

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 5 No. 2 2015

JSAE エンジンレビュー

レポート特集:

第 25 回内燃機関シンポジウム

—エンジンシステムを支える基礎技術—

Report of 25th ICE Symposium (TSUKUBA)



第 25 回内燃機関シンポジウム会場：産総研つくばセンター つくば中央
国立研究開発法人産業技術総合研究所（産総研）提供



公益社団法人 **自動車技術会**

コラム : ●アナログエンジン実験 : 飯島 晃良 / 編集委員 1
Old-style approach in engine experiment

Report : 第 25 回内燃機関シンポジウム 3
—エンジンシステムを支える基礎技術—
Report of 25th ICE symposium (TSUKUBA)
佐藤 唯史, 鈴木 央一, 野口 勝三 (編集委員),
川那辺 洋 (京都大学), 座間 淑夫 (群馬大学),
中谷 辰爾 (東京大学), 三原 雄司 (東京都市大学)

■ JSAE エンジンレビュー編集委員会

委員長: 飯田 訓正 (慶應義塾大学)
副委員長: 村中 重夫 (元日産自動車)
幹事: 飯島 晃良 (日本大学)
委員: 遠藤 浩之 (三菱重工業)
金子 タカシ (JX 日鉱日石エネルギー)
菊池 勉 (日産自動車)
小池 誠 (豊田中央研究所)
小酒 英範 (東京工業大学)
佐藤 唯史 (ケーヒン)
清水 健一 (元産業技術総合研究所)
下田 正敏 (日野自動車)
鈴木 央一 (交通安全環境研究所)
西村 知江子 (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)
山崎 敏司 (編集)

発行所: 公益社団法人 自動車技術会
発行日: 2015 年 7 月 10 日
発行人: 竹村 純 (三菱自動車工業)
〒102-0076 東京都千代田区五番町 10-2
電話: 03-3262-8211

●コラム

アナログエンジン実験

Old-style approach in engine experiment



飯島 晃良

Akira IIJIMA

日本大学

理工学部機械工学科

助教

Department of Mechanical Engineering

College of Science and Technology

Nihon University

古くから内燃機関は、熱力学・流体力学・工業力学・材料力学のいわゆる機械系四力学を始め、燃焼工学・伝熱工学・機械材料・機械工作法・トライボロジー・振動工学・計測工学・制御工学・信頼性工学などを含めた、いわば機械工学の粹を集めた典型的な分野として知られている。実際には、機械工学だけでなく、電気電子工学、情報工学、化学などを含めた総合工学の典型例であることは誰もが認識している事だと思う。それだけに、その現象は複合的かつ複雑であり、未知現象が多い。加えて、その技術は今も急速な進化を続けている。当然のことながら、上記の様々な学問分野単独では、内燃機関の現象を説明できない。

例えば著者は、大学の機械工学科にて熱力学、内燃機関、エンジン実験、設計製図等を担当しているが、内燃機関を学ぶための基礎科目の代表格と言えば熱力学だと思われる。それにもかかわらず、熱力学の授業で説明したことと矛盾するような説明を、内燃機関の授業ですることがあり、学生に混乱を招くことにならないか心配になることがある。もちろん、熱力学と内燃機関とで理論が矛盾している訳ではなく、内燃機関の現象は熱力学だけでは決まらない複合現象であるからこそ起こる事態である。例えば、熱力学で学ぶガスサイクルにおいて、オットーサイクル、ディーゼルサイクル、サバテサイクルという3種のサイクルを、往復動内燃機関の基本サイクルとして教え、オットーサイクルはガソリンエンジンの、サバテサイクルは高速ディーゼルエンジンの基本サイクルに相当すると説明する。しかし、例えばノック回避のために点火遅角運転をした過給ダウンサイジングガソリンエンジンや、多段噴射を行う現在の過給ディーゼル機関や、予混合圧縮着火燃焼の指圧線図などと比較すると、“オットーサイクル＝ガソリン機関”、“サバテサイクル＝ディーゼル機関”のように説明するのが苦しく思える。その他にも、熱力学では圧縮比と比熱比を増加させることで理論熱効率が向上すると説明するが、実際には低圧縮比ディーゼル機関や大量EGR等、熱力学だけで考えると矛盾する事が行われている。もちろん、これらのメカニズムは、前述の様々な学問分野を複合的に適用すると、明快な説明ができる。例えばディーゼル機関の低圧縮比化については、伝熱工学、燃焼工学、構造強度、トライボロジー等を複合して考えればその手法にも一理あることが納得できる。

つまり内燃機関は、機械工学で学んだ個々の基礎科目の使い方を学ぶ格好の教材だと考えられる。そう考えると、機械工学を学ぶ学生全員に、エンジンを教えることの有用性が理解でき、教える側のモチベーションも向上する。著者の所属する学科では、1年生の必修科目である機械工作実習の一部に、エンジンの分解組立があり、また、3年生の必修科目である機械工学実験Ⅱにおいて、ガソリンエンジンの特性実験(性能試験)がある。加えて、3年生の選択科目として設置されている内燃機関の授業も、ほとんどの学生が受講している(150名以上の受講者で、教室は毎回ギッシリである)。つまり、卒業する学生全員が、エンジン分解組立とエンジン性能実験を経験することになる。

機械工学の総合力を培うために、在学生全員に内燃機関を教えることを考えると、その教材はなるべく“アナログ”で“ローテク”であることが望ましいとつくづく感じる。現在のエンジン試験設備は、オペレーションや測定の自動化はもちろん、得られたデータの解析の自動化も進んでいる。最新エンジンをテキスト(教材)として考えると、初学者には大変分かりにくいテキストである。そのため、本学での3年生のエンジン実験(必修科目)では、なるべくアナログな装置と手法を使っている(卒業研究においても、基本的にそのスタイルを踏襲している)。一例を以下に記す。

内容	方法	体感できること
軸トルク測定	動力計支持反力 F を天秤やロードセルで測定し、指示値を読む。	・エンジン 1 回転の仕事(力 $F \times$ 距離 $2\pi r = 2\pi T$) がイメージできる(r は腕の長さ, T は軸トルク)。 ・トルク変動(指示値変動)をどう読み取るのか?
吸入空気量測定	層流流量計の差圧を液柱マンノメータ(ゲッチングマンノメータ)で読む。	・流体力学で習うハーゲンポアズイユの法則が応用できる。 ・吸気脈動による液面の振動をどう読むか?
燃料流量計測	ビューレットを用いて既知容量の燃料消費時間をストップウォッチで計る。	・ビューレットの容量はどの位が適当か? ・あなたと私とで同じタイムになるか? (正味熱効率の算出誤差への影響度合いは?)
指圧解析	・ブースト圧を基準にドリフトを補正する。 ・ピストンクランク機構の式を用いて $p-\theta$ 線図, $p-V$ 線図を描く。	・TDC ずれの影響, 図示平均有効圧力(IMEP)や熱発生率を正しく算出する事の難しさが実感できる。
ノッキング	高負荷で回転速度を低下させ強いノック音が生じる状況を体感する。回転速度を少し上げるとノックが収まることを体感する。	・低速高負荷時に火花ノックが生じやすいことが身を以て体感でき, エンジンの性格を理解したような気分になれる。

以上のような方法は、20 年くらい前までは当たり前のようにやられていたことだと思うが、現在はなかなか体験できない項目もあるように思われる。それが、内燃機関に入門するための敷居を高くしているとも言える。内燃機関への入門や、機械工学を学ぶための教材としての役割を果たすためには、このようなアナログな方法が今後ますます重要だと考え、これからも続けていきたいと思っている。これらの過程を経て内燃機関に触れ、興味を抱いた学生が卒業研究で内燃機関研究に進み、将来、最新エンジン開発の分野に進んでくれれば、願ったり叶ったりである。

第 25 回内燃機関シンポジウム —エンジンシステムを支える基礎技術—

Report of 25th ICE Symposium

日時：2014年11月26日（水）～11月28日（金）
会場：（独）産業技術総合研究所つくば中央第1共用講堂
共催：（一社）日本機械学会（幹事学会）
（公社）自動車技術会

