

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 10 No. 3 2020

JSAE エンジンレビュー

特集 : SIP「革新的燃焼技術」リーダー対談

コラム : 時間の戦争



公益社団法人 **自動車技術会**

- コラム：時間の戦争 1
War of time
小酒 英範
Hidenori KOSAKA
編集委員
JSAE ER Editorial Committee
東京工業大学工学院
Tokyo Institute of Technology
- SIP「革新的燃焼技術」リーダー対談 2
—工学と科学の融合がエンジンを革新する—
編者 小酒英範
Editor: Hidenori KOSAKA
東京工業大学工学院
Tokyo Institute of Technology
- スーパーリーンバーンとはいかなる現象か 25
What is super lean burn
飯田 訓正
Norimasa IIDA
慶應義塾大学名誉教授
Keio University
- 高熱効率を目指したディーゼル燃焼の研究 31
Research on Diesel Combustion Aiming at Higher Thermal Efficiency
石山 拓二, 川那辺 洋
Takuji ISHIYAMA, Hiroshi KAWANABE
京都大学
Kyoto University

■ JSAE エンジンレビュー編集委員会

委員長: 飯田 訓正(慶應義塾大学)

副委員長: 村中 重夫(元・日産自動車)

幹事: 飯島 晃良(日本大学)

委員: 遠藤 浩之(三菱重工エンジン&ターボチャージャ)

大西 浩二(日立オートモティブシステムズ)

菊池 勉(日産自動車)

小池 誠(豊田中央研究所)

小酒 英範(東京工業大学)

清水 健一(元・産業技術総合研究所)

下田 正敏(元・日野自動車)

鈴木 央一(自動車技術総合機構)

西川 雅浩(堀場製作所)

野口 勝三(本田技術研究所)

平井 洋(日本自動車研究所)

細谷 満(日野自動車)

山崎 敏司(編集)

渡邊 学(JXTG エネルギー)

発行所: 公益社団法人 自動車技術会

発行日: 2020年4月6日

発行人: 大下守人(アイシン精機)

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN

Vol. 10 No. 3 2020

●コラム

時間の戦争

War of time



小酒 英範

Hidenori KOSAKA

編集委員

JSAE ER Editorial Committee

東京工業大学工学院

Tokyo Institute of Technology

COP24の参加国首脳に向かって「あなた方は、自分の子どもたちを何よりも愛していると言いながら、その目の前で、子どもたちの未来を奪っています」と強烈なメッセージを放ったグレタ・トゥーンベリさんは、当時15歳であった。この発信に対し、数百万人の同世代の若者が賛同し、世界各地で彼女らによる抗議デモが起こるなど、その影響は今でも広がり続けている。地球規模の気候変動とエネルギー政策の問題は、自然現象、エネルギー技術、経済、社会構造などが複雑に絡み合う課題であり、エネルギー工学にかかわる研究者の一人として、筆者はグレタさんの意見に全面的には賛同できない。しかし、彼女の問いかけに対し、真摯に向き合うべきであると強く思う。ここでは、エネルギーの課題を取り上げるのではなく、10代の若者と社会人である「大人」との断絶について感じていることを記す。これに関連して、筆者がまだ20代のころに読んだミヒャエル・エンデ（ドイツの児童、幻想文学者）の言葉を思い出した。少し長くなるが引用する。

「1945年以来、第三次世界大戦は起こりうるか、という問いが幾度も出た。わたしが思うに、わたしたちはもうそのまっただなかにいる。ただ、だれも気づかないだけで、なぜなら、この戦争は領土ではなく、時間の戦争だからだ。わたしたちは、わが子や孫に向かい、来る世代に対して、ようしゃない戦争を引き起こしてしまった。私たちは砂漠と化した世界を子孫に残すことになるだろう。子孫がそこで生きることはたやすいことではない。だが、子孫は応戦できないから、わたしたちはこのままさらに進めていく。もはや、これ以外のことはできない。そして、（黙らせることができないなら）こう聞かせて良心をなだめるのだ。わたしたちが行ったひどいことを償うために、子孫は何か思いづくに違いない、と」（エンデのメモ箱、ミヒャエル・エンデ著、田村都志夫訳、岩波書店）

これが出版されたのは1980年代中ごろであったから、CO₂問題はまだ社会的に大きな問題にはなっていなかったと思う。ただ、エンデは人間の活動が後世の地球に与える負の遺産について強く警告している。「大人たち」はだいぶ前から気づいていたのだ。でも、「子孫は応戦できな」かっただけだ。今は違う。子孫は反撃する。第三次世界大戦はすでに始まっていたが、エンデが語ったような、「大人たち」からの一方的な戦争ではなくなった。これを最終戦争にしてはならない。「大人」はもっと真摯に彼らの意見に耳を傾け、彼らとともに困難な課題の解決に取り組まねばならない。

SIP「革新的燃焼技術」リーダー対談

—工学と科学の融合がエンジンを革新する—

対 談

石山 拓二 Takuji ISHIYAMA

京都大学教授 Kyoto University

飯田 訓正 Norimasa IIDA

慶應義塾大学名誉教授 Keio University

編者 小酒英範

Editor: Hidenori KOSAKA

東京工業大学

Tokyo Institute of Technology



飯田訓正氏（左）と石山拓二氏（右）（2019年9月10日，自動車技術会事務局にて）

1 新しい燃焼コンセプト

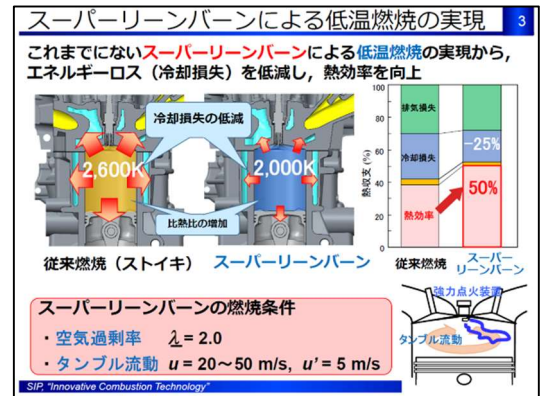
小 酒 エンジンレビュー誌では、今回、3号からなるSIP「革新的燃焼技術」の特集を組みました。その第一弾として、ガソリン燃焼チーム、ディーゼル燃焼チームをそれぞれリーダーとして牽引してきた、慶應義塾大学名誉教授の飯田訓正先生、京都大学教授の石山拓二先生にお越しいただき、SIPにおける燃焼研究の総括と今後の内燃機関研究の方向について対談形式で語っていただきます。対談は三部で構成し、第一部では、それぞれの燃焼チームで

実現を目指した新しい燃焼コンセプト、「スーパーリーンバーン」（ガソリン燃焼）と「高速空間燃焼」（ディーゼル燃焼）がどのような現象であり、従来燃焼に対し何が革新的であったのかについて対談いただきます。続く第二部では、開発された新たな燃焼技術の実用化に向けた技術課題について述べていただきます。最後の第三部では、これまでにない産産学学連携研究の大規模プロジェクトを推進するにあたって、組織運営面でどのようなことを工夫し心掛けたのかについてお話しいただき、今後の内燃機関研究の展望についてご意見を伺います。

早速ですが、第一部を始めます。まずはガソリン燃焼チームで開発した「スーパーリーンバーン」について飯田先生よりお話しいただきます。



従来研究では、リーンバーンの安定性や冷却損失を支配する要因を突き詰めなかった。これを解明するにはサイエンスが必要で、そこにチャレンジする意味がある。(飯田)



出典：SIP 革新的燃焼技術公開シンポジウム平成31年1月28日

「これまでない超希薄燃焼における反応論と燃焼科学、燃焼と流動の相互作用、過給機を含めたシステム最適化などに焦点を絞り、科学と工学の両面における内燃機関研究活性化を目指しました」 — 飯田

飯田 内燃機関の歴史において、最大の要求は出力を上げることと効率を上げることであり、それが今日まで100年以上続いています。過去の文献やエンジンの教科書を読むと、熱効率向上の共通キーワードは燃焼効率の向上であり、とにかく燃焼室内に投入された燃料を完全に燃やしきることが第一です。これが解決されなければ話になりません。ガスタービンエンジンのような開いた系の内燃機関では、これでほぼ良いのですが、作動ガスを閉じた系で扱う容積型のレシプロエンジンの場合には、さらに、できるだけ短時間に上死点近傍の同じタイミングで安定した燃焼を行う必要性が加わります。そのために、これまでのSIエンジンでは、燃料と空気の混合気を過不足なく燃える空燃比(量論混合比)に保ち安定して燃やすことが最適とされ、開発が進められてきた歴史があります。ところが、さらに熱効率向上を目指す時、エンジン壁面からの熱損失(冷却損失)の問題が浮上してきます。ガスタービンエンジンでは燃焼が定常に行われるため、エンジン内壁面温度が高温に維持され、燃焼気体と壁面温度の差が一定以上に大きくなり、冷却損失の低減は比較的対処しやすい。一方、レシプロエンジンの場合には、吸気—圧縮—燃焼—膨張といった行程が間欠的に繰り返されるサイクル中で、壁温は低いままで気体温度が大きく変化します。このような間欠サイクルにおける壁面と燃焼室内気体との熱の出入りはガスタービンエンジンに比べてとても複雑で、冷却損失の低減はより難しくなります。最近では、壁面温度を筒内気体の温度上昇に応じ上昇させ熱伝達を抑制する遮熱スイング^{1), 2)}が提案されていますが、材料の熱物性も有限であり冷却損失低減には限界があります(温度スイング効果を上げるには、密度 ρ 、比熱 C 、熱伝導率 λ で定まる熱浸透率 $\sqrt{\rho C \lambda}$ が小さいことが要求されるが、これに限界がある)。今回のSIPでは、火炎温度を極端に低下することで冷却損失を下げるアプローチをとりました。スーパーリーンバーン(超希薄燃焼)により、燃焼温度を2600 Kから2000 Kまで下げ、これにより冷却損失を25%程度減らします。ここに高効率のための燃焼技術をフォーカスしました。燃焼温度を低下させるだけなら、EGR利用、あるいはEGRと希薄燃焼の組み合わせも選択できますが、目標値達成のためにシステムを複雑化することはせずに、これまでない超希薄燃焼における反応論と燃焼科学、燃焼と流動の相互作用、過給機を含めたシステム最適化などに焦点を絞り、科学と工学の両面における内燃機関研究活性化を目指しました。

小酒 ガスタービンエンジンとの対比によりレシプロエンジンの冷却損失低減の難しさがよく分かりました。一方では、レシプロエンジンではサイクル毎に安定した燃焼を実現しつつ冷損低減対策しなければならないので、「リーンバーンにおけるサイクル変動の増加が大きな壁になるのでは」という疑問が湧きます。

飯田 その通りです。ガスタービン、レシプロエンジンともに完全に燃やせばいい。しかしレシプロエンジンでは、それに加えて、一定の燃焼位相、ピストンの動きに対して同期して間欠に燃焼させなければいけない。これは回転速度により許容される時間内に燃やし切らなければいけない要求であり、高回転運転時には厳しい要求となります。多くのエンジンの教科書では、「熱効率向上のために急速燃焼を実現しなければならない」と書かれている。

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 10 No. 3 2020

しかし、だれも急速燃焼の定義はしていない。おそらく、「ピストンが上死点にきたときに、あるいはその直前に燃え始めて、クランク角度で上死点後 70 度まで燃焼が続いたら遅すぎ、では 60 度ならいいのか、あるいは 50 度までに燃焼終了する必要があるのか」という非常に曖昧な世界です。それでも、混合気をストイキ（量論混合比）にしておくと、低回転速度では相対的に燃焼変動が少ないから、それくらいの期間に燃え切って、高速運転すると筒内流動の乱れ強さも自然に強くなって、なんとなく安定してその辺で燃え切っていたので急速燃焼を厳密に定義する必要はなかった。それでは、毎分 2 万回転とか 3 万回転でエンジンを回したら燃焼位相はどうなるのか。そもそもそこまで回せるエンジンがないので、この議論は終わりにして次の議論に行こう。このような状況で、本当の意味での急速燃焼を論ずることはできません。

「(従来研究では) リーンバーンの安定性や冷却損失を支配する要因を突き詰めなかった。これを解明するにはサイエンスが必要で、そこにチャレンジする意味があると考えました」 - 飯田

「スーパーリーンバーンであっても、1 サイクルでも良い燃焼が実現されるなら、その成立条件が分かれば、再現することができる」 - 飯田

小 酒 リーンバーンで冷却損失は抑え込む、でもリーンバーンであっても急速に安定して燃やす。その二つを狙ったところが革新的ということですね。

飯 田 燃焼効率を完全に、つまり未燃成分を作らない。しかし、短い時間に燃やし切る。さらに、燃焼の開始時期と終了時期を全サイクルで一定に保つ。リーンバーンの場合には、そもそも着火しにくいので、確実に燃焼を開始させなければならない。これまでの SI エンジンでは、最後の問題解決が難しく、ストイキ付近、あるいはちょっとリッチにした燃焼で高効率化を図っていた。そうすると火炎温度は高く冷却損失が大きく熱効率的には理想の燃焼とは言えない。こんなことは、エンジニアは分かっていたのですが、リーンバーンの安定性や冷却損失を支配する要因を突き詰めなかった。これを解明するにはサイエンスが必要で、そこにチャレンジする意味があると考えました。混合気を薄くしていったら、燃焼変動が起こり、効率が悪化するから使えないということではなく、スーパーリーンバーンであっても、1 サイクルでも良い燃焼が実現されるなら、その成立条件が分かれば、再現することができる。

2000K という低温燃焼温度では、燃焼速度は 1/3 まで下がります。空気過剰率が 2.0 を超える予混合気を、1) 毎サイクル安定して着火する。2) 安定して火炎伝播させる。3) ストイキと同等の短い時間に燃やし切る。4) 燃焼の完結性を確保する。これらが課題でした。

「目標にしたのは、効率点、比較的負荷の高いところの効率を上昇させること、さらに、常用される中低負荷における CO₂ 排出量の低減です。高速空間燃焼は高負荷側の燃焼コンセプトの名称です」 - 石山

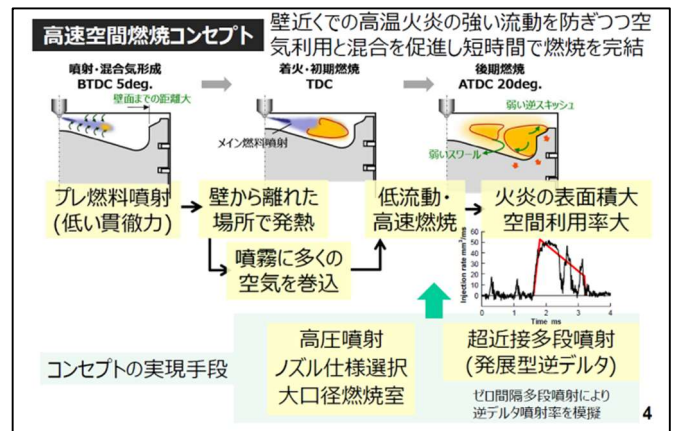
「限られた空間の中で噴霧火炎の壁への衝突を出来るだけ和らげて冷却損失を低減しながら、燃焼室内の空気を目いっぱい使って速く燃やす。『急速燃焼と冷損低減を両立させる』という意味で高速空間燃焼という狙いを定めました」 - 石山

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 10 No. 3 2020



急速燃焼や冷損低減について、現象の正しい理解と、それを整理して現象間の法則を見出すことが必要です。(石山)



出典：SIP 革新的燃焼技術公開シンポジウム平成 31 年 1 月 28 日

小 酒 次に、ディーゼル燃焼チームの目指した高速空間燃焼のコンセプトを石山先生にご説明いただきます。

石 山 ディーゼル燃焼チームが目標にしたのは、効率点、比較的負荷の高いところの効率を上昇させることです。全負荷近くでは効率より出力が重視されるので、全負荷より少し負荷の低いところですね。さらに、常用される中低負荷における CO₂ 排出量の低減です。これら二つの負荷領域で有効な燃焼を研究しました。高速空間燃焼という名前については、高負荷側の燃焼コンセプトの名称で、どちらかという後付けになるのですが、限られた空間の中で噴霧火炎の壁への衝突をできるだけ和らげて冷却損失を低減しながら、燃焼室内の空気を目いっぱい使って速く燃やすということです。

