

エクセルギー再生燃焼

—等温膨張燃焼過程を有するガスタービンサイクルを中心に—

Exergy Regeneration Combustion—Isothermal Expansion Combustion Gas-Turbine Cycle—

越後 亮三*・吉田 英生**

Ryozo Echigo Hideo Yoshida

1. はじめに

化石燃料は現在エネルギー需要の過半を賄っており、今後数十年にわたる中・長期展望をみても最も重要なエネルギー供給源であることに変わりはない。

一方、燃焼生成物である二酸化炭素の排出が地球温暖化の主要な原因であるとするれば、技術を支える燃焼の学術の基盤が揺らぐことになる。

地球温暖化問題に対しては既におびたどしい数に昇る対策案が提出されているが、直接の原因とされている燃焼に関連する技術はごく僅かで、しかもそれらの多くは受動的な対策で、新しい燃焼法による真正面からの積極的な提案はない。主な理由は化石燃料の主成分が炭素でその生成物が二酸化炭素であるという難しさ、また多くの燃焼機器における燃焼効率は既に十分高い水準に達して改善の余地は殆どないという認識（熱力学第1法則）が背景にある。地球環境保全はもはや科学・技術の力では達成できないという「破局に対する恐怖感」を説く思潮まで現れてきているが、あながち否定できない。そのためには既成概念に捉われない抜本的な発想の転換が必要である。

化石燃料のもつエネルギーの質（エクセルギー）はもともと非常に高い。積極的に活かせば（非可逆損失を減らす—熱力学第2法則）燃料電池のように高効率の変換が可能となる。非可逆損失を減らせる燃焼方法が実現できれば燃焼を中心にエネルギー技術の革新へ発展する可能性がある。

2. 燃焼と非可逆過程

燃焼過程における熱損失を小さくすることは比較的

容易で、既に多くの燃焼器において実現している。燃焼の非可逆性は本質的なものであって、非可逆損失を減らすこと自体不可能であるかのように専門家の間でさえ考えられている向きがある。

燃焼過程をやや詳しくみると燃料と空気の混合、化学反応と発熱、熱および物質の拡散・混合過程を経て最終的には熱、化学平衡状態に到達する。これらの過程はすべて非可逆で、それに伴うエクセルギー損失は燃料の持っているエクセルギー値と燃焼後の燃焼生成物の組成と温度によって決まる。

熱エネルギーの質（エクセルギー）は温度で決まる。図-1に空気の温度に対するエクセルギー率を示す。これは、ある温度の空気塊が環境と平衡するまでになし得る最大の仕事を、カルノー因子を考慮した温度積分により求めたものである。電気エネルギーや力学エネルギーのエクセルギー率が本質的に1であるのに対し、熱エネルギーの場合は2000℃でも0.7、1000℃でも0.5程度と、質が低いことがわかる。

他の系からエネルギーの供給をせずに燃焼生成物が最終的に到達できる燃焼平衡温度（断熱火炎温度）に較べて十分高い温度の火炎をつくることは理論的には可能である。最終的な燃焼平衡温度は理論値以上に上

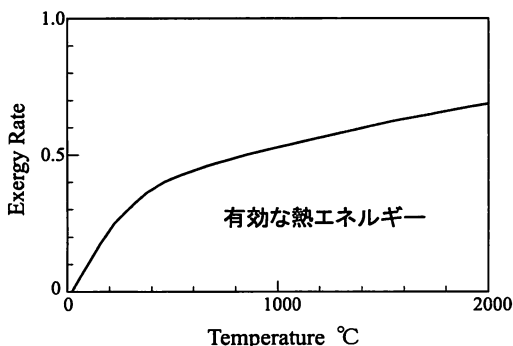


図-1 熱のエクセルギー率

* 芝浦工業大学工学部機械工学科教授

〒108-8548 東京都港区芝浦3-9-14

** 東京工業大学工学部機械科学科助教授

〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1

げられないが、燃焼過程中の火炎温度はほぼ無制限に上げられると考えても良い。同じ100Kの温度上昇のために燃料を消費するとすれば、常温から100K上げるよりも1000Kから1100Kに上昇させるために用いる方がエクセルギー的には有効である。

3. エクセルギー回収・再生燃焼の具体的方法

燃焼は燃料のもっている化学エネルギーを単に熱エネルギーに変換するだけではなく、燃料以外の化学種に改質したり、物質合成するものに加え、膨張による力学エネルギー（圧力変化、音響等も含む）あるいは熱放射により光エネルギーを発生させたり、反応帯における各種イオン（正負）、高温熱解離（電離）等のように光、電気エネルギーとも深い関わりがあり、燃焼はその過程で殆どすべての形態のエネルギーを放出しているのである（図-2）。