佐藤 唯史，鈴木 央一，野口 勝三（編集委員）
川那辺 洋（京都大学），座間 淑夫（群馬大学），中谷 辰爾（東京大学），三原 雄司（東京都市大学）

Tadafumi SATO, Hisakazu SUZUKI, Katsumi NOGUCHI (JSAE ER Editorial Committee)
Hiroshi KAWANABE (KYOTO UNIVERSITY), Yoshio ZAMA (GUNMA UNIVERSITY),
Shinji NAKAYA (University of Tokyo), Yuji MIHARA (TOKYO CITY UNIVERSITY)

はじめに

「本シンポジウムは、国内で毎年定期的開催されるエンジン関連の最高峰のシンポジウムと位置付けられ、「エンジン技術発展のために、大学教員や大学院生、企業若手エンジニア、ベテランエンジニアとの研究・技術の交流の場とする」ことを目的の一つとしています。2014年の第25回はエンジンシステムを支える基礎技術の最新動向に焦点をあて、エンジンシステム技術の向上に貢献するとともに研究者の技術交流促進を図りたい（実行委員会委員長 後藤新一）との趣旨により開催された第25回内燃機関シンポジウムをレポートする。

1 CI 機関

CI 機関(3)および(4)からは3論文を紹介する。まず、北海道大学の西本らは「炭化水素の分子構造に基づいたディーゼル燃料の着火性指標(分子構造パラメータの検討と最適化)」と題して講演を行った¹⁻¹⁾。今後、幅広く導入の可能性がある分解軽油等の新燃料では、燃料の着火性をその物理的性状により定めたセタン指数等で表現するのが困難になる可能性がある。このことから、燃料の化学的性状に基づき着火性を記述する必要がある。ここではディーゼル燃料着火性指標 PDI(predicted diesel ignitability) index を燃料中の炭素の結合構造変数の関数で表現するとともに、各種燃料において着火性を精度よく表すことができることを示している。図 1-1 は PDI index とセタン値との相関を示しており、基本的な相関は高いことが分かる。また、図 1-2 は実験による着火遅れについて PDI index とセタン値により予測した結果との相関を示した例であり、総じて PDI index の方が高精度な結果となることが分かる。

つぎに、筒内におけるディーゼル火炎の構造に関連して、部品総研の山下らおよび豊田中研の冬頭らはそれぞれ「多噴孔ノズルからの高圧噴射ディーゼル噴霧へのエアエントレイン計測」¹⁻²⁾および「多噴孔ノズルからの高圧噴射ディーゼル噴霧火炎の set-off 長の支配要因」¹⁻³⁾と題して講演を行った。ディーゼルエンジンの筒内の様に噴霧間が比較的狭い状況では、エントレインおよび火炎構造が大きな空間に噴射された噴霧とは異なる可能性がある。前者では、定容容器中に形成した噴霧において、噴霧周辺の流動を PTV で計測している。図 1-3 は実験装置および可視化画像の一例であり、図 1-4 は計測された速度である。これによると、噴霧間距離が狭い場合、噴霧周辺部では内部への流動が抑制される(i)とともに、上流から噴霧根元への逆流が強い(ii)ことが分かる。さらに、後者では周囲流動が制限を受けた際のエントレイン量を理論的に予測するとともに、可視化エンジンを用いた燃焼条件において、火炎構造の変化を調べている。すなわち、噴霧火炎の周辺流動が制限された場合は既燃ガスがエントレイン流により再導入され、これにより火炎の「Set off 長」(ノズル出口から火炎が観察される位置までの距離)が広い領域に形成された噴霧火炎とは異なる可能性を示唆している。図 1-5 はエン

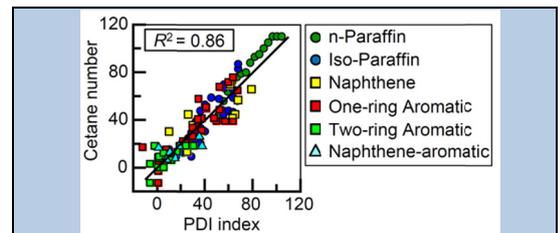


Figure 1-1 PDI index とセタン指数

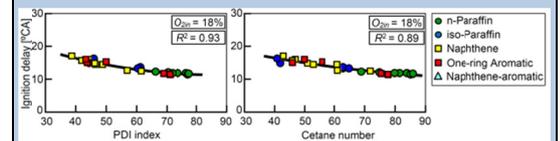


Figure 1-2 PDI index およびセタン値による着火遅れの予測

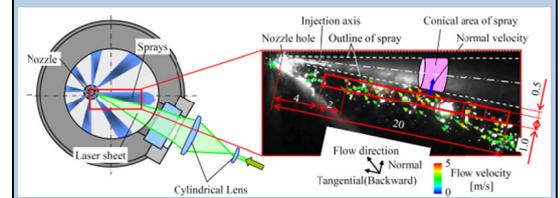


Figure 1-3 実験装置の概略

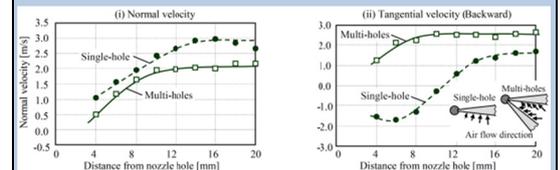


Figure 1-4 噴霧周辺流動の計測結果の一例

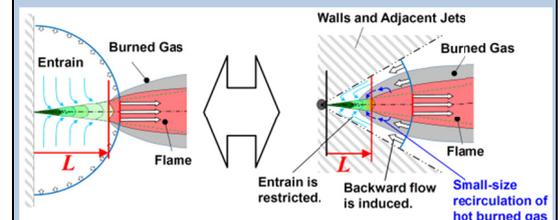


Figure 1-5 噴霧周辺の流動が抑制された際のエントレイン過程

レイン過程の概略を示す。また、図 1-6 は可視化に用いたピストンヘッドの形状である。図 1-7 は可視化画像の一例であり、黒い雲状の既燃ガス(A)が噴霧周辺に形成された逆流に載って、上流部(B)で再導入される。これによりいわゆる「Set off 長」が単噴孔噴霧燃焼とは異なるとしている。(川那辺)

【参考文献】

- 1-1) 西本, 大森, 小川, 柴田, 「炭化水素の分子構造に基づいたディーゼル燃料の着火性指標」, 第 25 回内燃機関シンポジウム前刷集, 論文番号 46(2014).
- 1-2) 山下, 戸田, 増田, 「多噴孔ノズルからの高圧噴射ディーゼル噴霧へのエアエントレイン計測」, 第 25 回内燃機関シンポジウム前刷集, 論文番号 49(2014).
- 1-3) 冬頭, 服部, 山下, 増田, 「多噴孔ノズルからの高圧噴射ディーゼル噴霧火炎の set-off 長の支配要因」, 第 25 回内燃機関シンポジウム前刷集, 論文番号 50(2014).

2 SI 機関(1)(2)

SI 機関(1)(2)では、過給直噴エンジンの更なるダウンサイジングを目指し、低回転の高負荷域で発生する低速ブレグニッションを課題とした研究が盛んに発表された。その中から 5 件の講演を紹介する。

森川・森吉ら^{2-1)~2-3)}は一連の発表において、数値計算と可視化実験から、筒内に飛散した潤滑油やデポジットの影響を検討すると共に、単気筒エンジンを用いて、低速ブレグニッションの発生が無い低回転の高負荷運転を実現している。図 2-1²⁻³⁾に示す観察視野のエンドスコープを用い、ピストンクレビス部近傍で発生したブレグニッションを、高速度で直接撮影した写真が図 2-2²⁻³⁾である。上段 A に示されたサイクルでは、点火時期(4deg.ATDC)よりも早い-10deg.ATDC において、吸気バルブ側のピストンクレビス部付近に局所的な発光が観察され、ブレグニッションの発生が確認できる。また、下段 B に示すサイクルでは、-12deg.ATDC において、排気バルブ側のピストンクレビス部付近から、ブレグニッションが発生している。数値計算による検討²⁻²⁾では、燃料の壁面付着によって潤滑油が希釈され、筒内に飛散した液滴が、上述のブレグニッションの発生要因になることを示唆している。図 2-3²⁻¹⁾は、ノック限界の点火時期における図示平均有効圧(IMEP)を示しており、単気筒エンジンによる回転数 1500rpm の運転結果である。先に述べた発生要因を抑制するため、冷却水温は 90°C、燃料噴射の開始時期は 120deg.ATDC とし、Ca 系添加剤を含まない潤滑油を用いている。加えて、圧縮端温度の低下を狙うために、ミラーサイクルを採用している。この図より、過給圧 380kPa(abs)においても、低速ブレグニッションの発生がない運転を実現しており、その際の図示平均有効圧は 3.02MPa に達し、4 気筒エンジンの正味平均有効圧に換算して 2.98MPa 相当であるとしている。尚、Ca 系添加剤を含む潤滑油が、ブレグニッションの発生要因になるメカニズムとして、CaCO₃ から分解生成した CaO の固体粒子が、CO₂ を吸着して発熱すること提案しており、更なる解明が進むことを期待したい。

