

平成 28 年 6 月 9 日

第 1 回内燃機関の熱効率 55%達成に向けた技術の道筋を議論する研究会議事録

日 時：平成 28 年 5 月 28 日（土） 13:30-17:15

場 所：愛知工業大学 本山キャンパス 2F 多目的室

出席者：

調，中瀬，河野（部品総研），長谷川（元ダイハツ），水野，寺地（日産），内田（新 ACE），杉田（総研），萩原（ヤンマー），船山（日野），小島（名城大），大平（スズキ），太田安彦（元名工大），田村（東邦ガス），永田（アイシン精機），神尾（本田技研），高島（大阪ガス），園（SWRI），山川（マツダ），金子（富士重工），鈴木（豊橋技科大），太田篤治（トヨタ自動車），芹澤（ダイハツ），藤村（主査，愛工大），中村（幹事，豊田自動織機），井原（幹事，大同大）

（順不同・敬称略，26 名）

議 題：熱効率 55%に向けた道筋についての自由討論会（当会初の試み）

以下 Q&A と記載なきところは自由意見です。

話題提供 1. 名城大学 小島先生

【概要】

- ・燃焼分野の研究（例えば未燃混合気温度と既燃ガス温度で整理された SI エンジンや HCCI エンジンの運転可能範囲）を実際のエンジン開発に適用するには，拘束条件（過給，損失，コスト等）を特定する必要があるが，熱効率を議論する際にも拘束条件を特定すべきと思う。
- ・それぞれの技術には，必ずコストがつきもの。コスト意識が重要。

【議論】

- ・拘束条件から進める（熱力学を脇に置いておく）手法もあるが，熱力学は常に自覚しておくべき。例として，低温燃焼のトレンドがあるが，カルノー効率とは相反している理論と実際を照らし合わせながら解析が必要。
- ・熱力学(理論サイクル)は常に念頭に置いておいておき，その上で，検討内容に対して理論、実機での得失を検討し熱効率 55%を目指せばよい。たとえば EGR、それにより κ は落ちるが、冷損、機械損は改善する。

Q. 熱力学で言えば， ϕ -T マップの適用条件・使い方についてはどうか。

A. 負荷や時間軸、EGR、インタークーラなどの含めた ϕ などの条件が入ってない。
たとえば、HCCI の $\phi 1$ というのは軽負荷で大量に EGR を入れた条件である。

話題提供 2 マツダ 株式会社 山川氏

【概要】

- ・燃料製造から考えた場合のエネルギー効率はガソリン<軽油<ナフサの順となるため将来的にナフサの需要が減り供給過剰になると予測され，燃料として利用価値あり。
- ・軽油より安くなる可能性あり
- ・ナフサは約 70RON 程度で，HCCI が成立すればトータルで効率 10%の効率向上期待。

【質疑応答・議論】

Q. 軽油と比較して，脱硫が要らない分コストが抑えられているということか。

A. パスを見るとそのようだが，軽質ナフサと重質ナフサでも異なっているようだ。

Q. HCCI は燃料を特定して実用化するのか。燃料を指定すると燃焼側の自由度がなくなるの

では？

- A. 自着火の点では、ガソリンよりナフサのほうが HCCI に向いているので希望がある。
- Q. いずれにせよ脱硫などでコストがかかるのでは？ ナフサは重要な工業原料だが、将来的に燃料へ進むと石油業界も考えているのか
- Q. 少し前は、余剰重油の利用が課題になっていた。燃料のトレンドは結構変わり、社会勢などの影響も大きいのでは？
- A. 余った重油を軽質（軽油、ガソリン）に転換していくと、それに応じてナフサも精製されて結果的に余剰になる
- ・現状（2015）で、原油からの精製割合はガソリン（56）、軽油（33）、ナフサ（43）、重油（41）単位：100万キロリットル
 - ・いずれにせよ、化石燃料なので CO2 の排出は避けられないと思う。
 - ・石油会社がナフサを燃料として供給できる（コスト等を勘案して）と言っているので実現性は高い。それに対応する燃焼技術があってもよい
 - ・55%は HCCI で達成すると決まっているわけではない。HCCI がベストの熱効率という理論も決まっていない。道筋の1手段という位置付け。期待は大きいようだが。
 - ・RON80, 85 のガソリンエンジンが解決策とも考えられる。
 - ・当然燃焼だけでは 55%は難しい。燃焼形態(含む圧縮比、希薄化、高膨張)、動弁機構、着火方式、点火強化、機会損失・・・で 55%の可能性がどうなるかを議論していくのが当会の目的と考える。そこに燃料も入ってくる。燃料は最後の選択しのひとつでないか。

