



海外開発 / 海外生産 特集

海外の大学とのエンジン共同研究

Collaboration on Engine Research with Foreign Universities

米谷 俊一 Shunichi Kometani

●研究開発センター コア技術研究室

Universities can no longer shut themselves in an ivory tower. Most research activities at present in universities depend on liaisons with industry. In the field of engine research, the collaboration between universities and the industry can be divided into two types. One is the type in which the industry provides funding and technical assistance while allowing the researchers a high degree of freedom in the way they pursue a given research target. The other type is one in which companies literally outsource the development projects they used to do by themselves.

The measurement facilities and software used in current engine research are becoming more sophisticated and convenient year by year. However, solutions for core technologies of next-generation engines cannot be derived simply by pressing the right button on the right machine or computer. Clues might better be found through the process of the construction of hand-made test devices in a creative laboratory. Based on this belief, we have developed two joint research projects of the first type.

These two projects include a Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) research project with Professor Foster of the University of Wisconsin, Madison, and a project investigating air-flow, combustion and emissions in a 5-valve motorcycle engine with Professor Arcoumanis of City University, London. A report on the former has already been published in this journal, so here a brief summary of the experiment results in the latter project is given.

1 はじめに

大学が象牙の塔であった時代はとうに過ぎ、大学の研究は企業との連携なしには成り立たなくなっている。エンジンの研究に関して、大学と企業の関係は大きく2つに分けられる。ひとつは、大学側に大幅な自由度を認め、資金や技術を提供し共同で研究する方法であり、もうひとつは、企業が本来自社で研究開発すべきプロジェクトをそのまま大学に委託する場合である。

エンジン研究の計測設備やソフトウェアは、年々高機能化し便利になっている。しかし、次の時代のコア技術は、ボタンひとつで簡単に解が求められるものではない。それは、知的な創発活動に満ちた研究室で、手作りの実験装置を組み上げて、生まれるものであろう。われわれは、このような考えに基づき、前者のスタイル、すなわち、大学と一緒に実験をしながら、次の2つの共同研究を進めてきた。

米国ウィスコンシン大学マジソン校フォスター教授との均一予混合自着火エンジン (HCCI, Homogeneous Charge Compression Ignition) の研究¹⁾⁻⁴⁾ と、英国ロンドン市立大学アルコマニス教

授との5弁エンジンの空気流動、燃焼、排ガス特性の研究^{5),6)}である。前者は既刊の本技報で紹介しているので、今回は後者の研究結果概要を述べる。

2 研究課題とテストエンジン

モーターサイクル用エンジンは、自動車エンジンに比べ高い比出力が要求され、バルブ開口面積を大きくとり、流量計数の高い吸気ポートを採用し、バルブ・オーバーラップを大きくする傾向にある。その結果、低負荷時に燃焼が悪化し、出力維持と排ガス低減の両立が課題となる。このとき、筒内で起こっている現象をレーザー計測、高速 FID (Flame Ionization Detector)、燃焼直接撮影などにより明らかにする。

テストエンジンは、単気筒水冷、吸気3弁、排気2弁をもつ5バルブエンジンで、諸元を表1に、バルブ配置を図1に示す。燃料供給は、混合気分布計測 (LIF) を除いて、吸気ポート上流に装着したインジェクタ (燃料圧力 300kPa) による。レーザー計測用に、延長ピストンとクォーツ・シリンダを装備した同じ諸元の可視化エンジンを製作した。

表1 Engine Specification

Engine Type	1Cyl. DOHC 5Valve
Bore, Stroke	73 mm, 59.6 mm
Displaced Volume	249 cm ³
Compression Ratio	9.5:1
Inlet Valve Open (IVO)	31° CA BTDC
Inlet Valve Close (IVC)	61° CA ABDC
Exhaust Valve Open (EVO)	61° CA BBDC
Exhaust Valve Close (EVC)	31° CA ATDC

