

## ■連載講座／SERIAL LECTURE■

—高効率エネルギー利用に向けた燃焼研究の役割／Roles of Combustion Studies for Highly Efficient Energy Usage—

超燃焼 — 燃焼技術の革新による省エネルギーを目指して—  
Innovation of Combustion Technologies for Energy Saving

丸田 薫\*

MARUTA, Kaoru\*

東北大学流体科学研究所 〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平2-1-1  
Institute of Fluid Science, Tohoku University, 2-1-1 Katahira Aoba-ku Sendai, 980-8577, Japan

## 1. はじめに

2030年に向けて、日本の省エネルギー技術を国際社会における産業競争力の源泉とするため、省エネルギー技術開発推進の方向性を示す指針となる「省エネルギー技術開発戦略マップ2007」がとりまとめられ、公表されている。毎年修正を行い練り上げられることになっており、省エネルギー技術全般を対象に、既存技術に過度に捉われないよう、一般的な内容になっている。同マップは、非常に広範な分野・技術領域をカバーしており、省エネルギー技術が総合工学であることを再認識させてくれる。本稿はこれらの広い技術領域のうち、「超燃焼」という、技術用語とも、あるいは技術政策の標語とも受け取れる耳慣れない用語によって提唱される、燃焼技術開発戦略の内容とその背景をご紹介します。本誌読者である燃焼技術者・研究者に問題提起することを目的としている。このような問題提起を行うに至った動機は、この省エネ技術マップ作成の過程で燃焼の利用そのものがやり玉に挙がり、燃料電池への大幅シフトなど、日本の近未来の研究開発指針から燃焼研究が外されそうになったことにある。

## 2. 超燃焼とは

超燃焼の主たる対象は、燃焼熱を大量に使用する業種である鉄鋼・非鉄・石油石化・化学・窯業・セラミクス等のプロセス産業としたが、燃焼熱を直接・間接的に利用する分野の関連技術が広くその範疇に含まれる。なお「超燃焼」という語には、燃焼を経ずによりよい結果が得られるプロセスにおいては燃焼過程を省いた技術開発をおしすすめる

こと、そして燃焼の利用が不可欠なプロセスにおいては、省エネルギーという観点によって、既存技術が成熟した分野であっても見直しをすすめる、今後さらに大幅な省エネルギーを実現するための研究・技術開発を行うこと、という二つの意味が込められている。

本稿ではこのうち、直接あるいは間接的な燃焼熱の利用について、またその燃焼技術開発の方向性について背景とともに考察していきたい。

## 2.1. 超燃焼の考え方

社会における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、その尺度の選択が重要であるが、これには大きく二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(有効エネルギー)に基づく考え方である。念のためここで再度、両者の意味することについて確認しておきたい。

自動車を利用すれば燃料は消費され、無くなってしまう。このとき燃料の持つ化学エネルギーは、熱エネルギー、作動流体であるエンジンシリンダ内の混合気体の仕事を経て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排出される。また有効に使用されなかった熱あるいは摩擦熱などは、冷却水などを通じてやはり外部環境に捨てられることになる。ここで熱力学第一法則によれば、エネルギーの総量は保存されるのであり、前述の表現に倣えば、燃料の持つ化学エネルギーが、移動のために必要な機械的エネルギーと、排気ガスなどの廃熱に変換された(車一台分であればほんの少しだけ地球環境を温める熱エネルギーに姿を変えた)ということになり、エネルギー総量としては保存されていることになる。しかしむしろ、燃料という化学エネルギー源を消費してしまった結果、もうそのエネルギーは無くなってしまったという方がより実感に近いであ

\* Corresponding author. E-mail: maruta@ifs.tohoku.ac.jp

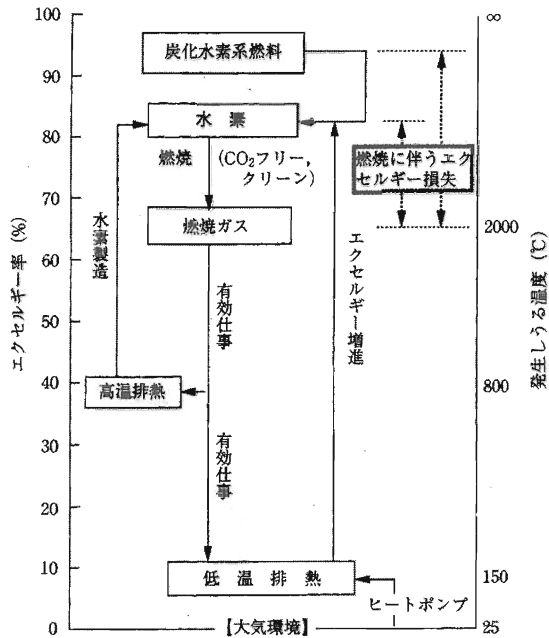


図1. エクセルギー再生産の原理[1]

