

解説 *Explanation*

私の研究とものづくり

原稿受付 2011 年 3 月 23 日

ものづくり大学紀要 第 2 号 (2011) 66~71

神本武征

ものづくり大学 学長

**An overview of experimental equipments designed and built for
fundamental study on engine combustion**

Takeyuki KAMIMOTO

President of Institute of Technologists

Abstract

The author has been involved in research on combustion and emissions from internal combustion engines in the last four decades. This article starts with an introduction of his experiences on hands-on-learning at high-school and college, focusing on aero planes and automobiles. Attracted by the mechanism of these machines, he started his academic career at TITech, and has been working on studies on combustion and emissions from diesel engines. He constructed a number of experimental equipments and machines that he and his students designed and built. The major part of this article concerns the description of the objectives and performances of the machines and instruments that he developed. These include a combustion bomb for studying fuel evaporation, an optical equipment for measuring flame temperature in the engine cylinder, and a rapid compression machine designed for easy access to optical diagnostics.

Key Words : internal combustion engine, combustion, emission, optical measurement

1. はじめに

私が模型製作を始めたのは中学生の時代である。少年クラブの付録である幻灯機、写真機、コメット号の製作から始め、夏休みの宿題にはゴム動力を使った潜水艦、プロペラ船、ライトプレーンの製作に夢中になった。高校時代にはエンジン付きのUコントロール機とソリッドモデルに発展、ソリッドモデルは浦和の模型屋から注文を受けてゼロ戦、紫電改、中島4式戦闘機、チャンスボートカットラスジェット戦闘機、超音速試験機 X-5などを製作した。趣味と実益を兼ねた実入りの良いアルバイトであった。写真1は当時製作したノースアメリカン F86F 戦闘機で、現在 学長室に展示してある。大学に入ると当時もっとも人気のあ

った自動車部に入り、エンジンを中心に車の整備を学んだ。ようやく模型から本物に触れるように



Fig.1 Solid model: F86F jet fighter

なった。3年生の春に晴海ふ頭でアメリカ製ホバークラフトのデモフライトを見て興奮。これを作ろうということになり、ダイハツからミゼットの2サイクルエンジンを2台供与してもらい写真2のホバークラフトを製作した。搭乗しているのが神本である。残念ながら基礎学力のなさから設計ミスで失敗した。2年生から戦後禁止されていた航空機学科の残党の研究室に所属してエンジンと流体力学を学んだ。実験機材が乏しいので昼は輪講で名著を読み、夜は飲みに出掛けるのんびりした時代であった。流体力学に関しては *Boundary Layer Theory*, *Gas dynamics*, 岡本哲史著「流体力学」, 谷一郎著「飛行の理論」などを勉強した。

修士課程を修了してすぐ内燃機関講座の助手になった。旧航空機学科の教授は助手に何も要求せず、また指導もしなかった。「何をしたら良いでしょう」と聞いたところ「これからは燃焼が重要になる」とヒントをいただいた。あとは自由放任である。しかし、燃焼と言われてもどこからどのように攻めるのか、さっぱり分からず途方に暮れた。それから苦闘の10年を経て自分の研究スタイルがようやく確立してきた。すなわち、独創性のある研究を行うには目的に合った独自の装置を作り、それを駆使して他の追従を許さぬデータを取ることである。1970年から2010年までの40年、独自の実験装置を作り続けた。この「ものづくり」の概要とそこで得た経験について述べてい。

2. 実験装置の製作

2.1 ディーゼル噴霧の蒸発過程に関する研究



Fig.2 A failed model of hover craft-

燃焼の第一段階は液体燃料の蒸発にある。そこで高温不活性の雰囲気中に軽油を数ミリ秒高压で噴射して蒸発現象を調べる事にした。問題はいかにして温度 500°C 以上、圧力 20 気圧以上の雰囲気をつくるかである。定常的にこのような状態を作るには大掛かりな装置が必要であり、しかも設計を誤ると危険である。予算もない。考え抜いた末に到達したのは、定容容器にプロパンガスと空気の過濃混合気を火花点火して燃焼させる方法である。燃焼ガスの圧力と温度は燃焼室壁への熱損失によって低下してゆくので所定の温度状態になったところで燃料を噴射すればよい。デジタル制御のない時代なので、噴射タイミングの設定と圧力データの収録はアナログの遅延回路によって行った。圧力経過はメモリースコープに蓄積し、フィルムカメラで撮影した画面像を物差しで定量化するという極めて原始的なデータ採取方法であった。苦心して製作した手づくり低予算の装置であった。米国カミンズ社の Lyn 博士（副社長）を招いて東大で行われた研究紹介では博士に実験手法のアイデアを高く評価された。

