

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 27 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K15331

研究課題名（和文）三次元造形を利用した高炉内軟化溶融充填層の通気性制御技術の開発

研究課題名（英文）Development of permeability control technology for soften and molden packed bed in blast furnace using 3D modeling

研究代表者

石原 真吾 (Ishihara, Shingo)

東北大学・多元物質科学研究所・助教

研究者番号：40760301

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000 円

研究成果の概要（和文）：高炉プロセスの安定で高効率な操業のため、炉内ガス流れに影響を与える軟化・溶融を伴う粒子挙動を解析するためのシミュレーションモデル開発を行った。固体状態および軟化する過程を表現する手法としてADEM(Advanced Discrete Element Method)を、溶融後の融液状態を表現する手法としてSPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)を用い、両者のカップリングモデルを構築した。単一鉱石の溶融挙動を実験的に観察し、シミュレーションで挙動を再現することで構築したモデルの妥当性を検証した。構築したモデルにより、高温荷重下での充填層構造変化の解析が可能になった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発したADEM-SPHカップリングモデルを用いることで、軟化・溶融を伴う複雑な粒子挙動の解析が可能となり、炉内融着帯近傍での充填層構造変化や閉塞現象の予測によって、高炉プロセスの安定化、省エネルギー化に繋がることが予想される。莫大なエネルギーを消費している鉄鋼業の高効率化は、エネルギー削減による持続可能な社会の創成へ貢献するだけでなく、二酸化炭素排出量の削減による地球環境問題の解決にも寄与することが考えられる。

研究成果の概要（英文）：For stable and efficient operation of the blast furnace process, we have developed a simulation model to analyze the particle behavior with softening and melting that affects the gas flow in the furnace. ADEM (Advanced Discrete Element Method) was used to represent the solid state and softening process, and SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) was used to represent the melt. The coupling model was developed. The model was validated by experimentally observing the melting behavior of a single ore and reproducing the behavior by simulation. The model enables us to analyze the structural change of the packing layer under high-temperature loading.

研究分野：粉体工学

キーワード：高炉 シミュレーション ADEM SPH 鉱石 相変化 粉化 軟化溶融

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

他の金属と比べ莫大な生産量を誇る鉄鋼業では、ごくわずかな操業効率の変化でも最終的には膨大なエネルギー消費量の変化に直結するため、製鉄プロセスの高効率化は省エネルギーや地球環境保全の観点から極めて大きなインパクトを持つといえる。日本の鉄鋼業においては、良質な鉄鋼資源の枯渇に伴う原料の劣質化、高コスト化への対応および二酸化炭素排出量の削減が喫緊の課題であり、高炉原料であるコークス使用量を削減した低炭素比操業の達成が求められている。コークスは鉄源である鉄鉱石を還元するための役割の他、高炉下部から高温で吹き込まれるガスの通気性を確保するスペーサーとしての重要な役割を担っている。高炉製鉄において最も重要視すべきは炉内通気性であるが、通気性を悪化させる要因として鉄鉱石が還元される過程で起こる軟化および融液生成による流路の閉塞が挙げられる。コークス使用量の削減は融着帯近傍での通気性の悪化を招くと想定され、一定の通気性を維持しつつコークス使用量を削減するためには、高温荷重下における粒子軟化溶融挙動を把握し、原料性状に応じて配置や配合比を適切に設定することが必要である。高炉内粒子挙動やガス流れをシミュレーションにより解析しようとする試みはこれまでもなされているが、高温高荷重という特殊環境下での還元反応を伴う軟化溶融挙動は非常に複雑であり、更に 4000m³ を超える巨大な容積全体をカバーした解析はスパコン等の大規模計算資源を用いても非常に困難な現状にある。

2. 研究の目的

本研究では、高炉における相変化を伴う粒子挙動とガス流れの解明を目指し、3D プリンタによる充填構造設計および通気試験と数値シミュレーションを組み合わせたプロセス技術の開発を目的とする。

3. 研究の方法

(1) 数値シミュレーションによる軟化溶融挙動の計算と計算結果の三次元造形

ADEM-SPH による軟化溶融挙動の計算を実施し、得られた出力ファイルから三次元造形するための形状データ (stl ファイル) を作成するプログラムを開発する。計算で得られる粒子座標情報をもとに 3D プリンタで印刷可能な形式へと変換することで、計算と同一の充填構造を得られる。これにより、実験とシミュレーションを一対一で比較することが可能になる。

