

熱機関のパワーと効率の間の普遍的なトレードオフ関係

東京大学 総合文化研究科 白石直人

熱機関を特徴づける量として、効率とパワー（仕事率）の二つがある。両者の関係として、この二つは相補的である、すなわち効率を上げるとその分パワーが下がる、と広く予想されている。しかし両者の関係を一般的な形で示すことは難しく、それどころか「有限パワーの熱機関はカルノー効率に達成可能か」という、一見すると非常に簡単そうに見える問題すら、未解決問題として残されている。実際、熱力学や線形非平衡熱力学といった確立された一般的な枠組を用いても、線形領域においてさえ「有限パワーかつカルノー効率の熱機関」の可能性を排除することは出来ないことが知られている[1]。この「有限パワーの熱機関はカルノー効率に達成可能か」という問題は特に近年活発に研究がされている[2-5]が、そのほとんどはモデル依存的かつ線形領域に限定された結果で一般的な禁止定理は得られておらず、まして効率とパワーの一般的な関係はほとんど分かっていない状況にあった。

これに対し我々は、近年発展した「小さい系の熱力学」の手法を用いることで、マルコフ過程で記述可能な任意の熱機関に対して適用可能な、パワーと効率の間の普遍的なトレードオフ不等式の導出に成功した[6]。この不等式は、時間反転対称性のような特別な対称性は一切仮定せず、また激しい非平衡状態・非線形領域においても適用可能な、極めて一般的なものである。さらに、この不等式は熱力学極限においても有意味な結果を与えるものであり、これは小さい形の熱力学がマクロな系に非自明な予言を与えた重要な例と言える。この不等式は「効率を上げるとパワーが下がる」という素朴な予想を再現するものであり、またそのコロラリーとして「有限パワーかつカルノー効率の熱機関は存在しない」という禁止定理が得られる。

本講演では、まず小さい形の熱力学の手法を簡単に解説した後に、最も重要な関係式である「エントロピー生成と熱流の間の不等式」を導く。これは、熱浴とエンジンとの間でエネルギーを素早くやり取りしようとする、その分散逸が生じる、という物理的意味を持っている。この不等式を用いることで、パワーと効率の間のトレードオフ不等式を導く。時間があれば、上記とは全く異なる、リーブ・ロビンソン限界を用いたアプローチによって、非マルコフ的な熱機関に対しても操作速度と効率のトレードオフ不等式の導出に最近成功した[7]ので、それについても簡単に解説する。

[1] G. Benenti, K. Saito, and G. Casati, Phys. Rev. Lett. **106**, 230602 (2011).

[2] K. Sekimoto and S.-i. Sasa, J. Phys. Soc. Jpn. **66**, 3326 (1997).

[3] K. Brandner, K. Saito, and U. Seifert, Phys. Rev. Lett. **110**, 070603 (2013).

[4] K. Proesmans and C. Van den Broeck, Phys. Rev. Lett. **115**, 090601 (2015).

[5] K. Yamamoto, *et.al.*, Phys. Rev. B **94**, 121402 (2016).

[6] N. Shiraishi, K. Saito, and H. Tasaki, Phys. Rev. Lett. **117**, 190601 (2016).

[7] N. Shiraishi and H. Tajima, arXiv:1701.01914 (2017).