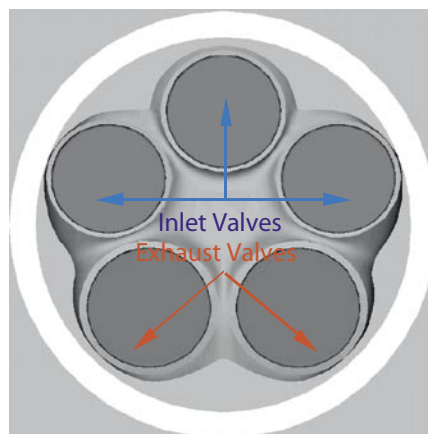


図1 Valve Configuration

3 筒内空気流動計測 (LDV)

レーザードップラー流速計を用いた筒内空気流動計測結果を図2に示す。測定条件は、モータリング WOT (スロットル全開)、3弁駆動、1,000 rpm (平均ピストンスピード $V_p=1.98\text{m/s}$)。吸気行程初期には2つの異なった回転方向の渦が形成されていた。吸気行程が進むにつれて、逆タンブル (反時計方向まわりの渦) は消滅するが、正タンブルは圧縮行程まで存在した。乱れ強さは、吸気初期に $3.5V_p$ あったが、圧縮終了時には $0.5V_p$ に低下していた。

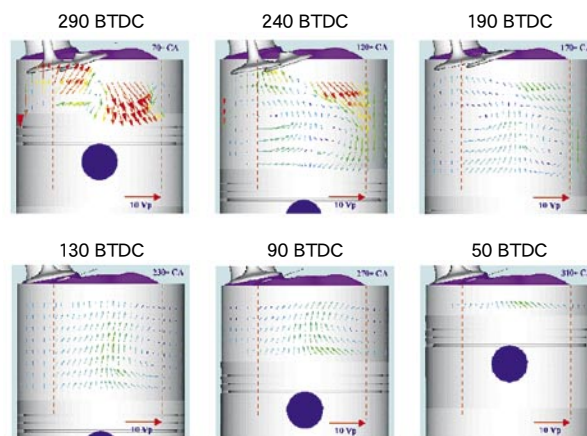


図2 筒内空気流動 (LDV)

4 筒内空気流動計測 (PIV)

PIV 法を用いて筒内空気流動を計測した。図 3 は、吸気弁を 3 弁とも駆動、図 4 は 1 弁だけを駆動した結果である。測定条件は、モータリング、WOT、1,500 rpm。各速度ベクトルは、100 サイクルの平均から求めた。図中の色の付いていない部分は散乱光の影響により計測できなかったところを示す。3 弁の場合、LDV 結果と同様、吸気行程初期に異なる回転方向の 2 つの渦が見られた。圧縮行程では、先に逆タンブルが消滅し、その後正タンブルも減衰した。1 弁の場合、吸気行程前半は 3 弁同様の流れが形成されたが、その後、吸気弁下側に巻き込む流れが成長して全体の主流となった。3 弁と 1 弁では、バルクフローが大きく異なった。1 弁では吸気および圧縮行程中に逆タンブルが継続的に存在し、2 つの渦を生成する 3 弁に比べ、強い筒内流動であることがわかる。

