

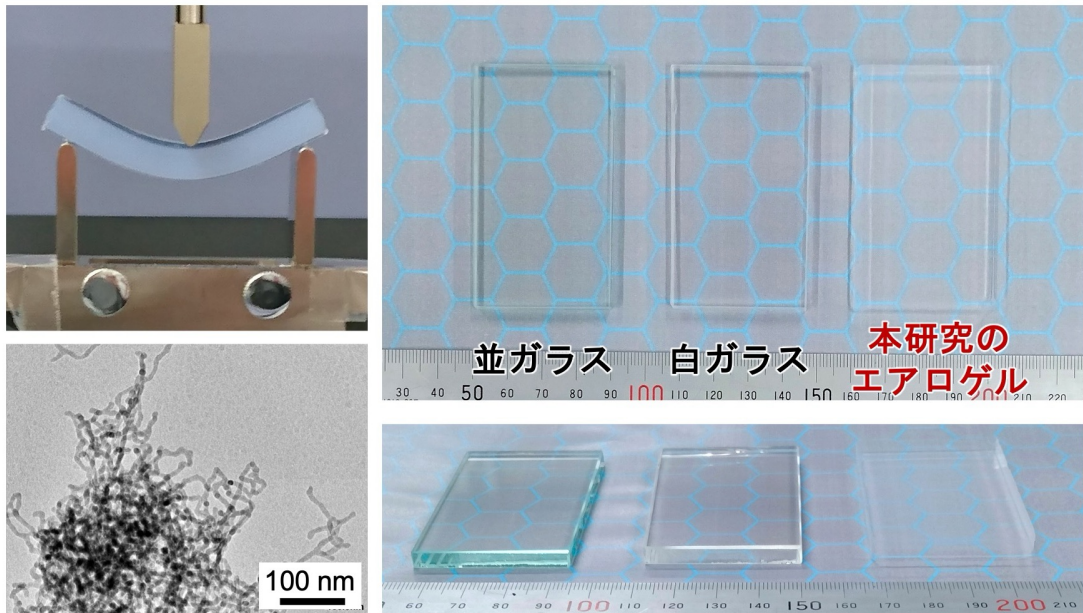
# ガラスのように透明で曲げられるエアロゲル

—高性能透明断熱材として期待—

## 概要

京都大学大学院理学研究科 上岡良太 博士課程学生（研究当時）、原瑠佑 博士課程学生（研究当時）、金森主祥 助教らの研究グループは、ガラスのように透明かつ曲げ変形が可能な低密度多孔体（エアロゲル）の作製に成功しました。エアロゲルは熱伝導率の極めて低い多孔体であり、省エネルギー材料として期待されていますが、機械的な強度やハンドリング性の向上に課題がありました。研究グループでは、エアロゲルを作る材料として一般的に用いられているシリカではなく、より柔軟なシリコンを利用することによってエアロゲルに柔軟性を付与し、強度を高めることに成功しました。特に、非イオン性の界面活性剤と、重縮合触媒として有機強塩基を用いたことによって、高強度の繊維状骨格構造が形成し、高透明かつ曲げ柔軟性の高いエアロゲルを得ることができました。この技術を利用してエアロゲルの工業生産やハンドリングが容易になれば、高性能透明断熱材として広く利用可能になることが期待されます。

本研究成果は、2024年1月11日に国際学術誌「*Nature Communications*」にオンライン掲載されました。



本研究で得られた新しいシリコンエアロゲル

## 1. 背景

より高度な省エネルギー化を実現するための新しい材料や技術は、世界的にも非常に活発に研究されています。その中でも断熱材の高性能化は、住宅やビル、工場、乗り物、物流などの分野においてエネルギー効率を高め、高い省エネルギー効果が期待されています。一般的にはグラスウールやポリマーフォームなどの断熱材が多く用いられていますが、エアロゲルと呼ばれる低密度の多孔体は、このような汎用断熱材と比べて約半分程度の熱伝導率、すなわち2倍程度の高い断熱効果を示すことが知られています。しかしながらエアロゲルは、機械的な強度が非常に低いため、規模の大きい工業生産やアプリケーションの難しい材料です。このため、エアロゲルの機械的な強度を高めることによって、利用しやすい材料を目指す研究が世界中の研究機関や企業で行われています。また、エアロゲルの光透過性を併せて利用した高断熱窓への展開はエアロゲル独自のアプリケーションとして非常に期待されていますが、板ガラス材料のようなクリアな透明性が求められます。