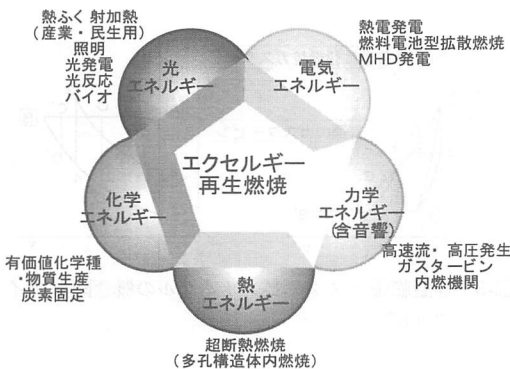


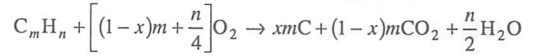
図-2 エクセルギー再生燃焼の概念図

新しい燃焼技術は上記のうち目的とするエネルギーの発現が特に顕著になるように工夫をすることである。既存の燃焼技術の中にも結果的にそれらを指向したものが少なくないが、積極的にそれを目指すものはあまり見られない。力学エネルギーへの変換は後述として、ここではエクセルギー損失を低減するという観点から高価値エネルギーを生み出す新しい燃焼技術を概観してみる。

まず「熱エネルギー」を発生させるために燃焼を用いるのが最も一般的であるが、意外にも技術的には非常に遅れている。理由は前述のように火炎温度はほぼ無制限に上げられるにもかかわらず、これを正しく理解し高温、高質の熱発生を指向した研究開発が積極的には実施されてこなかった点にある（超断熱燃焼）。

燃焼はもともとある化学種（炭化水素反応物等）を

別の化学種（中間・最終生成物）へ変換する際の「化学エネルギー」の放出過程である。化学反応は反応物→生成物になる途中の温度、圧力、発・吸熱量等の微妙な変化によって大きく変わる。高度な燃焼制御技術が確立できれば、水蒸気による改質反応、次式に示すような炭素固定化燃焼¹⁾、



物質合成、燃料電池併用型燃焼等優れたエクセルギー再生、環境調和燃焼などが可能となる。

「光エネルギー」の放出は燃焼とは切り離せない。ガス灯の照明は典型的な例である。光量は温度によって激しく変わるが燃料の違いも大きい。気体燃焼は液体、固体燃焼に較べて熱放射は小さい。輝炎燃焼によって相当大きくできるが、発熱量の高々10～20%程度である。熱放射変換体を利用すれば高効率変換が可能で、80～90%にも達するような高効率変換ができる。

「電気エネルギー」を直接発生できる燃焼方法は非常に魅力的であるが、最も難しい。超高温燃焼によるMHD発電は代表的な例である。耐熱材料の問題は依然として大きい。多孔構造をもつ熱電材料の中で予混合気を燃焼させ大きな温度差と温度勾配を創出し、電力を発生させることができる。高出力化等は今後の課題である。燃焼系から直接電気エネルギーを抽出することは夢物語であるかもしれないが、夢を現実のものとするための創意工夫あふれる挑戦的な研究も必要である。電力を生み出す燃料電池の反応の仕組みは典型的な拡散燃焼で、ヒントのひとつになるかも知れない。つまり両電極は極端な燃料過濃・希薄燃焼に該当し、電解質が拡散領域に相当する。

4. 力学エネルギー変換のための燃焼法

「力学エネルギー」を発生させる燃焼の例は爆破、破碎を目的とするダイナマイト、内燃機関、ガスタービン等において見られる。しかし熱機関における燃焼は力学エネルギーを発生させるという目標に最も適合しているか議論の余地がある。一般に燃焼は定積か定圧の条件下で行われることが多く、動力（力学エネルギー）を発生することを目的とする熱機関も例外ではない。オットー機関は定積燃焼、ディーゼル機関、ガスタービンでは定圧燃焼で、いずれも熱サイクルとしては引き続き断熱膨張で動力を抽出するために必要なエネルギーを「熱」として蓄積する手段として用いら

れる燃焼法である。

一方既報¹⁾で詳細に議論したとおり、カルノー機関における動力発生は、断熱膨張過程ではなく等温膨張過程で起こるのであって、しかも加熱量がすべて力学エネルギーに変換される。この加熱方法を燃焼で行えば内燃式カルノーサイクルとなる可能性がある。このように「等温燃焼」は新しい燃焼方法として注目すべき特徴を有している。

