

2026 年 10 月 20 日

報道機関 各位

国立大学法人東北大学

低炭素製鉄プロセスの新しい予測技術 —X 線 CT と粒子法を融合した、鉄鉱石の「強さ」を逆推定—

【発表のポイント】

- 高炉^(注1)内の高温環境を模擬した実験と高エネルギーX 線 CT^(注2)を組み合わせ、鉄鉱石ペレットが還元・軟化・溶融^(注3)していく際の内部構造と充填層の変形を3次元で捉えました。
- 1300 °Cから 1550 °Cの温度域で、金属鉄からなる硬い外殻による荷重の支え、ペレット内部の溶融スラグ生成、そして溶融・滴下に至る一連の化学・構造変化を明らかにしました。
- X 線 CT で観察した変形状態と粒子法による予測結果を比較して、ペレットの外殻の「変形しにくさ」を表す実効降伏応力^(注4)の温度依存性を定量化しました。
- 本手法は、従来の試験法では困難だった高温 3 次元構造に基づく解析を可能にし、原料評価や高炉の安定操業条件の設計への活用が期待されます。

【概要】

鉄鋼業の脱炭素化に向けて、高炉内における鉄鉱石の還元・軟化・溶融挙動を正確に予測することは、安定操業と高効率化のために重要です。

東北大学多元物質科学研究所の夏井俊悟准教授らの研究チームは、Tata Steel Europe、Delft 工科大学、産業技術総合研究所との共同研究により、高炉内を模擬した実験と高エネルギーX 線 CT、組織・元素分析、粒子法 MPH-I^(注5)による数値シミュレーションを組み合わせた解析手法を構築しました。鉄鉱石ペレット内部の構造変化を 3 次元的に明らかにし、数値的な逆解析によって実効的強度を定量化しました。本手法により、水素利用の拡大など低炭素化が進む製鉄プロセスにおける原料評価や高炉の安定操業への応用が期待されます。

本研究成果は、2026 年 10 月 16 日付けで、科学誌 Scientific Reports にオンライン掲載されました。

【詳細な説明】

研究の背景

鉄鋼業の脱炭素化に向けて、水素利用や直接還元製鉄などの技術開発が進められる一方、移行期の現在、高炉の高効率化と安定操業が重要です。特に、鉄鉱石が還元されながら高温になるにつれて軟化・変形・熔融する「融着帯」では、鉄鉱石の変形によってガスの通り道が狭くなるため、その状態が高炉の通気性や安定操業を大きく左右します。これまで鉄鉱石の軟化・熔融特性は、試料層の収縮量や圧力損失などの平均的な指標を用いて評価されてきました。しかし、粒子内部の構造変化と充填層全体の変形・通気性低下を直接結び付けて評価することは困難でした。

そこで本研究では、高エネルギーX線CTによる3次元観察と粒子シミュレーションを組み合わせ、鉄鉱石内部の構造変化から充填層の変形までを一体的に解析しました。

今回の取り組み

研究チームは、高炉内の還元・軟化・熔融過程を模擬した実験を行い、得られた試料を高エネルギーX線CTと元素分析により解析しました。その結果、1300℃では金属鉄の外殻が荷重を支える一方、1400℃では内部にスラグ成分が濃化して軟化が進み、1550℃では熔融・滴下に至る一連の構造変化を明らかにしました。さらに、X線CTで得られた3次元構造を粒子法MPH-Iによる数値シミュレーションを用いて再現しました。実験結果を計算で推定する逆解析により、温度上昇に伴って低下する鉄リッチ外殻の実効的な強度を定量化し、鉄鉱石の軟化・変形を予測するモデルへ結び付けました。

今後の展開

本研究により、高エネルギーX線CTによる3次元観察を、鉄鉱石の軟化・変形や高炉内の通気性を予測する数値モデルへつなげる手法を構築しました。今後は、水素濃度や鉄鉱石の種類などが異なる条件へ適用し、高炉全体の数値解析と連携することで、低炭素製鉄に適した原料評価や融着帯・操業条件の設計への活用を目指します。