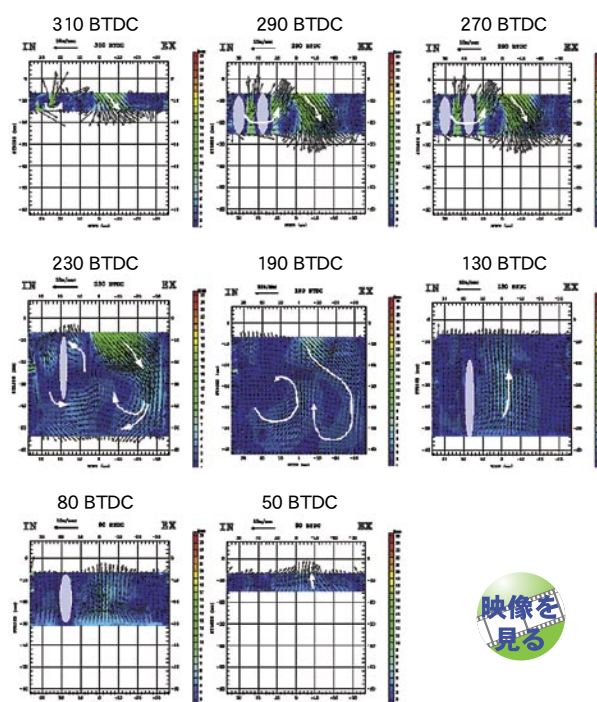


図 3 筒内流動（3 弁、PIV）

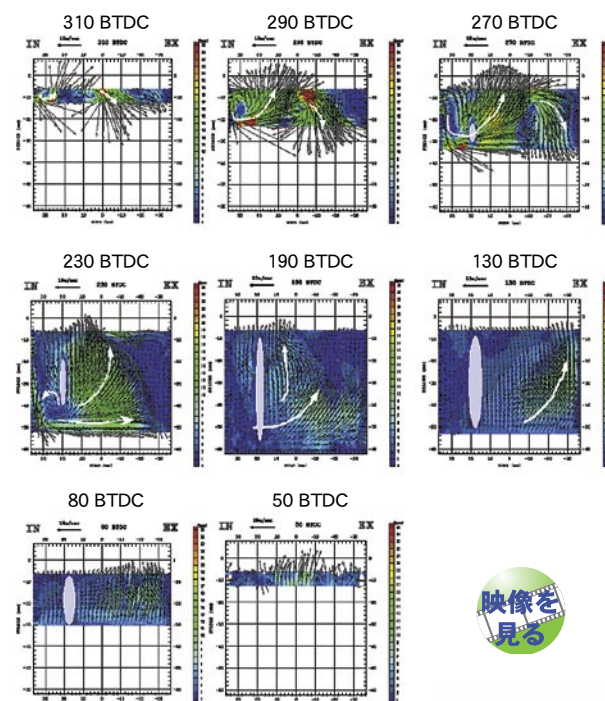


図 4 筒内流動（1 弁、PIV）

5 局部混合気濃度計測（高速 FID）

ファイアリング時の筒内の混合気状態を調べるために、高速 FID を用いて局所 HC（炭化水素）濃度を計測した（図 5）。サンプリングプローブは点火プラグに装着した。エンジン冷却水温は 70 度とした。供給 A/F（空燃比）は 12。測定条件は、1,500 rpm WOT、2,000 rpm WOT とし、燃料噴射時期を各々のエンジン回転数で、340 BTDC（上死点前）、120 BTDC とした。図 6 に示した結果から、3 弁は 1 弁に比べて、筒内混合気濃度が供給混合気濃度に対して、希薄な状態にあることがわかる。1 弁では、おおむね供給混合気濃度と筒内混合気濃度は等しかった。

