



名古屋大学
NAGOYA UNIVERSITY

配布先: 文部科学記者会、科学記者会、名古屋教育記者会

報道の解禁日(日本時間)

(テレビ, ラジオ, インターネット) : 2025 年 6 月 23 日(月) 18 時

(新聞) : 2025 年 6 月 24 日(火) 付朝刊

2025 年 6 月 20 日

報道機関 各位

超伝導線材製造効率化に向けて 製造現場の“ものづくり”効率化へ大きく前進

【本研究のポイント】

- ・超伝導^{注 1)}線材のデータ・モデル^{注 2)}駆動型製造に向けて、作製プロセスのモデル化に成功した。
- ・実験室での理想的な状況でなく、製造装置が変わる実際の製造現場でも対応可能な製造 AI 化手法を構築した。

【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、吉田 隆 教授らの研究グループは、超伝導線材製造の効率化に向けて、製造装置が変わっても対応可能な現場指向型製造 AI モデルを開発しました。

次世代エネルギーとして注目される核融合や、電動航空機、さらに医療現場で使われる MRI などの開発に欠かせないのが、超伝導線材と呼ばれる材料です。こうした技術が広く実用化されるためには、この超伝導線材を大量に、安く作れるかが重要な課題となっています。しかし、超伝導線材に限らず材料の制御は非常に繊細で、長年にわたり製造現場では、熟練した技術者の「経験」や「勘」に頼って最適化したプロセスで生産が行われてきました。近年、こうしたスキルを人工知能(AI)に学ばせ、製造の効率を上げようという取り組みが進められています。ところが、同じ材料を作っている、使っている製造装置や細かな調整の仕方が異なるため、AI による一律の対応が難しいという課題がありました。

そこで本研究では、「製造装置は違っても、プロセスの現象は共通している」という点に着目しました。さまざまな製造装置から得られたデータを分析し、共通するプロセスの特徴を見つけ出すことに成功しました。

この成果をもとに、AI を活用した製造管理やプロセスの最適化がさらに進めば、超伝導線材だけでなく、さまざまな材料の製造がより効率的になり、日本のものづくりの競争力向上にもつながると期待されます。

本研究成果は、2025年 6 月 23 日 18 時(日本時間)付で Springer Nature 社の国際科学誌『Communications Engineering』に掲載(オンライン)されます。

