- 1-9) M. Heldmann, S. Bornschlegel, M. Wensing, Investigation of Jet-to-Jet Interaction in Sprays for DISI engines, SAE 2015-01-1899
- 1-10) Lama M. Itani, G. Bruneaux, L. Hermant, C. Schulz, Investigation of the mixing process and the fuel mass concentration fields for a gasoline direct-injection spray at ECN Spray G conditions and variants, SAE 2015-01-1902
- 1-11) J. Manin, Y. Jung, S. A. Skeen, L. M. Pickett, S. E. Parrish, L. E. Markle, Experimental characterization of DI gasoline injection processes, SAE 2015-01-1894
- 1-12) Y. Jung, J. Manin, S. A. Skeen, L. M. Pickett, Assessment of the Ignition and Lift-off Characteristics of a Diesel Spray with a Transient Spreading Angle, SAE 2015-01-1828
- 1-13) Andrew. B Swantek, D. J. Duke, C. F. Powell, A. L. Kastengren, An Examination of Spray Stochastics in Single-Hole Diesel Injectors, SAE 2015-01-1834
- 1-14) Y. Pei, P. Kundu, Graham M. Goldin, S. Som, Large Eddy Simulation of a Reacting Spray Flame under Diesel Engine Conditions, SAE 2015-01-1844
- 1-15) M. Battistoni, C. Poggiani, S. Som, Prediction of the nozzle flow and jet characteristics at start and end of injection: transient behaviors, SAE 2015-01-1850
- 1-16) M. A. Chishty, M. Bolla, Y. Pei, E. R. Hawkes, S. Kook, T. Lu, Soot Formation Modelling of Spray-A Using a Transported PDF Approach, SAE 2015-01-1849
- 1-17) I. W. Ekoto, S. A. Skeen, R. R. Steeper, N. P. Hansen, Detailed Characterization of Negative Valve Overlap Chemistry by Photoionization Mass Spectroscopy, SAE 2015-01-1804
- 1-18) A. Ickes, R. Hanson, T. Wallner, Impact of Effective Compression Ratio on Gasoline Diesel Dual-Fuel Combustion in a Heavy-Duty Engine Using Variable Valve Actuation, SAE 2015-01-1796
- 1-19) M.-D. Cheng, Thermographic Measurements of Volatile Particulate Matter, SAE 2015-01-1992
- 1-20) L.-M. Malbec, W. E. Eagle, Mark P. B. Musculus, P. Schihl, Influence of injection duration and ambient temperature on the ignition delay in a 2.34L optical diesel engine, SAE 2015-01-1830
- 1-21) P. Efthymiou, C. P. Garner, G. K. Hargrave, D. Richardson, An Optical Analysis of a DISI Engine Cold Start-Up Strategy, SAE 2015-01-1877
- 1-22) A. P.E. York, T. C. Watling, N. P. Ramskill, L. F. Gladden, A. J. Sederman, A. Tsolakis, J. M. Herreros, I. Lefort, Visualization of the Gas Flow Field within a Diesel Particulate Filter Using Magnetic Resonance Imaging, SAE 2015-01-2009

1-23) Ma. Bogarra-Macias, J. M. Herreros-Arellano, A. Tsolakis, Andrew P.E. York, P. Millington, Reformate exhaust gas recirculation (REGR) effect on particulate matter (PM), soot oxidation and three way catalyst (TWC) performance in Gasoline Direct Injection (GDI) engines, SAE 2015-01-2019

1-24) A.J. Butcher, P.G. Aleiferis, D. Richardson, Characterisation of Spray Development from Spark-Eroded and Laser-Drilled Multi-Hole Injectors in an Optical DISI Engine and in a Quiescent Injection Chamber, SAE 2015-01-1903

1-25) N.Miyamoto, H.Ogawa, M. N. Nabi, Approaches to extremely low emissions and efficient diesel combustion with oxygenated fuels, Int. J. Engine Research. 1:71-85, February 200 H

2 Diesel Combustion (1)

トヨタ自動車の西田らは、「Low Cooling losses and Low Emission Analysis of Small Bore Diesel Engine Combustion」²⁻¹⁾と題して講演を行った。

本報告では、小径ボアエンジンにおいて、冷却損失の低減と筒内での燃料空気混合気分布の均一化を実現する新燃焼コンセプトを提案している。新燃焼コンセプトの開発においては、3D CFDと可視化実験を活用している。

図 2-1 に新コンセプトに基づく燃焼室形状を示す。新コンセプト燃焼室は燃焼室キャビティが浅皿となっており、キャビティ中心はインジェクタ位置に合わせてオフセットしているが、キャビティ入口テーパ部外側の中心はシリンダ中心と一致している。このテーパによって、キャビティ内の過濃混合気が速やかにキャビティ外に拡散できる。また新コンセプト燃焼室の断面図で見て左側の方が面取りが大きくなっており、この領域でのスキッシュ流が弱くなるため、混合気がスキッシュ部の余剰空気を有効活用できる。また新コンセプト燃焼室では、低負荷での燃焼室壁面への噴霧衝突を抑制できるため THC の低減にも効果がある。また流動を弱めた浅皿燃焼室は冷却損失も低減できる。これらの燃焼コンセプトを図 2-2 にまとめている。

次に表 2-1 に示す諸元のエンジンで行った試験結果を図 2-3 および図 2-4 に示す。新コンセプトでは圧縮比を従来の 16.9 から 16.4 への若干低くしている。最近のディーゼルには低圧縮比とは言えないものの、小径ボア・2弁ではこれ以上圧縮比を下げると背反が大きいとのことであった。低負荷(図 2-3)、高負荷(図 2-4)の両方の運転条件で THC、冷却損失、燃費率の改善が得られており、コンセプト通りの試験結果が得られている。

また図 2-5 の CFD 結果、図 2-6 の観察結果からもテーパ部で混合気がスキッシュエリアに分散し、余剰空気を効率よく活用できていることが確認された。

本報告は、小径ボアの 2 弁エンジンの燃焼改善について、コンセプトの立案から CFD と可視化を用いた現象の確認、最終的には実機による確認まで筋道の立った報告となっており、参考となる点が多い。(遠藤)

【参考文献】

2-1) Kentaro NISHIDA, Takeshi HASHIZUME, Ryo HASEGAWA, Takashi OGAWA: Low Cooling losses and Low Emission Analysis of Small Bore Diesel Engine Combustion, JSAE20159021/SAE2015-01-1824, SAE Powertrains, Fuel & Lubricant Meeting 2015, 2015-9

3 ディーゼル噴霧

昨今のディーゼル噴霧燃焼過程の数値解析においては、Large Eddy Simulation (LES) が盛んに利用されるようになってきた。LES の解析では微視的乱流特性の表現のために小さな格子サイズを求めることがしばしばあるが、計算格子数と計算コストは相反関係にある。したがって、LES 解析においては、格子サイズの影響を理解し格子数を最小限に留めること、計算速度を高めることが重要と考えられる。Diesel Spray (4)-(5) のセッションにおいては、このような観点から 2 件の発表があった。

Argonne 国立研究所の Pei ら³⁻¹⁾は、Engine Combustion Network (ECN)³⁻²⁾ の Spray A を対象に LES 解析をしている。ここで、燃料は n-ドデカンであり、103 化学種と 370 の素反応および広安のスモデルを組み込んでいる。LES の研究ではよくあるように、この研究でも RANS との比較結果が主に議論されている。計算の最小格子サイズは、LES で 0.0625mm, RANS で 0.25mm である。LES の計算は、よく知られるように、図 3-1 のような RANS に比べて不均一で広がりのある温度と化学

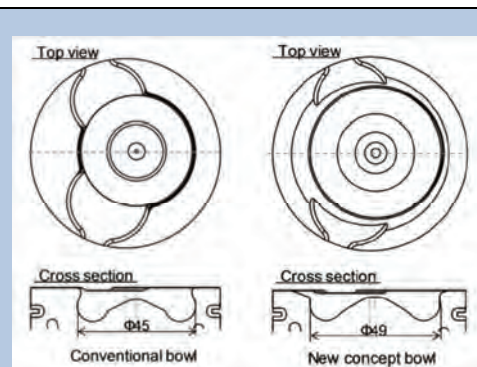


Figure 2-1 従来および新コンセプト燃焼室形状

Table 2-1 エンジン諸元

	Conventional	New concept
Engine type	Single cylinder DI diesel with 2 valves	
Displacement (L)	0.84	
Bore × stroke (mm)	75 × 81.5	
Compression ratio	16.9 : 1	16.4 : 1
Injector flow rate (cc/min)	525	525
Diameter (mm) × hole number	φ0.8 × 8	φ0.8 × 8
Clean angle (deg)	±15	±18
Combustion bowl diameter (mm)	45	49
Intake port type	Helical	
Swirl ratio	2.2	
DOE system	HPL - LPL	

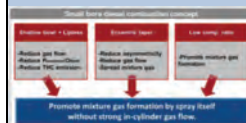


Figure 2-2 小径ボアディーゼルの燃焼コンセプト

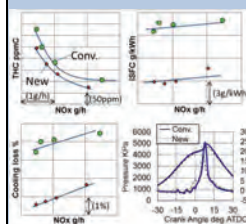


Figure 2-3 低負荷 (1,800rpm, IMEP:260kPa) における EGR 変化時の試験結果 (Prail:42MPa, 2pilot&main injection, Pboost:100kPaabs, O2intake:16-19%)

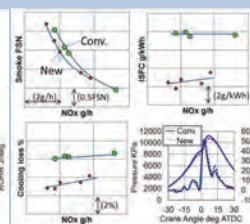


Figure 2-4 高負荷 (2,000rpm, IMEP:1,000kPa) における EGR 変化時の試験結果 (Prail:120MPa, 2pilot&main injection, Pboost:160kPaabs, O2intake:15-18%)

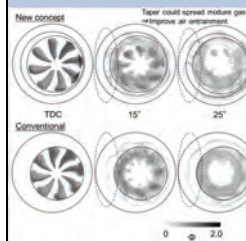


Figure 2-5 STAR-CD によって計算された当量比分布 (2,000 rpm, IMEP: 1,000 kPa).

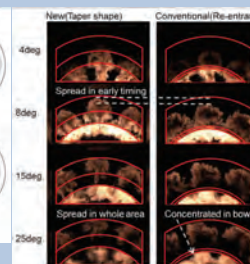


Figure 2-6 可視化エンジンによるテーパ部の火炎分布 (1,600rpm, IMEP:1,000kPa)

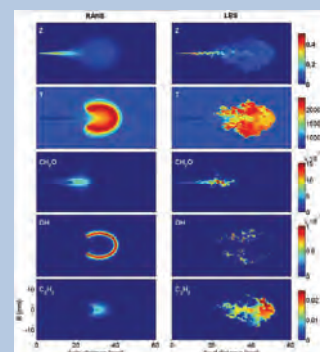


Figure 3-1 RANS と LES の計算結果の比較 (霧囲気温度 900K, 噴射開始後 1ms)

種の分布を計算した。一方、興味深いことに、この研究の計算においては、LESとRANSで化学種の濃度が異なり、図3-1においては特徴的にLESにおけるC₂H₂の濃度が高かった。この研究に用いるスモデルではC₂H₂をスの前駆体としているため、図3-2に示されるように、LESのス生成量はRANSに比べて高く、実験値とよく一致した。また、図3-3のように、噴霧火炎内のス分布もRANSより実験に近い特徴を示した。このように、計算コストが課題のLESであるが、その計算から得られる局所の混合気状態が燃焼過程とス生成量に大きく影響する可能性がある。燃焼過程やス生成量を正しく予測するためには、どこまでその分解能を高める必要があるのか、興味深いところである。

大阪大学のHoriら³⁻³⁾も、上記のPeiらと同様、ECNのSpray Aに対してLESによる解析をしている。この研究では、図3-4と図3-5のように格子サイズの影響を調べている。格子サイズが異なると計算される渦の大きさとそれによる噴霧液滴の分散が異なるために、格子サイズが粗い計算では噴霧が軸方向に伸びる結果となった。格子を小さくすると計算コストは増加するが、その時間の短縮のため、Horiらはスーパーコンピュータを利用した大規模並列計算を試みている。表3-1に計算条件を示し、図3-6に使用コア数による計算時間の変化を示す。いずれの条件においてもコア数の増加に伴い計算時間が大幅に短縮した。しかし、ノード間の通信時間の増加によって、条件によっては128以上のコア数で計算時間が増加した。なお、図3-4と図3-5における計算格子はそれぞれ0.5mm、0.25mmであり、PeiらのLES解析に比べて1桁大きい。今後の格子サイズのより一層の縮小のために、計算のさらなる高速化が期待される。(小橋)

【参考文献】

- 3-1) Yuanjiang Pei, Prithwish Kundu, Graham M. Goldin and Sibendu Som, "Large Eddy Simulation of a Reacting Spray Flame under Diesel Engine Conditions", JSAE No. 20159036, also published as SAE No. 2015-01-1844
- 3-2) <http://www.sandia.gov/ecn/>
- 3-3) Tsukasa Hori, Minoru Hanasaki, Jun Komae, Eriko Matsumura and Jiro Senda, "Compressible Large-Eddy Simulation of Diesel Spray Structure Using OpenFOAM", JSAE No. 20159318, also published as SAE No. 2015-01-1858

4 Gas Engine Control

Gas Engine Control (1) (2)では合計6件の発表があり、そのうち5件が、天然ガスエンジンからのエミッション低減をターゲットとしたものであった。Brunel大学のMayら⁴⁻¹⁾は、Premixed Micro Pilot Combustion (PMPC)による、大型デュアルフェューエルエンジンからのメタン排出量低減を提案した。PMPCは、従来のデュアルフェューエルエンジンと同様に、天然ガス予混合気と軽油の噴霧火炎で点火するものである。ただし、PMPCは天然ガスよりも反応性の高い軽油を早期パイロット噴射して予混合化することにより、上死点付近において天然ガスおよび軽油を急速燃焼させ(図4-1, 2)、未燃CH₄を低減するものである。さらに、PMPCに高圧ループEGRを組み合わせることで、CH₄, NO_x, および燃料消費率の同時改善が可能であることを報告した(図4-3)。

大連理工大学のLiyánら⁴⁻²⁾は、船用の予燃焼室式天然ガスSIエンジンからのNO_x排出量低減を目的として、予燃焼室における最適な燃料噴射条件をPIV計測およびCFD解析に基づいて探索した。解析の結果、予燃焼室内に互いに反転する二つの渦が生成するような燃料噴射方向(予燃焼室の中心軸に対して11°の方向)を選択して混合気を形成することにより(図4-4)、主室および予燃焼室における火炎温度が低下して、NO_x生成が抑制される可能性があることを示した(図4-5)。(河崎)

【参考文献】

- 4-1) Ian May, Alasdair Cairns, Hua Zhao, Vinicius Pedrozo, Hoi Ching Wong, Steve Whelan, Paul Bennicke, Reduction of Methane Slip Using Premixed Micro Pilot Combustion in a Heavy-Duty Natural Gas-Diesel Engine, JSAE 20159263/SAE 2015-01-1798, pp1-13, (2015)
- 4-2) Feng Liyan, Zhai Jun, Li Bo, Chen Lei, Wang Weiyao, Long Wuqiang, Du Baoguo, Tian Jiangping, Research on the Characteristics of Enrichment Fuel Injection Process in the Pre-chamber of a Marine Gas Engine, JSAE 20159271/SAE 2015-01-1961, pp1-9 (2015)

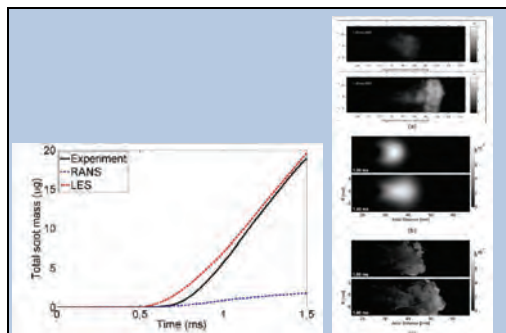


Figure 3-2 スス質量の実験値とRANSおよびLESによる計算値の比較(雰囲気温度900K)

Figure 3-3 噴霧火炎内のス分布の比較 (a)実験 (b)RANS (c)LES(雰囲気温度900K, 噴射開始後1msおよび1.4ms)

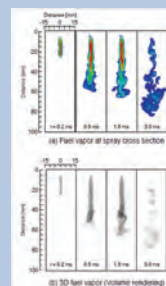


Figure 3-4 格子サイズ0.50mmのLES解析による燃料蒸気濃度分布

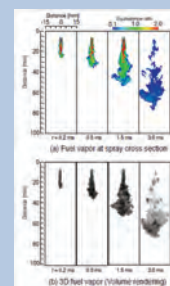


Figure 3-5 格子サイズ0.25mmのLES解析による燃料蒸気濃度分布

Table 3-1 コア数が計算時間に及ぼす影響を調べるための条件

Case	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Domain	20 mm x 20 mm x 100 mm	20 mm x 20 mm x 100 mm	20 mm x 20 mm x 100 mm	20 mm x 20 mm x 100 mm
Grid size	4164 x 4164	1664 x 1664	819 x 819	416 x 416
Number of grid	168,100	27,744	5,312,200	1,312,200
Ambient Temperature	800	300	800	800
Reaction mechanism	Chem-step	40	29 species, 53 reactions, GRI	Chem-step
Max. number of cores	0.1	0.01	0.1	0.1