(2) 同一充填構造を用いた通気実験と通気シミュレーションによる計算精度検証

(1) で作製した充填構造を用いて、実験とシミュレーションによる通気試験から計算精度の検証を行う。充填構造が全く同一であることから、圧力損失の定量的な一致を目指して計算モデルの改良を行う。

(3) ガス流れに伴う伝熱を考慮した軟化溶融挙動の双方向解析

充填層に吹き込まれたガスは、流路が広く通気抵抗の少ない箇所を優先的に流れると想定される。ガス流れの不均一性による充填層温度分布と軟化溶融エリアの分布の時間変化を、実験とシミュレーションの両方で確認し、計算モデルの妥当性を検証する。

(4) 通気性を維持する非軟化粒子の配置および配合比

融点の異なる樹脂を材料とし、低融点樹脂を軟化粒子、高融点樹脂を非軟化粒子と見立て、高温ガス流通時の充填構造変化および圧力損失の測定を行う。非軟化粒子が骨材となることで通気性を一定に保つための配置や配合比を明らかにする。本課題で取り扱う樹脂と、実際の高炉原料の性状をそれぞれシミュレーションパラメータで表現できるように開発し、ラボ試験における知見をスケールアップし、実操業での操業指針を提案する。

4. 研究成果

(1) ADEM-SPH による軟化溶融挙動解析モデルの構築

ADEM-SPH カップリングモデルにより、鉱石の軟化溶融挙動の再現が可能になった。図 1 に鉱石溶融試験とその再現シミュレーションの様子を示す。

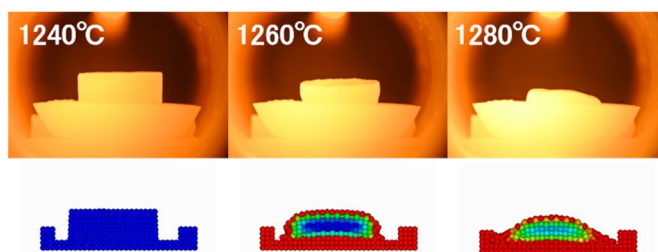


図 1 鉱石溶融試験とシミュレーションによる再現

(2) 鉱石充填層の軟化挙動の再現

図2に還元後鉍石試料を充填した充填層での軟化溶融挙動の再現シミュレーションの様子を示す。昇温に伴う充填層の収縮率変化を再現することができ、また実験では観察困難な各温度における充填層の三次元構造の取得に成功している。

