



名古屋大学
NAGOYA UNIVERSITY

電力中央研究所
Central Research Institute of Electric Power Industry

配布先: 文部科学記者会、科学記者会、名古屋教育記者会、エネルギー記者会

2026 年 8 月 4 日

報道機関 各位

想定外の実験データを価値ある発見につなげる探索手法を開発！ 新手法により超伝導材料の性能向上に重要なナノ構造を発見

【本研究のポイント】

- ・実験で得られた「通常なら失敗やばらつきとして見過ごされるデータ」から、思いがけない価値ある発見(セレンディピティ^{注1)})につなげる新しい材料探索手法を実証した。
- ・データがどれだけ「通常と異なるか」を数値化する指標を導入し、新たな発見につながる可能性の高いデータを効率よく見つけ出す解析手法を開発した。
- ・超伝導^{注2)}薄膜中のナノロッド^{注3)}が上下方向にわずかにずれた新しいナノ構造を発見。この構造は、同条件で一般的に形成されるナノ構造と比べて、臨界電流密度(J_c)^{注4)}が約 2.9 倍高いことを明らかにした。
- ・データ科学と実験を融合した「データ駆動セレンディピティ探索」を提案。AI やロボットと組み合わせることで、材料開発に限らず幅広い科学分野における発見を加速する新たな研究アプローチとして期待される。

【研究概要】

名古屋大学大学院工学研究科の堀出 朋哉 准教授、伊藤 駿汰 博士後期課程学生、吉田 隆 教授の研究グループは、一般財団法人電力中央研究所グリッドイノベーション研究本部 ファシリティ技術研究部門の一瀬 中 シニアスペシャリストと共同で、データ科学と実験を組み合わせた「データ駆動セレンディピティ探索(データ科学を用いて、見過ごされていた発見の可能性を見つげ出す新しい探索手法)」により、超伝導薄膜中に、従来の探索では見過ごされていた新しいナノピンニング構造を発見しました。この構造は、同じ条件で一般的に形成されるナノ構造と比べて、臨界電流密度(J_c)が約 2.9 倍高いことを明らかにしました。

本研究では、実験データの中に埋もれた想定外の情報をデータ科学によって解析し、新たな発見につながる可能性の高いデータを抽出する「データ駆動セレンディピティ探索」を開発しました。これは、従来は見過ごされていたデータを科学的発見へとつなげる、新しい探索アプローチです。本手法を、核融合発電、電動航空機、MRI など次世代エネルギー・医療技術を支える超伝導線材の開発に適用しました。その結果、超伝導薄膜中にこれまで報告されていなかった新しいナノピンニング構造を発見しました。

本成果は、これまで研究者の経験・洞察に頼ることの多かったセレンディピティを、データ駆動によって支援する新しい探索手法を提案したものであり、超伝導分野にとどまらず幅広い分野への展開が期待されます。

本研究成果は、2026 年 8 月 3 日(日本時間)付で米国化学学会が発行するナノサイエンス分野を代表する国際学術誌『ACS Nano』に掲載されました。

【研究背景と内容】

背景

科学者は実験を通じて膨大なデータを取得し、その中から新しい発見や技術を生み出しています。しかし、実験では予期しない結果や想定外のデータが得られることも少なくありません。こうしたデータは従来、異常値や失敗として扱われ、見逃されることがありました。一方、このような想定外の結果から思いがけない価値ある発見につながる現象は「セレンディピティ」と呼ばれます。歴史的な科学的大発見の多くは、このような気付きから生まれてきました。セレンディピティは、研究者が十分な知識や経験を基に、想定外の現象やデータの中に新たな価値を見いだすことによって生まれると考えられています。

近年、AI やデータ科学の発展により、実験データを活用して材料開発を効率化・高度化するデータ駆動型研究が注目されています。そこで研究グループは、「どのようにすればセレンディピティを見逃さず、新たな発見につなげられるのか」という課題に着目し、想定外の実験データから新たな発見の手掛かりを抽出する「データ駆動セレンディピティ探索（データ科学を用いて、見過ごされていた発見の可能性を見つけ出す新しい探索手法）」を開発しました。これは、データ駆動によってセレンディピティをとらえる新しい科学的発見アプローチを提案するものです。