【研究背景と内容】

背景

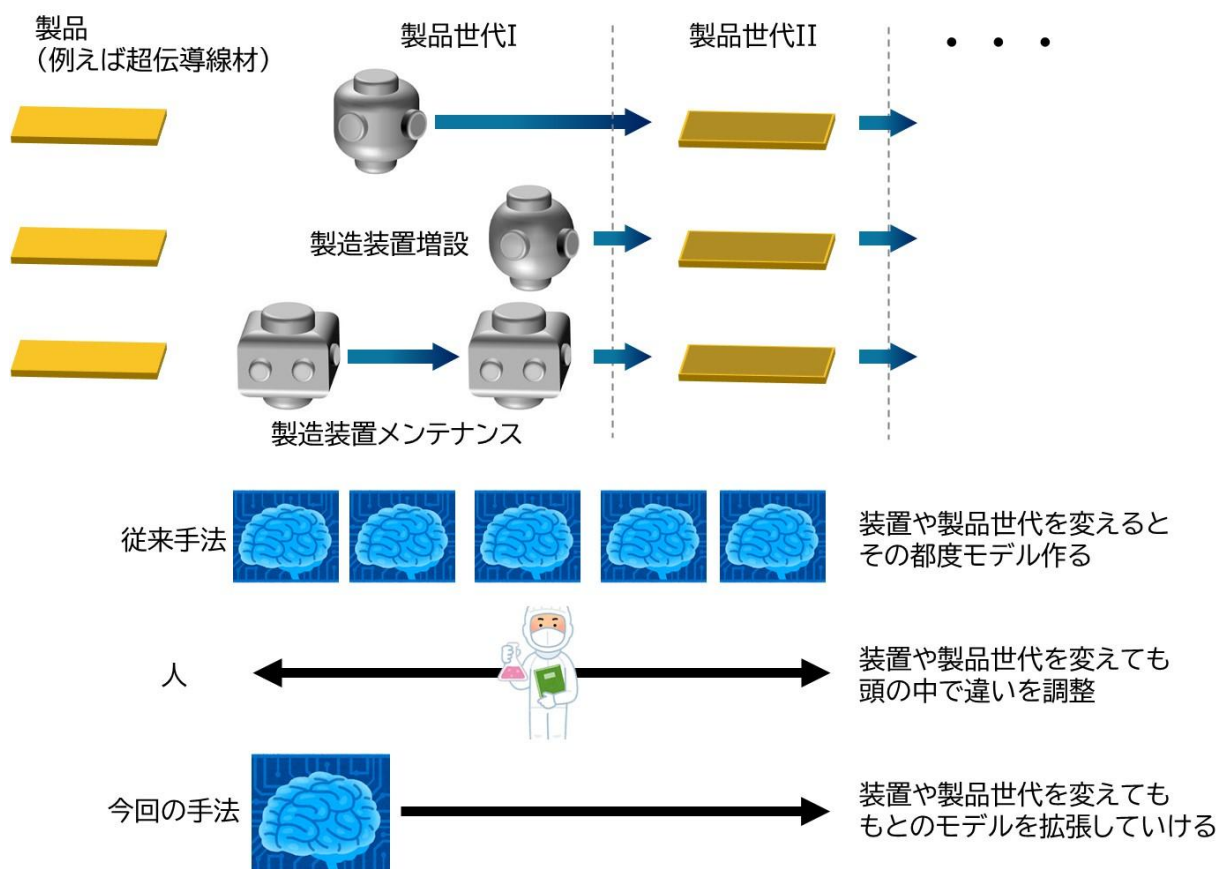


図1 製造における AI の活用

電気の流れに「抵抗」がなく、大きな電流を通すことができる「超伝導線材」が、今注目を集めています。核融合発電や MRI(磁気共鳴画像装置)、リニアモーターカー、電動航空機といった最先端技術の分野での活用が期待されていますが、これらの用途に使うには、超伝導の特性を活かした「マグネット(磁石)」をつくる必要があります。そのためには、長さがキロメートル単位に及ぶ超伝導線材を大量かつ低コストで製造する技術が求められています。こうした中で、人工知能(AI)を活用した製造工程の効率化が注目されています。

製造業全体を見ても、AI の活用は重要な課題です。材料の製造現場では熟練の技術者の経験や勘に頼っている部分が多く、人手不足やベテラン技術者の引退が進む中で、製造力の維持が難しくなることも懸念されます。このような課題の解決に向けて AI の活用は鍵となっています。

AI は膨大なデータから傾向を読み取り、作業を自動化したり最適化したりするのが得意です。しかし、製造現場では使っている製造装置や製品ごとの細かな工夫が異なり、すべてを数字で表すのが難しいという現実があります。このため、使えるデータも限られており、AI が対応できるのは「特定の装置」や「過去の製品」に限られると考えられ、汎用的に使うのは難しいという課題があります。

一方で、人間の技術者は、こうした装置や製品の違いを経験や知識によって柔軟に理解し、対応することができます。現時点では「AI を使うより、人間の方が効率がいいのでは？」と感じる技術者もいるのではないのでしょうか。

AI が人のように装置や製品の違いを理解し、広い範囲に対応できるようになれば、製造業の AI 化は大きく進む可能性があります。今後の開発や研究により、より汎用性の高い AI モデルが実現すれば、製造現場で行われている製造を AI を用いて効率化する足掛かりになるかもしれません。

実験

本研究では、複数のパルスレーザー蒸着^{注3)}装置を使って、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ ^{注4)}の薄膜を作製しました。その際、成膜時の温度(T_{sub})を変化させることで、どのように性能が変わるかを調べました。特徴的なのは、異なる装置を用いて、それぞれ独立した5種類のグループの試料を用意した点です。装置が違えば、同じ材料・条件であっても、最終的な性能に微妙な差が出るということが知られています。研究では、薄膜の超伝導性能を示す重要な指標である「臨界電流密度(J_c)」^{注6)}を評価しました。これは、電気を損失なく流す能力を示すもので、超伝導材料の実用化には欠かせない値です。