ろう。このようにより実感に近い考え方をする尺度が後者のエクセルギーである。エクセルギーを尺度として燃焼技術をもう一度見直し、省エネルギーという観点で燃焼技術の研究開発の方向性を模索してはどうかという提案を超燃焼という言葉で表現していると考えていただきたい。

## 2.2. エクセルギーについて

より一般的なエクセルギー (有効エネルギー) の定義は、周囲の環境条件と平衡状態に達するまでに発生可能な最大の仕事であり、系のパラメータ以外に周囲環境のパラメータにも依存する。たとえば内部が真空に引かれている容器を考えると、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、バルブを開くことで周囲から気体が入り、羽根車を設けることによって仕事を発生できる。したがって大気圧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。

エクセルギーを考えるにあたって、運転中の燃焼器や化学プラントのように、物質が定常的に流入する系が仕事を発生している状態を考える。この定常流動系の出口条件を表す添え字を 0 すなわち周囲環境であるとする、エネルギー保存則と、不可逆過程により生成するエントロピーの定義から、この系において発生可能な最大仕事は次の式を満たすことになる。

$$\delta L = -dH + T_0 dS - T_0 dS_{gen}$$

このとき  $S_{gen}$  がエントロピー生成であり、変換過程における不可逆性に起因してエクセルギー損失が生じる要因と

なる。

得られた仕事を、発生可能な最大仕事であるエクセルギーで除した値で表わすエクセルギー効率、一連のエネルギー変換や、物質の状態変化の過程でエントロピーが生成すると、これに伴うエクセルギー損失によって徐々に悪化する。熱力学で想定する仮想的な理想変化である「可逆過程」以外の実際の系では必ずエントロピーは生成し、エクセルギー損失が生じる。したがって実際の過程におけるこの不可逆性の度合いを下げるのがエクセルギー効率向上のために必要となる。しかしここで問題となるのは、燃焼過程は本質的に不可逆変化であり、エクセルギー損失を完全に避けることは原理的に不可能であることである。しかし人類の生活を支えているエネルギーの 8 割以上を燃焼によって得ていることを考慮すると、ただちにその全てを別の方法に転換することは事実上不可能であるが、燃焼に伴うプロセスの高効率化を進めていくことによるインパクトは大変に大きいと考えられる。

いかにして高効率化を達成するか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少し詳細にみていく。図 1 は、エクセルギー再生産の原理とよばれる概念[1]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。しかしこの炭化水素燃料を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する、またさらにメタノールを水素に改質する際に 100°C レベルの低温廃熱を利用するなど、プロセス中にエクセルギーを増進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を実現することができる。また燃料電池や IGCC などほかのエネルギー変換まで組み合わせた、コプロダクションという概念に基づいた仕組みを構築することで、エクセルギー損失の非常に小さなエネルギー利用体系を構築できるとの提案もある (図 2 [2])。その中で、単に燃焼させるとしても水素燃焼であればエクセルギー損失が 2 割程度に低減できる点を理由にあげ、エネルギー利用体系の改革を提唱している。

Okazaki[3]によれば、長期的な観点で脱化石燃料を成し遂げるとすれば、(原子力を除けば) エネルギーのキャリアは水素しかなく、短期～中期的には石炭ガス化や CO<sub>2</sub> 分離回収、また燃料電池を含む水素利用技術の研究開発が必須としている。ご承知のように米国大統領の提言によって、こうした水素社会への転換を目指した研究開発の動向は、世界的な傾向になっている。

しかしながら現実の問題として、高温源そのものが必要となる鉄鋼業など前述したプロセス産業においては、燃焼の利用なしに目的を達成するのは実質的には不可能である。したがって超燃焼の対象である業種においては、これほど革新的なスキームは難しいとしても、燃焼利用におけるエクセルギー効率の改善あるいは最大化はどのようにし

