

伝統工芸「切り紙」で創るフレキシブルな温度変調素子

～身近なプラスチックを用いた新しい加熱/冷却技術～

配布日時：2022年4月22日14時

国立研究開発法人物質・材料研究機構

概要

1. 国立研究開発法人物質・材料研究機構(NIMS)は、固体の伸び縮みに伴う温度変調現象「弾性熱量効果」を利用する加熱/冷却技術に新たな可能性を切り拓きました。本研究では、日本の伝統工芸として知られる「切り紙」から着想を得た加工を施すことで、弾性熱量効果による温度変調用途としては注目されていなかった物質でさえも局所的な加熱/冷却素子として有力な材料になり得ることを示しました。これによって、小型電子機器用の熱エネルギー利用技術やフレキシブルな温度変調素子などへの応用展開が期待されます。
2. 温度制御は私たちの生活に欠かせない重要な技術の一つです。現在、環境負荷が大きいフロン類ガスを用いる冷却技術に替わる固体型温度制御技術の候補原理として、弾性熱量効果が注目を集めており、高効率な温度変調を実現する物質探索が精力的に行われています。弾性熱量効果を示す物質は数多く存在しますが、有力な候補は形状記憶合金などに限られていました。
3. 今回、研究チームが提案・実証したのは、弾性熱量効果による吸発熱 (図(a)) を、板材の「切り紙」加工で制御するという手法です (図(b))。切り紙加工によって、非常に小さな引張応力で任意の場所に大きな内部応力を集中的に発生させることが可能になります。その結果として、これまで弾性熱量効果の温度変調材料としては全く着目されていなかった身近なプラスチック材料の局所加熱/冷却能を大幅に向上できることを実証し、その値は従来最高性能の弾性熱量効果を示していた形状記憶合金をも凌ぐことを明らかにしました。

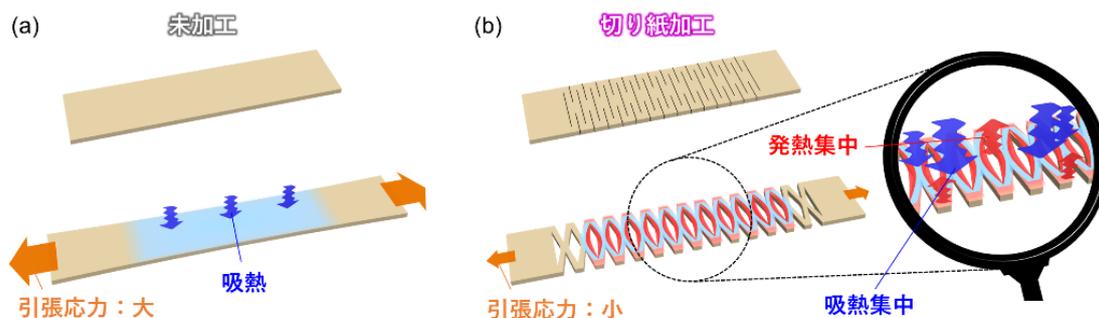


図 (a) 弾性熱量効果による温度変調. (b) 切り紙加工で作成した温度変調素子.

4. 切り紙加工は、プラスチックに限らず様々な物質に人工的に伸縮性やフレキシビリティを与えられ、その加工パターンは多彩です。今後、弾性熱量効果による温度変調に最適な加工パターンや物質の選定を進めることで、電子機器に対する温度制御技術や曲面などにも取り付け可能なフレキシブルな温度変調素子開発への展開を目指していきます。
5. 本研究は、NIMS 磁性・スピントロニクス材料研究拠点 スピンエネルギーグループの平井孝昌 研究員、内田健一 グループリーダーらによって行われました。また本研究の一部は、JST 戦略的創造研究推進事業 CREST (JPMJCR17I1)、キャノン財団研究助成プログラム「産業基盤の創生」の支援を受けて実施されました。
6. 本研究成果は、日本時間 2022 年 4 月 19 日に、ドイツ国際科学誌「Advanced Functional Materials」にオンライン掲載されました。

研究の背景

現代のエレクトロニクス社会では、IT 関連機器の小型化・高性能化・多様化が目覚ましい速度で進んでいます。同時に発熱による電子機器の信頼性低下など“熱”が引き起こす問題も増加します。このような問題に対処すべく、熱エネルギーを高度に制御・利用するための熱マネジメント技術⁽¹⁾の発展が必要不可欠となっており、その内容には電子機器の省エネルギー化の推進だけでなく、高効率な排熱利用法や放熱技術の開発などが含まれます。中でも、温度制御は我々の生活や産業に欠かせない重要な技術の一つであり、環境・機器の種類に応じた最適な温度制御技術の開発が盛んに取り組まれています。