図3に製作した燃焼容器を示す。図4は燃焼終了後に燃焼ガスの圧力が熱損失によって低下してゆき、途中で噴射した軽油の蒸発によって急速に低下する様子を示している。この蒸発による圧力低下を定量的に計測した結果を数値シミュレーションによって解析した。解析に用いた液滴の蒸発理論は当時 NACA (NASA の前身) が宇宙ロケット開発のために研究した結果を NACA Report に発表していたので、これを参考にした。蒸発の理論解析結果は MIT の Heywood 教授の著書にも引用

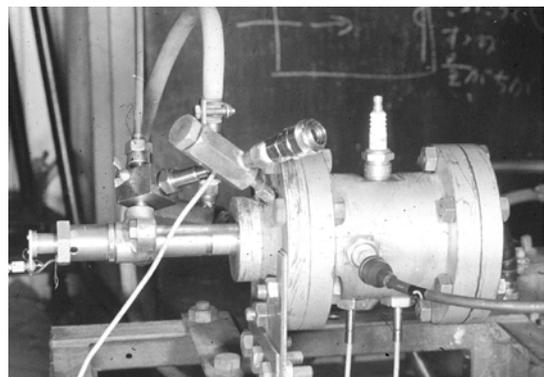


Fig.3 A combustion bomb for studying fuel evaporation

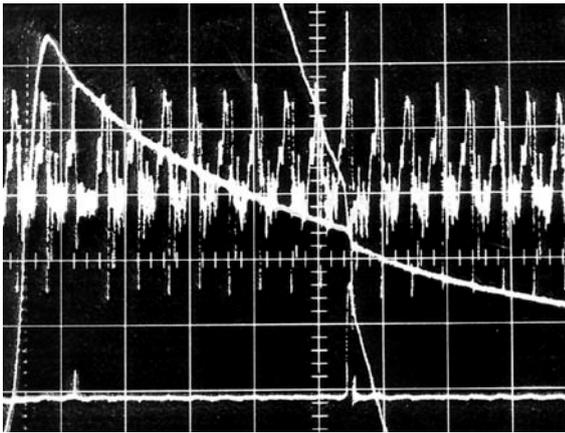


Fig.4 Time record of burned gas pressure in the bomb, showing a sharp drop at an instant of fuel injection into the hot gas.

されている。燃料の蒸発過程の研究は私が独自で考えた最初の研究であり、博士論文の前半を占めている。投稿した論文は期せずして日本機械学会論文賞を受賞した¹⁾。

2.2 2色法によるディーゼル火炎温度の計測

蒸発の次は燃焼である。自動車技術会の燃焼と排気委員会が三菱自動車に依頼して製作した5台の単筒ディーゼルエンジンの1台が東工大の研究室に納入された。勇気百倍して燃焼の高速度撮影を計画した。エンジンに撮影用の石英ガラスをはめ込む部分の設計は未知の分野であったが、ガスケットの材質、ガラス窓の固定法などを工夫して信頼性のある方法に辿りついた。また毎秒5000コマの高速度撮影なのでクランク角度とエンジンの照明には高輝度の光源が必要であり、500ワットの超高圧水銀灯2個を用いた。照明の調整をやりすぎて左目をやられて病院へ行ったところ、溶接工と間違えられる始末であった。米国のRedLake社のHycamカメラの操作習熟にも時間がかかったが、1年後には何とか納得できる画像がとれるようになった。

当時、日本では珍しかったのでNHKテレビでも放映されたが、無声映画なのに爆発音が擬音で入っていたのには驚いた。各社のエンジニアも見学を訪れ、高速度撮影の手ほどきをした。

1970年代当時、ロスアンゼルスでの光化学スモッグが問題になり、マスク法による排気規制が始まった。ガソリンエンジン、ディーゼルエンジン

とも排気中の窒素酸化物NO_xの濃度を大幅に下げることが要求された。世界中の研究により、低温では不活性な大気中の窒素が燃焼室で高温になると酸素と反応して窒素酸化物を生じること、したがって燃焼温度が窒素酸化物の生成を支配する重要な要因であることなどが分かってきた。

排気ガスを吸気に還流するEGR方式によってNO_xを低下させる対策が進められたが、誰も燃焼温度を測定していないので、現象が定量的に把握されていない。エンジン内の火炎温度を測定できれば大きな貢献ができると考えたが、どうやってディーゼルエンジンの火炎温度を測定するか？高速度カラー写真を見ると火炎の色と輝度は燃焼の進行につれて変化する。その理由を説明せよと恩師の山田教授にゼミで指摘されていたのをヒントに、火炎の色と輝度に着目した温度測定法を開発することにした。

