

2026 年 10 月 2 日

報道機関 各位

国立大学法人東北大学

構造用金属材料の実験を一気通貫で自動化 —熱処理から構造・力学特性評価まで、AI 自律探索に道—

【発表のポイント】

- 広大な熱処理条件空間を探索するための全自動実験システムの実現が、鉄鋼などのバルク構造用金属材料^(注1)において求められています。
- 熱処理炉、X 線回折による構造解析、力学特性評価装置をロボットアームで統合し、世界的にも先駆的なバルク金属試料の全自動熱処理・構造・特性評価システムを開発しました。
- プロセス—構造—特性データを高効率創出するこのシステムの実現は、バルク金属材料での AI 自律探索の道を拓く成果です。

【概要】

鉄鋼などのバルク構造用金属材料は、熱処理によって同じ組成でも構造や特性が大きく変わるため、広大な熱処理条件空間を高効率探索できる自動実験システムの実現が求められています。しかし、バルク金属の自動実験は、試料の扱いや大掛かりな装置が必要なため困難であり、世界的に遅れています。

東北大学金属材料研究所の謝玉麟助教、関田さやか学術研究員、古原忠教授（研究当時、現物質・材料研究機構（NIMS））、宮本吾郎教授、NIMS の田村亮グループリーダー、株式会社 LaboRobo の稲川雅也代表取締役（研究当時、現 TsubameLab CAIO）の研究チームは、高周波誘導加熱炉、X 線回折装置、微小衝撃試験機をロボットアームで統合し、バルク金属試料の熱処理・構造解析・力学特性評価を連続して自動実験するシステムを開発しました。このシステムでは、従来の人による実験に比べ 10 倍以上の速度で一連の処理・評価を行い、同等の精度で力学特性を評価し、かつシステム小型化も実現しています。

今後、次条件提案 AI と組み合わせることで、革新的な構造用金属材料の自動自律探索への発展が期待されます。

本研究成果は 2026 年 9 月 18 日に、総合科学誌 Science and Technology of Advanced Materials: Methods にオンライン掲載されました。

【詳細な説明】

研究の背景

構造用金属材料では、同じ合金組成でも熱処理条件により構造と力学特性が変わります。複数ステップの温度と時間の組み合わせからなる熱処理条件空間は広大ですが、熱処理、構造評価、特性評価を人が行くと、速くても15条件／週の手作業でしか探索できませんでした。そのため、液体・粉末・薄膜材料分野で実現している自動実験による高効率探索が構造用金属分野でも望まれていました。しかし、バルク金属材料では、試料搬送、熱処理、装置間の受け渡し、力学特性評価の自動化が難しく、構造用材料における自動実験システムの実現は世界的にもほとんど例がなく、熱処理条件を探索できる自動実験システムはありませんでした。

そこで本研究グループは、種々の条件で熱処理ができる制御炉と、構造評価装置、力学特性評価装置をロボットアームで統合し、プロセス—構造—特性の関係を全自動で高効率取得できる自動実験システムを開発しました。

今回の取り組み

小型試料（ $40 \times 4 \times 1.5 \text{ mm}^3$ ）を自動供給装置から6軸ロボットアームで取り出し、プログラム制御高周波誘導加熱炉で熱処理した後、X線回折（XRD）^{（注2）}で構造情報を取得し、微小衝撃試験で力学特性を評価します。熱処理炉はガス冷却機構も備えており、急冷処理も含めた多様な条件で熱処理ができます。XRDにより得られた回折情報から、自動データ解析機能により各相割合に加え、転位や結晶子サイズ情報を反映する回折ピーク幅を評価できます。また、衝撃試験により、硬さのようなスカラー値ではなく、変形・破壊特性を直接表す荷重—変位曲線が得られるため、曲げ強度や破壊吸収エネルギーを評価できます。破断後の試料回収まで自動化し、これら複数の装置を一台のPCで制御し、複数装置から得られたデータを階層構造を持つデータベースに蓄積します。

開発したシステムを活用することで、人が行う従来実験に比べて10倍以上となる、150条件／週以上の速度での探索が可能となりました。また、小型試料ならびに小型評価装置を活用することで、システム本体が約2 m²に収まる装置小型化を実現しました（図1、2）。

