

日本機械学会エンジンシステム部門

A-TS07-56 「内燃機関を改良する継続的技術力に関する研究会」 第3回研究会議事録

日時： 2014年11月29日(土) 13:30-17:00

場所： 名城大学 名古屋駅サテライトMSAT

出席者： 23名

中野道王（講師, 日本工業大学）, 葛山裕史氏（講師, 豊田自動織機）, 大平哲也(主査, スズキ), 藤村俊夫(幹事, 愛知工業大学), 田村守淑(幹事, 東邦ガス), 永田龍三郎（アイシン精機）, 井原禎貴(岐阜大学), 河野正顕（部品総研、代理）, 太田篤治(トヨタ自動車), 太田安彦(元名古屋工業大学), 中島公平(名城大学), 鬼頭俊介（豊田高専）, 内田登（新エイシーイー）, 芹澤毅（ダイハツ）, 長谷川国夫（元ダイハツ）, 鈴木孝司（豊橋技科大）, 佐々木覚（デンソー）, 高島良胤（大阪ガス：代理）, 中村俊秋（豊田自動織機）, 園比呂志（SWRI）, 神尾純一（ホンダ）, 飯田晋也（マツダ：代理）, 鈴木浩高（いすゞ中研：代理）

(敬称略)

議事

#### I. 話題提供（その1）

講演題目：GC×GC-TOFMS を用いた燃焼反応解析

講師：日本工業大学 中野道王氏

人材教育に関して日本工業大学における学生フォーミュラの活動を紹介します。学生フォーミュラは競技という側面もあるが、ものづくりを通じた人材育成を重視している。日工大は2009年から参加しており2011年には総合14位と高成績であったが、2012年は欠場、昨年2013年は40位と振るわなかった。特に、昨年度は最後のトライアルで完走できなかった。今年は完走を目標にして活動してきた。現在、20名の学生が履修申告して院生6名、卒業生がサポートする体制である。日工大の特徴として加工設備が充実しているので、基本的にほとんど全ての部品を学生が自作している。車のエンジンはヤマハのエンジンを使用。CVTを使っているのでコーナーでのキレが悪く完走するにはそれなりのドライブテクニックや注意深い運転が必要。今年の成績はまずまずの23位だった。クルマ性能や競技は得意であるがプレゼンの成績がよくない。今年、履修申告した4年生は18名いたが残ったのは6名といつもこの活動についていけない学生がいる。

学生とのふれあいの中で感じるのは、共通話題（体験、知識、興味）の減少、ジャンク情報の摂り過ぎによる肥満脳の蔓延である。工業大学の学生だがメカや車に興味を持つ学生が少ない。全体の1割から2割の学生は車に関心があるが、好きな車を聞いてみるとミニバンやエコカー。スポーツカーが興味を中心であった我々の若い時代とは隔世の感がある。また、自動車メーカーのカタログも最近寂しいと感じている。スポーツタイプの車でさえ燃費表示がされ動力性能より目立っている。昔のカタログは技術のことが詳細に記載されていた。ユーザーがわかろうがわかるまいが熱く技術のことを語っていた。エンジン出力やトルクのグラフについても最近では数字が記載されていないが、かつては細かな数字も記載されていた。こういったことも学生のメカ離れの要因の一端と考えている。

詳細化学反応解析については学生時代から行っているがノルマルヘプタンについては1995年から研究を開始した。現在は解析技術が進みHCCIなど着火遅れについて実験では成し得ないことが計算上で

いろいろできるようになった。詳細反応モデルは便利なものであるが、現在まで反応モデルの骨格は変化していない。低温酸化反応の骨格も 1960 年代から変わっていない。精度向上等も重要であるが別の側面として未知の物質を探求したいと考え研究を開始した。

ガスクロマトグラフ (以下 GC) は、採取した物質をカラムに流通し、カラム内の吸着脱着の時間の差が物質によって異なることを利用して物質を分離する。吸着剤を選択することで沸点、極性、硫黄との親和性などの特性で分離パターンが異なってくる。物質の沸点だけで分離すると複数の物質のピークが密集し物質特定が難しくなる。

そこで GC×GC では例えば、沸点と極性など吸着特性の異なるカラムを 2 種類用意し、適用することで沸点と極性による 2 次元クロマトグラフを取得することができる。一般的な GC では不可能である成分分離が可能となり物質同定が容易となる。

TOFMS は GC×GC で分離された物質をイオン化して電界中に導入することで加速し、フライトチューブでの飛行経路の距離を測定する。飛行経路の距離で質量/電荷比が分かり、データベースライブラリーで検索して物質を同定する。その際、ライブラリーとの適合度を示すマッチファクター (Match Factor) が 900 以上となったものを研究では検討対象とした。マッチファクターは 999 が最高点であり、900 以上というのはかなり高い適合度のものである。

