

低エクセルギー損失燃焼*

Combustion with Smaller Exergy Loss

丸田 薫¹⁾
Kaoru Maruta

Discussion on the first- and second-law efficiencies during combustion process was conducted. Special attention was paid to the loss of exergy (availability) during combustion processes. Simple analysis showed drastic improvement of exergy efficiency in combustion process through heat recirculation. A successful example of industrial combustion technology with heat and mass recirculation processes were introduced. Finally, future trends of engine developments with new concept combustion were discussed.

Key Words : (Standardized) Heat Engine, Compression Ignition Engine, Spark Ignition Engine, Theory/Modeling, Performance/Fuel Economy/Efficiency (Free) Combustion with Smaller Exergy Loss, High-temperature Air Combustion [A1]

1 はじめに

EV, HV, PHV の研究開発が進み、クルマ社会ではかつてない多様化が始まっている。一方で、内燃機関も格段の進歩を遂げており、国産車では、小型車で 30 km/L (10・15 モード)、軽自動車で 30 km/L (JC08 モード) という驚異的な低燃料消費が達成されている。EV 以外の HV, PHV でも依然として内燃機関が重要な役割を果たしており、こうしたクルマの内燃機関に要求される特性は、従来とは異なるものとなる可能性が高い。本稿では、燃焼過程に関して、エネルギー多消費産業や、基礎燃焼研究分野における新しい燃焼技術の動向に目を向け、エンジン燃焼とは一旦少し離れた立場・視点で考察を試みる。その後再度、内燃機関の燃焼の将来の方向性について議論する。エンジンにおける燃焼の根源的な役割とは、負の要素を露呈させずに、エンジンが正の仕事をするための熱をなるべく上手に投入すること、という観点で考察する。

2 エクセルギー損失最小化技術

省エネルギー技術を日本の産業競争力の源泉とする

目的で 2007 年から技術マップが作成されている。毎年改訂があり、最新版は「省エネルギー技術戦略マップ 2011」である (平成 23 年 3 月 28 日公開)⁽¹⁾。このマップの中で当初は「超燃焼」⁽²⁾ という用語 (造語) が用いられた。しかし改訂の過程で姿を消し、現在ではより記述的な表現である「エクセルギー損失最小化技術」が用いられ、発電分野等における重要技術とされている。その主旨は、エネルギー変換過程におけるエクセルギー効率に着目し、変換過程を改善することで省エネルギーに貢献しようというものだが、燃焼過程そのものにおける実質的な効率向上にも多様なヒントを与えてくれる。まずその考え方、続いて関連の燃焼技術や基礎研究を紹介する。

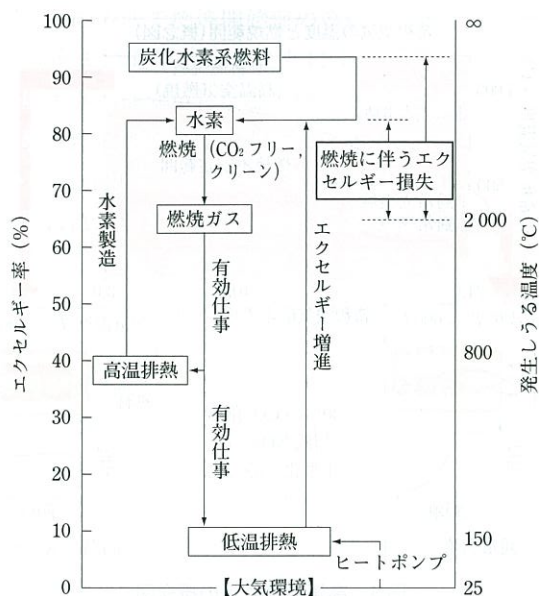
2.1. エネルギー変換とその効率

エネルギーフローや、エネルギー変換装置の効率を熱力学的観点で分析する場合、大きく 2 通りの考え方がある。一つはエンタルピーに、もう一つはエクセルギーに基づく考え方である。(前者は熱力学第一法則の効率、後者は第二法則の効率である。) 念のためここで、両者の差異について確認しておきたい。