AI

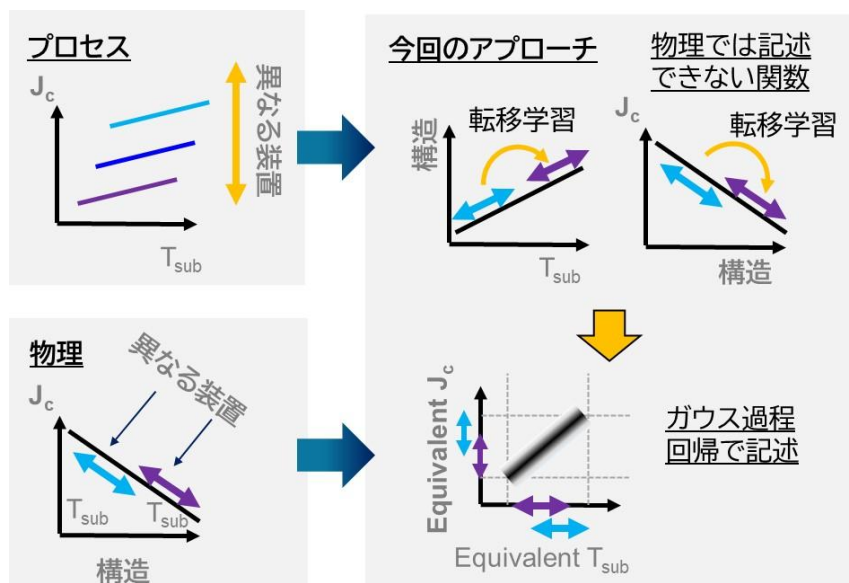


図2 本研究のモデル化の模式図

製品を作る際の「プロセス条件」と「性能(特性)」の関係を調べるのは、ものづくりの基本です。従来の研究では、異なる条件で何度も実験を行い、どうすればより良い性能が得られるかを探ってきました。製造装置が異なると、同じような条件でも性能の「数値」が変わることがあります。性能の動き方(傾向)は似ていても、細かな違いが出るため、違う装置の実験を比較することは通常行われません。また、材料の構造と性能の関係を調べる際には、理論モデルと照らし合わせながら、より深い理解が行われます。ここでも製造装

置の「違い」をデジタル化することは困難で、解析に組み込みませんでした。

本研究では、異なる装置でつくられた 5 つの試料グループを対象に、AI 技術を活用してこの問題に挑みました。複雑な製造プロセスの動きを「ガウス過程回帰」^{注 7)}という手法でモデル化し、装置による違いを「転移学習」^{注 8)}を使って数値化することに成功しました。それぞれの装置ごとに AI モデルを作成し、装置ごとの共通性を学習させることで、データの少ない装置でも精度よく性能を予測できるようにしました。

結果

5 種類の異なる試料グループについて、膜の性能を示す「臨界電流密度(J_c)」と成膜温度(T_{sub})の関係を調べました。図 3(中)に示されているように、性能と温度の関係は装置ごとにバラバラです。見た目には相関がなく、一貫性がないように見えます。これは、装置ごとに温度の測定箇所が異なるうえ、装置そのものの違いといった「数値で表せない要素」が結果に影響しているためです。

一方で、すべての装置で「同じ超伝導膜」を作っているという点に注目すると、物理現象として共通している部分が多いはずです。そこで装置に依存しない「プロセスの共通性」を AI によって抽出できないか、という発想に立ちました。新たに開発した手法を用いて複雑なデータをモデル化したところ、バラバラに見えていたデータが一つの汎用モデルで説明できるようになりました(図 3・右下参照)。