小 酒 とても難しいことですね。

石 山 とても難しいです。しかし、着目は全くあたりまえの話ですね。ガソリンエンジンでは、混合気を希薄化して燃焼温度を下げることで冷却損失を減らせますが、ディーゼル噴霧火炎の場合には拡散的燃焼であるため、全体の当量比を下げても噴霧火炎の局所温度を下げることはほとんどできない。EGR を利用すれば火炎温度は下げられますが、十分な冷却損失低減を得ようとすると、排気エミッション悪化や燃焼期間長期化による効率低下といった問題が出てくる。噴霧火炎が壁に当たることによる冷却損失は冷却損失全体の半分にも及びます。そこで、火炎温度の低下ではなく、噴霧火炎の壁への衝突を和らげることで冷却損失低減を狙いました。しかし、これを従来手法で実現しようとすると、噴霧の空気利用が悪化し燃焼期間が延びてしまう。急速燃焼と逆になってしまい熱効率は上がらないわけです。急速燃焼で上死点近くに圧力が高い期間を集中させることでサイクル熱効率は増加します。「急速燃焼と冷損低減を両立させる」という意味で高速空間燃焼という狙いを定めました。

「急速燃焼や冷損低減について、現象の正しい理解と、それを整理して現象間の法則を見出すことが必要です。これについては、残念ながら宿題として残っている。しかし、効率向上への筋道は見えってきたと思います」 — 石山

小 酒 ディーゼル燃焼チームの高効率化アプローチは、制御性の高い燃料噴射装置を使って燃焼を最適化するという実際的なアプローチという印象を持っていましたが、石山先生が言われたように、冷損低減のために噴霧を壁の前で寸止めしたいが、燃焼室内のできるだけ多くの空気を使って燃焼を急速に完了させるという、相反する要素の最適化であり、至難の業の開発です。これを実現するための手法やアイデアは初めからあったのか、それとも試行錯誤の上に開発されたのでしょうか。

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 10 No. 3 2020

石山 最適解を得るには、急速燃焼や冷損低減について、現象の正しい理解と、それを整理して現象間の法則を見出すことが必要です。これについては、残念ながら宿題として残っている。しかし、効率向上への筋道は見えてきたと思います。つまり、物理法則を表す数式を得るには至っていないが、冷損低減と等容度向上という相反事項をうまくマネージするための燃焼系設計の方向性は分かってきた。たとえば、ある与えられた燃焼室に対する燃料噴射条件の最適化は、非常に複雑ではあるが、できると思います。その燃焼室に対し高い熱効率を得る燃料噴射条件を求めることはできる。しかし、それを一般化した形にして誰でも使えるまでには至っていない。それは今後の宿題として残りました。

「低中負荷の燃焼はPCCIではありません。PCCIを一部取り込んだ、パーシャルPCCIと呼んでいます」 — 石山

小酒 今回のプロジェクトでは、高負荷は拡散燃焼、常用域の中負荷はPCCIと、燃焼を使い分けています。これらの燃焼は互いに全く異なる現象であり、両者を限られた研究期間で同時に追求するのは相当大変だったと思いますが、チームで分担して乗り越えたのでしょうか。

石山 そうです。チーム中に五つのグループを作り、1番目のグループは総括を担当し、残り四つをさらに二つに分け、それぞれ高負荷、低中負荷を担当してもらいました。しかし、明確に負荷別に分担しているわけでもなく、オーバーラップしている部分もあります。あと、低中負荷の燃焼はPCCIではありません。PCCIを一部取り込んだ、パーシャルPCCIと呼んでいます。多段燃料噴射を使って、1段目の噴射が起こす燃焼はPCCIとし、2段目以降に噴射した燃料は先の燃焼の影響を受け着火遅れが短く拡散的燃焼となります。PCCIだけでは燃焼制御が難しく、制御性の高い拡散的燃焼と組み合わせました。しかし、従来のパイロット燃焼のように初段に微量の燃料を噴射するのではなく、燃料噴射量割合は等分に近くなっています。

「本当は、圧縮比について極めたかった」 — 飯田

「圧縮比を高めればどこまでも熱効率が上がるということは幻です。どこが幻で、どこが幻でないのかを見極めること、そうしないと究極の熱効率にアプローチできない」 — 飯田

「様々な制約下でエンジン開発する設計思想に沿った研究だけでは、真に革新的な技術は開発できないと思います」 — 飯田

「エンジニアは、先達が見出してくれたローカルミニマムの世界に留まっていたは駄目で、常にローカルミニマムの壁の外を探索すべきだと思います」 — 飯田

小酒 それぞれの燃焼チームが目指した燃焼についてお話いただきましたが、先生方から他チームの燃焼コンセプトに対し意見をいただきたいと思います。ケンカしない程度をお願いします。(笑)

飯田 他チームについてでなく、ガソリン燃焼チームについて、個人的にやりたかったことを話してもよいですか。本当は、圧縮比について極めたかったのです。

小酒 それはスーパーリーンバーンにおける圧縮比ですか。

飯田 ほとんどの教科書では、圧縮比を高めれば熱効率は高まると書いてある。そこに示されているグラフの横軸の圧縮比は20程度までです。しかし、炭化水素燃料と空気を使って、圧縮比を従来以上に、例えば60~100まで高めると、筒内の最高温度は極めて高くなり、燃焼反応は終わっていても熱乖離でCO₂やH₂OなどはCO、OH、O、Hに乖離してしまう。これでは発熱量が低くなるので、効率を上げるためにLNGを燃料として用いて、圧縮前の下死点温度を-50°C~-100°Cまで下げて圧縮する。すると、熱効率が60~70%まで向上できるという研究をスタンフォード大学のグループが既にやっています³⁾。

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 10 No. 3 2020

本当は、究極の熱効率を求めの方針を得るために、圧縮比を極端に上げた燃焼現象における課題を抽出し、得られた高効率化の条件等を実用レベルまでリダクションして自動車用量産エンジンで何をすべきかを探索したかった。このことを昨年逝去された神本武征先生（東工大名誉教授）に申し上げたら、それは今回のプロジェクト課題としては駄目ですと言われました。でもそれをやらないと、いつまでたっても教科書どおりに「圧縮比が高いと効率が良い」と言い続けてしまいます。温度が高くなれば熱乖離が起こるし、冷却損失も増加します。「燃焼や熱伝達の視点から熱効率を向上するための限界圧縮比は幾つですか」という問いに答えられない。本当はこの答えを見出したかった。圧縮比を高めればどこまでも熱効率が上がるということは幻です。どこが幻で、どこが幻でないのかを見極めること、そうしないと究極の熱効率にアプローチできない。それから急速燃焼も、先に述べた定義も含めて、急速燃焼における本当の課題を見極めること。それをせずに、ノックなど様々な制約下でエンジン開発する設計思想に沿った研究だけでは真に革新的な技術は開発できないと思います。ただ、極限を見極めるだけでは不十分で、実用エンジンを作るためにはどこまで実用レベルに戻らねばならないかを、皆で見出さなければならない。こういうのがエンジン研究における科学的アプローチだと思います。エンジニアは、先達が見出してくれたローカルミニマムの世界に留まっただけでは駄目で、常にローカルミニマムの壁の外を探索すべきだと思います。

予混合系の燃焼は、このアプローチをシンプルに捉えることができますが、石山先生が研究対象とした拡散燃焼では、狭い空間における燃料と空気の混合という現象がさらに加わるので、混合気分布を噴霧という手段でアレンジしながら、冷却損失も減らして熱乖離も減らして、熱効率を向上させることは、とても難しいと思います。今回提案された様々なアイデアや要素技術は素晴らしいと思いますが、どうしても相互にトレードオフの関係があり、100年以上の歴史の中で最適化が進められてきた今のディーゼルエンジンを上回る高効率エンジンを作るのは極めて難しいことですね。



エンジニアは、先達が見出してくれたローカルミニマムの世界に留まっただけでは駄目で、常にローカルミニマムの壁の外を探索すべきだと思います(飯田)

「与えられた条件に対して理詰めで答えを出すことを体系化しないと、内燃機関の講義を聞く学生は、『何ていい加減な学問だ』と絶対思います」 — 飯田

小酒 以前、飯田先生から超高圧縮比エンジンの研究について話を伺ったことがありますが、そのときは何を話されているのかわかりませんでした。今、改めてお話を聞いて、飯田先生が当初SIPでやりたかったことが、ようやく分かりました。

飯田 エンジンの技術議論では、何となく理由もなく、「圧縮比が高ければ熱効率が高い」とか、そういう技術がたくさんある。アトキンソンサイクルで膨張仕事を増やすのをミラーサイクルで実現するという話も、通常サイクルであっても、排気エンタルピをターボチャージャーにより回収できるわけです。ターボ効率向上でも高効率化はできます。どちらを選択するかは技術者に委ねられる。それぞれのシステム設計全体を通してより高い効率を得るには

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 10 No. 3 2020

どうしたらよいか。与えられた条件に対して理詰めで答えを出すことを体系化しないと、内燃機関の講義を聞く学生は、「何ていい加減な学問だ」と絶対と思います。

「内燃機関の効率向上に対しては、総合力で挑まなければならないと考えます。しかし、中心テーマは、あくまでも燃焼であり、噴霧燃焼やPCCIに焦点を当て研究を進めました」－ 石山

「燃料噴射と燃焼の関係、ディーゼル燃焼の基本部分ですね。当たり前のような話でも、これまで整理されていないことを明確に整理したいと思いました」－ 石山

「ディーゼル燃焼は、燃料と空気が混ざり合いながら発熱するという、両方が同時に進む現象なので、ガソリン燃焼が簡単だとは言いませんが、ガソリン燃焼のように、層流燃焼速度と流動場の乱れ特性で燃焼速度がおおよそ予測できるような燃焼ではありません。根本的な燃焼形態の違いに起因する難しさがあります」－ 石山

小 酒　　これまでの先生方の話を聞いた印象では、単なる印象ですが、飯田先生の高効率化に対するアプローチは、エンジンをまずシステムとしてとらえて高効率化の要素を抽出し、燃焼室内現象の研究に投影しているように思えます。一方、石山先生は、燃焼室内における燃焼や熱伝達といった現象に重きを置いたアプローチをとられたように思われます。飯田先生の場合には、リーンバーンありきではないけれど、石山先生の場合には、拡散燃焼やPCCIなどディーゼル燃焼そのものに対する視座が強いのではないのでしょうか。

石 山　　それは、SIPが「革新的燃焼技術」ですから。でも、内燃機関の効率向上に対しては、総合力で挑まなければならないと考えます。それには、摩擦低減、排気エネルギーを使うターボチャージャの効率向上も当然含まれる。これが燃焼の環境を作ってくれる。例えばターボチャージャが高効率であれば、平均的により稀薄なディーゼル燃焼ができ、比熱比増加の効果で熱効率が上がります。さらに空気がより多いので排気エミッションの制限をあまり受けずに、より自由度高く燃焼を制御できる。そういう意味では総合的に考えていきます。しかし、中心テーマは、あくまでも燃焼であり、噴霧燃焼やPCCIに焦点を当て研究を進めました。そういう捉え方をしてもらいたいです。

小 酒　　先ほど飯田先生は、当初は超高圧縮比エンジンをやりたかったと話されましたが、石山先生は、プロジェクト開始時に、これだけは究明したいと考えられていたことはございますか。

石 山　　やはり、燃料噴射と燃焼の関係、ディーゼル燃焼の基本部分ですね。当たり前のような話でも、これまで整理されていないようなことです。例えば、ノズル孔の大きさが変わったら何が起るのか。このとき乱流強度はどのように変化するのか。さらに、必ず火炎は壁に衝突する。衝突前は、大体、自由噴流と同様な振る舞いをすると思われている。壁に衝突した後はどうなるのか。壁面衝突はディーゼル燃焼の後燃えに強く影響すると思われているが、影響の強さを定式化できるのか。当たり前のように思われている問いに対し、答えてみると言われると、実は何も言えない。これらを明確に整理したいと思いました。残念ながら、どうしても熱効率を上げることに時間を割かれてしまい、これらの整理が十分にできませんでした。飯田先生のガソリン燃焼チームのように、基礎の究明と熱効率向上の技術開発の両方を分担して進めるスタイルは取れなかった。反省ですね。やりたいことはありました。

小 酒　　しかし、基本的な姿勢としては、「当たり前と言われていることでも、実は当たり前ではないだろう」という批判精神と、「当たり前でないならそれを明らかにしたい」という科学的精神においては、両先生とも共通しておられますね。

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 10 No. 3 2020

石山 ちょっと負け惜しみみたいなことを言うと、ディーゼル燃焼は、燃料と空気が混ざり合いながら発熱するという、両方が同時に進む現象なので、ガソリン燃焼が簡単だとは言いませんが、ガソリン燃焼のように、層流燃焼速度と流動場の乱れ特性で燃焼速度がおおよそ予測できるような燃焼ではありません。根本的な燃焼形態の違いに起因する難しさがあります。

飯田 それは負け惜しみではないです。拡散燃焼と予混合燃焼の違いという点については、実は私も浮気してまして、鴨居エンジンラボの共用エンジンの実験では、ガソリンをマニフォールド内へ噴射し可能な限り均一予混合気として筒内に供給しましたが、どうしても混合気の不均一性は残ります。実はこの不均一性がリーンバーンを成立させているとの考えもあります。しかし、リーンバーンを極めるなら、均一予混合気でスーパーリーンバーンを実現するとして、不均一性の誘惑は断ち切らねばなりません。そうしなければ限界は追及できません。ところが、実は、共用エンジンは筒内直噴用ガソリン噴射装置を装置立ち上げ時から装備しています。また、森吉先生（千葉大学）にツインポートによる混合気成層化で効率向上に挑戦いただきました。要は、均一スーパーリーンバーンが実現できなかったときの二の矢として成層リーンバーンの研究を用意していました。ローカルミニマムの誘惑を断ち切ってはいなかったのです。



燃料噴射と燃焼の関係、ディーゼル燃焼の基本部分ですね。当たり前のような話でも、これまで整理されていないことを明確に整理したいと思いました(石山)

「冷却損失低減として従来は禁じ手とされた噴孔径を大きくする冒険に出ました」 — 石山

「どれか一つが欠けても駄目だった。なんか神がかったチームでした」 — 飯田

小酒 第一部の最後に、両先生から、何が革新的であったのかを簡潔に総括いただけないでしょうか。

石山 ディーゼル燃焼の場合、燃料噴射装置の性能が良くなければ、想定する理想の燃焼ができません。我々が行ったことは、一つには明治大学が後燃えを減らすための燃料噴射パターンを提案し、それを実現するための燃料噴射装置を開発し実証する研究をした。それから同志社大学では、従来と同じ燃料噴射装置を使ってコンパクトな噴霧を作る技術を提案して、冷却損失を減らしながら燃えきりは早い燃焼を実現した。そして、これら二つの提案技術を合体させ実証試験を行いました。結局ハードウェアの限界から、例えば狙ったパターンの燃料噴射率が実現できずに、期待したような効果が得られなかった。そこで、結局、既存よりも燃料噴射圧力が高く応答性の良い燃料噴射装置を先行入手し、明治大学が提案する噴射率パターンを多段噴射で表現しました。

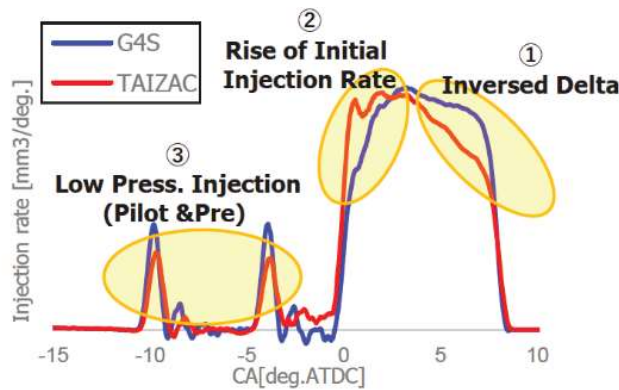


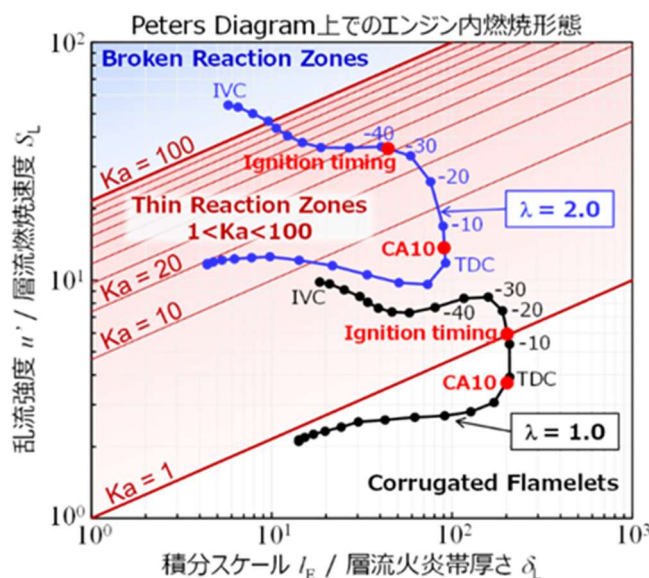
Fig2. Injection rate

出典：SIP革新的燃焼技術 Research Report 2019.1

さらに、同志社大学で得られた基礎的知見から、冷却損失低減として従来は禁じ手とされた噴孔径を大きくする冒険に出ました。これにより燃焼期間を短縮することで結果的にはトータルの冷却損失も低減でき、熱効率を向上できました。同志社大学の実験結果をよく見ると、噴孔径を大きくしても、火炎の壁面への接触時間が短かければ、トータルの冷却損失は減ることが分かった。どのような条件下でこれが成立するかは、まだ解明できていないが、噴孔径を大きくしてエンジンを回したところ、当初の予想に反し、見事に冷却損失が減り、しかも高速に燃える。革新的とは言いませんが、燃料噴射のコントロールが熱効率50%を達成できた要因といえます。それと、やはり過給機が高効率化されたことで平均的によりリーンな燃焼が実現できたことでしょう。これら全部が合わさってできたのが我々の高効率燃焼です。