エンジンから直接排出される排ガスの分析を試みた。供試エンジンはボア×ストロークが 84×70mm の単気筒 4 サイクルエンジン、燃料として初めはレギュラーガソリンと 10W-30 オイルを用いた試験を行った。燃料を構成する成分が多く、排気ガス成分も極めて多い。また、オイルの影響が大きいため解析するのは容易ではないことがわかった。

そのため、つぎに燃料についてはノルマルヘプタンの単成分を使用し、オイルは 100% 化学合成油で行うことにした。単成分燃料を用いても排気中から多くの化合物が検出されピーク数は 1800 となった。マッチファクター 900 以上のものは 130 であり、燃料やオイルに含まれていない各種化合物の存在が示唆された。さまざまな分子量の含酸素化合物、含窒素化合物は芳香族系化合物に多く見られた。側鎖や酸素、窒素の有無から 7 種類のグループに分類した。

つぎに燃料がトルエンの場合との比較を実施した。同様にマッチファクター 900 以上のものを対象としたがピーク数は 100 程度に減った。トルエンではアロマ系がほとんどで飽和炭化水素は出てこないことや、多環化しやすいことがわかった。

ノック発生条件での低温酸化反応について調べるため九州大学の北川先生と共同で定容燃焼器での研究を実施した。ノルマルヘプタンを燃料として当量比 1、初期圧 0.33MPa、初期温度 420~520K の場合の空気予混合気の火炎伝播を対象とした。初期温度 480K で激しい圧力振動が発生した。480K 以上においては逆にノック強度は低くなった。また、伝播速度は 480K までは初期温度が高くなるにつれて大きくなったが、480K 以上では逆に小さくなった。

480K 以上のところの挙動に関心があり、GC×GC-TOFMS を使って解析を試みた。実験では初期温度を 3 分間保持して加熱した後に燃焼試験を行うので、510K の条件で 3 分間保持した混合気を分析した。燃料にノルマルヘプタンだけを使用したにも関わらず分枝系炭化水素、ナフテン系炭化水素、芳香族炭化水素の存在が示唆された。その多くは従来の炭化水素の低温酸化反応に関するモデルでは考慮されていないものであり興味深いものであった。

## Q&A (敬称略)

<太田> : 分析したものは安定物質だけか? また、安定物質の定義は何か? ⇒ サンプリング管で冷却して安定し、短期間は反応しないもの。

<太田> : 今回、従来モデルでは考慮されていない物質は全体として、鼻葉的に全体反応に寄与するものなのか? ⇒ 今後、調べていく。

<藤村>

実際のエンジンでは、オイル混入や乱れや流れ等の影響があると思う。定容器実験ではそれらの影響を考慮したものではないか?

⇒ オイルを入れると実験が難しい。また、いろいろな要因が入ってくると切り分けが難しいので今の段階は基礎的に取り組んでいる。ただ、温度が重要なので初期温度の影響から取り組んだ。

<田村> 燃料とオイルからの生成物は分離できるものなのか

⇒ 重合物はあるが、元の成分がわかっているならば分離できるものと考えている。

<飯田> 定容器実験において高温で3分間保持し燃焼が変化した理由は?

⇒ 燃料が酸化したため。

<神尾> 定容器実験は冷炎が関与していると考えられるが、それぞれの条件における冷炎の割合などはわかっているのか?

⇒ 圧力履歴からの解析は行っていない。480K のノック発生時には冷炎の波が観察できた。510、520K では冷炎は観察できていない。

<大平> 大量 EGR、高過給条件では、未燃の炭化水素系の成分が点火/着火までにエンジンシステム内に長い時間滞在するため、本解析は興味深い。未知なる物質が ppm オーダーの微量であっても、燃焼に影響してノックが発生したり、抑制されたりするケースがあるかもしれない。

以上

## II. 話題提供 (その2)

講演題目 : 燃焼コンセプトの現象解明

講師 : 株式会社豊田自動織機 エンジン事業部 葛山裕史氏

ディーゼルの燃焼コンセプトについては、2007年くらいから PCCI を使った燃焼検討を開始し研究を進めてきたが、コンセプトとして良さそうなものが出てきたので、紹介する。

全体としては、研究の背景、コンセプトの概要、コンセプトの信頼性を高めるための、CFD、燃焼可視化評価についてまず説明し、そのあと実際の走行における PCCI 適用範囲、エンジン運転環境の違い、セタン指数の違い、過渡の制御方法、欧州 NEDC モードでの課題と効果について解説する。