低速ブレグニッションのメカニズム解明を目的として、越後ら²⁻⁴⁾は筒内に飛散する潤滑油を含んだ燃料液滴の自着火について、数値計算および可視化実験から検討している。図 2-4 に示す可視化範囲の急速圧縮膨張装置を用い、メタン予混合気中に潤滑油を含んだ燃料を噴射して、その自着火を観察した結果が図 2-5 である。メタン予混合気中の火炎伝播が観察される前に、小さな粒子状の輝炎が確認され、潤滑油の含有量と共に輝炎の個数が増加することから、自着火の原因は潤滑油を含んだ燃料液滴であると結論付けている。また、図 2-6 は、低速ブレグニッションが発生した際の筒内圧を示しており、数値計算は実験結果を良好に再現している。尚、数値計算では、ピストン冠面の壁面近傍から中心に向かって、潤滑油と燃料の混合液を噴射することにより、ピストンクレビス部近傍から飛散する潤滑油を含んだ燃料液滴を模擬している。温度分布とHCHO分布の数値計算と併せて、低速ブレグニッションでは、点火時期より前に潤滑油を含んだ燃料液滴が自着火し、エンドガスノックに至ると推察している。

中村ら²⁻⁵⁾は、低速ブレグニッションが発生する 1 サイクル目に着目し、燃料の壁面付着と潤滑油の消費量から、潤滑油の液滴による自着火のメカニズムを考察している。図 2-7 は、燃料の壁面付着量が低速ブレグニッションの発生頻度に及ぼす影響を示している。ここで、発生頻度は直列 4 気筒エンジンを用いた実機運転の結果であり、付着量は実機運転の条件に合わせた数値計算の結果である。この図より、噴射時期の遅角や冷却水温の低下に伴い、燃料の壁

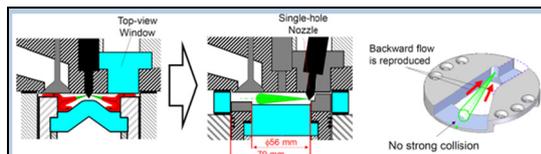


Figure 1-6 流動を制限した噴霧燃焼の可視化実験

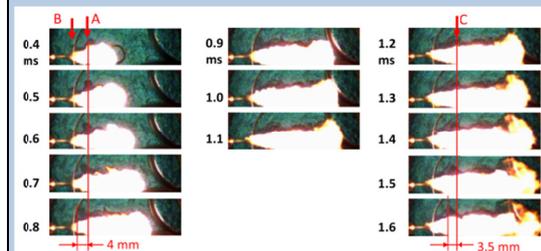


Figure 1-7 噴霧火炎の可視化画像の一例

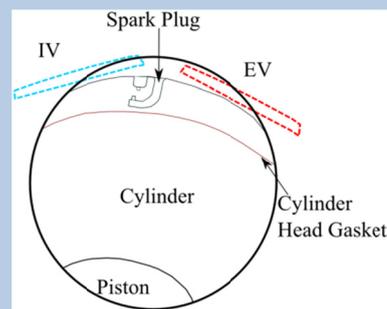


Figure 2-1 可視化による観察視野

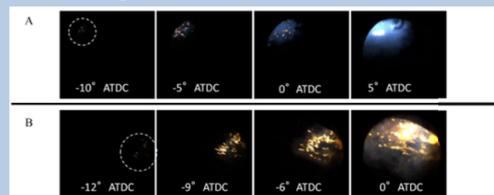


Figure 2-2 ピストンクレビス部近傍でのブレグニッションの高速度直接写真

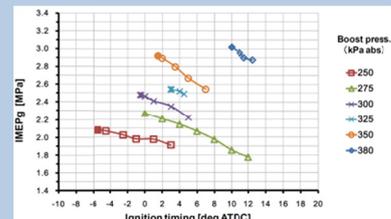


Figure 2-3 ノック限界の点火時期における図示平均有効圧力



Figure 2-4 急速圧縮膨張装置の可視化範囲

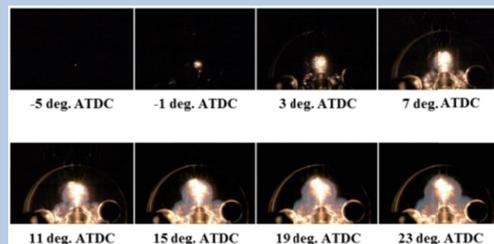


Figure 2-5 潤滑油を含んだ燃料をメタン予混合気中に噴射した際の自着火観察

面付着量が増加することで、低速ブレイクニッションの発生頻度が高まると結論付けている。また、この因果関係を検討する為、図2-8では、点火時期の進角によるノッキング発生時と、低速ブレイクニッションの発生時における潤滑油消費量(LOC)の挙動を比較している。尚、潤滑油消費量は、排ガス中のSO₂濃度を計測して算出するSトレース法を用いている。この図より、ノッキングの発生時も低速ブレイクニッションの発生時も、筒内圧は同等の履歴を示すが、潤滑油消費の挙動は後者だけに見られることから、急峻な燃焼に伴い飛散した潤滑油の燃焼ではなく、燃料の壁面付着により飛散した潤滑油の液滴が自着火した可能性を指摘している。更には、この自着火が低速ブレイクニッションを引き起こす1サイクル目の原因になり得ると述べており、先に紹介した越後ら²⁻⁴⁾の報告と併せて非常に興味深い。(佐藤)

【参考文献】

- 2-1) 森川弘二, 今井康雄, 窪山達也, 森吉泰生, 山田敏生, 畑村耕一, 鈴木正剛, 熊仔: ダウンサイジングコンセプトの限界を向上させるための超高過給ガソリンエンジンの研究(第一報), 第25回内燃機関シンポジウム講演論文集, 講演番号1(2014).
- 2-2) 森吉泰生, 山田敏生, 角田大輔, 謝銘銘, 窪山達也, 森川弘二: ダウンサイジングコンセプトの限界を向上させるための超高過給ガソリンエンジンの研究(第二報), 第25回内燃機関シンポジウム講演論文集, 講演番号2(2014).
- 2-3) 鈴木俊靖, 鐘ヶ江優, 沈富超, 窪山達也, 森吉泰生, 森川弘二: ダウンサイジングコンセプトの限界を向上させるための超高過給ガソリンエンジンの研究(第三報), 第25回内燃機関シンポジウム講演論文集, 講演番号3(2014).
- 2-4) 越後亮, 伊藤孝典, 宮井契史, 草鹿仁, 大聖泰弘, 葛西理晴, 白石泰介: 過給直噴ガソリンエンジンにおける低速ブレイクニッションのメカニズムに関する研究, 第25回内燃機関シンポジウム講演論文集, 講演番号4(2014).
- 2-5) 中村望, 村上信明, 平石文昭, 秦幸司: 過給ガソリンエンジンにおける低速ブレイクのLivengood-Wu 積分値を用いた考察, 第25回内燃機関シンポジウム講演論文集, 講演番号7(2014).