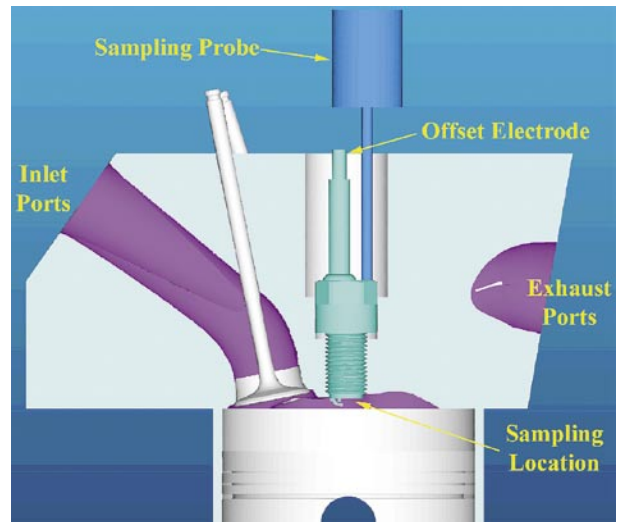


図 5 高速 FID による局部混合気濃度計測装置

6 混合気分布計測（LIF）

レーザー誘起蛍光法（LIF）を用いて、筒内混合気の濃度分布を計測した。本計測のみ燃料供給系を変更し、筒内直接噴射にした。スワール・インジェクタをシリンダヘッド中央に装着した（燃料圧力は 7Mpa）。燃料はイソ・オクタン、蛍光剤は、20% 3-ペンタノンを用いた。Nd-YAG レーザーは、266nm、70mJ。運転条件は、1,500 rpm WOT。結果は 50 サイクルの平均値。別途、濃度が既知の十分に予混合された混合気の計測結果から筒内混合気濃度の絶対値を推算した。図 7 は、噴射タイミングの混合気濃度分布への影響を示す。初期に噴射された燃料はピストン頂部に衝突し、圧縮行程の末期に混合気は成層化されていた。図 8 は、弁数の差を示している。サイド 1 弁では、3 弁に比べて強いスワールが得られ、圧縮行程終わりにより均一の混合気を得られた。