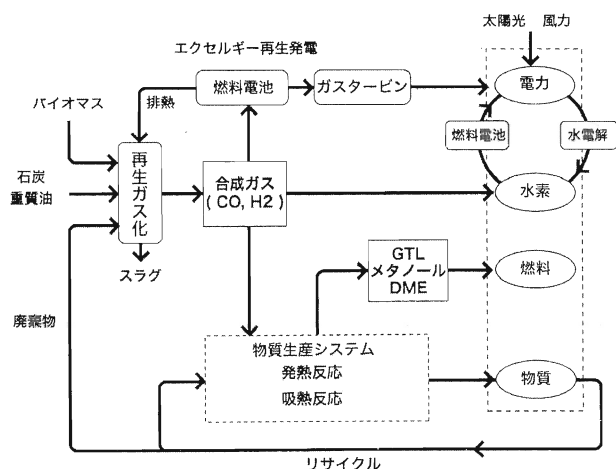


図2. コプロダクションの概念. エクセルギー損失低減を目指したエネルギー利用法を提案している. [2]

て成し遂げられるのか, という観点による研究が必要となる。

燃焼におけるエクセルギー損失を低減する一般的な方法はないだろうか. 燃焼とエクセルギー損失の関係をもう少し丁寧にみていくことにする. 図3 [4]は, 化学平衡的に断熱燃焼させた場合のエクセルギー損失率と, 燃焼前の温度との関係を示したものである. 入口温度を変えて出口温度を一定に保つため, 希釈ガスの種類を変えている. 図からわかるように, 燃焼前の温度を上昇させることでエクセルギー損失率が低下する. 一方で燃焼前の温度をパラメータとして燃焼後の温度を変えた場合 (図4 [4]) も, 燃焼前の温度が高い方が, 全般的にエクセルギー損失率が低いことがわかる. 以上の点から, 燃焼前後の温度差が小さいことがエクセルギー損失低減に有効であると言える. なお, 燃焼前の温度が一定の場合, 特に低温時のデータを見ると, 燃焼後の温度が高い方が, エクセルギー損失率が低い結果となっている. これについては, 燃焼後の温度を変えるために当量比を変化させており, そのため燃焼後の温度が高い場合には系に余剰に持ち込まれる空気量が減っており, その影響が現れたためであると考えられる[5].

### 2.3. 燃焼におけるエクセルギー損失の低減

燃焼過程の不可逆性が高いことはエントロピー生成の増大につながる. また火炎温度が必要以上に高いと冷却が必要になるなどの派生的な問題が生じる. したがって熱力学的な観点から見た理想を掲げるとするならば, 燃焼による温度上昇が少なく, 用途に応じて最適な火炎温度を自由に選ぶことができ, しかも安定に燃焼を維持できる, などの条件が同時に満たされることであろう. 実際に火炎温度や火炎の安定性を制御するためには, 通常言われている熱のカスケード利用や複数過程の組み合わせで全体として熱物質のバランスを整えるのみならず, 当該過程の燃焼条件が合目的になるよう, 排気ガスの直接循環や熱交換による廃

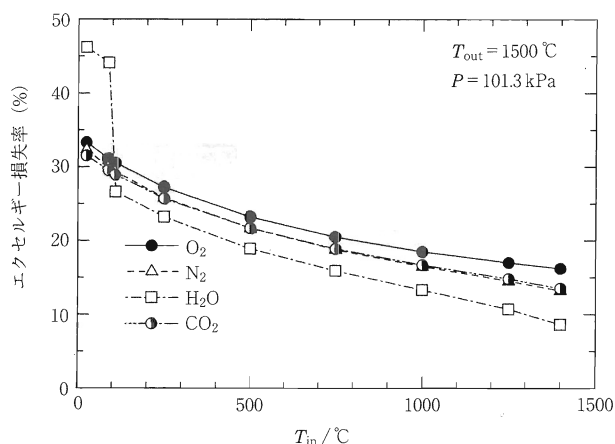


図3. 燃焼前の温度とエクセルギー損失の関係 (燃焼後の温度1500°C)[4]

