

2019年6月18日

報道機関 各位

東北大学 多元物質科学研究所  
信州大学先鋭領域融合研究群 先鋭材料研究所  
岡山大学

## ナノの孔をもつスポンジを利用した 自然冷媒で動作する高効率ヒートポンプを提案 ～ナノ空間の変形による気液相転移を利用～

### 【研究成果のポイント】

- ・柔軟に変形するナノ多孔体「ナノスポンジ」を利用することで、エネルギー効率の高い気液相転移を実現しました。
- ・気液相転移に伴い発生する潜熱を利用することで、エネルギー効率の高いヒートポンプを構築できます。
- ・従来のヒートポンプとは異なり、自然冷媒を利用してもシステムが巨大化しない利点があります。

### 【概要】

東北大学の野村啓太助教、山本雅納助教、我部篤助教、西原洋知准教授、京谷隆教授、日産自動車株式会社、信州大学の田中秀樹教授、京都大学の宮原稔教授、岡山大学の仁科勇太研究教授らの研究グループは、自然冷媒<sup>注1)</sup>を用いた新しいヒートポンプ<sup>注2)</sup>の原理を提案しました。現在のヒートポンプには代替フロン<sup>注3)</sup>が冷媒として使用されています。代替フロンの地球温暖化係数は二酸化炭素に比べて約千倍と非常に大きく、環境に優しい自然冷媒への切り替えが急務となっています。本研究では、柔軟に変形するナノ多孔体<sup>注4)</sup>「ナノスポンジ」に、液体状態の冷媒を含ませてから押し付けて変形させると、冷媒が蒸発して気体となって放出され、気化熱によって冷却が可能であることを見出しました。反対にナノスポンジを復元させると、気体が液体となって取り込まれ発熱します。従来とは異なり、応力による気液相転移を利用するため、冷媒には水やアルコールなどの環境に優しい物質を利用可能です。ナノスポンジは何度でも繰り返し冷媒を取り込み、放出することができる上に、ナノスポンジを押し付けるために必要な動力はそれほど大きくないため、エネルギー効率の高いヒートポンプの設計が可能となります。ヒートポンプは空調や冷蔵庫など現代社会に欠かせない機器であり、今回の発見は大きな波及効果が期待できます。

本成果は、2019年6月17日（英国時間）に Nature Communications 誌にてオンライン公開されました。

## 【詳細な説明】

### (背景)

空調や冷蔵庫などに利用されているヒートポンプは、外部からエネルギーを与えることで温度をコントロールするシステムです。現代の人々の生活には欠かせないものである一方で、冷媒として使用されている代替フロン<sup>①</sup>の地球温暖化係数は二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)と比べ約千倍と非常に大きく、環境への悪影響が問題視されています。国際的にも代替フロンは規制対象となっており、日本を含む先進国は2036年までに生産・消費量を85%削減する目標が設定され、環境に優しい冷媒への切り替えが急務となっています。

従来のヒートポンプを冷却に利用する際の模式図を図1に示します。コンプレッサーで冷媒の飽和蒸気を過熱蒸気にして凝縮器に送り込み、飽和液となった冷媒をバルブで減圧して蒸気と液体の混合状態で蒸発器に送り込みます。蒸発器では液体の気化熱により冷却をすることができます。また、凝縮器で発生する凝縮熱は外部に排熱されます。このように従来のヒートポンプは、液体である冷媒を気化する蒸発器と、気体である冷媒を液化する凝縮器を必要としていました。またその原理から、自然冷媒の利用は困難であり、代替フロンを冷媒として用いる必要がありました。