人が測定した硬さと本システムによる自動実験で得られる曲げ強度は、高い直線相関（ $R^2=0.975$ ）を示し、従来のマニュアル実験と同等精度で力学特性を評価できることが分かりました。さらに、自動実験で必須となる熱処理の高精度制御に向け、PID制御^{（注3）}のパラメータ調整についても、NIMS Orchestration System（NIMO）^{（注4）}のベイズ最適化機能で実現しました。また、本システムの探索性能を確認するため、低合金鋼の従来型1段焼戻し^{（注5）}と非

従来型 2 段焼戻しについて探索を行い、非従来型 2 段焼戻しでは 1 段焼戻しを上回る高い強度が見られ、非従来型熱処理による新たな材料開発の可能性が見出されています。

今後の展開

今後は、XRD の構造情報と衝撃試験の力学特性を AI に入力し、AI が次の熱処理条件を提案する「実験－解析－次条件提案」の閉ループ自律探索へ拡張します。また、電子顕微鏡と自動研磨装置との統合による金属組織写真の自動取得機能を追加し、従来に比べ添加元素量を削減した上で同等以上の力学特性を発揮する革新的な省資源型構造用金属材料などの開発加速につなげます。

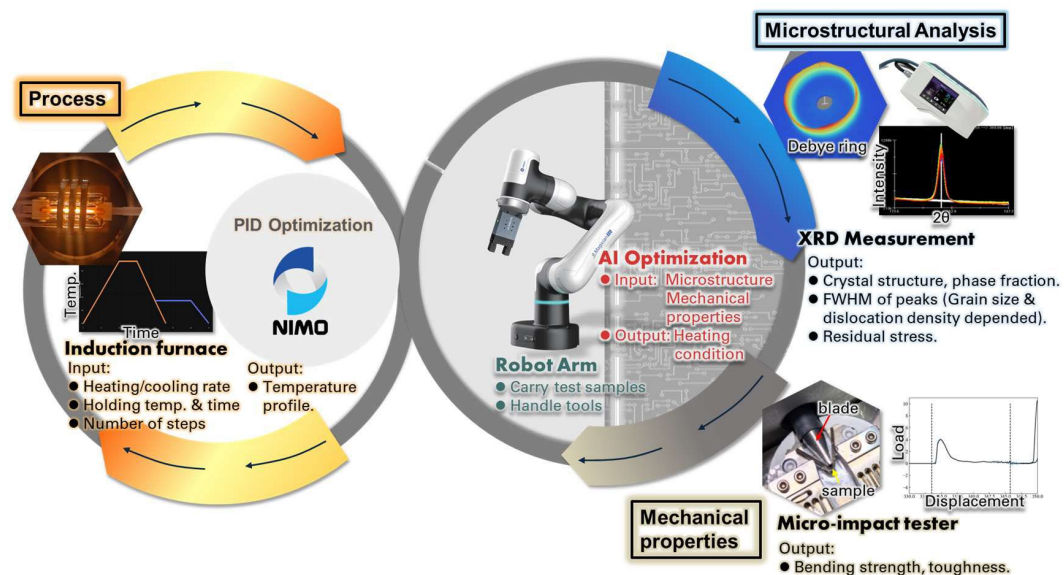


図 1. 自動実験システムの概念図。熱処理、XRD 組織解析、衝撃試験をロボット搬送で連携。本研究では炉の PID 制御を最適化し、将来は閉ループ自律探索へ拡張します。