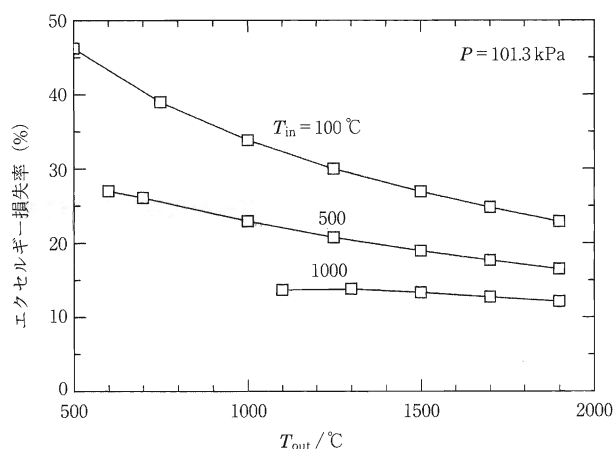


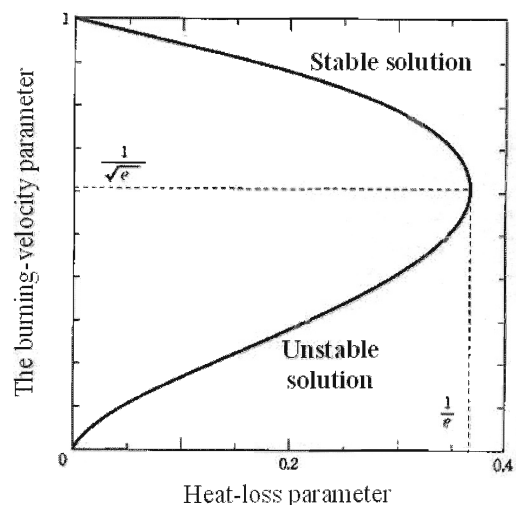
図4. 燃焼後の温度とエクセルギー損失の関係[4]

熱利用などにより熱や物質を再循環して燃焼過程の入口条件を (間接的には出口条件も) 制御する必要がある. このような意味で, いわゆる熱物質再生をともしう燃焼過程を多様に利用していくことが, キーワードになるものと考えられる.

このように定性的な議論しかできないのは面映ゆいが, 燃焼過程におけるエクセルギー解析は, それ自体が個々の事例に依存する比較的手間のかかる作業であることがその理由の一つである.

### 2.4. 熱力学的要求と実際の燃焼現象

ところで, ここまではもっぱらエクセルギー効率という観点で燃焼前後の温度差や温度レベルとの関係を概観したが, 燃焼学的観点では, このように燃焼温度を任意に選び, 安定な燃焼を実現することは実際に可能なのだろうか. 火炎を安定に実現するという事は, 火炎の安定性, すなわち燃焼が限界を迎え反応が停止してしまうメカニズムという観点で検討する必要がある. 燃焼限界のメカニズムにつ



$$\lambda \frac{d^2 T}{dx^2} - mc_p \frac{dT}{dx} = -\omega q^0 + L$$

図5. 燃焼速度パラメータと熱損失パラメータとの関係

いては従来から多くの研究が行われてきたが、現在では、系内の発熱量に対する熱損失量の割合がある一定値を越えると燃焼限界に達するということが概ね整理できるというのが研究者間の共通認識である。図5は、無限に広い平面上の一次元予混合火炎に対する火炎の熱理論に基づく燃焼限界の概念を示したものである[6]。

支配方程式中に熱損失項があり、この項が大きくなると、火炎伝播速度をあらわす縦軸のパラメータが急激に低下、その傾きが無限大になる。この点が燃焼限界を意味しており、したがって熱損失を低減することができれば、燃焼限界は自由に制御できるはずであり、適正な熱バランスさえ確保できれば、いかなる希薄燃焼も可能であることを示唆している。また言い換えれば、系からの熱損失が無いか、または無視できる系では、(熱理論では) 原理的に燃焼限界は存在しないことになる。熱理論に含まれる熱損失項に相当する現実の物理現象は、ふく射熱損失であろうと長らく言われてきたが、燃焼限界が実際に燃焼ガスからの微弱なふく射によって引き起こされているという事実が証明されたのは90年代の終わりごろ、微小重力場における燃焼実験によってであった[7]。(輝炎からではなく、燃焼ガスからのふく射である。) このような事例から、発熱と放熱のバランスを変えることで、燃焼限界はある程度、しかし相当に広い範囲に制御できると推測できる。

さてここまで考えてくると次の段階として、では燃焼限界の制御はどこまで可能か、という新たな疑問が生じる。1500℃ではなく、1200℃の火炎が実現できそうかどうかということには異論はないかもしれないが、では100℃の火炎といったら誰も信用しないであろう。少なくとも、いわゆる着火温度と火炎温度の間に、実現可能な最低の火炎温度が存在する可能性はありそうである。