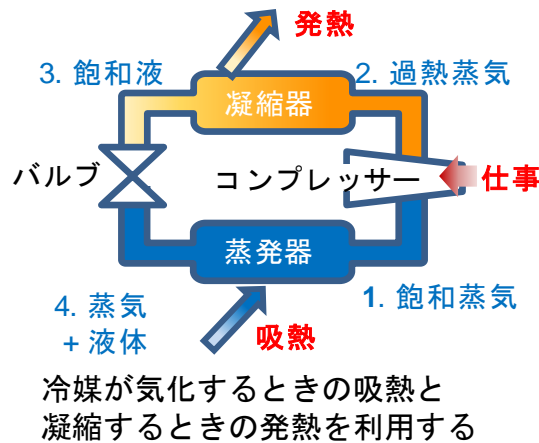


図1 従来のヒートポンプの概要図

## 【研究の内容と成果】

本研究では、応力で柔軟に変形するナノ多孔体、「ナノスポンジ」に着目しました。ナノスポンジは、10 nm以下の微小な穴(ナノ細孔<sup>⑤</sup>)を大量にもつ、スポンジ状の材料です。従来のナノ多孔体は非常に硬いため、スポンジのように応力で変形させるのは困難でしたが、我々のグループでは応力で柔軟に変形するナノスポンジの開発に成功しています。ナノ細孔には「吸着<sup>⑥</sup>」と呼ばれる特殊な機能があり、飽和蒸気圧以下であっても気体分子を捕え、液体に近い密度でナノ細孔の中に溜め込むことができます(図2)。また、一度吸着した分子でも、温度を上げたり気相の圧力を下げたりすることで再び気体として取り出す(脱着する)ことができます。つまり、ナノスポンジは液体を蓄えたり、放出したりすることができ、その意味では通常のスポンジに似ています。ところが、「絞る」という操作をした際に、ナノスポンジは非常にユニークな挙動を示します。液体を蓄えたスポンジを絞ると液体が染み出しますが(図3上段)、ある条件下で液体を蓄えたナノスポンジを絞ると、液体ではなく気体が出てきます(図3下段)。また、押し付けるのを止めてナノスポンジを復元させると、放出された気体は再び液体になってナノスポンジに蓄えられます。つまり、ナノスポンジを圧縮すると蒸発が生じ、膨張させると凝縮が生じます。熱力学の常識として、気体

を圧縮すると凝縮して液体になり、反対に膨張させると液体が蒸発して気体になるため、ナノスポンジで生じる気液相転移は一見反対であり、奇妙に思えます。しかし、「吸着」という観点からは極めて当たり前の現象として理解できます。

