

第 5 回内燃機関を継続的に改良する研究会議事録

日時：平成 27 年 5 月 9 日 13:30～17:00

場所：邦和セミナープラザ

出席者：秋濱一弘（日本大学、講師）、河野正顕（部品総研、講師）、大平哲也（スズキ、主査）、田村守淑（東邦ガス、幹事）、藤村俊夫（愛知工大、幹事）、内田登（新 ACE）、長谷川国生（元ダイハツ）、中島邦彦（ユニバス）、木下久寿（ヤマハ）、高野孝義（豊田工大）、調尚孝（部品総研）、藤川竜也（マツダ）、野田進（豊橋技大）、鈴木孝司（豊橋技大）、鈴木浩高（いすゞ中研）、太田安彦（元名工大）、佐古孝弘（大阪ガス）、内田克己（ダイハツ）、太田篤治（トヨタ）、鬼頭俊介（豊田高専）、井原禎貴（岐阜大）、佐々木覚（デンソー）、神尾純一（ホンダ）、中村俊秋（豊田自動織機）、佐藤孝明（部品総研）、小島晋爾（名城大学）
（計 26 名、敬称略）

話題提供 1

講師 秋濱一弘氏（日本大学生産工学部）

講演題目 ϕ -T マップとエンジン燃焼コンセプトの接点

要旨

反応計算による ϕ -T マップの作成方法を概説し、様々な燃焼コンセプトがマップのどの領域を使用しているかを燃焼制御方法と関連づけて解説を試みる。また日本大学に着任後 1 年半における研究トピックスも併せて紹介する。

講演内容

ϕ -T マップと燃焼の接点について日本燃焼学会誌に投稿し、掲載されている。その内容について詳しく説明する。おとしの 10 月に日本大学に転職。それまでは 30 年間豊田中央研究所に勤務していた。日本大学生産工学部に所属。日本大学は約 130 年の歴史がある。卒業生は 110 万人、14 学部、87 学科、学生数は 8 万人いる。学部ごとのキャンパスが散らばっている。

生産工学部は津田沼にキャンパスにあり 60 年ぐらいの歴史がある。最も産業界に密接しており、インターシップも昔から実施している。

9 学科あり 6500 人在籍している。環境安全工学科は 5 年前に土木、機械、化学、電気が集まって創立。環境、安全、エネルギー分野を対象とした学科。学科のビルも最近建設され、上空大気の試験ができるスペースチャンバーなどの設備がある。

豊田中央研究所を 1 年半前に退職し着任したため大学での業績はこれから。今日は豊田中研時代の研究について紹介する。

1984 年に入社し、レーザー計測 CARS を使ってノック時の分光解析など 10 年くらいやった。その後、LIF で筒内燃料、温度、NO_x 分布計測、6000rpm までまわる可視化エンジ

ンを構築、なかなか可視化できなかつた残留ガス分布や CO 排出などをテーマとしてきた。

化学反応論については煤生成のシミュレーションに取り組み、今日お話しする ϕ -T マップとの関わりができた。

特に今日は ϕ -T マップについて話をする。きっかけは、昔、トヨタに在籍し、その後 SwRI に移られた佐々木さんが無煙低温ディーゼル燃焼の条件を発見され、理論的に現象として成立するのかというところから始まった。ディーゼルをガソリン並の後処理で実現したいわけですが、触媒活性温度の保持と還元雰囲気との醸成に課題があった。これを理論空燃比前後でしかもスモークレス燃焼で実現するのがコンセプト。

エンジンシステムとしては大型 EGR クーラーで大量に EGR を加える。通常は酸素が減ってスモークが増えてくるが、AFR がもっとリッチになりストイキ状態に近くなるとスモークレス領域が出現する。

その支配要因として混合気の混ざり具合が良くなったとか異なった反応メカニズムがあるなど当時いろいろ議論した。アプローチとしては煤の生成と筒内コンディションの関係をみるべきで 3 次元 CFD でやればよいのであるが、現在でも困難な部分があり当時は計算時間の面で更に難しかった。そのような中で、1988 年、神本先生がとても面白い図、 ϕ -T ダイアグラムを出していた。衝撃波管や急速圧縮装置のデータを使って、どの領域で煤、NOx が発生するかをまとめたものであった。横軸が温度で縦軸が当量比でまさに ϕ -T。ここで煤、NOx が両方でない領域があってここで燃やすべきだと提唱したことは大変先駆的だと考えている。一方、そのころ煤の計算ができるようになってきた。0 次元の反応計算であるがこれで神本先生と同じような ϕ -T マップを作成し、3D のエンジン内の状態も計算してマップ上にプロットして、普通のディーゼルとスモークレス燃焼の違いがわかると考えた。