### 1. 背景

11年秋にディーゼルの CO<sub>2</sub> メリットを維持しながら EURO6 に対応するにあたり、NO<sub>x</sub> を大幅に低減できる技術として、後処理 (NSR, SCR)、可変動弁系、2 ステージターボ、LPL—EGR 等コストアップを伴うアイテムを使わず、PCCI (噴射の方法) で実現可能なコンセプトを発表した。当時、PCCI は早期噴射+大量クールド EGR が主流で  $\phi$ -T マップ上で、NO<sub>x</sub>、PM の高濃度領域から離せる一方、

温度が低い場合 HC,CO,燃費が悪いあるいは PCCI は適用範囲が狭く効果が少ないという課題があった。

これまで PCCI の経験が少なかったため、これらの課題に対し、まず現象を解析した上で課題を抽出し、解決することとした。

## 2. コンセプト

基礎実験として 4cyl 2.2L ディーゼルエンジンを用いた。圧縮比 15.0、VNT、HPL-EGR という仕様である。

2000rpm\*12Nm EGR 率 55%では、早期に噴射すれば NO<sub>x</sub>、ノイズは低減するが、燃費、HC は大幅に悪化する。(負荷が低いのでスモークは出ていない) そこで、TDC 近傍噴射の HC、燃費悪化の抑制効果と高い等容度を活かさないと考え、分割噴射を考えた。

熱発生を 2 段階とすることで、1 段目で NO<sub>x</sub>、ノイズを低く抑え、2 段目で未燃 HC、CO の酸化を助長できる。ここで 2 段目は着火遅れを考慮して混合促進できるように、噴射時期を考えないと、局所的リッチによりスモークが発生する。噴射時期の最適化で予混合時間をうまく確保すれば、φ-T マップ上で Soot、NO<sub>x</sub> の高濃度域を避けることが可能となり、熱発生は狙い通りにコントロールできることがわかった。

本コンセプトの燃焼は、時間差をもった 2 段予混合燃焼であり、2 段目の燃焼による未燃分の低減(酸化促進)が特徴であることから、D-SPIA(Diesel Staggered Premixed Ignition with Accelerated oxidation)燃焼と名付けた。この燃焼コンセプトの Key は 2nd 噴射の時期と量をスモークを出さないようにいかに制御するかにある。

## 3. 現象解明

次に 4cyl 2L ディーゼル(圧縮比 15.8)を用い、1300rpm\*15mm<sup>3</sup>/st A/F19.6 のもとの、2 段噴射の時期を変更した際の予混合期間(噴射の終わりから着火までの時間)とスモーク、ノイズへの影響を調査した。2 段噴射時期 2° ATDC を境にスモーク、ノイズ共に悪化する事がわかり、この現象解明のため豊田中研の協力のもと、燃焼シミュレーションと燃焼可視化を行った。シミュレーションでは AVL の FIRE を用いてノズル内流れと筒内噴霧の連成し、φ-T マップを用いた解析をした。可視化においては、ボトムビューでリエントラント燃焼室をバスタブ型に変更し、20000 コマ/sec でシャドウグラフと直接撮影を実施した。4 サイクルごとに 1 サイクルの燃焼を可視化し内部 EGR の影響を排除している。

可視化結果より、TDC 噴射では中心部分の空気利用が不十分で、温度が上がっていない。2° ATDC 噴射ではスモーク、CO 共に最も低いが、1 段目の着火前に、2 段目が噴射され一段目の揮炎が広がる前に噴霧は拡散して見えなくなり、揮炎はノズル近傍までには至っていない。

一方、5° ATDC 噴射では 1 段目の火炎が広がる中で 2 段目が噴射され、噴霧に沿って揮炎がさかのぼりノズル近傍まで揮炎が広がるのが観察できる。こういうところで、まだ混合が進んでいないリッチな混合気が燃えて Soot が発生すると考えている。

そこで数値計算により CO 濃度を解析してみた。

φ-T マップ上に CO 濃度を濃さで示し、2nd 噴射後 5° 経過後の濃度を見てみると、2° ATDC の場合ほとんど拡散が進む。5° ATDC では温度が既に高くなったリッチな混合気の拡散が進まず、Soot の半島に近いこともあって Soot も CO も出たと考える。

進角側は TDC と 2° の比較では、直接画像から 2 色法で温度と KL 値を算出し解析しているが、TDC

噴射では揮炎が燃焼室の外側のみに存在し、中央部分の空気が使えてないし温度も低く酸化が抑制されている。2° 噴射は中央付近の空気も使えているし温度も高く酸化が進む。

