



2016年10月31日

報道関係者各位

慶應義塾大学

一般の熱エンジンの効率とスピードに関する原理的境界の発見

慶應義塾大学工学部の齊藤圭司准教授と、東京大学大学院総合文化研究科博士課程3年の白石直人、学習院大学理学部の田崎清明教授の研究グループは、二百年以上の歴史を持つ熱力学の分野で、「何ができないか」を示す新たな原理的境界を発見しました。一般的な（外部熱源を用いる）熱エンジンについて、「効率を高くしようとすると不可避免的に時間当たりの出力が小さくなってしまう」ことを、定量的で厳密なトレードオフの関係を新たに証明することで、理論的に明らかにしたのです。導出には最新の非平衡統計物理学の知見が活かされています。今回の研究結果は純粋に理論的な成果であり、考えるほぼ全ての熱エンジンにあてはまります。今後、省エネルギーや環境への負荷の軽減を考慮した「環境配慮型エンジン」の性能評価の基準や開発指針として応用されることが期待されます。

本研究成果は2016年10月31日〔現地時間〕に米国物理学会誌「Physical Review Letters」のオンライン版で公開されます。

1. 本研究のポイント

非平衡統計物理学の最新の知見を用い、一般的な（外部熱源を用いる）熱エンジン（注1）の効率とスピードに関する新たな原理的境界を発見。「カルノー効率を達成し有限のスピードで動作する熱エンジンは可能か？」という古くからの論争を否定的に解決した。

2. 研究背景

科学の世界では、ときに「何ができないか」を明確に示すことが大きな発展につながります。たとえば、「光より速く情報を伝えることはできない」という原理はアインシュタインの相対性理論の基盤になりました。

熱力学は、化学、工学、気象など幅広い分野の基礎になっている物理学の体系ですが、「熱力学第一法則：何もないところからエネルギーを生み出すことはできない」（注2）と「熱力学第二法則：熱のエネルギーをすべて利用可能なエネルギーに変えることはできない」（注3）という二つの「何ができないか」についての原理を基盤にして作られています。今回の発見により、「何ができないか」についての新しい原理が熱力学の分野に付け加えられたのです。

ここでは、高温の物体から受け取った熱を物体の運動や電気のような「使えるエネルギー」に変える装置を「熱エンジン」と呼びます（図1）。例えば蒸気機関や汽力方式の火力発電はこれに当たります。性能の高い熱エンジンを設計し実用化することはわれわれの文明にとって本質的に重要な課題です。

上で述べた熱力学第二法則を熱エンジンに適用すると、「どんな熱エンジンであっても、高温の物体から受け取った熱の一部は利用できず、低温の物体（たとえば周囲の空気や海水）に捨てなくてはならない」ことが導かれます。捨てられずに残った熱だけが（たとえば電気として）利用できるのです。「高温の物体から受け取った熱エネルギーのうちのどれだけを利用できたか」という比率を「効

率」といいます。エンジンの効率が低いほど「エネルギーの無駄」が少なく望ましいのですが、原理的に超えられない「カルノー効率」（注4）という効率の上限があることがわかっています。

一方、実際に発電装置を使うことを考えると、効率だけでなく「何ワットの電力が発電できるか」あるいは「時間当たりどれだけのエネルギーを出力できるか」という「仕事率」が問題になります。いくら効率が高くても仕事率が小さければ優れた熱エンジンと言えないのは明らかでしょう。

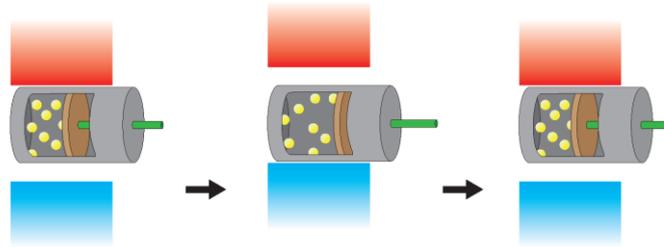


図1：一般的な熱エンジンのイメージ。高温（赤・上側）の熱源から熱を受け取り、低温（青・下側）の熱源に放出し、それらの差を使えるエネルギーとして取り出す。従来の熱力学の枠組みではエンジンの動作時間を取り扱えないため、時間当たりの出力（仕事率）についての解析は進んでいなかった。なお、ガソリンエンジンやガスタービンのような内燃機関はここでは熱エンジンには含めない。

