

第 6 回内燃機関を改良する継続的技術力に関する研究会議事録

日 時：平成 27 年 8 月 1 日（土） 13:30~17:00

場 所：名城大学 MSAT

出席者： 内田登（新 ACE）、金子誠（富士重工業）、中瀬善博、姉崎幸信、重永真弘（部品総研、代理）、朝井豪、川端裕二（ヤンマー、代理）、寺地淳（日産）、中村俊秋（豊田自動織機）、高橋周平（岐阜大）、園比呂志（SwRI）、松原耕司（ダイハツ）、島川英明（ダイヤモンド電機）、高島良胤（大阪ガス、代理）、養祖隆（マツダ、代理）、鈴木孝司（豊橋技科大）、神尾純一（ホンダ）、太田篤治（トヨタ）、太田安彦（元名工大）、小島晋爾（名城大）、大平哲也（スズキ）、藤村俊夫（愛工大）、田村守淑（東邦ガス） （23 名、敬称略）

話題提供（その 1）

題目：熱効率改善のストラテジー研究

講師：内田登氏（新エィシーイー）

議事：

1. 新エィシーイーの紹介

当初トラックメーカ 4 社を中心に新燃焼システム研究所を引き継ぐ形で始まり、現在の出資企業は 10 社で、運営は主要 7 社でおこなっている。研究員、研究補助員は 3~4 年のスパンで出向し、出向先者は 3~8 年の実務経験の若手が多い。参加企業の期待の半分は「育成」と認識している。

これまでの研究成果としては、超高压噴射、触媒エンジン（オンボード SCR）から始まり、予混合圧縮着火の研究に移行してきたが、燃料は軽油というメーカからの縛りがあり、HCCI 燃焼は次第にフェードアウトした。少し着手が早かったと思う。その後、排気的大幅低減と併せて、熱効率改善をすすめた。2015 年重量車燃費規制に対して 2010 年に目標をクリアし、2012 年には更に 10%改善という目標に対し、2012 年に 7%達成し完了した。設立当初から一般的な切り口での研究ではなく、300 MPa の噴射圧のようなエンジンそのものの将来を見越したものに早くからアプローチした。そのため、経験がない人間同士で進めると議論も活発になった。それが、これまで 28 年間続いた理由である。当初から「産」のみならず、「官」「学」にも価値を認める人が多かったし、面白い事をやっているという評判もあった。

メーカからは、これまでのありものの技術には囚われず、どうやったら熱効率 55% を達成できるか、何をやっても良いと言われ、今までの常識を覆すため、これまでの技術を掘り下げもっと追究すべきところがないか検討した。育成方針は個としての identity を鍛えるところにあり、AICE や SPI と新エィシーイーでは狙いどころがずいぶん違うと思う。重要なのは真理の探究であることを研究員には植え付けようと考え

ている。

2. 他社動向

ディーゼルエンジンを取り巻く環境は、軸足が排気から CO₂・熱効率に移ってきた。エンジン単体で正味熱効率 50%を目標とし、将来 55%への道筋を明らかにして行く必要がある。

他社の動向を紹介すると、たとえばカミンズとダイムラーでは既に正味熱効率 50%（排熱回生込み）は達成し、55%の道筋に対しては Dual Fuel がないと達成は難しいというスタンスを示している。特にカミンズはこれまで機械損失低減を進め、正味と図示がほぼ同等まで来ており、排熱回生の研究は 10 年程度進めている。熱損失低減については、オールチタンピストン（熱物性値は ZrO₂ に近い）で 1.7%程度改善しているが、これには機械損失分等も含まれていると思う。

ダイムラートラックはダウンサイジング、ダウンスピーディングのみならず、ダウンレーティングもやってきた。すべてやって、シリンダ最高圧を落として圧縮比アップをはかり 48%の正味熱効率を達成しており、細かく見ると面白そうである。壁面熱損失低減も重要と言ってる。しかしオイルギャラリーは結構大きくとっており、遮熱は最終的に含まれなかったように思う。

欧州 CO₂RE プロジェクト（2011～2015）では、EuroVI エミッションを担保しつつ EuroV 比で燃費 15%改善を目標としている。改善技術（ありもの）は 2020 から前出しすることを想定。