ここまでをまとめると、シングル噴射と TDC 噴射では同じような理由でスモークと CO が出る。2° 噴射ではリッチ火炎の酸化が進む。 噴射インターバルが長すぎるとノズル近傍付近まで揮炎がさかのぼり Soot が出る。

分割の比率影響を見てみると、指圧から求めた筒内最高温度に関しては、2nd 噴射を増やすと温度は上昇するが、増やしすぎると 1st 噴射のガス温度上昇が低下し、最高温度はシングル噴射よりも低下する。HC、CO は一旦減ってそのあと増える傾向となる。比率によりこのような影響があるため、筒内分布も変わりそういったところが影響してくる。

数値計算で 2nd 噴射無と 2nd2° 噴射の CO を見てみた。2nd 噴射無では筒内温度が低く CO の酸化は途中でとまり低温で発生した CO が減って行かない。一方、2nd2° 噴射では筒内温度があがるため CO が酸化されていくことがわかった。

#### 4. 燃焼騒音の増減機構

エンジンの燃焼騒音は圧力上昇率 ( $dP/d\theta$ ) 最大値と相関を持つと一般的には言われているが、今回の 2nd 噴射時期をふった試験においては、 $dP/d\theta$  最大値が同程度であるにもかかわらず、騒音レベルが異なる結果となったため、中研殿の協力によりその解明を行った。

燃焼騒音レベルは、筒内の圧力変動を AVL ノイズメータに取り込み、フーリエ変換、フィルター処理したのちスペクトル解析しそれを周波数で積分したものと定義する。

900rpm で見てみると、2nd7.2° ATDC と 2nd10° ATDC の一山目の  $dP/d\theta$  は同程度だが、スペクトル解析してみると、1.05kHz の騒音レベルが大きく低下するためオーバーオール値を下げている。1 段目の熱発生率のピークと 2 段目の熱発生率のピーク間の時間は 0.47msec であり、これが 1.05kHz の周期 0.95msec の 1/2 に相当する。一山目の振動が反転したところに二山目の振動が発生し振幅を減衰させる、すなわちヘッドホン等に使われるノイズキャンセルが働いていることが分かった。少しまとめると、二山間のインターバル時間がある周波数周期の 1/2 あるいは 2/3 であればその周波数ではノイズキャンセルが起り、騒音レベルは低下する、一方、二山間のインターバル時間がある周波数周期と同じになるとその周波数ではノイズ増幅がおこり騒音レベルは増加する。

本燃焼コンセプトは分割噴射で  $dP/d\theta$  を低下させたことに加え、HC、CO 酸化のための 2nd 噴射時期の最適化に伴い、ノイズキャンセルにより騒音レベルのさらなる低減を実現したことより、2nd 噴射の燃焼を消音スパイク燃焼 (Noise cancelling spike combustion) と名付けた。

#### 5. 本燃焼の自動車への適用

当初の PCCI では未燃分が多く適用範囲は狭かったが、本燃焼では NEDC 領域の広範囲で適用できた。NO<sub>x</sub> も Euro6 の半分、燃費は同等、HC は若干増えるも特に問題無く、この燃焼コンセプトにより NO<sub>x</sub> 後処理なしで Euro6 対応が可能であることを確認した。

環境変化に関しては、吸気温度とエンジン水温の影響を調査した。吸気温については -10° まで下げると、吸気量増に伴い NO<sub>x</sub> 増となるが、EGR を増やすことで常温レベルと同等になり、問題ない事がわかった。一方、水温を 20°C まで下げると着火遅れ影響が大きく、なんらかの対応が必要となった。一段目噴射の着火遅れ期間を蒸発、低温酸化期間 (化学的着火遅れ) に分離し、一段目噴射に先立つプレ噴射の効果を見てみた。プレ噴射により蒸発時間が短縮し着火遅れは

短くなるものの、化学的着火遅れ期間への短縮効果は少なく HC 改善があまり期待できない。そこで、化学的着火遅れ期間短縮を狙って、EGR 減量 (A/F リーン化) による温度上昇を試みた。結果は化学的着火遅れを 80℃と同等に出来、HC が若干多い (壁面付着影響が残る) もの他の成分は同等レベルにすることが出来た。

セタン指数の影響 (48.7~55.2) も見てみたが、低セタン側で着火遅れ影響が出てくるが、燃焼は安定しており問題ないレベルであった。また、低水温条件でもプレ噴射+EGR 減で十分な安定性を確保できることを確認した。