3 SI 機関(3)(4)(5)・計測

「パルスジェットを用いた希薄混合気の点火に関する研究」と題し、奥村(九州大学)らによる発表があった。本研究では、希薄燃焼において有効なパルスジェット(Pulsed Flame Jet: PFJ)点火の実用化を目的として、新たなPFJイグナイタ(図3-1)を開発し、主要諸元(表3-1)が点火性能に及ぼす影響を調べている。従来品は、中心電極汚損と燃料インジェクタからの高圧噴射が必要になるという課題があった。新PFJイグナイタでは、点火装置と噴射装置を独立させることで、これらの課題を解決している。急速圧縮膨張装置を用いて、オリフィス径を1mm, 2.5mm, 4.0mmと変化させた実験を行い、図示熱効率の高かった4.0mmを用いて点火限界を調べている。通常のSIでは当量比0.55の点火限界に対し、PFJの点火限界は当量比0.45と高い点火性能を確認している。PFJ点火の熱発生率を図3-2に、SIの熱発生率を図3-3に各当量比で示す。PFJ点火は、熱発生が急峻で、燃焼期間も短い。PFJは、ジェットが、燃焼室に吹き込むことで体積的に点火するため、希薄混合気の安定した点火と燃焼促進に有効な手段であると述べている。

「レーザー誘起燐光法を用いた直噴ガソリンエンジンピストン表面温度計測」と題し、小山(明治大学)らによる報告があった。レーザー誘起燐光法を用い、形状が複雑な直噴エンジンピストン表面のエッジ部等を含めた温度分布を、運転中に瞬時2次元画像計測を行っている。新たな方法として、燐光体添加無機耐熱接着剤をピストン表面へ厚塗り焼結後、超音波スピンドルにより3次元NC除去加工し、燐光体薄膜を残す方法を考案している。実機テストエンジンを用いた実験セットアップの概略を図3-4に実験条件を表3-2に示す。吸気・圧縮・膨張・排気の4つの時期に撮影された燐光画像と燐光減衰比から求めた温度分布実験結果を図3-5に示す。観察された温度上昇は、厚さ100μmの燐光体薄膜が、ピストン母材より熱伝導率が小さいことにより増幅されていることを留意すべきだと述べている。今後更に燐光体薄膜を薄くする事で、精度向上を考えているということであった。実験の結果、ピストン表面温度は、膨張行程のみ上昇しキャビティエッジ近傍には、ヒートスポットが形成されるが、次サイクルには持ち越されず、ノッキングの要因にはならないと報告している。

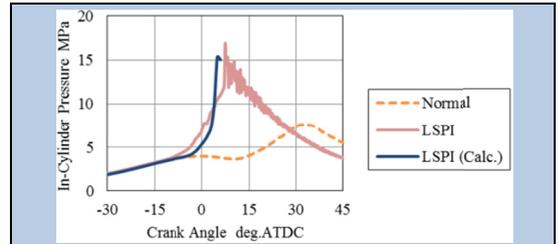


Figure 2-6 低速ブレイクニッション発生時の筒内波形

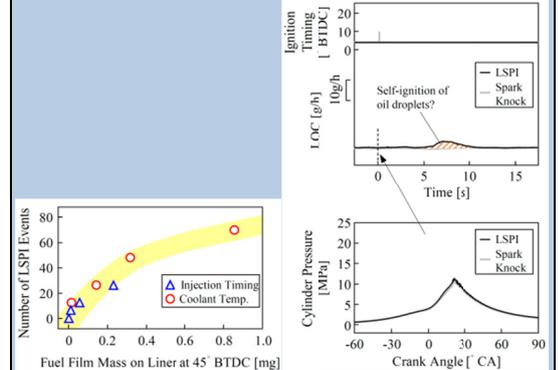


Figure 2-7 壁面燃料付着量と低速ブレイクニッション発生頻度の関係
Figure 2-8 火花ノックとLSPiでのオイル消費量の比較

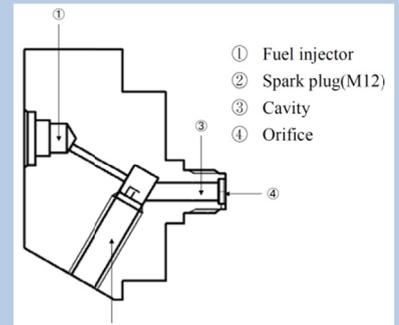


Figure 3-1 PFJ イグナイタ

Table 3-1 PFJ イグナイタ諸元

Cavity volume [cc]	1.68
Orifice diameter [mm]	1.0, 2.5, 4.0

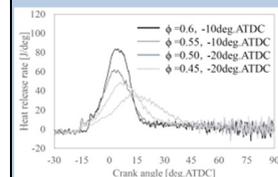


Figure 3-2 PFJ 点火の熱発生率

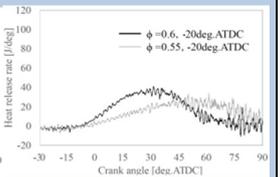


Figure 3-3 SI の熱発生率

Table 3-2 実験条件

Measurement Timings [degATDC]	-270, -90, 90, 270
Piston surface coating	
Binder Type	AronCeramic-C (90%wt)
Phosphor	La ₂ O ₃ :S:Eu (10%wt)
Thickness	100μm
Excitation Laser	
Source	Pulsed Nd:YAG
Power	100mJ
Wavelength	355nm
Camera	
Shutter speed	19μs
Fame Rate	5000fps

Figure 3-4 実験セットアップ

「エンジンシリンダ内乱流予混合火炎の観察—実機関における時系列ラジカル自発光解析を用いた燃焼診断—」と題し、河原(橋本氏講演)(岡山大学)らによる発表があった。M12の点火プラグを改良し、光ファイバ組込型点火プラグ(図 3-6)を開発している。これを圧縮膨張機関と実機関に適用し、時系列分光計測によりラジカル自発光を解析したと報告している。解析より以下のような知見を得ている。可視化同時計測からCH^{*}、C2^{*}は火炎面で観測され、CO-O再結合放射による連続スペクトルは、既燃ガス部で検出された。図 3-7 に示すように、ラジカル発光強度比 C2^{*}/CH^{*}は、空燃比とある程度相関がある。プラグ近傍の空燃比計測の可能性があると述べている。しかしラジカル発光強度比には、変動も生じており今後の課題と考えられる。(野口)

【参考文献】

- 3-1) 奥村 勲, 河北 晋一郎, 近藤 和吉, 西島 義明, 橋本 英樹, 森上 修, 村瀬 英一: パルスジェットを用いた希薄混合気の点火に関する研究, 第 25 回内燃機関シンポジウム講演論文集, 講演番号 62 (2014).
- 3-2) 小山 将, 内村 雄, 栗林 真幹, 近藤 克文, 相澤 哲哉, 庄司 喜代隆, 橋詰 豊, 今岡 佳宏: レーザ誘起燐光法を用いた直噴ガソリンエンジンピストン表面温度計測, 第 25 回内燃機関シンポジウム講演論文集, 講演番号 92 (2014).
- 3-3) 河原 伸幸, 橋本 将太, 富田 栄二: エンジンシリンダ内乱流予混合火炎の観察—実機関における時系列ラジカル自発光解析を用いた燃焼診断—, 第 25 回内燃機関シンポジウム講演論文集, 講演番号 93 (2014).