一般にポリトロープ指数 $n > 1$ の膨張行程では温度は低下するが、その温度低下分を丁度補うような燃焼制御ができれば等温・膨張燃焼が維持されること（結果的には $n = 1$ ）になる。なお $0 < n < 1$ の膨張行程では圧力の低下は起きるが温度は上昇するため加熱量は膨張仕事以外に内部エネルギーの上昇に費やされる。燃焼によって温度一定の状態（ $n = 1$ ）が維持できれば熱力学第1法則によって発熱量はすべて力学エネルギーに変換されることになる。すなわち定常（ガスタービン）、非定常（往復動機関）を問わず膨張過程（行程）中の状態は燃焼にとって決して特別な環境ではなく、むしろ多くの場合燃焼は動力（力学エネルギー）発生のために利用されるのであって、その動力を発生させるためには膨張機（過程）が必要となるのである。従来の熱機関では加熱と動力発生のための膨張過程を分離して考えてきたが、両者を一体化して考えれば膨張過程は燃焼にとって興味深い環境となり得るのである。

5. 等温膨張燃焼過程を含む新サイクルの提案と検討

等温膨張燃焼は古くはディーゼルが目指したとされており、また多くの熱機関における再熱サイクルは近似的に等温膨張燃焼を目標としたものである。力学エネルギーへの変換のために等温膨張加熱が実現できれば新しい熱機関への展開が期待できる。たとえば平岡等の「タービン内再熱」³⁾は近似的に等温膨張を目指したもので、さらに進めれば燃焼器と膨張機を一体化できる可能性があり、大変興味深い。また往復動内燃機関への応用については花村等⁴⁾が系統的に研究を進めており、多孔構造体の蓄熱作用によって熱力学的には低圧縮比、低温で高性能の機関が実現でき、環境調和指向としても価値が高い。

5.1 等温膨張ガスタービンサイクルの熱力学的検討²⁾

前述した等温膨張燃焼は、燃焼系から最大限機械的仕事を抽出すること、すなわち $dQ = dW$ ($dU = 0$)

の熱力学第1法則の関係を積極的に利用することを可能にする。実機において等温燃焼は、これまでのガスタービンで用いられているような燃焼器を用いず、タービンブレード内に直接燃料を噴射し燃焼させる、いわば膨張機と燃焼器の両方の性質を兼ねたタービンで行われる。また、ポリトロープ圧縮は、圧縮行程中にも補助的に燃焼させることによって高圧を発生させ、構造的にも無理のない圧縮比の範囲で高い出力密度を維持できることを述べた。この2つの燃焼方法をガスタービンサイクルに組み込むことによって、図-3に示すいろいろな意味で興味深い熱機関が考えられる。

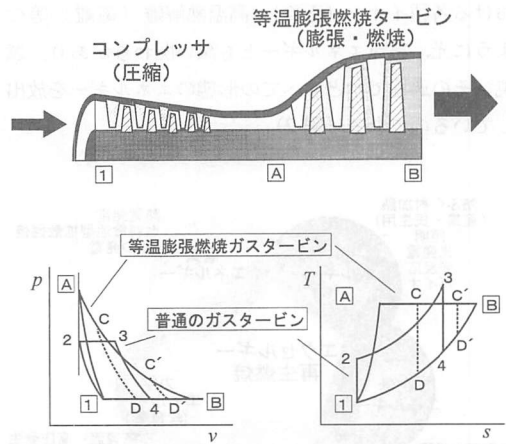


図-3 等温膨張ガスタービンサイクルの概念図とサイクル図

この新形式のガスタービン（1 [ポリトロープ圧縮] →A [等温膨張] →B [等圧排気] →1）は、ポリトロープ圧縮行程に必要な圧縮仕事は増加し、加熱も必要となるが、そのあとに続く等温膨張行程では、加熱量がすべて力学的仕事に変換されるという利点があるだけでなく、材料の耐久性やNO_x発生等に関係する最高温度 T_A としてはそれなりに低く抑えることができるといふ魅力がある。また逆に排気温度 T_B （ $= T_A$ ）としてはむしろ高くなるが、それでもかなりの高効率を実現でき、ランキンサイクルとの複合サイクルとしても好ましい。

別のオプションとしては、図中にも示すとおり最高圧力 p_A から排気圧力 p_B への膨張途中の圧力 p_C で発熱反応を停止させ、断熱膨張に移行させれば排気温度を T_b まで下げることができ、単体としての効率上昇が期待できる（1 [ポリトロープ圧縮] →A [等温膨張] →C [断熱膨張] →D [等圧排気] →1）。