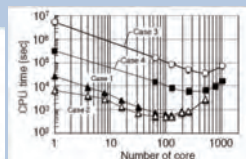


Figure 3-6 コア数による計算時間の変化

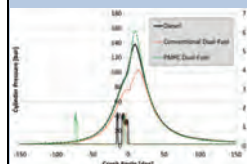


Figure 4-1 Cylinder pressure traces and injection signals vs crank angle for the three combustion modes

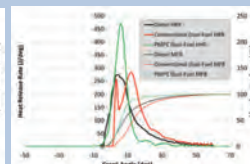


Figure 4-2 Gross Rate of Heat Release (ROHR) and mass fraction burned for the three different combustion modes

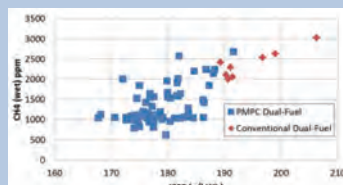


Figure 4-3 Methane (CH₄) emissions vs ISFC for engine operation under PMPC and conventional Dual-Fuel

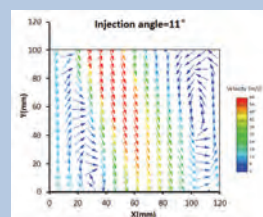


Figure 4-4 Numerical simulation results

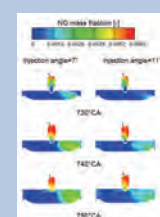


Figure 4-5 NO mass fraction in cylinder

5 Emission Control (1) (2)

今回のセッションの7件の発表のうち、6件が粒子関係であった。揮発性粒子の分離技術、エンジンシリンダ内のSoot濃度や、排気ポート直後の粒子径分布を測定した報告、Transmission electron microscope (TEM)の画像による粒子の状態の解析や自動化のアルゴリズムの報告などがあった。そのうち、TEMの画像を用いた粒子計測に関する発表と車載排ガス粒子数(PN)計測に関する発表について紹介する。

New South Wales大学のSanghoon Kook⁵⁻¹⁾らは、ディーゼルエンジン中で生成されたSootの一次粒子を、TEMの画像を用いて粒径や形状、粒径分布を測定するシステムに関する発表をしている。このシステムは、粒子を自動認識するために、四つのプロセスからなる画像処理や形状を識別するアルゴリズムを組み合わせている(図5-1)。また、自動認識にて測定した結果と熟練したオペレータの測定結果を近づけるために、画像処理にかかわる五つのパラメータを最適化させる検討を行い、検出状況や粒径分布にて評価した結果を示した(図5-2(1),(2))。粒子の計測には、粒子状物質の質量(PM)や粒子数(PN)を測定する方法があるが、このシステムは幅広い粒径やその分布を計測可能とし、粒子が存在している状況を可視化して見られることが興味深い。また、自動認識の精度が上がることで、より計測の効率化が期待できる。

EUではLDV車を対象に車載計測システムを用いた排出粒子数(PN)の規制導入が検討されている。堀場製作所の大槻⁵⁻²⁾らは、国際基準に記載されている排出粒子数(PN)の計測装置(PMP system)や凝縮粒子カウンタ(CPC)を用いて、車載計測システムにおけるDiffusion Charger Sensor(DCS)の適用性を評価した。CPCを基準にDCSの検出効率と粒径の関係を調査したところCPCと傾向が異なり、粒径の影響を受けていることがわかった。DCSセンサを用いて粒子数を算出するには更なる改良が必要と報告している(図5-3)。また、シャシ試験においてPMP SystemとCPCやDCSを用いた車載計測システムを比較した(図5-4)。特に、検出器には関わらず車載計測システムは、PMP systemにはないピークを検出しているため、車載計測システムにおいても揮発性粒子を除去するための前処理が必要と述べている(図5-5)。車載排ガス計測システムは注目されている分野であり、排ガスだけでなく粒子計測も重要となってくる。今後の研究結果を期待している。

本稿では割愛しているが、このセッションでKarlsruhe Institute of TechnologyのChristian Disch⁵⁻³⁾らは、直噴ガソリンエンジンにおいてシリンダ内のSoot濃度や排出される粒径分布を測定することにより、燃焼状態の解析を行っている。この発表はBest Paper Awardsを受賞している。(西村)

【参考文献】

5-1) Sanghoon Kook, Renlin Zhang, Qing Nian Chan, The University of New South Wales / Tetsuya Aizawa, Katsufumi Kondo, Meiji University / Lyle M. Pickett, Sandia National Laboratories / Emre Cenker, Gilles Bruneaux, IFPEN / Övind Andersson, Joakim H. Pagels, Erik Z. Nordin, Lund University, "Automated Detection of Primary Particles from Transmission Electron Microscope (TEM) Images of Soot Aggregates in Diesel Engine Environments", JSAE20159147 / SAE2015-01-1991

5-2) Yoshinori Otsuki, Kenji Kondo, Kenji Takeda, Hiroshi Nakamura, HORIBA, Ltd., "Applicability of Diffusion Charger Sensor to Portable Emission Measurement System", JSAE20159040 / SAE2015-01-1994

5-3) Christian Disch, Jürgen Pfeil, Heiko Kubach, Thomas Koch, Karlsruhe Institute of Technology / Ulrich Spicher, MOT GmbH / Olaf Thiele, LaVision GmbH, "Experimental Investigation of a DISI Engine in Transient Operation with Regard to Particle and Gaseous Engine-out Emissions", JSAE20159125 / SAE2015-01-1990

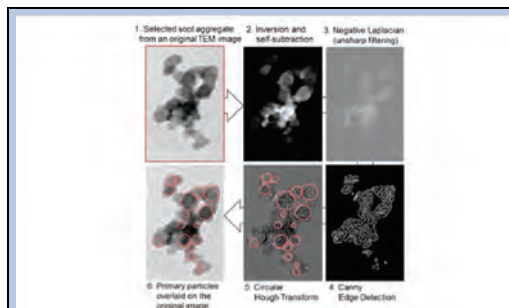


Figure 5-1 粒子を自動認識するための四つのプロセス

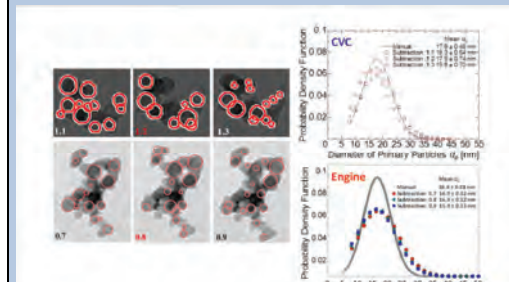


Figure 5-2(1) 一次粒子の検出状況(左側)、オペレータが測定した粒径分布と自動認識システムの比較(右側)

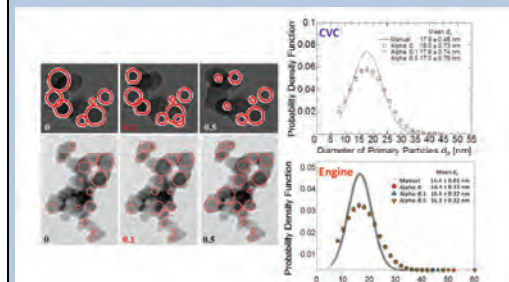


Figure 5-2(2) 一次粒子の検出状況(左側)、オペレータが測定した粒径分布と自動認識システムの比較(右側)

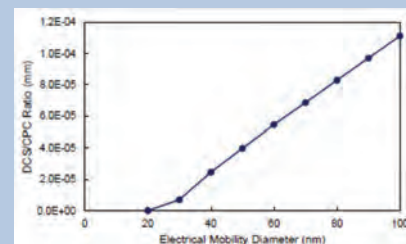


Figure 5-3 粒子径とCPCを基準にしたDCSの検出効率

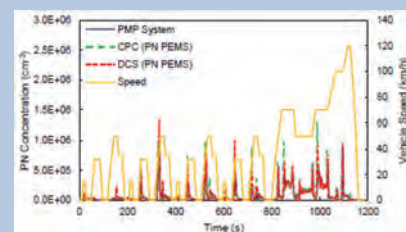


Figure 5-4 Cold NEDC サイクル試験におけるPMPシステムと車載粒子計測システムの比較

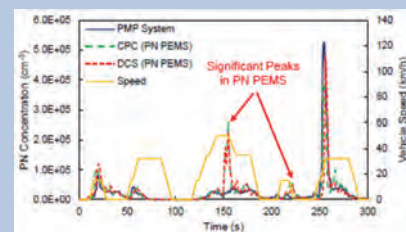


Figure 5-5 Cold NEDC 試験における揮発性粒子の挙動

自動車技術会 2015 年秋季大会

2015 JSAE Annual Congress (Autumn)

主催：公益社団法人自動車技術会
会期：2015年10月14日（水）～10月16日（金）
会場：西日本総合展示場／北九州国際会議場（北九州市）

清水 健一，下田 正敏，野口 勝三（編集委員）
伊東 明美（東京都市大学），五十嵐 龍起，津曲 一郎（日野自動車），平岡 賢二（三菱重工業）

Ken-ichi SHIMIZU, Masatoshi SHIMODA, Katsumi NOGUCHI (JSAE ER Editorial Committee)
Akemi ITO (Tokyo City University), Tatsuki IGARASHI, Ichiro TSUDA (Hino Motors), Kenji HIRAOKA (Mitsubishi Heavy Industries)

1 ディーゼル排気

日野自動車・津曲らは「大型トラック用の低排気温後処理装置の研究」と題して講演を行った。著者らは、高効率エンジン、ハイブリッド(HV: Hybrid Vehicle)化、廃熱回収装置、車両空力改善などの低燃費化技術が進むと、排気温度が低下するため、低排気温度で効果のあるNOx低減技術の構築を課題としている。本研究は環境省のプロジェクトであり「環境省 CO₂ 排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業」の中で推進し、上記の低燃費化技術を搭載した車両を製作し、実際に東名道を走行しているが、御殿場-沼津間の走行区間では、NOx触媒入口温度 150°C以下と低温になっていることが示されている。

低温での NOx低減技術として、触媒の低温性能の改良、エンジンのアフター&ポスト噴射+触媒による排気昇温、パーナやヒータにより排気昇温させる技術など検討され多くの研究機関が進められているが、本研究は、酸化剤や還元剤を用いて、NOxを低減する化学反応そのものを促進する方針が進められ、実車にて評価していることが新しい試みである。低温でも NOx低減が進むと言われている Fast-SCR(Selective Catalytic Reduction)反応に着目している。この化学反応は、 $\text{NO}_2 + \text{NO} + 2\text{NH}_3 \rightarrow \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}$ であるが、低温で NO₂と NO が 1:1 で存在し、かつアンモニア(NH₃)と反応する必要がある。しかしながら、低温では下記の課題がある。

- ・酸化触媒が機能しないため NO が酸化できず NO₂が不足する。
- ・尿素水からアンモニアが生成できない。

これら二つの課題に対して、

オゾン(O₃)の酸化力を利用して NO₂を生成させる。→オゾン発生器の採用

2) 尿素水をグローヒータで強制加熱分解してアンモニアを生成させる。→尿素改質器の採用の対策を行っている。

オゾン発生器については、オゾンの原料を空気中の酸素とし、高電圧プラズマを用いてオゾンを生産させている(図 1-1)。尿素改質器は、グロープラグ 6 本を用いて急速に加熱する装置(図 1-2)となっている。それぞれの単体性能評価を行い、車載用の制御システムを構築し、従来の後処理マフラーにこれらの装置を追加し車両搭載(図 1-3、-4)した後、東名高速道での実路試験の評価を実施。結果、平均排気温度 150°Cにて NOx低減率 61.2%と大幅な NOx低減性能の改善を実現している。

以上のように、低温時の NOx低減性能向上に、尿素 SCR システムに尿素改質器およびオゾン発生器が有効であることが示された。しかし、オゾン発生器はエンジンの NO 排出量に応じてオゾンを生産する必要があるため装置、必要な電力も大きくなっている。オゾン発生器の小型化・低コスト化に今後期待するとともに、エンジンそのものからの NOx量を低減し、エンジンと後処理装置が両輪で課題解決に向けた技術を構築する必要がある。(津曲)

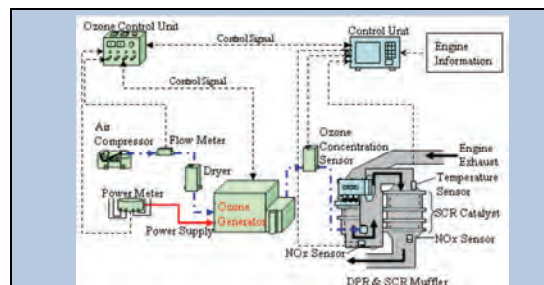


Figure 1-1 オゾン発生器概略図

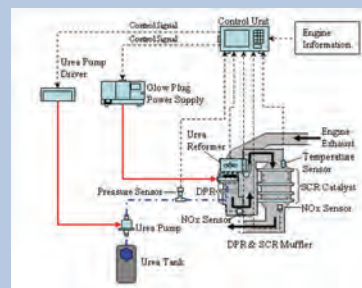


Figure 1-2 尿素改質器概略図

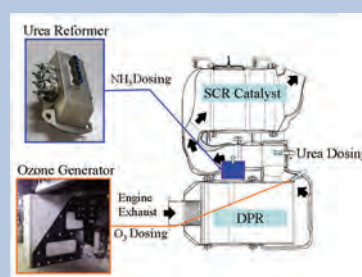


Figure 1-3 オゾン発生器と尿素改質器のマフラ搭載

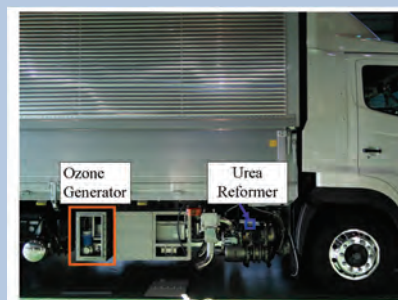


Figure 1-4 オゾン発生器と尿素改質器の車両搭載

【参考文献】

1-1) 津曲 一郎, 佐藤 信也, 町田 耕一, 濱口 孝一, 古川 卓俊, 増田 敦: 大型トラック用の低排気温後処理装置の研究, 自動車技術会 2015 秋季大会, No. 20156229

2 DPF

大学から3件, 自動車メーカーの研究所から2件, DPF 単体での捕集, 再生に関する解析から実車システムとしての検討, DPF 再生時の排出ガス分析と, 多岐にわたる研究成果の報告があった。

東工大・中村らは, 「六角セル構造ディーゼル微粒子フィルターの壁面に沿うバイパス流によるスス堆積と酸化過程」²⁻¹⁾と題して講演した。部分的に入口セルどうしが隣り合う六角セル構造のDPF (HEX DPF, 図2-1)における捕集, 再生について, 直接セル壁面の観察を行い次のことを確認した。入口セル同士が隣り合うセル壁にもガスは流れ, PM 捕集と再生が行われること。そのセル壁のPM 捕集量は, 入口セルと出口セルが隣り合うセル壁よりも少なく, 再生時は先にPM が焼失する。この現象により, HEX DPF のPM 捕集時の圧力損失が低いこと, 再生時の急激な温度上昇を抑制できることがわかった。従来, エンジンでの実験結果あるいは計算解析から言われていたHEX DPF の特性が可視化できた意義は大きい。

いすゞ中央研究所・中村, イビデン・尾久らは, 「低圧力損失小型 DPF の開発」²⁻²⁾と題し, DPF の圧損低減策についてエンジンでの実験結果を発表した。圧力損失の上昇に寄与度が大きいDPF セル壁内部でのPM 捕集を抑制する濾過膜層や, 再結晶SiC材の強度を生かした薄壁化, 八角セルDPFについて, DOC (酸化触媒)+DPF (触媒担持)の構成で評価している。薄壁SiC-DPFは, 従来のコージライトDPF 対比で圧力損失を低減しつつも容積(長さ)を半減できた(図2-2)。さらには, 小型化により, DPF をエンジン直下に配置でき, 結果としてDPF 温度が大幅に上昇し(WHTC-cold で平均90°C), 再生に要する燃費低減が図れるとしている。排出ガス規制の強化により大型化, コスト上昇する排気後処理装置の小型化, コスト抑制さらには, また, エンジン熱効率向上によって低下する排気温度対策として有望な技術である。

いすゞ中央研究所・塩谷らは, 「ディーゼルパティキュレートフィルタ再生時のVOC 排出挙動 第1報 VOC 捕集方法および排出量評価の基礎検討」²⁻³⁾と題して, DOC+燃料添加によるDPF 再生時における排気中VOC の排出挙動について発表した。従来, THC で一括りされていたものを, VOC として, かつ成分毎に測定している。通常運転時と再生時, あるいは再生時のDOC+DPF の前後で, VOC 量は成分にもよるが, 芳香族炭化水素などは40~50倍増加が見られた。また, DOC 前の各VOC 成分の量と排気管に添加した燃料のVOC 量を比較すると前者が多く(ベンゼンでは排気管添加量の2倍), エンジン燃焼由来のVOC が少なくないことが分かった。一方, DOC+DPF 下流においては, VOC 各成分がほぼ100%近く低減され, 無害化されていることが分かった(図2-3)。安定化しているベンゼンについては低減率が85%となったが, 絶対量がTHCの0.01%と低いため問題ではないとの見解。今後の期待として, VOC 中の含有率が少なくないと考えられる高沸点成分の分析が待たれる。