話題提供 3 大平氏

【概要】

- ・エンジン以外の技術も並行して進めると、60km/L ほどの超低燃費車を開発することになる。実用燃費を相当向上させなければならないと考える。
- ・最良 BSFC 領域以外での熱効率にも目を向けるべき：低回転速度領域、低負荷領域
- ・エンジン自体の軽量化は難しいが、車両全体としての軽量化が求められている。
- ・要素技術として、新材料が不可欠。
- ・耐久性、ロバスト性、自己修整機能等が 55%を支える技術として必要。

【質疑応答・議論】

- Q. トランスミッション、タイヤ、空力はエンジン並みの努力をしているのか。各専門家に意見を聞いてみたい
- A. それらの要素も 55%達成には重要。CVT の登場は大きい。トランスミッション側は低回転数を要求。エンジンとの協調が求められる
- ・企業に長くいると、説明された内容は痛いほどわかる。理論で一点、ベストな燃焼効率を見つけても、商品開発ではものにならないことも多い。ロバスト性は重要。
 - ・これらの項目自体も、それぞれハードルが高い。熱効率 55%と同時にやっけないといけない
 - ・熱工学からみると、例えばオットーサイクルの理論効率には「負荷」の影響が入っていない。現実ではそこに様々な要素が加わって実際の効率が決まるので、それらを丁寧に見ていくことが、理論面からは重要
 - ・車両重量に対応して、最適な排気量がある。車両軽量化に伴って、排気量ダウンサイジングも考えられる。ライトサイジングが重要。
 - ・変換効率まで含めると、モード走行ではもはや AT の方が高効率。DCT と CVT では使い方によるので、議論がある。トランスミッション側では伝達効率 90%が目標

- ・ニーズによってトランスミッションは変わるが、いずれにせよ伝達効率は上げる必要がある

話題提供 4 ダイハツ工業 株式会社 芹沢氏

【概要】

- ・エンジンのアウトプットはトルク。レシプロ機関として見直し、クランク機構のモディファイが重要
- ・クランク系の変更で、燃焼の温度履歴を変えることができる。

【質疑応答】

- Q. 燃焼工学の面からは、燃焼期間を短くしたい要求はある（これが目的なのか？）。壁面近傍では燃焼速度が落ちる。燃焼の最後で燃やしきるのがエンジン技術の仕事。ノック低減にも寄与
- A. オフセットクランクは、サイクル効率の改善が目的（熱⇒仕事への変換効率アップ）

話題提供 5 大阪ガス 株式会社 高島氏

【概要】

- ・中大型ガス機関の高効率化が参考になると思う。
- ・現時点でこれらのエンジンは熱効率 50%以上を達成している。
- ・副室希薄燃焼、高 Bore/Stroke 比、高過給機効率、早閉じミラーサイクルが要素技術。

【質疑応答・議論】

- Q. ボアストローク比が大きいことが高効率の主要因か
- A. 評価し切れていない
- ・低回転なので冷却損が多いのかとも思うが、熱勘定を解析して見る必要がある。
 - ・ボアが大きいので、副室からの熱損失は割合としては極小さい。
 - ・舶用の 55%に自動車も追いつこうということなので、大型エンジンの内容を精査していくことが重要。例えば、メタンの排気規制がないので燃焼効率が低いはず。それでも高熱効率である理由を追究すべき。
 - ・業界によって熱勘定の仕方が違う。それを加味して、舶用・自動車用（大～小）をまとめて整理してみたい。

話題提供 6 富士重工業 株式会社 金子氏

【概要】

- ・サイクルシミュレーションで正味熱効率 50%越えエンジンを検討。
- ・超ロングストローク、フリクション低減、圧縮比 18 以上の希薄領域で 50%を達成。

【質疑応答】

- Q. 1200rpm, BMEP=530kPa とした理由は
- A. 低回転の方がフリクションが減ると期待。従来エンジンで使用頻度の高い BMEP を選んだ。回転数が高い方が冷却損は低いはず
- Q. 結果を見ると、せいぜい 50%が理論的な限界では？
- A. 55%を狙うには、排熱回収等の要素を併用することが必須
- Q. ガスエンジンでは $\lambda = 2$ くらいで 50%を達成しているが、どこが違うのか
- A. ガスエンジンは、もっと高負荷。回転数も低い