クルマが走行すれば燃料は消費され、なくなってしまう。このとき燃料 (化学エネルギー) は、熱エネルギーを経て、作動流体であるエンジンシリンダ内の混合気による仕事 (機械的エネルギー) に変換され、残りの熱は排気ガスとして捨てられる。また冷却に使われた熱や摩擦熱も外部へ捨てられる。ここで熱力学第一法則によれ

* 2012 年 2 月 13 日受付

1) 東北大学 流体科学研究所
(980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1)
E-mail: Maruta@ifs.tohoku.ac.jp

図1 エクセルギー再生産の原理⁽¹⁾

ば、エネルギーの総量は保存されるのであり、燃焼の前でエネルギーの総量は不変である。しかしむしろ、燃料の化学エネルギーを消費した結果、もうエネルギーはなくなってしまったというほうがより実感に近いであろう。このように、より実感に近い考え方をする尺度がエクセルギーである。

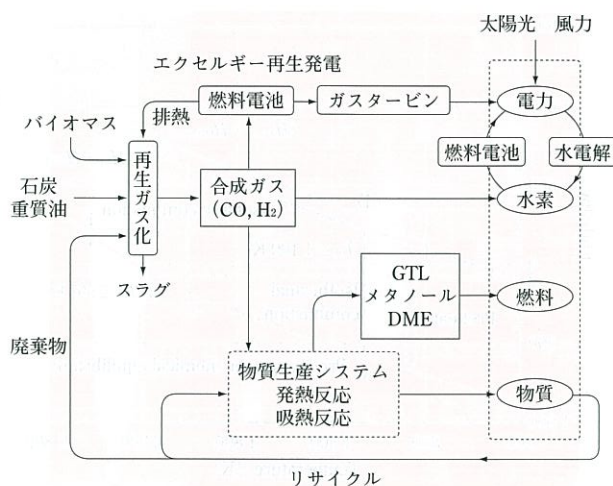
2.2. エクセルギーについて

エクセルギーの定義は、ある状態にある系が、周囲環境と平衡に達するまでに発生可能な最大の仕事であり、それは系のパラメータ以外に、周囲環境の状態にも依存する。たとえば内部が真空の容器を考えると、この容器には何も入っていないので内部エネルギーはゼロであるが、もし周囲が大気圧環境ならば、容器のバルブを開くことで周囲から気体が入り、そこに羽根車を設けることによって仕事を発生できる。したがって大気環境を基準とすれば、この真空状態はエクセルギーを有していることになる。一方宇宙空間では、この場合のエクセルギーは零となる。

(エクセルギーに関する一般的議論なので閉じた系、開いた系、どちらを選択してもよいが、自動車用内燃機関では吸気バルブ閉から排気バルブ開までの期間は閉じた系としてよいので、)ここでは閉じた系によるエクセルギーを挙げる。この系の最終条件を表す添え字を0すなわち周囲環境とすると、この系が発生可能な(単位質量当たりの)最大仕事 e (比エクセルギー)は次式となる。

$$e = -du + T_0 ds - p_0 dv$$

いかにしてエネルギー変換過程全体の高効率化を達成

図2 コプロダクションの概念図⁽²⁾

するかという考察を進めるための準備として、燃焼過程におけるエクセルギー損失についてみていこう。図1は、エクセルギー再生産の学理と呼ばれる概念⁽³⁾の説明図であり、その中で燃焼に伴うエクセルギー損失が図示されている。炭化水素系燃料を燃焼させると、発生した熱エネルギーの損失がなくても、燃焼過程に含まれる不可逆過程によって3割程度のエクセルギーが失われている。この点が注目され、燃焼利用そのものがやり玉にあがることになり、次のような提案がなされた。「炭化水素燃料はいきなり燃焼させずに、燃料改質によって水素を取り出し燃料電池で利用したり、改質を行う際にも排熱を利用する。さらにプロセス内にエクセルギーを循環させる過程を導入することで、全体として非常に高効率なエネルギー利用体系の実現を目指す」