熱は高温側から低温側に移動し、その逆は自然には起こらないため、精密な温度制御のためには外部からエネルギーを与える必要があります。例えば、エアコンや冷蔵庫などでは、冷媒ガスの圧縮を利用して冷却していますが、一般社会に広く浸透している冷媒ガス（例えばフロン）は環境負荷が大きく、集積化された電子機器に対するピンポイントな温度制御には不向きという欠点もあります。その代替として期待されている技術の基盤原理の一つが、物質を伸び縮みさせることで吸発熱が生じる弾性熱量効果です。弾性熱量効果は固体中で生じる温度変調現象であり、環境に配慮した技術を実現し得ることで注目されています。弾性熱量効果を示す物質はゴム、プラスチック、金属など数多く存在しますが、ほとんどの物質では効果が小さく、実用化に足るほどの大きな加熱/冷却能を有する物質は一握りといわれています。現在、最も有望な候補は形状記憶合金と考えられており、これらの合金系を中心に、より高効率な物質の探索が精力的に行われています。

研究内容と成果

今回、NIMS の平井研究員と内田グループリーダーらの研究チームは、日本の伝統工芸の一つである「切り紙⁽²⁾」加工を身近なプラスチック材料に施すことによって、弾性熱量効果によって生じる吸発熱分布を後天的にデザインするという新手法を提案・実証しました。本手法を用いれば、物質に切れ込みを入れるという簡便な加工だけで、弾性熱量効果による温度変調素子の加熱/冷却能を局所的に増強できるだけでなく、素子の伸縮性やフレキシビリティを大幅に向上させることができます。

本研究では、ロックインサーモグラフィ法⁽³⁾と呼ばれる熱イメージング技術を用いて、弾性熱量効果の測定を行いました。ロックインサーモグラフィ法では、試料に周期的に変動するひずみ⁽⁴⁾を与えながら赤外線カメラを用いて素子表面の温度分布を測定し、ひずみと同じ周期で時間変動する温度変化だけを選択的に抽出して可視化します。これにより、非接触かつ高感度で弾性熱量効果による温度変化の空間分布を定量評価することができます。測定には、食品用容器にも使われる市販品プラスチック（ポリスチレン）シートを主に使用しました。

実験の結果、切り紙加工を施した試料には、未加工試料とは全く異なる温度変化分布が生じることが分かりました。図 1 (a) に示したロックインサーモグラフィ法により測定した熱画像は、引張ひずみを試料の長手方向（測定画像の縦方向）に加えた際の実験結果です。上の図からは温度変化の大きさが、下の図からはその変化が加熱または冷却のどちらであるか（0°[青色]：加熱/発熱、180°[赤色]：冷却/吸熱）が分かれます。未加工試料では引張ひずみに対して一様な大きさの吸熱（約-0.2°C）が生じる一方、切り紙加工を施した試料では吸熱と発熱が同時に生じ、未加工試料よりも大きな温度変化（約-0.4°C）が特定の場所（例えば図 1(a) の白枠で囲まれた場所）で観測されました。これは、試料内部に生じている応力⁽⁵⁾分布を反映しています。未加工試料では内部応力の大きさは一様であり、その方向は常に引張ひずみ方向と一致します。一方、切り紙加工を施した試料では、応力集中・分散点が周期的に分布し、内部応力の方向も一様ではなく場所に依存して引張または圧縮方向に作用します。その結果、吸熱箇所と発熱箇所が同時に生成され、特定箇所（応力集中点）では温度変化量が増強されます。

弾性熱量効果においては、生じる温度変化量に加えて、ひずみを与えるために必要な引張応力の大きさも重要になります。割れ物の緩衝材として利用される切り紙状に加工された紙や発泡プラスチックの様に、普通は全く伸びない材料でも切り紙加工を施すことにより小さな力でもよく伸びるようになります。今回の実験においても、切り紙加工を施した測定試料では、同じ距離だけ伸ばすのに必要な引張応力を飛躍的に減らすことができるという結果が得られています（図 1 (b)）。局所的な温度変調応用の可能性を検討するため、応力集中点における局所加熱/冷却能（試料に 1%の引張ひずみを与えた際に生じる特定箇所における温度変化量を、そのひずみを生み出すのに必要な引張応力で割った値）を計算すると、切り紙加工