小 酒 ありがとうございます。ガソリン燃焼チームの革新性は何ですか。

飯 田 28のクラスター大学のすべての成果ですね。そもそも、ペータースの乱流燃焼の状態図⁴⁾上での位置が、ストイキ燃焼に比べて、スーパーリーンバーンで火炎帯が厚く燃焼が遅くなったときにどこに移動するのかを時間履歴で考えることから始めました⁵⁾。



出典：5)

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 10 No. 3 2020

それには、様々な当量比、温度、圧力下でのガソリンの層流燃焼速度が必要です。しかしこれが存在しないため、同一のガソリンを用いて複数の大学が異なる方法でこれを測定しました。しかし、装置毎に計測できる温度圧力範囲は限られるため、計測範囲外は反応モデルにより外挿します。そのために、使用ガソリンの自己着火だけでなく、層流燃焼速度も表現できる素反応スキームを三好先生に作成いただきました。

スーパーリーンバーンにおける安定した着火を得るためには、着火時に 3mm 程度のスケールを有する乱れに対し、これをまたぐように放電経路を形成できるような傘型電極点火プラグも開発しました。



出典：SIP 革新的燃焼技術公開シンポジウム平成 31 年 1 月 28 日

点火プラグ周辺の流動をマイクロ PIV で計測した結果、タンブル流を強化するとサイクル毎に電極をよぎる流れの方向が変動することが明らかにされ、スーパーリーンバーンで安定した着火を得るには、流動の強化よりもバルク流れの方向を毎サイクルで同方向に保ち、電極をよぎる流体に継続して放電エネルギーを与えることが重要であることが分かりました。

壁面熱伝達については、ピストン表面の境界層の速度分布をマイクロ PIV 計測したところ、壁面流れは層流でも乱流でもないことが明らかにされ、壁面乱流制御で熱伝達を抑制する手法を開発するのではなく、別のコンセプトで冷却損失を低減しなければならないことが分かりました。その手法の一つが層状水噴射遮熱です。これを提案した当初、SIP の評価委員の先生方からは水噴射のような古い技術を持ち出してきたと冷ややかに見られましたが、結局、壁面付近に層状に水蒸気を挿入してしまえば、壁温スイングと同様な効果を得ることができるのです。最後は幾何学的な圧縮比を 17 まで上げて、PV 線図上の仕事面積を十分稼いで、正味熱効率 50%以上を達成できました。ということで、どれか一つが欠けても駄目だった。なんか神がかったチームでした。

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 10 No. 3 2020

2 実用化に向けた技術課題

小酒 対談の第二部では、工学的あるいは工業的視点から SIP「革新的燃焼技術」を振り返っていただきます。最初の質問は、今回提案された二つの燃焼コンセプトを次世代自動車に実装することを想定すると、どのような動力形態の自動車に載せることになるでしょうか。全域を提案エンジンのみで駆動するのか、ハイブリッドなど部分電化した自動車に利用するのか。



内燃機関を搭載した車両に大事なことは、エネルギー回生ができること、それからエンジンを広い運転範囲で使わずに狭い範囲でいいから高効率条件で必要なときだけ動かすこと、そしてコールドスタートでのヒートアップも含めて熱マネジメントすること（飯田）

「内燃機関を搭載した車両に大事なことは、エネルギー回生ができること、それからエンジンを広い運転範囲で使わずに狭い範囲でいいから高効率条件で必要なときだけ動かすこと、そしてコールドスタートでのヒートアップも含めて熱マネジメントすること」 — 飯田

「エミッションを出さないように助ける電動化、例えば、加速時のトルクを燃焼だけで賅うとエミッションが悪化しますが、これを電動と分担することでエミッションは抑えられます。これは近い将来の大型車の電動化技術であると思います」 — 石山

飯田 私のイメージは、近未来のハイブリッド車です。これにはe-POWERのようなシリーズハイブリッド車を含みます。要するにワンポイント運転条件で高い効率で回す。ただし、さすがにワンポイントだと狭すぎるから、運転条件は少し広げる。内燃機関を搭載した車両に大事なことは、エネルギー回生ができること、それからエンジンを広い運転範囲で使わずに狭い範囲でいいから高効率条件で必要なときだけ動かすこと、そしてコールドスタートでのヒートアップも含めて熱マネジメントすること。電動化の基本技術ですね。また、お客さんに違和感なく出力提供する制御技術も必要です。僕が初めてスウェーデンのスカニアのガスタービンハイブリッドバスに乗ったとき、お客さんを降ろしているときに、充電のためにエンジンがグワッと回ってました。バスが走ってないのにうるさいわけです。それがe-POWERでは、きめ細かな制御で、ちょっとアクセル踏むと、今ならお客さんに文句を言われないのでグワッとエンジンが動いて充電するし、アクセル放したらエンジンが止まります。一方では、バッテリー電力が不足しているときにはエンジン運転を許可する「いいよボタン」があってもいいと思います。お客さんが違和感持ってしまったら、商品企画担当者からダメ出しされるでしょうが、それで燃費が悪化すると、お客さんのためにも、国のためにも、CO₂削減の点から良くないわけで、その解決は、制御で対応するより、エンジン駆動音を静かにすることで対応すべきです。

小酒 分かりました。ディーゼルのほうはいかがでしょう。

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 10 No. 3 2020

石山 ディーゼルのハイブリッド車というのは、コストや重量の増加の課題があり、今すぐに実用化することは難しいと思います。特にトラックやバスのような重量車の電動化は、急激でなく徐々に加速していくのではないのでしょうか。当面は、エンジンが負荷・回転数の全領域をカバーする使い方となる。そのため、高負荷と中低負荷の両方に対しエンジンをパーフェクトに仕立てる必要がある。燃焼形態は、高負荷と中低負荷では変える必要があるでしょう。その切り替え制御も重要な技術課題になると思いますが、エンジン自体が広い負荷・回転数範囲で、排気と熱効率の両面でバランス良く駆動できることが重要と考えます。ここで重要となる技術の一つは、ターボチャージャです。SIP では、共用試験エンジンに合わせて、広い動作範囲で高い効率を持つターボチャージャが開発されました。あらゆる車に対して広域で高効率であるターボチャージャの開発がもう一つの課題です。

大型車の電動化については、ストップアンドゴーに対する電動化のメリットはほとんどないため、エミッションを出さないように助ける電動化、例えば、加速時のトルクを燃焼だけで賄うとエミッションが悪化しますがこれを電動と分担することでエミッションは抑えられます。以前、この思想でバスが開発されました⁶⁾。これは近い将来の大型車の電動化技術であると思います。

次世代自動車への実装で考慮すべき課題の一つは値段です。「今回SIPで取り入れた技術をリーズナブルなコストで使えるのか」との質問には、ここでは回答が難しい。我々の責任の持てる範囲ではありません。コストの問題は、企業で検討し解決いただきたいと思います。



エミッションを出さないように助ける電動化、例えば、加速時のトルクを燃焼だけで賄うとエミッションが悪化しますが、これを電動と分担することでエミッションは抑えられます。これは近い将来の大型車の電動化技術であると思います(石山)

「せっかくエンジンの過給ダウンサイジングが進み、同じボア・ストロークの下で量産効果を上げてきたエンジンが、昨今の多様な電動化に対応するために非常に多くの異なる仕様のエンジンを作らなければならない状況になってしまった。電動システムを整理して、エンジンの種類を減らすこともトータルのCO₂低減には重要と考えます」 - 飯田

飯田 エンジンの使い方について追加説明いたします。現状では、普通の街中走行向けと、ドイツのようにアウトバーン走行が前提のマーケット向けに、別仕様のエンジンをそれぞれ作って対応している。これを、シリーズハイブリッド車にするなら、エンジンは発電機に徹するので一つの仕様でよく、1種類のエンジンで多様な自動車に対応できます。エンジンの種類を減らすことができる。これが電動化のもう一つのメリットではないでしょうか。しかし、今の電動化に伴うエンジン開発の方向は逆です。せっかくエンジンの過給ダウンサイジングが進み、同じボア・ストロークの下で量産効果を上げてきたエンジンが、昨今の多様な電動化に対応するために非常に多くの異なる仕様のエンジンを作らなければならない状況になってしまった。一つの自動車におけるエンジンの駆動点を絞ることに加え、電動システムを整理して、エンジンの種類を減らすこともトータルのCO₂低減には重要と考えます。

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 10 No. 3 2020

「ガソリン燃焼チームで提案した技術は、導入自体に特に高いコストを要するものではありません」 - 飯田

小 酒 次の質問に移ります。今回のプロジェクトで提案開発された要素技術の量産化における課題をお答えください。

飯 田 ガソリン燃焼チームで提案した技術は、導入自体に特に高いコストを要するものではありません。点火系にしても、20個までコイルを用意しましたが、20個でなくても100mA程度の電流で行けそうです。強いコアにしてしまうと電流だけ大量に流れて、エネルギーが投入できなくなってしまう。そのほか、傘型電極、マイクロボルトクスジェネレータ、水噴射、これらの提案技術に必要なハードウェアの製造コストはそれほど高くないと思います。一方、これらをエンジンシステムに組み入れた際の信頼性や安定性の保証が課題といえます。

小 酒 大きなコスト増加を伴わずに、従来点火系の発展型に強タンプル流を組み合わせると多点点火でスーパーリーンバーンを実現する道筋ができたということですね。

飯 田 ただ、ストローク/ボア比を1.7にしたので、自動車に搭載できるかという問題はあります。

「理想の熱発生率を実現する燃料噴射率を見出し、それを実現する装置を揃えれば熱効率と排気のバランスをとった最適化ができるという方法論は示せた」 - 石山

小 酒 ディーゼルはかいかがでしょう。

石 山 先ほど紹介した、明治大学が開発した燃料噴射率可変の燃料噴射装置と、同志社大学が開発したコンパクト噴霧火炎の形成技術については、時間とハードウェアの制約で、これらの技術を取り入れたエンジン試験で熱効率向上を実証することはできませんでした。しかし、理想の熱発生率を実現する燃料噴射率を見出し、それを実現する装置を揃えれば熱効率と排気のバランスをとった最適化ができるという方法論は示せました。噴孔径や噴射圧力等の設定と燃焼室形状の最適化については、既存技術の延長となりますが、例えば、今回最後に噴孔径を増やすことで冷却損失を低減できたことは、従来の設計方向と逆のように見えますが、実験に使用したエンジン内の現象をよく観察すれば理にかなった方法です。ただし、この方法が成立する条件と成立しない条件があるはずであり、このことを一般化して示すには至りませんでした。また、これまでにまだ話していませんが、基本的な熱効率向上技術についても取り入れている。例えば圧縮比を18まで上げている。これは最近のディーゼルエンジンに比べると高い値です。これに伴い最大筒内圧力(Pmax)については結構攻めています。

小 酒 具体的にはどの程度までPmaxを上げたのでしょうか。

石 山 17MPaまで上げました。もともとテストエンジンが頑丈に作ってあり、装置としては問題ないのですが、乗用車用エンジンとしてはかなり高いです。昔から言われてきたように、Pmax制限を設けると熱効率の追求は非常に難しくなる。我々も研究を進めていく過程で、Pmaxの制限に突き当たってしまった。これに対し、燃料分割噴射で対処しました。分割噴射では、それなりに高い効率を得られるのですが、さらなる熱効率向上が難しい。そこでPmaxの制限値を上げたくなるのですが、最近のエンジン開発の動向として、ガソリンとディーゼルの仕様をできるだけ近づけて部品の共通化を図りたいことがあり、ディーゼルエンジンの高圧縮比化やPmaxの制限値上昇は、共通化に逆行する変化です。エンジン量産においては、このような課題も生じます。あとは過給機ですね。

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 10 No. 3 2020

小 酒 今回ディーゼル燃焼チームでは、過給圧を最大どこまで上げたのでしょうか。

石 山 それは公表していません。しかし、最大筒内圧力が17MPaの条件で最高熱効率を達成したわけではありません。それより手前で最高効率が出ています。

飯 田 難しいね。圧縮比を上げると熱効率が悪くなる領域に入ってしまった。

石 山 いえ、圧縮比 18 までは圧縮比の増加に伴い効率は向上します。しかし、さらに上げると、燃焼室の狭さが燃焼に悪い影響を与え始めます。明らかに等容度が下がります。燃焼室形状等を工夫しましたが、今回は時間切れとなりました。

小 酒 火炎と壁面との干渉を抑えるため、噴孔数を増やして燃料噴射圧力を下げるのはどうでしょう。

石 山 すでに噴孔数は多く、これ以上は増やせないです。

飯 田 エンジン実用化においては、エンジンと排気後処理装置との組み合わせも課題です。ガソリン、ディーゼルともにリーン燃焼でも働く NO_x 還元触媒の開発が急務ですが、NO_x 吸蔵還元触媒 (NSR) 等における技術課題、触媒が機能するために必要な排気温度などの要求事項等、企業と大学研究者で情報をしっかり共有して基礎研究にブレークダウンして、進めなければなりません。

「排気エネルギーの質は低いので、これを回収するには相当コストがかかってしまう。技術の簡素化とコストダウンが課題です」 — 石山

「エンジンと排気後処理装置の組み合わせという点では、エミッション対策のために、どうしてもある程度まで高い排気温度は必要です」 — 飯田

小 酒 次の質問は、今のご意見と関連する質問でもあります。エネルギー回生も含めたパワートレインシステムとして最適化を考えたときに、排気エネルギー利用という課題が出てきます。エンジン単体ではなく、自動車としてのエネルギー回生、損失低減、高効率化について、ご意見をお聞かせください。SIPの研究に含まれていないことでも、先生方が考えている、パワートレインシステムとしてのエンジンの磨き方についてお聞かせいただきたいと思います。

石 山 難しい質問ですね。排気エネルギーの質は低いので、これを回収するには相当コストがかかってしまう。技術の簡素化とコストダウンが課題です。また、かつて、ターボコンパウンドによるディーゼルエンジンの排気エネルギー利用が研究されましたが、ターボとエンジンの出力配分が課題でした。ターボにエネルギーを余計に配分すると、排気エミッションが壊滅的に悪化してしまいます。排気後処理装置がしっかりと機能する条件を提供しなければならない制約があります⁷⁾。定置型コージェネ用エンジンでは時々見られますが、排気温度を高めに設定するという手法もあります。

小 酒 その場合には熱効率は悪化しますね。

石 山 必ずしも悪化するとは限らない。例えば、吸気温度を高く設定すれば、熱効率は悪化しません。しかし、それだけで問題は解決しないでしょう。自動車用としては、熱効率や出力だけでなく、排気、エンジンの大きさや重量等を総合的に考えなければならない。とても複雑な問題になります。

小 酒 飯田先生はどのように考えますか。

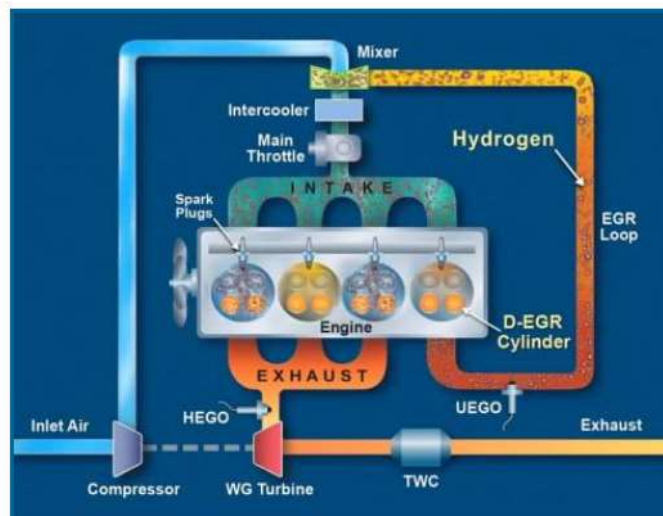
ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 10 No. 3 2020