名古屋大・矢ヶ崎らは, 「数値シミュレーションによるDPFの構造評価」²⁻⁴⁾と題して, DPFの圧力損失低減を目的とした, DPF 壁内の流れ, すす堆積による圧力損失の変化についての数値解析結果を発表した。多孔体流れの解析に適した格子ポルツマン法により, 三次元で解析している。実際のコージライト製DPFの多孔質構造を三次元CT法でデータ化したものをベースとしてモデル化し, その空隙率を壁のIN側, OUT側で変化させたものについて圧損を比較した(表2-1, 図2-4)。深層濾過~表層濾過への変化も表現でき, 結果は, ベースに対して全体的に空隙率を下げた仕様およびOUT側のみ空隙率を下げた仕様の圧力損失が明らかに低くなった。表面を緻密化して素早くすすけ層を作る方が圧損は小さいという一般論と合わない部分もあるが, 実験することが困難な事象の解析であり, 理想的な細孔構造を求める手法として今後期待したい。(五十嵐)

【参考文献】

2-1) 中村真季, 花村克悟, 洪田匠, 吉野朝, 岩崎健太郎: 六角セル構造ディーゼル微粒子フィルターの壁面に沿うバイパス流によるスス堆積と酸化過程, 自動車技術会 2015 秋季大会, No. 20156221

2-2) 中村圭介, 藤井謙治, 藤野竜介, 大角和生, 島崎直基, 上條浩道, 尾久和丈: 低圧力損

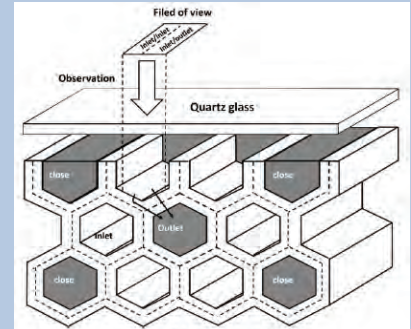


Figure 2-1 Hexagonal cell DPF

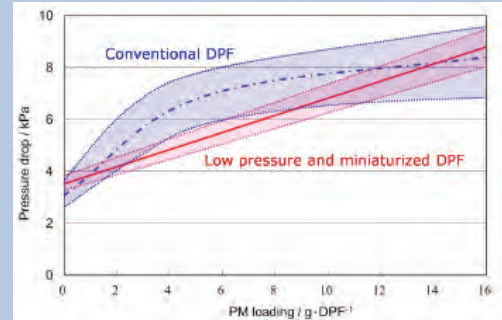


Figure 2-2 Distribution of DPF pressure drop at each PM loading

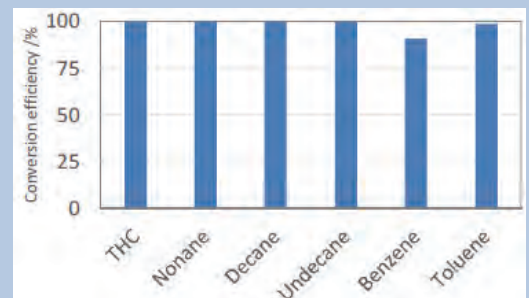


Figure 2-3 Conversion efficiency of THC and VOCs under DPF regeneration condition

Table 1 Porosity and initial pressure drop

Filter number & name	Porosity $\varepsilon_{air}(\varepsilon_F, \varepsilon_R)$	Initial pressure drop ΔP (kPa)
0 Reference	0.48 (0.51, 0.45)	2.97 (-)
1 Front thin	0.56 (0.67, 0.45)	2.81 (-0.16)
2 Rear thin	0.58 (0.51, 0.64)	0.27 (-2.7)
3 Front & Rear thin	0.65 (0.67, 0.64)	0.112 (-2.86)

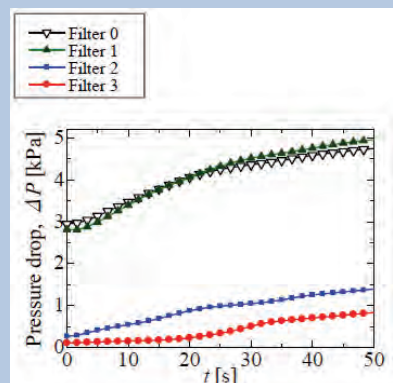


Figure 2-4 Time variation of the pressure drop

失化小型 DPF の開発, 自動車技術会 2015 秋季大会, No. 20156223

2-3) 塩谷健二, 柴田慶子, 島崎直基: ディーゼルパーティキュレートフィルタ再生時の VOC 排出挙動 第 1 報 VOC 捕集方法および排出量評価の基礎検討, 自動車技術会 2015 秋季大会, No. 20156224

2-4) 矢ヶ崎勝太, 山本和弘, 田島祐太: 数値シミュレーションによる DPF の構造評価, 自動車技術会 2015 秋季大会, No. 20156225

3 ディーゼル燃焼・排気

相園らは「機械式過給機を用いたディーゼルエンジンの排出ガス低減に関する研究」と題して講演を行った。

平成 29 年より段階的に施行される次期ディーゼル重量車用排出ガス規制では, 最高出力・トルクで規定される領域内全てにおいて排出ガス量一定値以内に抑えなければならない(図 3-1)。これには, 従来の排出ガス規制では, あまり考慮されていなかった低速全負荷領域も含まれており, 低速トルクの向上とともに排出ガスの低減も求められる。

今回の発表では, これまで研究を進めてきたターボチャージャと機械式過給機を組み合わせた 2 段過給システムを用いて, 低速トルク向上と排出ガス低減, ならびに, 次期排出ガス規制への適合可能性を調査している。

まず初めに, 0 次元ディーゼル燃焼シミュレーション HIDECS を用いて, WNTE の NO_x 排出ガス規制値(本報では 0.6g/kWh)をクリアできる EGR 率と過給圧の検討を行った。1400rpm での検討結果を図 3-2 に示す。EGR 率を 40%程度に高め, また, 過給圧も同時に増加させることで, Soot 排出量も低減させている。

次に, エンジン性能予測ツール WAVE を用いて, 上記吸気条件を満足するためのエンジンシステムの検討を行った。これには, ターボチャージャと機械式過給機による 2 段過給システムベースに, 図 3-3 に示す中圧 EGR システムを採用することで, 排気マニホールドと機械式過給機間の吸排気差圧を活かし, 大量 EGR を確保できるようにしている。

最後に, これまでの机上検討結果を反映したエンジン実機試験を行い, 全負荷領域で NO_x ≤ 0.6g/kWh を確保したほか, 過渡運転モードでも NO_x ≤ 0.4g/kWh を, NO_x 後処理装置なしで達成できている(図 3-4)。

Soot 排出量が多いこと, およびそれに伴う機械式過給機の信頼性確保が課題ではあるが, これはインジェクタ仕様や燃焼室形状適正化などの燃焼改善により低減できると考える。今後, 排出ガス規制はますます厳しくなると思われるが, DPF や SCR 等の後処理システムだけでなく, エンジン燃焼技術のさらなる進歩にも大きな期待を寄せていきたい。(平岡)

【参考文献】

3-1) 相園 齊, 菊地 武, 新田 淳一郎, 石川 直也, 伊東 光, 「機械式過給機を用いたディーゼルエンジンの排出ガス低減に関する研究」, 自動車技術会 2015 秋季大会, No. 20156138

4 新エンジン開発

本セッションは, 開催期間の初日にメインホールで開かれ, 4 件の講演が行われた。その中から新型エンジンに関する 3 件の講演を紹介する。

トヨタ自動車の松井ら⁴⁻¹⁾は「新型 ESTEC 2GR-FKS/FXS エンジンの開発」と題して講演を行った。GR 系エンジンを 3.5L V 型 6 気筒エンジンに統合, 4in1 と称し FF/FR, 乗用/商用, コンベンショナル車/HV 車を同時開発し開発のスリム化を図ったという(表 4-1)。燃費向上技術として, アトキンソンサイクル, 中間ロック機構付油圧式 VVT, 進化した燃料システム, 高水温制御等を投入している。VVT 制御用のオイルコントロールバルブには, センタースプール方式を採用し圧損低減, 低温始動性とレスポンス向上を図っている。燃料システムとしては, 第 4 世代 D-4S をシリーズ全機種に導入, 運転状況に応じ最適な燃圧制御を行っている。またヒータを取り付けた開弁温度可変サーモスタットを採用し, 中軽負荷域では水温 87℃とし, フリクションと冷損低減を図り, 高負荷域では水温 82℃とし, 従来の制御水温と同等の出力を確保している(図 4-1)。欧州車のシリンダブロック高水温制御に比べると若干低めの設定温度であるが, コストと効果からこのシステムを採用し, 過渡時の応答性から高水温側を 87℃に抑えているとのこと。さらに Ex ポート一体シリンダヘッド, 運動部品軽量化等により, 表 4-1 に示す出力を達成し,

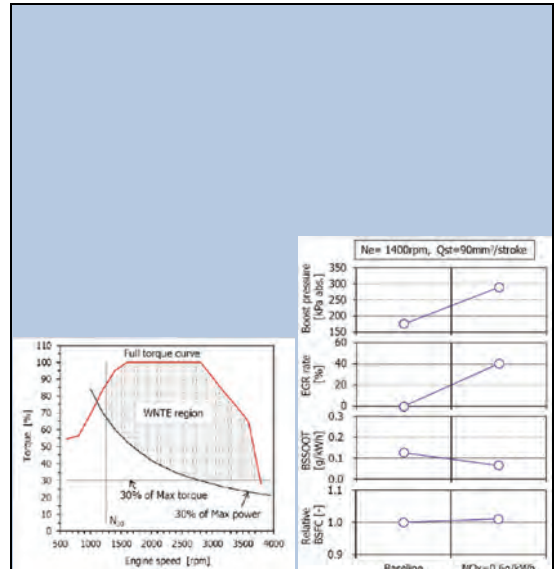


Figure 3-1 WNTE region on full load performance curve

Figure 3-2 Optimum value of boost pressure and EGR rate to obtain NO_x = 0.6 g/kWh (Case 1)

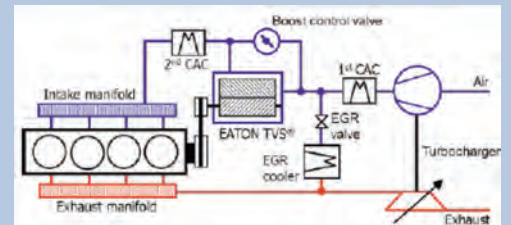


Figure 3-3 Schematic layout of supercharging system on this study

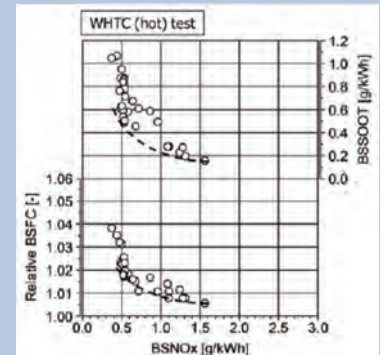


Figure 3-4 Test results of WHTC (hot)

Table 4-1 エンジンファミリーと主要諸元

Usage	Passenger	Commercial	Passenger
Platform	FF	FR	FF
Vehicle type	Conv.		HV
Engine name	2GR-FKS		2GR-FXS
Engine type	60 degree V6 DOHC		
Bore x Stroke (mm)	84 x 83		
Displacement (cc)	3458		
Equipments	Dual VVT-iW D-4S		Dual VVT-iW D-4S Cooled EGR
Compression ratio	11.8		
Max. output (kW/rpm)	216 / 6300	234 / 6600	201 / 6000
Max. torque (Nm/rpm)	355 / 4700	380 / 4800	354 / 4600

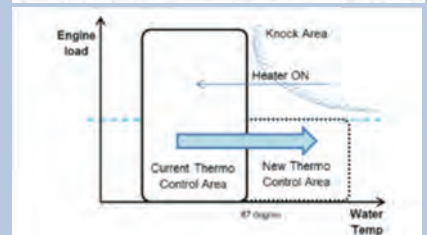


Figure 4-1 開弁温度可変サーモスタットの動作原理

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 6 No. 2 2016

図 4-2 に示す燃料消費率を達成,最小 BSFC は 224g/kWh, 最大熱効率で 38%を実現したと報告があった。

ホンダからは 2 件, 1.5L と 2.0L の新型 VTEC TURBO エンジン開発について講演があった。

まず 1 件目, 城野ら⁴⁻²⁾は,「新型 2.0L 直列 4 気筒ガソリン直噴過給ダウンサイジングエンジン」と題して講演を行った。このエンジンは, 欧州でホットハッチといわれるカテゴリーの高出力スポーツ用エンジンであるという。FF 車最速を達成するため, 高出力と高応答性, そして環境性能との両立を狙いに開発を行っている。採用している燃焼技術としては, ノッキングの抑制, PM の低減のためにタンプル流動の強化を行っている。ただし高回転側の出力も要求されるため, 吸気ポートの流量係数低下を抑えつつ急速燃焼を図っている。動弁系技術として, Dual VTC とエキゾーストバルブリフト可変機構を採用し, 低回転高負荷領域では,エキゾーストバルブリフトに狭開角(低リフト)を用い, Dual VTC によりオーバーラップを拡大しエキゾーストバルブを最適なタイミングで閉じることで, 掃気効果を発揮できたという。高回転高負荷時は広開角(高リフト)を用い, ブローダウン時の排気抵抗を低減し出力向上を図っている。低中負荷領域は, 燃費向上のため広開角(高リフト)とし, オーバーラップ拡大による内部 EGR の増加を図っている。またオーバーラップ領域を吸気行程とすることにより, 吹き戻し削減の効果もあると述べている。主運動系技術としては, 新開発の桿部部分強化コンロッドを採用することで, LSPI が発生した場合の高い筒内圧にも耐えることができ, かつ重量として 15%の軽量化を行っている。また高負荷荷重に最適なクランク剛性となるように CAE 解析を行うことで, トルク比で世界最軽量のクランク重量を達成したという。これらの技術により, 図 4-3 に示すような最大出力 228kW, 最大トルク 400Nm を発生させるとともに, 図 4-4 に示すエンジン単体燃費を実現した。このエンジンを搭載した車両は, FF 車においてニュルブルクリンク最速でありながら,ホットハッチのカテゴリーでトップレベルとなる欧州燃費モード CO2170g/km を達成し, すず排出量はホンダ量産直噴 NA 同等以下を達成したと報告があった。

2 件目として, 和田ら⁴⁻³⁾は,「新型 1.5L 直列 4 気筒ガソリン直噴過給ダウンサイジングエンジン」と題して講演を行った。このエンジンは, 排気量 1.8L から 2.4L クラスの NA エンジンからの置き換えを目的としている。使用燃料は, 広く普及させる狙いからレギュラーガソリンとし, 圧縮比をクラストップレベルの 10.6 としたという。燃焼コンセプトとして, 急速燃焼や均質混合気形成が重要であると, それを実現するため図 4-5 に示すように, 高タンプルポート, 浅皿ピストン, 壁面付着を低減できるマルチホールインジェクタ, ノッキング低減のためのナトリウム封入エキゾーストバルブを組み合わせ, 燃焼システムを構築している。最大出力は, 2.0L NA エンジン同等の 110kW, 2000rpm のトルクは 2.4L NA 並とし, 市街地と高速走行を両立する出力特性としている。これを具現化したのは, 低イナーシャ高応答ターボチャージャー, 電動ウエストゲート, Dual VTC であるという。燃費特性として, 本開発エンジンと 2.0L NA エンジンの BSFC マップ比較を図 4-6 に示す。最小 BSFC は 220g/kWh, 熱効率で 38%を達成したと報告があった。低エミッション化に関して, 本燃焼システムは, 低温始動時の燃焼安定性でも効果があり, 大幅な点火時期リタードが可能になったという。その結果ターボチャージャー等, 触媒前ヒートマスが増加する過給エンジンでありながら, NA 同等レベルの触媒昇温特性を確保したとしている。本新開発エンジンを搭載した車両は, JC08 モード燃費 17.0km/L を達成し, 平成 17 年排出ガス基準 75% 低減に適合したと説明があった。(野口)

【参考文献】

- 4-1) 松井 淳, 小山 裕靖, 後藤 雄一, 河合 秀敏:新型 ESTEC 2GR-FKS/FXS エンジンの開発, 自動車技術会 2015 年秋季大会学術講演会講演予稿集, No.20156001
- 4-2) 城野 実考, 篠原 利光, 田口 将之, 成廣 繁:新型 2.0L 直列 4 気筒ガソリン直噴過給ダウンサイジングエンジン, 自動車技術会 2015 年秋季大会学術講演会講演予稿集, No.20156002
- 4-3) 和田 裕介, 中野 弘二, 望月 計:新型 1.5L 直列 4 気筒ガソリン直噴過給ダウンサイジングエンジン, 自動車技術会 2015 年秋季大会学術講演会講演予稿集, No.20156003

