

2025 年 7 月 17 日

報道機関 各位

国立大学法人東北大学

**天然ゴムで 200℃未満の廃熱から
高い動力エネルギーを得ることに成功**
— 低温廃熱を電気エネルギーに変換する環境発電に期待 —

【発表のポイント】

- 天然ゴムの特性を生かした新たな熱—動力変換機構を提案し、その性能を実験的に評価しました。
- 工場廃熱などの低エネルギーとゴムが有する弾性熱量効果^(注1)を利用することで、ゴムから形状記憶合金等に匹敵する十分な機械的仕事が得られることを明らかにしました。
- 提案した熱—動力変換機構は安価な天然ゴムを利用していることから、出力向上が容易に可能であり、廃熱を電気エネルギーに変換する環境発電^(注2)への利用が期待できます。

【概要】

200℃以上高温排熱は発電・蒸気等での利用が推進されています。一方、80℃～200℃低温排熱は大部分が大気中に排気されています。そこで工場等から排出される 200℃未満の廃熱を再利用する気運が高まっています。

フランス国立応用科学院リヨン校（INSA Lyon）とフランス国立科学研究センター（CNRS）の Gaël Sebald 教授と Gildas Coativy 研究員、東北大学流体科学研究所の Giulia Lombardi 研究員（日本学術振興会外国人特別研究員）、小宮敦樹教授らの研究グループは、天然ゴムなどの弾性熱量効果に着目し、わずかな温度差から効率的に動力エネルギーを得ることに成功しました。さらに提案した再生型の熱—動力変換機構の性能の向上についても検討を行い、熱駆動アクチュエータとしての評価を行いました。

その結果、1 サイクルあたり 3.2J の正味出力エネルギーが測定され、120mW 相当の出力となることを確認しました。今回提案したエネルギー変換機構を大型化することで、熱から動力エネルギーを経由した電気エネルギーへの変換も可能であり、新たな熱電変換技術の実現が期待されます。

本研究成果は、2025 年 7 月 7 日にエネルギー分野に関する科学誌 Joule にオンライン掲載されました。

【詳細な説明】

研究の背景

人類がその社会生活水準を維持するためのエネルギー消費は産業革命以降増加の一途をたどっており、我々は様々な方法を使って膨大なエネルギーを電気エネルギーとして得ています。この社会活動により地球温暖化や土壌汚染問題といった環境問題が生じることになり、人類はエネルギーの利用方法について再考する転換期に差し掛かっていると言えます。

社会活動で使われるあらゆるエネルギーは最終的には「熱」に変わり、大気に廃熱として放出されてしまいます。この無駄に廃棄されてしまう 200℃未満の熱を上手に再利用し、動力や電気などの必要なエネルギーに変換していくことは、環境問題の進行を抑える他、限りある資源を有効に利用する上で大変重要なこととなります。

我々が最も必要なエネルギーは電気エネルギーであることから、最近では熱電材料による廃熱から電気エネルギーに直接変換する技術開発が進められております。しかしながら、その変換効率はとても低く、熱電材料に代替し得る革新的なエネルギー変換技術の新開発が望まれております。

このような背景の中、磁性体や弾性体といったカロリー材料と呼ばれる物質に注目が集まっており、これらの物質が有する熱量効果を利用し、かつ環境に配慮した新たなエネルギー変換機構の開発が活発に行われています。これらの方法にも出力が小さく実用化が難しいという問題が残存しますが、本研究グループでは、出力向上に向けて天然ゴムなどの弾性体が持つ弾性熱量効果を利用した新たな熱－動力変換機構を提案し、天然ゴムが持つエネルギー密度を実験的に評価しました。

今回の取り組み

本研究グループでは、天然ゴムの弾性熱量効果を利用した冷却機構の実現可能性について、これまでに実験的および解析的な研究を進めてきました[1][2][3]。これまでの研究では、単純往復運動から高温場と低温場を形成する動力から熱へのエネルギー変換について評価を行ってきましたが、研究過程で天然ゴムの有する弾性熱量効果が他の弾性熱量材に比して優れていることが認められたことから、本研究ではエネルギー変換の向きを逆にした熱から動力へのエネルギー変換にも着目し、Ni-Ti 形状記憶合金のような熱駆動アクチュエータとしての評価を行いました。

提案した熱－動力エネルギー変換機構では、熱交換器によって温度が制御された作動流体を天然ゴムチューブ内に流すことにより弾性体である天然ゴムを加熱・冷却し、弾性熱量効果による天然ゴムの伸長・収縮により可動部を往復運動させます。天然ゴムチューブは可動部分の上下に据え付けられており、加熱・冷却を半周期ずらすことで両方向からの力を得るようにしています（図 1）。