のポリスチレンシートにおける値は、未加工の場合より大きいだけでなく、最も有望な材料候補と考えられてきた形状記憶合金（例えばニッケルチタン合金）もはるかに超える値に達していることが見出されました（図1(c)）。

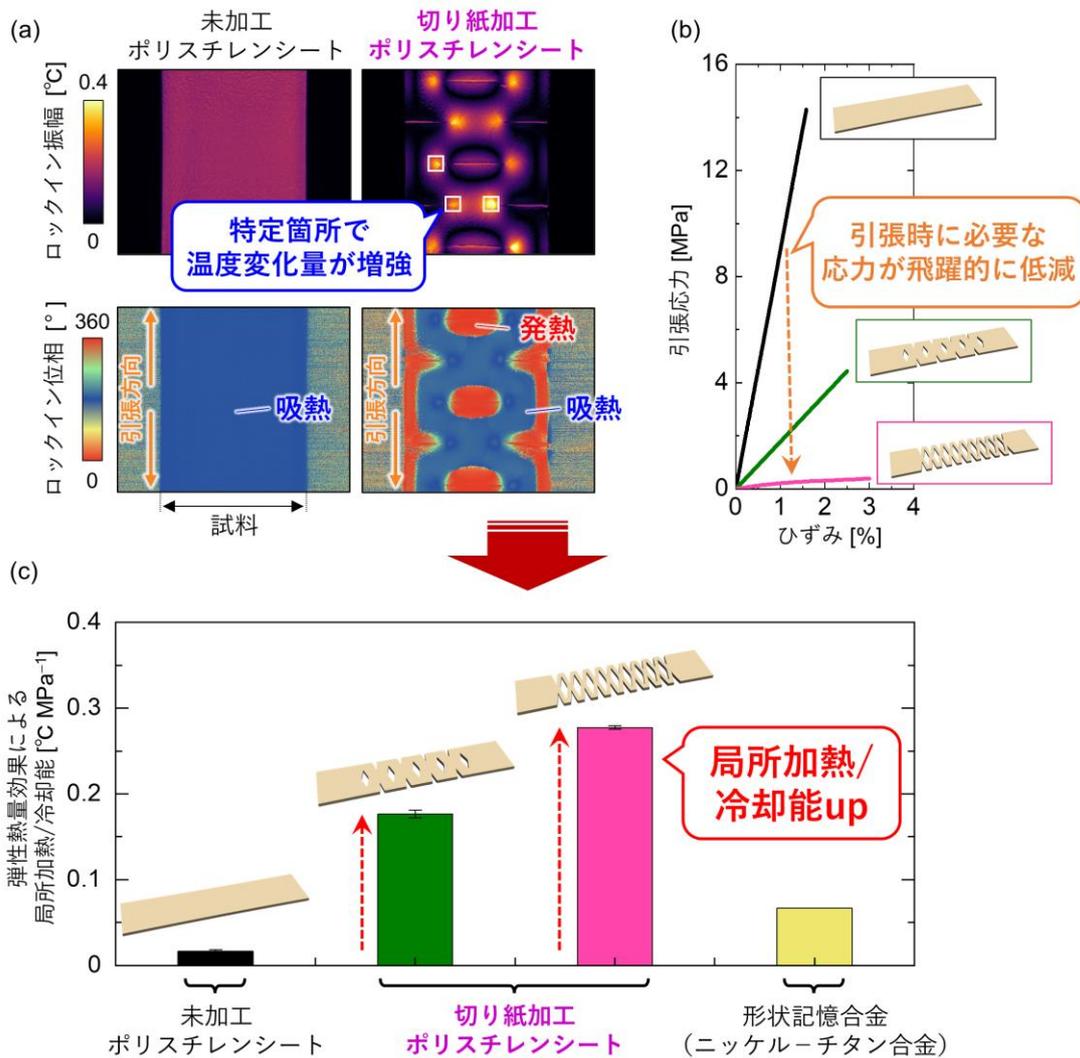


図1. 切り紙加工による局所加熱/冷却能の向上

(a) 未加工/切り紙加工のポリスチレンシートにおけるロックインサーモグラフィ像。切り紙加工によって、特定箇所（白枠）において温度変化量が増大するだけでなく、一つの試料上で吸発熱が同時に生じる。(b) 応力-ひずみ曲線。切り紙加工によって、同じ距離だけ引張る際に必要な応力を大幅に低減できる。試料の模式図も合わせて掲載している。(c) 弾性熱量効果による特定箇所における局所加熱/冷却能。