しかし注意を要する重要な点がある。燃焼利用そのものが常に大幅なエクセルギー損失を招くのではなく、エクセルギー低下が大きい場合の燃焼が例として図1で用いられ、そのことが明確には意識されていなかったことである。(このことは次章で詳細に議論する。)

なおエクセルギー再生産の学理を整理統合、発展させることで、発電に関わるエネルギーのみならず、石油化学プロセスにおける物質生産を含めた社会システムにおけるエネルギー利用を最適化しようとする、(電力と物質の)コプロダクションという概念も提案されている(図2)⁽⁴⁾。コプロダクションでは、コンバインドサイクル式ガスタービンがシステムに含まれた状態で全体としての高効率が達成されていることから、(エクセルギーが大きく低下する例があるからという理由だけで)燃焼利用そのものをなるべく排除すべきであると結論づけるのは必ずしも正しくないことになる。

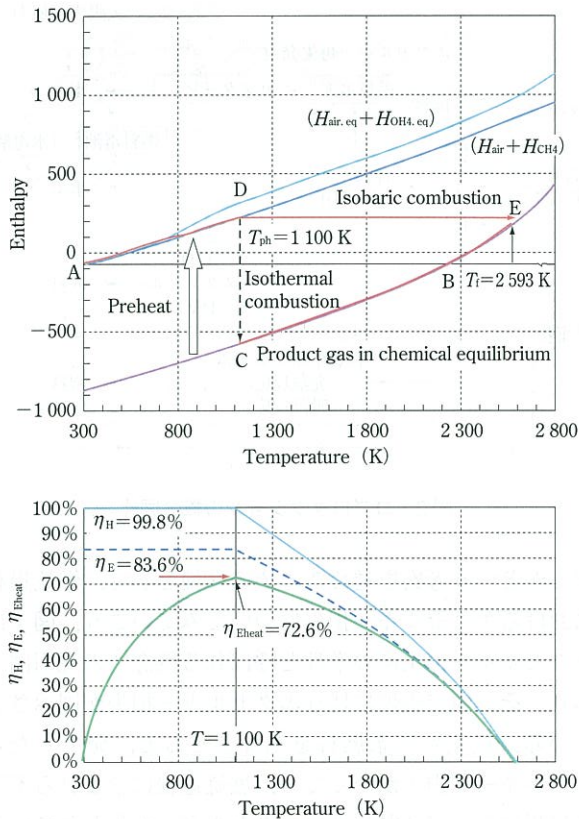


図3 未燃焼ガスの予熱を行った場合のエンタルピー・温度線図(上)とエクセルギー利用率(下)⁽⁵⁾

3 エネルギー循環燃焼の熱力学

燃焼過程におけるエクセルギー損失についての考察を紹介する。超過エンタルピー燃焼として知られる熱再生を伴う燃焼現象について、吉澤⁽⁴⁾は、高温に予熱された空気を用いる燃焼におけるエクセルギー利用率を検討した。検討に際して示されたエンタルピー・温度線図と、燃焼による熱利用率とエクセルギー効率、エクセルギー利用率を図3に示す。紙面の制約から、図を用いた最小限の説明となるので詳細は出典元の文献⁽⁵⁾をご覧ください。燃料のメタンが常温から2229 K(断熱火炎温度)まで等エンタルピー的に変化する通常燃焼によって1100 Kで加熱を行う場合(図3上図においてA→B→C)と、燃焼ガスとの何らかの熱交換によって未燃焼ガスを1100 Kまで予熱してから(A→D)燃焼し(D→E)、その後1100 Kで加熱を行う(E→C)場合に利用しうるエクセルギーを比較すると、前者では38.3%(図は省略)であるのに対し、後者では72.6%(下図の矢印)と、34.3%もエクセルギー利用率が改善される⁽⁵⁾。同様に、燃焼前の温度を固定して燃焼後の温度が異なる場合には、燃焼前の温度が高いほうが、また燃焼後の温