飯田 基本的には同じです。かつて、ロイ・カモがアディアパティック・エンジンを作りましたが⁸⁾、これは実際には断熱ではなく低熱放出エンジンであり、冷却水への放熱を低減したエンジンです。これの利点は、ラジエータ等のエンジン冷却系を小型化、あるいは無くすることができる点です。戦車や物資輸送車用に冷却水なく動くエンジンができれば、超寒冷地でも砂漠でも戦闘のポテンシャルを上げることができます。また、戦車の装甲を強化するとエンジン用スペースは縮小されるので、冷却系の無い、より小さく軽いエンジンは歓迎されます。しかし、実際にはNO_xは多量に排出するし、タービンによる排気エネルギー回収についても、当時のタービン性能は十分でなく、エネルギー回収率は高くありませんでした。間欠的に放出される排気エネルギーを、定常運転が基本のタービンで回収すること自体に無理があり、限られた条件下でしか効率よく機能しないシステムです。

エンジンと排気後処理装置の組み合わせという点では、エミッション対策のために、どうしてもある程度まで高い排気温度は必要です。エンジンの膨張仕事を極大化する、あるいは極端にリーンバーンにもっていくと、排気温度は400°Cあるいは350°Cというオーダーになってしまう。リーンバーンでここまで温度を低くするとNO_x排出量はかなり低減できて良いのですが、未燃炭化水素浄化のための酸化触媒は機能しなくなる。そこで、ディーゼルエンジンの排気後処理で挑戦している様々な触媒技術がスーパーリーンバーンガソリンエンジンでも必要となる。

エネルギー回収技術の中には、排気エネルギーを用いた燃料改質が提案されていますが、燃料改質できるほど高温な気体を放出すること自体、エネルギー変換機械としては合理的でなく、自動車用のシステムとして問題です。低温始動性の向上等には使えるかもしれませんが。唯一の例外として、デディーケテッドEGR⁹⁾は、自動車への適用可能性がある技術といえます。ここでは、必要に応じて1気筒内でリッチ燃焼を行い各種中間生成物を発生させ、次サイクルでほかの3気筒へこの気筒の排気を吸入させる技術です。出力は3気筒に任せ、1気筒は燃焼改善のための化学種の生成工場になる。これなら、必要な時に必要量の燃料改質をその場で行うことになり合理的です。しかし、エネルギー回収としての意義は低いでしょう。



出典：SWRI HP

石山 基本的に筒内でエクセルギ割合が高いうちに仕事に変えることが効率的には有利であり、そこを逃すと、極端にエクセルギ割合が下がってしまう。さらに、排気の熱交換を繰り返すと、どんどん質が下がっていくので、どうしても装置が大型化してしまう。エネルギー回収には、コストとスペースの問題が宿命的に伴うと思います。

飯田 全く同じことがエンジンの電動化にも言えます。エンジンの色々なところにモータを入れてシステムが肥大化する傾向にある。しかし、導入した電動化技術を吟味して、電動化が本当に必要なところを見出してシステムを簡略化しないと、電動化でLCA的にCO₂を減らすことはできないと思います。

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 10 No. 3 2020



スーパーリーンバーンにおけるノックに関する燃料指標を新たに作る必要があります。これは、まさしく共通領域として大事なテーマになっていくと思います。この研究には、燃料会社とのコラボレーションも必要となるでしょう(飯田)

「スーパーリーンバーンにおけるノックに関する燃料指標を新たに作る必要があります。これは、まさしく共通領域として大事なテーマになっていくと思います。この研究には、燃料会社とのコラボレーションも必要となるでしょう」 — 飯田

「これまでのディーゼル燃料に関する研究は、ほとんどがエミッション低減を目的にしています。今後は、噴霧燃焼を良くする、例えば、拡散的燃焼を高速化するような燃料開発の研究も重要です」 — 石山

小酒 次は、第二部の最後の質問です。内燃機関にとって燃料は宿命的な課題です。将来の燃料多様化に対する開発された燃焼コンセプトの対応力について、あるいは、理想の燃焼を実現するための燃料を積極的に設計することの可能性について、ご意見をお聞かせください。なお、SIP「革新的燃焼技術」では、基本的には従来燃料の利用を前提に研究が進められました。

飯田 スーパーリーンバーンの領域では、燃料の研究は不可欠になります。従来のストイキ条件のノックを想定したRONやMONなどの指標は、混合気の圧力-温度の関係が異なるスーパーリーンバーンでは機能しなくなると思います。カルガッティは同じ圧力における温度差の影響を外挿し、オクタンインデックスを提案しています¹⁰⁾が、スーパーリーンバーンでは、圧力と温度の関係が従来条件より大きく異なるため使えなくなるでしょう。スーパーリーンバーンにおけるノックに関する燃料指標を新たに作る必要があります。これは、まさしく共通領域として大事なテーマになっていくと思います。この研究には、燃料会社とのコラボレーションも必要となるでしょう。

石山 ディーゼル燃焼では、燃料を工夫することでエミッションが抑えることができれば、その分、燃焼制御を、熱効率を上げる方向に向けられると一般には考えられていますが、必ずしもそうではありません。今回のSIPでは、噴霧燃焼からPCCIまで、様々な燃焼を試みましたが、運転条件に対するエミッションの傾向と熱効率の傾向が、すべての運転条件下でトレードオフの関係にはなっていないわけではない。ですから、エミッション低減を狙った燃料を使えば、すべての場合で熱効率が向上するとは限らないと考えます。ただ、燃料に対する贅沢を言わせてもらうと、燃料自体が手土産として酸素を燃料噴霧内へ持ってきてくれるとありがたい。従来のディーゼル用の含酸素燃料はアルコール系がほとんどですが、アルコールの発熱量は軽油に比べかなり低いので、噴射量を増やさねばならず、熱効率的には不利になる。発熱量が軽油により近い含酸素燃料が使えれば、良い燃焼ができるのですが、これまでのディーゼル燃料に関する研究は、ほとんどがエミッション低減を目的にしています。今後は、噴霧燃焼を良くする、例えば、拡散的燃焼を高速化するような燃料開発の研究も重要です。

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 10 No. 3 2020

小酒 エミッション低減については、含酸素燃料を使う方法と、燃料噴射条件を変える方法の2通りがあると思いますが、どちらがより有効と考えますか。

石山 スートについては、高出力条件下では、噴孔径の小さいノズルを高噴射圧力で使えば、ほとんど排出されません。一方、中低速域では、騒音や噴射系の駆動損失、ターボチャージャ効率等の問題から、燃料噴射系でスート排出量を下げることが難しい。ここを燃料側で助けてもらえればありがたい。



これまでのディーゼル燃料に関する研究は、ほとんどがエミッション低減を目的としています。今後は、噴霧燃焼を良くする、例えば、拡散的燃焼を高速化するような燃料開発の研究も重要です(石山)

3 産産学学連携研究の今後の展望

小酒 対談の第三部では、自動車の内燃機関に関する産産学学プロジェクトとしては、かつてない大規模研究プロジェクトをチームリーダーとして牽引されたお二人に、プロジェクト運営上のご苦労や工夫などについてお話しいただきたいと思います。正味熱効率50%という目標を設定し、目標達成度を管理する運営スタイルは、企業では当たり前のことだと思いますが、アカデミアでは一般的ではありません。参加した大学の研究者からは、反発もあったのではないのでしょうか。

「私は放任主義なので、それほど管理したとは思っていません」 — 石山

「最初は学学の間ですら互いに話が伝わらなかった」 — 石山

石山 私は放任主義なので、それほど管理したとは思っていません。プロジェクト開始時は、AICEが運営を相当サポートしてくれたので、非常に緻密な進捗管理、1週間に一度の進捗報告などの提案もありましたが、それはあまりに非現実的なので、月例報告書の提出を義務付けることから始めました。それでも、実質的には研究が進まない、スケジュールを守るという問題以前に、各大学の研究内容が正しい方向に向かっていない。やはり面着で顔を見て具体的な作戦を考えるのが良いとなりました。とはいえ、全員が集まるのはスケジュールを合わせるだけでも難しいので、チームを4グループ分け、そのグループ長が集まる会議を非常に頻繁に開きました。そこで研究上の技術的な課題を議論しました。すると、研究内容の議論であれば、互いに反発することなく、その時に一番いい問題解決法を考えて、同意を得て進めて行くことができるようになった。この研究者間の議論で感じたことは、産産学学連携とありますが、最初は学学の間ですら互いに話が伝わらないということです。それぞれがやるべきと考えていることが違います。これらの異なる考えを合わせて研究の方向を揃えるのに時間がかかりました。もちろん合わせるができなかったこともあります。同様に産産間においても理解や認識の違いはあると思います。産産学学連携となると、完全な連携研究に至るにはまだまだ時間がかかるでしょう。

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 10 No. 3 2020

小 酒 おっしゃる通りだと思います。目標値を定めているので、研究期限が迫ってくると、さすがに我を通すばかりではまずいと気づいて、互いに歩み寄るようになりませんでしたか。

石 山 それはそうです。しかし、あまり安易によってくる人も信用できない。初めは我を通していただいて、それからこちらへ行きましようという仕向けるわけです。

小 酒 その呼びかけるタイミングが難しい。

石 山 そうです。それぞれ個性を持った先生方、最初は偏見と思われるような考えを持っておられる方も、話し合いによって方向を変えて頂く。十分な話し合いなしに、はい分かりましたっていうのも、それはそれでまた問題がある。

小 酒 どちらかといえば、変わらない先生が多いと思います。

石 山 SIPをやった実感としては、多いです。



新しいアイデアに対して、エンジン屋であれば、『これまでに誰かがエンジンで試していて、そんなに良い結果は得られていないはずだ』といった先入観から手を出さなかったことに対しても、基礎的な知見からこうなるはずだというアプローチで攻める。今回、ガソリン燃焼チームではこれができたと思います(飯田)

「新しいアイデアに対して、エンジン屋であれば、『これまでに誰かがエンジンで試していて、そんなに良い結果は得られていないはずだ』といった先入観から手を出さなかったことに対しても、基礎的な知見からこうなるはずだというアプローチで攻める。今回、ガソリン燃焼チームではこれができたと思います」 - 飯田

「最初から学学連携がうまく始められたのではなく、3年目までは大変でした。チームが分解する手前まで行きました」 - 飯田

小 酒 ガソリン燃焼チームはいかがでしたか。

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 10 No. 3 2020

飯田 学学連携については、ディーゼル燃焼チームのメンバーは、全員が自動車技術会の会員ですね。それに対し、ガソリン燃焼チームのメンバーの中には、自動車技術会を知らない方もいらして、そこがかなり違いました。逆にいうと、森吉先生を除けばエンジン屋さんがいなかった。小酒先生もエンジン屋さんですか。

小酒 自分ではそう思っております。

飯田 飯田も小酒先生も、エンジンは燃焼装置の一つであって、エンジン性能を最大化することを優先順位の一つ上にはおいていない。

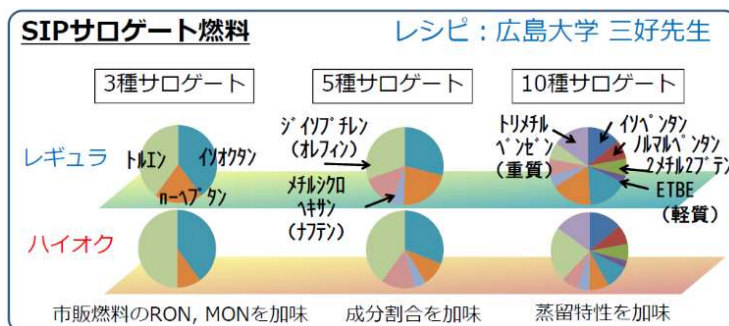
小酒 エンジン性能向上を最上位におく研究者は狭義のエンジン屋さんだと思います。ディーゼル燃焼チームでもそういう先生はごく一部ではないでしょうか。ガソリン燃焼チームがディーゼル燃焼チームと違うのは、これまでエンジン研究に大きくかかわっていなかった基礎燃焼、基礎流体の先生方に参加いただいたことだと思います。

飯田 ただ、その基礎研究の人達に、エンジンの高効率化のためのアイデアを出せとか、むちゃ振りしました。気合でもよいのでとにかく何か出して下さいと。

小酒 あのとときの飯田先生は目標値達成のため管理の鬼になっていました。

飯田 そうだね。横森先生（慶應義塾大学）もえらい心配して、燃焼シンポジウムなどで若手研究者が集まって、「なんだこれっ」で議論したのだと思う。でも結構良いテーマが出てきました。新しいアイデアに対して、エンジン屋であれば、「これまでに誰かがエンジンで試していて、そんなに良い結果は得られていないはずだ」といった先入観から手を出さなかったことに対して、基礎的な知見からこうなるはずだというアプローチで攻める。今回、ガソリン燃焼チームではこれができたと思います。

SIP 以前では、学学連携の範囲が狭かったと思います。それぞれが所属している学会やグループ内での限られた連携だった。国内、国際でリードされている先生も、そこに食らいついていこうとする先生も、所属分野における常識があって、その外側に自身の知識や知見が活かされる場があることが良く見えていなかったのだと思います。それぞれの分野における高い基礎知見を持った人たちが集まると、シナジー効果により従来にはない新しいアプローチが生まれると思います。それぞれの技術課題に対し、何がどこまで分かっている、分からないことについては誰に頼ったら良いのか、そこが見えたのが大きかった。例えばガソリン燃焼チームでは、ガソリン燃焼反応の骨格を表現できて、しかも成分を最小限にしたサロゲート燃料のレシピを、化学的視点から三好先生（広島大学）が作成し、これを基にJXTG エネルギーに燃料をブレンドしていただき、共通燃料として参加大学に必要量を配送し使った。



出典：SIP 革新的燃焼技術公開シンポジウム平成 31 年 1 月 28 日

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 10 No. 3 2020

これにより、層流燃焼速度を、定容容器、ショックチューブ、急速圧縮装置、超急速圧縮装置など、各大学が所有する装置で計測し、得られたデータを同じ図上にプロットできます。初期の報告会では、各大学から報告される層流燃焼速度の縦軸横軸の定義、その範囲がバラバラで、それぞれの流儀で報告されたのですが、学生に、同じ縦軸横軸で、日大の超急速圧縮装置と茨城大の急速圧縮装置で得られた層流燃焼速度を全部プロットして、さらに上智大の衝撃波管で得られたアレニウスプロットとも比較してもらったら、各計測における装置上の問題も分かってきた。例えば、急速圧縮装置による層流燃焼速度の計測では、まず水素を空焚きしてからでないとガソリン燃焼を模擬できないといった問題も改めて確認できた。これらの装置依存の問題解決のために、RCM（急速圧縮装置）コンソーシアムを始めた。ここでは、燃料の装置への供給方法が実は間違っていたことなど次々と判明しました。自分のデータだけでなく他人のデータとも比較する。更に世界のデータを見るときも批判的視点で見る。当たり前のことですが、この姿勢を改めて確認し、チーム全体で徹底できたと思います。三好先生のサロゲート燃料や共通ガソリンがなかったら、このような深い所まで行けなかった。壁面境界層の課題もそうです。店橋先生（東京工業大学）は当初から、サイクル毎に流れがリセットされるようなレシプロエンジン内では壁面乱流にまで発達するには十分な時間がないと主張されていました。このことがマイクロPIV計測で実証されたわけです。

しかし、最初から学学連携がうまく始められたのではなく、3年目までは大変でした。チームが分解する手前まで行きました。3年目までに学学連携の体制ができて、4年目以降に一気に成果が出てきた。やはり3年のプロジェクトであつたら失敗していたでしょう。



（報告会などで、）結構厳しいことを言ったり言われたりということを通して、学生もプロジェクトへの理解を深めるとともに、これまでの自分の常識を見直したのではないのでしょうか（石山）

「（報告会などで、）結構厳しいことを言ったり言われたりということを通して、学生もプロジェクトへの理解を深めるとともに、これまでの自分の常識を見直したのではないのでしょうか」 - 石山

小 酒 SIP では、公開報告会で学生に成果発表させるなど、学生参加も積極的に行われました。これにより学生間のネットワークができ、他大学の先生からの指摘が刺激になり、教育面でもよい効果があったと思います。

