

令和 6 年 5 月 26 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K03651

研究課題名（和文）力学系と線形応答理論に基づく低温度差スターリングエンジン技術の新機軸の提案

研究課題名（英文）Proposal for innovative low-temperature-differential Stirling engine technology based on dynamical systems and linear response theory

研究代表者

泉田 勇輝 (Izumida, Yuki)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・講師

研究者番号：70648815

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、非線形動力学と線形応答理論を用いて低温度差スターリングエンジンの物理学を発展させた。特に、エンジンの熱力学振り子モデルから予測されたわずかな温度差から自律的な運動が生じる分岐メカニズムを実験的に実証した。また、線形応答理論によってエンジンの最大熱効率と最大仕事率時の熱効率を定式化し、これらを特徴づける性能指数を決定した。これらの成果は低温度差スターリングエンジンの理解と技術に貢献すると期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

低温度差スターリングエンジンはわずかな温度差から仕事を取り出す自律熱機関であり、持続可能社会に貢献する可能性を秘めた熱技術として知られる。本研究では特に、低温度差スターリングエンジンの運動メカニズムを力学系の解の分岐現象として予測した先行研究の結果を実験的に実証した。また最大熱効率・最大仕事率時の熱効率を定式化し、エンジンの機能とその原理的境界を定量化した。原理的・応用的な可能性を持つこれらの成果は、今後の低温度差スターリングエンジン技術に資する学術的・社会的意義を持つものであると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this research, the physics of low-temperature-differential Stirling engines was developed based on nonlinear dynamics and linear response theory. In particular, a bifurcation mechanism underlying the onset of autonomous motion from a small temperature difference, which was predicted by a thermodynamic pendulum model of the engine, was verified experimentally. Moreover, the maximum thermal efficiency and the thermal efficiency at maximum power were formulated and the figure of merit that characterizes them was determined. These achievements are expected to contribute to the understanding and technology of the low-temperature-differential Stirling engines.

研究分野：非線形非平衡系の物理学

キーワード：低温度差スターリングエンジン 力学系 線形応答理論 分岐現象 熱効率 仕事率 非平衡熱力学 0 nsager係数

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

低温度差スターリングエンジンは人の体温と室温程度のわずかな温度差を回転運動に変換するエンジンとして知られており、1980年代に提案されて以来、持続可能社会のための新しいエネルギーテクノロジーとして注目を集めてきた。技術的な改良とともに、エンジンが稼働できる温度差が小さくなった一方で、小さな温度差から回転運動が生じるメカニズム自体は非線形力学系と熱力学の絡む興味深い課題であった。

低温度差スターリングエンジンにはいくつかのタイプが存在するが、中でも運動論型(キネマチックタイプ)は代表的なものとして知られる。近年、運動論型低温度差スターリングエンジンのダイナミクスを記述するシンプルな力学系モデル(熱力学振り子モデル)が提案された(Izumida, EPL2018)。本モデルは、たった一変数のニュートンの運動方程式でエンジンのダイナミクスを記述しており、わずかな温度差から回転運動が生じるメカニズムを研究するための理想的なモデルである。一方で、このモデルによって予測された分岐シナリオの妥当性は実験的に検証されておらず、また熱効率の最大値の決定のような原理的な問題も未解決であった。

### 2. 研究の目的

本研究では低温度差スターリングエンジンの熱力学振り子モデルから予測される温度差による自律的な回転運動の形成メカニズムを検証する。特に、熱力学振り子モデルはエンジンの回転運動を、温度差を分岐パラメータとする力学系の解の分岐現象として記述する。この分岐の種類と分岐点の値の予測までを含め検証し、より低温度差で動作するための条件を明らかにする。

また、非平衡熱力学、特に線形応答理論に基づいて、エンジンの機能を定量化するための熱効率や仕事率(単位時間あたりの仕事、パワー)などを定式化し、その最大値を求めることで、原理的な側面も明らかにする。主にこれらを達成することで低温度差スターリングエンジンの物理学の基礎的な理解と制御技術を確立することが本研究の目的である。

### 3. 研究の方法

回転運動の分岐シナリオの検証については、共同研究者とともに実際の運動論型のエンジンである英国 Kontax 社の N92 型低温度差スターリングエンジンを用いて実験的な検証を行った。