しかし、文献調査の結果、1940年に英国でLyn博士が、戦後の1947年にWisconsin大学のOtto A Uyehara教授が既に研究論文を発表していることが分かった。またその方法は1932年にMITのHottelとBroughton教授によって発明された2色法に遡ることが判明した。これにはがっかりしたが、よく読むと電子機材が旧式でありデータの信頼性が低いこと、またコンピューターによる多数サイクルの統計的処理が為されていないこと、輝度の検定が不十分なことなどが判明した。気を取り直し

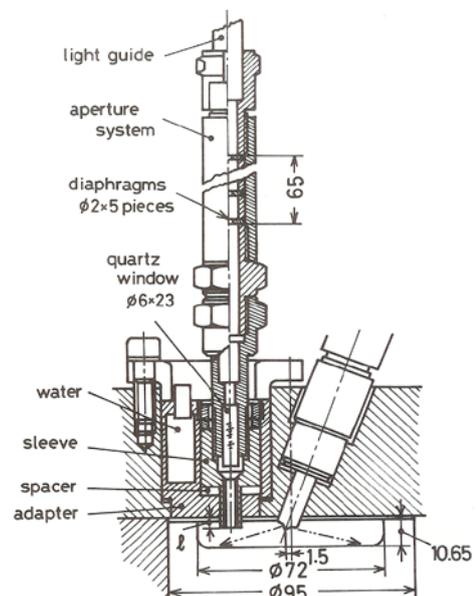


Fig.5 An optical probe for detecting light from the flame

で最新の装置の設計と製作に取り掛かった。

まず苦労したのは図5に示すエンジンヘッドに取り付ける光プローブの設計である。先端には火炎からの光を取り出すために石英ロッドが付いているが、エンジンを回すと短時間で表面にススが付着して光が検出できなくなる。冷却熱量を加減するために石英ロッドの突き出し量と冷却水温度を変化させた実験を繰り返し、最適条件を得る事ができた。水温度が最も重要な要素であり、石英ロッドの表面温度を高温に保てばススが付着しなくなり、数10分の連続運転が可能となった。

次の問題は輝度温度の検定である。ディーゼルエンジンの燃焼温度を測定するには 2200°C 以上の検定が必要であるが、市販の黒体炉は最高温度 1800°C 以上のものは存在しない。止む無くこれも自作することにした。溶鉍炉の温度などを測定する光高温計のメーカーである東京精工との共同研究を開始してほぼ2年、ついに完成した2号器が図6である。

外径12mm,肉厚3mmのカーボンチューブを水平に通し、数ボルト、10から100アンペアの大電流を流して直径10mmのターゲットの温度を高める。炉内に空気が残存するとカーボンは燃焼して損傷するので、通電まえに窒素ガスで炉内を充分パージする。しかし、何回やってもカーボンは損傷する。安い窒素を諦めて高価なアルゴンを購入してパージしたところ無事に 2200°C の目標を達成することができた。機械屋の悲しさ、窒素が高温で炭素と反応することを知らなかったのである。現在

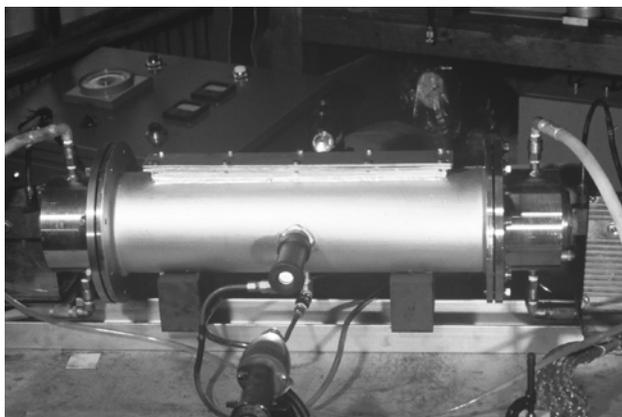


Fig.6 Prototype blackbody furnace for calibration of radiation

この試作品から発展したコンパクトな製品が東京精工から販売されている。

最後に苦労したのはコンピューターを用いた大量データの処理である。購入したTOSBACK-10というミニコンは幅1m,高さ1.5mほどの巨大なマシンであるにもかかわらずマシン語しか解さない。4年生が必死になってマニュアルと首っ引きで解析ソフトを作製してくれた。なにしろルートもログもゼロからマシン語からつくるので大変であった。