過渡運転での課題として、NEDC120km 定常から減速への移行する際の通常燃焼から D-SPIA の切り替わりで、高 EGR を要求するにもかかわらず制御遅れによりリーンとなるため燃焼騒音が悪化する現象が発生したが、これについては噴射時期の補正で対応した。

## 技術者教育と人材育成について

社内教育は、全社システムとして基礎技術講座等実施している。(大学で不十分な基礎講座と実習に力を入れている 43 講座 520Hr) 織機、エンジンの分解・組み付け実習も行っている。最近、工具を使っている人が少ないのでそこから初めている。座学は聞くだけでは良くわからないので、現物を用意し理解が深まるよう工夫している。SQC を活用した問題解決学習もやっている。(Journal of Quality Education Vol. 2 参照)

エンジン部では基礎と専門教育を実施し、触る、動かすを経験させる。専門講座は 10 講座あり充実しているが、所属先での OJT 教育が大事。データをうまく整理し、人にうまく説明できる人が少ない。実際の業務で教えて行くしかない。簡単な検討を式を使って計算させようとしても一から教えてあげる必要がある。一回教えると、次はやれる人もいるが個人差が大きい。実際の業務の中で、できない人の底上げも必要。

## Q&A

### ・太田先生

Q: このコンセプトは 1 段目も 2 段目も予混合化するということですか？ 1 段目はスワールはあまり与えないでキャビティの奥のほうで燃やして、中心部は酸素を残すという事ですか？

A: 2 段目は完全な予混合ではない。スワールはそれほど弱くないが、位置関係は 1 段目は遠くに飛ばし、空間の空気があるところに 2 段目をふくという事です。

Q: 2 段目は、1 段目で温度が上がっているのに、着火遅れは短いので中心付近でうまく燃やして全体の温度を上げて未燃物を燃やすということですか？

A: そのとおりです。

### ・愛知工業大学 藤村

Q: 可視化のエンジンと実エンジンで燃焼室形状が大きく違うが、今回の可視化で見ようとするものがしっかり解析できているのかという事と、今回の燃焼は大量クール度 EGR を前提としてやられていると思いますが、そのレベルとか温度等がどうなっているか教えてください。

A: 燃焼室の形状差の影響はありますが、今回は負荷が低いので、空間での燃焼という意味ではある程度みれていると思います。EGR は負荷が高いところで 30~40%くらいで、負荷の低い領域では 60

～70%くらい入っています。

・新ACC内田さん

Q：NEDC の領域でカバーできていますという話なのですが、これから過渡のもっと負荷の高い厳しい状況になった時に、この燃焼だけでカバーできますかということと、今カバーできているという領域内が同じ考えでできているのかどうか？ 負荷、回転によって噴射圧、過給圧色々変わりますよね。そうなるとう噴霧のディストリビューションも変わってくると思います。狙いと現実がどうなのかと？

A：過渡が厳しくなるとこの燃焼だけでは難しくなってくるが、どこまで適用できるかが今後の課題となる。負荷が高い側に来ると通常の拡散燃焼の改善が優先でそこにこの燃焼をどう加えて行くかという事になる。2nd 噴射は 1st 噴射の着火時に噴射する事になるが、負荷が高い側に行くと噴射量が増え発熱量がふえるため、2nd 噴射はあまり増やせず、ノイズキャンセルもうまく使えなくなり騒音は悪化する。

Q：負荷が上がると 2 段の制御が難しくなってくるということですね。

A：これ以上領域を上げようとすると壁が急に高くなると思います。

・日本工大 中野先生

Q：予混合燃焼を考える際に 2 段が最適なんですか？こだわる理由があるのですか？

A：いろいろやったが、未燃と燃費等考慮すると 2 が良かったということです。

Q：このハードウェアで 3 段 4 段にしても効果ないんですか？

A：3 段の場合、後ろにもってくると燃費が悪くなるし、前にもってくると予混合が難しくなるし、燃焼としてはコンパクトにしたい。他のエンジンでもやってみたが、2 くらいがバランスが取れていると思うが、2 でないと駄目と言ってるわけではない。

噴射系がもっと高応答になってくればある領域は 3 段が良いという事も将来的にあり得る。

・マツダ飯田さん

Q：このノイズキャンセラーは色々解析されていますが、狙ってやったんですか？

A：当初から狙っていたわけではないが、圧力上昇率を下げる事を主眼に進めていたが、2nd 噴射時期を振った時に、圧力上昇が一緒であるにも関わらず騒音レベルが違う事に疑問を持ち調べてみた。今回は排気改善可能なインターバルでうまくノイズキャンセルができた。

### III. 事務連絡

次回は 1/24 (土) において日本大学飯島氏および SWRI から話題提供の予定。

以上