石 山 学生にとって良い経験だったと思います。これまで、学生が学会で発表していても、他大学の先生から非常に厳しいことを言われることはあまりなかった。手加減される。

小 酒 今回は、報告会等でボコボコにされました。

石 山 それは、以前より互いに近い関係になったからでしょう。結構厳しいことを言ったり言われたりということを通して、学生もプロジェクトへ

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 10 No. 3 2020

の理解を深めるとともに、これまでの自分の常識を見直したのではないのでしょうか。特に我々のチームでは、同型の単気筒エンジンを複数の大学に導入し、元々各大学が所有する単気筒エンジンも使って研究を行ったため、まず、実験方法とエンジンの運転法を統一する必要がありました。実際にエンジンを回すのは学生なので、エンジンを運転する各大学の学生に、掘場の共用エンジン施設に集合してもらい、結線のやり方、エンジンの組み方、運転方法を指導しました。参加学生は、これまで所属研究室のやり方でエンジンを回して計測していたのとは、別な方法を指摘されたり学んだりする。エンジンの運転は、安全に問題がなければ、様々な方法があってもいいと思いますが、今まで先輩がしてきた方法をそのまま繰り返していたのを改めて考え直し、その意味を理解する機会を与えられたのだと思います。

参加学生の中には、「この報告会までに熱効率をこの値まで上げなければならない」と設定されると、これまでになく、とてもキビキビと研究を進めるものもありました。大学の研究では、現象理解を最優先しますが、「熱効率50%」のような具体的な目標値に向けた研究の進め方も、学生にとっては新鮮だったのではないのでしょうか。これを経験できて良かったという学生もいます。

「共用エンジンがあり、それを管理整備するスタッフがいたから、学生も短期間でエンジン計測のやり方を学ぶことができた。この教育効果は大きいです」 - 飯田

小 酒 ガソリン燃焼チームはいかがですか。

飯 田 ガソリンも、学生諸君の切磋琢磨を通して、いい成果を得られたと思います。たとえば、明治大学の出島君は、これまで微細流体デバイス等に用いられてきたMEMS技術を使って熱流束センサを開発した。これをエンジンに組み込んで壁面熱流束を計測する。最初はエンジン計測におけるセンサの耐久性が分からなくて、彼はセンサを設置したらすぐにデータが取得できると思っていた。ところがアイドル運転でも短時間でセンサが壊れてしまい、痛い目にあって、そこから彼の研究が始まる。エンジンで計測するには準備期間が必要であることも理解できた。共用エンジンがあり、それを管理整備するスタッフがいたから、学生も短期間でエンジン計測のやり方を学ぶことができた。この教育効果は大きいです。

また、マイクロPIV計測についても、最高峰の技術を有する店橋先生や志村先生（東京工業大学）が、共用エンジンの計測を通して、参加学生にその技術を惜しみなく提供された。トップレベルの計測技術を学生が学ぶことができたわけです。学学連携が教育面でもとても有効に働いた好例でしょう。



ディーゼル燃焼研究に対する要求は、CO₂を下げるとかエミッションを良くするとか、どんどん技術的には高度になっていますが、ある程度まで研究を進めて振り返ってみれば、ディーゼル燃焼の基礎的な現象が分かかっていないということに突き当たってしまう。ですからやっぱり、これからは基礎研究ですね(石山)



エンジンに関する多くの論文の中では、『このパラメータを変えたら燃焼現象が活発化したと思われる』といった定性的な説明が多く、具体的なエビデンスがないのに平気で『思われる』と記述して終わっている。これではだめで、燃焼状態を様々な物理量や指標値を縦軸と横軸とで表現することでエビデンスを得て、それらの相互の関係を明らかにしてモデルを構築していかねばなりません(飯田)

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 10 No. 3 2020

「ディーゼル燃焼研究に対する要求は、CO₂を下げるとかエミッションを良くするとか、どんどん技術的には高度になっていますが、ある程度まで研究を進めて振り返ってみれば、ディーゼル燃焼の基礎的な現象が分かっていないということに突き当たってしまう。ですからやっぱり、これからは基礎研究ですね」－ 石山

「エンジンに関する多くの論文の中では、『このパラメータを変えたら燃焼現象が活発化したと思われる』といった定性的な説明が多く、具体的なエビデンスがないのに平気で『と思われる』と記述して終わっている。これではだめで、燃焼状態を様々な物理量や指標値を縦軸と横軸にとり表現することでエビデンスを得て、それらの相互の関係を明らかにしてモデルを構築していかなばなりません」－ 飯田

小 酒 対談の最後に、今後の内燃機関研究の在り方について、先生方の考えをお話したいと思っています。

石 山 一言でいうと、やはり基礎研究だと思います。ディーゼル燃焼を研究していると特にそう思います。先ほども言いましたが、ガソリン燃焼の場合には、RON、MON、層流燃焼速度などの燃料の燃焼特性と流動場の乱流特性から燃焼イメージをある程度予想できるのに対し、ディーゼル燃焼の場合には、より多くの複雑な物理要素が重なるため、セタン価のような燃料着火性と噴霧特性だけで燃焼イメージを予想することがとても難しい。加えて、ディーゼル燃料の燃焼特性を表す指標が、着火性を表すセタン価以外にないのです。燃料の燃焼特性を表現する指標値に関する研究のような基礎研究が必要です。ディーゼル燃焼研究に対する要求は、CO₂を下げるとかエミッションを良くするとか、どんどん技術的には高度になっていますが、ある程度まで研究を進めて振り返ってみれば、ディーゼル燃焼の基礎的な現象が分かっていないということに突き当たってしまう。ですからやっぱり、これからは基礎研究ですね。

飯 田 私も同じ意見です。エンジンに関する多くの論文の中では、「このパラメータを変えたら燃焼現象が活発化したと思われる」といった定性的な説明が多く、具体的なエビデンスがないのに平気で『と思われる』と記述して終わっている。過去の論文からの引用で同じ説明を繰り返して続いています。これではだめで、燃焼状態を様々な物理量や指標値を縦軸と横軸にとり表現することでエビデンスを得て、それらの相互の関係を明らかにしてモデルを構築していかなばなりません。ここまでいけば様々なシミュレーションに役立てることができる。「混合が促進され燃焼が活発になった」で片づけていたら、いつまでたってもツールはできないし、現象も理解できない。そんな論文を査読で通してはいけません。我々が修正していかなければならない。検証されたモデルや実験式を作る。作成したモデルの検証範囲に限られているならば、新たに検証実験を行う。実験が困難であるなら、直接計算との比較検証を行う。こういった研究の基本的なアプローチに関するリテラシーの必要性を、先ほど話題になった学学連携の中でお互いに理解し合えたのではないのでしょうか。

小 酒 ありがとうございます。先生方の将来のエンジン研究に対する考えは同じだということが、改めて確認されたように思います。

飯 田、石 山 やはり共通点が多かったですね。

小 酒 本日は長時間に亘る対談をありがとうございました。これで対談を終了させていただきます。

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 10 No. 3 2020

【用語集】

EGR	Exhaust Gas Recirculationの略. 燃焼後の排気ガスの一部を再度吸気させる技術
Pmax	Maximam Pressureの略. 最大燃焼圧力のこと
PCCI	Premixed Charge Compression Ignitionの略. 予混合圧縮自着火燃焼
MEMS技術	Micro Electro Mechanical Systemsの略. 要素部品等を一つの基板などに集積化したデバイス
ターボコンパウンド	排気タービンから得られるエネルギーを吸気の圧縮に用いるのではなく, 動力して活用する技術
SIエンジン	Spark Ignitionエンジンの略. 点火プラグで混合気に着火させて燃焼させるエンジンのこと
遮熱スイング	低熱伝導率・低熱容量の遮熱層を燃焼室壁面に形成することで, 壁温度を筒内ガス温度に追従させる方法
タンブル流	エンジン気筒内に吸い込む吸気によって発生する縦方向の渦. 水平方向はスワール流れと言う
RON	Research Octane Numberの略. 比較的低回転域のノック耐性を表す数値とされる
MON	Motor Octane Numberの略. 比較的高回転域のノック耐性を表す数値とされる
含酸素燃料	燃料組成中に, エタノール(C ₂ H ₅ OH)やETBE(C ₂ H ₅ OC(CH ₃) ₃)等の酸素を含む化合物燃料のこと
バルク流れ	筒内の空気, 混合気のうち界面(シリンダ)の影響を受けていない部分を指す

【参考文献】

- 1) 小坂英雅・ほか, 壁温スイング遮熱法によるエンジンの熱損失低減 (第1報), 自動車技術会論文集, 44-1, pp. 39-44, (2013).
- 2) 西川直樹・ほか, 壁温スイング遮熱法によるエンジンの熱損失低減 (第4報), 自動車技術会論文集, 47-1, pp. 55-60, (2016).
- 3) Miller, Shannon L., Theory and implementation of low-irreversibility chemical engines, ProQuest Dissertations and Theses, Dissertations at Stanford University (2009).
- 4) N. Peters, "Laminar flamelet concepts in turbulent combustion", Proc. Combust. Inst. 21: pp. 1231-1250(1986).
- 5) 菅田健志, 李世竣, 横森剛, 飯田訓正, 乱流燃焼ダイアグラムを用いたスーパーリーンバーンSIエンジンにおける燃焼形態の検討, 自動車技術会論文集 Vol. 48, No. 4 (2017) pp. 801-806.
- 6) 鈴木孝幸・ほか, HIRM採用ディーゼル電気ハイブリッドエンジン搭載の大型路線バスについて (エンジン・駆動系<特集>) — (地球環境問題と自動車用動力・燃料<小特集>), 自動車技術 Vol. 44, No. 8, pp. 23-26, (1990).
- 7) 内田登, 将来の商用車ディーゼルエンジンに求められるターボ過給機の特性, 日本ガスタービン学会誌 Vol. 33, No. 4, pp. 55-60, (2005).
- 8) R. Kamo and Walter Bryzik, "Cummins/TACOM advanced adiabatic engine", In book: Proceedings of the 12th Automotive Materials Conference: Ceramic Engineering and Science Proceedings, Volume 5, Issue 5/6, DOI: 10.1002/9780470320211, ch4, (2008).
- 9) T. Alger and B. Mangold, "Dedicated EGR: A New Concept in High Efficiency Engines, SAE Int. J. Engines 2(1), pp. 620-631, (2009).
- 10) G.T.Kalghatgi, "Auto-ignition Quality of Practical Fuel and Implication for Fuel Requirements of Future SI and HCCI Engines", SAE Paper 2005-01-0239, (2005).

SIP「革新的燃焼技術」特集号

スーパーリーンバーンとはいかなる現象か

What is super lean burn

飯田 訓正

Norimasa IIDA

慶應義塾大学名誉教授

Keio University

1 はじめに

内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム SIP「革新的燃焼技術」は、「乗用車用内燃機関の正味最高熱効率率50%を達成」および「持続的な産産学学連携体制の構築」という二つの目標を設定した。約80大学が結集して4チームを構成。専門分野は、機械工学、内機関工学、燃焼科学、伝熱科学、反応化学、流体力学、トライボロジー、高分子化学、計算科学など多岐に亘る。

SIP 燃焼は、日本の内燃機関の研究開発史における変革点と言える。それは正味熱効率率50%という、世界初の値を達成したからだけではない。この達成に伴い世界に例を見ない燃焼科学の基礎的知見と技術成果が多数創出されたからである。

2 従来のガソリン燃焼技術と SIP スーパーリーンバーン技術

従来、乗用車用ガソリンエンジンは、理論空燃比（酸化剤である空気中の酸素と燃料であるガソリンとが過不足無く反応する混合比）にて燃焼させてきた。この燃焼は燃焼期間が短い一方、燃焼温度が2600Kと高い。そのため、燃焼ガスの熱エネルギーが燃焼室壁面から逃げることで生じる冷却損失は、熱収支の25-30%をも占める。そこで SIP 燃焼のガソリン燃焼チームでは、理論空燃比に対して燃料濃度が半分程度の「超希薄燃焼」の実現を目指すこととした。これにより燃焼を2000Kの低温にし、熱損失を大幅低減させるというものである。（図1）

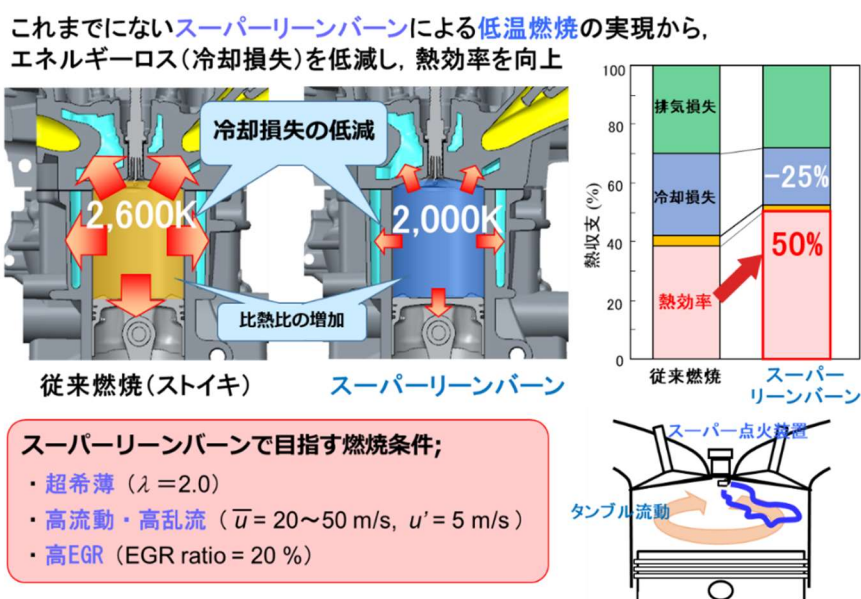


図1 スーパーリーンバーンによる低温燃焼の実現および熱損失低減による熱効率向上のシナリオ

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 10 No. 3 2020

希薄ガソリン燃焼がこれまで世界で実現されなかったのは、燃焼させること自体の難しさにある。希薄化すると、燃焼期間が増大する、また、サイクル毎に燃焼が完結したり完結しなかったりと不安定になり、エンジンとして作動不可能であった。SIP 目標である 2000K 低温燃焼まで「超」希薄化すると、そもそも火が点かない、たとえ点いたとしても途中で消炎する、これが過去のエンジニアの常識だ。

そこでガソリン燃焼チームでは、以下の個々の課題を達成し、さらにこれらを統合することで、エンジンでの超希薄燃焼を実現させることに挑んだ。

(図2)

- ① エンジンに超希薄かつ均質なガソリン空気混合気を導入する。
- ② 吸気行程にて、燃焼室内に強いタンブル流動を形成する。
- ③ 電極付近の流動が 25m/s となる条件下でも、火炎核を連続的に形成できる、スーパー点火装置を開発する。
- ④ タンブル流動の崩壊と火炎核の形成に基き、安定した火炎伝播を実現する。
- ⑤ 低温燃焼により、燃焼室壁面から受ける冷却損失を大幅に低減する。
- ⑥ 燃焼の素反応に関する科学的解明とモデル構築により、ノッキング発生を抑制・制御する。
- ⑦ 燃焼室に水を直接噴射して、ピストン表面に蒸気層を形成し、遮熱効果で熱損失をさらに低減する。