この手法を超伝導材料のナノ構造制御に適用しました。電気抵抗がゼロとなり、大きな電流を流すことができる超伝導線材は、核融合発電、MRI(磁気共鳴画像装置)、リニアモーターカー、電動航空機などの次世代技術を支える材料として近年注目されています。これらの用途では、強い磁場中でも大きな超伝導電流を流せることが求められ、その性能を決める重要な指標が臨界電流密度(以下 J_c と表記)です。 J_c を向上させるため、超伝導材料ではピンニングセンター^{注 5)}の最適化が約 20 年にわたり進められてきましたが、近年は性能向上が飽和しつつあり、従来の延長線上にはない新たなピンニング構造・機構の発見が求められています。

超伝導薄膜中では、自己組織化によってナノロッドが形成されます。ナノロッドが有効なピンニングセンターであることが知られていますが、形成機構は十分には解明されていないため、形成機構からプロセスを設計することには限界があります。さらに、超伝導薄膜の作製・評価には長い時間を要することから、探索範囲を広げるために膨大な数の実験を行うことは現実的ではありません。このような背景から、超伝導材料はデータ駆動セレンディピティ探索の有効性を実証する対象として適しています。

本研究では、データ駆動セレンディピティ探索を用いて、超伝導薄膜における新しいナノピンニング構造とそのピンニング機構を探索しました。

実験

本研究では、ナノロッドを導入した多層型 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ ^{注 6)} 薄膜を作製しました。低温、磁場中で J_c 測定を行いました。さらに特徴的な試料について、透過型電子顕微鏡(TEM)^{注 7)}を用いてナノ構造を詳細に観察しました。ナノ構造観察には時間がかかるため適切な試料を選択する必要があります。本研究では、この観察対象をデータ科学によって選び出す手法を開発し、想定外のデータを見逃さず新しい発見につなげました。

結果 発見

まず、12 サンプルの初期データを取得し、その結果を基に、ベイズ最適化^{注8)}によって提案された19 サンプルを追加で作製・評価しました。その結果、多くの試料ではベイズ最適化によって提案された条件では、多くの試料で超伝導特性が徐々に向上しました。しかし、一部の試料では予測を大きく上回る非常に高い特性が得られました(図1A)。

これらの高特性試料が、単なる実験ばらつきによるものなのか、それとも新しい現象を示す「想定外のデータ」であるのかを判断するため、異常スコア^{注9)}解析を行いました。その結果、二つの試料が他の試料とは明らかに異なる高い異常スコアを示すことが分かりました(図1B)。

これら二つの試料は、新しいナノピンニング構造の候補として、見過ごすことなく詳細に検討する必要があると示唆されました。従来であれば見過ごされてしまう可能性のあった「セレンディピティ試料」と位置付けられます。