高温側の熱交換器を出た作動流体は下部の天然ゴムチューブ群を通過し、ゴムチューブ群を加熱した後、低温側の熱交換器に移動します。一方、低温側の熱交換器を出た作動流体は上部の天然ゴムチューブ群を通過し、ゴムチューブ群を冷却した後、高温側の熱交換器に移動します。これらは同時に行われ、半周期ずらした天然ゴムチューブの加熱・冷却を行います。その後、作動流体の流れ方向を逆転させ、加熱されたゴムチューブ群は冷却され、冷却された側は加熱されることとなります（図 2）。この繰り返しの動きにより、可動部分の移動量および力を測定します。このサイクルには 4 段階の熱力学的サイクルが適用でき、正味の出力を評価しました。

実験からは、1 サイクル当たり最大 150 mJ/cm^3 のエネルギー密度が測定され、これは機器の出力として 120 mW に相当します（図 3）。温度差が 25°C と天然ゴムチューブの伸びの変化率が 50% の条件という、温度差を得ることが難しい廃熱利用等への応用には十分適した条件で熱-動力エネルギー変換を実現性が評価されました。また、今回の研究で得られた力（ 100 N 以上）と変位量（ 20 mm 以上）は、既存のオルタネーター等の運転条件と互換性があり、熱から動力エネルギーを経由して、電気エネルギーへの変換も可能であることを示唆しています。

今後の展開

本研究では、安価で入手しやすい天然ゴムが持つ弾性熱量効果を用いて、工場等からの廃熱等を利用した熱-動力エネルギー変換の実用性を評価しました。得られた結果では、廃熱利用の際に問題となる小さな温度差環境においても、形状記憶合金等に匹敵する十分な機械的仕事を得られることが明らかとなりました。

今後は社会実装に向けた環境発電を見据えた高効率化が課題となります。研究グループでは今後、本研究を通して明らかにしたエネルギー変換技術と高効率化を阻む諸問題、具体的には熱交換器の性能向上や機械摩擦によるエネルギー損失の解決に注力し、これまで大気に放出されるのみであったエネルギーの最終形態である「熱」を、再度有効なエネルギーに変換し得るシステムの構築を検討しています。熱は「地産地消」であり、生じたその時その場所で利用するのが最も効率的です。この考えに基づき、天然ゴムの弾性熱量効果で得られる新たなエネルギーを、必要とされるエネルギーに変換できるシステムを構築していきます。



図 1. 熱－動力エネルギー変換機構の全体写真。中央の可動台の上下に天然ゴムチューブ群で構成される弾性体が配置され、両方向からの力を受ける構造となっている。この可動台は、力を測定する際にはアクチュエータに固定することが可能。

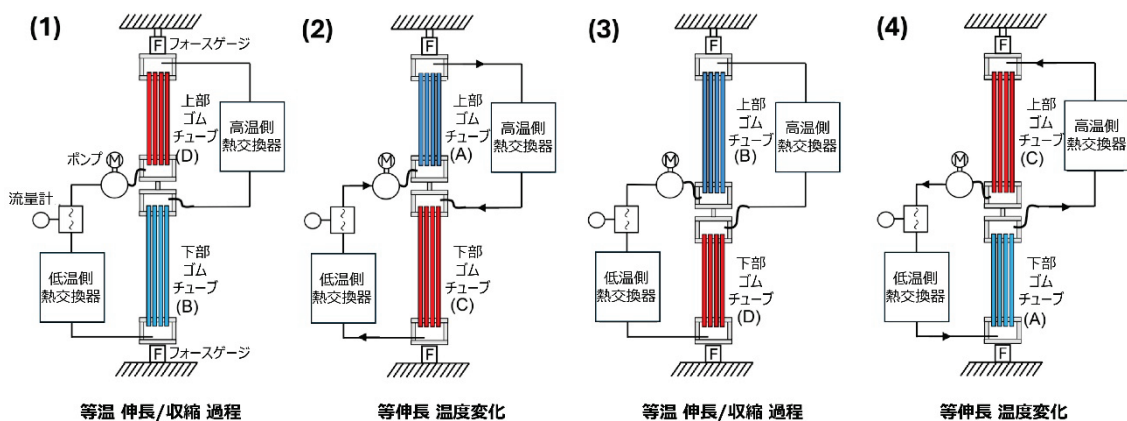


図 2. 熱－動力エネルギー変換機構の構造と熱力学サイクル状態。(1)初期状態：上部は自然長、下部は伸長状態。(2)作動流体を時計回りに流し、上部天然ゴムチューブ群を冷却、下部天然ゴムチューブ群を加熱。(3)上部天然ゴムチューブ群が伸長、下部天然ゴムチューブ群が収縮。(4) ポンプを逆回転させ、作動流体を反時計回りに流す。上部天然ゴムチューブ群を加熱、下部天然ゴムチューブ群を冷却。