次に ϕ -T マップの作り方について簡単に説明する。煤生成のプログラムに関しては Frenklach (フレンクラ) が有名。PAH ができたあとに煤が成長していく。気相反応からベンゼンが生成、7 環ぐらいまで気相の PAH に成長していく計算。反応式としては 292 種の化学種と 2189 個の反応式を扱っている。気相反応のあと表面反応と合体とかあるが 1 次粒子の生成までを計算で行う。その後、1 次粒子の合体・凝集で 2 次粒子が生成、酸化反応などあるが 1 次粒子だけで煤の総量はだいたいわかる。核形成についてはあまりわかっておらず色々な説があるが煤の電顕写真をみると PAH 前駆体説が本命だと思う。

炭化水素の気相反応メカニズムにはベンゼン生成機構があり、ベンゼンができると H がベンゼンの H を引き抜いて活性なベンゼンのサイトが生成する。更にアセチレンがくるとそこに付加され、炭素原子 2 個の側鎖ができる。対抗した位置に同様の側鎖の手ができ、それら 2 本の側鎖の手が結ばれると 2 環のアロマが形成され、1 環から 2 環に成長する。これを HACA メカニズムという。これが計算メカニズムにいられてある。固体はいつできるのか？4 環のピレンを選んでいる人が多いがこれは現状ではあいまい。計算ではピレン 2 量体を粒子として扱う。凝集、C₂H₂、アセピレンなどが付加する表面成長、酸化などの粒子化

プロセスの基礎方程式、エアロゾルの世界では有名ないわゆるレート方程式を作って計算する。粒子サイズクラスについて無限の数の方程式となるが、統計手法のモーメント法をつかうと方程式を減らすことができ最終的には 6 つの方程式になり、それらを解けばよい。化学反応計算ソフトの CHEMKIN II にこれらを組み込んで計算した。

これはショックチューブの計算。1850K、1.35atm、アセチレン 2.5%、残り Ar について 2ms の時間まで計算した。Soot Yield 1% ぐらい煤に変換される。はじめ小さい粒ができて、その後、合体・凝縮して数が減少する。衝撃波管の実験で検証したが大体再現できる。一桁は違ってない。これを繰り返して ϕ -T マップを作成した。1ms での反応時間、6MPa、EGR=0% の条件。神本先生が作成したマップと同じようなものができる。

スモークレス燃焼を KIVA を用いて 3D 計算を行った。噴射時期は同じでストイキ近くの大量 EGR を加えた場合のスモークレス燃焼と煤が発生する場合についてスモーク特性を比較した。混合気の分布はあまり変わらないが温度が大きく異なり、 ϕ -T マップにその筒内状態をプロットすると、当量比分布はあまり変わらないが、明らかにスモークレス燃焼の方が大量 EGR で温度が低下しスート半島の低温側にシフトしている結果となった。スモークレス燃焼はスート半島を低温側に避けているのですすが減った。

神本先生の提案された燃焼はスート半島と NO_x 発生領域の丁度間、HCCI はマップの左下の水平領域、トヨタの低温燃焼はスート半島の左側の広い領域。

従来のディーゼル燃焼はスート半島と NO_x 発生領域の両方を含むので当然両方発生することになる。

Low Temperature Combustion の研究は探すとたくさんでてくる。均一化の方向と未燃分がでない範囲で低温化の方向がある。アメリカが特に熱心で過去の LTC について整理して分類しているホームページもある。この中には日本で提唱されたコンセプトもはいつている。HCCI は $\phi=0.5$ 程度、2100K 以下のマップではボトム領域にある。スモークレス燃焼領域は CDC 領域（通常ディーゼル燃焼領域）から EGR を大量に導入して低温側にシフトしている。但し、HC と CO が大量に排出するが触媒で消費して触媒の保温に使う。SI の条件はすすはでないが NO_x 発生領域の条件となる。柳原さんが提唱した UNIBUS は多段噴射に一種であり、早期噴射で着火場を形成しメイン噴射で膨張行程の後期に燃焼するので低温燃焼となる。UNIBUS では EGR を使っていないことが特徴のひとつで燃費もよい。日産の MK 燃焼は大量 EGR を加えて局所当量比を下げて均一化、予混合燃焼と低温燃焼する。噴射圧を高圧にして着火までの時間を稼いで強いスワールで急速に燃焼させる。スワール 9 までかけている。