このように色々なプロジェクトが進んでいるが、正味熱効率の改善技術は皆よく似ている。もっと先を考えている新エシイーとして、個別エンジンの最適化による効率改善手法には参考になるものはあまりないように思う。エネルギー収支を見てみると、今後冷却損失低減に手を付ける必要が有ることは言うまでもない。図示仕事をより積極的に高めるために、理論サイクルに立ち返って考えてみることも重要と考える。

3. 新エシイーにおける最近の研究動向

ここでは理論解析と実験的解析による理論の証明という観点で近年の研究成果を報告する。供試エンジンは 2 L 単筒ディーゼル、噴射圧 300MPa、スチール浅皿ピストン、設計最高筒内圧 30MPa、圧縮比 18～30

正味熱効率 55%達成の条件として、(1) エネルギーバランスのデザイン (2) 多気筒にうまく展開できるか（摩擦、ポンピング）かが重要であり、エンジンモデルを使い、サイクル効率向上と各損失の解析と低減検討を行い、新エンジンコンセプトを提案する形で進めた。

① 火炎の時間・空間的制御により、冷損低減による燃費改善を狙い、拡散燃焼下において大量 EGR とマルチ噴射による局所温度分布の改善を検討した。結果として、

冷却損失は 40%低減し、付随効果で油温上昇に伴う機械損失低減効果もある。一方で、よくわかっている話だが排気損失が増加した。

- ② 排熱回生はターボ付きエンジンの場合はゲインが少なく、又排気損失低減手段の高膨張比化も圧縮比増となるため、最大筒内圧制約よりゲインは減るというジレンマがある。圧縮比と膨張比を独立に制御する方法として、サバテ・ミラーサイクルがあげられるが、低負荷：圧縮比＝膨張比、高負荷：圧縮比 \leq 膨張比が必要である。理論サイクルの計算では、実圧縮比を上げ、それ以上に膨張比をあげてやれば効率は上がる。実験においては、実圧縮比一定で膨張比を増やすことで図示熱効率はあがるが、機械損失・ポンピング損失の増加により正味熱効率改善効果が減少する。圧縮比、膨張比を最適化する場合の課題は、その際に増加する各損失の低減であるが、膨張比拡大により冷却損失低減分を正味仕事で回収することは可能である。
- ③ 冷損低減のために噴霧火炎の壁面衝突メカニズムの解析は非常に重要である。遮熱ピストン(ジルコニア)による冷損低減効果を確認した。高入域で効果が現れたが、このあたりのメカニズム解析に正面から取り組まなければブレークスルーは難しいと思う。詳細について、まず燃焼室上方からの可視化による解析を行ったが、ジルコニアピストンでは表面温度の低下がないにもかかわらず、燃費改善効果は確認できなかった。表面粗さが火炎表面温度に及ぼす影響もなかった。温度境界層の直接計測を試したが、差は少なく計測した熱流束のオーダーもあまり変化がなかった。今後さらに細かい計測を行おうと考える。

次に圧縮比を上げて熱損失を見てみたが、単調に増加していくわけではなく、18から22で下がって、その後22~24、26で増加する傾向であった。

空間遮熱に関しては、噴射パターン変更で低減の可能性があるが、燃焼が緩慢になり燃費改善効果は期待できない。そこで3本のインジェクタを使い、それぞれ独立に噴射させることで、シミュレーションによる効果を確認した。NO_x、PMについても、 Φ -Tマップ上の高濃度域からはずれており、またそれらがトレードオフの関係になっていないので、燃焼が悪化しているわけでもない。