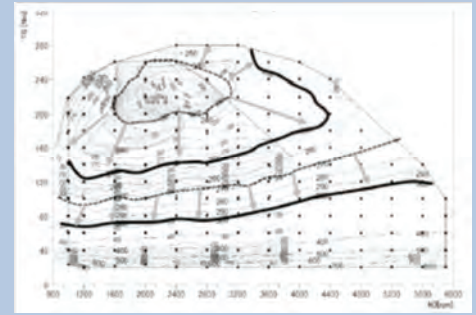


Figure 4-2 BCFC マップ

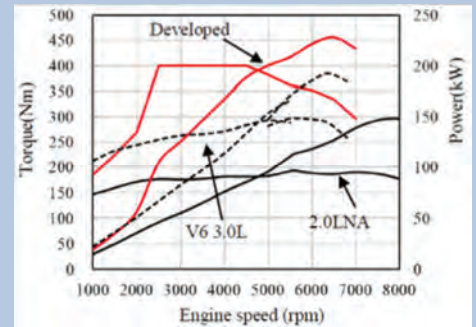


Figure 4-3 エンジン出力性能曲線

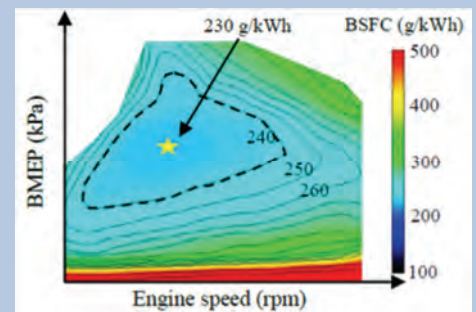


Figure 4-4 BSFC マップ



Figure 4-5 燃焼システム

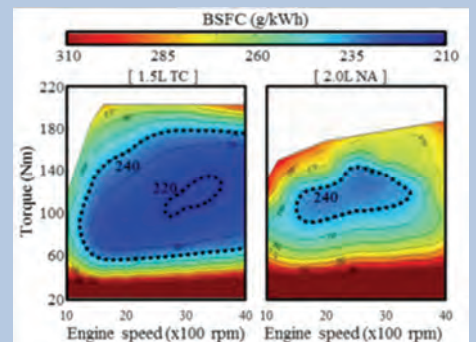


Figure 4-6 BSFC マップの比較

5 パワートレイン・トライボロジー I, II

本分野の主な課題は、信頼性・耐久性向上、摩擦損失低減およびそれらの机上評価手法確立と思われる。表 5-1 に筆者の分類による本セッションの講演内容を示す。上述の課題を網羅した多岐にわたる研究成果が報告されたことが分かる。

表 5-1 パワートレイン・トライボロジー I, II の発表分野

講演 No.	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220
信頼性・耐久性	○	○	○				○	○		○
摩擦損失低減				○	○	○	○		○	○
机上評価手法							○	○		

信頼性・耐久性に関し、間瀬らより E100 燃料使用時の吸気バルブ摩耗の発表があった。摩耗は図 5-1 に示す RI 法にて運転条件毎に測定されている。形状測定や重量測定による摩耗量の特定には最低でも数 10 時間、部位によっては数 100 時間の運転を要するが、RI 法を用いることで短時間での摩耗測定を可能としている。測定された摩耗量は排気中の硝酸系イオン量と良い相関を示した(図 5-2, -3)。このことから吸気バルブ傘部に付着した水分を含む E100 燃料に硝酸系イオンが溶け込み、腐食摩耗が発生することが示唆された。

摩擦損失低減については、田牧らよりオイルリングに関する報告があった。ピストンリング中オイルリングは摩擦損失への寄与度が最も高い。さらに摩擦低減の背反となりがちなオイル消費に対しても高い寄与度を持っている。田牧らは表 5-2 に示す摺動面形状を付与し、摺動面油膜厚さおよび摩擦力の測定を行った。これにより図 5-4 に示すように油膜厚さを増加させずに摩擦損失が低減できる事例を示した。本研究は、研究例の少ないオイルリングを取り上げた研究であり、今後が期待される。ただし本結果はリグテストによるものであるため、ピストン挙動を考慮した際の性能は確認が必要であろう。また油膜厚さ測定結果は計算結果よりも大きな値を示しており、測定、計算ともに課題を有している可能性があると思われる。

机上評価手法に関しては、針谷らより、オイル消費の予測に必要となるシリンダ壁面からの潤滑油蒸発量計算に関する報告があった。本計算ではオイルが多成分からなることが考慮されている。図 5-5 に各種オイルの炭素数毎のモル分率と、それより算出された蒸気圧を示す。この蒸気圧を用いて計算された結果が図 5-6 のように示されている。図 5-6 に示される蒸発したオイルの質量割合を図 5-5(a)と比較することで、各オイルの軽質炭素数成分が主に蒸発していることが分かる。このことからオイルの蒸発を計算で予測する際には、供試オイルの組成を考慮する必要があることがわかる。さらにこのことは、オイル消費低減のためにはオイルの軽質分の低減が有効であることを示唆していると思われる。(伊東)

【参考文献】

- 5-1) 間瀬謙, 布川公博, 木下雅夫, 森谷浩司, 前川仁之, 田中宣行, 岩出純, 川田明彦, 腰水孝英: RI トレーサ法を用いた E100 燃料使用時の吸気バルブ摩耗解析, 自動車技術会 2015 年秋季学術講演会講演予稿集, No. 20156211
- 5-2) 田牧清治, 川合清行, 彦根顕, 南郷哲哉, 郷和子, 浜昌秀, 西友祐: 低張力 3 ピースオイルリングにおけるフリクション低減とオイル消費性能との両立, 自動車技術会 2015 年秋季学術講演会講演予稿集, No. 20156216
- 5-3) 針谷安男, 鈴木秀和, 伊東明美, 副島光洋, 浜武俊朗: ディーゼルエンジンのシリンダ壁面における多成分オイルの蒸発に関する研究, 自動車技術会 2015 年秋季学術講演会講演予稿集, No. 20156218

6 EV 関連

今大会の電動車両関連発表は、EV, HEV 関連の 5 セッションと FGV 関連の 1 セッションの、計 6 セッションであったが、エネルギー消費量の絶対値が大きい高速道路走行を中心とする長距離走行用の大型トラック HEV に関する発表が多かったのが一つの特徴であった。ここでは、これらについて相互の関係を踏まえた紹介を中心に、要素に関する注目される技術について紹介する。あわせてトレンドとして注目すべき発表についてもその概要を紹介する。

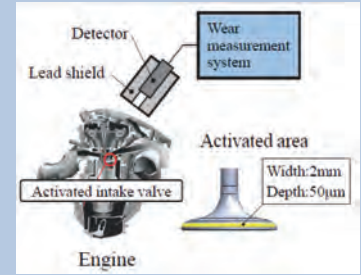


Figure 5-1 RI トレーサ法を用いた吸気弁の摩耗測定

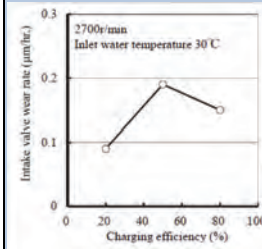


Figure 5-2 充填効率と摩耗

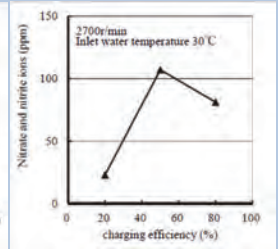


Figure 5-3 充填効率と硝酸系イオン

Table 5-2 供試ピストンリングの概要

Piston Rings	Piston Rings		
	TOP	END	OCR
cross section	rectangle	rectangle	rectangle
peripheral profile	CrN	CrN	CrN
axial width (mm)	1.2	1.2	2.8

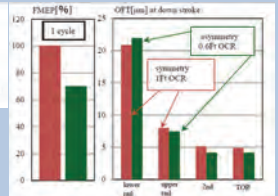


Figure 5-4 FMEP and OFT に対する非対称形状の効果

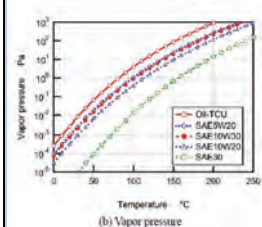
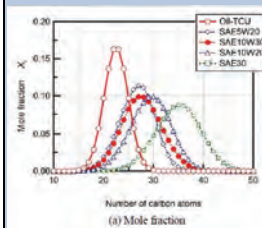


Figure 5-5 混合オイルのモル分率から算出した蒸気圧

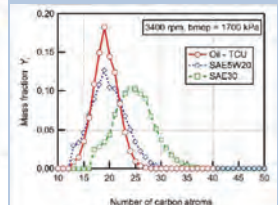


Figure 5-6 蒸発したオイルの質量割合

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 6 No. 2 2016

増田らは、既報の、図 6-1 に示す MG を変速機以降に設置した、高速道路での高低差によるエネルギー回収に特化した大型 HEV トラックシステムを実現し、高速道路での評価結果について述べた⁶⁻¹⁾。HEV システムとしては、東名高速道路の坂路の約 94% を占める 3% 以内の勾配に対応できるように MG (100kW) と電池容量 (30kWh) を設定し、回生時のエンジン切り離しによって回生量の改善を図っている。この制御は、道路マップから走行予定コースの道路勾配を先読みし、電池の SOC を勘案して最適な回生とアシストを実施することによって電気系の寄与度を向上している。回生されるエネルギーは走行抵抗で消費された残余であるので、回生量を改善して燃費を向上するには高速走行時の風損低減がキーとなる。前面の局面化、車体後端の絞り込みをはじめ車体底面やリヤバンパの低風損低減などを図り、シミュレーションでは 14% の改善を見込んだ。また、ランキンサイクル発電装置 (図 6-2) による廃熱回収を採用し、80km/h 走行時相当の台上試験で 4% の改善を見込んだ。実車による東名高速道路厚木 IC ~ 相良牧之原 IC 間の実車による走行試験で各部の効果を確認し、表 6-1 の結果を得た。HEV システムの改善、走行抵抗低減は予定より良い結果が得られたが、廃熱回収は予定を大幅に下回った。この主な原因は系の高効率化によって発熱量が低下した (当初予定した 85°C 以上の出現確率が低かった) ことによる。

これに対して、電動過給器の使用によってダウンサイズのエンジンを高効率・高出力で使用するパラレル HEV トラックが提案されているが、これに関する二つの発表があった。

肥喜里らは、図 6-3 に例示する、①ダウンサイズの engine B (7L) を高トルク・低燃費化したエンジン (engine D, 7.7L) に換え、②定速トルクと燃費を電動過給器によって改善し、さらに③不足動力をモーターアシストで補ってコンベンショナル車両の engine C (10.8L) の性能を得る手法について検討結果を述べた⁶⁻²⁾。電動過給器は図 6-4 に示すようにエンジン性能の改善が有利なインタークーラ下流側に設置され、使用/非使用は吸気バイパス路の切り替えによっている。電動過給器の駆動は HEV 用 MG で発電された電力による。

3kW の電動過給器が供試可能であることから、これと 4.7L エンジン (engine A) によって 20 ton HEV トラック用の高効率 HEV システムの検討を、当該エンジンの台上性能試験結果をベースにしたシミュレーションで行った。電動過給器の回転速度が 40000rpm と 65000rpm の際の engine A の全負荷トルクと全負荷時の燃料経済性は各々図 6-5、図 6-6 に示すとおりで、65000rpm では低速域でトルク、燃費とも engine B より良好である。過給器は 8000rpm のアイドル状態で待機することによって、過渡応答の確実化を図り、エンジン回転数 1200rpm での全負荷へのステップ入力に対する応答時間を半減している。目標のトルク域を補完する各機能は図 6-7 に示すとおりで、シミュレーションで求めたこの HEV の都市間走行モードでの燃費改善率の変化は図 6-8 に示すとおりで、基準になる HEV に対して 17.6% 改善されている。

図 6-3 の例示は 25 ton 車を対象としており、これには 5kW の電動過給器付きのエンジンが必要であるが、入手不能であるため 3kW 電動過給器のデータを基にエンジン性能をシミュレーションで求めた。例示の高効率 HEV を実現する各ステップは図 6-9 に示すとおりで改善率は 9.9% にとどまっている。この原因は主に燃費性能に優れたダウンサイズエンジンが得られなかったことによるとしており、全体の効率を大きく左右するのはこの部分の性能であるとしている。

奥井らは、既報で提案していた前述のダウンサイズエンジンと電動過給器による HEV システムを、試作電動過給器と量産エンジンの組み合わせで実現し、図 6-10 (図 6-3 に準ずる) に示す仮想的な構成をハイブリッド・パワートレイン台上試験機上に構築し、国内の重量車用燃費・排ガス評価試験を実施し、燃費の改善度等を検証した⁶⁻³⁾。前述の 3kW の電動過給器と 4.7L エンジン (engine A) でコンベンショナル車両の engine D (10.8L) の性能を目標としている。各負荷域の各要素のカバー範囲は図 6-11 のとおりで、回生制動の機会が多い都市内走行 (JE05 モード) ではモーターアシストを主流とし、回生の機会が少ない高速道路走行 (都市間モード) 時には MG を積極的に発電に使用する (この際はエンジンを図 6-11 の熱効率の優れた線上で稼働するよう制御した)。排ガス後処理装置は DPF、酸化触媒 (DOC) や選択的還元触媒 (SCR) を搭載している。

この車両の性能と比較検討のために目標のコンベンショナル車両 (25 ton 車, 10.8L エンジン) の HEV 車 (MG (112kW) と電池 (Li イオン電池, 10kWh) は検討車両に準ずると、4.7L エンジンの HEV 車 (検討車両から電動過給器の系を削除したもの、MG の容量は走行可能な値に修正) についてもシミュレーションを実施している。電動過給器付きエンジンを実機またはモデルで対応したほか、MG、駆動用電池等はモデルで対応し、走行評価は JE05 モード (都市内) と縦断

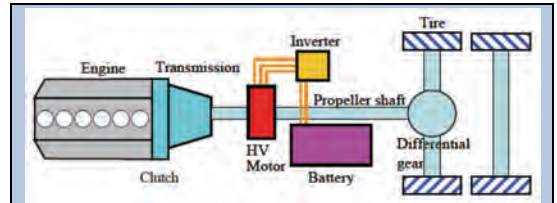


Figure 6-1 高速道路走行に特化した HEV システム

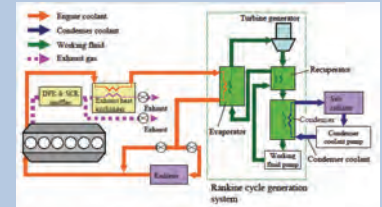


Figure 6-2 ランキンサイクルによる熱電変換システム

Table 6-1 各要素毎の燃費改善率

System	Targets %	Results %
Hybrid system	14	14.9
Aerodynamics & tire	14	14.1
Rankine cycle gen. system	4	1.7

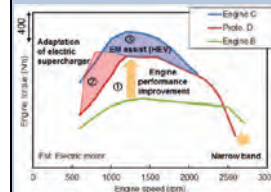


Figure 6-3 燃費改善コンセプト

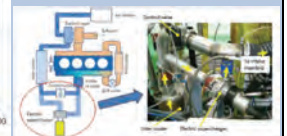


Figure 6-4 電動過給器付きエンジン A のブロック図

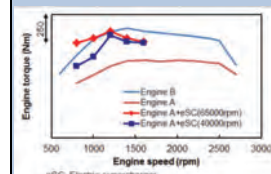


Figure 6-5 全負荷トルクへの電動過給器効果

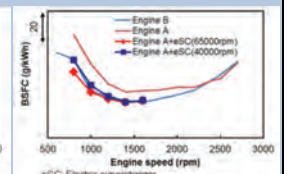


Figure 6-6 全負荷燃費への電動過給器効果

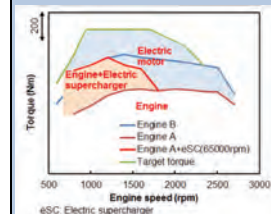


Figure 6-7 エンジン A による高効率 HEV の各要素の使用域

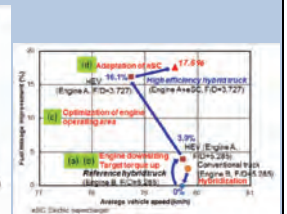


Figure 6-8 エンジン A による 20 トン HEV の燃費改善ステップ

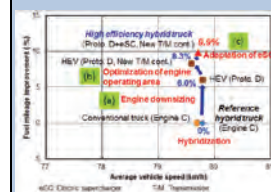


Figure 6-9 エンジン C による 25 トン HEV の燃費改善ステップ

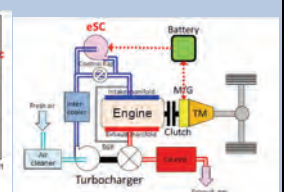


Figure 6-10 電動過給器付き HEV (新方式 HEV) の構成

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 6 No. 2 2016

勾配情報付きの 80km/h 定速走行を主体とする「都市間モード」でおこなっている。3 車両のパワートレインの要素を表 6-2 に示す。

3 車両の半積載／全積載時の燃費改善率を図 6-12 に示す。4.7L エンジンの HEV は、全積載時は電池の SOC が低下して実現不可であるが半積載時は 45.3%で良好である。eSC 付き HEV の場合、積載によらず良好で、最終ギヤの修正を含むと 43%以上を確保出来、実用的であるとしている。JE05 モードと都市間モード運転時の一秒ごとのエンジン動作点は図 6-13 に示すように、10.8L エンジン HEV では効率の悪い低負荷での運転が比較的多いのに対し、eSC 付き 4.7L エンジン HEV 車では MG を積極的に発電に使用したことにより高効率点を規則的に使用していることが分かる。HEV では排ガス後処理装置の運転温度が問題になる例が多いが、eSC 付き HEV 車の SCR の平均温度は、積載状態や走行モードの違いによっても活性化温度をほぼ満足していることから、十分実用性があるとしている。

eSC を採用する HEV については 2015 年春季大会での AVL によるマイルド HEV での燃費改善が 5%との発表があった⁶⁻⁴⁾が、改善率はシステムの最適化如何に大きく依存していることが分かる。

