

令和元年6月10日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14846

研究課題名(和文) 相変化粒子挙動シミュレーションによる高炉内通気性予測手法の開発

研究課題名(英文) Development of evaluation method for permeability in blast furnace by phase transformation particle simulation

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) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：ADEM(Advanced Distinct Element Method)とSPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)のカップリングモデルにより、鉱石の加熱時における軟化溶融挙動の再現を試みた。単一の鉱石の定性的な溶融挙動の再現に成功し、構築したモデルが上記の解析に対して有効であることが示された。鉱石の荷重軟化試験における温度-収縮率曲線を実験的に取得し、連結バネ定数の変化によって鉱石の変形挙動の再現に成功した。単一の荷重軟化試験で決定されたパラメータを用いて粒子層の荷重軟化試験に適用することで、充填層の収縮挙動を予測できることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果により、相変化を伴う高炉内粒子挙動が明らかとなることで、高炉操業条件の理論的な最適化が進み、高炉プロセスのエネルギー改革を達成できる。また、鉄鋼業の社会的課題である二酸化炭素排出量の削減に貢献し、還元剤であるコークスを低減させ国際的な競争力の強化に資すると考えられる。学術的には高炉解析の分野における新たな枠組みの一つとなり、当該分野および周辺分野における数値計算法の発展に資すると考えられる。

研究成果の概要(英文)：A new simulation model to reproduce softening and melting behavior of ore during heating have been developed by a coupling model of ADEM (Advanced Distinct Element Method) and SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics). The qualitative melting behavior of a single ore was successfully reproduced and the constructed model was shown to be valid for the above analysis. Temperature-shrinkage curves in load softening tests of ore were experimentally obtained, and deformation behavior of ore was successfully reproduced by changing the joint spring constant. It was shown that the shrinkage behavior of the packed bed could be predicted by applying the parameters determined by a single load softening test to the load softening test of the particle bed.

研究分野：粉体工学

キーワード：ADEM SPH シミュレーション 高炉 軟化 溶融 相変化 融着帯

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

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となっている。高炉をはじめとする製鉄工程で使用されるエネルギーは製鉄所全体に投入されるエネルギーの約 70%といわれており、製鉄プロセスの省エネルギー化には高炉プロセスのエネルギー改革、とりわけ原料性状に対応した高炉操業が必要不可欠である。原料性状により高炉内現象は様々に変化するが、現状では操業条件の判断は高炉技術者の経験や直感に依存している部分が多々あり、理論に基づく科学的な操業が求められている。高炉現象を的確に把握するための計測技術は日々進歩しているが、高炉という特殊環境下においてあらゆる情報を取得することは極めて困難であるため、数値シミュレーションをはじめとした解析技術への期待は非常に大きい。

### 2. 研究の目的

高炉プロセスにおいて、安定で高効率な操業のためには、高炉内ガス流れの制御が特に重要であり、ガス流れは炉内で積層された粒子挙動に大きく依存している。本研究では、高炉における相変化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を構築する。炉頂から装入された粒子が積層により粉化し、加熱により軟化融着し、最終的に溶融する極めて複雑な粒子挙動を解析する手法を創成し、炉内ガス流れ解析と組み合わせることで、高精度な高炉内通気性予測手法の開発を目的とする。

### 3. 研究の方法

#### (1) ADEM をベースとして、固体が溶融して液体へと相変化する際のモデル開発

不規則形状粒子の運動挙動や破砕挙動を取り扱うことが可能な ADEM (Advanced Distinct Element Method) を用いることとした。ADEM では固体状態において近傍粒子との相互作用を連結バネによって計算している。連結バネが閾値を超えて伸びた際に相互作用力をなくすことで、粒子の破砕を表現することができる。固体から液体へと相変化するとき、粒子間の相互作用力の支配方程式を変化させることで液体挙動の表現を試みる。粒子法で液体挙動を計算する手法として、SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法がある。この手法は、液体を粒子で分割してモデル化し、重み関数を用いて近傍粒子との圧力等を計算する手法である。ADEM と SPH はいずれも陽解法的に時間発展させて粒子挙動を計算する手法であるため親和性が高いと考え、ADEM と SPH のカップリングモデルにより相変化挙動を表現することとした。

#### (2) ADEM における連結バネ定数と温度の関係の解明

高炉原料である鉄鉱石は、加熱されることによって徐々に軟化する。ここでは、加熱時の軟化挙動を ADEM における連結バネ定数の変化で表現することを試みる。連結バネ定数が物質のヤング率に相関することは知られているため、連結バネ定数を連続的に減少させることで軟化挙動の再現を試みる。鉱石の単粒子の加熱実験を行い、溶融時の挙動を直接観察することで溶融挙動を把握し、シミュレーションでの再現を試みた。