エンジンの熱効率の定式化には非平衡熱力学の標準的な理論を拡張する必要がある。低温度差スターリングエンジンの回転運動を駆動する熱力学的力は温度差および負荷トルクであり、これらに共役な熱力学的流れはそれぞれ熱流と角速度である。これら熱力学的流れと力の間には一般には線形関係はないが、分岐点から十分離れた領域(準線形応答領域)では近似的に線形関係が成立する。この領域では、標準的な線形応答理論、特に Onsager 関係式に準じた関係式を定式化できる。これを用いて、熱力学的力で最大化することで最大熱効率・最大仕事率時の熱効率を定式化した。

### 4. 研究成果

得られた主な成果について以下に挙げる。

(1)低温度差スターリングエンジンの温度差と負荷トルク(熱力学的力)と熱流・角速度(熱力学的流れ)の間の準線形応答領域における線形関係式の導出

一般にエンジンの回転運動が形成される分岐点近傍での熱力学的力と流れの関係は線形ではなく、この領域での熱効率などの定式化は困難である。そこで十分に分岐点から離れた領域に注目すると、近似的に線形関係が成立する領域(準線形応答領域)が存在し、この領域での線形関係式の導出を行う。

熱力学振り子モデルはエンジンのクランクの運動方程式および気体温度の時間発展方程式の連立系(3次元力学系)から、温度のダイナミクスを断熱消去することで得られる(Izumida, EPL2018)。この3次元力学系に戻り、外部駆動力がない平衡状態近傍の熱力学変数の平衡状態への緩和ダイナミクスから、緩和時の流れと力の間での線形応答係数である Onsager の運動論的係数を同定した。この運動論的係数は時間反転対称性を反映した Onsager 対称性を示す。外部駆動力下の回転状態では、これら Onsager の運動論的係数を含む因子を周期積分した量が、準線形応答領域における線形応答係数となることを示した。Onsager の運動論的係数の対称性を反映し、この線形応答係数も対称性を持つ。

本成果は原著論文として出版されている(Izumida, PRE2020)。

## (2)(1)に基づく低温度差スターリングエンジンの最大熱効率・最大仕事率時の熱効率の定式化

準線形応答領域で成立する線形関係式を用いて、低温度差スターリングエンジンの最大熱効率・最大仕事率時の熱効率を定式化し、両者とも性能指数を表すパラメータとカルノー効率のみに依存する形で表されることを示した。この性能指数は、エンジンを特徴づける3つのパラメータである(無次元)圧縮比、熱伝導度、摩擦係数の組み合わせからなる。これらのパラメータの適切な極限を取ることで、最大熱効率についてはカルノー効率の18パーセント程度、最大仕事率時の熱効率については線形応答領域において最大仕事率時の熱効率の上限として知られるCurzon-Ahborn効率の1/3、が上限であることを示した。本成果は原著論文として出版されている(Izumida,PRE2020)。

## (3)N92型低温度差スターリングエンジン(Kontax社)のホモクリニック分岐シナリオの実験的検証

熱力学振り子モデル(Izumida,EPL2018)の予測では低温度差スターリングエンジンは温度差を分岐パラメータとしたホモクリニック分岐によって、回転運動が生じる。英国Kontax社の運動論型低温度差スターリングエンジンであるN92型を用いて温度差を変えながら角速度を実験的に測定した。また、圧力センサーを使って回転運動している際の気体圧力も測定し、圧力-体積(p-V)図も構成した。その結果、回転運動が消失する際の振る舞いにホモクリニック分岐の特徴が見られることが観測された。

得られた分岐図と、理論から予測される分岐図を比較するために、理論に含まれるパラメータをフィッティングによって確定した。一度フィッティングパラメータを変更した後は、外部負荷(摩擦を与えるパフ)を変更したときの分岐点のずれ含め、実験と理論の一致は良いことが確認された。

さらに興味深いことに、回転運動以外にも、振動運動やカオスのような複雑な非周期的な運動モードも観測された。生まれた振動解が周期倍分岐していくような様子も観測されているが、カオスの形成シナリオ含め、まだ未解明な部分が多い。特に振動モードが生じる温度差では理論ではこうした振動が再現できていないため、さらに作り込んだ理論が必要であると思われる。これについては今後の課題である。

本成果は原著論文として出版されている(Toyabe and Izumida,PRR2020)。

## (4)非自律熱機関における階層的なOnsager係数の導出

一般的なガウシアン型の非自律的な確率的熱機関に対して、局所的なOnsager係数と大域的なOnsager係数の階層関係を定式化した。このような階層関係は低温度差スターリングエンジンでも見られたものである(1参照)。本成果は原著論文として出版されている(Izumida,PRE2021)。