等温膨張ガスタービンの解析結果の一例を図-4に示す。横軸は断熱膨張開始点圧力比 r_b 、縦軸は熱効率、図中 ε は圧縮比、 η_i はタービンの断熱効率($\eta_i=0.9$)である。タービン部をすべて等温燃焼させる場合は、 $r_b=1$ (図中○印)である。この等温膨張ガスタービンでは、等温膨張燃焼の途中で燃料の供給を停止して断熱膨張に移行することにより排ガスの温度を下げる事ができる。 r_b を大きくするという事は、断熱膨張の割合を大きくすることに相当し、ある値までは効率が改善され、図中△印で単体としての効率が最大となる。断熱効率 $\eta_i=0.9$ とした図-4では、断熱過程の割合が大きい、すなわち、 r_b が大きいほど効率の落ち込みが激しい。等温膨張ガスタービンサイクルの熱効率の値は、断熱効率を考慮した理論ガスタービンサイクルの熱効率とほぼ同レベルかそれ以上である。また、排気ガスの温度は理論ガスタービンサイクルのそれより高く(全等温膨張ならば排気温度は最高温度と等しい)複合サイクルとして用いた場合、かなりの効率改善が期待できる。

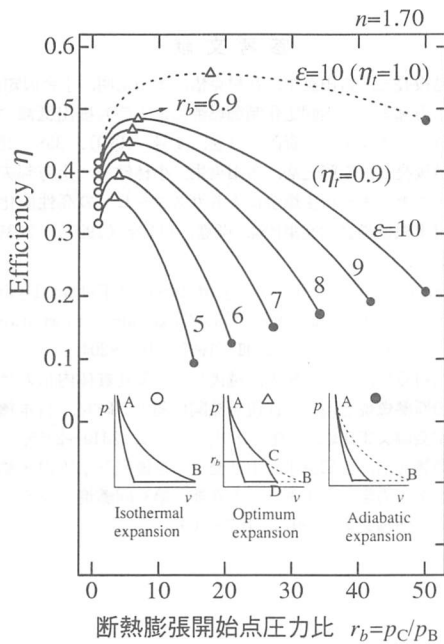


図-4 等温膨張ガスタービンサイクルの効率

5.2 反応を考慮した熱流体力学的検討⁵⁾

等温膨張燃焼を実現するために必要な諸条件を正確に把握することは今後の展開を考える上で重要である。理想的な等温状態が実現すれば、火炎面であるとか反

応帯、燃焼速度等のような従来のような火炎構造を持つ燃焼学の通念とは様相が一変する。

そこで、加熱と力学エネルギーの関係で最も基本となる一次元ノズル内定常流れにおいて、等温状態を維持するための燃焼(発熱分布)と断面積変化(膨張)等との関係について検討を加えた。等温膨張燃焼のための制御は、燃焼反応の時間スケールと流れの時間スケールとの関係により、以下の二つの場合に分けることができる。

- 燃焼反応の時間スケールが流れの時間スケールと同等であれば、流れ方向の発熱分布に対応させてノズル形状を変化させることにより、加速・膨張に伴う温度降下によって発熱による温度上昇を打ち消す。
- 燃焼反応の時間スケールが流れの時間スケールに比べて短ければ、温度上昇が瞬間的に生じてノズル形状の操作では温度制御ができない。そこで、燃料注入量を流れ方向に変化させて等温化を行う。

なお、ここでは第一段階の見積もりとして、燃料と空気の混合に要する時間は無視した。また以下では、計算条件として、流路は入口断面積が0.01 [m²]、全長を1 [m]とした。

(1) 燃焼の基本特性 等温膨張燃焼を実現するために必要な基本パラメータは、入口温度、入口流速、当量比の3つが挙げられる。まず、断面積変化が無い場合に、燃料を入口から0.1 [m] の位置で噴射した場合につき、燃焼が50%進行する位置に及ぼす入口温度・流速の影響を図-5に示す。容易に予想されるように、入口温度への依存性が指数関数的で極めて強い。そして、流速や当量比にもよるが、1400 [K] に達するような高温では、燃焼過程が速すぎるためノズル形状の変化による等温膨張燃焼の制御が難しいが、一方1200 [K] 以下では反応が遅すぎるために現実的でないこ