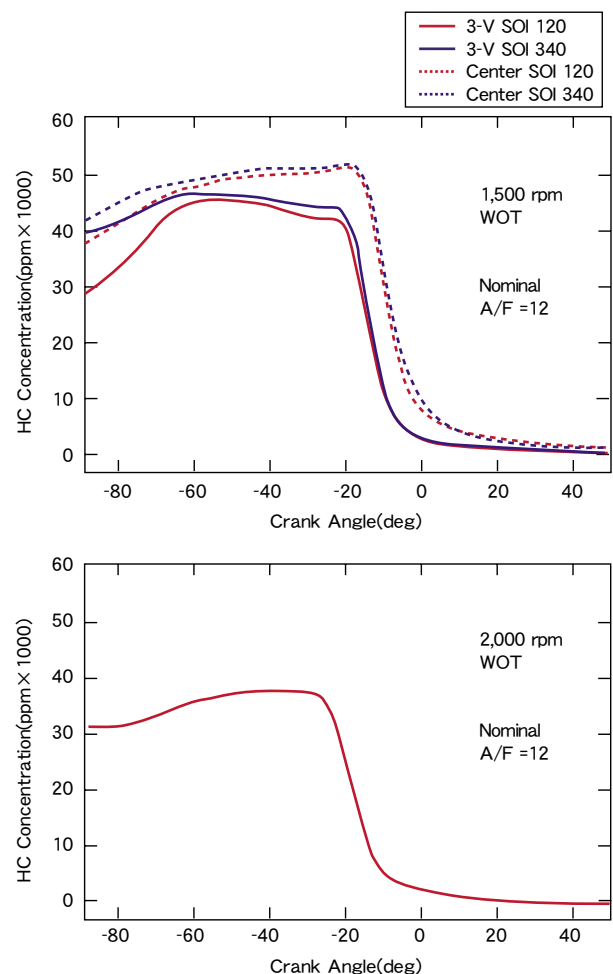


図 6 局部混合気濃度

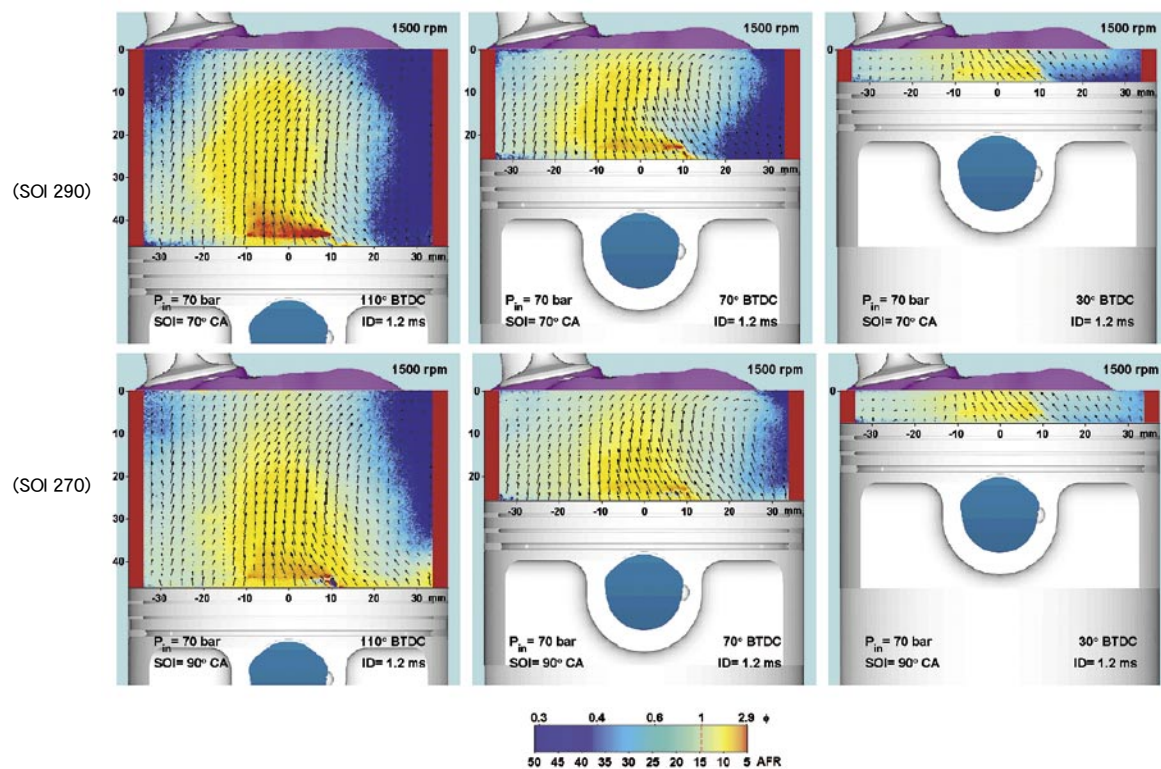


図 7 筒内混合気濃度分布（燃料噴射時期の差）

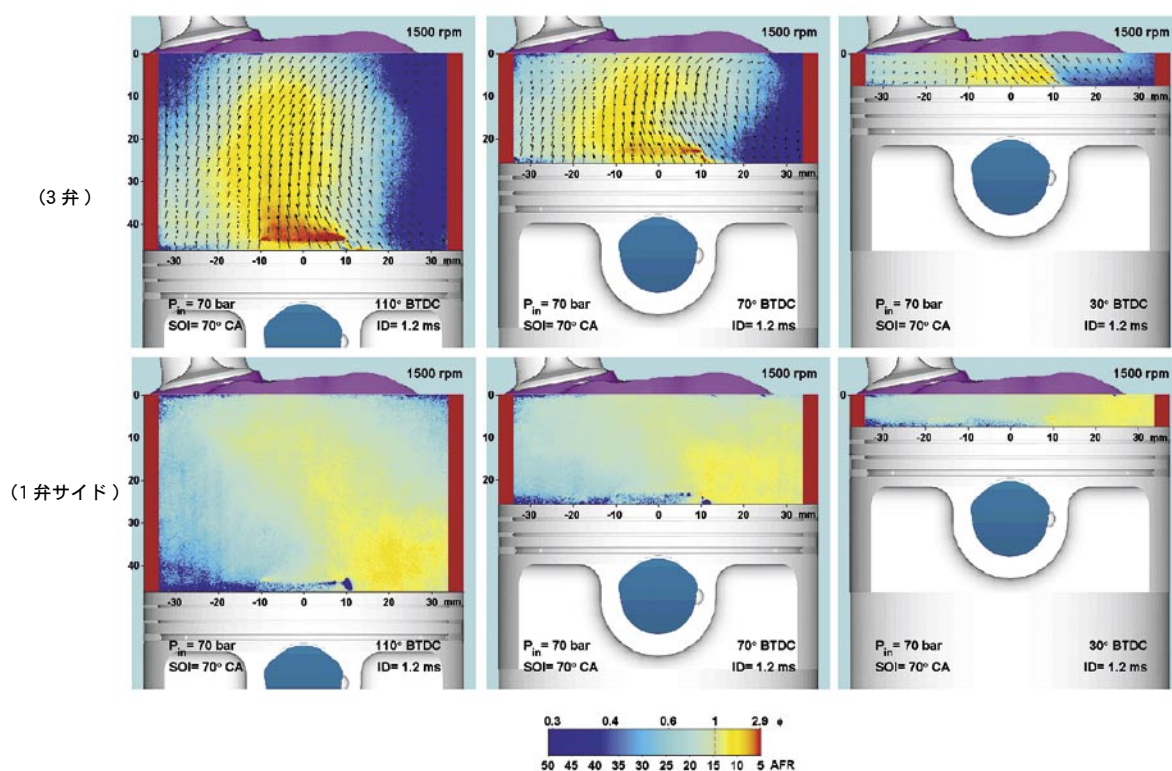


図 8 筒内混合気濃度分布（弁数の差）

7 火炎直接撮影

火炎が筒内を伝播していく様子を、延長ピストンの下に取り付けた45度の傾きを持ったミラーを介して、イメージ・インテンシファイア付きのCCDカメラで撮影した。撮影した範囲を図9に示す。連続する24サイクルから平均火炎面積を求めた。