### 4. 研究成果

#### (1) ADEM-SPH による軟化溶融挙動のモデリング

ADEM と SPH を連成した解析モデルにより、固体から液体への相変化挙動の表現を試みた。固体状態では ADEM における連結バネが作用し、固体として構成粒子同士が拘束されており、軟化時は連結バネ定数が減少することとした。最終的に連結バネの相互作用がなくなると粒子は SPH における液体粒子としてのみ扱われるため、溶融後の融液挙動を表現することができる。構築したシミュレーションモデルの検証を行った。立方体形状に粒子を配置し、初期状態における連結バネ定数を  $0.1 \text{ N/m}$  とし、1 秒後に 0 となるように線形に連結バネ定数を減少させた際のシミュレーション結果を Fig.1 に示す。重力による作用をなくすため無重力とした。ここではポテンシャルモデルによる表面張力を粒子間に作用させており、液体の状態では球形になるうとする力が働いている。連結バネによる固体としての拘束力が働いている状態では初期の立方体形状を維持しているが、連結バネ定数の低下に伴って表面張力が支配的となり、最終的に球形に落ち着く様子が観察された。このように、連結バネ定数の低下により粒子が軟化し、連結バネ定数が 0 となると液体としての挙動を示すことがわかった。

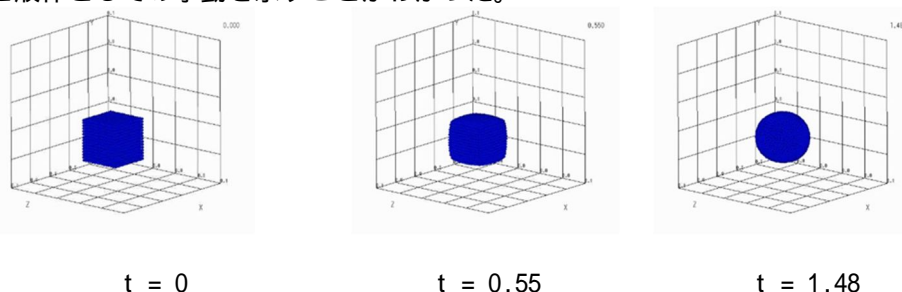


Fig.1 Phase change behavior from solid to liquid calculated by ADEM-SPH

## (2) 温度と連結バネ定数の関係

実際の鉱石では化学的な組成等により昇温時の軟化や溶融挙動が異なるため、実際に鉱石粒子の溶融挙動を観察し、昇温時の形状変化からシミュレーションにおける連結バネ定数の決定を試みた。Fig.2 に予備還元鉱石の溶融挙動のシミュレーション結果を示す。伝熱計算には熱伝導および輻射を考慮している。鉱石の表面付近から昇温し、それに伴いバネ定数が減少することで表面から変形がはじまり、最終的に全体が融液となる挙動を再現することができた。実験で観察された温度と形状の比較から、温度と連結バネ定数の関係が見いだされ、実際の軟化挙動の再現に成功した。

## (3) 得られた成果の国内外における位置づけ、今後の展望

本研究で構築したモデルは、固体状態の粉化から融液生成までの挙動の一連をシームレスに解析ができるオリジナルなシミュレーションモデルであり、世界的に類をみない。今後は本モデルの適用可能範囲を拡大するため、様々な物性を有する鉱石や石炭等の破碎、溶融挙動の解析を実施していく予定である。

## 5. 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計1件)

Shingo Ishihara, Junya Kano, “ADEM simulation for analysis of particle breakage of irregular shaped particles”, ISIJ International, 査読有, 59, 820-827, 2019  
10.2355/isijinternational.ISIJINT-2018-688

### 〔学会発表〕(計12件)

石原真吾、加納純也、“ADEM-SPHによる軟化溶融挙動のモデリング”、日本鉄鋼協会第174回秋季講演大会、2017

石原真吾、加納純也、“ADEM-SPHによる相変化粒子挙動シミュレーション”、化学工学会第49回秋季大会、2017

Shingo Ishihara, Junya Kano, “Modeling and simulation for softening and melting behavior of packed bed”, 10<sup>th</sup> World congress of Chemical Engineering, 2017

石原真吾、加納純也、“ADEM-SPHによる相変化粒子挙動のモデリング”、粉体工学会2017年度秋期研究発表会、2017

石原真吾、加納純也、“粒子法シミュレーションによる相変化挙動のモデリング”、第55回粉体に関する討論会、2017

Shingo Ishihara, Junya Kano, “Modeling and simulation for total analysis of particle behavior in blast furnace”, International workshop on Mineral processing and Metallurgy 2018, 2018

石原真吾、加納純也、“ADEM-SPHによる軟化溶融挙動の数値シミュレーション”、日本鉄鋼協会第175回春季講演大会、2018

Shingo Ishihara, Junya Kano, “Modeling and simulation for softening-melting behavior of packed bed using ADEM-SPH”, 23<sup>rd</sup> International Congress of Chemical and Process Engineering, 2018

石原真吾、加納純也、“ADEM-SPHによる融液生成挙動のモデリング”、日本鉄鋼協会第176回秋季講演大会、2018

石原真吾、加納純也、“高炉製鉄における軟化溶融粒子挙動とガス流れ解析”、第6回アライアンス若手研究交流会、2018

石原真吾、加納純也、“軟化溶融挙動のモデリングとシミュレーション”、粉体工学会2018年度秋期研究発表会、2018

石原真吾、加納純也、“ADEM-SPHによる軟化溶融粒子挙動の解析”、日本鉄鋼協会第177回春季講演大会、2019

### 〔図書〕(計0件)

### 〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

## 6. 研究組織

(1)研究分担者 なし

(2)研究協力者 なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。