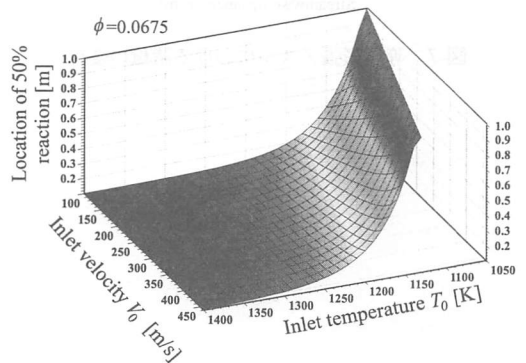


図-5 入口温度・流速と燃焼50%進行位置

とがわかる。

(2) 運動エネルギーへの変換割合 断面積変化がない場合でも、燃焼に伴う温度上昇で膨張・加速する。このとき、投入した燃料の熱エネルギーと、そのうち運動エネルギーに変換されたエネルギーとの比を図-6

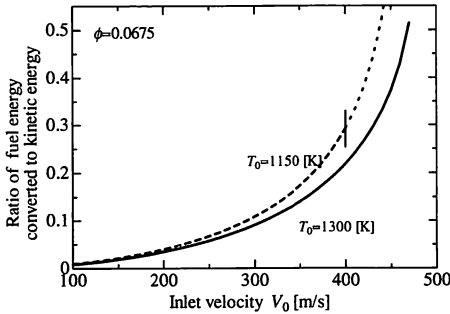


図-6 入口流速と運動エネルギーへの変換割合

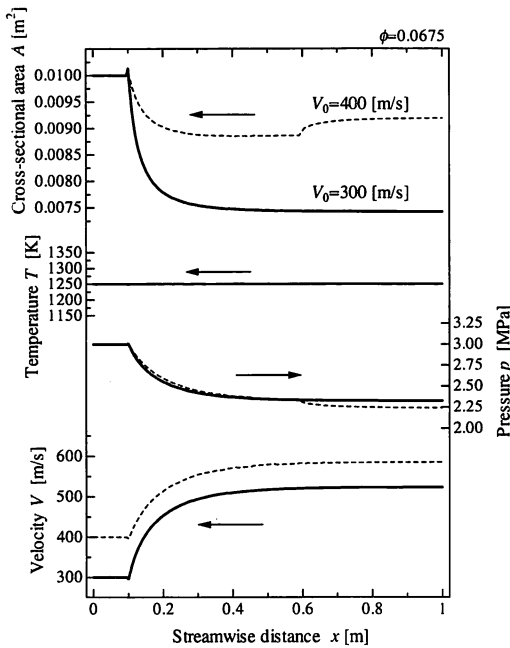


図-7 等温膨張ノズルにおける諸量の変化

に示す。入口流速が $V_0=300$ [m/s] 程度になれば、約10%程度のエネルギーが運動エネルギーに変換されていることがわかる。このような運動エネルギーへの変換は、マッハ数が1に近づくときと顕著になる。

(3) 等温膨張燃焼ノズル

ノズル断面積を未知数として、等温を保つように形状を求めた数値計算結果の一例を図-7に示す。入口温度は1250 [K]、実線は入口流速 $V_0=300$ [m/s]、破線は $V_0=400$ [m/s] の場合である。この場合、発熱量は100%運動エネルギーに変換される。

6. 結言

本研究では力学エネルギーをより効果的に獲得できるような燃焼方法として等温・膨張燃焼を提案し、その基礎となる熱力学的な問題と、1次元ノズルに関する断面積変化と流速はじめ熱力学的諸量の変化の関係を検討した。実現にあたり、燃料の混合や微妙な燃焼制御、そして理想的なノズル形状等の問題があり、より詳細な現象について、数値計算・実験の両面から幅広い研究を進めていく必要がある。

参考文献

- 1) 越後亮三, 吉田英生, 花村克悟, 奥山正明, 小沢知己, 土方邦夫; 炭素固定化制御燃焼によるCO₂排出低減の試み, エネルギー・資源, 11巻, 4号 (1990), 358~363.
- 2) 越後亮三, 齋藤元浩, 吉田英生, 小林健一, 土方邦夫; エクセルギー再生燃焼によるガスタービンの高性能化, 日本機械学会論文集B編, 63巻, 611号 (1997), 2531~2538.
- 3) Hiraoka, K., et al.; Study of Internal Reheat Hydrogen Gas Turbine, Proc. 1995 Yokohama International Gas Turbine Congress III (1995), 197~204.
- 4) 花村克悟, 宮入由紀夫, 越後亮三; 多孔質体内における超断熱燃焼を用いた往復熱機関に関する研究, 日本機械学会論文集B編, 61巻, 586号 (1995), 2349~2355.
- 5) 齋藤元浩, 吉田英生, 小林健一, 越後亮三; 等温・膨張燃焼と力学エネルギーへの変換, 第35回燃焼シンポジウム講演論文集 (1997), 167~169.