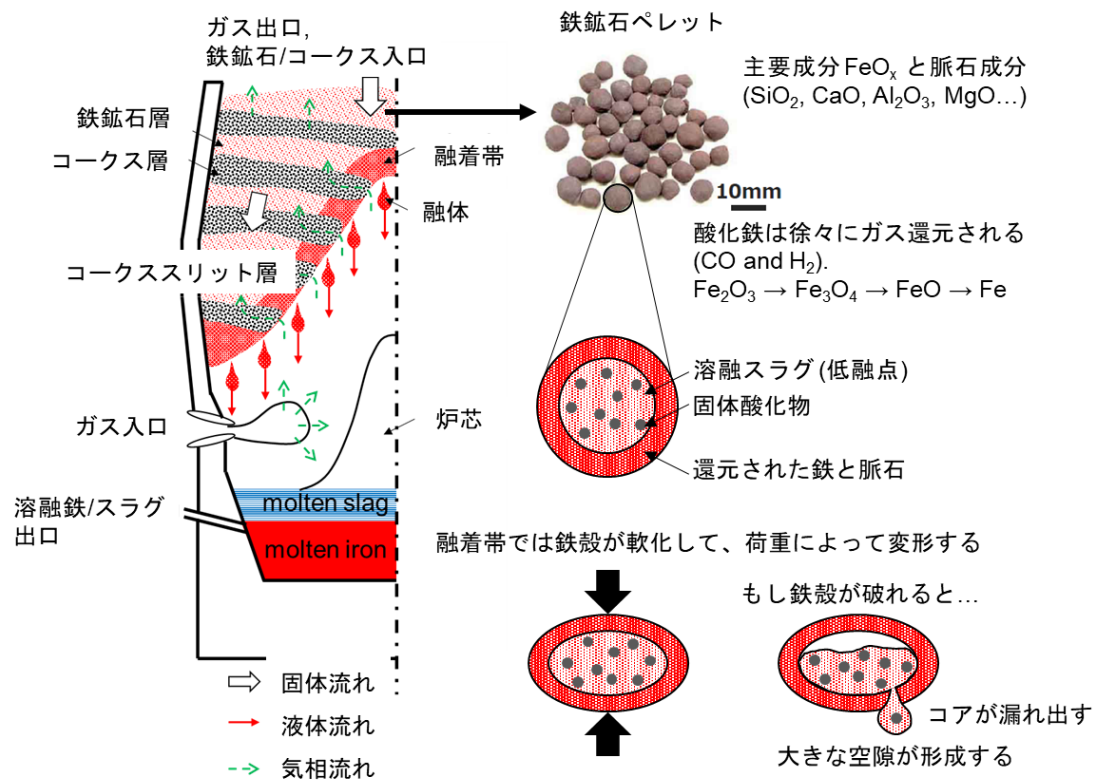


図 1. 高炉内の融着帯と鉄鉱石ペレットの変形過程の模式図。
鉄鉱石ペレットは還元されながら軟化・変形し、最終的に溶融・滴下する。

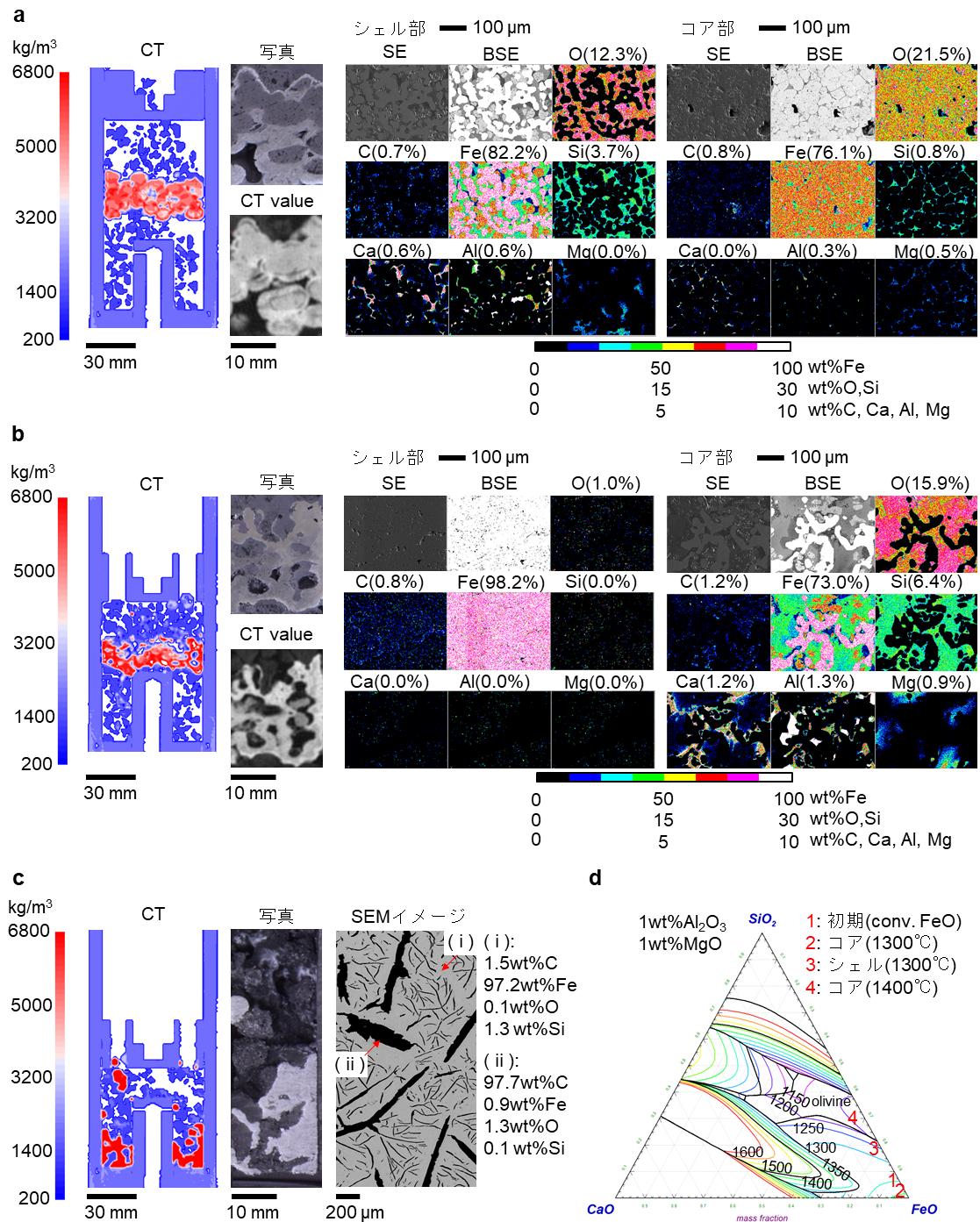


図 2. 温度上昇に伴う鉄鉱石ペレットの内部構造変化。

a. 1300 °Cでは金属鉄外殻が荷重を支え、b. 1400 °Cでは軟化が進行し、
c. 1550 °Cでは溶融・滴下に至る。

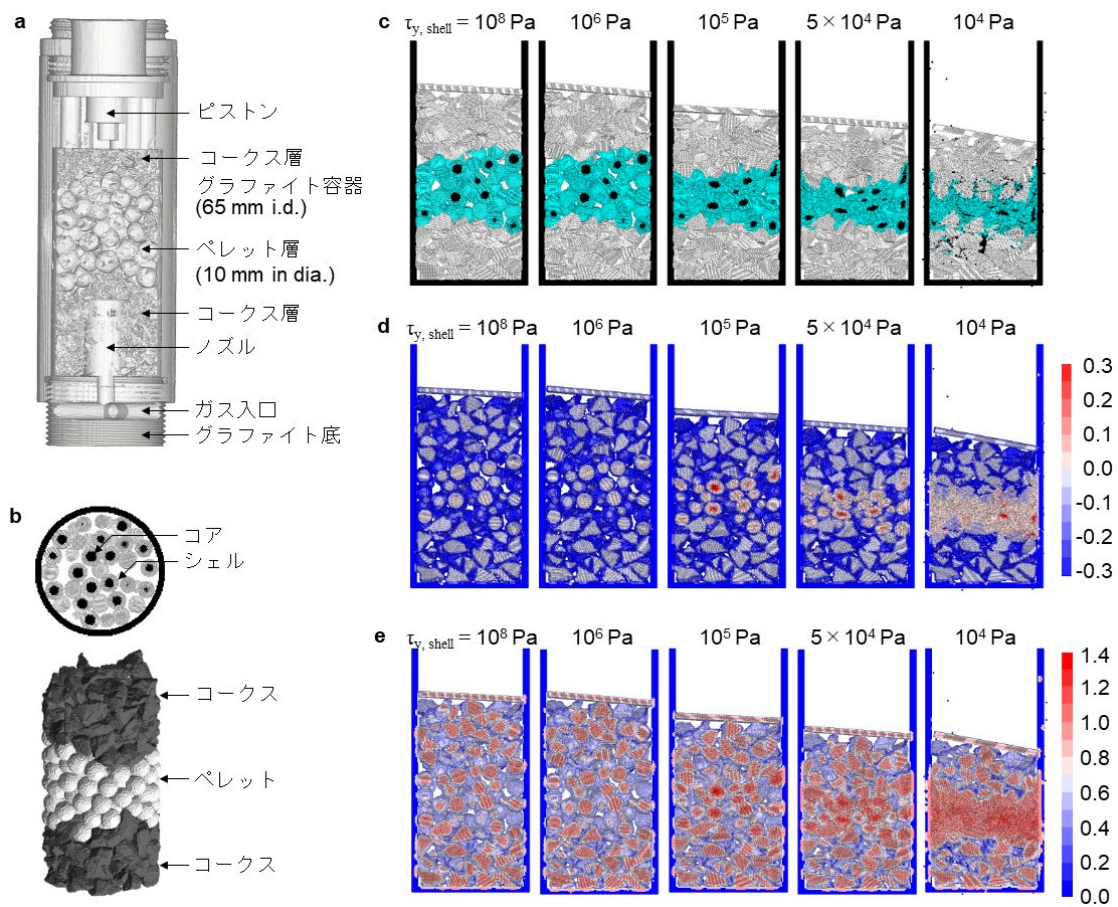


図 3. X 線 CT で観察した 3 次元変形をシミュレーションで再現し、その比較から鉄リッチ外殻の実効的な強度を推定。

a. X 線 CT データから再構築した ASAM 試験装置の 3D ポリゴンレンダリング。b. MPH-I シミュレーションで使用した計算領域。c. 異なる降伏応力条件下における相分布。d. 体積ひずみマップ。e. 相対密度マップ

【謝辞】

本研究は、JSPS 科研費 (JP23K17810、JP24KK0100、JP26K01273) および JFE21 世紀財団 (2024-7) の支援を受けて実施されました。また、高エネルギー X 線 CT 測定に際してご協力いただいた日立グループ、および研究に関する技術的議論にご協力いただいたデルフト工科大学 Department of Materials Science and