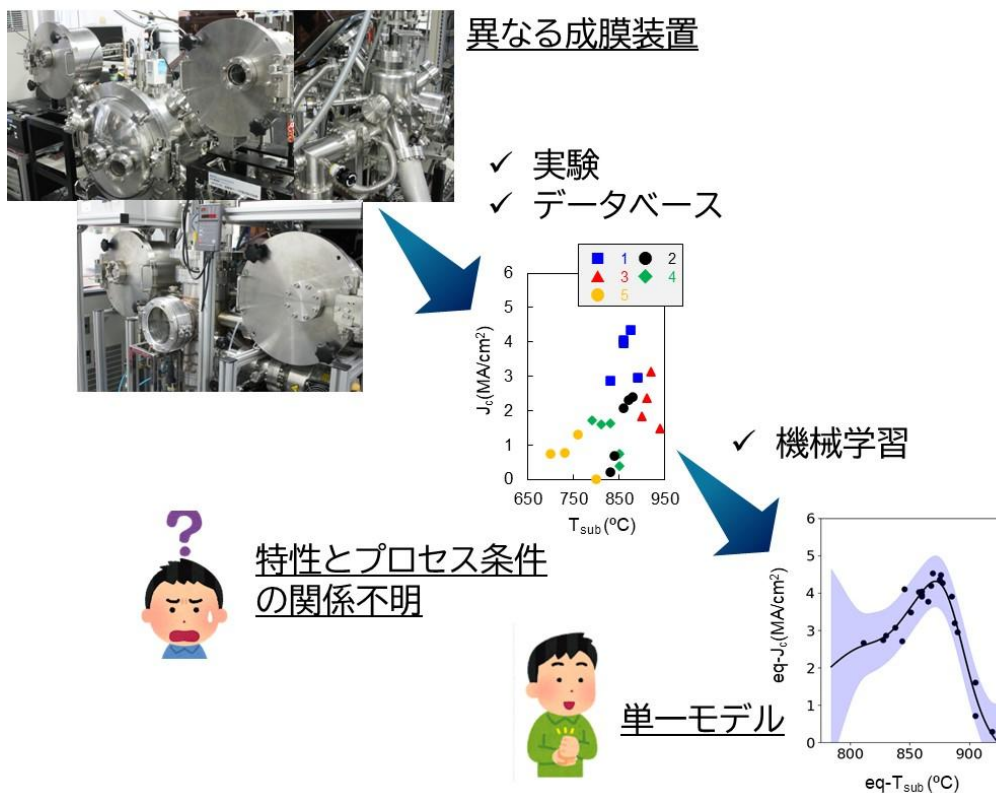


図 3 本研究の結果。異なる成膜装置(左上)、作製した試料の特性プロセス条件の関係(中)、異なる試料群の結果をモデル化した結果(右下)。

応用

装置の違いを超えて共通の製造モデルを構築した本研究では、さらにそのAIモデルを拡張し、「測定の手間」を減らす試みを行いました。超伝導材料の性能は、応用される磁場の条件によって大きく変わります。たとえば、医療用のMRIや電力機器、リニアモーターカーなど、それぞれ異なる環境(磁場や温度)で使われるため、材料がどれだけ電流を流せるか(臨界電流密度: J_c)を、磁場や温度ごとに詳しく調べる必要があります。ところが、磁場中での J_c 測定は、極低温かつ高磁場という特殊な環境で行わなければならない、専用の装置や多くの時間がかかるのが実情です。

そこで、ある磁場条件で得られたデータから、別の磁場条件での J_c を予測するAIモデルを開発しました。図4に示されたように、モデルによる予測値(黒線)が実測値(赤や青の点)と一致すれば、現象が正しくモデルで表せていることを意味します。

最初は、通常の手法や対数変換を使ったモデルではうまく予測できませんでした。そこで、「物理の知識」をAIに組み込むことを考えました。 J_c をそのまま扱うのではなく、 $1/J_c^2$ や $1/J_c^3$ といった関数に変換することで、物理的な意味合いを反映させながら予測モデルを再構築しました。

その結果、装置に加え、磁場の条件が異なっても、 J_c の変化を一つのモデルで説明できるようになりました。磁場ごとに測定を繰り返さずとも性能を予測できる、より汎用的なAIモデルの実現に成功しました。