4 噴霧

筑波大学大学院 柏崎ら⁴⁻¹⁾は「PLIF 法による噴霧内温度分布計測」と題して講演を行なった。高温高圧場における燃料噴霧内の温度分布や濃度分布を計測するための従来の方では、物性の異なる燃料噴霧間での混合気分布の比較が困難であり、燃料物性の違いが混合気形成に与える影響に関する知見の不足を指摘している。本報告では物性の異なる燃料として n-Heptan と n-Tridecan を選択し、燃料物性の違いが混合気形成に与える影響について調査した。雰囲気混合させたアセトンに蛍光剤(トレーサ)とした平面レーザ誘起蛍光法(PLIF法)を提案した。燃料蒸気とアセトンを含んだ周囲気体が断熱混合すると仮定して、アセトンからの蛍光強度をもとに濃度および温度分布を計測した。実験には RCEM を使用し、雰囲気温度 800K, 雰囲気圧力 4MPa とした。また燃料噴射圧力は 50MPa を選定した。これらより、以下の知見が得られた。

- * 巨視的にみればノズル近傍の領域を除き n-Heptan と n-Tridecan の噴霧内部の温度分布はほぼ一致する。(図 4-1, 図 4-2)
- * 蒸発性の高い n-Heptan の方が n-Tridecan よりも上流から混合気が形成されることが示された。(図 4-3)

本研究で提案された手法では、従来の方法と異なり、供試燃料そのものの混合気濃度分布と温度分布を同時に計測できることが斬新である。本手法を用いることで混合気形成に対する噴射圧力、雰囲気温度、雰囲気圧力などの効果の分離から噴霧制御による燃焼改善のアイデアに結び付く可能性があり、今後の研究の進展に期待したい。

産業技術研究所の文ら⁴⁻²⁾は「直噴ガソリン機関多噴孔ノズル噴霧の詳細考察: 噴孔長及び噴孔数が初期噴霧形成に及ぼす影響」と題して講演を行なった。ガソリン多噴孔ノズルの初期流動特性が下流の噴霧形成に及ぼす影響を明らかにするため、SPring 8 による X 線位相コントラスト画像法による噴孔極近傍の噴霧の可視化と数値解析(汎用解析ツール: STAR-CD)から、噴孔長(0.3mm, 0.6mm, 1.0mm)と噴孔数(2 噴孔, 10 噴孔)をパラメータとしてノズル内部及びノズル近傍の噴霧流動について調査した。供試ノズルの噴孔径は 0.12mm である。燃料噴射圧は 13MPa とし、常温常圧の窒素雰囲気下にドデカンを供試燃料として噴霧した。これらより、以下の知見を得た。

- * 噴孔長が最も短いノズルにおけるノズル出口の流動幅は他の噴孔長の場合よりも狭く、更

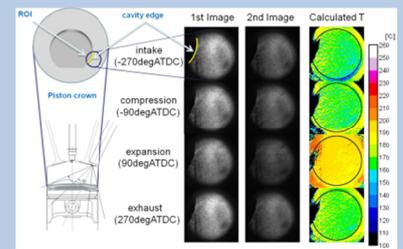


Figure 3-5 燐光画像と温度分布

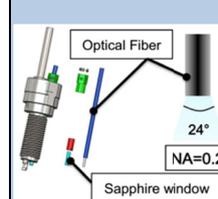


Figure 3-6 光ファイバ組込型点火プラグの構造図

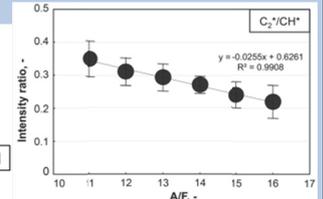


Figure 3-7 設定空燃比とラジカル発光強度比の関係

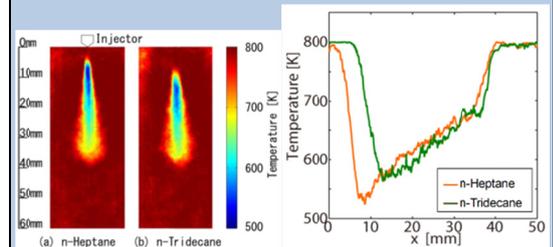


Figure 4-1 噴霧内部の平均温度分布

Figure 4-2 噴霧軸上における平均温度分布

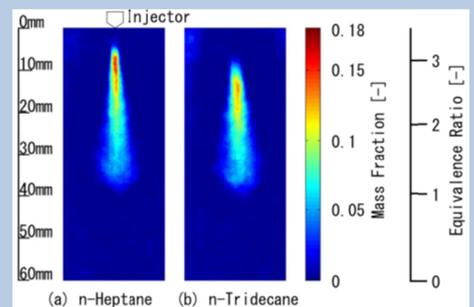


Figure 4-3 噴霧内部の平均濃度分布

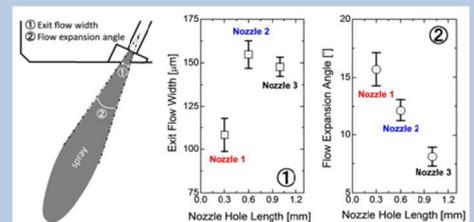


Figure 4-4 噴孔出口近傍での噴孔長に対する流動幅と噴霧角の関係

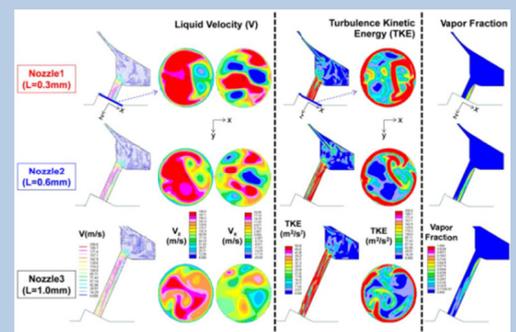


Figure 4-5 数値解析によるノズル内部の流動特性

にその流動幅は噴孔径よりも小さい。(図 4-4)これは、ノズル内部にキャビテーションが生じ、それがノズル出口まで到達していることを明らかにした。またその点について、数値解析から定性的な一致が示された。(図 4-5)

* 噴孔長が短いほど噴孔出口の流速が高いにもかかわらず、軸方向距離に対する噴霧の減速率が高くなることで、噴霧到達距離が短くなる。(図 4-6)

* 噴孔数が多いほど、ノズル内のサック圧が減少しノズル出口における軸および半径方向速度が減少する。(図 4-7)

本研究では、計測が困難な噴孔極近傍の噴霧内部流動を X 線による可視化計測から詳細に調査するとともに、ノズル内部の流動について数値シミュレーションの結果で補い、ノズル内流れと噴霧の初期形成メカニズムとの関連を明らかにしようとする意欲的な研究である。今後、噴孔径、噴孔長だけでなくノズル内部形状の効果などを期待したい。(座間)

【参考文献】

- 4-1) 柏崎貴司, 小島宏一, 高橋栄一, 小野拓磨, 辻村拓, 古谷博秀, 西岡牧人, PLIF 法による噴霧内温度分布計測, 第 25 回内燃機関シンポジウム前刷集, (2014).
- 4-2) 文石洙, 駒田佳介, 佐藤圭峰, 横畑英明, 和田好隆, 安田伸広, 岩本裕之, 鈴木芳生, 直噴ガソリン機関多噴孔ノズル噴霧の詳細考察: 噴孔長及び噴孔数が初期噴霧形成に及ぼす影響, 第 25 回内燃機関シンポジウム前刷集, (2014).

5 後処理関連

排気後処理 2 のセッションでは、それぞれ異なる大学から、HC-SCR に関する研究が 2 件と、尿素の熱分解に関する研究が 1 件発表された。前者ではいずれもモデルガスを用いた試験装置による研究であり、SV 比が同等である状況では還元剤の違いの影響などが比較できる部分と、燃料供給系や触媒の構造等に起因するだろう違いなど不明な点とがあり、成果を一般化しづらい面とが共存した。

その一つが、東京工業大学佐藤らの研究発表で「HC-SCR システムの NO_x 浄化効率改善に関する研究」⁽⁵⁻¹⁾である。HC-SCR 触媒としては、複数の銅ゼオライト触媒を用いており、2 種類の Cu/ZSM-5 触媒と 1 種類の Cu/Beta 触媒で、それぞれ 500~600 μm のペレット状としたものである。試験装置の概要を図 5-1 に示す。ボンベガスをマスフローコントローラにより制御してモデルガス試験を行うことは一般的であるが、触媒前で分岐させて 2 ラインとして、それぞれにバタフライバルブとヒーターを取り付けている点が興味深い。それらの制御次第では、ガス流量あるいは温度を瞬時的に変化させることも可能で、触媒基礎試験の知見を実用レベルにする際の課題として過渡運転の問題があるが、そこに近づける可能性を持ったものといえる。ただし今回の報告には、その部分は含まれていない。

実験結果の一例として、Cu-ZSM-5, Cu/Al=0.41 触媒を使用し、還元剤噴射期間 4ms でガス温度を変化させた場合の NO_x 濃度の時間履歴を示したのが図 5-2 である。627K 条件などでは還元剤(ノルマルブタン)添加直後に NO_x 排出がむしろ増加しているが、これは燃料添加前に触媒上に NO_x が吸着し、触媒前後の NO_x 濃度が一致した状態を試験条件としているため、還元剤を添加すると、条件によっては吸着していた NO_x が脱離してしまうためとのこと。それも含め、図 5-2 をみても分かるように、過渡的に変化する NO_x 濃度に対して NO_x 浄化率を定義するのは容易ではないが、本報では NO_x 浄化率を還元剤添加後 1 分間の触媒入口 NO_x 量に対する出口 NO_x の減少割合としている。そうしたこともあり、最も浄化性能の高い 723K の条件でも浄化率は 40%強にとどまる。このほか多段噴射時には、NO_x 浄化率が 60%程度まで改善可能としている。

著者自身もまとめの中で言及しているが、既述のように過渡的な変化を与えられる試験装置のポテンシャルをまだ生かしているとはいえず、今後その装置同様に一ひねりした研究成果を期待したい。(鈴木)

【参考文献】

- 5-1) 佐藤 進, 荻田 裕矢, 李 昞錫, 小酒 英範, HC-SCR システムの NO_x 浄化効率改善に関する研究, 第 25 回内燃機関シンポジウム前刷集, (2014).