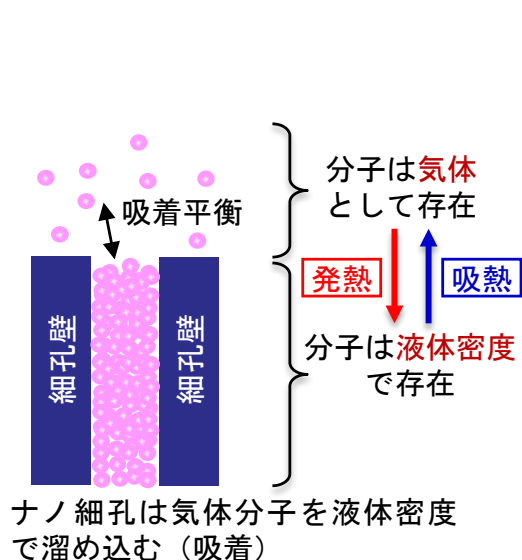


図2 ナノ細孔による分子の吸着

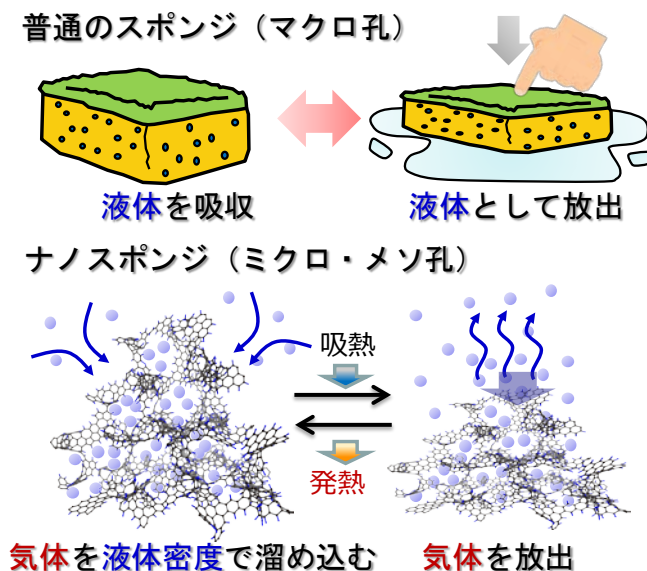


図3 普通のスポンジとナノスポンジを変形させたときの挙動の違い

従来のナノ多孔体は剛直であり応力に変形させるのが困難であったため、今まで誰もナノ多孔体を「絞る」ことはできませんでした。一方で我々は柔軟に変形可能なナノスポンジを応力によって「絞った」ところ、上で述べたような気液相転移が確かに生じることを実験的に初めて実証しました。気液相転移には必ず潜熱が伴うため、ナノスポンジを圧縮すると冷熱を、膨張させると温熱を得ることができます。この潜熱を利用すれば、図4に示すような原理で作動する新型のヒートポンプを設計することができます。図4の例では、2つのナノスポンジがそれぞれ2つの容器に封入されており、部屋どうしが気体を通過させる通路で接続されています。右側の容器でナノスポンジを圧縮して冷媒を気化させると、室内の空気を冷却することができます。それと同時に左側の容器のナノスポンジを膨張させて右側から発生した気体を液体として捕集します。その際に発生する凝縮熱は、外気に排熱します。ナノスポンジは何度でも冷媒を蓄え、放出できるため、この原理を利用すれば、連続運転可能なヒートポンプの設計も可能となります。また、従来のヒートポンプとは異なり、応力印加による気液相転移を利用しているため、自然冷媒を用いてもシステムが巨大化しない利点があります。

本システムに外部から投入するエネルギーは「ナノスポンジを変形させるのに必要な仕事」となります。したがって、ナノスポンジが柔軟であるほど、エネルギー効率が高まります。今回提案する新型のシステムは、自然冷媒を利用した高効率なヒートポンプ開発に繋がる新技術であり、今後の大きな波及効果が期待されます。

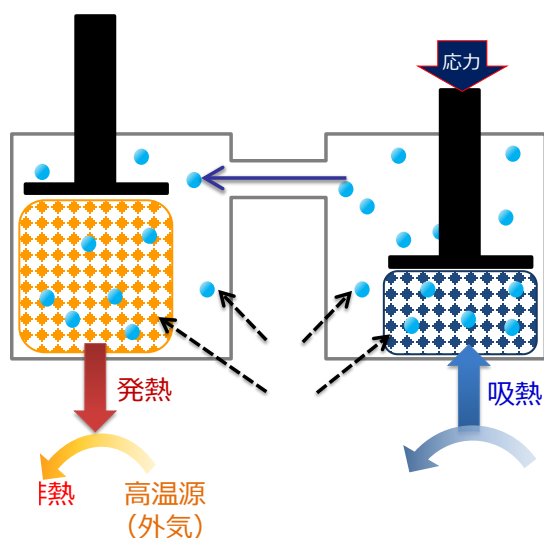


図4 ナノスポンジを利用したヒートポンプの原理を簡略化した模式図

### 【用語解説】

#### 注1) 自然冷媒

冷媒はヒートポンプの内部を巡り、気化と凝縮を繰り返すことで熱を運びます。現在はハイドロフルオロカーボン系の冷媒がヒートポンプに利用されていますが、地球温暖化係数が非常に大きいことが問題になっています。自然冷媒はオゾン破壊係数がゼロで、地球温暖化効果の低い冷媒の総称で、水やアルコールが含まれます。

#### 注2) ヒートポンプ

外部からエネルギーを供給することで、温度の低いところから高いところへと熱を運ぶ機関です。空調機や冷蔵庫はこれに該当します。

#### 注3) 代替フロン

現在のヒートポンプで広く使用されているハイドロフルオロカーボン系の冷媒です。フロンガスのようにオゾン層を破壊することはありませんが、地球温暖化係数が非常に大きいことが問題視されています。