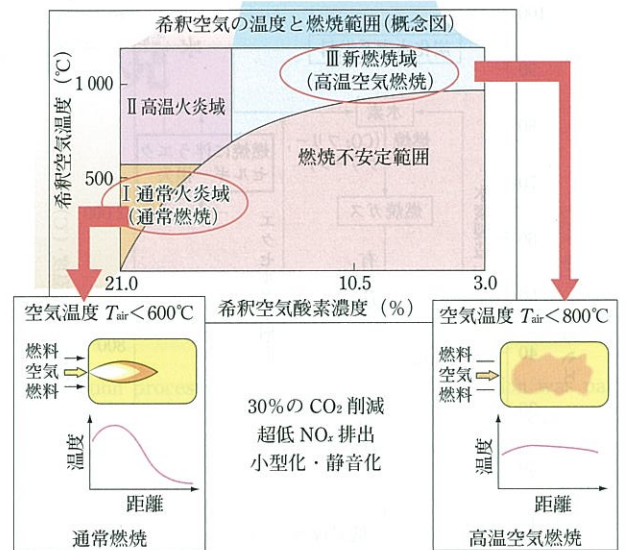


図4 高温空気燃焼の概念図

度がより高温の場合(下流の変換過程の開始条件がより高温である場合)に、エクセルギー損失の大幅な低下がみられた⁽²⁾。

ここまでの考察によって、エクセルギー再生産の学理において示された燃焼に伴う比較的大きなエクセルギー損失は不可避のものではなく、適切な対策によって相当程度改善できることがわかった。すなわち、図1における評価では、常温の混合気から出発し断熱燃焼した場合を評価の対象としたために大きなエクセルギー損失が発生したのであって、排熱を回収して混合気を予熱する、あるいは燃焼後のガスを下流の過程でどのように取り扱うかによって、全体のエクセルギー効率は大きく異なってくることになる。

4 高温空気燃焼技術

上記考察の対象となった、徹底的な熱再生を伴う燃焼過程は果たして議論に値する現実的なものだろうか。それとも机上の空論に過ぎないのであろうか。実はこのような燃焼過程は、工業炉等の大型燃焼器ですでに実用化され、世界的にも徐々に普及が進んでいる。その技術は「高温空気燃焼」あるいは「高温空気燃焼技術」(Hi-COT: High Temperature-air Combustion Technology)⁽⁶⁾と呼ばれ、主として加熱用の工業炉、改質炉等に使用されている比較的新しい燃焼技術である。図4に高温空気燃焼が実現される条件を示す。通常の燃焼では、酸素を20%程度含む大気を、常温から高々600°C程度までの範囲の温度で使用する。しかしおむね800°Cよりも高温条件で燃焼反応を開始させること、さらに排気ガス再

循環などの方法で燃焼開始前の燃焼場の酸素濃度を3～10%程度まで低下させることによって、通常の燃焼現象とは大きく様相が異なる燃焼場が実現される。こうして実現される燃焼場は、火炎がほとんど不可視となることから、mild combustion, flameless combustion などとも呼ばれている。極端な希釈によって酸素濃度を低下させているため、燃焼前に大きく昇温されているにもかかわらず、火炎反応帯における最高温度が通常の燃焼よりもずっと低くなる。低下した酸素濃度に合わせて少量の燃料が投入されることになり、極端な場合には、燃焼前の温度が1100℃、燃焼後が1200℃などと、燃焼前後の温度差が非常に小さい条件で使用される。化学反応が緩慢になることで、反応帯領域が通常よりも広範な空間に分布していると考えられており、燃焼場において平坦な温度分布が実現される。こうした特長のため、高温空気燃焼によって排出される窒素酸化物濃度は、通常燃焼に比べて著しく低くなるほか、通常の乱流燃焼にみられる燃焼騒音が消えてしまうため機器の静音化が可能である。また局所的に高温の火炎がないため、被加熱物から距離をおいてバーナを配置する必要がなく、高温空気燃焼の反応場中に被加熱物を直接さらすことができるため、炉体寸法を従来よりも小型化できるメリットがあり、炉体からの熱損失も低減できる。こうした種々のメリットの結果、同じ被加熱物に対する同等の加熱に要する燃料消費量（すなわちCO₂排出量）は従来燃焼法に比べて約30%低減できることが確認されている。（この30%という数値は、さまざまな条件にある千数百器の既存炉における通常バーナを、高温空気燃焼方式に置換した結果を平均した実績値である。改良効果が大きいケースでは、60%を越える効率改善がみられた。）