今後、実験で効率50%オーバーを狙えないか、詳細確認を進める。まだまだ55%達成技術は十分みえてないが、シミュレーション含めてしっかりやっていきたい。

4. Q&A

1) 太田先生

Q：火炎の先端が壁に近づいて行くとき、一本の噴霧の周りが燃えながら膨張しているのですか？

A：そうですね、燃えたものが膨らみながら壁に近づいていきます。

Q：火花点火(火炎伝播の渦構造)の様な様相がみえますね。初めてみました。

A：200000コマでとるとこのような細かい渦がみえてきます。

Q：噴流はあたっていないのですか？

A：噴流はあたっていないようにも見えます。火炎をよく見ると、壁の部分に火炎が向きを変えた壁の部分には、輝炎の観察出来ない隙間（黒く見える）が確認できます。

Q： ΔT の意味は？

A：観察火炎の最高温度と火炎先端部分の温度差です。最高温度には、今回の計測の際にはあまり差がありません。

Q：これは2色法でやられているのですか？

A：下の方は限界があるので1800K以上しか見えていません。

懸念点払拭のため、壁の温度と燃焼可視化を同時にやりたいと思っています。色々面白い結果が出ると思います。

2) 本田 神尾さん

Q：スキッシュエリアの可視化はできるのですか？ A：半分くらい見えています。

Q：スキッシュエリアに火炎は入っていますか？

A：入っており、圧縮比があがると乗り上げが大きくなってきます。スキッシュエリアの隙間を増やすと熱損失が減ることも確認されています。

3) 太田先生

Q：熱効率55%が一番いいところだと思いますが、これを広い領域に広げるためにはどうするのですか？

A：ピンポイントでできてるものを、広げるには圧縮比・膨張比をもうすこし検討する必要があります。熱効率改善は領域までふくめた研究スタンスをとっています。

4) 日産 寺地さん

Q：熱効率55%を目指す時に、理論的にどう進めるか考えて行くと思うが、比熱比をどう考えるか？ 均一リーンで理論効率は考えているが、極所的にはかなりリッチですよ。作動ガスをどう考えたらいいのですか？

A：我々も考えているところで、2領域で考えたらいいのかとか議論しているが、結論はでていない。

Q：ディーゼルの比熱比の考え方は難しいですね？

A：比熱比が制御できると良いのですが、それは非常に難しい。どうやって実現するか考えて行く必要が有る。検討はいろいろやってるが、現時点ではまともっていない。計算で、圧縮側と膨張側でかえたらどうなるかとかは検討している。

5) 本田 神尾さん

Q：熱発生率のピーク部分はリッチなところで火がついているのですか？

A：ここは予混合なのでリーンですね。

Q：その後はどうなんですか？ A：拡散ですから、どちらかというリッチです。

Q：リッチで自着火している領域はありませんか？ A：ありません。

6) 鈴木 大平さん

Q：噴射率パターンを変えても熱効率があまり変わらないと言われたが、摩擦損失、冷却損失はどうなんですか？どう分離していますか？また冷却損失の定義はどうなってますか？

A：総熱量から図示仕事と排気損失を引いたものとしています。排気損失計算は未だ検討の余地が多いですが、排気マニホールドの圧力・温度よりそこまでの流れが断熱として遡ってバルブが開いた際の環境を見積もっています。計算精度は不安がありますので、高応答の熱電対を使ってバルブ近傍の温度測定にトライしています。

話題提供（その2）

題目：単気筒エンジンの改良による開発プロセスの課題対応

講師：金子誠氏（富士重工業）

議事：

1985年に入社し一貫して先行開発に取り組んできた。量産開発に貢献できたのは約6割。最初は均質リーンに取り組んだ。量産に繋がらない時期もあったが直噴ターボではレガシーやフォレスター、ダウンサイズターボではレヴォーグに貢献。直噴NAでは来年発表する車に搭載される予定。最近ではライトサイジングターボに取り組んでいる。

今日は主にスバル技報にそって話題提供する。また単気筒の技術を入れたレヴォーグの話と最近の取り組みについても話す。

背景として開発手法は国内ではV字プロセス開発が一般化しており、試作回数が減らせるので後戻りがなく開発コストが削減できる。特に経営者は期待している。只、実態としてゲートを超えるための検討が多く、ものを作らず検討ばかりするケースが増えてきた。開発の後半で潜在的な課題が発覚し苦勞することがある。その場合の対策としてゲートを厳しくし新しいゲートを設定することになる。すると今度はゲートを超えるための方策がなくなり開発が進まないという悪循環に陥る。