私と博士課程の青柳,松井君の3人で4年がかりで取り組んだ労作である。指導教官と連名で温度測定と平行して実施したガスサンプリングの結果をまとめて投稿したところ, 他にもや日本機械学会論文賞受賞の栄に浴した²⁾。図7はディーゼルエンジン燃焼室内でススと NO_x がいかに生成されるかを世界で始めて示したものであり, MITの教科書ほか多くの論文に引用された。

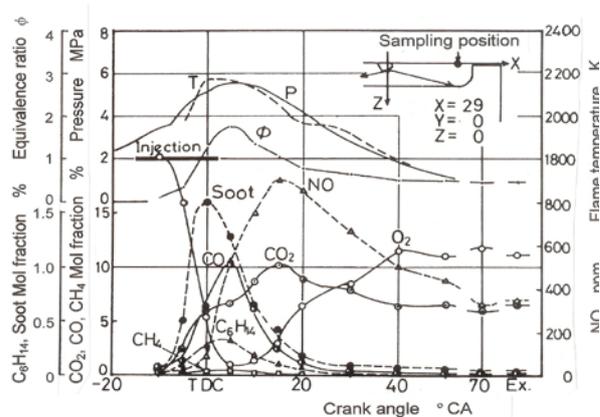


Fig.7 Time records of flame temperature and NO concentration in the cylinder of a diesel engine

2.3 急速圧縮機によるディーゼル燃焼の観察

1975年の夏, 松岡助教授に連れられて, 欧米の研究機関を視察した。羽田から家族と卒業生のバンザイの声に送られて欧州へと向かった。ドイツ, フランス, イギリス, アメリカの各地の代表的な大学と研究機関を訪問したが, 重厚な実験設備とユニークかつ精緻に設計された実験装置に圧倒された。「これじゃ勝てない」というショックが私の闘争心に火を着けた。実験装置の中で最も興味を引いたのは急速圧縮機である。シリンダー内の

ピストンを1回だけ作動させて中の空気を急速圧縮してエンジン内と同様の条件を作り出し、燃焼室に設けた大きな観測窓を通して燃焼の様子を仔細に観察することができる。見学したアーヘン工科大学の縦型小型急速圧縮機、英国シェル研究所の小型対向型急速圧縮機、MITの水平型急速圧縮機はそれぞれ目的に応じて異なる仕様を持っていた。

帰国した私はディーゼル燃焼の基本である壁面衝突のない自由噴霧が実現できる大型急速圧縮機の製作を決心した。まずスケール1/5の装置を試作して勉強したのち、直径200 mm、ストローク560 mm、70気圧の空気圧による駆動力20トンの巨大な急速圧縮機を小林助手と設計した。ピストン駆動時に装置が回転モーメントで転倒ないように軸心は可能な限り低く設計した。ピストン上面とシリンダヘッドは石英窓で構成し、いかなる光学測定も可能なようにした。この世界最大の急速圧縮機を実現するための企画書をディーゼル各社に送って製作寄付金を集め、さらに文部省科学研究費などを合算して製作費を工面した。製作は日産ディーゼル上尾工場が引き受けてくれ、設計図面の最終チェックは林研究部長が1日ばかりで行ってくれた。水平で3.2メートルの長さなので、軸心の精度を確実にするため各部品の直角度を明記するよう指導された。駆動軸とピストン軸との連結には水平度の誤差を逃すため球面継ぎ手を採用した。この巨大かつ駆動力の大きな機械を支える基礎の設計も行った。大岡山地区の土圧が推力20トンに耐えるためのコンクリート基礎の寸法、大型急速圧縮機を設置する定盤の寸法を決定し、大学の第1会議室に業者を集めて入札工事の説明を実施した。

図8に急速圧縮機の最終図面を示す。右側が空気圧駆動と油圧制動部、左側が被駆動部のピストンとシリンダーである。ピストンは中空になっており、シリンダー側面の窓からの平行光を45度ミラーによって燃焼室に導く構造である。さて装置が完成してから苦労したのは油圧制動部の寸法調整である。駆動ピストンが最終端で油圧室端面に激突しないようにソフトランディングさせる必要がある、油圧室の内側の僅かなテーパ部と駆動ピストン外面とのクリアランスが制動性能を決定す