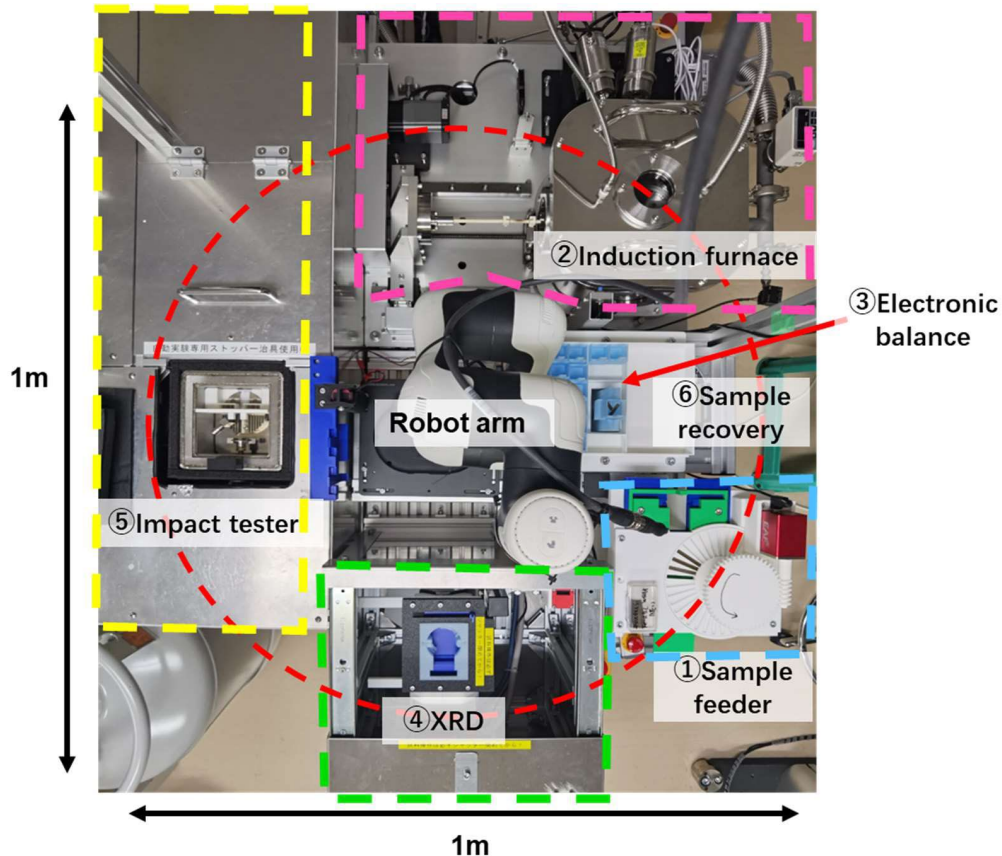


図 2. 上から見た自動実験システム。約 2 m^2 の範囲に各装置を配置し、中央の 6 軸ロボットアームが試料を搬送します。

【謝辞】

本研究は、文部科学省「データ創出・活用型マテリアル研究開発プロジェクト」(JPMXP1122684766、JPMXP1121467561)、創発的研究支援プログラム (JPMJFR203W)、JSPS 科研費 特別研究員奨励費 (JP24KJ0367)、JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム (SPRING) (JPMJSP2114) の支援を受けました。

【用語説明】

- 注1. バルク構造用金属材料：薄膜や粉末ではなく、一定の厚みと形状を持つ固体の金属材料で、建築物や機械などの荷重を支える部材に用いられるもの。本研究では $40 \times 4 \times 1.5\text{ mm}^3$ の板状試料を用いた。
- 注2. X線回折 (XRD)：材料に X 線を照射し、回折した X 線から結晶構造や相、回折ピーク幅などの情報を得る方法。本研究ではピーク幅の相対変化を組織変化の指標として利用した。
- 注3. PID 制御：温度などを目標値に追従させるために、目標値と測定値の現

在のずれ（比例、P）、ずれの累積（積分、I）、ずれの変化の速さ（微分、D）に応じた三つの働きを組み合わせる制御方法。それぞれの働きの強さを決める係数（パラメータ）を調整することで、目標値への追従性や安定性を整える。

注4. NIMO（NIMS Orchestration System）：ロボット実験とAIを連携させるPythonベースの自律実験支援ソフトウェア。本研究ではNIMOに搭載されているPHYSBO（高速ベイズ最適化のためのPythonライブラリ）によるベイズ最適化を利用した。

注5. 焼戻し：焼入れした鋼を再加熱し、強度や靱性を調整する熱処理。

【論文情報】

タイトル：Development of an automated evaluation system for the process-structure-property relationship of structural metallic materials towards autonomous exploration

著者：Yulin Xie*, Sayaka Sekida, Masaya Inakawa, Ryo Tamura, Tadashi Furuhashi, Goro Miyamoto

*責任著者：東北大学金属材料研究所 助教 謝 玉麟（Yulin XIE）

掲載誌：Science and Technology of Advanced Materials: Methods (TSTM)

DOI：10.1080/27660400.2026.2735657

URL：https://doi.org/10.1080/27660400.2026.2735657

【問い合わせ先】

（研究に関すること）

東北大学金属材料研究所

教授 宮本吾郎

TEL: 022-215-2045

Email: goro.miyamoto.e8@tohoku.ac.jp

（報道に関すること）

東北大学金属材料研究所 情報企画室広報班

TEL: 022-215-2144

Email: press.imr@grp.tohoku.ac.jp