## 2. 研究手法・成果

エアロゲルは一般的にシリカ<sup>(注1)</sup>を用いて作製されますが、研究グループでは過去に、より柔軟なシリコーン<sup>(注2)</sup>を用いてエアロゲルを作ることによって、圧縮変形に対して壊れにくく、また変形回復が可能なエアロゲルが作製できることを見出しました(2007年に初報を発表済)。今回の研究では、圧縮変形に加えて曲げ変形に対する強度を高め、より扱いやすいエアロゲルを作製することを目指しました。これまでの研究と同様に、シリコーン骨格を作る原料としてはメチルトリメトキシシランを用い、ゾルーゲル法<sup>(注3)</sup>によってエアロゲルを作製しました(図1)。本研究のポイントは、均一な網目構造を形成させるために非イオン性のブロックポリマー型の界面活性剤を、ゲル化を促進するための触媒として有機強塩基を用いたことです。これらの工夫により、直径が4~10 nmの繊維状骨格および5~20 nmの細孔(図2左)をもつエアロゲルが得られ、これらが高い曲げ柔軟性を示すことがわかりました(図2右)。これまでの作製法では直径が10 nm程度の球状コロイド粒子が連結した構造のものが得られていましたが、粒子と粒子の間の連結部が変形によって壊れやすく、曲げ変形性の低いものしか得られていませんでした。さらに、有機強塩基によって重合反応時のpHが適切に制御できるようになり、より均質性の高い多孔構造となった結果、ガラスのようなクリアな透明性を示すエアロゲルが得られることもわかりました(図3)。

エアロゲルの強度や柔軟性を高める研究は世界中で数多く行われていますが、そのほとんどが強度(柔軟性)を高めるために透明性や多孔性を犠牲にしたものでした。つまり本研究では、強度(柔軟性)と透明性が両立されたエアロゲルを世界で初めて報告することができ、エアロゲルの多孔構造と柔軟性や透明性との関係についての理解も深まりました。