加減速を繰り返す路線バス HEV についても参考になる発表があった。植村らは「ディーゼル車に比べて 40%の燃費改善」を目標にして開発した路線バス HEV について主要な燃費改善技術と営業路線で実施したモニタ試験について述べた⁶⁻⁵⁾。パラレル HEV をベースに、HEV 技術の知見を精査して最適化を図っている。エンジンとモータ間のクラッチによって回生時にエンジン引き摺りトルクを回避できるいわゆる動力切り換え型複合 HEV システムを採用し(図 6-15)、現行の HEV に対してダウンサイズのエンジン(表 6-3)を採用して、電力負担比率を大幅に高くしている。そのため、モータは高効率同期機に油冷を、インバータには水冷を採用して大負荷化と小型化を実現した。空冷のバッテリーは、発熱量そのものを抑制する目的も兼ねて余裕のある大容量化を採用した。

大型路線バスの実データによる減速時のパワーのヒストグラムは小パワーほど頻度が高いことから、小パワーまで回生できる設定とし、減速時の回生電力は現行車より図 6-16 のように改善され、その結果、回生エネルギーは約 60%増加した。これによって、電力的にもモータ中心の加速が可能となり、エンジン・モータ間のクラッチによって EV モードでの加速が可能となる(図 6-17)。路線バスの場合、発進時の燃料消費量が全体の 60%を占めていることから、EV モードでの加速は重要な燃費改善手順となる。

一方、加速時のモータ駆動力は、車両の加速と同時に回転部分の回転速度の上昇にも使用されるので、燃費改善には回転部分の等価慣性質量の低減も重要となる。この観点から、2 速ギヤと 3 速ギヤでの等価慣性の差が約 1ton に相当することを明らかにし、発進時のギヤを従来の 2 速ギヤから 3 速ギヤに換え加速時のエネルギー消費量を 40%低減できたとしている。ギヤシフトタイミングを最適にすることによって燃費低減を確保するために、従来の MT から小型トラック HEV で一般的な AMT(自動化手動変速機)に変更している。この部分のユーザ受け入れ性を確認することも含めてバス事業者によるモニタ試験を実施し、ディーゼル車に対して概ね 40%の燃費改善を確認した(図 6-18)。この結果は、小型車からの類推からも妥当な値であると思われる。

シリーズ／パラレル HEV 双方の欠点を補う複合型 HEV システムとしては、動力切り換え型(クラッチ等によって動力のパスを切り換えるもの)と動力分割型(遊星歯車によって動力を機械／電気に分割するもの)に大別され、特に後者は CVT の機能を包含することから電気 CVT の別名を持ち、乗用車用として広く普及している。しかし、二つの M/G が必須であることから、より小型の車両への採用には難がある。

久保田らは、遊星歯車の機能と M/G の機能を複合化した図 6-19 に示す磁気ギヤモータによる動力分割型 HEV システムの可能性について述べた⁶⁻⁶⁾。ロータ(エンジン軸)と、回転磁界を発生するステータの間に磁気変調子(Modulator, 車両駆動軸)を設けた構造で、ロータ(pm)、ステータ(s)、モジュレータ(m)の各回転角速度(ω)と各極対数(P)、トルク(T)の間には、

$$\omega_m = \frac{P_{pm}}{P_m} \omega_{pm} + \frac{P_s}{P_m} \omega_s \quad (1)$$

の遊星歯車に準じた関係が成り立つ。(1)式の右辺第一項はエンジン、第 2 項はステータによる回転)

Table 6-2 各 HEV のパワートレインの仕様

Vehicle Mass	8,765 kg	
Max. Load Mass	15,530 kg	
Height × Width	2934 × 2490 mm	
Tire (radius)	473.0 mm	
Gear Ratio	1st	6.304
	2nd	4.170
	3rd	2.393
	4th	1.456
	5th	1.000
	6th	0.752
	7th	0.604
Final Gear Ratio	5.102 (DE)	

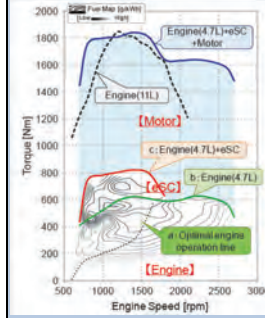


Figure 6-11 新方式 HEV のエンジンとモータのトルク

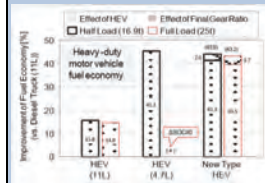


Figure 6-12 3 種の HEV の燃費改善率

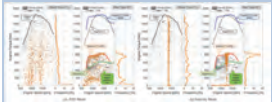


Figure 6-13 従来 HEV と新方式 HEV のエンジン効率

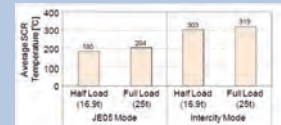


Figure 6-14 種々の条件下での新方式 HEV の SCR の平均温度

Table 6-3 現行車と新モデル車の仕様概要

	Current Model	New Model	
Engine	Model	J08E-1M	A05C-K1
	Type	6-cylinder inline	4-cylinder inline
	Displacement [L]	7.684	5.123
	Max Power [kW/rpm]	206/2500	184/2300
	Max Torque [Nm/rpm]	853/1200	834/1400
Transmission	MT(5speed)	AMT(6speed)	
Differential Gear Ratio	4.875	5.857	
Tire Size	275/70R22.5	—	

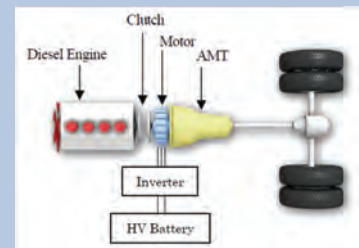


Figure 6-15 新モデルのパワートレイン

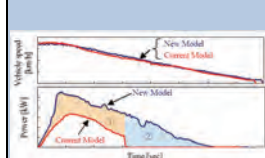


Figure 6-16 減速時の回生電力の比較

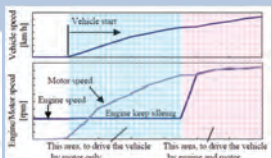


Figure 6-17 新モデルの加速時のエンジンとモータの挙動

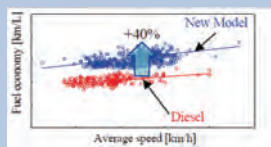


Figure 6-18 モニタ試験による燃費改善度の確認

このシステムはステータの回転磁界とロータに非同期成分が大きいので、磁石に高保持力磁石が要求される一方、磁石による渦電流対策が必須になるなど難点が多い。久保田らはロータへの磁束の非同期成分をロータの界磁エネルギーに利用する磁石フリーの巻き線型モータを提案してきた⁶⁻⁷⁾が、永久磁石による渦電流損を回避出来るこの技術を磁気ギヤモータに応用した。

図 6-20 に示す 8 極のステータ(コイルとしては 48 セグメント)、16 極のロータ、12 極の磁気変調子による原理検証機を試作し、電磁界解析によって HEV システムへの利用可能性確認のための基礎的な特性を明らかにしている。

図 6-21 は、ソリッドロータのみを内包した 8 極の分布巻きステータで発生する磁束密度分布とギャップ磁束の調波解析結果で、基本的には正弦波に近いことが分かる。図 6-22 は、これに 12 極のモジュレータを挿入したギヤモータの結果で、モジュレータの効果で 4 次と 8 次成分が顕著となっており、この 8 次成分にロータが同期することでロータが駆動される。ロータと同期せずに渦電流損を生む 4 次成分でロータ上の誘導コイル(i coil)によって発電し、これを界磁コイル(f coil)に給電する。逆位相の i coil 群を、ダイオードを介して並列接続することにより全波整流した誘導電流を得るが、f coil にも 4 次成分が誘起されるため、i coil と同相の f coil と逆相の f coil を i coil 群と直列に接続することでリップルの少ない界磁電流を実現可能としている。

2 軸の回転数とステータ磁界の回転数には図 6-23 の共線図に示す関係があり、動力分割型 HEV システムと同様の動作が可能である。ただ、遊星歯車によるシステムが機械動力として直接駆動軸に伝達されるパスがあるのに対して、本システムにはこのパスがない点が本質的な差で、機械分がないだけ、モータのトルクの大きさが重要な指標の一つとなる。図 6-24 は、エンジン最大回転数 5000rpm、ステータ可変周波数範囲 600Hz 以下の条件下で、各変調子速度に対して差分周波数が最大になる励磁周波数とエンジン回転数の動作点を示している。この条件で電磁界解析によって求めた変調子回転速度に対する変調子トルクと差分周波数を図 6-25 に示す。図 6-26 に示すこれに対応する各軸の出力の関係から、車速(変調子速度)が低い範囲ではエンジン出力が変調子とステータに分割される(ステータで回生)モードとなり、車速が高い範囲ではエンジンとステータの出力が合成されることが分かる。

その他の技術的に注目すべきトレンドについて、紙面の関係からその概要のみを述べる。島本らは、量産 EV 用の、材料開発から再検討したバッテリーの高容量化について紹介した⁶⁻⁸⁾。高容量化のために増加した電極の積層枚数の影響を、モジュール構造等を工夫して既存の電池パックへの搭載を可能にしている。電池の容量そのものは 20%の容量アップであるが、電池の性能が改善されたことと検出器の精度を向上させたことによって電池状態の管理の確実度が増したため、不確かさによって執らざるをえなかったマージンを低減できることによって実質的に数%の利用可能容量を確保している。電池パックの改善によって、一充電距離を 228km から 280km に向上できた。

EV 用等の電池パックのほとんどは電池パック外からの空気で直接電池を冷却する空冷式で、乗用車では温度が常温に保たれる可能性が高い客室の空気を利用している。そのため、ダストや湿気の進入可能性に加えて車室内での送風音や送風ダクトのスペースなどの問題がある。さらに、送風音や消費電力の低減目的の風量可変制御などが製作時の工数増加や不均一な冷却を生む欠点の問題視されている。井上らは、図 6-27 に示す密閉型電池パックによってこれらの課題を解決する提案をおこなった⁶⁻⁹⁾。パック内外を筐体で仕切り、内部に循環用ファンと必要な要素を取り込んだスタンドアロン機で、セル間の冷却風流路の小断面化による高速冷却風によってセル冷却の均一化を実現し、セル上下の空間の体積を大きくすることでセル間温度ばらつきの低減を図っている。(清水)

【参考文献】

- 6-1) 増田敦, 町田耕一, 津曲一郎, 佐藤信也, 土田典裕, 古川卓俊, 濱口孝一: 大型トラック用ハイブリッドシステムの実車評価, 自動車技術会 2015 年秋季学術講演会講演予稿集, No. 20156063
- 6-2) 肥喜里邦彦, 浅海靖夫, 宮田達司, 小川博, 小林雅行, 奥井伸宣: 電動過給機を用いた大型ハイブリッドトラックの走行燃費改善, 自動車技術会 2015 年秋季学術講演会講演予稿集, No. 20156062
- 6-3) 奥井伸宣, 小林雅行: 新方式ハイブリッドシステム搭載大型ハイブリッドトラックの燃費改

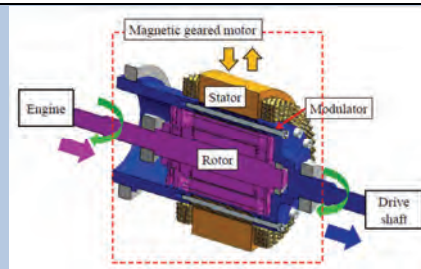


Figure 6-19 HEV用磁気ギヤモータ

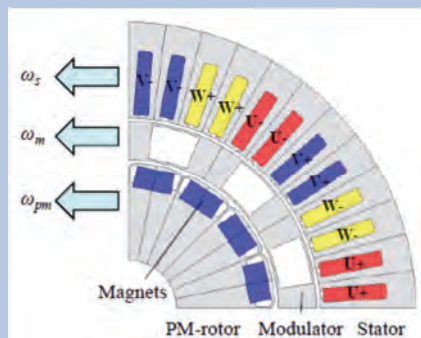


Figure 6-20 一般的な磁気ギヤモータの断面図

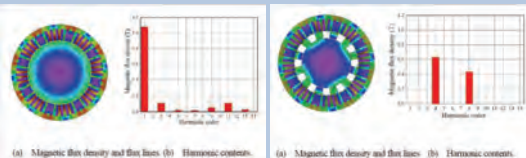


Figure 6-21 磁束密度分布と調波解析結果(モジュレータ無し)

Figure 6-22 磁束密度分布と調波解析結果(モジュレータあり)

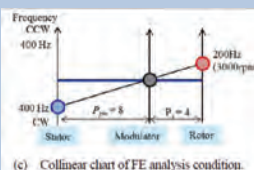


Figure 6-23 磁気ギヤモータの共線図

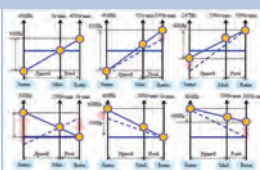


Figure 6-24 差分周波数が最大となる固定子とエンジン回転数の関係

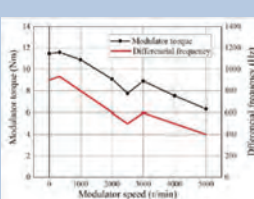


Figure 6-25 変調子回転数に対する変調子トルクと差分周波数の最大値

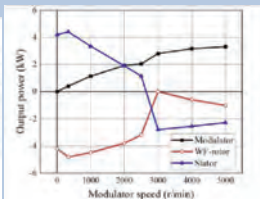


Figure 6-26 各軸出力の最大値の関係

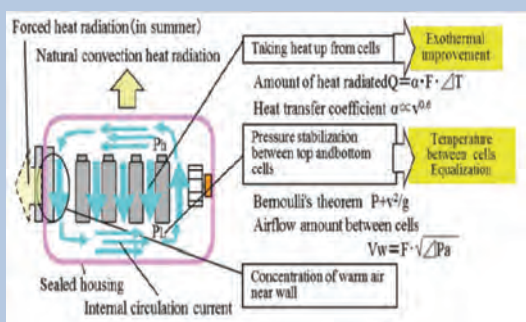


Figure 6-27 密閉型電池パックの概念図

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 6 No. 2 2016

善検証, 自動車技術会 2015 年秋季学術講演会講演予稿集, No. 20156064

6-4) 「自動車技術会 2015 春季大会」, Engine Review, Vol. 5, No. 1, p 10

注)内容は以下の解説:Gregor Wagner, Helmut Kastler, Gernot Hasenbichler, Arno Huss, Herwig Ofner, Heimo Schreier, Helmut Theissl: Mild Hybrid Systems for Long Haul Truck Applications, 自動車技術会 2015 年春季学術講演会講演予稿集, No. 20155261

6-5) 植村智史, 澤山昭, 大島淳, 大崎敏明, 奥野秀樹: 新型路線ハイブリッドバスの開発, 自動車技術会 2015 年秋季学術講演会講演予稿集, No. 20156061

6-6) 久保田芳永, 青山真大, 野口季彦: HEV 用磁石フリー磁気ギヤモータの提案, 自動車技術会 2015 年秋季学術講演会講演予稿集, No. 20156282

6-7) 「自動車技術会 2015 春季大会」Engine Review, Vol. 5, No. 1, p 9

注)内容は以下の解説: 鄧家寧, 青山真大, 田村卓也, 野口季彦: 空間高調波を利用した補極付ラジアルエアギャップ形磁石フリーモータの実機運転特性, 自動車技術会 2015 年春季学術講演会前刷集 No. 20155162

6-8) 島本卓弥, 福沢達弘, 酒井健一, 枚田典彦, 渡邊康晴: 電気自動車用新型大容量リチウムイオンバッテリーシステムの開発, 自動車技術会 2015 年秋季学術講演会講演予稿集, No. 20156146

6-9) 井上美光, 山本啓善: 密閉式電池パックの冷却技術についての基礎研究, 自動車技術会 2015 年秋季学術講演会講演予稿集, No. 20156148

第 26 回内燃機関シンポジウム

26th Internal Combustion Engine Symposium

開催：2015 年 12 月 8～10 日

場所：京都テルサ（京都市）

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

小酒 英範, 下田 正敏, 野口 勝三（編集委員）

佐藤 進（東京工業大学）, 川野 大輔（交通安全環境研究所）, 小笹 俊博（大阪電気通信大学）

Hidenori KOSAKA, Masatoshi SHIMODA, Katsumi NOGUCHI (JSAE ER Editorial Committee)

Susumu SATO (Tokyo University of Technology), Daisuke KAWANO (National Traffic Safety and Environment Laboratory),

Toshihiro OZASA (Osaka Electro-Communication University)

1 CI 機関 (1)

同志社大・福地らは「急速圧縮膨張装置を用いたディーゼル機関における後燃えの原因究明」と題して講演を行った。¹⁾¹⁾本研究では燃焼噴射終了後に燃焼が長期間続く後燃えを短縮することで急速燃焼を実現し当容度を向上するため、現在は後燃えの原因究明を目的としている。図 1-1 に示すように後燃えの定義は、燃料噴射終了後から熱発生率が初めて 0 に達した時期までとした。急速圧縮膨張装置 (RCEM) の諸元を表 1-1 に、実験条件を表 1-2 に示す。本実験では混合気の時空間的配置を把握するため非燃焼場において図 1-2 に示す光学系により噴霧をシャドウグラフ法により撮影し、燃焼過程を把握するため図 1-3 に示す光学系により噴霧の OH ラジカルおよび輝炎の同時撮影を行った。燃焼領域の流動状態を把握するため、輝炎の高速度撮影画像を用いた PIV 解析を実施した。以下に結果を示す。