一方、世界ではGEがファストワークスといって最小限度の機能を実現した試作品をつくっているから開発を進める手法を試している。日経ビジネスによるとジェットエンジン

の世界では機能をしばって 3D プリンタで部品をつくり試作や量産も作って試作を重視する流れがある。

同業他社に単気筒エンジンの活用について雑談レベルで聞いてみた。単気筒と多気筒のエンジン性能ではノックが問題となる。気筒干渉が少ない 3 気筒では単気筒の結果を利用して開発を進めているとの会社もあった。スバルとしては燃焼アイテムの評価に加えてノックも含めて単気筒を E/G 開発に活用したいと考えている。

単気筒エンジン性能と多気筒エンジン性能の相違の主要因と対策案について検討を行った。主要因としては冷却方法、内部 EGR 量、吸気圧力の条件の 3 つがあり、対策として冷却方法は燃焼室壁面温度の調整、脈動そのものは合わせられないが内部 EGR 量については排気チャンバ設置、吸気管の圧力降下については吸気チャンバ設置を行い性能について検討した。

冷却方法については各所（ヘッドとライナー）の壁面温度を測定し 4 気筒エンジンの壁面温度に単気筒エンジンを分割冷却して壁面温度を近づけた結果、単気筒エンジンと多気筒エンジンのノック感度の差異が改善した。

単気筒エンジンでの内部 EGR 量調整と吸気行程中の脈動を多気筒エンジンのものに近づけるため GT-Power でサイクル計算してパイプ長さやチャンバ容量を決定した。

排気チャンバの容量は 35L として運転条件に合わせてパイプ長さを変えて内部 EGR 量を所定のものにした。

部分負荷時の圧力降下の対策については吸気チャンバを 10L と大容量化することで改善が見られた。10L でも圧力降下がまだ見られるので更に大容量化していく予定。

全負荷時の脈動対策については排気ダウンブローが吸気に帰ってくるので吸気チャンバを付けたが効果がなく、吸気ダンパとしてスロットルにエアクリーナを直付けすることで改善できた。

可視化エンジンの場合はモータリング試験を行い改善の様子を可視化している。吸気行程の圧力降下の対策として吸気チャンバを付けることで改善した。

単気筒エンジンでの燃焼試験では燃焼室の壁温を調整するため少なくともヘッドとライナーの分離冷却が必要。また、吸気チャンバと排気チャンバも必要となることがわかった。

つぎにレヴォーグ開発について話す。レヴォーグはダウンサイジングとしてツインスクロールターボを採用して出力と燃費を追及。1.6L で 2.5L クラス NA エンジンと同等の出力において 17.6km/L という高燃費を実現した。定常では NA より高トルク、4-2-t 排気系を採用しツインスクロールだととなりの脈動をカットできる。オーバーラップを大きくして 3000rpm までは吸気管圧が排気管圧より高くなるので掃気効率が高くなった。

TGV（タンブルジェネレーションバルブ）を採用、はじめ外側を閉めていたノーマルよりリバースの方がタンブルが強くなる。この原理について単気筒エンジンを用い LIF 可視化計測を行い明らかにした。最終的には 4 気筒エンジンを試作して決定したが、ISFC,COV,THC ともにリバースの方が良い結果となった。出力と燃費に特化したのでしわ

寄せが、特に、始動や暖機の時のエミッションに出てきた。直噴で改善したが可視化エンジンが役に立った。直噴は Wall ガイドとエアガイドの両方を採用して点火栓周りの混合気濃くしている。

最近の事例として単気筒と4気筒の熱勘定が一致するレベルまでできるようになってきた。ICOS (LaVision) でCO₂の濃度を計測してEGR率を測定している。

最後に残課題について述べる。コンロッド長、回転速度変動、排気温度、THCなどの課題が残っている。

コンロッド長でTDC付近のピストン挙動が変わりノック特性も異なることがある。以前研究していたリーフシェイプのカーブだとかなり変わるが通常のカーブで、コンロッド長の影響は少ないものと考えている。