今後の展開

本成果の根幹を担う「切り紙」は、紙やプラスチックに限らず様々な物質に対して適用可能な加工技術であり、多彩なデザインを可能とします。例えば、ひずみに対して異方性⁶⁾を持つ物質に適用すると、ひずませる方向に応じて吸発熱分布がさらに変化します。また、様々な物質に伸縮性・柔軟性を与えられるため、曲面にも取り付け可能なフレキシブル温度変調素子への展開に繋がる可能性があります。

今後、「切り紙」を念頭においた弾性熱量効果物質の探索や切り紙デザインの検討を多種多様な観点から行うことで、高効率な熱エネルギー利用素子の開発を目指していきます。

掲載論文

題目：Elastocaloric Kirigami Temperature Modulator

著者：Takamasa Hirai, Ryo Iguchi, Asuka Miura, Ken-ichi Uchida

雑誌：Advanced Functional Materials

掲載日時：日本時間 2022 年 4 月 19 日

DOI：10.1002/adfm.202201116

用語解説

(1) 熱マネジメント技術

熱エネルギーを制御・有効利用することで、省エネルギー化・高効率化を行う技術の総称。その対象は、電子機器、自動車から IT、住宅まで幅広く、特に近年の電子機器の小型化・高性能化に伴ってその重要性が増しています。

(2) 切り紙

紙に切れ込みを入れることで様々な形を表現する細工。通常は強く引っ張ると破けてしまう紙でも、切り紙加工を施すことによって高い伸縮性を付与したり立体的に変形させたりすることができます。本研究に使用した、線状の切れ込みを交互に入れたパターンは網飾りと呼ばれ、割れ物の緩衝材にも使用されています。この日本の伝統的な紙遊び細工「切り紙 (Kirigami)」は「折り紙 (Origami)」と並んで国際的に注目されており、近年の科学・工学分野においても、紙に限らず様々な物質に対して切り紙加工を施すことによる人工物質・新機能の創出が進められています。

(3) ロックインサーモグラフィ法

サーモグラフィは物質表面から放射される赤外線の空間分布を画像として検出する技術です。赤外線のエネルギーは放射する物質の温度に依存するため、適切な校正を行うことで、物質の温度分布を画像情報として取得できます。非接触で温度をイメージング計測できることから、サーモグラフィ法は産業・研究など幅広い分野で利用されています。

ロックインサーモグラフィ法は、物質に周期変動する外部擾乱（今回の実験においてはひずみ）を作用させながら物質表面の温度分布を測定し、外部擾乱と同周期で変動する温度変化だけを選択的に抽出してイメージングする方法です。環境変化などによる温度変化などを排除し、外部擾乱に応答して生じる温度変化のみを測定するため、高感度な熱イメージングを実現できます。ロックインサーモグラフィ法においては、温度変化の大きさを表す振幅像（図 1(a)の上図）、温度変化の符号（0°：発熱、180°：吸熱）に加え熱拡散情報を表す位相像（図 1(a)の下図）が得られます。

(4) ひずみ

物質の変形状態を表す物理量であり、物質が初期状態の長さに対してどれだけ引張または圧縮されたかを表現します。単位は[%]

(5) 応力

物質にひずみが与えられた際に生じる力の大きさや作用方向を表現するために用いられる物理量。単位は[Pa]

(6) 異方性

物質の物理的性質が方向によって異なること。

本件に関するお問い合わせ先

(研究内容に関すること)

国立研究開発法人物質・材料研究機構 磁性・スピントロニクス材料研究拠点
スピンエネルギーグループ 研究員 平井 孝昌 (ひらい たかまさ)

E-mail: HIRAI.Takamasa@nims.go.jp

TEL: 029-859-2565, FAX: 029-859-2701

URL: <https://www.nims.go.jp/mmu/scg/index.html>

(報道・広報に関すること)

国立研究開発法人物質・材料研究機構 経営企画部門 広報室
〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1

TEL: 029-859-2026, FAX: 029-859-2017

E-mail: pressrelease@ml.nims.go.jp