3弁とも駆動したときの結果を図10、中央1弁だけの結果を図11に示す。1弁の方が3弁より火炎伝播速度が速いことがわかる。点火後24度で、1弁の場合、火炎はシリンダの撮影範囲すべてに行き渡ったが、3弁では約半分程度にすぎなかった。これは1弁の場合の点火時期におけるプラグまわりの良好な混合気形成と、高い乱れ強度によると思われる。3弁では、バルブが閉じているときに噴射した場合（SOI（燃料噴射時期）120BTDC）の方が火炎速度は遅かった。1弁では噴射時期による差は小さかった。

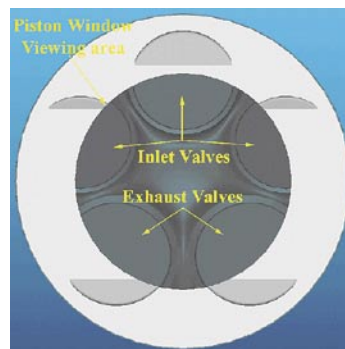
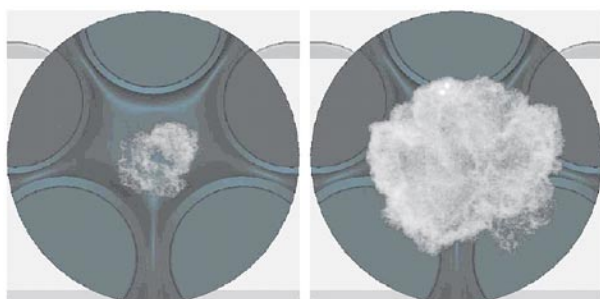