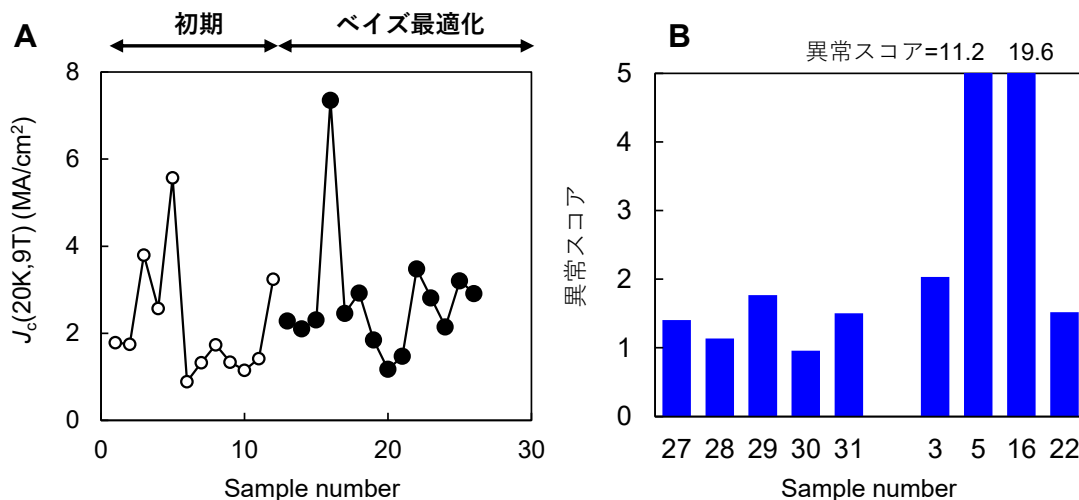


図1 (A) サンプル実験回数を進める中での J_c 推移、(B) サンプルの J_c 値に対して計算した異常スコア

高特性

データ駆動セレンディピティ探索によって見いだされた高特性試料(セレンディピティ試料)の近傍条件で作製した試料の出現頻度を解析しました。その結果、本研究の実験条件で一般的に形成される通常試料は、セレンディピティ試料に比べて約 5 倍高い頻度で観察されました(図2A)。一方、それぞれの平均 J_c を比較すると、セレンディピティ試料は高頻度で出現する通常試料の約 2.9 倍の性能を示しました(図2A)。このことから、セレンディピティ試料は統計的なばらつきの範囲内の高特性ではないことが示唆されます。

また、 J_c および磁場中のピン力密度(F_p)を評価した結果、セレンディピティ試料は特に高磁場領域において優れた特性を示しました。これは、新たに発見したナノ構造が磁束を効率よく捕捉し、高磁場下でも高い超伝導特性を維持できることを示しています(図2B)。統計的なばらつきでは説明できない高特性であることが示されました。

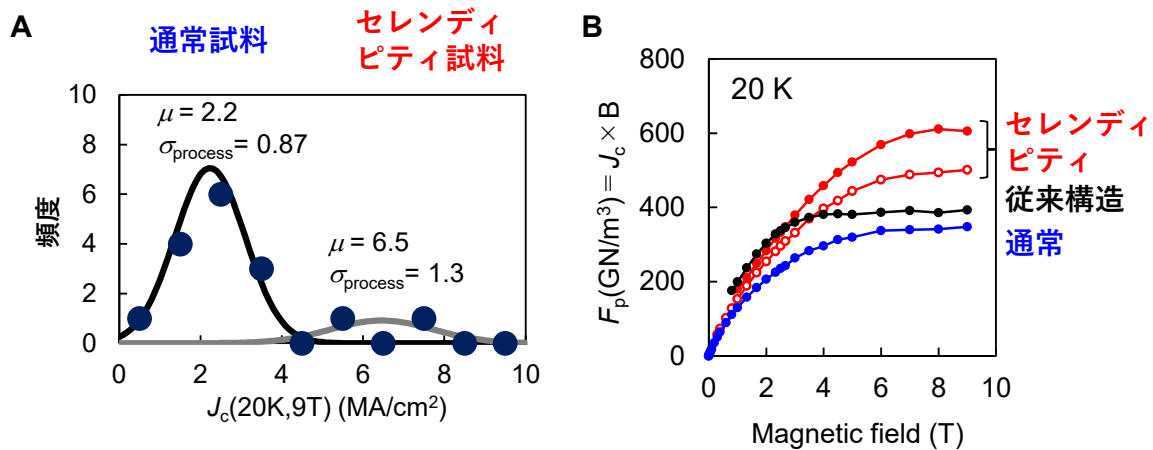


図 2 (A) J_c の出現頻度、2つのピークが観察される、(B) $F_p = J_c \times \text{磁場}$ の磁場依存性、セレンディピティ試料は F_p の磁場依存性が他の試料と異なることが分かる。