3. 研究内容・成果

今回、本研究グループは、一般的な熱エンジンについて、効率を高めようとする仕事率が不可避免的に小さくなってしまふことを示す原理的な関係式を導出しました（図2）。この関係式から、エンジンの効率を上限値であるカルノー効率まで高めるには、エンジンの動作速度を無限に遅くしてどれほど待っても利用可能なエネルギーがほとんど得られない状況（発電装置なら出力はゼロワット）にせざるを得ないことも結論されます。

今回の結果は、「エネルギーを無駄なく利用したい」という要望と、「短い時間で多くのエネルギーを得たい」という要望とが両立しないことを示しています（図3）。このような「あちらを立てればこちらが立たず」の関係は「トレードオフの関係」と呼ばれます。

エンジンの出力と効率向上の間にトレードオフの関係があるだろうということは古くから推測されてきました。特に、カルノー効率が達成されれば仕事率もゼロになることは多くの人が漠然と予想していたことです。しかし、従来の熱力学には動作時間という概念が組み込まれていないため、時間当たりの出力（仕事率）を解析することができず、決定的な答えは長らく得られていませんでした。実際、カルノー効率を達成しつつも有限の仕事率をもつ「夢のエンジン」の可能性を模索する論文は、特に近年になって多く出版されていました。

これに対し本研究グループは、一般的な熱エンジンを古典力学とマルコフ過程（注5）でモデル化し、近年急速に発展した「ゆらぎ系についての非平衡統計物理学」（注6）において考案された手法を拡張することで、広範な熱エンジンに適用できる普遍的な関係式を導出したのです。こうして、少なくとも古典力学で記述できる熱エンジンに限れば、長い論争に終止符が打たれることとなります。今回の結果は、従来の熱エンジンすべてに適用可能であり、さらに生体内の分子モーターのような微小な「機械」さえも理論の適用範囲に入っています。本研究グループは、このような熱エンジンについて、効率と仕事率の間に成り立つトレードオフの関係を厳密な不等式として証明しました。

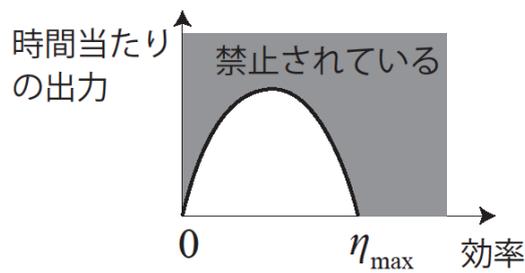


図 2：今回の研究で明らかになった「何ができないか」の限界を示すグラフ。横軸は熱エンジンの効率で、その原理的な最大値がカルノー効率 η_{\max} である。縦軸はエンジンの時間当たりの出力（仕事率）を表わす。グレーの領域に相当する効率と仕事率の組み合わせが原理的に禁止されていることが今回の研究によって確立した。物理的に実現可能なエンジンはすべて曲線の下側の白い領域に入る。

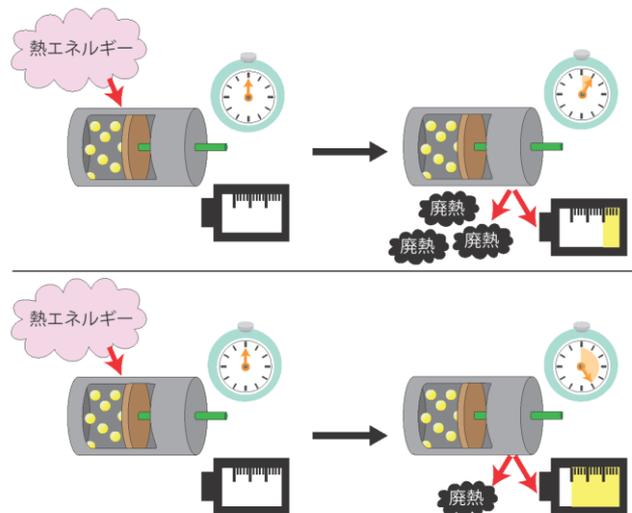


図 3：効率と時間当たりの出力（仕事率）のトレードオフが生じている状況の概念図。同じ量の熱エネルギーを用いても、上図のように素早く操作を行うと、時間当たりの出力は大きくなるが、廃熱が多く効率は下がってしまう。一方、下図のようにゆっくり操作を行うと、時間当たりの出力は小さいが、廃熱は少なく高効率にできる。