図9 撮影範囲

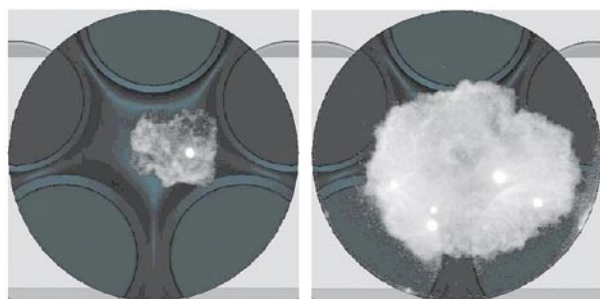
2,000 rpm WOT A/F=13 SOI 120BTDC



14 After Ignition

24 After Ignition

2,000 rpm WOT A/F=13 SOI 340BTDC

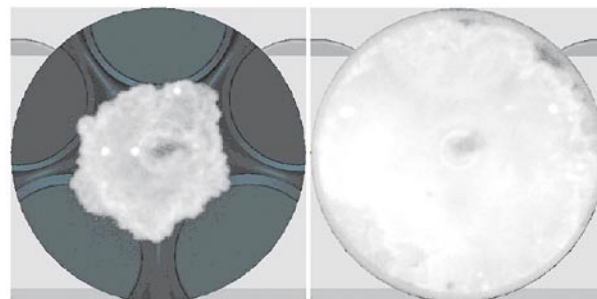


14 After Ignition

24 After Ignition

図10 燃焼撮影（3弁）

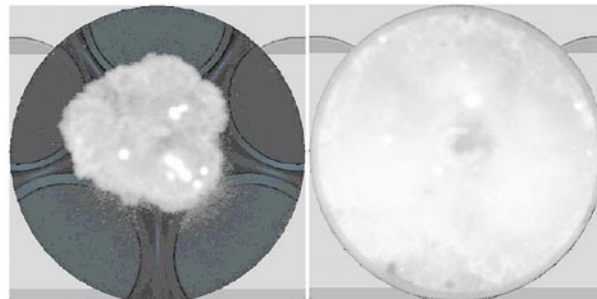
2,000 rpm WOT A/F=13 SOI 120BTDC



14 After Ignition

24 After Ignition

2,000 rpm WOT A/F=13 SOI 340BTDC



14 After Ignition

24 After Ignition

図11 燃焼撮影（1弁）

8 排気ガス (HC) 計測

3 弁と 1 弁の THC (総炭化水素) 排出の違いを調査した結果を図 12 に示す。3 弁では、1 弁に比べいずれの条件においても THC 濃度は高く、1 弁による THC の低減効果が確認された。3 弁での 2,000 rpm WOT では供給 A/F の変化 (12 → 14) に対し筒内 A/F は希薄な状態 (16 → 19) となる。そのため、極端な希薄状態での燃焼の悪化による HC の増加傾向が見られた。

9 エンジン共同研究あれこれ

これまでに述べた実験の多くは、当初英国インペリアルカレッジの熱流体研究室で始まった。実験室スペースは確保されていたものの、新たに動力計を導入し、可視化エンジンを設計製作し、レーザー装置や計測機器を調達するために、多くのエネルギーを費やした。この間、駐在員、大学スタッフ、本社担当者の間の意志疎通の難しさに加えて、仕事を進めていく上での日本と外国の習慣の差にとまどうことが多かった。特に、個人の業務担当が明確に分かれており、「これはわたしの仕事ではない」と主張するテクニカル・スタッフの頑固さと、時として怠惰にさえ感じられる仕事ぶりに困惑した。しかし、このことは欧米に共通して見られる現象らしく、日本の閉じた世界で、腹芸文化の中で育ってきたわれわれこそ変革の必要があるのかもしれない。

こんな苦勞をしてどうして海外で共同研究するのかと言えば、われわれの考えに共鳴して研究を実際に推進していただいた経験豊かな教授の存在があるからだ。アルコマニス教授がロンドン市立大学から工学部長として招聘されたときには、われわれも実験装置ごと一緒に移転した。多くのスタッフも勤務先を変え、教授の後に続いた。日本では、教授は、ほとんど身ひとつで異動するのが一般的と聞くと、この辺は英国の方が融通がきき、合理的だ。

インペリアルカレッジからロンドン市立大学への引っ越しには、またエネルギーが必要だったが、新たに整備された最新の計測設備を利用することが可能になった。2001 年 11 月、教授の活動が実り、ロンドン市立大学にエネルギー・環境センターがオープンした。BMW、トヨタ自動車(株)、ヤマハ発動機(株)などの企業が個々にスポンサーになり、レーザー計測やコンピュータシミュレーションを基にして、ガソリンエンジン、ディーゼルエンジン、燃料システム、ガスタービンなどの研究が行われている。

エンジン研究の主な対象は、機構、強度、振動などの機械工学から、流体、燃焼、制御にシフトした。機械工学全般に言えることかもしれないが、もはや、エンジン研究は、現地の優秀な若者を集めるこ

