

中性子ビームを使った新しいサーモグラフィの開発に成功

～産業製品内部の様々な熱エネルギー問題の解決に期待～

ポイント

- ・中性子ビームを機械に透過させる技術により、閉鎖空間内にある物質の内部温度を可視化。
- ・透過中性子の分光データに含まれる中性子非弾性散乱の温度依存性の解析により成功。
- ・従来の温度測定技術では困難であった社会の様々な熱エネルギー問題の解決への貢献に期待。

概要

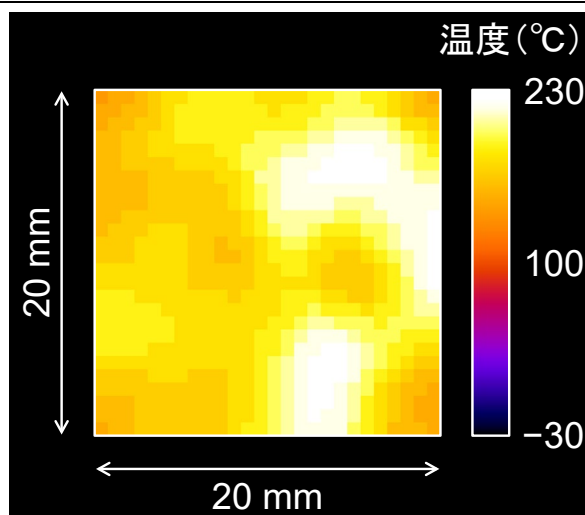
北海道大学大学院工学院修士課程（研究当時）の三好茉奈氏、同大学大学院工学研究院の佐藤博隆准教授、加美山隆教授並びに英国ラザフォード・アップルトン研究所の国際共同研究グループは、中性子ビームを使った新しい温度可視化技術（サーモグラフィ）の開発に成功しました。

温度測定はあらゆる場面で利用されている工学技術です。しかし、例えば産業製品の閉鎖空間内の物質の、さらに内部の温度を非接触かつ非侵襲で測定することは極めて困難です。そこで当該研究グループは、熱エネルギー工学の技術革新を志向し、物質透過能力の高い中性子^{*1}を利用する新しいサーモグラフィ^{*2}技術の開発に取り組みました。

中性子ビームを利用したサーモグラフィ技術は、粒子加速器^{*3}を利用した加速器駆動パルス中性子源^{*4}と、中性子飛行時間分析型イメージング検出器^{*5}を組み合わせたものです。検出器で得られる測定対象を透過した中性子の分光データから温度を計測しますが、本研究では温度に対して大きな変化を起こす中性子非弾性散乱^{*6}に着目しました。北海道大学大学院工学研究院の電子線形加速器駆動パルス中性子ビーム利用施設「HUNS」^{*7}において、真空チャンバー内に設置された鉄の内部温度を非接触かつ非侵襲で測定した結果、10°C程度の誤差で温度分布画像を取得することに成功しました。

将来的には、従来の温度測定技術では困難であった工業製品の閉鎖空間内の物質内部の非接触・非侵襲温度測定、ひいては、社会の様々な熱エネルギー問題の解決に資することが期待されます。

なお、本研究成果は、2023年1月13日（金）公開の Scientific Reports 誌にオンライン掲載されました。



真空チャンバー内に閉じ込められた厚さ10 mmの鉄の体積サーモグラフィ

【背景】

温度測定は身近な行為で、日頃から体温を計測する方も多いと思います。産業分野でも温度測定は極めて重要な行為であり、社会のエネルギー問題の解決にも直結します。温度測定法には非接触かつ非侵襲の赤外線サーモグラフィなど様々な技術がありますが、例えば機械の閉鎖空間内にある部品の、さらに体積内の温度を非接触かつ非侵襲で測定することは極めて困難です。

そこで、量子ビーム（放射線）の一種である中性子ビームを利用したイメージング（レントゲン撮影）技術により、物体内部の温度イメージングが試みられてきました。この方法は、粒子加速器を利用した加速器駆動パルス中性子源と、中性子飛行時間分析型イメージング検出器を組み合わせたものです。中性子は物質透過能力が高く、閉鎖空間内にある物体の、さらに体積内の温度を非接触かつ非侵襲で測定することが可能です。従来、検出器で観測できる透過中性子分光データ中の共鳴吸収あるいはブラッグ散乱を解析した温度測定が試みられてきましたが、課題も多くありました。