構造説明

高性能化の要因を明らかにするため、従来構造試料、本研究の実験条件で一般的に形成される通常試料、およびデータ駆動セレンディピティ探索によって見いだした高特性試料(以下、セレンディピティ試料)について、透過型電子顕微鏡(TEM)を用いてナノ構造を観察しました。図 3 は薄膜断面、図 4 は薄膜面内を観察した結果を示しています。

従来ナノロッド試料では、膜厚方向に伸びたナノロッドがわずかに傾斜して形成されており、面内では楕円状に観察されました。一方、通常試料では、ナノロッドが途中で分断され、面内でも配列の乱れがみられました。

これに対し、セレンディピティ試料では、周期的な多層構造の形成に伴い、ナノロッドの位置が膜厚方向にわずかにずれた、これまでに報告されていない新しいナノ構造が確認されました。従来試料ではナノロッドが同じ位置に連続して成長するのに対し、本構造では各層でナノロッドの位置がわずかに変化していることが特徴です。

さらに、この新しいナノ構造について磁束ピンニングのエネルギー計算を行った結果、ナノロッドの位置が上下方向にわずかにずれることで磁束をより効率よく捕捉できることが分かりました。このことが J_c を大幅に向上させた要因であると考えられます。以上の結果から、セレンディピティ試料で観察された高い特性は、新しいナノ構造の形成に伴ってピンニング機構が変化したことによると結論付けました。

