

令和 6 年 6 月 9 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04741

研究課題名（和文）高温プロセスにおける耐火物の浸食・破壊現象の数値シミュレーション

研究課題名（英文）Numerical simulation of the erosion and the destruction of the refractories used in high temperature processes.

研究代表者

伊藤 公久 (Ito, Kimihisa)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：10159866

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,100,000円

研究成果の概要（和文）：耐火物の溶損と破壊現象のシミュレータ開発を行い、以下の結果を得た。1）粒子法を用いた溶損シミュレーションプログラムを開発し、検証用コールドモデル実験と結果と比較した結果、実験結果を十分に再現できることを確認した。さらに、鉄るつぼ中に溶解したFeO系スラグにCaO円柱を浸漬回転させた溶解実験のデータ解析に、シミュレータを適用し、良好な結果を得た。2）粒子法を用いたキャストブル（不定形）耐火物の乾燥破壊現象シミュレーションプログラムの開発を行った。高温乾燥セルによる検証実験と比較した結果、開発したシミュレータは高温におけるCaCO₃-水系ペーストの亀裂進展を十分に再現することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

耐火物は様々な高温プロセスで用いられており、特に鉄鋼産業における使用量は莫大な量に上るため、耐火物の溶損防止や高寿命化を実現するためのツールとして、本研究成果は、省資源・省エネルギーに対して、大いに貢献できるものと考えられる。また、耐火物溶損プログラムの本体は、物質移動論に立脚した固体溶解シミュレータなので、耐火物に限らず、様々な固体物質の溶解挙動を3Dで再現できる。このため、その応用範囲は限りがない。また、ペーストの乾燥破壊現象は、元々複雑系物理の代表的な問題として、様々な研究者によって取り上げられており、本研究の成果は基礎的分野にも波及効果が期待される。

研究成果の概要（英文）：The simulation program for the dissolution and fracture phenomena of refractories was developed and the following results were obtained: 1) The simulation program for the dissolution of solids using the particle method was developed and compared with the results of a cold model experiment for the verification on the same scale, and it was confirmed that the simulator could sufficiently reproduce the experimental results. 2) A simulation program for the drying fracture phenomena of castable refractories using the particle method was developed. Compared with the verification experiment using a high-temperature drying cell, the developed simulator was able to sufficiently reproduce the crack propagation of CaCO₃-water paste at high temperatures.

研究分野：金属生産工学

キーワード：耐火物 溶損現象 高温プロセス 粒子法 乾燥破壊 溶解モデル

1. 研究開始当初の背景

研究開発当初の段階では、溶損・破壊現象の予測に計算モデルを適用した例はなかった。これは、現象が複雑であり、必然的にマルチフィジックス解析を必要とするからであった。そこで、本研究では、マルチフィジックス解析に適し、形状の自由度が大きいという特徴を持つ、SPH法を用いて計算シミュレータを構築することを試みた。粒子法を用いた固体の溶解に伴う形状変化の解析は、コンピューターグラフィックスの分野で活発に研究されている一方で、実現象への応用は数少ないのが当初の現状であった。したがって、本研究の学術的な意義は、今まで未解決であった固体の溶解現象を正しい物理モデルに従って記述し、粒子法によって表現することにあるとして研究を開始した。また、不定形耐火物における亀裂発生現象は、耐火物破壊に至る重要な現象であり、実作業においては大きな問題であるが、系統的な研究は報告されていない。この亀裂発生現象は自然界で見られる乾燥破壊現象のひとつであり、初期亀裂の発生位置や形状などによりその後の亀裂形成や最終的な亀裂パターンが異なってくるため、非常に扱いにくい非線形非平衡現象となり、複雑系物理の題材として多くの実験による研究結果が報告されていた一方で、シミュレーションに関する報告は数少なく、定性的な予測にとどまっているのが当初の現状であったので、より精度の高いモデルの構築を目的として研究を開始した。