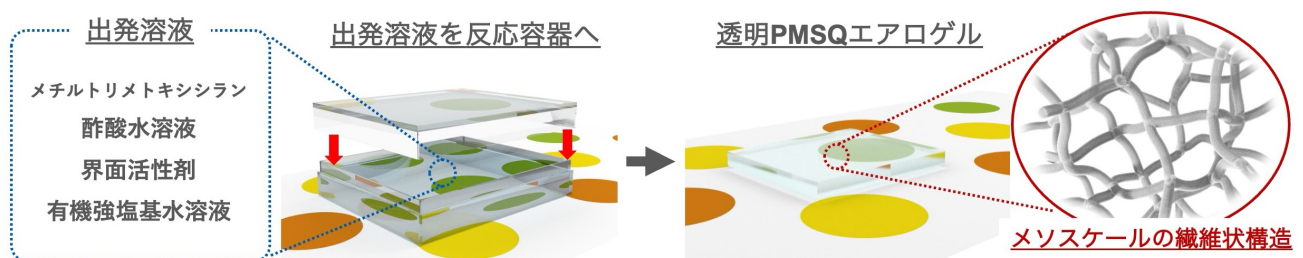


図1 本研究におけるエアロゲルの作製プロセス。

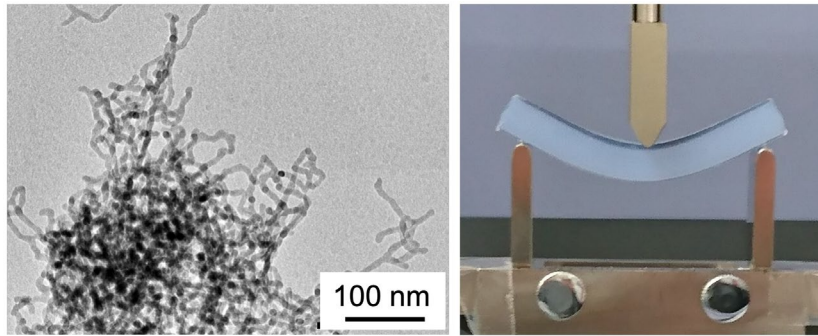


図2 本研究におけるエアロゲルの微細構造と曲げ柔軟性。

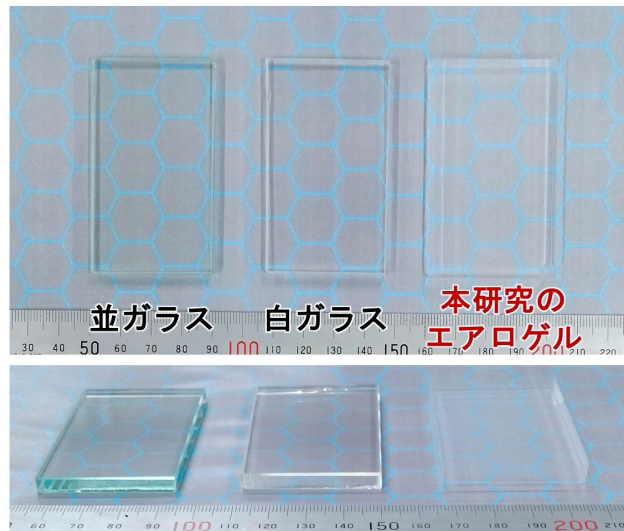


図3 本研究におけるエアロゲルが示すガラスのような高い光透過性。

### 3. 波及効果、今後の予定

本研究によって、これまでのエアロゲルでは不可能だった高い曲げ変形性を示すエアロゲルが得られました。圧縮変形に強いエアロゲルは他にもありますが、断熱材として実際に利用する際には、製造プロセス中や施工時には圧縮以外の力も加わります。すなわち、さまざまな方向の力に対して強い材料を作ることができれば、エアロゲルの工業的な利用可能性も高まるといえます。ただし、本研究によって曲げ変形が可能なエアロゲルが得られたものの、ポリマーフォームなど他の断熱材と同様に扱えるようにするには、他の種類の変形、例えばせん断変形に対する強度や柔軟性を向上させることも必要です。また、透明性についても、ガラスのような透明性が実現できたものの、そのクリアさ（ヘイズ値<sup>(注4)</sup>)はまだガラスには及びません。今後の研究によって、機械的な柔軟性をさらに高めること、透明性をさらに高めることを実現したいと考えています。

さらに、エアロゲルの製造プロセスとしてもっとも大きなネックになっているのが、高圧の超臨界流体<sup>(注5)</sup>を使った乾燥プロセスです。本研究でも超臨界乾燥によりエアロゲルを作製しました。私たちがこれまでに報告したエアロゲルは、超臨界流体を用いず、常温・常圧下において溶媒を蒸発させるだけで得られるものもあります。本研究のエアロゲルについてもこのような簡単な乾燥法を試みており、小型のものではできるようになってきています。

#### 4. 研究プロジェクトについて

本研究は、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）、戦略的省エネルギー技術革新プログラム「透明断熱材搭載窓の開発」（P12004）、ティエムファクトリ株式会社との共同研究により遂行したものです。また、国立研究開発法人 科学技術振興機構（JST）、さきがけ「未来材料」領域、「新しいシリコンの水溶液化学による多孔性ソフトマテリアルの創成」（JPMJPR22Q）の支援にも感謝いたします。

##### <用語解説>

（注 1）**シリカ**：二酸化ケイ素（ $\text{SiO}_2$ ）のこと。ただしここでは、水酸基も含むシリカゲルを意味している。

（注 2）**シリコン**：ケイ素と酸素からなる鎖状・分岐状ポリマーで、各ケイ素には側鎖としてメチル基などの有機基が結合したもの（有機シロキサンポリマー）。理化学機器やキッチン用品としてよく使われているシリコンゴムが代表的な例。

（注 3）**ゾルーゲル法**：広義には、コロイド分散液などのゾル状態を経てゲル（溶媒を含む固体）を得る手法のこと。本研究では、水溶液中におけるアルコキシシラン前駆体の加水分解・重縮合によりゲルを作製した。

（注 4）**ヘイズ値**：全透過光に対する拡散透過光の割合。拡散透過光が多いほどヘイズ値が高くなり、よりぼやけた「すりガラス」のようになる。一般的な板ガラス材料（5 mm 厚さ）のヘイズ値は約 0.1% であるが、本研究のエアロゲルは 5.3 mm 厚さで 1.7% である。このヘイズ値は、これまでに報告されているエアロゲルのうち最も低い値のひとつである。

（注 5）**超臨界流体**：物質は一般に、臨界点を超えた高温高圧下では超臨界状態となる。超臨界流体は表面張力をもたないので、壊れやすい材料の乾燥や洗浄に用いられている。エアロゲルの乾燥には超臨界二酸化炭素（臨界点は 31.1 °C, 7.38 MPa）を用いるのが一般的であるが、高圧プロセスであるため製造上のネックとなっている。

##### <研究者のコメント>



「エアロゲルは 90 年も前に発見されたものですが、その機械的物性には未だに多くの課題や謎が残されています。これまでエアロゲルを構成する材料を変化させた研究は数多くされてきましたが、構造や密度なども同時に変化してしまっており、機械的物性の由来はよく分かっていませんでした。そこで、細孔が小さくてもその形状を変えるだけで機械的物性には変化が見られるはずだ、と考え、研究を進めたところ、今回の成果に繋げることができました。本研究により、エアロゲルの物性改善に向けた研究を大きく前進させることができただけでなく、多孔体の細孔構造と機械的特性の関係性について重要な知見が得られたと考えております。」博士課程学生（研究当時） 上岡良太

<論文タイトルと著者>

タイトル：Unusual flexibility of transparent poly(methylsilsesquioxane) aerogels by surfactant-induced mesoscopic fiber-like assembly (界面活性剤により誘起されるメソスケール繊維状構造に基づく透明ポリ(メチルシルセスキオキサン)エアロゲルの特異な柔軟性)

著者：上岡良太<sup>1</sup>・原瑤佑<sup>1</sup>・前野綾香<sup>2</sup>・梶弘典<sup>2</sup>・中西和樹<sup>3,4</sup>・金森主祥<sup>1</sup>

所属：<sup>1</sup>京都大学大学院理学研究科、<sup>2</sup>京都大学化学研究所、<sup>3</sup>名古屋大学未来材料・システム研究所、<sup>4</sup>京都大学物質-細胞統合システム拠点

掲載誌：*Nature Communications* DOI：10.1038/s41467-024-44713-5