

内燃機関の エネルギー効率限界

Pragmatic Efficiency Limits
for Internal Combustion Engines



Prof. David E.
Foster

University of Wisconsin-Madison
Phil and Jean Myers Professor
Ph. D.

本稿では、炭化水素を燃料とする内燃機関において、理論上実現可能な最大効率が100%であることを裏付ける熱力学の原理について概説する。それに基づき、燃料のもつ化学エネルギーを軸仕事に変換する過程において、必然的に発生する不可逆性について焦点をあてる。エネルギー損失は、現在の内燃機関の構造上避けられないものと、先進技術の適用により低減の可能性があるものとは分類できる。内燃機関の出力が制御しきれない化学反応、すなわち燃焼によって得られるという性質上、燃料エネルギーの20%から25%にあたる潜在的仕事量の損失はどうしても避けられない。それ以外の摩擦や熱損失、排気エネルギーなどの損失は、直接軸仕事には変換されない利用可能エネルギーに相当する。「最大のエネルギー効率を得るには低い燃焼温度を維持するのが最も容易」という仮説を立証するため、燃焼温度、燃焼室内のガスの比熱比、熱伝達、排気の有効エネルギーの相互作用を示す。低温燃焼においては、熱伝達や排気のエクセルギー損失が最小になるとき、燃料の化学エネルギーが軸仕事に直接変換される量は最大となる。

This article gives an overview of the thermodynamic principles demonstrating that the maximum efficiency theoretically possible with a hydrocarbon fueled internal combustion engine is one hundred percent. From this basis the focus turns to articulating irreversibilities that naturally occur within the processes of converting the chemical energy in the fuel into shaft work. These losses are classified as losses that cannot be eliminated when using the current embodiment of internal combustion engines, and losses that in principle could be reduced through application of advanced technologies. Because power is obtained from the engine via unrestrained chemical reaction, i.e. combustion, we must accept a loss of work potential of between 20 and 25 percent of the fuel's energy. Other losses, such as friction, heat loss and exhaust energy account for the balance of the useable energy that is not converted directly into shaft work. The interplay between combustion temperature, the ratio of specific heats of the combustion chamber gases, heat transfer and exhaust availability is presented as support for a postulate that the maximum pragmatic efficiency is most readily achieved through efforts to keep combustion temperatures low, which in turn maximizes the direct conversion of the fuel's chemical energy into shaft work while minimizing the available energy lost to heat transfer and exhaust flow.

はじめに

液体炭化水素を燃料とする内燃機関は、モビリティ用途においてエネルギー変換器とエネルギー担体の非常に有効な組み合わせである。液体炭化水素はエネルギー密度と比エネルギーが高いため、燃料を車載する用途に適しており、エンジンは燃料に蓄えられたエネルギーを駆動力に変換するのに便利で効率的な発明品である。内燃機関と炭化水素燃料の組み合わせは、今後数十年にわたっ

て堅牢で経済的に成長が見込まれる動力推進システムである^[1]。

しかし、燃料源となる石油は需要が大きく、現在も世界的な開発が進められてはいるが、限られた資源である。さらに、モビリティから排出される炭素は、地球規模の気候変動に影響を与えることも懸念されている。したがって、モビリティはユーザにとっての実用性を損なわず、環境影響を最小にして、考えられる最大効率を得ることが最も

重要となる。これが今日のモビリティ社会が直面している大きな課題のひとつであると言える。

駆動システムであるパワートレインを考えると、二つの合理的な質問が生じる。一つ目は、理論上実現可能な最大効率はどれくらいで、現在のパワートレインの効率はこの最大値と比較してどうか。二つ目は、システムに工学的制約が課せられた場合の効率の実用限界はどれくらいかであるか。後者の質問は、開発に取り組む上の現実的なストレッチ目標を生み出し、モビリティの燃料消費とエミッションを低減し、かつ、期待される実用性を確保するという点において、大変重要である。

本稿の目的は、今後数十年間に送り出されるであろう内燃機関の構造、すなわち燃焼により高温高压ガスを膨張させることで仕事を引き出すピストンシリンダー機構で成し遂げられるエンジン効率の実用限界を察知することである。はじめに、内燃機関の最大理論効率について総括し、次に典型的な内燃機関で生じるエネルギー損失を特定する。これらの観点から、避けられないエネルギー損失について議論し、それ以外の損失については実用技術の範囲内でどのように最小化できるかについて述べる。