米国 SANDIA のホームページでは LTC 燃焼について可視化映像を公開している。いろいろな LTC の画像が見られる。MK や HCCI に似た PCCI 燃焼は均質化を狙ったものもある。PREDIC の映像もある。早期に燃焼室中心に向けて燃料噴射し壁面に燃料がつかないようにしたコンセプト。

噴射時期で整理すると HCCI が最も早期で、PREDIC が 180° BTDC、UNIBUS は 60°

BTDC、MK は遅い噴射時期であるが、いすゞの島崎さんが提唱されている PCI は上死点近傍の $15\sim 35^\circ$ BTDC と普通のディーゼルとほぼ同じもの。キャビティは変えているが普通のエンジン。ボアが大きいから実現できるのかもしれない。これもサンディアの HP にある。HCCI 燃焼に似た燃焼の様子を示している。

最近ではマツダの志茂さんらが ITI-PCI 燃焼を提唱している。空気と EGR を増やしたいので吸気を冷却し大量 EGR で希薄 $\lambda = 1.4$ 程度で燃焼するもの。豊田中研の堀田さんは高過給・高 EGR。LTC のやり方はいろいろあり、日本発のものがそこそこあり、各社の競争領域となっている。

現在、研究室はマスター1名、4年生が約10名の体制。ゼロスタートなので設備もなく産総研などへ人を派遣して研究を行っている。ホームページを開設しているのでみてほしい。内閣府の SIP では3テーマを受託して研究している。産総研とは点火について研究しており高希薄、高希積の点火強化のため体積的に点火する LBALDI の基礎研究している。実用化はまだまだであるが電極間でレーザーブレイクダウンを起こせば、使えば通常ではプラグギャップは最大 2.5mm ぐらいであるが 25mm でも着火できる。8kV の要求電圧が 2kV ぐらいまで低くなる条件も見つけた。

最後に、技術者教育の取り組みや課題について要望があったので述べる。社会で必要となる能力としては、基礎学力、専門能力、問題設定能力、問題解決力、engineering design 力、グローバル力、目的意識、プレゼン能力、マネジメント能力、コミュニケーション、総合力・チームワーク力などいろいろな能力が必要。大学側は企業で求める能力について正確に把握していないのではないかと感じている。日大と国立大学を比べると並べた能力の中でコミュニケーション能力や後輩育成力などの総合的な力やマネジメント力について優位性はあるものと考えている。目的や問題設定、問題解決能力の伸ばすことが課題と考えている。

Q&A

Q 太田 (安) : 煤の反応計算では 1ms までやったということだが、普通のエンジンでは滞在時間としてこれぐらいを考えておけばよいのか？平衡計算をしたときの ϕ -T マップとどれぐらい違うのか？

⇒紹介した ϕ -T マップは時間が固定されており、時間概念は反映されていない。しかし、1ms でほとんど反応は飽和する。スウェーデンのチャルマース大は時間変化する ϕ -T マップを用いた研究をしていた。 ϕ -T マップはコンセプト検討には有用であり、滞在時間の影響を考えるのであればむしろ 3D 計算を直接やったほうがよいと考えている。

Q 藤村 : 私はトヨタの LTC で量産を実際にやっていた。CO, THC に対して触媒で非常に苦労した思い出がある。ところでディーゼルの低圧縮比化において LTC+大量 EGR がいいと考えているが、多段で低スワールという選択もあるがどうおもうか？

⇒低圧縮比では着火遅れを制御すれば均一な燃焼はやりやすい。分布は自由度があり可能性があると思う。HC,CO が最後の問題で、解決手段として多段は可能性があると思う。