回転速度変動の相違は単気筒では爆発行程で速くなる。低慣性動力計か大フライホイールを使って調べられる。今後取り組みたい。

排気温度は多気筒の方が単気筒より高い。THCも単気筒の方が高く高速FIDで排ガス計測を検討している。

まとめとしては、単気筒エンジン性能の多気筒エンジン開発への活用に関し燃焼室壁温調整でトレースノック点の差が半減、内部EGR率が4気筒に近づいた。部分負荷で吸気チャンバを採用し圧力降下を抑制できる。40Lぐらいあるとよい。全負荷ではスロットル上流にダンパを設置することが有効であった。

Q. 太田(安)氏：吸気チャンバの口はどのようになっているのか？サージタンクによってエンジン性能が異なる。サージタンクと同じであるが、サージタンク上流の部品は性能に影響しないのか？

⇒スロットルボディがある。空気量は別の方法で制御して合わせているためサージタンク上流の部分は性能に影響しない。

Q. 中瀬氏：単気筒を横にした理由は何か？

⇒ポート噴射の始動が変わるため。直噴なら変わらない。

Q. 寺地氏：内部EGR、吸気の影響についてそれぞれ分離した評価を行っているが、それらを組み合わせた検討はどうか？どちらが支配的か？

また、定常状態の検討であるが、ノックなどは過渡状態の場合の方が重要と考えるが、その場合の検討はしているのか？

⇒内部EGR検討の時には吸気チャンバをついている。内部EGRの影響の方が大きい。過渡状態の場合については今後の課題。

Q. 藤村氏：単気筒エンジン性能結果を多気筒エンジン開発に利用する流れは本当に主流となるか？

⇒ダイハツの方はそのような意見であった。トヨタやスズキの方は異なる意見であった。

Q. 中瀬氏：可視化の蛍光剤は何か？

⇒アセトンを 532nm で励起してつかっている。タイミングを変えて撮影している。均一ガスをエンジンに導入してそれをレファレンスとしている。トヨタ中研の藤川さんのやり方で行った。

Q. 松原氏：ダイハツでも単気筒エンジン性能結果を多気筒にすべて使っているわけではない。ヒートバランスの計算方法は？

⇒理論効率は村中さんの教科書のやり方を踏襲。サイクル損失、比熱比を入れてオットーサイクル効率を計算、排熱損失は排ガス温度、時間遅れはは等容度から計算。冷却損失は残り。

Q. 朝井氏：単気筒はボアスケールを合わせて開発するのか？ 1つのボアで他のボアの開発ができないか？

⇒そんなに機種はなので基本的にはボアストロークは同じでやっている。

Q. 小島氏：CFD 結果で色分けが異なる理由は何か？また、使用ソフトウェアは何か？CAE は信用できるか？

⇒色分けに特に理由はない。使用ソフトウェアは StarCD。現場は可視化の方を信じるようだ。

Q. 養祖氏：単気筒エンジンで多気筒の吸排気脈動の形を合わせたいのだが、経験はあるか？

⇒その経験はない。形を合わせるのは不可能と考える。

Q. 藤村氏：吸気慣性を積極的に利用する。タンクは大きくなるがそういった発想はどうか？

⇒今の過給エンジンのトレンドは慣性過給を使わないのではないか？

Q. 中村氏：V 字開発での期間短縮の効果はどのようなものか？

⇒講演で話したように V 字開発を進めていくと越えられないハードルがでてくるので試作が必要となってくる。効果を簡単に述べることは難しい。

Q. 大平：技術者の育成について単気筒は教育面でどのように使っているのか？

⇒多気筒試作は費用が数千万円レベルになるので試験する側が壊さないように試験しなくてはならないので緊張する。単気筒は気が楽。特に可視化はインパクトがある。また、CAE とのコミュニケーションが活発になり、そういう場面が教育になる。未知の現象が体験できるし、エンジンの複雑さを理解してもらうために利用している。

Q. 小島：内田さんの講演に質問。トレードオフよりもブレークスルーをとということだが、どのようにやるのが良いか？⇒内田：トレードオフの方法論は決まったやり方。基礎に戻ることが必要と考えている。燃料コントロールなどわかっていないことが、未だ多くあると考えている。

以上