・後燃え期間と発熱量

図 1-4 に燃料噴射開始 0deg.ATDC の条件における各燃料噴射圧の熱発生率履歴および燃焼の経過を示す。燃料噴射終了後 4.11~6.56deg.の後燃えが生じており、噴射圧力の増加に伴い後燃え期間が短縮しているのが分かる。図 1-5 に後燃え期間および後燃えにおける発熱量の相関図を示す。図 1-5 の噴射時期の違いに注目すると、全体的には後燃えにおける発熱量が減少した場合、後燃え期間が短縮される傾向がある。図 1-6 の噴射時期違いの非燃焼時のシャドウグラフを比較すると、噴射時期 -10deg.ATDC の条件では噴霧角および噴霧先端到達距離が大きく燃料噴射期間中の燃焼率が向上していると考えられる。一方、図 1-5 において噴射圧力の違いに着目すると、後燃えにおける発熱量が同程度の条件においても噴射圧力の増加に伴い後燃え期間が短縮されている。これらのことから、後燃え期間の短縮には燃料噴射期間中、燃料噴射終了後の双方の燃焼の促進が重要であると考えられる。図 1-7 に OH ラジカル、図 1-8 に非燃焼時のシャドウグラフを示す。図 1-8 より後燃えは燃焼室下部で終了している。図 1-7 よりこの時の混合気形状は噴射圧の増加に伴い、壁面に衝突した混合気が広範囲に拡散していることが分かる。このような混合気形状の差異が後燃えに影響を及ぼしていると考えられる。

・混合気形態が後燃えに与える影響

図 1-6 より後燃えは燃焼室下部で進行しており、燃焼室下部において燃料および雰囲気気体の混合が悪化していることが考えられる。そこで図 1-9 に壁面衝突前後における輝炎の PIV 解析画像を示す。9-(A)に示す火炎外周部は大規模な渦がみられ噴霧軸方向の流速が遅い。画像にも見られるような枝状構造を形成し、噴霧火炎内部にも雰囲気気体を取り込むことで混合が促進し、壁面衝突前に輝炎が消失しており、後燃えに対する寄与度は小さい。一方、図 9-(B)に示す火炎中心部噴霧軸方向の流速は早く燃料濃度が高濃度であるため、燃焼が継続した状態で壁面に衝突し、巻き上げ現象により側面上方に広がりがながら（領域 C）燃焼が進行する。図 9-(C)に示す側面上方に

Fuel injection system		Direct injection
Bore x stroke	[mm]	100 x 450
Inlet gas temperature	[K]	353
Equivalent crank speed	[rpm]	2500
Compression ratio	[-]	11.0-16.0

Test fuel		JIS #2 diesel fuel
Injection pressure	P_i [MPa]	40, 60, 80
Injection timing	θ_{inj} [deg.ATDC]	-10, -5, 0, 5
Injection heat quantity	[J/cycle]	372
Injection nozzle configuration	[mm]	0.10
Injection equipment		Common-rail type
Compression ratio	[-]	16.0

Figure 1-1 後燃えの定義

Figure 1-2 シャドウグラフの撮影用光学系

Figure 1-3 OH ラジカルと輝炎撮影用光学系

Figure 1-4 熱発生率と燃焼過程 (噴射時期 0deg.ATDC)

Figure 1-5 後燃え期間と後燃えにおける発熱量の相関

Figure 1-6 シャドウグラフの画像 (噴射圧 80MPa)

Figure 1-7 OH ラジカル画像 (噴射時期 0deg.ATDC)

Figure 1-8 シャドウグラフ画像 (噴射時期 0deg.ATDC)

広がった噴霧火炎は壁面衝突により運動量が減少して速度が低下しており、霧困気体との混合が悪化した状態が継続している可能性があると考えられる。図 1-7 より OH ラジカルについても壁面衝突後、側面に広がっており、OH ラジカルの発光が長時間継続している領域と図-9 に示す領域(C)が一致していることから、長期間にわたる後燃えを引き起こしている領域が壁面衝突後に側面に広がり滞留している領域であることが分かる。

以上のことから、噴霧火炎内部の局所的に高濃度な領域が壁面衝突後に運動量を失い、滞留することで霧困気体と混合が悪化することが後燃えの原因の一つであると結論付けている。

RCEM の自由噴霧の 1 噴口ノズルの場であるが、適切な解析手法を用い説得力のある推論を積み重ねている。実際の後燃え燃焼を論じるためには更に、燃焼室形状と寸法、壁温、キャビティ内スワール、剛体渦、スキッシュ、逆スキッシュ、噴射の後たれなど考慮すべき項目が多くどのような対策が高圧噴射以外に提案されるか大いに期待したい。この場のような燃焼室壁への衝突以後が主になる燃焼は、筆者は NA エンジンの燃焼で経験したが効果の大きかった項目は、高圧噴射、スキッシュの強化、キャビティ内二次流れによる剛体渦の崩壊などであったと記憶している。(下田)

【参考文献】

1-1) 福地翔一, 増田裕之, 村松恵理子, 千田二郎: 急速圧縮膨張装置を用いたディーゼル機関における後燃えの原因究明, 第 26 回内燃機関シンポジウム, 20158073

2 噴霧 (1)~(3)

文ら²⁻¹⁾は、「超短 X 線パルスを用いた高速撮影によるガソリン直噴用多噴孔ノズル内部流の詳細解析」と題し、ガソリン直噴用ノズルにおける内部流と噴口近傍噴霧を X 線透過高速撮影により観察した結果を報告した。ガソリン直噴インジェクタの針弁リフトは 0.1 mm 以下と小さいため、リフトの運動がノズル内流動に与える影響が大きく、その結果、特に微小噴射量における噴霧特性の安定化が課題となっている。彼らは、ノズル内部流と噴霧特性の関係を調べるために、超短 X 線パルスを用いた高速撮影を行った。燃料噴射圧力を 4~20MPa の範囲で変化させ、また、噴口のサック部に対する角度を変化させて撮影を行い、これらが内部流と噴霧特性に与える影響を調べた(図 2-1)。その結果、噴射前にすでにノズルサック内には燃料と気泡が存在し、これが噴射初期の噴霧構造に影響すること、ノズルシート部から噴口へ流入する流れとサック部から噴口内へ流入する流れの干渉が噴霧の広がり角や微粒化に影響を与えることなどを指摘している。噴霧特性とノズル内部流の関係は、ノズル設計上大きな課題の一つであり、研究意義は高い。しかしながら、今回の報告では、内部流と噴霧特性の関係について定性的な観察と推論にとどまり、今後の進展を期待したい。

Dong ら²⁻²⁾は、「Flow/Cavitation Behaviors in D.I. Diesel Nozzles and Their Effects on Spray Formation Processes」と題し、ディーゼル燃料噴射ノズル内部流と噴霧特性の関係を CFD によるノズル内部流解析と、散乱光法による噴霧観察により調べた結果について報告した。AVL-FIRE を用いて鉛直下向単孔ノズルと多噴孔ノズルの内部流を数値解析し、キャビテーションの発生等を比較している。噴霧については、数値解析と同仕様の 2 種類のノズルを用いて、定容容器内に実現した噴霧を散乱光法により高速撮影し、先端到達距離や噴霧広がり角などの噴霧特性を調べている。単孔ノズルと多孔ノズルでは内部流動が異なり、ノズル内部のキャビテーションの発生状況が異なること(図 2-2)、多孔ノズルは単孔ノズルに比べ、噴射初期のサック内圧力の上昇が遅く、その結果、先端到達距離は単孔に比べ短く、噴霧広がり角は大きくなることなどを示した(図 2-3)。ノズル内部流と噴霧構造の関係に関する考察は途上であり、一般化された結論には至っていない。前述のように本課題はノズルの開発・設計において重要課題であり、今後の進展を期待したい。

Dittapoom ら²⁻³⁾は、「Analysis of Diesel Spray Characteristics at High Pressure Conditions」と題し、高密度下のディーゼル噴霧について、広範な霧困気温度、圧力下で噴口近傍部の噴霧を拡大高速撮影し、霧困気温度と圧力が噴霧広がり角度に与える影響を調査した結果について報告した。急速圧縮装置を用いて、霧困気温度と圧力が燃料の臨界状態を超える条件下まで噴霧の可視化を実施している。独自の光学系により噴霧の影写真と散乱光写真を同時に高速撮影し(図 2-4)比較している。得られた結果から、霧困気密度の増加に対し、噴霧の

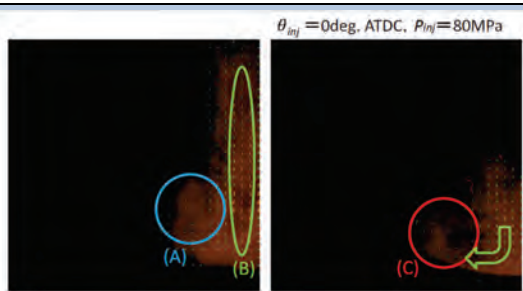


Figure 1-9 壁面衝突の前後における輝炎の PIV 解析画像 (噴射時期 0deg.ATDC 噴射圧 80MPa)

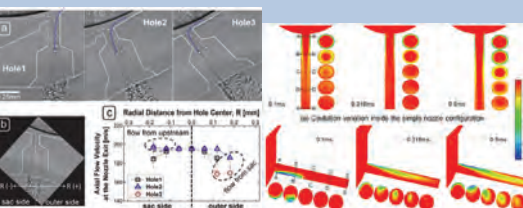


Figure 2-1 噴口角度がノズル内部流と噴霧に与える影響の X 線観察画像

Figure 2-2 数値解析による単孔ノズルと多孔ノズル内流動とキャビテーションの比較

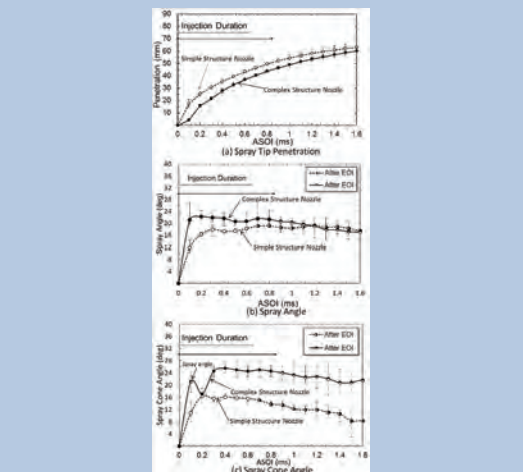


Figure 2-3 単孔ノズルと多孔ノズルの噴霧特性の比較 (計測)

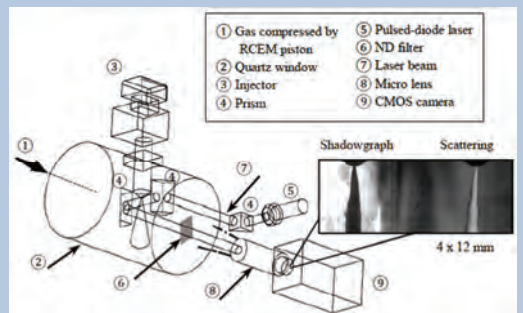


Figure 2-4 噴霧の散乱光画像と影写真の同時高速撮影光学系

影写真と散乱光写真の噴霧広がり角は増加すること、影写真の噴霧角は散乱光写真の噴霧角よりも大きいこと、低密度下では、噴口において定義されるウェーバー数に対し散乱光写真の噴霧広がり角の感度が高いが、高密度下では感度が低くなることなどが示された(図 2-5)。以上の結果は、高密度下では、噴霧の微粒化が噴霧の拡散に与える影響が低下することを示唆しており、燃料の超臨界条件下での新たな燃料拡散モデルの作成が必要となる可能性を示している。ただし、撮影の空間分解能が燃料の相変化をとらえるには不十分との指摘もあり、今後の詳細な調査が期待される。

田代ら²⁻⁴⁾は、「ポスト噴射雰囲気条件におけるディーゼル噴霧のシリンダ壁面付着特性」と題し、DPF 再生のためのポスト噴射におけるシリンダ壁面への燃料付着の課題に対し、定容容器を用いて、壁面衝突噴霧の壁面燃料付着量計測と噴霧観察を同時に行った結果について報告した。噴霧観察は影写真と散乱光写真を同時に撮影し、気液 2 相の可視化を行っている。ディーゼルエンジンで 30, 60, 90°CATDC 相当の温度と密度を定容容器にて実現し、非燃焼噴霧を対象に調査している。壁面付着量は電子天秤で計測している。得られた結果から、雰囲気密度を一定に保ち雰囲気温度を増加する(実機にて負荷を増加することに相当)と、噴霧の液相部長さは変化しない(図 2-6)が、燃料の壁面付着量は減少する(図 2-7)こと、雰囲気温度一定の下で雰囲気密度を増加する(実機にて過給圧を増加することに相当)と、噴霧液相部長さと壁面付着量はともに減少すること(図 2-8, 図 2-9)などを示している。

小立ら²⁻⁵⁾は、「平板に衝突する燃料噴霧の液膜付着と混合気形成」と題し、直噴ガソリンエンジンにおいて、粒子状物質排出の原因と考えられている噴霧壁面衝突について、定容容器を用いて壁面衝突噴霧の燃料壁面付着量を計測している。衝突平板にスリガラスを用い、燃料付着により、スリガラス表面における光の散乱低減効果を利用した屈折率マッチング法により燃料の壁面付着量を計測している。また、2波長レーザ吸収散乱法により噴霧の気液 2 相濃度計測を実施している。得られた結果より、大気圧下では燃料噴射圧力の増加に伴い、壁面付着液膜厚が増加するが、0.5MPa 雰囲気下では、噴射圧力の増加により液膜厚さが減少することなどを示している(図 2-10, 図 2-11)。屈折率マッチング法による液膜計測については、用いている較正手法に誤差要因を含むと思われる、定量計測手法としてはさらに検討を進める必要があると感じた。(小酒)

【参考文献】

- 2-1) 文石洙, Jin Wang, 君島隆浩, 有馬敏幸, 前田義男, 超短 X 線パルス用いた高速撮影によるガソリン直噴用多噴孔ノズル内部流の詳細解析, 第 26 回内燃機関シンポジウム講演論文集, 20158085
- 2-2) Pengbo Dong, Takuya Inaba, Keiya Nishida, Youichi Ogata, Daisuke Shimo, Makoto Namba, Flow/Cavitation Behaviors in D.I. Diesel Nozzles and Their Effects on Spray Formation Processes, 第 26 回内燃機関シンポジウム講演論文集, 20158088
- 2-3) Dittapoom Shinabuth, Susumu Sato, Hidenori Kosaka, Analysis of Diesel Spray Characteristics at High Pressure Conditions, 第 26 回内燃機関シンポジウム講演論文集, 20158097
- 2-4) 田代航太, 沼田睦, 謝溥慶, 柴田元, 小川英之, ポスト噴射雰囲気条件におけるディーゼル噴霧のシリンダ壁面付着特性, 第 26 回内燃機関シンポジウム講演論文集, 20158074
- 2-5) 小立俊己, 朴啓太, 西田恵哉, 尾形陽一, 張武, 藤川竜也, 平板に衝突する燃料噴霧の液膜付着と混合気形成, 第 26 回内燃機関シンポジウム講演論文集, 20158066

3 冷却・伝熱

本セッションでは、エンジンの冷却損失に関する 4 件の発表がなされた。最初の発表は、これまでのディーゼル機関における壁面熱伝達研究に関するレビューであり、ここで提示された今取り組むべき課題について、残りの 3 件の発表が現時点での回答を述べるような構成になり、セッション全体を通して活発な議論が展開された。

まず、神本と内田³⁻¹⁾により「ディーゼル機関の熱損失について」と題し、これまでのディーゼル機関における熱損失研究のレビューがなされた。前半は、急速圧縮装置や単気筒エンジンの燃焼室に熱流束センサを設置し、様々な条件と測定位置で熱流束を計測した結果の概要が説明され、直噴ディーゼルエンジンにおける壁面熱損失の時間変化が、熱発生率と同様の形