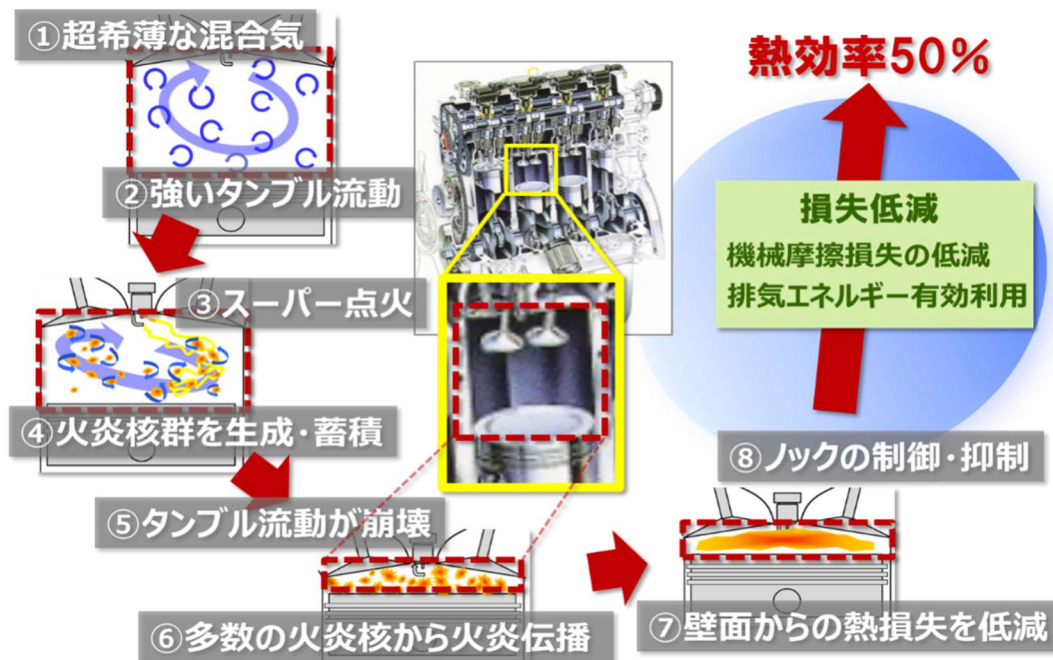


図2 超希薄燃焼「スーパーリーンバーン」の構想

3 ガソリン燃焼の研究体制

以上を達成するべく、リーダー大学および全国の28のクラスター大学で五つの班（着火向上班、火炎伝播促進班、冷却損失低減班、燃料・ノック抑制班、モデル/ばらつき縮減班）を編成し、基礎的な解析とエンジン実験を相互連携させる研究を進めた。また、これを実現するために、単気筒メタルエンジン、可視化エンジン、最新鋭のレーザ計測装置を揃え世界最先端の実験研究を可能とする拠点を株小野測器 横浜テクニカルセンター（横浜市緑区）内に整備し、産産学学の壁を越えてアイデア検証や熱効率の実証を行った。（図3、図4）

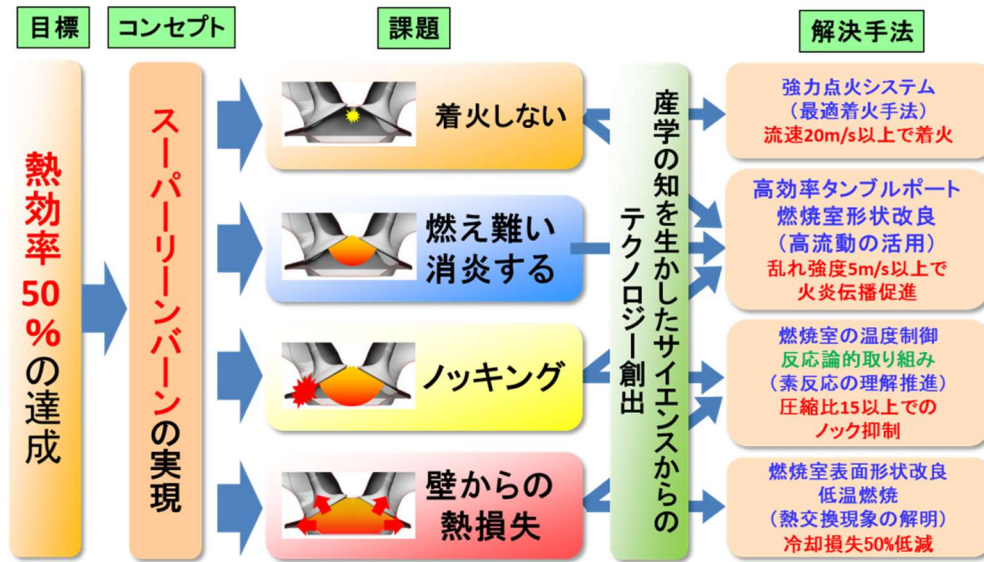


図3 スーパーリーンバーンの実現に向けたガソリン燃焼チームの研究構成

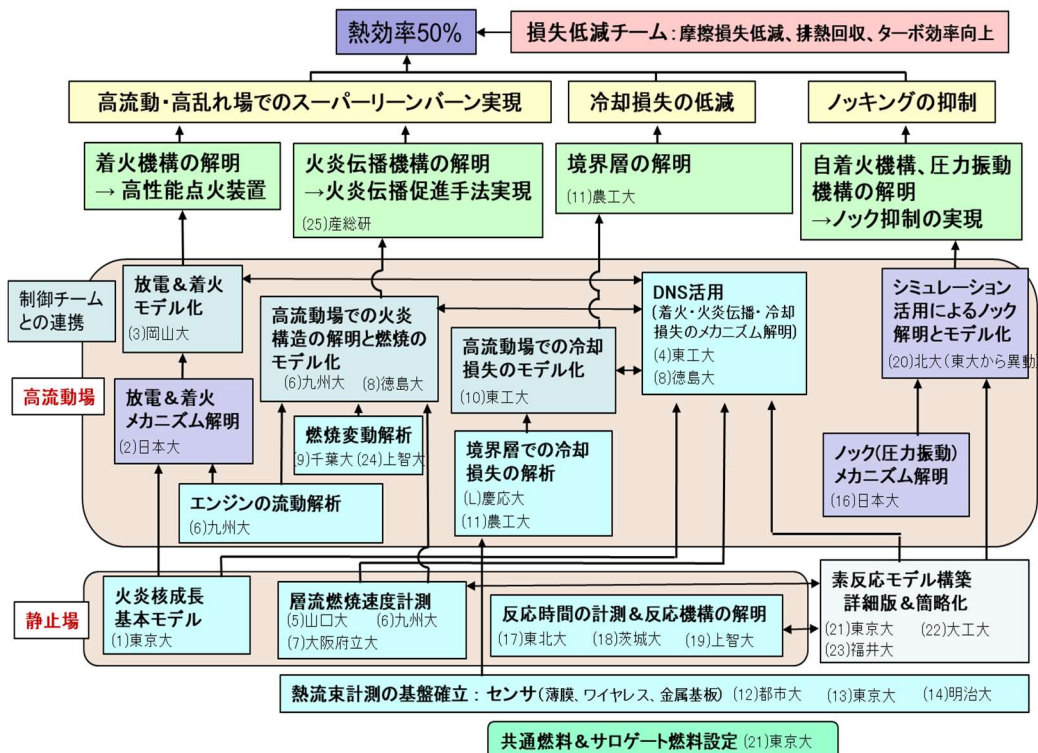


図4 燃焼のサイエンスとテクノロジーを繋ぐチーム構成

4 ガソリン燃焼の研究成果の概要

前項の研究構想を実現するためには、内燃機関工学や乱流燃焼科学に跨がる多様な研究者が深く連携しなくてはならない。そのための工夫として、エンジンの設計要件・運転条件と、乱流燃焼の物理量が結びつくよう、エンジン燃焼の構想を「Peters Diagram (乱流燃焼状態図)」に表し¹⁾、あらゆる分野の研究者が共通基盤に立って議論できるようにした²⁾ (図5)。

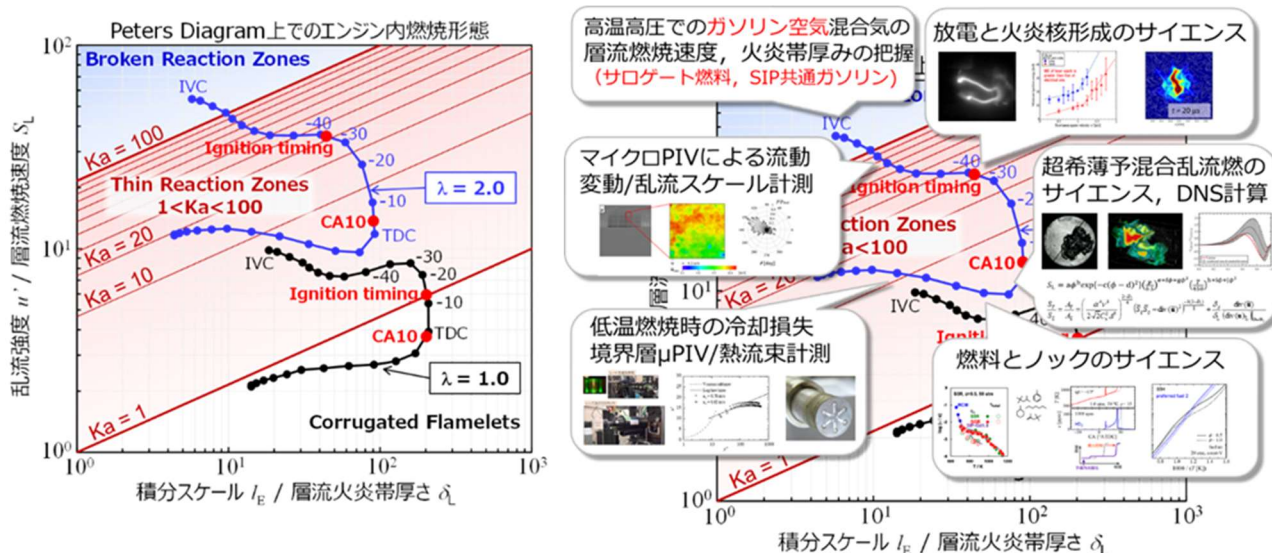


図5 スーパーリーンバーン技術のサイエンスへの落とし込み

併せて、層流と乱流の燃焼速度、火炎帯厚み、乱流の強度とスケール、放電挙動、低温燃焼ガスと壁面間の境界層構造と冷却損失の関係、燃料とノッキング発生との関係など、エンジン現象の系統的な計測、機構解明を行うと共に、モデル化を行ったことも、世界で例のない取組である。こうして得た研究成果の一部を、以下に記載する。

(a) 超希薄条件でも着火可能な火花点火システムおよび燃焼制御の研究開発

- ・ 20~50m/s という高流動場における、火花放電挙動および着火メカニズムを解明³⁾。これにより、超希薄条件下でも、確実に着火に至る放電パターンを見出し、安定した燃焼を実現。
- ・ タンブル流が導入された” Broken Reaction Zone ”の乱流燃焼形態を、DNS (Direct Numerical Simulation) で解析。これに基づき、燃焼期間の短縮および等容度の向上を実現⁴⁾。

(b) 冷却損失を低減するための研究開発

- ・ 壁面近傍の熱伝達メカニズムを境界層計測⁵⁾やDNS解析で解明。その制御手法を見出し、冷損低減のコンセプトを創出。冷却損失の低減と燃焼速度の促進を両立できる、新規の遮熱技術である層状水蒸気遮熱⁶⁾を開発。低温燃焼の効果に加えて冷却損失を半減。
- ・ 高圧縮比でもノックを抑制するための研究開発
- ・ 高圧縮比、高過給かつ超希薄燃焼条件におけるノックメカニズムを解明。これにより、化学反応論的アプローチによるノック抑制コンセプトを創出⁷⁾。

(c) 各種現象のメカニズムの解明、モデル化・予測技術や計測技術に関する研究

- ・ 上記(a)~(c)で得られた知見を体系化し、エンジン開発に役立つ物理モデルを構築。

これらの成果を統合した結果、世界未踏であった正味熱効率51.5%を実証することができた (図6, 図7)。

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 10 No. 3 2020

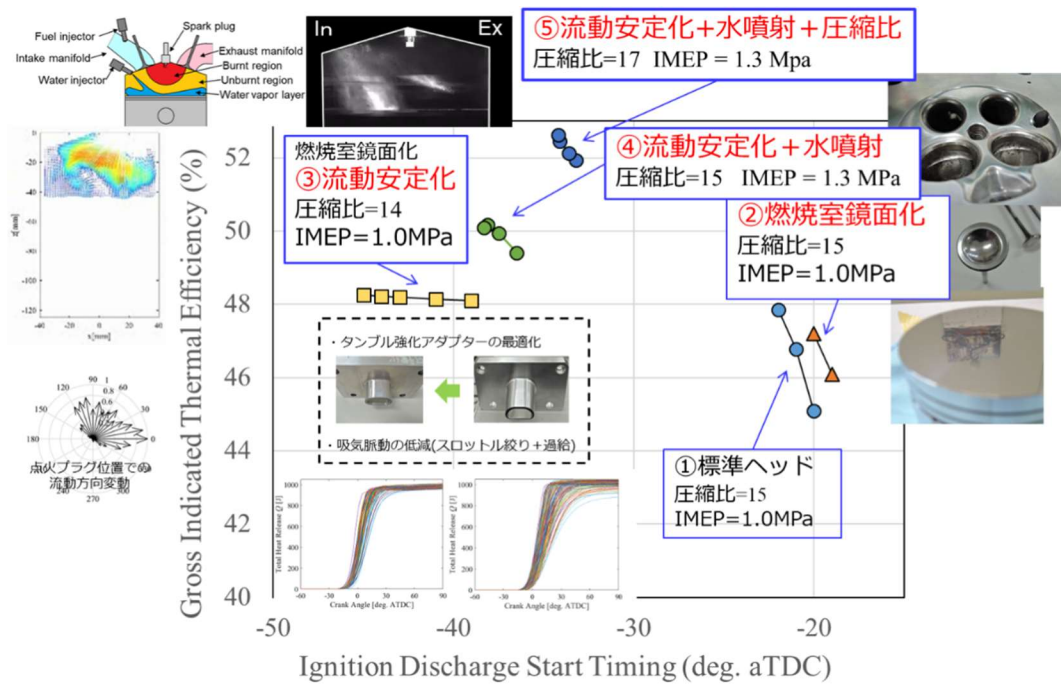


図6 SIPスーパーリーンバーンエンジンのグロス熱効率の達成履歴

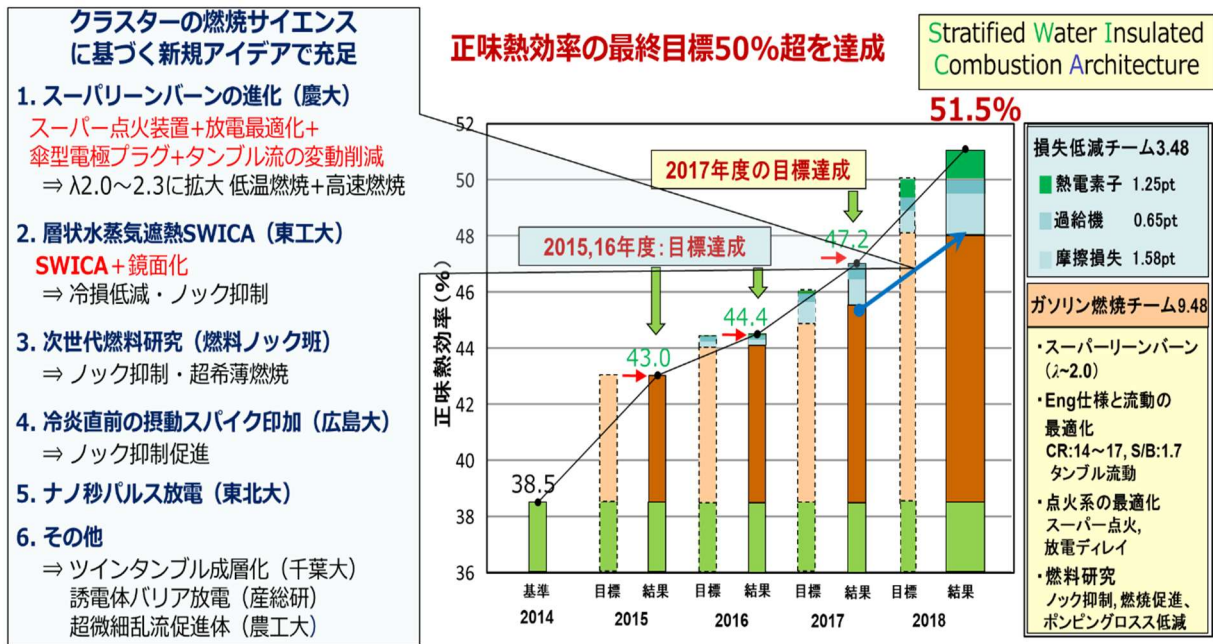


図7 SIPスーパーリーンバーンエンジンの正味熱効率の達成履歴

最終年度に正味熱効率50%超を達成

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 10 No. 3 2020

5 残された課題

今回の世界最高峰の熱効率値は、インサイドアウトなアプローチ、すなわち従来のエンジン開発の延長線上であるミニマムローカルから脱して、超希薄燃焼の原理をサイエンスから解析・解明し、その知見に基づきエンジン実験による燃焼技術を探求したことに依る。このことは、長い歴史を持つ本分野の研究に対する新たなアプローチの存在と、それがもたらすポテンシャルを明確に示した。