## (5)熱源の温度が連続的に変化する場合の熱機関の不可逆熱効率の定式化

熱源の温度が非一様で連続的に変化する場合、熱機関の最大熱効率は熱源の最大の温度と最小の温度で決まるカルノー効率で上限が与えられることが知られている。この公式を一般化し、十分ゆっくりと、しかし有限な周期で熱機関を動作させた際の不可逆熱効率の公式を与えた。この公式から、周期を固定したときの熱効率の上限が、熱力学的長さと呼ばれる幾何学量によって求まることも明らかになった。低温度差スターリングエンジンの熱力学振り子モデル(Izumida,EPL2018)のように連続的に熱源の温度が変化するモデリングにも応用できる可能性がある。本成果は原著論文として出版されている(Izumida,PRR2022)。

## (6)非準静的応答係数と熱力学的長さ・散逸の関係

一般のマクロな熱力学系を有限時間で操作した際の非準静的応答係数と熱力学的長さの関係を定式化した。これは非自律的な操作の下での理論であるが、低温度差スターリングエンジン含むより一般の自律熱機関の理論を考える際の手がかりにもなると考えられる。

本成果は原著論文として出版されている(Izumida,JPC2023)。

## (7)結合された低温度差スターリングエンジンの同期の研究

二つの低温度差スターリングエンジンを結合した際の熱効率・仕事率に対する効果を数値的・解析的に研究した。結合強度を変えて同期させると、熱効率と仕事率ともに最大化することが明らかとなった。これは結合の効果によって相対運動が抑えられることに起因する。また、二つのエンジンの有効振動数差は結合強度の変化に対して、順方向と逆方向の振る舞いが異なるヒステリシス現象を示すことが見出された。また熱効率にも同様なヒステリシス現象が現れることを示した。本成果は原著論文として出版されている(Yin, Kori, and Izumida,PRR2023)。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Izumida Yuki	4. 巻 4
2. 論文標題 Irreversible efficiency and Carnot theorem for heat engines operating with multiple heat baths in linear response regime	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 23217
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevResearch.4.023217	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Izumida Yuki	4. 巻 103
2. 論文標題 Hierarchical Onsager symmetries in adiabatically driven linear irreversible heat engines	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 L050101
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevE.103.L050101	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Izumida Yuki	4. 巻 102
2. 論文標題 Quasilinear irreversible thermodynamics of a low-temperature-differential kinematic Stirling heat engine	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 12142
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevE.102.012142	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Toyabe Shoichi, Izumida Yuki	4. 巻 2
2. 論文標題 Experimental characterization of autonomous heat engine based on minimal dynamical-system model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 33146
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevResearch.2.033146	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 泉田勇輝	4. 巻 75
2. 論文標題 低温度差スターリングエンジンの力学系モデリング---自律非平衡熱機関の物理学に向けて	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本物理学会誌	6. 最初と最後の頁 No. 6, 324-328
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Izumida Yuki	4. 巻 7
2. 論文標題 Non-quasistatic response coefficients and dissipated availability for macroscopic thermodynamic systems	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Physics Communications	6. 最初と最後の頁 125002 ~ 125002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/2399-6528/ad1597	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yin Songhao, Kori Hiroshi, Izumida Yuki	4. 巻 5
2. 論文標題 Synchronization approach to achieving maximum power and thermal efficiency for weakly coupled low-temperature-differential Stirling engines	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 43268
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.5.043268	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 尹松豪、郡宏、泉田勇輝
2. 発表標題 弱結合された低温度差スターリングエンジンの最大熱効率の実現：同期によるアプローチ
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 泉田勇輝
2. 発表標題 低温度差スターリングエンジンの力学系モデルに基づく回転メカニズムの解析
3. 学会等名 日本機械学会 第23回スターリングサイクルシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 泉田勇輝
2. 発表標題 低温度差スターリングエンジンの角速度と熱流の間に成立する対称性関係
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Songhao Yin, Hiroshi Kori, and Yuki Izumida
2. 発表標題 Synchronization approach to achieving maximum power and thermal efficiency for weakly-coupled low-temperature-differential Stirling engines
3. 学会等名 StatPhys28 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yuki Izumida
2. 発表標題 Dissipated availability for macroscopic thermodynamic systems in an entropy representation
3. 学会等名 StatPhys28 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 泉田勇輝
2. 発表標題 セミマクロ熱力学系における非準静的応答係数と熱力学的長さ
3. 学会等名 日本物理学会第78回年次大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------