話題提供 7 トヨタ自動車 株式会社 太田氏

【概要】

- ・現在の量産エンジンの熱効率は40%が世界一（トヨタ プリウス）.
- ・トヨタの取組みとしては均質リーンバーン、クールド EGR、ロングストローク、高タ
ンブル、電動スーパーチャージャーで 45.6%、ターボチャージャーでは 43.9%.
- ・今後の取組みとして、更なるリーンバーン（均質、弱成層）、HCCI、高負荷化、膨張比ア
ップ（ ϵ 増に伴うノック改善）、スイング遮熱膜、廃熱回収（ランキン、ペルチェ）

【質疑応答】

- Q. 遮熱膜はガソリンでも良いか
- A. 膜厚次第で壁温が上がるのでディーゼルより難しい、
排気温アップ分をターボで回収するのが良い
- Q. 冷損減らしても全てが仕事にならず、排気損が増えることになる
廃熱回収は本当に街中で回収できるのか、過給、触媒暖機で質は悪いが最終的に仕事に戻
ってくるものが良いのでは
- Q. 回収した熱はどう使う
- A. 電力（今後電動化が進み、使い勝手が良い）と冷間の暖機

話題提供 8 日産自動車 株式会社 寺地氏、水野氏

【概要】

- ・エンジンの熱効率向上の歴史はオットーの 13%から直線的に伸びており 2100 年には 60%
に到達する.
- ・その間にはオクタン価、GDI、HEV 等の技術的なイノベーションがあった.
- ・ $\lambda=2$ (燃焼安定の限界) での熱効率は ϵ 増、冷損 0 でも 53%が限界であり廃熱回収が必要.
- ・仮に 100km/L の燃費で 10-15 モードを走行すると燃料量は 42cc (1.5MJ) でそれはアル
ミ 50kg を 30°C 昇温させる程度でエンジンの早期暖機が重要.
- ・革新的な技術が必要、可変圧縮比（ ϵ アップ、高膨張比化）、燃料改質、エンジン小型化、
低熱容量化（新素材）、断熱

【質疑応答】

- ・ガスタービンは熱効率 60%になっている（コンバインドサイクル）、
将来はレシプロで無いかも
- ・燃焼以外の技術も積み上げていかないといけない

話題提供 9 株式会社 本田技術研究所 神尾氏

【概要】ホンダ殿の取組み

1. HCCI

- ・内部 EGR 利用の為、電磁バルブ、可変圧縮比で IMEP 約 400kPa まで運転.
- ・内部 EGR の熱量確保の為、排気管をブローダウンが入る配列に、弱過給の効果も得ら
れ、IMEP 約 600kPa まで領域拡大.
- ・制御性対策として少量の直噴を火種としたスパークアシスト、成層化で NOx 下げきら
ず.
- ・エタノール+サブオクタンガソリン（低オクタン価）のデュアルフューエルで制御性、
燃焼切替良好 ※USA のバイオを想定.
- ・天然ガス（小型発電機）で ϵ 26 くらいが良好.

2. 均質リーン

- ・高 ϵ 、DCO で A/F 30 超、ISFC も立ち上がり、但し NOx 50ppm で高め高エネル

ギプラグで NO_x 発生、若干成層が残ることによる。

- ・副室ジェットイグニッション、副室に H₂ 供給、H₂ は少量で熱損失少
※H₂ は廃熱回収で燃料改質を想定。
- 3. 効率はノイズとトレードオフとなる（等容度アップ、燃焼期間短い）

【質疑応答】

- Q. 効率とノイズのトレードオフはなぜか
A. HCCI でノイズが悪化する。これは自着火では当然問題となってくる。
Q. 天然ガスの HCCI はフリクション問題では
A. 悪くは無かったが注意が必要

話題提供 10 株式会社 日本自動車部品総合研究所 調氏

【概要】

1. エンジンでのアイテム
 - ・リーンバーン、可変 ϵ 、HCCI、廃熱回収、ディーゼル低流動。
2. 部品メーカーの取組み
 - ・噴射系：ガソリン高压化、高噴射率でノック低減
ディーゼルは低貫徹力、噴霧微粒化し高分散、多段噴
 - ・点火系：高エネルギー化で電極摩耗が課題、新システムの開発
ストリーマ、レーザー、DCO および気流強化への対応
 - ・動弁系：電動化が進む、油圧の立ち上がり待ち不要、高精度
※ 可変圧縮比は部品メーカーが入り込めておらずコモディティ化できていない
3. 部品総研殿の計測技術
 - ・時間分解できる LII で PM 生成過程、PN 可視化。
 - ・熱流速センサ、計測部品から部材を切り出し、隙間が無いようなノウハウ。
 - ・過給ガソリンエンジンの低速プレイグ可視化。
2 万サイクルに 1 回程度しか発生しない為、ドライブレコーダ方式で上書き録画し、発生前後を保存。