燃焼過程開始時における高温・低酸素濃度は、熱交換器による排熱の回収による空気加熱と、多量の排気ガスの（内部）循環によってもたらされる。したがって熱再生燃焼の一例であり、3章で述べたエネルギー循環燃焼の原理で説明した顕著なエクセルギー効率の改善が実現されている例であると結論できる。

なお高温空気燃焼では、セラミクス蓄熱体による高性能熱交換器によって徹底した排熱回収を行うことで、燃焼開始時の酸化剤温度を極端に高温に、かつその雰囲気における酸素濃度を極端にリーンにすることに成功している。技術的なボトルネックの一つは、この熱交換器の開発であったことも付言しておく。

さて図3に関連してもう一つ指摘しておきたい点がある。図3中には、未燃混合気が、予熱中の高温により反

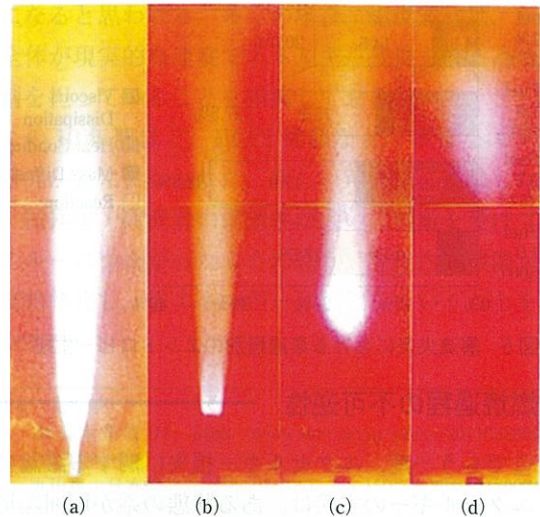


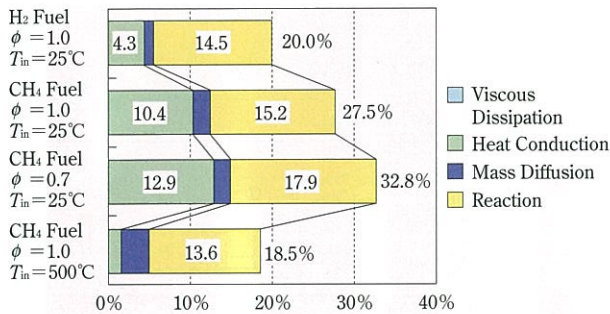
図5 高温空気燃焼の噴流火炎写真。メタン噴流の流量は3 Nリットル毎分。下方からの空気流の温度は、(a)1470 K、(b)1383 K、(c)1303 K、(d)1223 K⁽⁷⁾

応開始することを避けるため、空気と燃料を別々に予熱した場合の線図が記入されている。高温空気燃焼ではこの問題をどのように回避したのだろうか。

高温空気燃焼では、従来方式とは大きく異なる、高速の燃料噴流による燃料供給を導入している。さらにその噴流火炎をリフトさせることで、噴流基部付近で燃料と酸化剤とが混合しつつ、予混合燃焼とも拡散燃焼とも区別できない状態で、やがて反応時間と滞留時間がつりあうような場所から燃焼反応が始まるように制御している。（図5）⁽⁷⁾。これにより、予熱温度の制約を逃れることができる。このように高速噴流を使って短時間で混合気形成を進め、局所的な流れの伸長効果によって自着火を回避することは、高温の反応帯形成の回避を通じてNO_x生成を回避するためのポイントにもなっている。

この混合気形成方式は高温空気燃焼における一つの特長になっている。したがって高温空気燃焼の火炎は、予混合火炎・拡散火炎のいずれにも分類できない。高温空気燃焼に相当する現象をそれまでの基礎燃焼研究がカバーしていなかったのは、このように非予混合でありながら、反応時間支配の領域が支配的な現象であるという事情によるのかもしれない。