#### 注4) 多孔体

内部に微小な穴（細孔）を大量に含有する材料の名称です。細孔はその大きさによって、マイクロ孔（2 nm 以下）、メソ孔（2～50 nm）、マクロ孔（50 nm 以上）に分類されます。

#### 注5) ナノ細孔

ナノ細孔という言葉に厳密な定義は無く、広義にはナノメートル以下の細孔がこれに該当します。本稿では、気体分子を捕集（吸着）する能力が高い10 nm 以下の細孔を特にナノ細孔と表記しています。

#### 注6) 吸着

細孔の内部や物体の表面に分子が高濃度で捕集される現象です。特に、10 nm 以下の微小なナノ細孔は高い吸着の能力を持ち、気体分子は液体と同等の濃度でナノ細孔内部に取り込まれます。

### 【研究について】

本研究は、JST さきがけ「超空間制御と革新的機能創成」研究領域（研究総括：黒田一幸 早稲田大学理工学術院教授）における研究課題「応力で自在に変形する超空間をもつグラフェン系柔軟多孔性材料の調製と機能開拓」（代表者：西原洋知）の支援を受け萌芽的研究を開始し、科学研究費補助金 17H01042 の支援で更なる検討を重ね、「物質・デバイス領域共同研究拠点」展開共同研究 B および JST さきがけネットワーク、JSTCREST におけるそれぞれの共同研究グループが連携を重ねた結果得られた成果です。また本研究の一部には、科学研究費補助金 16J06543、17H03097 の支援を受けました。

物質・デバイス領域共同研究拠点では、拠点を構成する 5 附置研究所（北海道大学電子科学研究所、東北大学多元物質科学研究所、東京工業大学化学生命科学研究所、大阪大学産業科学研究所、九州大学先導物質化学研究所）において共同研究を濃密に深化させ、新規共同研究の新たな枠組みを構築し、研究成果を人・環境問題に資するイノベーションに展開する「人・環境と物質をつなぐイノベーション創出ダイナミック・アライアンス」事業を、平成 28 年度より開始しました。

「展開共同研究 B」は、物質・デバイス領域共同研究拠点において、顕著な成果を上げてきた課題をさらに発展させるもので、特に、応募研究者と複数の異なる 5 研究所に所属するアライアンス研究者でチームを組んで共同研究を遂行するものです。詳細はウェブサイトをご覧ください。 <http://five-star.tagen.tohoku.ac.jp/>

### 【論文情報】

題目：“Force-driven reversible liquid–gas phase transition mediated by elastic nanosponges”

著者：Keita Nomura, Hiroto Nishihara, Masanori Yamamoto, Atsushi Gabe, Masashi Ito, Masanobu Uchimura, Yuta Nishina, Hideki Tanaka, Minoru T. Miyahara & Takashi Kyotani

掲載誌：Nature Communications

DOI：10.1038/s41467-019-10511-7

## 【お問い合わせ先】

(研究関連)

東北大学 多元物質科学研究所  
准教授 西原 洋知 (にしはら ひろとも)  
電話 : 022-217-5627  
E-mail : hirotomo.nishihara.b1@tohoku.ac.jp

信州大学 先鋭領域融合研究群 先鋭材料研究所  
教授 田中 秀樹 (たなか ひでき)  
電話 : 026-269-5781  
E-mail : htanaka@shinshu-u.ac.jp

岡山大学 異分野融合先端研究コア  
研究教授 仁科 勇太 (にしな ゆうた)  
電話 : 086-251-8718  
E-mail : nisina-y@cc.okayama-u.ac.jp

(報道関連)

東北大学 多元物質科学研究所 広報情報室  
電話 : 022-217-5198  
E-mail : press.tagen@grp.tohoku.ac.jp

信州大学 総務部総務課広報室  
電話 : 0263-37-3056  
E-mail : shinhp@shinshu-u.ac.jp

岡山大学 総務・企画部 広報課  
電話 : 086-251-7292  
E-mail : www-adm@adm.okayama-u.ac.jp