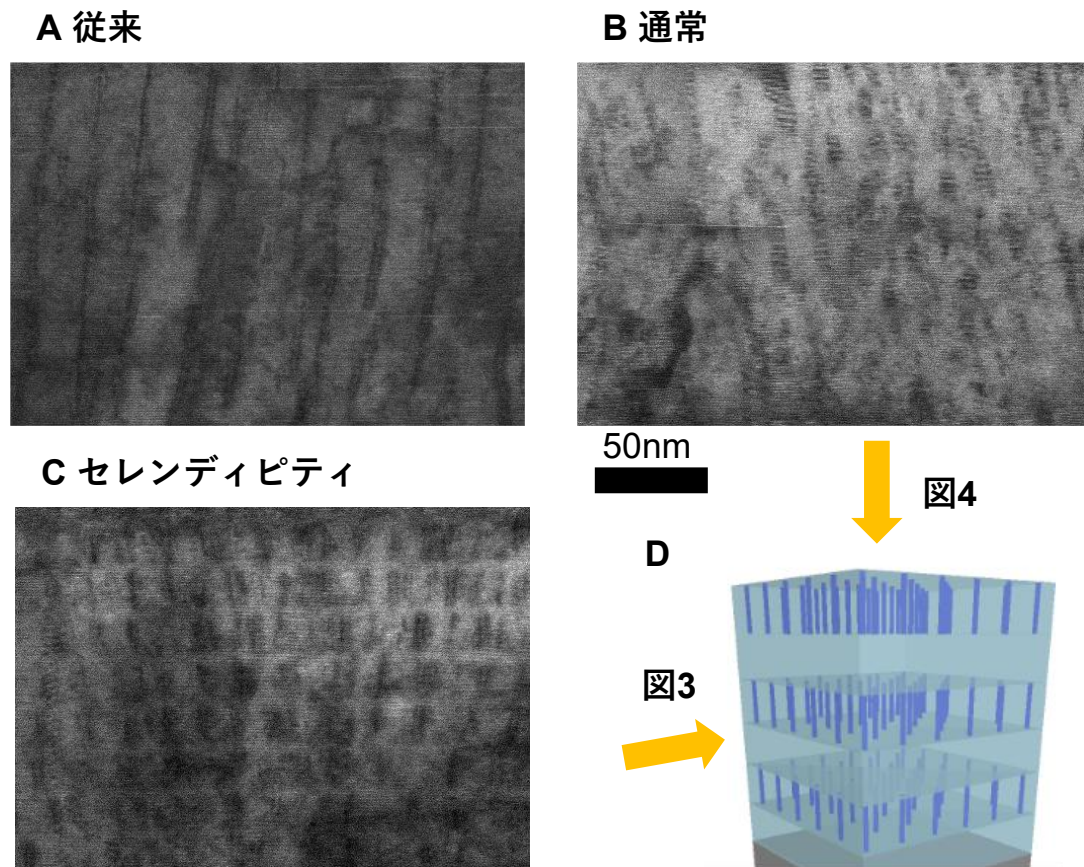


図 3(A) 従来構造、(B)通常試料、(C)セレンディピティ試料の断面観察結果。セレンディピティ試料は粒子が層状に配列していることが分かる。(D) 構造と観察方向の模式図。模式図のため層数は少なく書いている。

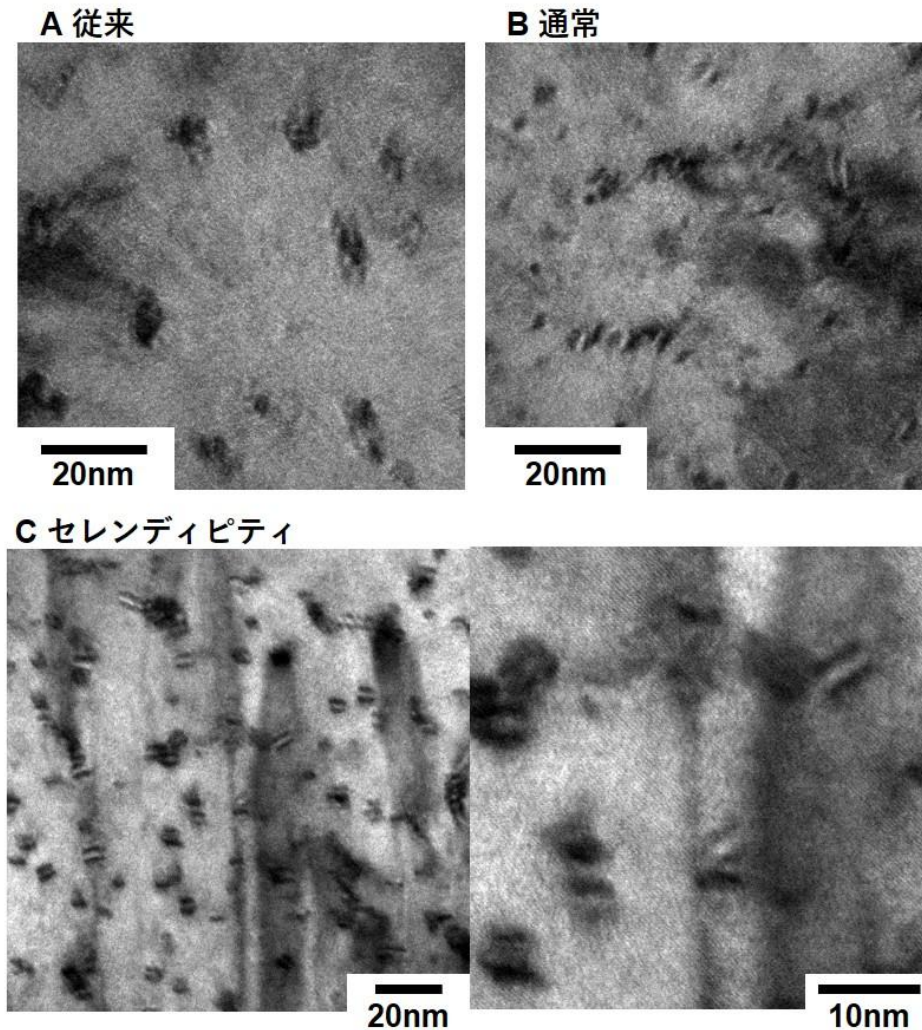


図 4 (A) 従来構造、(B)高頻度で発生する通常試料、(C)セレンディピティ試料の平面観察結果。セレンディピティ試料では二つの粒子が上下方向にわずかにずれていることを示している。