また、本活動を通して、産学での議論が進み、相互で何を求めているのか、何を研究しているのかの理解が進んだ。産学による本音の議論は、双方の人材育成にも繋がっている。

今後は、超希薄燃焼を採用した超高効率エンジンの製品開発が始まるだろう。CO₂の排出量の大幅な削減に貢献することが期待される。CO₂の削減は高効率エンジンが市場に投入され、使用されて初めて実現する。SIP 燃焼が生んだ産産学連携と技術がスパイラルアップし、双方が将来に渡っても継続・発展することを祈念する。

【参考文献】

- 1) 菅田健志, 李世竣, 横森剛, 飯田訓正, 乱流燃焼ダイアグラムを用いたスーパーリーンバーン SI エンジンにおける燃焼形態の検討, 自動車技術会論文集 Vol. 48, No. 4 (2017) pp. 801-806
- 2) 丸田薫, 中村寿, スーパーリーンバーン SI エンジンにおける着火~火炎伝播遷移—エンジン燃焼と燃焼基礎研究—, 自動車技術, Vol. 72 No. 4 (2018 年 4 月発行) 20184222
- 3) Shinji NAKAYA, Mitsuhiro TSUE, Ignition characteristics of laser breakdown and electrical, 6th Laser Ignition Conference, LIC7-1 (2018)
- 4) N. Saito, Y. Minamoto, B. Yenerdag, M. Shimura, M. Tanahashi, Effects of turbulence on ignition of methane-air and n-heptane-air fully premixed mixtures, Combustion Science and Technology, Vol.190, No.3 (2018) pp. 451-469
- 5) Masayasu Shimura, Shingo Yoshida, Kosuke Osawa, Yuki Minamoto, Takeshi Yokomori, Kaoru Iwamoto, Mamoru Tanahashi, Hidenori Kosaka, Micro particle image velocimetry investigation of near-wall behaviors of tumble enhanced flow in an internal combustion engine, International Journal of Engine Research, First Published 28 May (2018)
- 6) 大倉優一, 長澤剛, 山田涼太, 佐藤進, 小酒英範, スーパーリーンバーン SI エンジンにおける筒内水噴射による熱効率向上に関する研究, 第 29 回内燃機関シンポジウム, No. 13 (2018)
- 7) 三好明, 低温酸化反応の怪, 第 55 回燃焼シンポジウム, B323 (2017)

SIP「革新的燃焼技術」特集号

高熱効率を目指したディーゼル燃焼の研究

Research on Diesel Combustion Aiming at Higher Thermal Efficiency

石山 拓二, 川那辺 洋

Takuji ISHIYAMA, Hiroshi KAWANABE

京都大学

Kyoto University

1 はじめに

SIP「革新的燃焼技術」プログラムにおいて、ディーゼル燃焼チームは、乗用車用エンジンの大幅な熱効率向上を目指し、エンジン内燃焼の制御について、要素技術の研究開発に取り組んだ。この研究開発は、様々な面で AICE（自動車用内燃機関技術協同組合）の支援を受けながら大学および研究機関の研究者の手で行われた。本プログラムの全容については JST 公開情報¹⁾を参照されたい。以下に、この研究開発プログラムで実施されたディーゼル燃焼研究の概要と今後の課題について述べる。

2 研究のねらい

この研究の目標は、高負荷における 50% 正味熱効率、ならびに常用負荷における CO₂ 低減である。高負荷熱効率向上に対応する燃焼方法の考え方としては、混合律速燃焼を前提とし、噴霧火炎の制御により等容度の向上と冷却損失の低減を図ることとした。ここで、噴霧火炎が燃焼室壁面へ衝突・流動する際の壁面からの熱損失が冷却損失の大きな部分を占めることから、等容度と冷却損失の間にはトレードオフの関係が生じる。従って、狙いとする燃焼は、壁への衝突を和らげ冷却損失を減らしつつ、空間を無駄なく使い素早く燃焼させる噴霧火炎の形成をコンセプトとした。常用負荷における熱効率向上 (CO₂ 低減) に対しては、PGCI (予混合圧縮着火) 燃焼を取り入れることとし、実用上適用できる負荷範囲を制限する燃焼騒音を緩和する方法の研究を行った。

チーム内では、このような燃焼を実現するための主な課題を設定し、それぞれについて、下記のようにグループを編成して研究にあたった (大学、研究機関名はプログラム終了時)。

グループ 1: 総括、熱効率実証、噴霧モデル等数値計算の改善 (京都大、広島大、長崎大、鳥取大、産総研、滋賀県立大)

グループ 2: あと燃えの原因究明と低減 (明治大、早稲田大、徳島大)

グループ 3: 噴霧火炎の制御による冷却損失の低減 (同志社大、大阪工大、大阪大)

グループ 4: 燃焼のリーン化による PGCI および混合律速燃焼の改善 (東工大、滋賀県立大)

グループ 5: 構造・燃焼両面からのアプローチによる燃焼騒音の低減 (山口大、北海道大)

こ

のうち、グループ 2 および 3 は主に高負荷燃焼を、またグループ 5 は主に中低負荷燃焼を対象に研究を行った。なお、グループ 4 では、両負荷域ともに対象として研究を実施したが以下では高負荷燃焼の改善にかかわる研究内容を紹介する。なお、本チームにおいて、各種技術の燃焼改善、熱効率向上効果の評価には、共通仕様の単気筒試験機関 (口径/行程 85/96.9mm, EGR 付き外部過給) を用いた。

3 研究成果の概要

3.1 高負荷における熱効率の改善研究

(1) あと燃えの低減 (グループ2)

等容度を高めるには、総発生熱量の半分近くを占めることもあるあと燃え（噴射終了後に続く熱発生）の低減が必要である。そこでまず、燃焼後期に発熱が起きている場所を特定するため、新たな可視化技術を開発した。これは、燃料中の芳香族炭化水素による紫外光吸収を利用した未燃燃料の可視化、OH*を始めとする紫外自発光による高温部の可視化、ならびに輝炎の可視化を同時に行う。これを定容容器内の自由噴霧火炎に適用し、輝炎の消失後も下流域において熱発生が続き、未燃混合気が残留している様子が観察された²⁾。このことから、あと燃えの要因を噴霧先端の過濃混合気と推定した。

この推定に基づいて、噴射終了後の噴霧先端の濃度を低下させる方法を検討し、噴射期間中に噴射率を徐々に減少させる「逆デルタ噴射率」を考案した。さらに、このような噴射率変化を実現するハードウェアとして、TAIZAC (TAndem Injectors Zapping ACTivation) インジェクタを開発した³⁾。これは、直列に接続された2本のインジェクタとその間にある小さな容積とで構成され、噴射に伴う小さな容積中の圧力降下を利用して逆デルタ噴射率を作る。最新のインジェクタにおいては、さらに、プレ・メインの多段噴射において、メイン噴射を高い噴射率にする一方で、プレ噴射の噴射率を下げ、着火補助機能を保つことや、メイン噴射の噴射率立上がり急峻にするなどの柔軟な噴射率制御を実現できる⁴⁾。逆デルタ噴射率による噴霧火炎の特性について、詳細反応LESによる数値解析⁵⁾、および全量ガスサンプリング・分析⁶⁾により検討し、負の噴射率勾配による噴霧軸方向濃度分布の平坦化と、噴霧外縁での渦発生による周囲空気導入促進の効果が過濃混合気抑制に役立つ可能性が示された。

この噴射系を単気筒試験機関に装備して試験を行った結果、高負荷（グロス図示平均有効圧力1440kPa、エンジン回転速度2250rpm）において、通常噴射率に対し図示熱効率の向上を得た⁷⁾（図1、2）。分析の結果によると、この熱効率向上は、主に冷却損失の低減により得られており、燃焼期間の短縮はわずかである。噴射率漸減による噴霧貫徹力の抑制が冷却損失低減につながるが、噴霧火炎の壁衝突の影響もあって、噴射後期の乱流混合が十分でないと思われる、燃焼期間短縮の効果的な方法については、なお検討の余地が残されている。

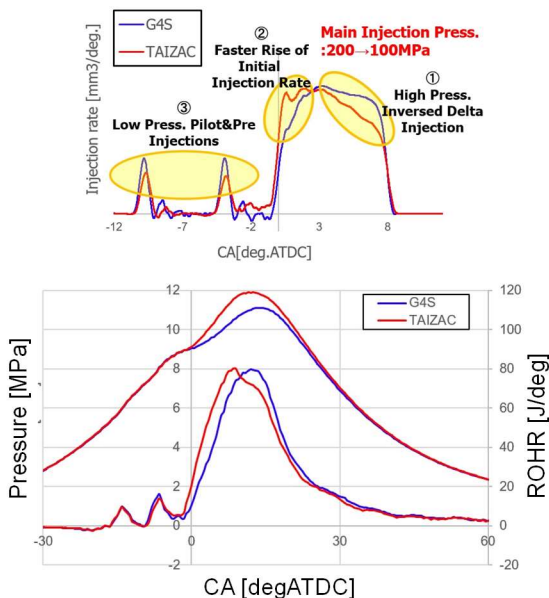


Fig. 1 Comparison of injection rate, in-cylinder pressure and heat release rate between TAIZAC and conventional (G4S) injection systems

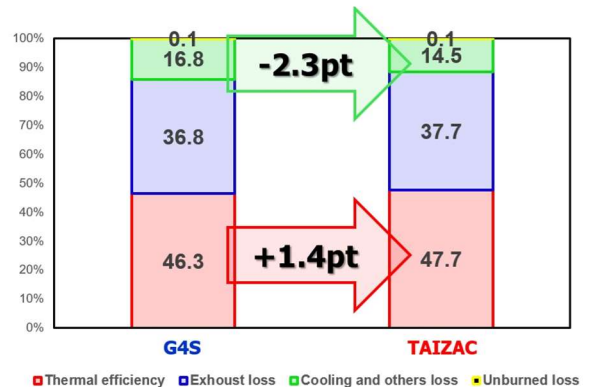


Fig. 2 Effect of injection rate pattern on heat balance

(2) 冷却損失の低減 (グループ3)

冷却損失の低減は、ノズル噴孔の小径化や燃焼室くぼみの大口径化による噴霧火炎の壁衝突の緩和によって得られるが、高負荷においてこれは概して燃焼室内の空気利用の不足につながり、燃焼期間が長くなる。すなわち、冷却損失と等容度との相反関係を緩和することがこの研究の要点となる。

まず、噴霧火炎の特性と壁への熱伝達との基本的な関係を調べた。平板に衝突する噴霧火炎を定容容器内に作成し、燃焼制御因子（噴孔径、噴射圧力、燃料温度、壁面距離など）を変化させて、輝炎・OH発光の高速撮影、および壁面熱流束の計測を実施した。その結果から、燃焼制御因子と熱損失との関係、ならびに火炎温度、流動、火炎の壁への接触面積などの物理因子と燃焼制御因子との相関を求めて、熱損失量への各制御因子の寄与度とその要因を明らかにした⁹⁾ (図3)。

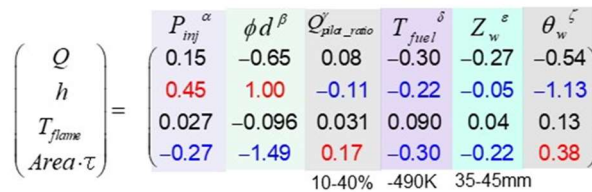


Fig. 3 Analysis of factors influencing heat loss for spray flames impinging on a flat wall in a constant volume vessel

(Q : cooling loss, h : heat trans. coeff., T_{flame} : flame temperature, $Area \cdot \tau$: contact area \times duration, P_{inj} : inj. press., ϕd : nozzle hole dia., Q_{pilot_ratio} : pilot fuel ratio, T_{fuel} : fuel temperature, Z_w : wall distance, θ_w : angle)

その結果によると、燃料温度の上昇による冷却損失の低減効果が大きく、噴霧角が大きく低貫徹力の噴霧火炎を形成していることが分かった。そこでまず、燃料温度の上昇により、低貫徹・高分散の噴霧火炎（コンパクト噴霧火炎）を作成することを試みたが、実機関ではノズル先端における燃料の十分な昇温が困難であった。そこで、燃料昇温による噴霧蒸発促進の効果を代替すべく、軽質な二つの成分からなる混合燃料（nペンタン + nデカン）を用いた噴霧火炎の特性と熱効率向上の効果を調べ、その要因を分析することとした。

二成分混合燃料（ML0.8：nペンタンの質量割合80%）を用いた単気筒機関による実験結果から、高負荷において、通常の軽油に比べて冷却損失の低減と図示熱効率の向上が確認された⁹⁾ (図4)。このとき、50%燃焼時期は遅れるが、それ以降の熱発生率が高いため、90%燃焼時期は早くなった。

通常軽油との差異を説明するため、定容容器を用いた蒸発噴霧の発達特性の計測、LIF/LIEF (Laser Induced Fluorescence/ Laser Induced Exciplex Fluorescence) を用いた噴霧構造の解析¹⁰⁾、RCEM (急速圧縮膨脹装置) を用いたOH*自発光と熱流束計測を実施した。これらより、半径方向に広がった噴霧が形成されていること、燃焼室くぼみ内で活発な発熱が行われているなどの特徴を明らかにした⁹⁾。

さらに、通常燃料によるコンパクト噴霧火炎の作成方法として、ザグリ付きノズル噴孔による噴霧の特性と熱効率への影響を調べた結果、二成分混合燃料には劣るものの、噴霧火炎の高分散化による熱効率向上の効果を確認した¹¹⁾。

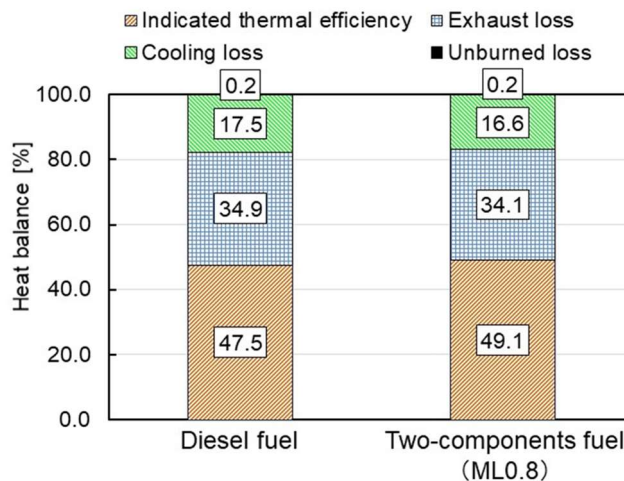


Fig. 4 Heat balance when using a high-volatility two-component fuel

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 10 No. 3 2020

(3) 燃焼のリーン化 (グループ4)

高温混合気と周囲気体を素早く混合して比熱比を上昇させることは熱効率向上に役立つ。そこで、従来よりも高い噴射圧力 (~350MPa) を用いてこれを実現することを試みた。

高負荷を対象とした研究においては、単気筒試験機関を用いて、超高压を含む噴射圧力の広い範囲における燃焼室形状ならびにノズル噴孔径・数の選択について検討を行った。

リップレス・トロイダル型の燃焼室を用い、直径と形状の異なる3種類のくぼみ (Piston A, B, C) を用いた試験を実施した。その結果、くぼみ形状によらず噴射圧力の上昇により燃焼期間、後燃え期間が短くなるが、燃焼終期の熱発生率形状にあまり変化がないことが分かった。図示熱効率は噴射圧力の増加に従い単調に上昇した¹²⁾ (図5)。

燃焼室くぼみによる性能および排気の違いを総合すると、超高压噴射による高負荷での燃焼改善効果 (高等容度と低冷却損失, 低エミッション) を活かすには、くぼみ口径がある程度大きく、壁面衝突後の噴霧火炎の流動が抑制できる側壁形状が望ましく、そのうえノズル直下の空間を確保し、噴霧根元部の空気導入を阻害しないことが肝要であるといえる。

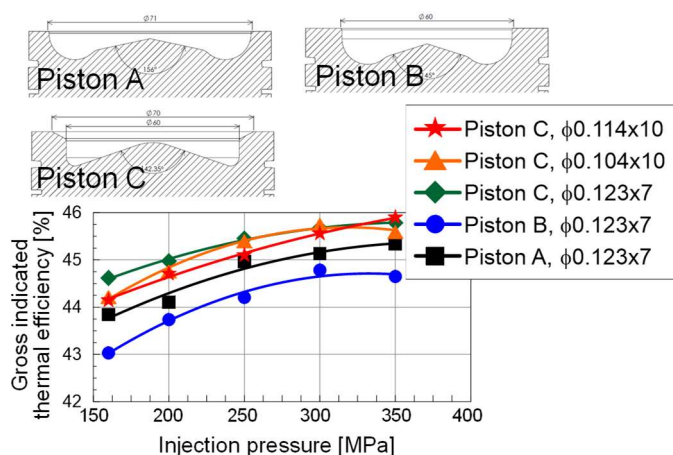


Fig. 5 Thermal efficiencies for various combinations of injection nozzle and piston bowl shape