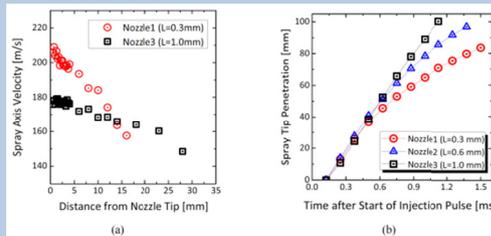


Figure 4-6 噴霧軸上の速度と噴霧到達距離に及ぼす噴孔長の影響

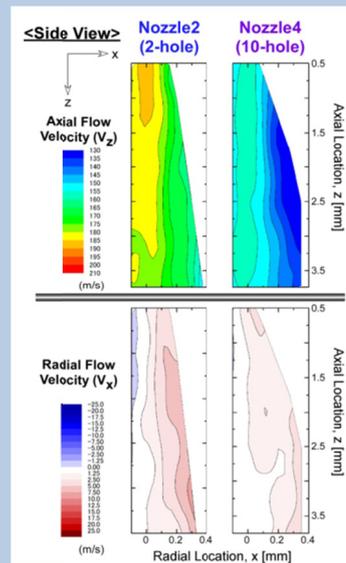


Figure 4-7 ノズル内部の流動特性に及ぼす噴孔数の影響

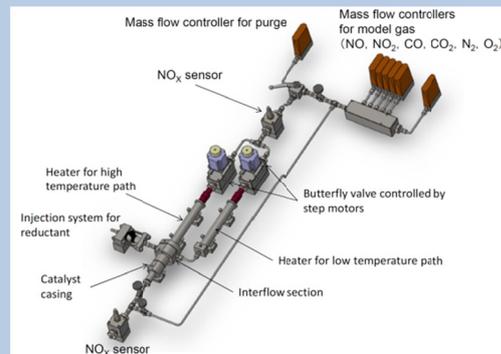


Figure 5-1 HC-SCR システムの試験装置概要

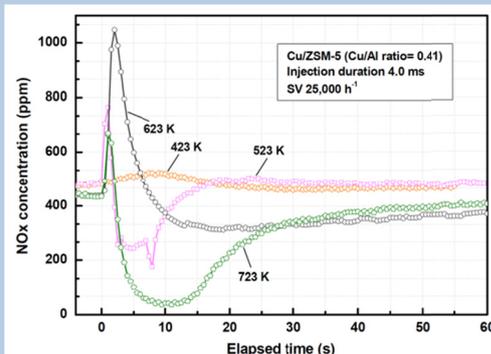


Figure 5-2 ガス温度を変化させた際の NO_x 排出濃度の時間履歴

6 潤滑(2), 新型機関

本セッションでは6件の講演があった。そのうち、以下の2件を選びその内容をまとめた。

6.1 表面塑性加工によるエンジン部品の摩擦損失低減 名城大学 宇佐美初彦⁶⁻¹⁾

宇佐美はエンジン摺動面での起動時や高負荷低速度領域での油膜破断防止のために、ショットピーニングによる粒子成分転写(固体潤滑剤の転写)とローラーバニシングの組み合わせによる更なる平坦化(表面塑性加工)技術を提案している。その手法は、50 μ mのガラスビーズを用いた微粒子ピーニングと超硬合金でのローラーバニシング処理の組み合わせから成り、本研究の特徴は、微粒子ピーニングによる試験片表面の初期ディンプルの有無が、ショットピーニングによる固体潤滑剤 MoS₂ の転写とバニシング加工による MoS₂ の圧入処理が、摺動表面の粗さと摩擦係数に与える効果にある。表 6-1 に示すように(a)NP(微粒子ピーニング処理無)+B(バニシング)+MoS₂, (b)NP+B+MoS₂+B((a)と比べて最終バニシング有), (c)SP(微粒子ピーニング有)+B+MoS₂, (d)SP+B+MoS₂+B((c)と比べて最終バニシング有)の四つの試験片を準備した。図 6-1 に示すように、微粒子ピーニングなしの(b)では Ra=0.5 μ mRa だったが、初期表面へディンプルを付与した(d)は表面粗さを 0.07Ra に低減できた。リングオンディスクによる摩擦係数 μ の評価では、図 6-2 及び図 6-3 に示すようにローラーバニシング処理無しの(a)(c)は、初期表面への微粒子ピーニングの有無に関わらず $\mu=0.02\sim 0.03$ に安定した。一方、MoS₂ を圧入した(b)(d)では、表面の微粒子ピーニング処理無しは $\mu=0.04$ 程度もしくは μ が大きく変動するなど不安定であったが、微粒子ピーニング有では $\mu=0.01$ 程度を維持できた。このような特殊加工による低 μ 化は、エンジントライボロジーの混合・境界潤滑状態での摩擦係数低減への寄与が期待される。

6.2 内燃機関の要素部品や潤滑油のトライボ設計指針に関する研究⁶⁻²⁾

九産大の副島らは、筆者らの40年間の研究、特にディーゼルエンジンにおける SAPS(硫酸塩灰分、リンおよび硫黄)の影響について、自らの研究を研究期間毎に総括してレビューしている。研究対象を大別すると①異常摩耗、②スカuffing損傷、③潤滑特性、④摩擦損失低減及び摩耗(通常)となっている。ここでは1990年以降の「低粘度基油への添加剤配合によるエンジン油の低粘度マルチグレード化の研究」をまとめた。

(1) 1990年~2000年:「低粘度基油への添加剤配合によるエンジン油の低粘度マルチグレード化の研究」が推進された。摩擦・摩耗特性の評価は、①出力 8.8kW/2400rpm の小型ディーゼル機関による運転停止法、②ピストン系摩擦力は図 6-4 に示す浮動ライナ法(浮動ライナの支持は静圧軸受方式)、動弁系の摩擦評価は図 6-5 に示す③カム・スリッパーフオロア試験装置をそれぞれ用い、低粘度油へ各種添加剤を配合した際の摩擦・スカuffing特性を検討した。冷却水と潤滑油が同じ温度下でのシングルグレード(SAE30)とマルチグレード(SAE10W-30)の摩擦損失低減率は、上記①試験法によりマルチグレード化で3~28%の低減効果が得られ、低回転数で低負荷ほどその効果は増大した(図 6-6)。原因は粘度指数向上剤ポリマーを含むマルチグレード油特有の高・低温域での温度-粘度特性が原因であるとしている。動弁系では耐摩耗極圧剤(ZnDTP)と摩擦調整剤(MoDTC)の組み合わせのオイルを用い摩擦摩耗特性を試験法③で評価した。その結果、図 6-7 と図 6-8 に示すように有機モリブデン系摩擦調整剤が ZnDTP と共存するときに摩擦低減効果はより大きく、1ry ZnDTP と MoDTC の組合せは摩擦と耐スカuffing性の両面で優れ、1ry ZnDTP と MoDTP の組合せでは摩擦は低いが耐スカuffing性に著しく低いことが分かった。