【研究手法】

当該研究グループは中性子の非弾性散乱に着目しました。非弾性散乱の温度に対する応答は極めて大きく（図 1）、従来よりも温度測定がしやすくなるというメリットがあります。しかし、北海道大学が開発した透過中性子分光データ解析ソフトウェア「RITS」を利用して非弾性散乱を解析し、温度を導出することを試みた結果、RITS の計算/解析アルゴリズム「非干渉法」では高温のデータを解析できないことが明らかになりました。そこで、北海道大学と英国ラザフォード・アップルトン研究所の国際共同研究グループは、RITS の弾性干渉性散乱（ブラッグ散乱）と非弾性散乱に関する二種類の原子変位パラメータ^{*8} の計算/解析アルゴリズムの修正を行い、体心立方格子型の結晶構造（原子配列）を持つ鉄のみに限定されますが、温度解析を実現することに成功しました。また、興味深いことに、計算予測に対して二種類の原子変位パラメータは、同じ比率になっていることも明らかになりました。

【研究成果】

開発した温度解析技術により、真空チャンバー内に閉じ込められた厚さ 10 mm の鉄の内部の温度の可視化を試みました（図 2）。実験は北海道大学大学院工学研究院の電子線形加速器駆動パルス中性子ビーム利用施設「HUNS」（図 3）において、鉄試料の温度を 21°C、98°C、192°C の 3 段階に変化させて行われました。各温度点で可視化された平均温度は 31°C、97°C、185°C であり（図 4）、10°C 程度の誤差で温度分布画像を取得することに成功しました。

【今後への期待】

従来の共鳴吸収法やブラッグ散乱法を利用した技術よりイメージング効率が高いと見込まれるため、本技術の実用化は早く進むことが期待されます。開発した技術を発展させることにより将来的には、従来の温度測定技術では困難であった産業製品の閉鎖空間内の物体内部の非接触・非侵襲温度測定、ひいては、社会の様々な熱エネルギー問題の解決に資することが期待されます。

【謝辞】

本研究は、日本学術振興会の科学研究費補助金・基盤研究（B）（研究代表：佐藤博隆、課題番号：22H01998）並びに学術研究助成基金助成金・基盤研究（C）（研究代表：佐藤博隆、課題番号：19K12641）の助成を受けて行われました。また、HUNS における実験では、長倉宏樹氏（北海道大学）、佐藤孝一氏（株式会社ハイブリッジ/北海道大学）、高田和幸氏（株式会社高田機械製作所）の協力を得ました。

論文情報

論文名 A new thermography using inelastic scattering analysis of wavelength-resolved neutron transmission imaging (波長分解型中性子透過イメージングの非弾性散乱解析を利用した新しいサーモグラフィ)

著者名 佐藤博隆¹、三好茉奈²、Ranggi Sahmura Ramadhan^{3,4}、Winfried Kockelmann⁴、加美山隆¹ (¹北海道大学大学院工学研究院、²北海道大学大学院工学院、³ブリストル大学、⁴ラザフォード・アップルトン研究所)

雑誌名 Scientific Reports (Nature Portfolio より刊行されている自然科学の総合誌)

D O I 10.1038/s41598-023-27857-0

公表日 2023年1月13日(金) (オンライン公開)

お問い合わせ先

北海道大学大学院工学研究院 准教授 佐藤博隆 (さとうひろたか)

T E L 011-706-6679 F A X 011-706-6679 メール h.sato@eng.hokudai.ac.jp

U R L <https://www.eng.hokudai.ac.jp/labo/QBMA/>

配信元

北海道大学社会共創部広報課 (〒060-0808 札幌市北区北8条西5丁目)