また通常燃焼バーナでは炉内に空気とともに燃料を供給する方法が常識であったのに対し、高温空気燃焼では、燃焼用空気とは別に、燃料専用ノズルで燃料を供給する方式も実用に供されており、燃焼器設計の自由度を大幅に拡げている。

図6 層流火炎における素過程別のエントロピー生成⁽⁸⁾

5 燃焼過程の不可逆性

ここでもう一度、エクセルギー損失に関する議論に戻る。エクセルギーの定義は、ある状態の系が周囲環境と平衡に達するまでの間、可逆過程によって発生しうる最大仕事であった。もし不可逆過程が介在すると、エントロピー生成 (S_{gen}) によって、実際に発生可能な仕事が $T_0 dS_{gen}$ 目減りすることになる。燃焼過程は不可逆過程なので、この目減りがこれまで議論してきたエクセルギー損失に相当する。ではこのエクセルギー損失の内訳はどうなっているだろうか。

高城らは、一次元予混合火炎を対象とした検討を行い、素過程別 (化学反応、熱伝導、物質拡散、粘性散逸) のエントロピー生成を調べている⁽⁸⁾。その結果、それぞれの過程におけるエントロピー生成への寄与を明らかにしている。特に、前述の議論にあった未燃焼混合気の予熱を行うことで、予混合火炎の予熱帯における熱伝導に起因するエクセルギー損失が大きく低減されることを示しており (図6)⁽⁸⁾ 非常に興味深い。圧力・体積ともに変化するエンジンにおけるエクセルギー解析を実施していないので予想になるが、上記の結果は、(比較的低温で火花点火により開始する) 燃焼よりも、(可逆過程である断熱圧縮と組み合わせて十分な高温で開始する) 自着火燃焼のほうが、不可逆性に起因する損失を低くできる可能性があることを示唆している。さらに、従来方式よりも気体燃焼により近い傾向のあるコモンレール式ディーゼル機関の燃焼や、HCCI 機関のような、自着火燃焼がより好ましいことになる。HCCI 機関研究において最も効率の良い条件では、50%を越える熱効率が得られることも傍証の一つといえるかもしれない。

また燃焼開始ぎりぎりまで比熱比を大きくとれることから、高圧燃料噴射によるコモンレールディーゼル機関は、よりいっそう理にかなった方法であることが示唆される。また高圧燃料噴射と高温空気燃焼における高速燃料噴流吹き込みにはアナロジーがあるように見える。

6 内燃機関の理論サイクルによる考察

熱力学では、火花点火式のガソリン機関はオットーサイクル、圧縮着火のディーゼル機関はディーゼルサイクルと教える。しかし最新のエンジンは、もうこのような画一的な考え方では議論できない水準に達しているようにみえる。筒内噴射や、(コモンレール式による) 高圧噴射技術、各種のバルブ開閉制御技術などの周辺技術の発達によって、混合気形成や燃焼制御の自由度が従来とは根本的に変わってきているし、また負荷や回転域によってもまったく異なる思想でエンジンが制御されているからである。新しいエンジンの指圧線図を見ると、その燃焼過程は、等積過程や等圧過程とはかけ離れた形状であることがしばしばある。

自然吸気に限定した理論サイクルの議論に戻るとして、いったいどのような指圧線図が描かれれば、エンジンは最高効率を発揮するのであろうか? 「もちろんカルノーサイクルが最高効率に違いない!」と考える向きもあるが、この点については慎重な議論が必要である。投入熱量が同じであっても、少なくとも高温熱源の温度は大きく変化する余地があるためである。したがって必要な考察は、投入熱量一定とした場合、どのようなサイクルがどんな圧縮比で最高効率を与えるか、という問題に帰着する。

最新の高圧縮比ガソリンエンジンの技術解説⁽⁹⁾において、全負荷時の $p-v$ 線図を見る機会に恵まれた。上死点付近で低温酸化反応による発熱の寄与による圧力上昇が一度あり、その後いったん圧力が低下した後に等圧線に絡まるような形状で主燃焼の寄与がみられる、特異で、実に印象的な指圧線図であった。