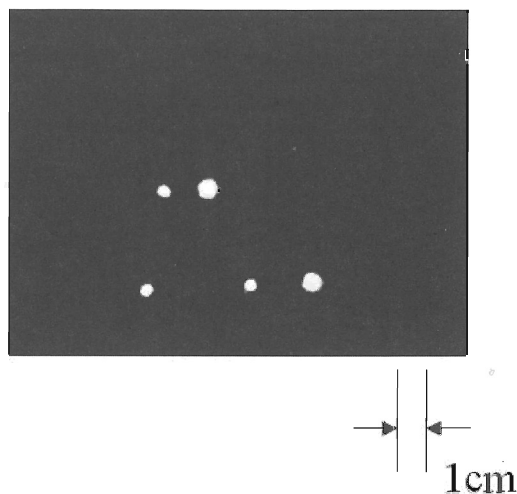


図6. 火炎球の観察写真(東北大—南カリフォルニア大共同の微小重力場実験より)[8]

低温の火炎というと、比較的最近研究が進められた火炎球 (Flame ball) が思い起こされる。火炎球に関する実験的研究は90年代から急速に進み、燃焼現象、特に燃焼の限界の理解に関して多大な貢献があった。微小重力場において観察された火炎球の写真[8]を図6に、またその構造[9]を図7に示す。火炎球は予混合気中に実現される定常な火炎であり、予混合気中の火炎でありながら、球状にその直径が増大しながら伝播するのではなく、固有値として定まる直径が一定のまま、定常的に存在する球状の火炎である。直径は数 mm から数 cm 程度、重力場では浮力のために連続して観察できず、微小重力場でのみ観察することができる。通常の可燃限界の近傍あるいは限界外の条件で観察され、対流速はいたるところでゼロであり、酸素も燃料も拡散によってのみ、球の表面部分に相当する反応帯に到達する。また燃焼ガスも拡散によってのみ周囲へ移動し、この状態でバランスしている[9]。重要な点は、球内部の燃焼ガスからのふく射損失によって、実際にこうした火炎が定常的にみられる(数学的に解が安定化する)点である。後にスペースシャトルによる宇宙実験でも、定常な火炎球の存在が確認されている。なおここでは、その火炎温度の低さに注目したい。火炎球の研究を通して、その温度は少なくとも900℃以下(水素燃料の場合)であることが予想されており、燃焼学の経験則である炭化水素燃料火炎の自律安定できる最低温度1200℃と比較してもかなり低い値である。このことは、熱管理によって実現できる火炎の最低温度を考えると、通常の火炎に関するこれまでの経験則に限定する必要はなく、少なくとも相当に低温の火炎が実現できる可能性を排除せずに検討する必要がある、応用のみならず基礎研究も進めながら検討を継続する必要があることを示している。温度上昇幅の小さな燃焼現象、用途によって選択可能な燃焼温度という考え方は、エクセルギー効率の高い燃焼システムを実現するために実に都合がよいことになる。

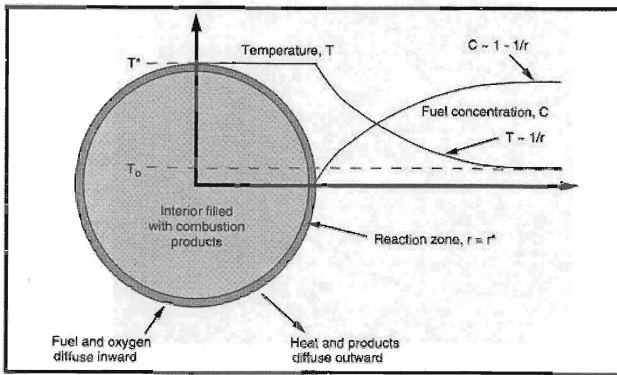


図 7. 火炎球の構造[9]

## 2.5. 既存燃焼技術との関連

よく知られているように、主として工業炉における革新的な燃焼技術として高温空気燃焼 (あるいは mild combustion, flameless combustion などと称される。) に関する技術開発が国プロジェクトとして 90 年代から 10 年間にわたって進められた。産官学連携のもとで進められ、燃焼限界や分散燃料に関する基礎燃焼学的な理解を広げたほか、廃棄物処理炉、天然ガス改質炉、微粉炭燃焼炉などへの適用拡大を図るなど、確固たる成果を挙げている。