Engineering, Metals Production, Refining and Recycling (MPRR) グループの Dr. Neslihan Dogan 氏をはじめとする関係者に感謝いたします。

【用語説明】

注1. 高炉：鉄鉱石から銑鉄を製造する大型の縦型炉。炉頂から鉄鉱石とコークスを投入し、下部から高温のガスを送り込むことで、鉄鉱石の還元と溶融を連続的に行う。

注2. 高エネルギーX線CT：X線を試料に照射し、さまざまな方向から得られる透過像を計算処理することで内部構造を3次元的に可視化する技術。本研究では最大9 MeVの高エネルギーX線を用いることで、鉄やコークスを含む比較的大型で高密度な試料内部を非破壊で観察した。

注3. 還元・軟化・溶融：鉄鉱石が還元ガスによって酸素を失い、温度上昇とともに軟化、変形し、最終的に溶融する一連の現象。高炉内の融着帯形成を理解するうえで重要な現象である。(Reduction–Softening–Melting：RSM)

注4. 降伏応力：物質が変形せずに耐えることのできる力の大きさを表す指標。これを超える力が加わると大きく変形し始める。本研究では、高温で軟化する鉄リッチな外殻の実効的な強さを表すために用いた。

注5. MPH-I：流体や変形する物質を多数の計算粒子として表現し、その運動を追跡する数値解析手法。解析力学に基づく手法で、本研究では、固体に近い状態から、軟化・流動する状態までを連続的に扱える点に特徴がある。(Moving Particle Hydrodynamics-Implicit)

【論文情報】

タイトル：Multiphysics framework for sustainable iron ore reduction–softening–melting: High-energy X-ray computed tomography and moving particle hydrodynamics

著者：Shungo Natsui*, Allert Adema, Jan van der Stel, Yongxiang Yang, Kaede Kano, Masahiro Kondo, Miho Hayasaka, Akihisa Ito, Takayuki Iwama, Hiroshi Nogami

*責任著者：東北大学多元物質科学研究所 准教授 夏井俊悟

掲載誌：Scientific Reports

DOI：10.1038/s41598-026-74732-9

URL：<https://doi.org/10.1038/s41598-026-74732-9>

【問い合わせ先】

（研究に関すること）

東北大学多元物質科学研究所

准教授 夏井 俊悟（ナツイ シュンゴ）

TEL: 022-217-5157

Email: natsui@tohoku.ac.jp

（報道に関すること）

東北大学多元物質科学研究所 広報情報室

TEL: 022-217-5198

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