【成果の意義】

セレンディピティは、「思いがけない価値ある発見」を意味し、これまでは研究者の経験や洞察、気づきに大きく依存してきました。本研究では、想定外の実験データをデータ科学によって解析することで、セレンディピティにつながる手掛かりを効率的に抽出する「データ駆動セレンディピティ探索」を実証しました。これにより、従来は研究者個人の洞察や気づきに頼ることの多かったセレンディピティを、データに基づいて見いだす新しい研究アプローチを示しました。今後は、AI や自動実験ロボットと組み合わせることで、科学的発見システムへの展開が期待されます。

また超伝導線材の開発という観点では、ナノロッドの位置が膜厚方向にわずかにずれる新しいナノピンニング構造が、 J_c を大幅に向上させる重要な設計指針であることを明らかにしました。これまで十分に注目されてこなかったナノロッドの位置関係という新たな設計パラメータが示されたことで、今後のナノ構造設計や成膜プロセス設計を通じて、さらに高性能な超伝導線材の開発につながることを期待されます。

本研究は、新しいナノピンニング構造を発見しただけでなく、「セレンディピティをデータ駆動で見いだす」という新しい科学的発見アプローチを提案した点に大きな意義があります。

本研究は、科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業（JST-CREST）、革新的計測解析領域、「計測データ駆動型薄膜プロセス最適化システムの開発(代表:吉田 隆(名古屋大学)、JPMJCR2336)」支援のもとで行われたものです。

【用語説明】

注 1)セレンディピティ:

実験中の失敗や予期しない現象、想定外のデータなどをきっかけに、新たな発見につながる。科学史上、多くの重要な発見がセレンディピティによってもたらされてきた。

注2)超伝導:

物質を冷却していくと突然電気抵抗がゼロになる現象。抵抗ゼロで大電流を流せる超伝導体を用いて線材を作製し、超伝導マグネットなどに応用されている。

注 3)ナノロッド:

直径数～数十ナノメートル程度の棒状のナノ構造。

注 4)臨界電流密度(J_c):

超伝導体に電流を流すとある電流値までは抵抗ゼロを維持できるが、ある値以上の電流を流すと電圧が発生する。電圧が発生し始める電流を臨界電流(単位面積当たりで表したものを臨界電流密度という)。臨界電流密度が高いほど、多くの超伝導電流を流せるため、高性能の超伝導線材を作製できる。

注 5)ピンニングセンター:

超伝導体中で磁束が動くのを抑えるための不純物や欠陥のこと。ピンニングセンターにより臨界電流密度が向上する。今回対象とした $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ ではナノスケールのピンニングセンターが有効である。

注6) $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$:

1987 年に発見された高温超伝導体。磁場中で高い臨界電流密度を有することから、特に高磁場での超伝導応用^{注 5)}において期待されている材料。複数のメーカーが線材製造を進めている。

注 7)透過型電子顕微鏡(TEM):

試料を薄片化して電子線を透過させ、試料内の構造を観察する手法。多くの材料の解析に使われているが、試料加工が必要で観察には時間がかかる。

注 8)ベイズ最適化:

データを不確実性も含めて学習したモデルから、期待値(獲得関数)を最大化する実験条件を探索する手法。材料やプロセスの最適化で用いられている。

注 9)異常スコア:

データが予測される値からどの程度離れているかを数値化した指標。異常検知などさまざまな分野で使われる。本研究ではこの値を基にセレンディピティ試料を特定した。

【論文情報】

雑誌名: ACS Nano

論文タイトル: Data-Driven Serendipitous Discovery of a Self-Organized Nanostructure for Enhanced Pinning in Superconducting Films

著者: Tomoya Horide, Shunta Ito, Ataru Ichinose, Yutaka Yoshida

DOI: 10.1021/acsnano.6c05455

URL: <https://doi.org/10.1021/acsnano.6c05455>