高温空気燃焼に関しては数多くの優れた文献[10-13]があるので詳細はそちらを参照いただくこととして、その概要は図 8 に示すとおりである。酸素を 20 % 程度含む通常の大気を、常温から高々 600°C 程度までの温度で使用する通常の燃焼過程ではなく、排気ガス再循環など何らかの方法で酸素濃度を 3 ~ 10 % 程度まで低下させ、しかも概ね 800°C よりも高温となった空気を使用する燃焼過程である。燃料を高速で炉内に吹き込むなど、混合気形成の際、後述するある条件を満たす必要があるが、火炎温度が通常の場合よりも低く、また燃焼反応が緩慢で、しかも反応領域が通常よりも広範囲に分布していると予想されており、比較的低温で温度分布が平坦な場が実現される。このため排出される窒素酸化物濃度が通常の燃焼過程と比べて著しく低減できるほか、燃焼騒音が無く、加熱用途の工業炉に適用した場合、小型化できるなどのメリットを併せると、同等の加熱に要する燃料量 (すなわち CO<sub>2</sub> 排出量) は 30 % 程度低減できることが知られている。また、火炎が無色透明に近く、不可視になる特徴があるため、flameless combustion と称される。極端な条件では、燃焼前後の温度差が 100°C 程度しかないような火炎も実現されている。

燃焼過程入口における高温・低酸素濃度は、熱交換器による廃熱の回収による空気加熱と、多量の排気ガス (内部) 循環によってもたらされる。したがって、これまで述べてきた熱物質再生を伴う燃焼過程のある一つの具体例であると同時に、従来は荒唐無稽とも考えられた燃焼制御、すなわち火炎の低温化や緩慢燃焼過程を特定の方法で実現し、また実用技術として世に示した大きなきっかけであったと

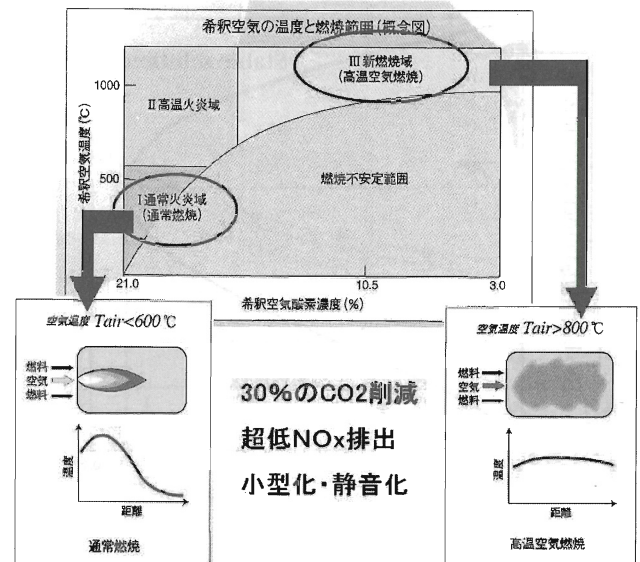


図 8. 高温空気燃焼の説明図

言うことができる。

またあまり強調されることが無いように見受けられるが、混合気形成は高温空気燃焼において一つの重要なポイントになっている。工業炉などにおける典型的な高温空気燃焼状態は、いわゆる予混合火炎または拡散火炎のいずれとも異なる燃焼形態である。通常雰囲気下であれば燃料の着火温度を超えるような温度の高温空気を使用するため、予混合気は使用できないし、また燃料噴流を高温の空気が満たされた空間にただ吹き込むだけでは、多量の窒素酸化物が排出されてしまうことになり、こちらも問題がある。しかし燃料噴流を非常に高速で吹き込み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完全には区別できないような状態で、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広く炉内に実現し、高温空気燃焼が実現することになる (図 9) [14]。高温空気燃焼に相当する状態を基礎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存在する現象であるという事情にもよるもので、ある意味で盲点であったと言えるかもしれない。

著者の知る限り、エクセルギー効率的観点によって高温空気燃焼を分析した事例などは無いと思われるが、こうした努力も含めて、熱物質再生燃焼のメリットを系統的に研究していくことは非常に有意義であると考えられる。例えば熱物質再生燃焼において任意の火炎温度を選択したい場合を想定し、実現可能な最低火炎温度を特定する試みも始まっている[15]。

熱物質再生を伴う燃焼に関連する最近の燃焼技術として、自動車用内燃機関を例にとり、その研究開発動向を考えてみたい。周知のように自動車の燃費向上、排気ガス浄化に対する法規制や社会的圧力は世界的にも厳しさを