考えられる最大仕事量

内燃機関から得られる考えうる最大仕事量とはどれくらいかを問う際に、認識すべき最も重要な概念の一つは、駆動システムとして用いているエンジンが熱力学サイクルではなく、化学過程であるということだ。熱力学サイクルの場合、作動流体は循環するが、内燃機関ではこのようなことは起こらない。空気と燃料の混合物がエンジンに導入され、反応して生成物になり、膨張しそして排気される。そして次のエンジンサイクルでは別の空気燃料混合物が導入される。すなわち、作動流体は廃棄され、その流体は元の状態に戻ることはない。したがって、古典的な熱力学的な熱機関サイクル解析を用いることは、ここで扱う問いへの解答として適さない。

内燃機関の燃焼過程のような化学過程から得られる最大有効仕事量を扱う熱力学解析では、得られる最大有効仕事量が化学反応によるギブス自由エネルギーの変化量の負数となることが分かっている^[2]。

$$W_{\text{max, useful}} = -(\Delta G)_{T_0, P_0}$$

これは燃料電池から得られる最大理論有効仕事量の方程式でもあることは注目に値する。燃料電池を表す場合は、通常下式のようなになる。

$$(\Delta G)_{\text{rxn}} = -nFE$$

ここで、

- n = number of moles of electrons transferred 移動する電子のモル数
- F = Faraday's constant ファラデー定数
- E = Electrical potential difference 電位差

ギブス自由エネルギーの変化量を電気化学ポテンシャルの観点で示す場合、上記の方程式はネルンストの式と呼ばれる^[3]。

このような理想的な結果が得られると仮定したとき、エンジンがどのように見えるかを概念化することは有益である。Figure 1にその概念図を示す。Figure 1に示す理想的なエンジンの構造は、今日実際に開発中のものと類似している。しかし、ここには明白な学術的差異がある。Figure 1の概念図では、エンジンにおけるすべての現象が可逆的と仮定されている。すなわち、空気と燃料は、大気温度・大気圧でエンジンに入り、エンジンの至るところで化学反応を含む可逆過程を経て、大気条件で平衡生成物としてエンジンから排気される。これらの可逆過程は特定状態の履歴に影響するため、生成物を大気温度にするように熱伝達を引き起こす必要がある。図示するように、このような熱伝達は、大気条件で熱遮断される可逆的熱機関の至るところで生じる。この可逆的熱機関から得られる仕事量をエンジンの軸仕事量に加えて、最大仕

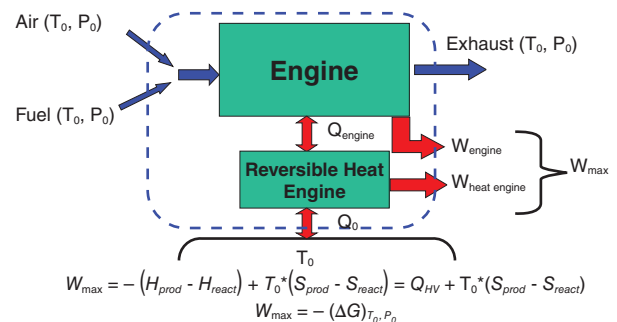


Figure 1 Conceptualization of an Engine to Achieve the Maximum Possible Work from a Charge of Air and Fuel Reacting to Products

事量を求める。

Figure 1下部に示したのは、この可逆機関で得られる仕事量を決定するためのエネルギー収支である。理論的に得られる最大仕事量が、燃料の発熱量 Q_0 を大気温度で廃棄される熱量で調整した値と等しくなることに注目すべきである。これら二項を足し合わせたものは、化学反応によるギブス自由エネルギーの変化量の負数と等しくなる。

燃料の発熱量とギブス自由エネルギーの関係

この結果における一つの巧妙さは、内燃機関または燃料電池から得られる最大理論仕事量が、燃料の発熱量とは対照的なギブス自由エネルギーの変化量で与えられていることである。種々の燃料において大気条件下で空気で酸化したときの発熱量とギブス自由エネルギーの負数を比較している表を以下に示す。

Table 1 Enthalpies and Free Energy Changes of Several Fuels when reacted with air at atmospheric conditions (adapted from Heywood⁽²⁾)

Fuel	Heating Value (MJ/kmol)	- Gibbs Free Energy (MJ/kmol)
Methane	802.3	800.6
Methanol	638.59	685.35
Propane	2044.0	2074.1
Octane	5074.6	5219.9