(2) 2000年~:カム・フォロアにおける高接触面圧化、低粘度マルチグレード油の適用、NOx 低減のための EGR 率増加によるカーボン・スートの混入による潤滑油の早期の劣化汚損による摩擦摩耗特性を調べるために、分散剤、ZnDTP 及び MoDTP を添加した試験油にディーゼル機関から採取した排気スートを混合して油中すす分が摩擦や摩耗に及ぼす影響について調べている。図 6-9 及び図 6-10 中の AB は SAE10W-30、HI は SAE20+ZnDTP 等の添加剤で、このうち B と I は排気スート混入オイルである。結果、図 6-10 に示すように ZnDTP と MoDTC が添加されたオイル H では、接触面にトライボ化学反応膜 MoS₂ が形成されて低摩擦となるが、図 6-9 の摩擦係数の時間的推移ではすす混入のオイル I がなじみの促進により低摩擦を示した。この原因はすすによる摺動面のポリッシング作用があると

Table 6-1 試験片表面の加工工程

Nomenclature in Figs. 5 and 6	Substrate finish	Surface finish after MoS ₂ plating
a) NP+B+MoS ₂	Turning-burnishing	burnishing
b) NP+B+MoS ₂ +B		none
c) SP+B+MoS ₂	Turning-burnishing-micro shot peening	burnishing
d) SP+B+MoS ₂ +B		none

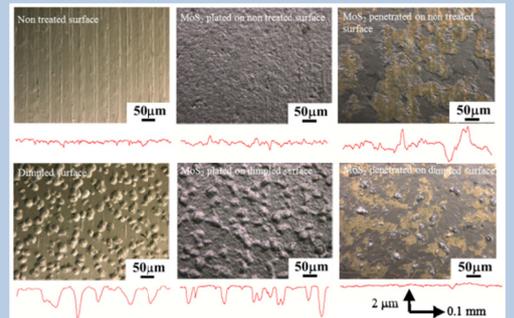


Figure 6-1 試験片の光学顕微鏡像及び表面粗さ

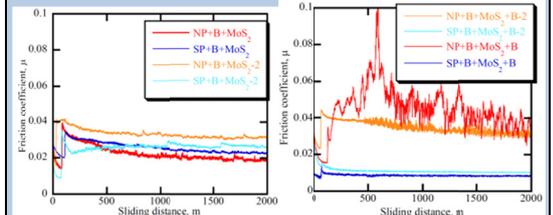


Figure 6-2 摩擦特性の経時変化(MoS₂転写面)

Figure 6-3 摩擦特性の経時変化(MoS₂圧入面)

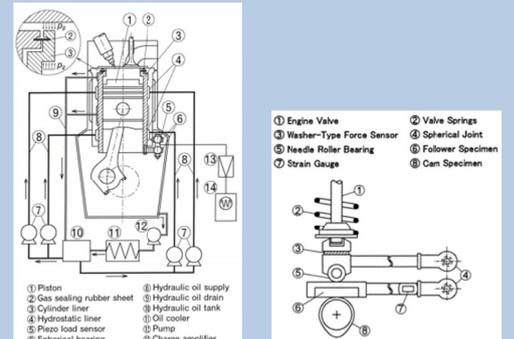


Figure 6-4 浮動ライナ法によるピストン系摩擦力評価

Figure 6-5 カム・スリッパーフオロア試験装置による動弁系摩擦評価

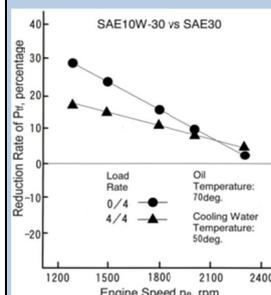


Figure 6-6 回転数を変化させた際の SAE30 に対する SAE10W-30 の摩擦低減率

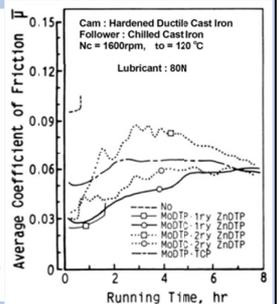


Figure 6-7 スカuffing試験中の摩擦係数の時間変化

Lubricant Additives:	Max. Contact Load for Scuffing Occurrence, kN			
	1	2	3	4
No	[Bar chart showing low load]			
MoDTP	[Bar chart showing moderate load]			
1ry ZnDTP	[Bar chart showing high load]			
2ry ZnDTP	[Bar chart showing high load]			
MoDTP 1ry ZnDTP	[Bar chart showing high load]			
MoDTC 1ry ZnDTP	[Bar chart showing high load]			
MoDTP 2ry ZnDTP	[Bar chart showing high load]			
MoDTC 2ry ZnDTP	[Bar chart showing high load]			
MoDTP TCP	[Bar chart showing high load]			

Figure 6-8 オイル添加剤の組み合わせ毎のスカuffing発生限界の接触荷重

し、また、すす量やそのサイズと摩擦・摩耗の傾向も調査し、すすの凝集を防止する添加剤（分散剤）の効果的な配合を提言している。

(3) **2000 年半ば～**: オイル消費エンジン油による排ガス後処理装置のDPFの劣化及びNOx還元触媒の燐被毒問題から、これらに対応するエンジン油のLow-SAPS化対策に関する設計指針を検討している。結果、図6-11に示すようにLow-SAPS潤滑油(DH-2)規格と低粘度マルチグレード化はエンジンの摩擦損失を7~8%低減させる効果があることを明らかにした。また、D図6-12のようにDLCコーティングは上記オイルとの相乗で摩擦係数を50%低減できることも実験により明らかにした。

摩擦損失のより一層の低減に向けて更なる低粘度油の導入が進められている。本研究は長年にわたりエンジン設計という視点から摩擦・摩耗の低減と潤滑油及びその添加剤の影響の研究結果がまとめられ、緻密な現象説明も行われており、今後のエンジントライボロジーの摩擦・摩耗低減の研究推進で参考にすべき内容と考える。(三原)

【参考文献】

- 6-1) 宇佐美初彦: 表面塑性加工によるエンジン部品の摩擦損失低減, 第25回内燃機関シンポジウム前刷集(2014).
- 6-2) 副島光洋他: 内燃機関の要素部品や潤滑油のトライボ設計指針に関する研究, 第25回内燃機関シンポジウム前刷集(2014).

7 数値計算, 燃焼(2)-燃焼制御

ウェーブフロントの磯島ら⁷⁻¹⁾は点火プラグの電極間でのストリーマー放電の数値計算を実施し、その結果を発表した。放電経路の確立は、まずストリーマー放電現象を通じて行われると考えられ、三次元空間における1, 2本のストリーマーに及ぼす磁場の効果について調べている。これまでの計算ではストリーマーの進展や活性化学種の生成についてシミュレーションを行っていたが、そこに磁場の効果を取り入れた。図7-1には上側電極を-30kV、電子密度を 1×10^9 $1/m^3$ としたときの電子密度の変化を示す。また、図7-2にはその時の電場強度を示す。ストリーマー先端付近の電場が強く、電子の移動により局所的な電場が生じて電離が進み、最終的には電子密度の高い領域が下側電極に到達する。これに伴い電流が流れる。また、電流が流れることにより磁場が生じるが、その影響を2本のストリーマーに対して求めた結果を図7-3に示す。電子の等値面および磁場に比例するローレンツ項ベクトルをプロットしている。それぞれのストリーマーに反時計回りの磁場が現れており、二本のストリーマーが引き合う効果が数値計算により再現された。

ヤンマーの壽ら⁷⁻²⁾はスパークプラグ間隙付近に補助電極を設置し電界を与えることで、電極間隙を増やさずに希薄燃焼限界の拡大を試みた。プラグの間隙の拡大は、希薄燃焼限界の拡大には寄与するが、絶縁破壊に必要とされる電圧が高くなり電極の損耗の原因となるため望ましくない。電界アシスト点火により絶縁破壊要求電圧の低下を目指した。図7-4に補助電極に±16kV付与した時の当量比0.8のメタン/空気混合気のシュリーレン画像を示す。補助電極による電界印加により、初期の熱発生促進および補助電極反対方向への火炎の成長および乱れが観察された。また、電界を付与した場合、最小通電期間が短縮されたため、点火性能が向上したと考える。図7-5に当量比0.6の場合のシュリーレン画像を示す。電界の付与によって点火および燃焼促進効果があることが示された。これらの効果は希薄燃焼限界の拡大に有効である。図7-6に通電時間を一定とした場合の、放電限界圧力、火花エネルギーおよび絶縁破壊要求電圧への電界の効果を示す。電界強度の増加により、絶縁破壊要求電圧が低下することが示された。補助電極による電界付与により点火性能が向上した。