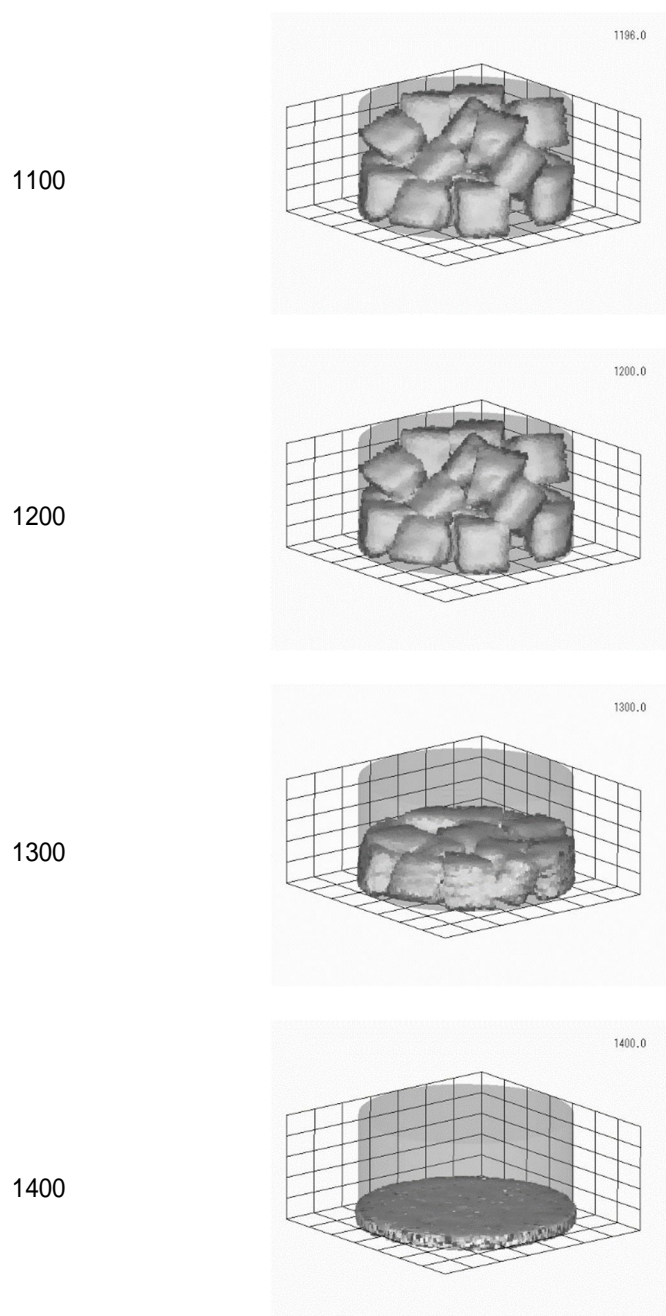


図2 シミュレーションによる鉍石充填層の軟化溶融挙動の再現

(3) 充填層ガス流れへの影響の解析

充填層構造変化の解析が可能となったため、流体解析と組み合わせることで炉内ガス流れの予測が高精度に実施可能になった。図3には軟化変形後の充填層と、そこを流れるガス流れの様子を示す。

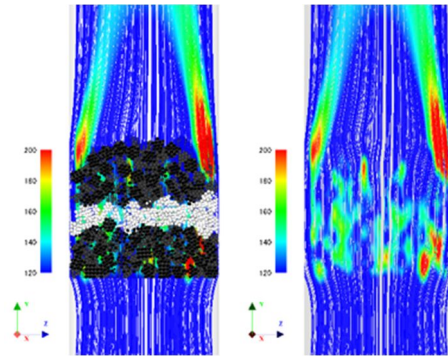


図3 変形後充填層を流れるガス流れ解析

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Ishihara Shingo, Takemasa Tetsu, Suganuma Katsuaki, Kano Junya	4. 巻 32
2. 論文標題 Analysis of the formation mechanism of coarse-dense structure of silver paste in die bonding	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Advanced Powder Technology	6. 最初と最後の頁 2020 ~ 2028
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.appt.2021.04.016	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Ishihara Shingo, Ohno Ko-ichiro, Konishi Hirokazu, Watanabe Takashi, Natsui Shungo, Nogami Hiroshi, Kano Junya	4. 巻 60
2. 論文標題 Prediction of Softening Behavior of Simulant Sinter Ore by ADEM-SPH Model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ISIJ International	6. 最初と最後の頁 1545 ~ 1550
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2355/isijinternational.isijint-2020-078	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Ishihara Shingo, Kano Junya	4. 巻 60
2. 論文標題 Development of ADEM-SPH Coupling Model for Analysis of Solid to Liquid Phase Transition Behaviors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ISIJ International	6. 最初と最後の頁 1469 ~ 1478
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2355/isijinternational.isijint-2019-813	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Ishihara Shingo, Franks George, Kano Junya	4. 巻 34
2. 論文標題 Effect of particle packing structure on the elastic modulus of wet powder compacts analyzed by persistent homology	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Advanced Powder Technology	6. 最初と最後の頁 103874 ~ 103874
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.appt.2022.103874	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 石原真吾、加納純也
2. 発表標題 粒子法シミュレーションによる粉砕および溶融挙動のモデリング
3. 学会等名 資源・素材2019 秋季大会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shingo Ishihara
2. 発表標題 Modeling and simulation of breakage behavior using particle simulation
3. 学会等名 2nd International Symposium on Decommissioning and Management（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石原真吾
2. 発表標題 粉体プロセス高度化に向けた粒子法モデリング
3. 学会等名 第7回アライアンス若手研究交流会（招待講演）
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------