T E L 011-706-2610 F A X 011-706-2092 メール jp-press@general.hokudai.ac.jp

【参考図】

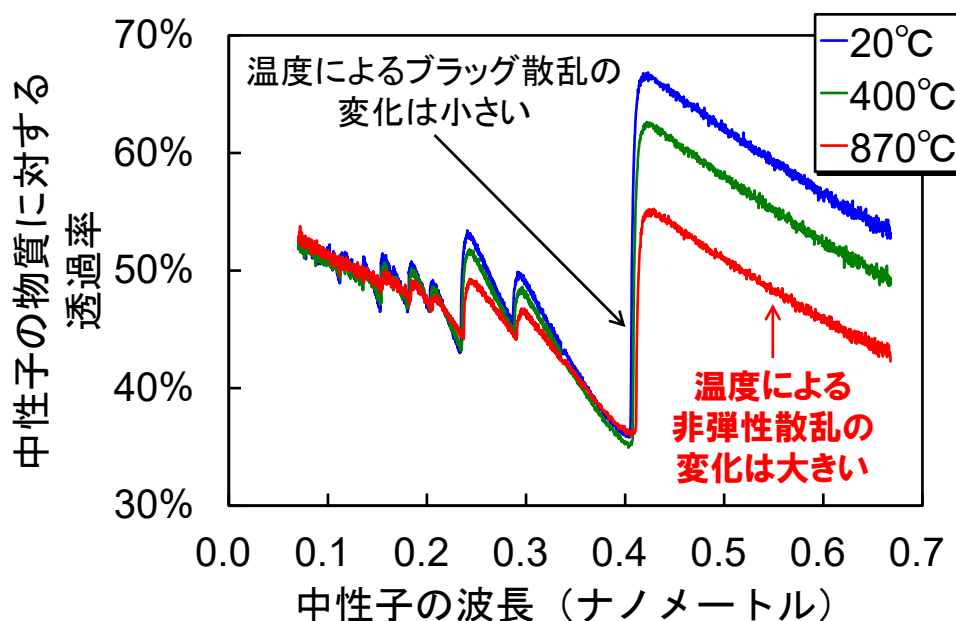


図 1. 中性子飛行時間分析型イメージング検出器の一つのピクセルで測定される体心立方格子型結晶構造(原子配列)の鉄を透過した中性子の分光データの例。中性子の波長は中性子飛行時間分析法により求められている。温度による非弾性散乱の変化は、ブラッグ散乱(弾性干渉性散乱)の変化よりも大きい。

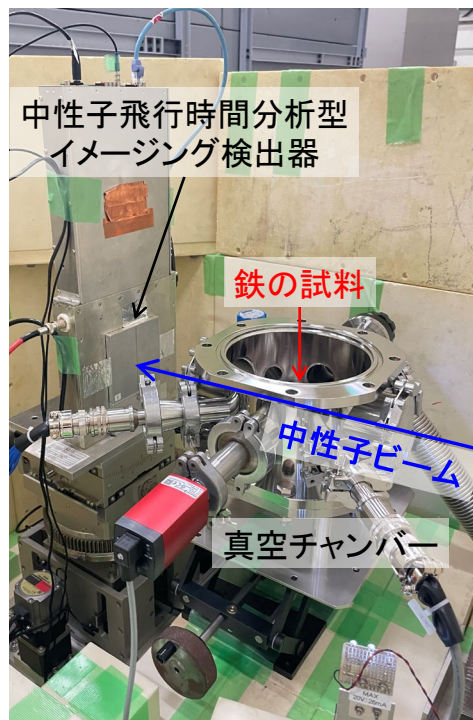


図 2. 北海道大学大学院工学研究院の電子線形加速器駆動パルス中性子ビーム利用施設「HUNS」における実験の様子。真空チャンバー内に鉄の試料が設置され、真空チャンバーと鉄試料を中性子ビームが透過し、中性子飛行時間分析型イメージング検出器で検出される。検出器の一つのピクセルでは図 1 のようなデータが測定される。このデータの非弾性散乱を温度に関して解析することで、各ピクセル位置で観測した鉄試料の各位置の温度を導出し、図 4 のような最終結果を得る。