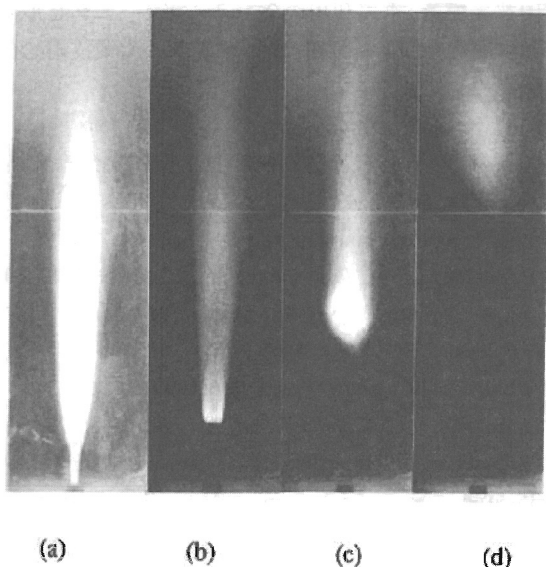


図9. 乱流噴流火炎の写真. メタン噴流の流量は3N リットル毎分. 下方からの空気流の温度は (a) 1470K, (b) 1383K, (c) 1303K, (d) 1223K [14]

増す一方であり、燃焼に加え触媒技術、各種の革新的デバイス開発、センサや制御技術を総動員した技術の結晶といてよい状態にある。実際、90年代前半と比較して自動車用内燃機関の実用燃費は、2～3割向上している。どのようにしてこれほどの進歩がもたらされたのであろうか。希薄燃焼利用と窒素酸化物吸蔵触媒の開発や、シリンダ内に直接燃料を噴射する方式に支えられた制御の多様化など、燃焼から見ると周辺技術に負うところが大きい。試験用のモード運転時に従来は使われることのなかった高温の排気再循環や、排気ガスの排出を積極的に迎えた多量の排気再循環を取り入れるなど、以前は考えられなかったようなさまざまな技術的トライがなされている。こうした動きの中に超燃焼で提案している熱物質再生という概念とのアナロジーが垣間見える。

まず自動車用ディーゼル内燃機関でその普及が進んでいるコモンレールシステムを考えてみたい。従来よりも格段に高圧（～2000 bar）に維持されたコモンレールと呼ばれるプラットホームに、1サイクル中に複数回噴射を繰り返すことのできるような、非常に高速の応答が可能な噴射弁を設置する（図10[16]）。ベースとなる機関の圧縮比を高く設定し、熱効率の高い設定をしながら先に述べたように超高圧による複数回噴射で、自着火の時期に適合するような混合気形成を図る。機関の発生する動力の一部を利用して圧縮し、これをもって自着火させる圧縮自着火方式自体が、ある意味でのエネルギー再生であるし、高圧噴射であたかも高温空気燃焼のリフト火炎のように窒素酸化物生成を抑える効果をもたせている点もまた、アナロジーがあると考えられる[17]。

また盛んに研究開発が進められている HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition) エンジンについてもその燃焼

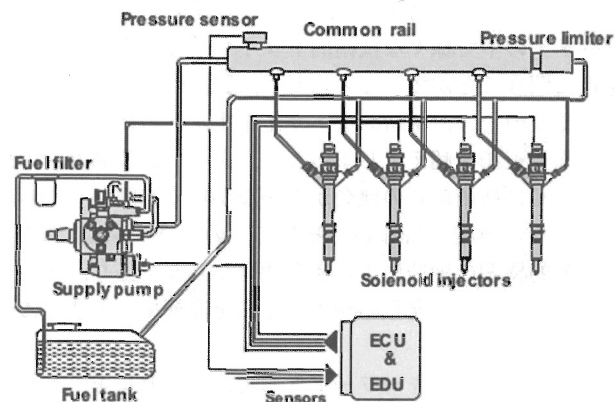


図10. コモンレールシステム. 機関低回転時から高圧での燃料噴射が可能. [16]

形態は、熱と排気ガス成分との再循環をベースにした自着火方式であり、やはり機関の発生する動力の一部を利用して着火開始に必要な条件を作り出しているとみれば、高いエクセルギー効率を有すると想像できる。また私感であるが、HCCI 機関とディーゼル機関との境界は、多様な制御や燃料供給を模索していく中で、今後さらに曖昧になっていくのではないかと考えている。

## 2.6. エクセルギー効率と燃焼研究

超燃焼について、平衡熱力学的なエクセルギー効率の観点、基礎燃焼学的な観点、また高温空気燃焼や自動車用機関などに見られる新しい技術的なトライとの類似性について記した。またこの機会にこれまでに行われてきたエクセルギーに基づく新しい燃焼法に関する文献を調べたところ、先達の非常に優れた着想に基づく提案を見出すことができた。エクセルギー再生燃焼[18]、等温膨張燃焼[19]などをキーワードとして挙げておきたい。また二酸化炭素の回収と組み合わせる酸素燃焼、媒体循環燃焼システムなど、境界分野で研究されている技術にも広く同様の思想があり、今後の研究開発のヒントとなりそうである。