投入熱量一定下で、同効率のオットーサイクル、ディーゼルサイクルを考える (無論異なる圧縮比で)。このようにオットーサイクルの圧縮比をあらかじめ、等しい投入熱量下で同効率となるディーゼルサイクルの圧縮比と等しくなるように高めにしておき、高負荷で等容的燃焼、低負荷で等圧的燃焼のように負荷によって違う燃焼過程を使い分けることで、比較的軽負荷のモード運転時の平均的な効率を高く保ちつつ、かつ全負荷でノッキングの影響を受けないエンジンを実現できる。このときサイクル中の最高温度は等圧燃焼のほうが低くなるので、NO_x やすす排出でも有利に働くと考えられる。

さらに実際の燃焼現象に起こりうる問題をいったん度外視して想像を逞しくすれば、さらに多様なパターンの熱発生 (新しい燃焼の利用) も工夫できそうである。

先に述べた種々の燃焼方式における不可逆性の定量的な寄与がどの程度なのかはいまだ不明であるが、解明されれば新たな視点を提供することになると思われる。

7 今後の課題—まとめに代えて—

かつて、エンジンにおける燃焼は結果であって、混合気形成までが勝負、という見方もあったように思われる。しかしながら新しいエンジンでは、筒内噴射、高度なバルブ開閉制御などの新しい技術を駆使することで、熱発生をデザインしようとする意思が透けて見える。アトキンソンサイクル等の利用はもちろんであるが、低温酸化の積極的利用、多数回の燃料噴射などによって、さらに高性能のエンジンが開発されると思われる。新しい基礎研究のテーマもたくさん見つかりそうである。

エンジンにおけるエクセルギーベースの分析には手がつけられなかった。今後の課題である。(文献⁽³⁾にエンジンにおける分析例がある。)特に過給(すなわちエクセルギー再生)を用いるシステムを対象にする場合には、もう一度、システム全体のエクセルギー効率に着目した考察を行うことが、従来にない視点を獲得するという点で意義深いように思われる。

本稿の議論では、平衡熱力学の範囲で第二法則効率を議論した。燃焼過程の不可逆性の要因についても触れたが、速度論を含めた議論はできなかった。高性能湯沸かし器とヒートポンプの性能論争に関する議論⁽¹⁰⁾は速度論そのものであり象徴的である。今後、エネルギー変換における効率を議論する際には、速度論は重要なポイント

になると思われる。多くの場合、燃焼過程は、システム全体が現実的な速度でエネルギー変換を終えるための役割を担っていることを指摘しておきたい。

この10年間ほど、HCCI機関など、多様なエンジンの研究が盛んに行われた。新しい可能性に挑戦したことで、技術者・研究者の創造性が大いに刺激を受けブレークスルーにつながったように思う。今後内燃機関がさらに高効率化し、省エネルギーに貢献していくことを願ってやまない。

参考文献

- (1) 経済産業省 HP, <http://www.meti.go.jp/press/20110328004/20110328004.html>
- (2) 丸田薫：日本燃焼学会誌, Vol. 49, No. 150, p. 26-32 (2007)
- (3) 吉田邦夫編著：エクセルギー工学，理論と実際，共立出版(1999)
- (4) 吉田邦夫編著：水素利用の省エネルギー，エクセルギーポンプ研究会，第1分冊，新エネルギー産業技術総合開発機構(2005)
- (5) 吉澤善男：日本燃焼学会誌, Vol. 50, No. 152, p. 111-117 (2008)
- (6) M. Katsuki, et al. : Proc. Combust. Inst., 27, p. 3135-3146 (1998)
- (7) T. Fujimori, et al. : Proc. Combust. Inst., 28, p. 455-461 (2000)
- (8) K. Nishida, et al. : Proc. Combust. Inst., 29, p. 869-874 (2002)
- (9) 山川正尚：2011年度第二回基礎燃焼工学講座，日本燃焼学会(2011)
- (10) 小宮山宏：速度論，朝倉書店(1990)

フェース



丸田 薫