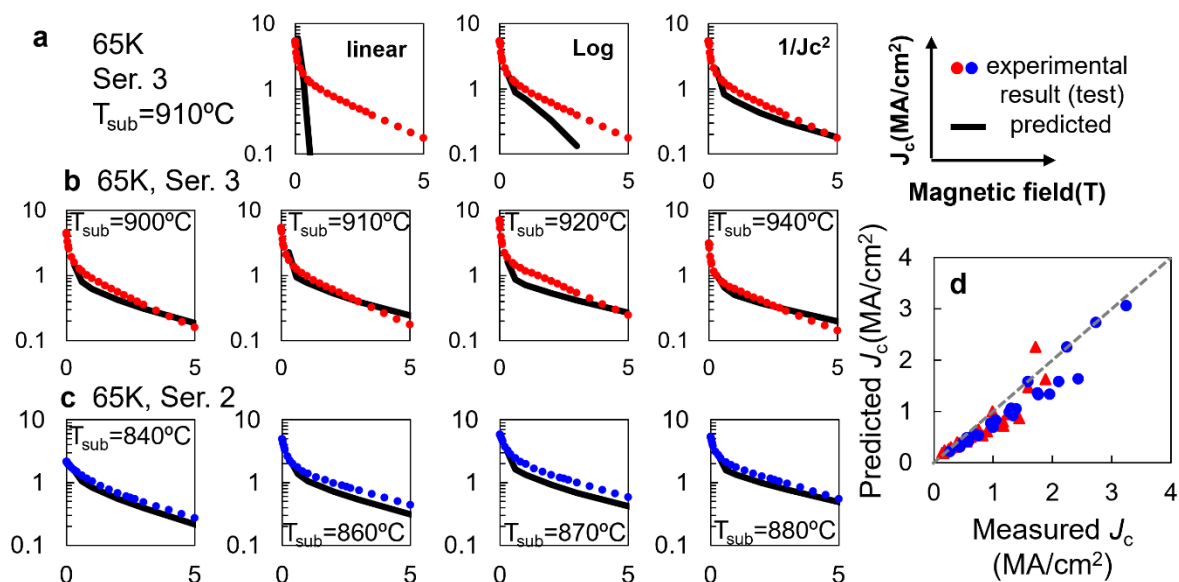


図4 J_c の予測値と測定値の比較。(a) J_c 、 $\text{Log } J_c$ 、 $1/J_c^2$ を用いて J_c を変換したうえで、 J_c の磁場依存性を予測した結果。(b)(c) $1/J_c^3$ を変換関数に用いて J_c を予測した結果。8つの試料に対する結果を異なる8つのパネルに示している。(d)計測値と予測値の比較。点線の上に来ると予測と測定が一致し、モデルがうまくできていることを示す。

【成果の意義】

本研究では、複数の異なる装置を用いた材料製造のプロセスを、AI によって一つの枠組みで解析することに挑戦しました。これは、実際の製造現場に AI を導入する際に直面するであろう装置や製品の違いという問題に対して、解決策を提示する試みでもあります。装置が違えば単純な比較が行いにくく、「理想的なデータ」とは言いがたい場面も多く存在します。それでも、現実の製造現場で AI を使いこなすためには、そうした多様性に柔軟に対応できるモデルが必要です。今回の成果は、そうした製造現場の AI 化の課題に対する解決策を示した点で、大きな前進といえます。今回の手法が製造現場に活用されれば、未来のものづくりを支える強力な武器となると期待しています。

AI の力を活かした新たな製造のかたちに向けた一步を示すことができました。実践的な活用に向け、現在研究室ではこの研究成果を超伝導線材の製造に応用すべく研究を進めています。

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（研究代表者：吉田 隆（名古屋大学大学院工学研究科・教授）」、公益財団法人 中部電気利用基礎研究振興財団の支援のもとで行われたものです。

【用語説明】

注 1)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。

注 2)モデル:

入力データに対して出力データを求める計算やアルゴリズム。AI ではデータを使って(学習して)モデルを作成するため、データが重要である。

注 3)パルスレーザー蒸着:

$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 超伝導テープ線材を作製する手法のひとつ。レーザーによって $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ を分解し、分解した $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ を金属テープの上に成長させることで $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 超伝導テープ線材が作製される。複数の製造メーカーがこの手法を使っている。

注 4) $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$:

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 5)超伝導応用:

抵抗ゼロで大電流を流せる超伝導体を用いて超電導マグネットを作製することができる。コイルを作るために km 級の長さの超伝導線材が必要である。

注 6)臨界電流密度:

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(単位面積当たりで考える場合は臨界電流密度)と言う。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 7) ガウス過程回帰:

ガウス過程の確率分布を利用した回帰手法。少量のデータでもモデルが作成できる。

注 8) 転移学習:

すでに別の系で構築された学習モデルを、別の対象に適用して精度の高い学習モデルを作成する手法。

【論文情報】

雑誌名: Communications Engineering

論文タイトル: Integrated Process-Property Modeling of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ Superconducting Film for Data and Model Driven Process Design

著者: Tomoya Horide, Shin Okumura, Shunta Ito, Yutaka Yoshida

DOI: 10.1038/s44172-025-00434-1

URL: <https://www.nature.com/articles/s44172-025-00434-1>



東海国立大学機構は、岐阜大学と名古屋大学を運営する国立大学法人です。

国際的な競争力向上と地域創生への貢献を両輪とした発展を目指します。

東海国立大学機構 HP <https://www.thers.ac.jp/>