Table 1に示された値から二つの事象が明らかになる。一つ目は、典型的な炭化水素燃料の反応における発熱量とギブス自由エネルギーの変化量がほぼ同じ値になるということである。すなわち、内燃機関の最大理論効率は事実上100%になる。二つ目は、いくつかのギブス自由エネルギーの変化量は発熱量よりも大きくなるということである。これは、一般的にエネルギー入力と呼ばれ、燃料の発熱量よりも大きい仕事量をエンジンから引き出すことが理論的に可能であるということを示している。これは、仕事量を最大化するに当たり、燃焼生成物を大気圧まで膨張させた結果である。場合によっては、大気圧まで膨張することで、大気温度を下回ることもある。これは外部環境からエンジンに熱伝達していることを意味する。このようにして仕事量は、外部環境からエンジンへの熱伝達によってエンジンを大気温度まで戻すための補助熱機関から得られる。

エンジン内の不可逆性の特定

内燃機関から得られる最大理論仕事量を理解する上で根本的な二つの指針がある。一つ目は、すべての過程が可逆的なもの、すなわち、エネルギー損失がないものとして概念化されているということである。これは有効仕事量に変換できる燃料中の全エネルギーは、実際に有効仕事量に変換されているということの意味する。これにより、現象の背景にある二つ目の指針が分かる。つまり、エネルギーにはエクセルギーと呼ばれる性質があり、不可逆的な過程では利用可能エネルギーが利用できないエネルギーになる、すなわちエクセルギーが損なわれる。実在のエンジンの運転過程で生じているエクセルギー損失を求めることは、前述した理想のエンジンに対するエネルギー損失を定量化するために有益となる。さらに、技術開発によってこれらの損失を低減させ、ひいてはエンジンの効率を高めることができるか調査することが可能になる。損失の解析はエクセルギーの収支によってもたらされる。このような収支をFigure 2に示す。

前述の議論を内燃機関にあてはめると、燃料内の利用可能エネルギーは、反応物と生成物の間のギブス自由エネルギーの変化量と等しくなる。Figure 2のグラフは、エクセルギーの観点で表されているが、実在のエンジンでは、ギブス自由エネルギーの一部は利用できない形態に劣化してしまっている。すなわち、エクセルギーが損なわれること、または「エネルギー損失」があるということを確認した上で、メタノール燃料の単位体積当たりの熱量として示

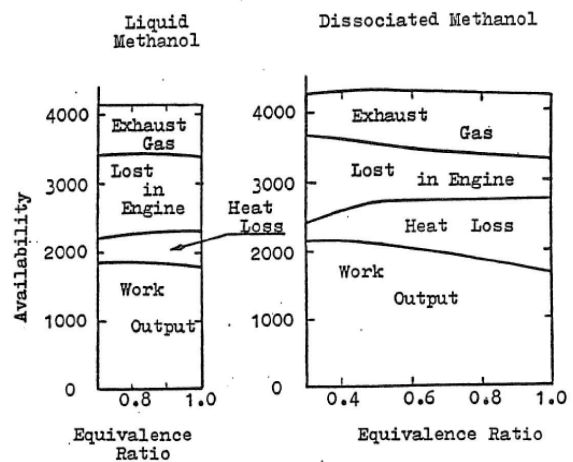


Figure 2 Availability Accounting per Mass of Fuel for Engine Operation for Different Equivalence Ratios for Methanol and Dissociated Methanol⁽⁴⁾. The units of the availability are kcal/liter of Methanol.

されている。エネルギーは保存されるが、利用可能性は損なわれてしまう。

Figure 2は、それぞれの運転条件で利用可能エネルギーに起きる各項目の積み重ねグラフである。「Work Output」は、軸仕事としてエンジンから得られるエネルギーを表している。「Heat Loss」は、軸仕事とは対照的に、熱伝達としてエンジンから去る利用可能エネルギーを表している。「Lost in Engine」は、燃焼過程における不可逆性の大きさであり、燃焼の非効率性ではない。これは燃焼が完了していても、燃焼室内で自発的な化学反応が起こることによる、利用可能エネルギーの低下である。最後に、「Exhaust Gas」は排気としてエンジンから去る利用可能エネルギーである。エンジンから逃れようとする熱伝達や排気ガスに含まれる利用可能エネルギーは、これら以外のエネルギー消費とは対極で、それらの一部は利用できる。