## 3. おわりに

燃焼技術の革新を成し遂げることができれば、省エネルギーに果たす役割は非常に大きいと考える。このような観点で、超燃焼の定義・考え方を示し、またエクセルギーを尺度とする技術開発のメリットを、高温空気燃焼技術や自動車用内燃機関の技術開発動向を例として紹介した。またそのような開発の動向を、熱物質再生や広義のエクセルギー再生として捉え、その有効性を考察した。

なお自動車用機関を例として挙げた理由としては、自動車メーカーの技術力の高さ、その先進性は無論のことであるが、自動車という製品の大きさや性質が、技術者の様々なトライや検証を完成品まで反映しやすい好例だからであ

る。すなわち、自動車であれば単独企業の研究開発のキャパシティの中で様々な技術的トライをしたうえで完成車両を世に問うことができるのに対し、製品のスケールが重厚長大な業種では、革新的なトライをするためには単独企業の設備投資額を超えてしまったり、あるいは製品寿命の長さのために技術革新の機会がなかなか無く冒険がしづらくなることが無視し得ない。そしてそのような業種にこそ、国や公的機関の補助による研究開発が必要であり、また国家の適正な技術開発戦略が大きく力を発揮すると感じるのである。

熱物質再循環をキーワードとして、エクセルギーを尺度として燃焼過程をさらに見直していくことで、種々の業種で相当程度の省エネルギーが期待できる。基礎および応用両面でのアプローチによる、産学官関係各位による技術開発と、国および公的機関のある程度長期的視野にたったサポートが噛み合い、我が国の省エネルギー技術が発展することを切に願うものである。

## 謝辞

本稿の執筆にあたり、東京工業大学・岡崎健先生、大阪府立大学・木下進一先生に、それぞれエクセルギー再生産の原理、および燃焼におけるエクセルギー解析について有用な議論をしていただいた。また大阪大学名誉教授 香月正司先生、北海道大学 藤田修先生、慶應義塾大学 横森剛先生、東北大学大学院生 坪井陽介君には燃焼過程におけるエントロピー生成について示唆に富む議論をしていただいた。ここに記して謝意を表する。

なお本稿は、工業加熱第44巻第3号、2007年5月、p.5-14を加筆修正したものである。

## References

1. 吉田邦夫編著, エクセルギー工学, 理論と実際, 共立出版, 東京, 1999, p.113.
2. 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, p.151.
3. 岡崎健, private communication.
4. 西田耕介, 木下進一, 高城敏美, 日本機械学会論文集 (B編) 68(673)(2002) 2643.
5. 木下進一, private communication.
6. D. B. Spalding, *Proc. Roy. Soc. Lond.*, A 240 (1957) 83-100.
7. Y. Ju, K. Maruta, T. Niioka, *Applied Mechanics Review*, 54(3) (2001) 257.
8. M. Abid, et al., *Combust. Flame*, 116(1999) 348-359.
9. P. D. Ronney, *Proc. Combust. Inst.* 27 (1998) 2485-2506.
10. M. Katsuki and T. Hasegawa, *Proc. Combust. Inst.* 27 (1998) 3135-3146.
11. H. Tsuji, A. K. Gupta, T. Hasegawa, M. Katsuki, K. Kishimoto and M. Morita, *High Temperature Air Combustion: from Energy Conservation to Pollution Reduction*, CRA Press, Boca Raton, (2003).
12. B. Dally, E. Riesmeier and N. Peters, *Combust. Flame* 137 (2004) 418-431.
13. A. Cavaliere and M. D. Joannon, *Prog. Energy Combustion Sci.*, 30 (2004) 329-366.
14. Toshiro Fujimori, Yasutoku Hamano and Jun'ichi Sato, *Proc. Combust. Inst.* 28 (2000) 455-461.
15. Yosuke Tsuboi, Takeshi Yokomori, Kaoru Maruta, 2007 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE2007), Seattle, Washington, IMECE2007-43339.
16. Denso ホームページ <http://www.denso.co.jp>
17. 花村克悟, 日本燃焼学会誌, 49(147)(2007)16.
18. 越後亮三, 齋藤元浩, 吉田英生, 小林健一, 日本機械学会論文集 (B編) 65(636)(1999)2929.
19. 越後亮三, 齋藤元浩, 吉田英生, 小林健一, 土方邦夫, 日本機械学会論文集 (B編) 63(611)(1997)2531.