Q 内田：すすモデルの現在の主流は何か？

⇒まさに SIP の研究テーマのひとつになっている。計算のやり方は固まってきているが煤の核形成についてはよくわかっていない。PAH の 2 量体と言っているが明確ではない。ピレンの 4 環でいいのではないかと考えている。

Q 内田：内燃機関の温度制御は難しい。特にトランジェントの温度慣性があるので難しいのではないか？

⇒実際車を作ろうと思うとそのとおり。フィードフォワード制御などでやるしかないと思う。

Q 大平：定容容器においてリーンでノックさせ衝撃波を走らせると煤が発生するが、 ϕ -T マップでも説明が可能か？自着火して衝撃波を走らせると煤がでる。

⇒本当に煤なのか？よくわからない。ノック時に発生する赤い光は水の波長の近くである。

太田：火炎帯の着火前反応においてはどんなリーンの着火反応でもリッチな条件になっており、酸素は使われていないので煤がでる可能性はある。高速ノックでは水の波長に近い赤い色が見られるが、火炎伝播の燃料分解過程で煤がでる可能性はある。

話題提供 2

講師 : 日本自動車部品総合研究所 河野正顕氏

講演題目 : バイフューエル CNG エンジンの燃料供給要件の検討

要旨 : バイフューエル CNG 車の航続距離を拡大する燃料供給システムを、吸気ポートの可視化計測と筒内混合気分布解析により検討した。CNG インジェクタを吸気ポートに取り付けるポート直載システムにおいて、噴射率と噴孔形状の最適化を図ることが燃費改善に対して有効であることがわかった。

1. 日本自動車部品研究所の紹介

研究分野として、パワートレーン、熱システム、燃料電池、パワーエレクトロニクス、電子通信があり、パワートレーンで内燃機関の大半の研究を進めている。

得意とするものは、製品開発およびその間の技術課題の解析（技術と技能が一体）ということで、製品開発に直結している。計測・解析技術による支援、特に可視化による解析を得意とする。例えば、燃焼関連では、実ノズルでのキャビテーション解析、点火による燃焼挙動解析、熱流束解析等。

当初は、トヨタグループ数社の出資でスタートしたが、現在はトヨタ、デンソー2社の出資。

2. テーマ報告概要 (本論)

テーマ「バイフューエル CNG エンジンの燃料供給要件の検討」について、背景、目的、解析法、結果・考察、結論という流で説明。

1) 背景

近年、CNG のバイフューエル車が、中東、インドで急激に伸びている。理由は価格で、インドではガソリンの約半分。又、改造（レトロフィット-バイフューエル化）時間は 4Hr, 価格は約 120,000 円。装置コストは、燃料価格が安いのでペイできる。さらにはインドでは排気規制強化、CO₂ 規制導入によりクリーンな天然ガスの需要が高まっていることもある。

このような背景の中で、CNG 燃料供給システムを開発するニーズが高まり、今回熱効率向上に向け必要となる燃料供給要件の解析に着目した。

2) 目標

CNG 供給システムのあるべき姿の明確化を目標とし、混合気形成がいかにガスエンジンの熱効率向上につながるか検討した。

噴射システム改良のポイントは、燃料噴射方式をポートへの直接噴射とホースを介した供給法で比較し、筒内均質混合を実現する噴射率や噴孔形状である。

3) 解析法

赤外線吸収法によるポート内ガス分析と CFD（市販の熱流体ソフト）による筒内混合気分布の解析を実施した。

赤外線解析ではインジェクタ直下とバルブ傘部直上にサファイアガラス窓を設置し、3.5 μ m の赤外線を照射し、天然ガスの混合気解析を行った。筒内の CFD 解析においては、前サイクルの残留ガスも考慮し、境界条件はメタンの特性を与えた。

4) 結果と考察

吸気同期噴射において、混合気分布は直載のほうがホース導入方式に比べ良い結果であるが、リッチ部分が上流側に存在しており、これはシミュレーションでも確認できた。

ホース導入方式の場合、後だれによりポート上流側に過濃部が固まっている。ガソリンのように液体が分裂しながら蒸発し、空気と混合していくのに対し、CNG の場合では噴霧ガス中への空気導入がうまくできない。混合を促進するためには空気との接触面積を時間、空間的に増やす必要がある。これに着目した改良検討をおこなった。