(4) 熱効率の総合的検証 (グループ1)

熱効率の到達点を確認するため、損失低減チームの摩擦低減研究の成果を活用した圧縮比、筒内最高圧力の上昇、同チームの過給機高効率化の成果を取り入れた高過給化 (比熱比向上) など、基本的なサイクル効率向上手段をベースとし、本チーム内の研究成果に基づく噴霧火炎制御を加え、単気筒試験機関を用いて試験を行った。

燃焼系のベースを、冷却損失低減のためリップレスとした大口径燃焼室に加え、高压噴射 (~270MPa) により混合促進を図る設定とした。噴射ノズルについては、従来からの知見に基づいて、小径多孔化が方向性として妥当と考えた。しかしながら、前述の研究成果による燃焼期間 (等容度) の大幅な短縮が容易でない。噴射圧力の制限の下で燃焼期間を短縮するには、ノズル流量を増して噴射期間を短縮することが必要と考えたが、従来の知見ではこれは冷却損失の増大を伴う。しかし、グループ3が得た燃焼制御因子・物理因子・熱損失の相関式 (図3) によると、ノズル径が大きくても壁への火炎接触時間・面積を減らせるなら壁面熱損失を低減できる。実際に、ノズル径を大きくし、単気筒試験機関による実験を実施したところ、冷却損失の低減と燃焼期間の短縮が同時に得られた (図6)。このような効果が得られる条件と限界については、今後なお検討が必要である。

さらに、冷却損失を徹底的に低減するため近接アフター噴射¹³⁾を用いた。これは、逆デルタ噴射率 (図1) の噴霧火炎貫徹力軽減効果を、従来より格段に短い間隔の多段噴射で再現しようとしたものである。これにより冷却損失の低減が得られ、燃焼期間の増加が最小限に抑えられた (図7)。冷却損失の低減は、メイン噴霧火炎の貫徹が抑えられたことによる。一方、燃焼期間増大の抑制は、メイン噴霧火炎が壁面衝突後に燃焼室中央部へ向かって流動する

のを抑え、燃焼室中央部の空間を使って後続噴霧を燃焼させることができたためと推定されるが、その詳細なメカニズムについてはなお検討を要する。最終的には、これに損失低減チームの成果である熱発電の効果を加え、熱効率の目標に到達した。

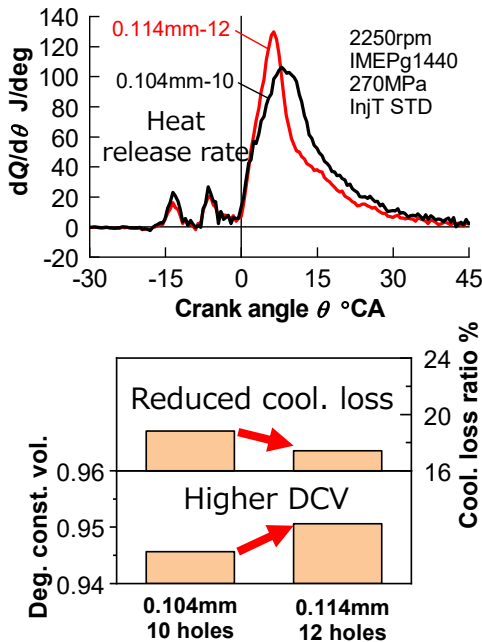


Fig. 6 Effects of a higher-flow-rate injection nozzle on heat release rate, cooling loss ratio and degree of constant volume

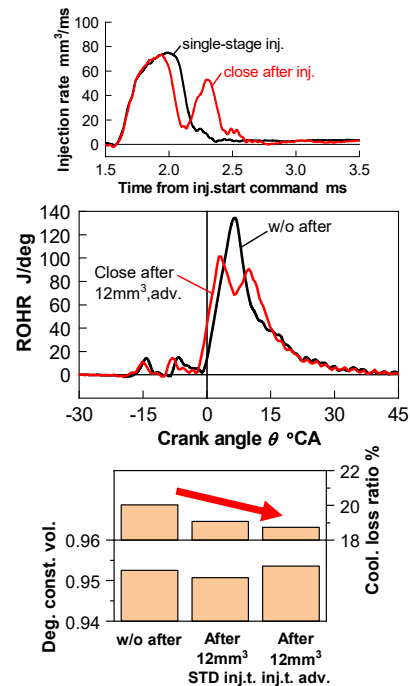


Fig. 7 Injection rate, heat release rate, cooling loss ratio and degree of constant volume of close after injection

3.2 中低負荷の燃焼改善 (グループ5)

前述のように、中低負荷については、PCCI 燃焼の利用を阻む燃焼騒音の低減を図ることを狙いとしたり。そのために、エンジン構造の工夫（振動伝達の減衰・制御）と燃焼制御（熱発生率形状の制御）の両面から研究を実施した。

まず、単段のPCCI 燃焼に代わり、2 段噴射により双峰形燃焼（二つの同程度の熱発生率ピークを生じる）とすることで初期燃焼の熱発生率を抑制し、燃焼騒音と冷却損失の低減を得た。また、熱発生率ピークの間隔を選択し、消音スパイク燃焼による騒音低減効果を利用することも可能になった¹⁴⁾。

熱効率をさらに向上させる方法を検討し、1 段目の熱発生を 2 段に分けた噴射で生じさせることにより（図 8、双 w/3 段）、燃焼騒音と冷却損失を低減した（図 9）。プレ噴射（最初の噴射）による前期燃焼の緩和と、燃焼室壁面近傍における燃焼量および噴霧によって励起されるガス流動の減少が加わり冷却損失の低減につながったと考えられる¹⁵⁻¹⁶⁾。

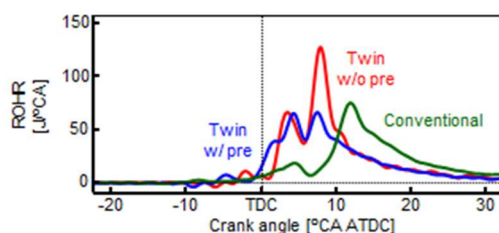


Fig. 8 Effect of pre-injection on heat release rate for twin-peak combustion

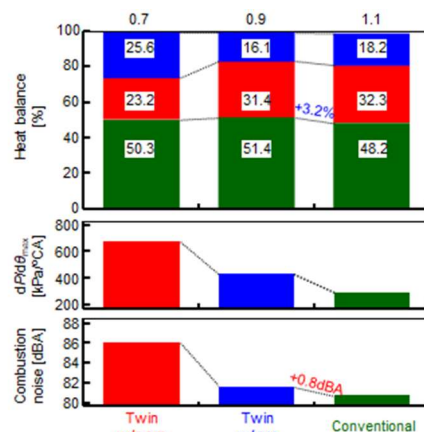


Fig. 9 Effect of pre-injection on heat balance, pressure rise rate and combustion noise

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 10 No. 3 2020

双峰形燃焼における消音スパイク効果に関して、単気筒試験機関による燃焼解析と騒音計測結果より、2段燃焼時の燃焼衝撃と放射騒音の時間・周波数特性を分析し、2段の燃焼が逆位相となる基本周波数およびその3倍の周波数における燃焼衝撃抑制効果、同位相となる基本周波数における衝撃増大効果を確認した。この結果に基づいて、コンロッドの仕様変更（オリジナルからSTP（Short Thinned Portion）コンロッドへ）によりピストン-コンロッド連成振動数を移動させることで、消音スパイク効果の周波数を構造に対して最適化し、さらに低騒音化が可能であることを示した¹⁷⁾（図10）。

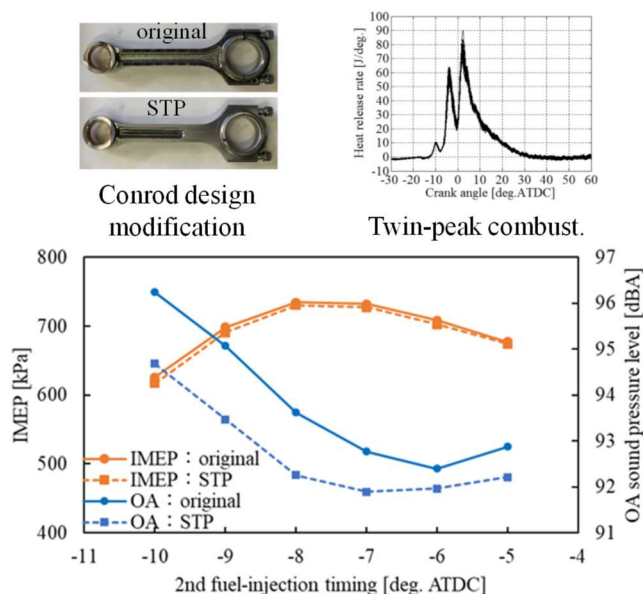


Fig. 10 Noise reduction by combining conrod design modification and twin-peak combustion

4 モデルの開発

本チームの研究を通じて基礎的なデータが蓄積されるとともに、それをもとに、以下に示す幾つかのモデル、および数値計算の精度向上に役立つ手法が得られた。詳細については関連の公表論文を参照されたい。

- ・噴霧形成モデル¹⁸⁻¹⁹⁾：ノズル内部形状とニードルの動きを入力し、ノズル出口流の速さや広がりなどの境界条件を計算する。CFD等との連携により噴霧燃焼計算の精度と汎用性を向上させる。
- ・CFDによる壁面熱伝達計算の精度向上²⁰⁾：壁関数をはじめとするサブモデルの選択により、壁面噴霧の流動および熱伝達計算を改善。
- ・高級炭化水素の簡略反応モデル²¹⁾：nC16までの炭化水素について、着火遅れの高精度予測が可能でCFD計算に適用できる新規な簡略化反応モデル。
- ・燃焼騒音モデル（骨子の作成）²²⁾：筒内における燃焼衝撃発生から騒音放射に至る物理過程について考慮した時間・周波数依存モデル。

5 おわりに

本研究開発プログラムにより、熱効率向上の観点から多くの有用な成果が得られた。ただし、有用と思われる技術について、そのメカニズムの詳細についてなお検討の余地がある。さらに低冷却損失・高速な燃焼を目指すためには、ディーゼル燃焼の現象理解をなおいっそう深める必要がある。

謝辞

本研究は、総合科学技術・イノベーション会議のSIP（戦略的イノベーション創造プログラム）「革新的燃焼技術」（管理人：JST）によって実施された。

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 10 No. 3 2020

【参考文献】

- 1) http://www.jst.go.jp/sip/k01_kadai_siryu0129.html (参照 2019.08.28)
- 2) 近藤克文, 坂井亨輔, 栗林真幹, 相澤哲哉, 紫外自発光及び吸収法によるディーゼル噴霧火炎の後燃え現象解明手法の確立, 第26回内燃機関シンポジウム, 講演No.2, (2015).
- 3) 秋山忍, 遠山義明, 猿渡蒼周, 嶋田泰三, 相澤哲哉, ディーゼル機関熱効率向上のための直列2弁瞬時切替式(TAIZAC)インジェクタ, 自動車技術会2018年春季大会, 論文No.20185278, (2018).
- 4) 西川雄也, 植松孝喜, 丸山裕暉, 秋山忍, 猿渡蒼周, 嶋田泰三, 相澤哲哉, TAIZACインジェクタを用いた段別, 噴射中の噴射圧制御がディーゼル機関性能に与える影響, 第29回内燃機関シンポジウム講演No.69, (2018).
- 5) 足立隆幸, 周ペイニ, 草鹿仁, 相澤哲哉, 詳細な素反応過程を考慮したLESによるディーゼル噴霧燃焼の当量比分布と熱発生解析, 自動車技術会2018年春季大会学術講演会講演予稿集, 論文No.20185284, (2018).
- 6) 菊井瑠偉, 宮崎進之介, 中吉航大, 木戸口善行, 名田謙, ディーゼル噴霧の燃焼経過が燃焼ガス中の未燃成分濃度の履歴に及ぼす影響, 第29回内燃機関シンポジウム講演No.68, (2018).
- 7) 西川雄也, 植松孝喜, 丸山裕暉, 秋山忍, 猿渡蒼周, 嶋田泰三, 相澤哲哉, TAIZACインジェクタを用いた段別, 噴射中の噴射圧制御がディーゼル機関性能に与える影響, 第29回内燃機関シンポジウム, 講演No.69, (2018).
- 8) 前田篤志, 中田将徳, 荒井直之, 巽健, 松村恵理子, 千田二郎, ディーゼル噴霧火炎における壁面熱損失に関する研究(第5報), 自動車技術会2017年春季大会学術講演会講演予稿集, 論文No.20175014, (2017).
- 9) 荒井直之, 中田将徳, 前田篤志, 藤川詳也, 松村恵理子, 千田二郎, 高負荷運転時におけるディーゼル機関の高効率化に関する研究—二成分混合燃料が効率・排気特性に及ぼす影響, 自動車技術会2018年春季大会, 論文No.20185005, (2018).
- 10) 西浦宏亮, 松村恵理子, 千田二郎, 高負荷運転時におけるディーゼル機関の高効率化に関する研究(第3報)—二成分混合燃料およびノズル噴孔形状が噴霧のマクロ特性および内部構造に及ぼす影響—, 自動車技術会2019年春季大会, 論文No.20195299, (2019).
- 11) 藤川詳也, 荒井直之, 岩本誠也, 松村恵理子, 千田二郎, 高負荷運転時におけるディーゼル機関の高効率化に関する研究(第4報)—ノズル噴孔形状が燃焼特性と熱効率に与える影響—, 自動車技術会2019年春季大会, 論文No.20195300, (2019).
- 12) 佐藤進, Pop-Paul Ewphun, 長澤剛, 小酒英範, 超高压燃料噴射がディーゼル燃焼の燃焼期間およびヒートバランスに及ぼす影響, 第29回内燃機関シンポジウム講演No.2, (2018).
- 13) Horibe, N., Bao, Z., Taguchi, T., Egoshi, K., Kawanabe, H. and Ishiyama, T., Improvement of Thermal Efficiency in a Diesel Engine with High-pressure Split Main Injection, SAE 2018PF&L meeting, Paper No.2018-01-1791, (2018).
- 14) Shibata, G., Nakayama, D., Okamoto, Y., and Ogawa, H., Diesel Engine Combustion Noise Reduction by the Control of Timings and Heating Values in Two Stage High Temperature Heat Releases, SAE Int. J. Engines, 9(2): 868-882, (2016).
- 15) 増子曜介, 稲葉一輝, 張焯赫, 小橋好充, 柴田元, 小川英之, 燃料噴射の分割による双峰形部分予混合化ディーゼル燃焼の熱効率改善特性, 第29回内燃機関シンポジウム講演No.1, (2018).
- 16) Inaba, K., Ojima, Y., Masuko, Y., Kobashi, Y., Shibata, G. and Ogawa, H., Optimization of Multiple Heat Releases in Pre-mixed Diesel Engine Combustion for High Thermal Efficiency and Low Combustion Noise by a Genetic-Based Algorithm Method, Int. J. Engine Research, 20(1): 80-91, (2019).
- 17) 小口瞳史, 湊高貴, 角田佳規, 瀬尾健彦, 三上真人, コンロッド仕様と燃料噴射時期がディーゼルエンジンの放射騒音特性に与える影響の調査, 自動車技術会論文集 50(2): 285-290, (2019).
- 18) Huang, W. D., Moon, S. and Ohsawa, K., Near-Nozzle Dynamics of Diesel Spray under Varied Needle Lifts and Its Prediction Using Analytical Model, Fuel, 180: 292-300, (2016).
- 19) Oda, T., Hirata, Y., Ebara, R., Iuchi, D., Sumi, T. and Osawa, K., Investigation on a Simple Model to Predict Injection velocity and Spray Cone Angle for Sac Type Diesel Injectors, ICLASS 2018: ID219, (2018).
- 20) 堀司, 藤原巧, 坪倉誠, 解析的壁関数を用いた壁面衝突噴霧のCFD, 第29回内燃機関シンポジウム講演No.18, (2018)
- 21) 桑原一成, 松尾直, 酒井康行, 小橋好充, 堀司, 松村恵理子, 千田二郎, 詳細反応機構の解読にもとづくノルマルトリデカンの簡略化反応機構の構築, 自動車技術会論文集, No.20174049, Vol.48, No.1, pp.27-33, (2017).
- 22) 三上真人, ディーゼルエンジンにおける燃焼衝撃のエネルギー蓄積・減衰・騒音放射, 日本機械学会2018年度年次大会, 講演番号 W071002, (2018).