Figure 2ではいくつか興味深い点が見られる。一つ目に、燃焼過程に関連するかなりの不可逆性があり、このエネルギー損失は希薄条件下でエンジンを運転するとより大きくなる。この損失は、燃料の利用可能エネルギーの約20%に相当する。二つ目に、かなりの利用可能エネルギーが熱伝達や排気の中で内燃機関から失われている。そして最後に、希薄混合では、燃焼の不可逆性が増加しても、燃料の単位質量当たりのエンジンからの仕事量は増える。これは、エンジンの空燃比を徐々に希薄にして運転すると、排気や熱伝達で廃棄される利用可能エネルギーが減少するためである。この減少分は、希薄燃焼で生じる損失の増加分を上回る。

個々のエネルギー損失の詳細な解析

個々のエネルギー損失をより詳細に調査することは、実在のエンジンの効率を改善する可能性がある点で意義深い。この議論の前に、Figure 2に示す損失の解析にエンジンの摩擦は含まれていないということを指摘しておく。実際に、エンジンの摩擦低減は効率改善の重要な要素である。摩擦は、軸仕事としてエンジンから得られる仕事に含まれているが、それが転化されてしまっている。摩擦低減は直接、相関的な軸仕事の増加につながる。ここで議論では損失に関連した熱力学現象に的を絞る。

燃焼におけるエクセルギー損失

燃焼において燃料の利用可能なエネルギーの約20%が失われることは残念なことであり、改善の機会があるようにみえる。このことについては多くの議論と解析がなされてきた^[5-8]。しかし、燃焼の不可逆性は、化学反応を緩和するために、反応物と生成物の化学ポテンシャル間の勾配、親和力を許容した結果である。熱力学上、自発的な化学反応を緩和するために大きい勾配を許すと、大きいエネルギー損失が生じることが知られている。すなわち、大きい温度勾配を挟んだ熱伝達や大きな圧力勾配に伴う流体流動の不可逆性である。たとえ化学反応が定温燃焼で起こるときと同じ割合でシリンダーから仕事を引き出せたとしても、燃焼の不可逆性は低減できない^[9]。燃焼の不可逆性を低下させる唯一の方法は、化学反応が起こる温度を上昇させることである。これが、燃焼温度の低い希薄運転で燃焼のエネルギー損失が増加する理由である。内燃機関の実際の燃焼温度では、燃焼の不可逆性は20%から25%の範囲になる^[9]。

したがって、燃料の化学エネルギーを仕事に変換する過程の一環として化学反応を用いると、燃料の潜在的仕事量の約20%から25%のエネルギーが失われる。これを工学的に回避する方法はない。同様のことが、燃料電池にもそのまま当てはまる。

希薄燃焼で、燃焼の不可逆性も増加するが、燃料の単位質量当たりの仕事量も増大するという矛盾は、エンジンから排気ガスや熱伝達として得られるエクセルギーに影響を及ぼす膨張過程時のエネルギーの移動を詳しく調査することで解決できる。

シリンダーガス膨張により引き出される仕事と利用可能な排気エネルギー

シリンダー内で膨張するガスから得られる仕事は次式で求められる。

$$w = \int Pdv$$

圧力と体積の関係は以下のように表される。

$$Pv^\gamma$$

ここで、

$$w = \text{work per unit mass} \quad \text{単位質量当たりの仕事}$$

図に示すように、熱伝達の起こる温度が上昇すると、熱伝達エネルギーの大部分を仕事に変換することができる。図中に示した二本の線は、2600 Kと1900 Kのそれぞれの温度で起こる熱伝達として仕事に変換できる、熱伝達エネルギーの割合を示している。これらの温度は、ストイキ燃焼および希薄燃焼における代表的なものとして考えることができる。2600 Kにおいて熱伝達として失われる単位エネルギー当たり、1900 Kにおける熱伝達によるものよりも約3%大きくなることから分かる。すなわち、2600 Kで熱伝達として失われる単位エネルギー当たりの潜在的仕事の損失は、1900 Kで失われる熱伝達のものよりも3%大きくなることを表している。

この解析には微妙な考えが加えられている。熱伝達率は、温度差に比例し、希薄燃焼または低温燃焼によってシリンダー内の温度が下がると、熱伝達のポテンシャルも低下する。このため、シリンダー内の温度が低下すると、熱伝達の量と単位エネルギー損失当たりの潜在的仕事も低下する。