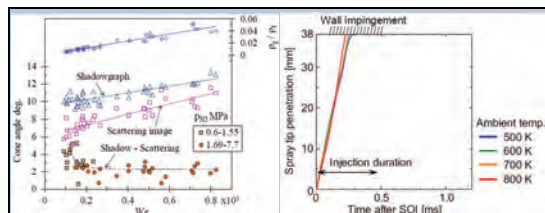


Figure 2-5 噴霧広がり角に与えるウェーバー数と雰囲気密度の影響

Figure 2-6 雰囲気密度一定の下で雰囲気温度を変化させた場合の液相部長さの時間変化

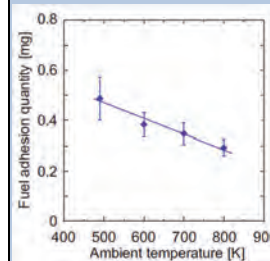


Figure 2-7 雰囲気密度一定の下で雰囲気温度を変化させた場合の燃料壁面付着量の変化

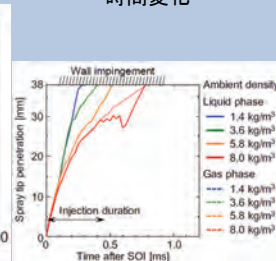


Figure 2-8 雰囲気密度一定の下で雰囲気密度を変化させた場合の噴霧到達距離の時間変化

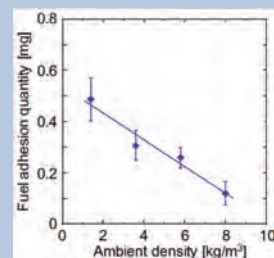


Figure 2-9 雰囲気温度一定の下で雰囲気密度を変化させた場合の燃料壁面付着量の変化

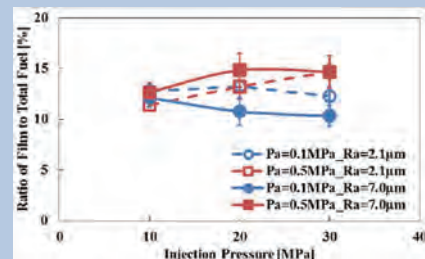


Figure 2-10 燃料噴射圧力、雰囲気圧力、壁面表面粗さが燃料壁面付着量に与える影響

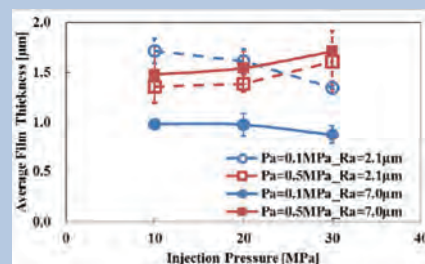


Figure 2-11 燃料噴射圧力、雰囲気圧力、壁面表面粗さが燃料液膜厚さに与える影響

状を有しその値は熱発生率の 10%程度であること(図 3-1)、噴霧衝突位置における局所熱流束は燃料噴射速度の 0.8 乗に比例し、これは定常乱流壁面熱伝達現象と同様であること(図 3-2)などが示された。さらに、燃焼室形状に影響される筒内流動が、燃焼室各所の局所熱流束に強く影響するため、機関熱損失を評価するためには、燃焼室内の流動場と高温領域分布の両者を把握することが必要であると述べている。講演の後半では、単気筒試験エンジンを用いた、エネルギーバランス解析により冷却損失を評価した結果について説明された。EGR と 2 段燃料噴射組み合わせにより冷却損失を 40%低減できること(図 3-3)が示された。また、壁面遮熱化が熱伝達に与える影響については、消炎距離の変化、壁面に接する気体の粘度上昇が乱流に与える影響、などのミクロスケールにおける現象の解明が必要であることが提示され、高精度なセンサを用いた最新ディーゼル機関における局所熱流束計測の重要性が示された。

石井ら³⁻²⁾は、「燃焼室表面の瞬時温度計測法に関する研究」と題し、燃焼室内壁面瞬時温度計測センサを、スパッタリング法により燃焼室壁面に薄膜熱電対を製膜することで製作し、これを急速圧縮装置内のディーゼル噴霧に適用した結果について報告した。熱電対素材の金属薄膜を電氣的に絶縁するための SiO₂ 膜が温度計測に与える影響を実験と数値解析により評価し、熱接点部のみ、絶縁膜を形成しない新たな瞬時壁面温度センサを開発した(図 3-4)。急速圧縮装置内のディーゼル燃焼に本センサを適用し得られた瞬時壁面温度の時間変化計測値を用いて、1 次元熱伝導を仮定した解析により瞬時壁面熱流束を求めている(図 3-5)。今後の高精度熱流束センサへの展開が期待される。

窪山ら³⁻³⁾は、「ディーゼル機関の壁面熱伝達率の推算方法の提案」と題し、急速圧縮膨張装置の燃焼室に薄膜型瞬時熱流束計を設置し、直噴ディーゼル燃焼におけるピストンキャビティ内壁面熱流束を計測した結果と、得られた結果を用いてレイノルズ数とヌセルト数の関係について解析した結果について報告した。壁面瞬時熱流束はピストンキャビティ内の 23 か所で計測し、燃焼場に加え、雰囲気窒素を用いた非燃焼蒸気噴霧を対象とした計測も実施している。図 3-6 は、計測された壁面瞬時熱流束と 2 領域モデルにより計算された既燃ガス温度により算出した局所壁面熱伝達係数の時間変化である。これより既燃ガスが壁面に到達した場合には、キャビティ内いずれの場所においても、局所熱伝達係数は同程度の値を示すことが示された。図 3-7 は計測された局所熱伝達係数から求めたヌセルト数と、レイノルズ数との関係を示す。レイノルズ数における代表速度については、燃料噴射期間中は、準定常運動量理論から算出される壁面衝突時の噴流速度を用い、それ以外の時間では、Woschni の熱伝達率式中の速度項を用いている。この図から、ヌセルト数は、レイノルズ数の 0.8 乗に比例しており、直噴ディーゼル機関における熱伝達に、定常壁面乱流の理論が適用できることを示唆している。

原田ら³⁻⁴⁾は、「急速圧縮膨張場における高応答遮熱壁面が壁面熱伝達機構に及ぼす影響」と題し、燃焼室内に熱拡散率の低い薄膜遮熱層を施し燃焼期間中の壁面温度を上昇させ冷却損失を低減させる手法について、その低減効果機構を解明するため、急速圧縮膨張装置により形成した乱流場を対象に、壁面熱流束と壁面近傍の流速分布を計測した結果について報告した。図 3-8 に示す副室を急速圧縮膨張装置に接続し、旋回流を発生させ、薄膜積層熱電対により壁面瞬時温度を計測し熱流束を求めている。さらに同位置において μ PIV により壁面境界層内部の速度分布を計測している。通常金属壁に対する遮熱壁面の局所熱伝達率の低減率を時間に対してプロットした図 3-9 をみると、遮熱化により圧縮・膨張行程全体で局所熱伝達係数が減少するが、特に膨張行程中で減少率が大きい。図 3-10 に膨張行程中の 1 時刻における乱流エネルギー分布を示す。壁面遮熱により壁面近傍の乱流エネルギーが低下しており、これが壁面境界層の厚さを増加させ熱伝達係数が減少したと推定している。この研究では強い旋回流が存在する場での計測であり、特に火花点火エンジンのように上死点付近で縦渦が崩壊するような場合に、今回の得られた知見がそのまま適用できるが疑問が残るが、エンジン相当の雰囲気条件下で壁面境界層内の流動場と熱流束を同時計測した稀有な例であり、今後、よりエンジン内の流動場に近い計測へ展開することが期待される。(小酒)

【参考文献】

- 3-1) 神本武征, 内田登, ディーゼル機関の熱損失について, 第 26 回内燃機関シンポジウム講演論文集, 20158090
- 3-2) 石井大二郎, 三原雄司, 佐藤進, 小酒英範, 燃焼室表面の瞬時温度計測法に関する研

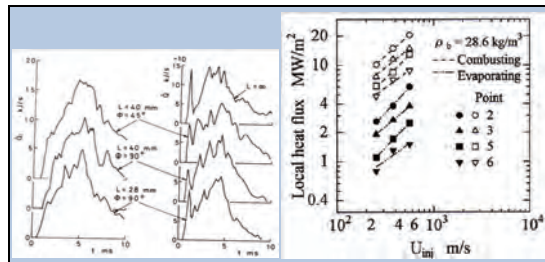


Figure 3-1 壁面衝突ディーゼル燃焼における壁面熱流束と熱発生率の比較

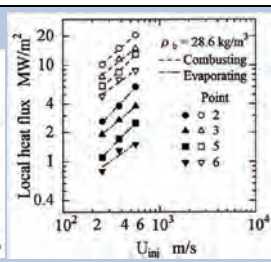


Figure 3-2 局所熱流束に与える噴射速度の影響

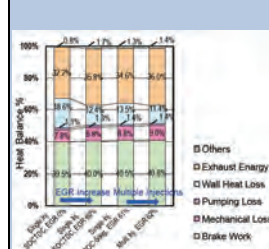


Figure 3-3 EGR と多段噴射による冷却損失低減効果

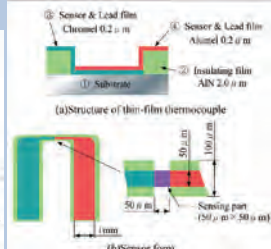


Figure 3-4 薄膜型熱電対による冷却損失低減効果の構造

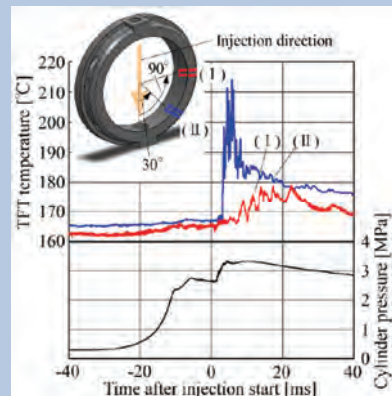


Figure 3-5 瞬時壁面温度と筒内圧力の時間変化

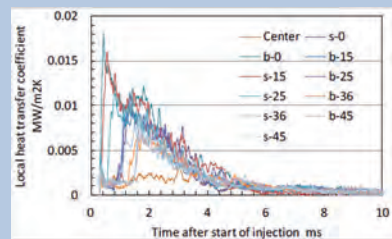


Figure 3-6 局所熱伝達係数の時間変化



Figure 3-7 ヌセルト数とレイノルズ数の比較

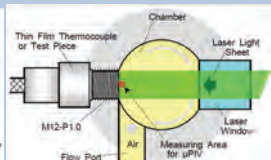


Figure 3-8 壁面熱流束と壁面流れの同時計測システム概要

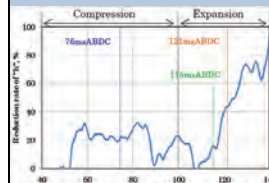


Figure 3-9 局所熱伝達係数の低減率の時間変化

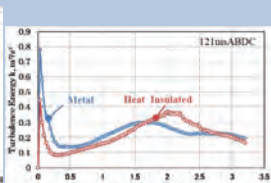


Figure 3-10 ヌセルト数とレイノルズ数の比較

究, 第 26 回内燃機関シンポジウム講演論文集, 20158078

3-3) 窪山達也, 森吉泰生, 小酒 英範, ディーゼル機関の壁面熱伝達率の推算方法の提案, 第 26 回内燃機関シンポジウム講演論文集, 20158080

3-4) 原田雄司, 田中達也, 山下洋幸, 山本寿英, 急速圧縮膨張場における高応答遮熱壁面が壁面熱伝達機構に及ぼす影響, 第 26 回内燃機関シンポジウム講演論文集, 20158064

4 SI 機関 (1)(2)

今回のシンポジウムの中で, SI 機関として四つのセッションあり, SI 機関(1)のセッションと SI 機関(2)のセッションでは, 共に 3 件の講演が行われた。両セッションでは, SIP によって実施された研究, 希薄燃焼に関する発表が多く見受けられ, その中から 1 件の講演について紹介する。

井関(東京大学)らは, 「電気火花点火におけるプロパン-空気希薄予混合気の点火特性」⁴⁻¹⁾と題して講演を行った。本研究は, 希薄条件での点火特性の解明を目標とし, 大気圧と高圧(10 気圧)の条件で, 火花点火によるプロパン空気予混合気の点火実験を行っている。また加えて, 対向電極の間隔を変化させた場合の影響についても調査している。図 4-1 に実験装置の概略図を示す。希薄点火限界に注目するため, 当量比は $\phi=0.54\sim 0.62$ の範囲とし, 点火装置については点火コイルを増強し, 高エネルギー投入を可能としている。また火花放電によって生じた火炎核の成長を観察するため, シュリーレン法によって撮影を行っている。図 4-2, 図 4-3 にそれぞれ電極間距離 2mm と 5mm での圧力 0.1MPa における実験結果を示す。電極間距離 2mm の最小点火エネルギーは, 5mm の場合と比較して 20mJ 程度高い結果となっている。図 4-4 に圧力 1.0MPa, 電極間距離 2mm における実験結果を示す。希薄点火限界は, 0.1MPa では当量比 0.54~0.58 の範囲内に存在し, 1.0MPa では当量比 0.54 付近であるという。点火エネルギーについては, 0.1MPa, 1.0MPa 共に当量比が減少するにしたがって, 最小点火エネルギーが上昇している。ただし 1.0MPa の方が放電エネルギーは, 大きな値となっている。これは圧力上昇により放電の電圧閾値が上昇し, 点火初期の容量成分が大幅に増加したためである。また, 最少点火エネルギー付近での点火成否ばらつきも大きくなるのが分かったという。図 4-5 に示すように点火成功したものは, 放電時間が長い, それは初期火炎核が長時間高温に保持される(ラジカルが多く生成される)からだと考えている。また十分な点火エネルギーを有しながらも, 点火に至らなかった原因の一つは, 容量成分が占める割合が大きすぎたことであると推測している。そして最適な容量-誘導成分比が存在するという。図 4-6 に圧力 0.1MPa での火炎核発展の様子を示す。1ms が経過した段階で, 点火失敗の火炎では放電が終了していることに対し, 点火成功の火炎では放電が継続している。0.1MPa においては, 誘導成分が点火エネルギーの多くを占めているため, 1ms 以降に大きなエネルギーが供給されることで, 火炎が大きく成長したと考えている。火炎核成長と放電特性との詳細な関係の解明には, 定量的な火炎断面積の調査が必要であるとしており, 今後の研究に期待したい。(野口)

【参考文献】

4-1) 井関 慎吾, 顧 肖晶, 中谷 辰爾, 津江 光洋: 電気火花点火におけるプロパン-空気希薄予混合気の点火特性, 第 26 回内燃機関シンポジウム講演論文集, 講演番号 27(2015) 20158076

5 ガス機関

田中ら⁵⁻¹⁾は, 水蒸気改質による天然ガスのメタン価向上効果を理論的に明らかにすることを目的とし, H_2 , CO_2 を含んだ CH_4 ベース燃料の組成の変化に対する耐ノッキング性の変化を調査している。 CH_4 を主成分, H_2 および CO_2 を副成分とする三成分燃料を用いて実機運転を行い, 組成の変化に対する燃焼特性とノッキング強度の変化を調査した。加えて, 実験と同様の燃料/空気混合気について層流燃焼速度および着火遅れ時間を詳細化学反応計算によって求め, 燃料組成に対する耐ノッキング性の変化について考察している。

実験の結果より, 図示熱効率率は CO_2 の体積割合が高いほど高く, H_2 の体積割合が高いほど低い傾向にあること(図 5-1), 平均ノッキング強度は H_2 の体積割合が高いほど高まり, CO_2 の体積割合が高いほど低下すること(図 5-2), 燃焼期間は CO_2 の体積割合が高いほど長く, H_2 の体積割合が高いほど短くなる傾向があり, CH_4 に対し同じ体積割合で H_2 , CO_2 を変化させた場

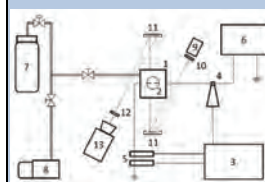


Figure 4-1 実験装置の概略図
1. Combustion chamber, 2. Electrodes, 3. Oscilloscope, 4. High voltage probe, 5. Current probe, 6. Ignition coils and a Battery, 7. Mixture tank, 8. Vacuum pump, 9. Light source, 10. Pin hole, 11. Concave mirrors, 12. Knife edge, 13. High speed camera



Figure 4-2 最小点火エネルギーに対する当量比の影響 (圧力 0.1MPa, 電極間距離 2mm)

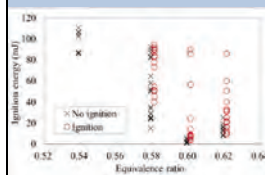


Figure 4-3 最小点火エネルギーに対する当量比の影響 (圧力 1.0MPa, 電極間距離 5mm)

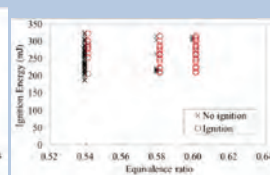


Figure 4-4 最小点火エネルギーに対する当量比の影響 (圧力 0.1MPa, 電極間距離 2mm)

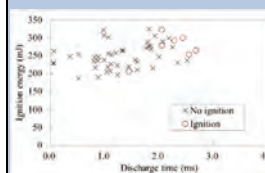


Table 4-5 最小点火エネルギーに対する放電時間の影響

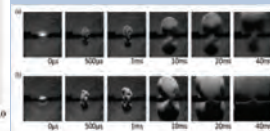


Figure 4-6 火炎核発展の様子(圧力 0.1MPa, 当量比 0.60, 電極間距離 2mm)
(a)点火失敗. 点火エネルギー: 28mJ; 放電時間: 0.82ms
(b)点火成功. 点火エネルギー: 103mJ; 放電時間: 2.93ms

合、燃焼期間は CH₄ の体積割合によらず同等となること(図 5-3)を明らかにしている。特に燃焼期間が変化しないことについて、著者は H₂ および CO₂ の添加による層流燃焼速度の増減効果が打ち消しあうことに起因すると考察している。

耐ノック性の実験においては、実験では当量比を 1.0、点火時期を -17.5 deg. ATDC、1 サイクルあたりの投入熱量を 1.14kJ/cycle に設定し、CH₄、H₂ および CO₂ の体積割合を変化させている。この実験では、平均ノッキング強度が 40±5kPa になるように吸気温度を設定している。図 5-4 は各燃料成分の体積割合に対する設定吸気温度の変化を示しており、設定吸気温度は CO₂ の体積割合が高いほど高く、H₂ の体積割合が高いほど低い。CH₄ に対し、同じ体積割合で H₂、CO₂ を添加した場合、設定吸気温度は 354-358 K とほぼ同等の値となる。詳細化学反応計算を用いた数値解析結果からも、この実験結果と整合した結果が得られている。以上の結果から、H₂ の添加は CH₄ の耐ノック性を低下させ、CO₂ の添加は CH₄ の耐ノック性を改善すること、CH₄ に対し同じ体積割合で H₂、CO₂ を添加した場合、CH₄ の耐ノック性は変化しないことを明らかにしており、これらの耐ノック性は、混合燃料のメタン価で表現できることを述べている。(佐藤)