低噴射圧化と小噴口化により、噴射期間が延びることで噴霧ガスの総面積が

増え混合は改善した。また、インジェクタ先端にガスマキサーを付けさらに形状検討することで、従来バルブ傘部直上の残量ガスによる過濃部位とポート近傍の過濃部位が低減し、均一化が図れることが確認できた。筒内での混合気分布改善効果もシミュレーションにて確認されている。

混合気の均質化により燃焼が改善（未燃分損失+時間損失+冷却損失等の改善）され、改良前に比べ最大熱効率 $32.3 \rightarrow 34.4\%$ まで向上することが可能となった。

5) 結論

赤外線によるポート内可視化とエンジン内混合気分布のシミュレーションを用い、CNG インジェクタはポート直載が良く、噴射圧の低圧化と噴口縮小（噴射率可変）、および噴孔形状の改良により混合気形成の大幅改善が可能となり、その結果、燃焼が改善し熱効率の向上が可能であることを確認した。

4. QandA

新エーシーイー内田さん

Q: エネルギー損失の部分ですが、時間損失と冷却損失の改善分がほとんど排気損失になっているよ

うに見えますが、どうですか？ 未燃損が一番効いているのではないですか？

A: 今回のケースはそうだと思います。

Q: 燃損のうちなぜCOが減ったのですか？

A: 混合が良くなり、リッチ領域がなくなったからだと思います。

太田先生

Q: 噴霧のシミュレーションにおいて、噴孔径が小さい場合、噴射圧が低い場合ともに噴射時間が長いということですね？ それは噴霧の話ですが、これに対してさらにポート内の空気の流れがあるということですね？どのくらいの時間で混じっているかという感覚が少し掴み難いのですが？

藤村: 空間・時間的にSV比があがり、混合促進されているということですね。

Q: 要は長くじわっと噴くといい。そういうことですよ。→ YES

Q: 別の質問ですが、シミュレーションで点火も燃焼もしないで次のサイクル計算をする場合、吹

き返し等の条件が変わりませんか？ 残留圧力の影響も変わりますよね。1サイクル回して次に行かないと、うまくいかないのではないですか？

A: おっしゃる通りですが、そこまで真面目にやると計算時間があまりにもかかるので、計算精度と時間を考慮し、運用上で今回の手法で進めました。

Q: 先ほど時間損失が少ないということでしたが、指圧線図で見ると時間損失が少ない

から等容度が

高くなって燃焼が早く終わるので、膨張期間が長く仕事が増えると思うんですが、一方で排損

が増えると言われていてもよくわからないのですが？

藤村: 結局、等容度があがり図示部分が増えたということが、燃費改善につながったということであって、あまりごちゃごちゃ考察してもしょうがないと思います。
(燃焼が変わっているだけ)

ダイハツ 芹澤さん

Q: 感想として、細かいところより、もっと大きいところをやったほうが良いと思います。馬蹄形の形状等も大事だと思いますが、どういう気流状態でタイミング良く噴くかというのが大事だと思います。そのあたりはどうですか？

もう一つ、今回は軽負荷ですが、均質度を上げると、筒内に入る酸素濃度も減るため WOT 性能も落ちると思いますが、どうですか？

A: 気流状態に合わせた噴霧が大事だと思います、その一環で馬蹄形による検討例を紹介させていただきました。WOT に対しては空気入らなくなるのでトルクは落ちますが、インドの人はそんなに気にしないので、問題にはならないと思います。

豊橋技科大 鈴木先生

Q: 研究の目的と今後の展開についてお聞きしたい。

A: 部品の製品化について考えている。インドでは品質の悪いインジェクタ等がバイフューエルで使われている。今後、現存の 3 パーティのリプレースではなく、OEM への対応として検討していきたい。

スズキ 大平さん

Q: 熱効率の解析に関して、サイクル変動は影響していませんか？

A: あまり影響はしてないと思う。COV で 1.3~1.5%程度です。

余談ですが某先生から、気体燃料の時は「噴霧」と違うと言われたことがあります。

この場合は「噴流」を使うということです。

愛工大 藤村

ガソリンエンジンでも筒内流動を使っているが、そういうものの影響をまず把握したうえで、ポート内の混合気流の検討をされるといいと思います。

以上