まとめ

本稿の議論を通じて、炭化水素を燃料とする内燃機関の最大理論効率を調査する目的において、原則的に燃料内のエネルギーはすべて仕事にすることが可能であることが示された。すなわち、内燃機関の最大理論効率は100%となる。

しかし、エネルギー変換過程の一環として自発的な化学反応を用いるため、燃料の利用可能エネルギーの約20%から25%が損なわれる。現在の燃焼温度範囲で駆動システムにこの化学反応を採用している限り、このエネルギー損失はどうしても避けられない。

エンジンから出る熱伝達や排気ガスに関わる潜在的仕事の損失を低減することは何とかできる。これを達成するため、燃焼に由来する γ の減少を最小にする試みは、単位膨張体積当たり引き出される仕事を最大化することに役立ち、排気として逃れる利用可能エネルギーを低減することにつながる。たとえ燃焼の不可逆性が多少大きくなっても、シリンダー内の燃焼温度をできる限り低く維持することで γ の減少を最小限にすることができる。

さらに、シリンダー内の温度を下げることは、熱伝達の損

失においても有利となる。シリンダー内の温度を下げると、熱損失の割合が小さくなるだけでなく、仕事に変換できるエネルギーも節約できる。

エンジン燃焼における研究開発の大半が、シリンダー内の温度を下げることを目指しているのは興味深い。一般に低温燃焼(LTC)と呼ばれる多くの取り組みが継続されている。LTCにおける活動の本来の動機は、窒素酸化物と粒子状物質の排出を最小限にすることであったが、副次的な効果が出現した。それは、低温燃焼過程の上手く制御することで、エンジンの効率改善という効果も同じく生み出せるということである。

最後に、内燃機関において達成できる最大エネルギー効率がどれくらいになるかについて見解を述べる。燃焼を用いているので、約20%から25%のエネルギー損失は受け入れなければならない。そのため、最大エネルギー効率の上限は75%から80%になる。それに基づき、内燃機関から廃棄される熱エネルギーと排気エネルギーをどの程度効率的に制御できるかという質問が生じる。これらのエネルギー損失を完全になくすことはできないが、これらのエネルギー損失の低減は着々と進行している。大型で低速のRPMディーゼルエンジンでは50%を超えるエンジン効率が達成されている。米エネルギー省のFuture Truck Programでは、55%の効率を達成するための技術の方針を打ち出し、Heavy Dutyトラックのエンジンで50%の正味熱効率を実証するためのプログラムを支援している。また、最近の米エネルギー省のワークショップでは60%のストレッチ目標が究極の実用限界であると示唆している^[8]。

参考文献

- [1] *Real Prospects for Energy Efficiency in the United States*, report by the National Academy of Sciences, Washington, D.C., 2009.
- [2] Heywood, J.B., *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw Hill, Inc., 1988, ISBN 0-07-028637-X
- [3] O'Hayre, R.P., Cha, S-W, Colella, W.G, Prinz, F.B., *Fuel Cell Fundamentals*, John Wiley and Sons, Inc. 2009, ISBN978-0-470-25843-9
- [4] Edo, T., and Foster, D.E., *VI International Symposium on Alcohol Fuels Technology*, Ottawa Canada, 1984
- [5] C. D. Rakopoulos and E. G. Giakoumis, "Second-law analysis applied to internal combustion engine operation," *Progress in Energy and Combustion Science*, 32, 2-47(2006).
- [6] N. Lior and G. J. Rudy, "Second-Law Analysis of an Ideal Otto Cycle," *Energy Conversion and Management*, 28(4), 327-334 (1988).
- [7] R. J. Primus, K. L. Hoag, P. F. Flynn, and M. C. Brands, Appraisal of Advanced Engine Concepts Using Second Law Analysis Techniques, SAE 840032
- [8] C. S. Daw, R. L. Graves, R. M. Wagner, and J. A. Caton, *Report on the Transportation Combustion Engine Efficiency Colloquium Held at USCAR*, March 3-4, 2010, ORNL/TM-2010/265
- [9] Druecke, B.C., Foster, D.E., Klein S.A., Daw, C.S., Chakravarthy, V.K., and Graves, "Second Law Analysis of Constant Temperature Combustion", Central States Section Combustion Institute, Chicago, IL, March 2006, also MSME University of Wisconsin-Madison 2006



翻訳

西川 雅浩

Masahiro NISHIKAWA

株式会社 堀場製作所
経営戦略本部
自動車計測事業戦略室