【参考文献】

5-1) 田中 大樹, 小林 和伸, 佐古 孝弘, 桑原 一成, 川那辺 洋, 石山 拓二, “メタンベース燃料の耐ノック性に対する水素および二酸化炭素添加の影響”, 第 26 回内燃機関シンポジウム講演論文集, JSAE 20158014

6 代替燃料 (1)(2)

代替燃料では、バイオ燃料をはじめとする様々な燃料をディーゼル機関・ガソリン機関に適用し、その基礎的な着火・燃焼特性に加え、カーボンデポジットや排出ガス特性に至るまでの広範囲なフィールドでの研究発表がなされた。その中から、菜種油、分解軽油、フラン類に関する講演 3 件を紹介する。

稗田ら⁶⁻¹⁾は、蒸発特性に劣る菜種油使用時における低負荷時の SOF 排出量を低減するため、Hot EGR を用いて燃料噴射時の筒内温度を上昇させ、菜種油噴霧の蒸発を促進させることを検討した。また、図 6-1 は試験で用いた二つのピストンの燃焼室形状であり、トロイダル型に比べ、リエントラント型では強いスキッシュ流により菜種油噴霧の微粒化・混合を促進させる効果が期待できる。図 6-2 は二つの燃焼室に菜種油・軽油をそれぞれ用いて、Hot EGR および Cooled EGR を適用した際の SOF 排出量を示している。EGR 率の増加(吸気酸素濃度の低下)とともに SOF 排出量が増加するが、リエントラント燃焼室と Hot EGR の適用により SOF 排出量が大幅に低減した。したがって、SOF 排出量の低減には、リエントラント燃焼室により菜種油の微粒化・混合を促進させ、加えて Hot EGR により筒内温度を高めて蒸発を促進させることが効果的であることが確認された。さらに、熱発生履歴から Hot EGR の EGR 率増加による燃焼特性の変化にも言及しており、低負荷の菜種油燃焼では EGR 率の増加により初期燃焼が活性化し、SOF 排出量の低減に寄与していることが示された。日本や欧米諸国では油脂から脂肪酸メチルエステル(FAME)に変換し、ディーゼル車に適用するのが主流であるが、発展途上国では油脂そのものを燃料とする要望が強く、その際に懸念される SOF 排出量やカーボンデポジット増加への対策の一つとして、有効な知見であると思われる。

高木ら⁶⁻²⁾は、低着火性燃料である分解軽油に着目し、その着火性とセタン指数の関係、および着火性改善手法の一つとしてパイロット噴射を挙げ、その効果について検証した。図 6-3 は、噴射圧力を 40, 130 [MPa]としたときの、様々な分解軽油の着火性指標(新セタン指数(現行のセタン指数)、旧セタン指数(以前のセタン指数)、新セタン指標(分子構造を考慮した指数)の三つのセタン指数)と急速圧縮装置を用いた実験により得られた着火遅れの関係を示したものである。各燃料での指数の値は新セタン指数、旧セタン指数、新セタン指標の順で小さくなっており、特に新セタン指数では標準燃料との関係が劣った。この原因を調べるため新セタン指数の各項の感度解析を行った結果、T50 の項を過小評価、T90、密度の項を過大評価していることが分かった。また、図 6-4 ではパイロット噴射による分解軽油の着火促進効果を検証した。噴射圧力 40 [MPa]、温度 800 [K]において、分解軽油ではもっともセタン指数の高いもの以外は着火せず、着火した分解軽油とセタン価 35 の標準燃料を比較してもパイロット噴射による着火改善効果には大きな差があった。これはセタン価とセタン指数が同じでも、着火の有無やパイ

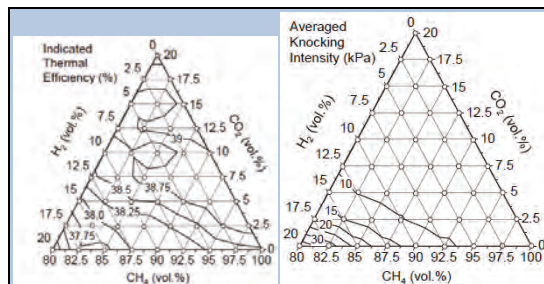


Figure 5-1 Ternary Diagram of Indicated Thermal Efficiency for Ternary-component Fuels

Figure 5-2 Ternary Diagram of Average Knocking Intensity for Ternary-component Fuels

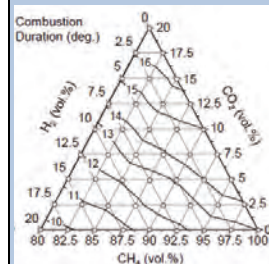


Figure 5-3 Ternary Diagram of Combustion Duration for Ternary-component Fuels

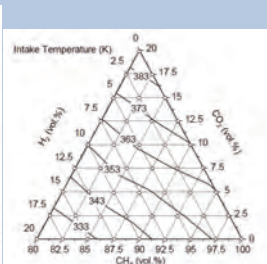


Figure 5-4 Ternary Diagram of Intake Temperature with a Knocking Intensity of 40 kPa for Ternary-component Fuels

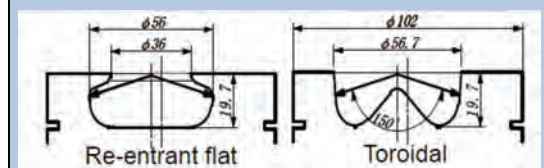


Figure 6-1 2種類の燃焼室形状

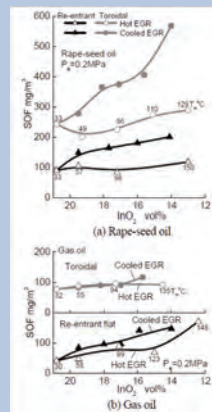


Figure 6-2 吸気酸素濃度と吸気ガス温度、ピストン形状が低負荷における SOF 排出に及ぼす影響

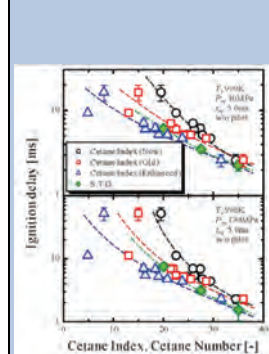


Figure 6-3 着火遅れと着火性指標の関係

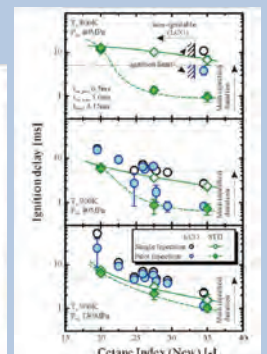


Figure 6-4 着火遅れに対するパイロット噴射の効果

ロット噴射による着火性改善効果に対して差異を生じていることを示している。今後、分解軽油のような低着火性燃料が普及する可能性があり、これらの着火性を正確に評価できる指標の構築に期待したい。

佐藤ら⁶⁻³⁾は、バイオ燃料の一種であり、エネルギー密度、オクタン価ともにガソリンと同等であるフラン類(2,5-ジメチルフラン(DMF), 2-メチルフラン(MF))に着目し、これらの希薄条件における自着火特性を実験・計算双方で解析した。構築した詳細素反応モデルが着火遅れ時間を概ね再現できることを確認した後、図 6-5 に示す DMF, MF, エタノールの反応経路解析を行った。その結果、DMF の主な消費反応が、(1) OH ラジカルや H ラジカル, CH₃ ラジカルが DMF の持つメチル基から H ラジカルを引き抜く反応、(2) 環状構造内の C 原子に OH ラジカルや H ラジカルが付加する反応、(3) H ラジカルが付加することで環状構造が開環する反応、の 3 種類であり、どの燃料でも酸化過程では OH ラジカル H ラジカルが重要であることがわかった。図 6-6 では、PRF90 と DMF, MF およびエタノールそれぞれの混合割合を変化させた場合の着火遅れ時間を解析した。DMF, MF およびエタノールの混合割合の増加に伴い着火遅れ時間が増加し、RON が等しい場合は着火遅れ時間が概ね等しい値になることが分かった。また、詳細素反応モデルで計算した結果は、DMF および MF 混合燃料の実験結果を概ね再現できており、今後、実エンジン燃焼場における着火・燃焼特性のさらなる解明が期待される。(川野)

【参考文献】

- 6-1) 稗田泰文, 寒川翔太, 名田譲, 木戸口善行: 菜種油直噴ディーゼル機関の燃焼と排気に対する EGR の影響, 第 26 回内燃機関シンポジウム講演論文集, 講演番号 97(2015).
- 6-2) 高木正英, 今井康雄: 分解軽油の着火特性に及ぼすパイロット噴射の効果, 第 26 回内燃機関シンポジウム講演論文集, 講演番号 100(2015).
- 6-3) 佐藤康太, 渡邊潤哉, 田中光太郎, 金野満: 希薄条件におけるフラン類の自着火特性, 第 26 回内燃機関シンポジウム講演論文集, 講演番号 103(2015).

7 潤滑 (1)(2)

北嶋ら⁷⁻¹⁾はスピロピラン系フォトクロミック色素を利用し可視化する基礎研究を行い、油膜厚さと流れの同時測定を試みている。平均吸光度と油膜厚さは線形な関係にあり、着色後の退色反応の速度定数と温度の関係がアレニウスの式で表された。図 7-1 は測定装置である。Nd-YAG レーザを照射し着色し、可視化光源として白色 LED ライトを用い、カラー CCD カメラで高速撮影された。図 7-2 のテスト部を観察した結果が図 7-3 である。着色された部分の先端の移動履歴から速度が、平均吸光度から油膜厚さが測定される。油膜厚さ 10 μm に対して 5 μm の測定結果であり、課題が残るが着色時間内の流れの観察には成果があったものと考えられる。

松本ら⁷⁻²⁾はオイル消費量低減を目的とした観察を行った。LIF 撮影によって、ピストンリング合口部からシリンダへのオイル上がりが見えられた。ピストンリング合口の広さとトップリングとセカンドリングの合口の相対角度に対する吸気行程下死点位置のオイル流入の様子と速度が明らかにされた。シリンダへの流入量はスロットル開度に大きく影響されるが、合口が狭くトップリングとセカンドリングの合口部の相対角度が大きいほど少なくなっている。

西島らは⁷⁻³⁾潤滑油消費のメカニズム明らかにする目的で、ピストンのオイルリング下の圧力測定を行った。図 7-4 のようにオイルリングの運動に伴いリング下の油の圧力が変化する。この圧力が運転条件にどの様に影響されるか、クランクケースの圧力とどの程度異なるかを調べるため、非常に低い圧力変化にも対応できる光ファイバー式圧力センサをオイルリング下部に取り付け、圧力が測定された。負荷の変化で圧力が異なること(図 7-5)、同一負荷でもオイル温度(粘度)が変わると圧力が異なることが、クランクケース内圧力をも示して明らかにされた。

エンジンのピストン、ピストンリングの摩擦は重要である。この測定には浮動ライナ法が用いられる。浮動ライナ法によって信頼性の高い測定結果を得るため、三原ら⁷⁻⁴⁾は図 7-6 に示す浮動ライナの構造や図 7-7 の圧縮圧力のシールなどに関する検討を行った。実験装置としては図 7-6 の C、図 7-7 の B の組み合わせで、モータリングと実動負荷(平均有効圧 510kPa)について実験データの再現性などの検討が繰り返され、多くの実験データがまとめられた。クランク角度に対する摩擦の測定例を図 7-8 に示す。ピストン速度の方向が変化する圧縮上死点と吸気上死点の摩擦値の扱いについて今後も検討を要するが、放置期間を伴う何回かの実験に対し

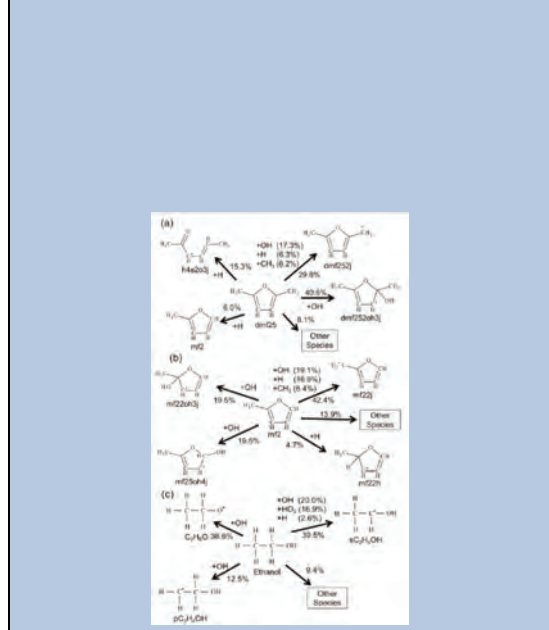


Figure 6-5 DMF, MF, エタノールの反応経路解析

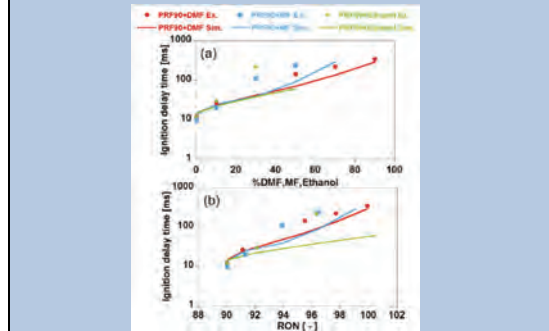


Figure 6-6 PRF90 と DMF, MF およびエタノールそれぞれの混合割合を変化させた場合における着火遅れ時間の解析

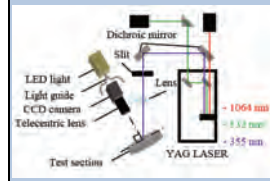


Figure 7-1 実験装置の光学系

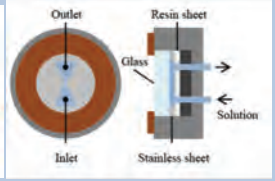


Figure 7-2 油の流れを伴う油膜の測定部

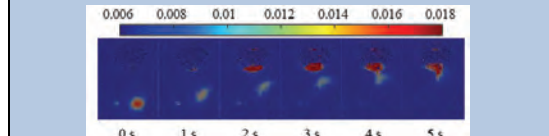


Figure 7-3 吸光を伴うフォトクロミック色素着色部によるオイル流れの観察

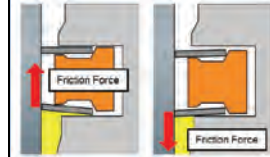


Figure 7-4 オイルリングの運動と油膜

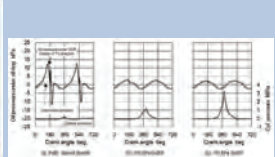


Figure 7-5 オイルリング下の圧力

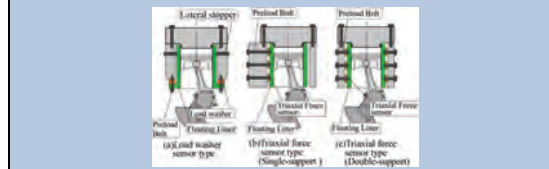


Figure 7-6 摩擦測定用浮動ライナーの形式

て再現性もよく、今後の低摩擦エンジンの開発に有効な研究である。(小笹)

【参考文献】

7-1) 北嶋 一慶, 畔津 昭彦: フォトクロミズムを用いた潤滑油膜の可視化 -油膜厚さと流れの同時計測への適用-, 第26回内燃機関シンポジウム講演論文集, 講演番号 75(2015).

7-2) 松本 貢典, 中村 純平, 大澤 克幸, 栗栖 徹: ピストンリング合口部から燃焼室内へのオイル上がり現象の可視化, 第26回内燃機関シンポジウム講演論文集, 講演番号 76(2015).

7-3) 西島 駿輔, 菊原 浩司, 長谷川 弘樹, 鈴木 秀和, 伊東 明美, 関谷 弘志, 赤松 洋孝: オイルリング下の潤滑油挙動に関する研究, 第26回内燃機関シンポジウム講演論文集, 講演番号 77(2015).

7-4) 三原 雄司, 岩崎 秀之, 田畑 秀規: 浮動ライナ法によるピストン摩擦力計測法に関する研究, 第26回内燃機関シンポジウム講演論文集, 講演番号 80(2015).

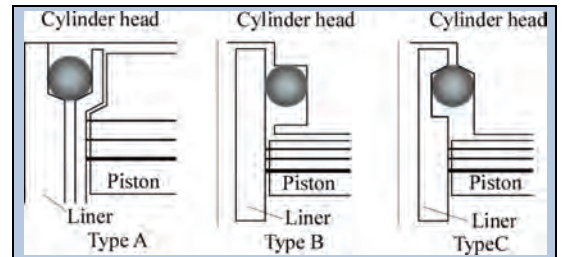


Figure 7-7 圧力シールの形式

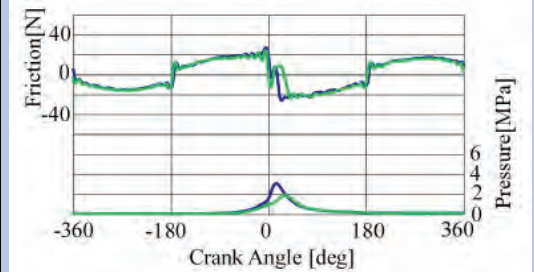


Figure 7-8 摩擦測定結果の例