千葉大学の野中ら⁷⁻³⁾は吹き消えが大きな問題となる高希釈、ガス流動場において放電時間を変化させた時の火炎核成長の様子を実験的に調べ、その挙動を報告している。図7-7に大気圧静止場で、中間型のコイルAおよび高電流型のコイルBを用いて50mJのエネルギーを与えた場合の波形を示す。7.9m/sの平均流速場において、22% N₂希釈によりEGR効果を考慮したプロパン/空気混合気に対して実験を実施した結果、コイルBの方は着火確率が高かった。この時の放電期間と放電エネルギーの関係を図7-8に示す。同程度のエネルギーで失火、着火は混在するもののコイルAの方のばらつきが大きい。電流値が小さいと放電路が流されて

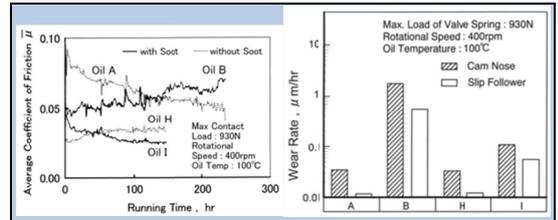


Figure 6-9 油中スス分が摩擦係数の時間変化に与える影響

Figure 6-10 油中スス分が摩耗率に与える影響

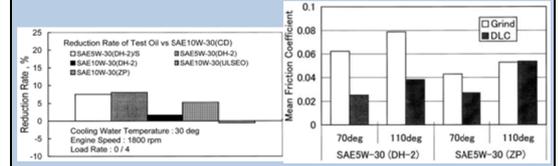


Figure 6-11 Low-SAPS オイルの全摩擦損失の低減率

Figure 6-12 Low-SAPS オイルとDLCコーティングの組み合わせによる正味摩擦係数の低減

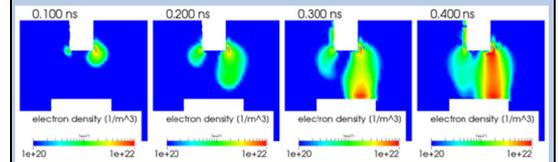


Figure 7-1 電子密度分布

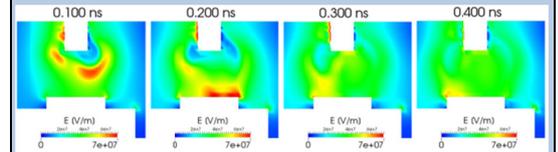


Figure 7-2 電場強度分布

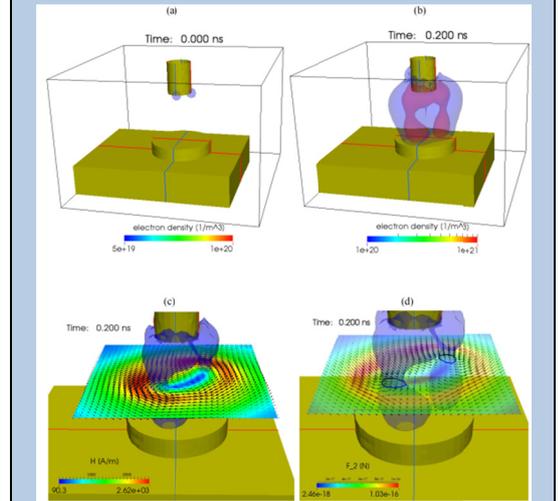


Figure 7-3 二本のストリーマー生成時の分布図 a) 初期電子密度分布, b) 電子密度等値面, c) 電場強度と方向, d) ローレンツ力の一部(磁場比例)と方向

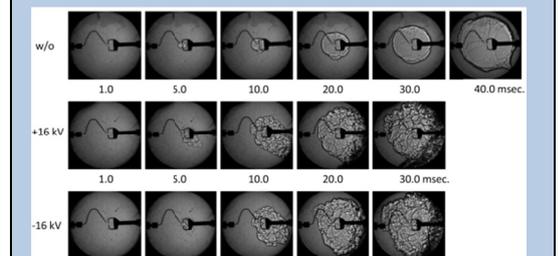


Figure 7-4 当量比 0.8 の時の火炎伝播の様子

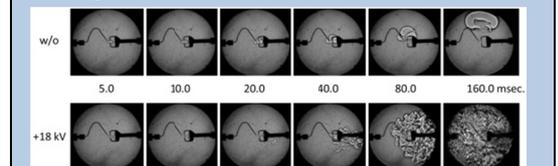


Figure 7-5 当量比 0.6 の時の火炎伝播の様子

ばらつく。放電挙動は、放電路伸張が早く生じる (Type1)、放電中頃に生じる (Type2)、ほとんど生じない (Type3) に分類された。全体的には高電流型のコイル B の方の失火確率が低く、Type1→2→3 の順に点火確率が低くなる。図 7-9 にコイルおよびタイプごとの放電路投影面積、積算値履歴および火炎投影面積を示す。放電路はコイル B の方が太く、初期の放電路投影面積の積算値および火炎投影面積は放電路伸張が大きな Type1 が大きい。電流値が大きいと放電路伸張が生じた時に放電を維持しやすく、外乱に対して強いと考えられる。これらの結果は今後の点火システム開発の有用な指針となる。(中谷)

【参考文献】

- 7-1) 磯島知也, 柴田一美, 点火プラグでの放電とそれに伴う電磁場のシミュレーション, 第 25 回内燃機関シンポジウム講演前刷集, No.14-24, (2014).
- 7-2) 壽和輝, 萩原良一, 武本徹, 古谷正広, 第 25 回内燃機関シンポジウム講演前刷集, No.14-24, (2014).
- 7-3) 野中史彦, 窪山達也, 森吉泰生, 白石泰介, 放電特性が高希釈・ガス流動場における初期火炎核成長に及ぼす影響(第 2 報), 第 25 回内燃機関シンポジウム講演前刷集, No.14-24, (2014).

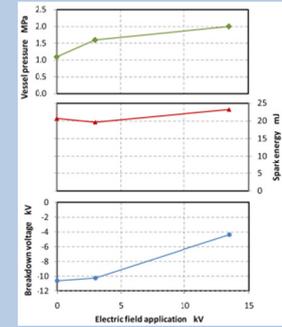


Figure 7-6 放電限界圧力, 火花エネルギー, 絶縁破壊要求電圧への電界の効果

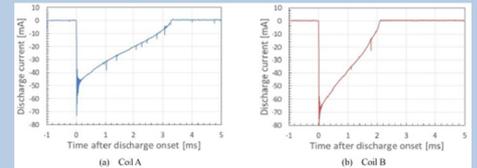


Figure 7-7 放電波形の様子

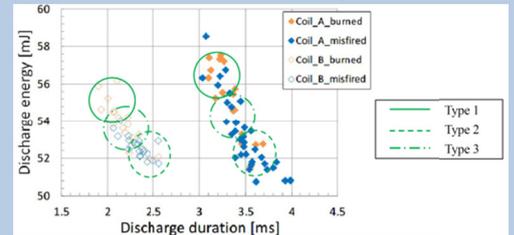


Figure 7-8 放電期間と放電エネルギー

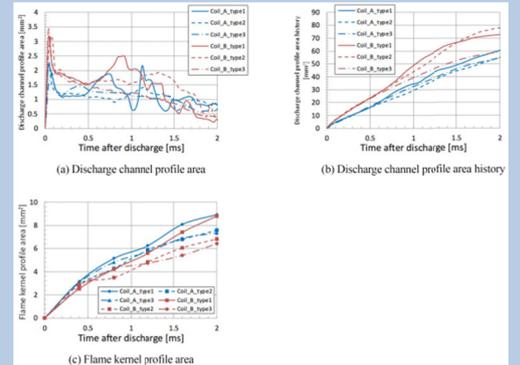


Figure 7-9 コイル A, B の放電タイプの比較