【質疑応答】

- Q. プレイグの着火源のデポの組成は
A. オイルの添加材の Ca 酸化物、プレイグの 2, 3 サイクル前に弱いノックが発生し、壁面のデポが剥がれて、次のサイクルで着火源となる
A 日産殿ではオイルそのものと考え
冷間始動時に直噴燃料で希釈されたオイルが、ピストンリングで掻き揚げられ、粒子が燃焼室内に入り、着火源となる
一度発生すると連続的に発生、一発目はオイル起因で 2 発目以降はデポと考える

話題提供 11 東邦ガス 株式会社 田村氏

【概要】

1. 定置ガスエンジンの状況
 - ・コージェネ発電効率は大型（519L 9MW クラス）で約 50%、小型（160cc 1kW）で 26.3%、GHP は最大熱効率 33% 程度。
 - ・ガス専用エンジンは無く、船用、産業用、自動車用を流用、ディーゼルベースが多い。
 - ・ミラーサイクルとリーンバーンが主流、大型は副室式が採用されている。

- ・日本ガス協会では大型コージェネの発電効率 50%（'20）を目標としている。
- 2. 熱効率向上の方策
 - ・高 BMEP 化：ノルウェーのバルチアで BMEP2.72MPa
耐圧増強コスト、プレイグ対策が課題
 - ・HCCI：日本ガス協会とヤンマーで 3L+高効率過給機（効率 64%）で 43.3%達成
高圧化、HCCI 制御コストが課題であった
 - ・USA スーパートラックプロジェクトは熱効率 55%を目標に掲げているが
廃熱回収、デュアルフューエル等のエンジン本体以外の方策も含む

【質疑応答】

- Q. 過給機効率が 64%まで上げられるのはなぜか
A. 定置用の諸元（大型スクロール）としている

まとめ

熱効率 55%は簡単に達成できるものではないが、熱力学的な追究と周辺要素技術の向上で実現可能性があるかどうか見極めたい。理論と実機結果の両者を常に見据えながら、矛盾なく方向性を決めていくことは重要である。熱効率改善は最良燃費点のみならず、それより軽負荷領域、高回転領域までを対象とし実使用領域を睨みながら検討していく必要がある。

具体的な手段として、熱力学的観点で踏まえたうえでの高圧縮/高膨張化(含むミラーサイクル・リーンバーン・着火方式(自着火 or 強制着火)、機械力学的観点でのクランク機構改良等、またこれらを実現するための可変動弁機構、強力点火システム、大量 EGR システム（クールド、MPL-EGR、Dedicated-EGR）、可変圧縮比機構等の実効ある検討が必要。さらには、ヒートマネジメントも重要で、冷間時の軸受け部加熱、燃焼室の断熱（低熱容量・低熱伝導⇒温度スイング量拡大）等を広範に進めていく必要がある。周辺要素としては新材料によるエンジン運動部品の軽量化、機械損失の低減、車両軽量化、燃料関連、廃熱回収の検討が今後重要となる。忘れてならないのは、一品料理ではなくロバストネスを持たせた製品につながる技術でなくてはならない。そういう意味で、計測技術は裏付けをとる上で非常に重要。

今回の議論にあったように、大型ガスエンジンを含む排気量、SV 比と熱効率の関連調査、トランスミッション・タイヤ・空力の実燃費に対する寄与率を整理してみる必要が在ります。会員の皆様からの情報提供を御願いたします。

連絡事項：次回研究会について

日時：9月3日（土） 13:30～17:00

※ 研究会では9月10日とお知らせしましたが訂正いたします

場所：愛知工業大学 本山キャンパス

話題提供：

- ① 展望：ガソリンエンジンの超希薄燃焼およびライトサイジングについて
愛知工業大学 藤村教授
- ② 技術報告：熱効率 55%達成に向けた燃焼技術（仮）
トヨタ自動車株式会社 太田委員
- ③ 技術報告：ディーゼル熱効率改善・超クリーン化を支えるシステム技術（仮）
株式会社 デンソー 佐々木委員