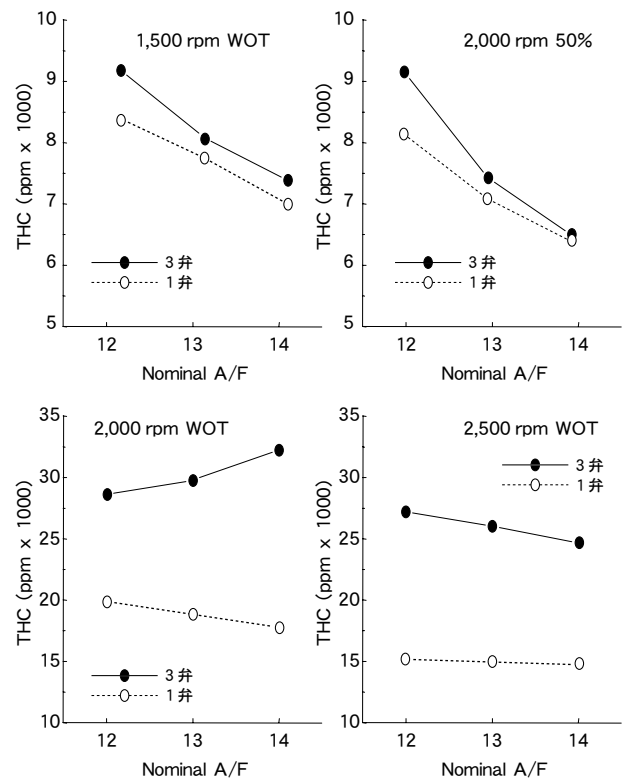


図 12 排ガス計測結果

とが難しく、留学生が目立つのも世界的な傾向だ。ついに、最近、いくつかのエンジン研究室では燃料電池の研究が始まった。燃料電池は燃焼を伴わない化学反応であり、エンジンとはかけ離れた技術のように思われるが、燃料と空気の分配、流量管理、触媒の活性化など、実は共通するところもある。

10 おわりに

筒内現象をいろいろな観点から計測し、空気流動を強化し、乱れを強くすることが、燃焼改善につながることを立証した。

ここで得られた定量的な計測データは、CFD (Computational Fluid Dynamics) によるエンジンシミュレーションの計算結果を検証するのに有用な情報となりうる。逆に、CFD を用いてパラメータスタディすることにより、実験結果をさらに意義あるものにできる。レーザー計測や CFD の計算で得られた結果は、実機テスト結果と照らし合わせてはじめて生きる。というのは、エンジニアリングの世界で最終的なアウトプットは実機で達成されて初めて価値があるからである。

■参考文献

- 1) 飯田実, 林素明, David E. Foster, Jay K. Martin : 予混合自着火エンジンの一般的性質と着火時期の予測, ヤマハ発動機技報, 2001 年 9 月, No.32
- 2) 飯田実, 森川健志, Aroonsrisopon, T., Sohm V., Werner P., Foster D. : HCCI 燃焼における炭化水素燃料性状の影響, 自動車技術会 2002 年 No.10-02 シンポジウム 「進化するガソリンエンジン」
- 3) Iida, M., Hayashi, M., Foster, D.E., and Martin, J., "Properties of Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) Engine with n-Butane Fuel", accepted for publication in ASME Journal for Gas Turbine and Power, 2002.
- 4) Aroonsrisopon T., Morikawa T., Iida M., Foster D. "Comparison of HCCI Operating Ranges for Combinations of Intake Temperature, Engine Speed and Fuel Composition", SAE Paper 02FCC-124
- 5) Kampanis N., Arcoumanis C., Kato R., Kometani S., "Flow, Combustion and Emissions in a Five-Valve Research Engine", SAE Paper 2001-01-3556
- 6) 加藤隆輔, 木下久寿, 米谷俊一 : モーターサイクル用 5バルブエンジンの筒内流動による混合気形成への影響, 自動車技術会学術講演会前刷集, 2002 年春季大会, No.74-02, 20025259

■著者



米谷 俊一