図 3. 北海道大学大学院工学研究院の電子線形加速器駆動パルス中性子ビーム利用施設「HUNS」。

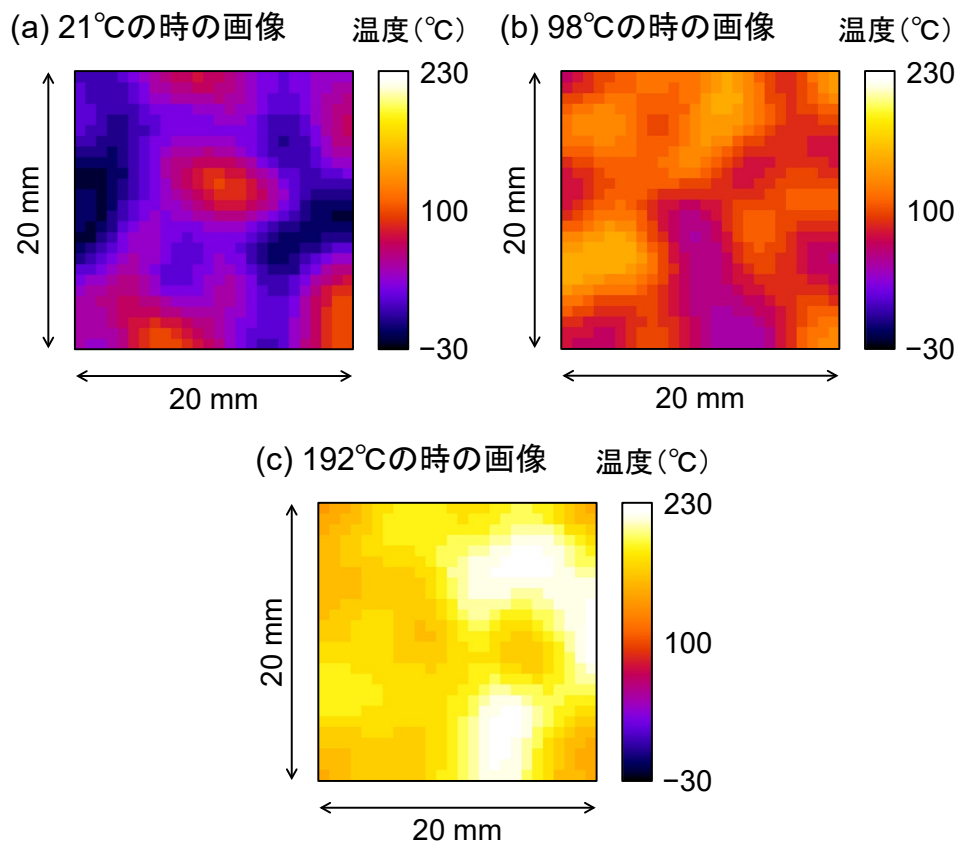


図 4. 真空チャンバー内に閉じ込められた厚さ 10 mm の鉄の体積サーモグラフィ。(a) → (b) → (c) と鉄の温度が高くなっている様子が 20 mm × 20 mm の実空間範囲に渡って可視化されている。

【用語解説】

- *1 中性子 … 原子核を構成する粒子（ハドロン）の一種。電荷を持っていない。物質を構成する原子（約 10^{-10} m の大きさ）と相互作用を起こさず、原子よりはるかに小さい原子核（約 10^{-15} m の大きさ）と相互作用を起こす。そのため、中性子は極めて高い物質透過能力を有している。
- *2 サーモグラフィ … 熱（温度）の空間分布を可視化する技術のこと。赤外線を利用したものが有名。
- *3 粒子加速器 … 荷電粒子を加速する装置のこと。
- *4 加速器駆動パルス中性子源 … 加速器で加速した荷電粒子（電子や陽子など）を利用して原子核から中性子を取り出す加速器駆動中性子源の内、瞬間的に中性子が発生する中性子源のこと。時間幅はナノ秒からマイクロ秒のオーダー。後述の中性子飛行時間分析法を行うために必要。
- *5 中性子飛行時間分析型イメージング検出器 … 中性子のイメージング（レントゲン撮影）を行うことのできる検出器の内、パルス中性子源から発生した連続エネルギーの中性子の飛行時間（速さ）分析により、中性子の運動エネルギーや波長を分けて検出（分光）できる検出器のこと。測定対象を透過した中性子の分光データ（図 1）の実空間依存データを万単位で得ることができ、物質情報（本研究においては「温度」）のイメージングに必要不可欠なデバイス。
- *6 中性子非弾性散乱 … 中性子と物質中の原子の間でエネルギーの授受が起こる中性子の散乱相互作用のこと。原子の熱振動によりエネルギーの授受が変わるので、これを利用して温度解析を行う。
- *7 HUNS … Hokkaido University Neutron Source（北海道大学中性子源）の略。
- *8 原子変位パラメータ … 原子の熱振動の大きさを表すパラメータのこと。非干渉法や準調和法といった計算/解析法がある。