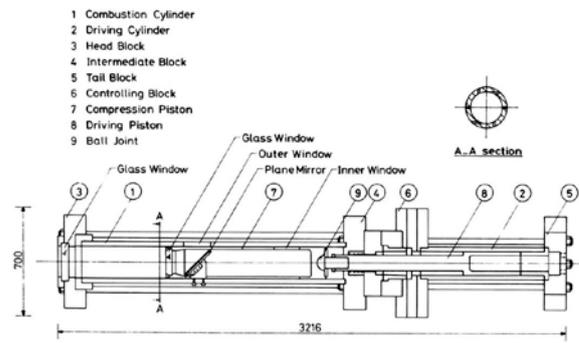


Fig. 8 Cross sectional view of rapid compression machine

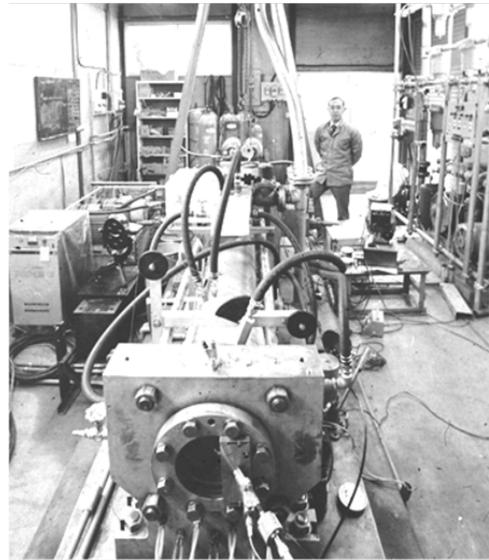


Fig. 9 World largest rapid compression machine just completed

る。このクリアランスを最適化するのにおよそ1年かかった。最終的に圧縮時間約150 msの装置が完成した。図9が装置全体像である。後方に立つのが40歳の著者、その横の見えるのは高圧空気ポンプである。右側がスワール発生用の空気ブロワー、左側の4角の箱は照明用クセノンランプの電源である。

この装置を駆使して多くのディーゼル燃焼の基礎研究を行った。火炎内のススとOH分子の可視化、火炎への空気導入率の測定、壁面に衝突する火炎と壁面の熱伝達の測定などである。図10は火炎内のススを可視化した1例である。論文の発表によって装置は世界の注目するところとなり、SwRIのShahed博士、Daimler社のMaly教授、Imperial collegeのArcoumanis教授、Istitute MotoriのLorenzo



Fig.10 Visualized soot in a diesel flame
(combustion chamber diameter: 196 mm)

所長と Corcione 部長など多くの研究者が見学に訪れた。本装置を用いて実施した燃料噴射圧力が燃焼に及ぼす影響に関する研究で日本機械学会論文賞と SAE, Corwell Merit Award を受賞した³⁾。

3. あとがき

本論では著者の研究生活の前半で製作した3つの実験装置について解説した。それぞれ特定の目的を持つ自作の装置であるが、それは研究の目的が世界で類の無い研究を志向したからである。目標とした性能と実験結果が得られたときの喜びは何ものにも代えがたく、その知的興奮を求めて研究生活を続けているようなものである。紹介した装置による研究がいずれも学会賞を得たことは、研究が工学的に価値あるものと認められたのであり、装置を製作した甲斐があったと言うべきである。

どうやって次々と新しい研究テーマと新しい実験装置をつくりだすのでしょうか？とある講演会で聞かれた事がある。年に4-5回は定期的に外国へ出張して世界の最新動向を掴むこと、企業の研究者と情報交換して将来動向を見極めるなどがテーマ選定に不可欠である。また新しい装置のアイデアは少年の頃から培ったセンスと自動車部で学んだほんものの機械をいじった経験によると思う。設計と製作に当たっては研究室の学生の力によるところが大きく、彼らをその気にさせるのも教師の腕である。

次回は研究生活後半に製作した装置について紹介する。

参考文献

- 1) 神本武征, 松岡 信, 杉山 博満, 青柳 宏: ディーゼル機関の燃料噴霧の蒸発過程(第1報, 噴霧の熱吸収に関する実験), 機論 40-339, (1974) pp. 3206-3215.
- 2) 神本武征, 青柳 友三, 松井 幸雄, 松岡 信: 直接ガスサンプリング法による直噴式ディーゼル機関における NO とすす生成に関する研究, 機論(B) 46-403, (1980) pp. 540-549.
- 3) 横田 治之, 神本武征, 小林 治樹: 画像計測によるディーゼル噴霧・火炎の研究(第1報, 噴射圧力が噴霧特性とすす生成および燃焼特性に及ぼす影響) 機論(B) 54-499, (1988) pp. 741-748.