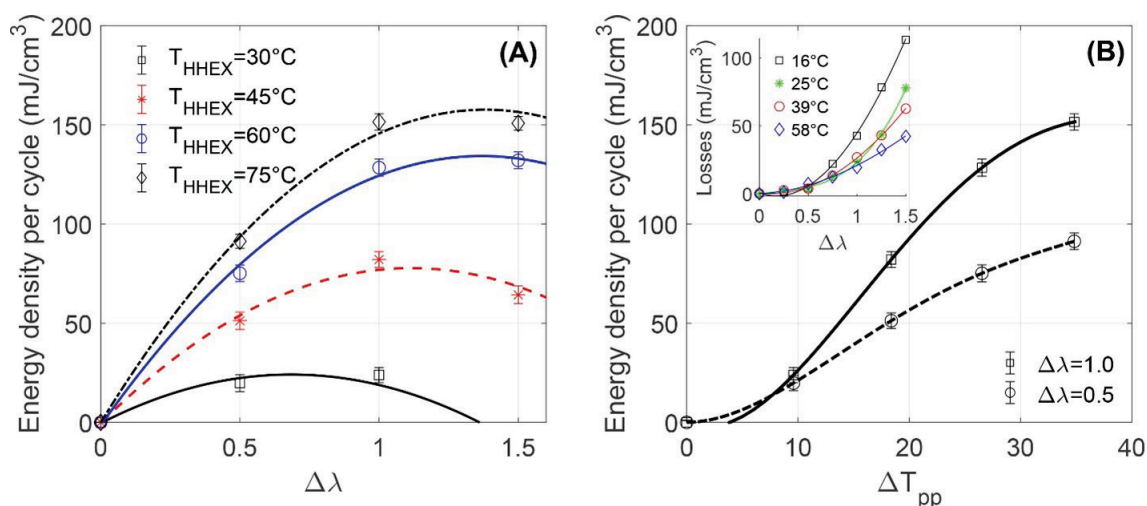


図 3. 高温側熱交換器の 4 温度における(A)天然ゴムチューブ伸長振幅とエリクソンサイクルエネルギー密度の関係、(B)温度振幅とエリクソンサイクルエネルギー密度の関係。

【謝辞】

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金 基盤研究 (C) (課題番号：JP19K04230) およびフランス国 Agence Nationale pour la Recherche (ANR) (課題番号：ANR-17-CE05-0016) の支援を受けたものです。

【用語説明】

- 注1. 弾性熱量効果：弾性体の形状が急激に変形する際に、変形前後でのエントロピーの差に相当する発熱や吸熱が起こる効果。
- 注2. 環境発電：様々な形態で周囲に存在する従来利用されことのなかった微小なエネルギーを、電気エネルギーに変換して活用する技術。

【論文情報】

タイトル：Converting low-grade heat into mechanical energy using a natural rubber elastocaloric device

著者：Gaël Sebald*, Giulia Lombardi, Gildas Coativy, Atsuki Komiya

*責任著者：東北大学 高等研究機構国際ジョイントラボセンター 客員教授 Gaël Sebald

掲載誌：Joule

DOI：https://doi.org/10.1016/j.joule.2025.102012

URL：https://www.cell.com/joule/abstract/S2542-4351(25)00193-X

【参考文献】

- [1] Gaël Sebald, Atsuki Komiya, Jacques Jay, Gildas Coativy and Laurent Lebrun
Regenerative cooling using elastocaloric rubber: Analytical model and experiments
Journal of Applied Physics, Vol.127 (2020-03), 094903.
DOI: 10.1063/1.5132361
- [2] Gaël Sebald, Giulia Lombardi, Gildas Coativy, Jacques Jay, Laurent Lebrun and Atsuki Komiya
High-performance polymer-based regenerative elastocaloric cooler
Applied Thermal Engineering, Vol.223 (2023), 120016.
DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2023.120016
- [3] Marianne Sion, Atsuki Komiya, Shihe Xin and Gaël Sebald
Analytical modeling for a single-stage elastocaloric cooling device using natural rubber
International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.247 (2025), 127150.
DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2025.127150

【問い合わせ先】

（研究に関すること）

東北大学流体科学研究所 教授

小宮 敦樹

TEL: 022-217-5876

Email: komiya@tohoku.ac.jp

東北大学高等研究機構国際ジョイ

ントラボセンター 客員教授

INSA Lyon 教授

Sebald Gaël

Email: gael.sebald@insa-lyon.fr

（報道に関すること）

東北大学流体科学研究所

国際研究戦略室（広報）

TEL: 022-217-5873

Email: ifs-koho@grp.tohoku.ac.jp