4. 今後の展開

「何ができないか」を知ることは新しい理論体系を生み出すための出発点になりえます。本研究グループの理論は、ほぼすべての熱エンジンの限界を定めるだけでなく、出力の限界がどのようにして定まるのかも明らかにしています。これは、熱エンジンの深い理解に資するのみならず、まったく新しいタイプの熱エンジンを探索する上で重要なヒントになると期待されます。

環境・エネルギー問題が重要となっている今日、単に素早くたくさん仕事をするだけでなく、資源を有効活用する熱エンジンの意義はますます増えています。本研究グループが明らかにした効率と仕事率の間の原理限界は、省エネルギー時代の熱エンジンの性能評価の基準や開発指針として役立つことが期待されます。

<原論文情報>

雑誌名：Physical Review Letters

論文タイトル：Universal Trade-Off Relation between Power and Efficiency for Heat Engines

著者：Naoto Shiraishi, Keiji Saito, and Hal Tasaki

<用語説明>

(注1) 熱エンジン：高温の物体から熱を受け取り、低温の物体に熱を放出し、二つの熱エネルギーの差を、使えるエネルギー（たとえば電気）として取り出す装置の総称。ここでは、ガソリンエンジンやガスタービンなどの内燃機関は熱エンジンには含めない。

(注2) 熱力学第一法則：エネルギー保存則とも呼ばれる。エネルギーは、その形態を運動、電気、熱など様々に変化したとしても、その総量は変わらないことをいう。

(注3) 熱力学第二法則：「単一の温度の環境から熱エネルギーを取り出して、(他の物体と熱のやり取りをせず) 利用可能なエネルギーに変換するような装置（第二種永久機関）」が存在しないという法則。

(注4) カルノー効率：熱力学第二法則を熱エンジンに適用すると、高温の物体から受け取った熱エネルギーのすべてを利用可能なエネルギーには変換できないことが示される。この効率（熱エネルギーを利用可能な形に変換できた割合）の上限値は、「 $1 - (\text{低温物体の絶対温度} / \text{高温物体の絶対温度})$ 」という非常にシンプルな式で与えられる。この上限値を「カルノー効率」と呼ぶ。

(注5) マルコフ過程：エンジンの状態が次の瞬間にどう変化するかが、エンジンの現在の状態のみによって決まり、それ以前にどのような状態であったかの影響を受けないような時間変化のルールのこと。この設定では、高温や低温の物体の内部ではロスが発生せず、ロスがエンジンの内部でのみ発生するので、エンジン内部について計算したロスの大きさが、そのまま全体のロスの大きさになる。

(注6) ゆらぐ系における非平衡統計物理学：従来の熱力学や非平衡統計力学は、容器の中の気体や電気を流した金属など、主に大きなスケールの物体を扱ってきた。これに対し、生物の体の中にあるナノスケールの分子モーターなど、激しい熱ゆらぎを受ける微小なスケールの物体を扱う非平衡統計物理学の概念と手法が、この二十年ほどで急速に発達してきている。

※ご取材の際には、事前に下記までご一報くださいますようお願い申し上げます。

※本リリースは文部科学記者会、科学記者会、各社科学部等に送信させていただいております。

・研究内容についてのお問い合わせ先

慶應義塾大学 理工学部 物理学科 准教授 齊藤圭司（さいとうけいじ）

TEL：045-566-1652 FAX：045-566-1672 E-mail：saitoh@rk.phys.keio.ac.jp

・本リリースの配信元

慶應義塾広報室（竹内）

TEL：03-5427-1541 FAX：03-5441-7640

Email：m-koho@adst.keio.ac.jp <http://www.keio.ac.jp/>