2. 研究の目的

鉄鋼・非鉄産業をはじめとした、様々な高温プロセスにおいて、耐火物は必要不可欠な材料であり、その耐久性は直接製造コストに影響を与えるため、耐火物の長寿命化には様々な工夫と努力がなされている。しかし耐火物の溶損や破壊をもたらす作業条件の抽出と、寿命を最大にする最適な使用方法については、そのほとんどが経験によるところが大きく、シミュレーションによるアプローチはほとんどなされていないのが現状である。本研究では、耐火物の長寿命化に資する基礎的研究として、耐火物の溶損と破壊現象について、精度の高い予測モデルの開発を目的として以下の二つの研究を行った。(1) 溶銑、溶鋼用の耐火物について、その溶損挙動をシミュレートするための粒子法を用いたシミュレーションプログラムを開発する。(2) 様々なプロセスで活用される不定形耐火物の破壊現象をシミュレートするプログラムを開発する。

3. 研究の方法

(1) 粒子法を用いた溶損シミュレーションプログラムの開発

固体の液体への溶解モデルを作成し、シミュレーションモデルを開発する。検証実験として、回転円柱の溶解実験を実施し、シミュレーションモデルとの対比を行う。具体的な実験方法は、アクリル製の水槽に純水を充填し、ショ糖円柱を浸漬させ、様々な速度で回転させ、ビデオ観察及びサンプリングによって形状変化と溶解速度を測定する。その後、シミュレータとの対比を行い、計算に用いた物質移動モデルおよび拡散モデルについて修正を加える。FeO系スラグへのCaOの溶解実験を行い、得られたモデルを用いて計算値と実測値の比較を行う。

(2) 乾燥破壊現象シミュレーションプログラムの開発

ペーストの変形にSPH法を適用し、各粒子の応力を、粘性項、弾性項、塑性項のそれぞれに分割し、対応する支配方程式を連成して解を求める。降伏応力を超えた時点で破壊が生じると考え、数十～百万粒子のスケールで計算を行う。炭酸カルシウム-水系を中心にして、正方形の耐熱ガラス容器に保持し、様々な乾燥速度で、高温での実験を行う。亀裂の発生及び進展の状況をビデオカメラによって連続撮影し、画像解析による定量化を行う。得られた実験結果とシミュレーション結果を対比し、シミュレーションプログラムの修正を行う。

4. 研究成果

(1) 粒子法を用いた溶損シミュレーションプログラムの開発

粒子法で固体の溶解を表現するためのモデルを構築した。 i 番目の粒子に濃度パラメータ C_i [mol/cm³]を設定し、物質移動を表現する(1)式 $J_i = -k_m \sum_{j \neq i} (C_i - C_j) W(r_{ij}, h) \dots$ (1)に基づいて、各ステップでの C_i を計算した。ここで、 J_i は物質移動フラックス [mol/cm²/s]、 k_m は物質移動係数 [cm/s]、 $W(r_{ij}, h)$ は、カーネル関数である。固体粒子の溶解現象は、固体粒子の濃度がしきい値 C^* を下回った場合に固体粒子を液体粒子に上書きすることで表現した。シミュレータ検証用のコールドモデル実験として、直径 38 mm のショ糖円柱を直径 76 mm、深さ 50mm の水浴中に、40 mm 浸漬し、100rpm で回転させた。溶解に伴うショ糖円柱の重量及び形状変化を、1min 毎にサンプリングして測定した。実験と同一のスケールで計算を行い、最適パラメータを決定した。Fig.1 に 10min 後の溶解形状と 5, 10min 後の計算結果を示すが、重量変化・形状変化ともに実験結果を良好に再現することができた。

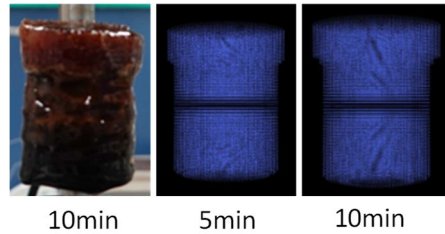


Fig.1 Dissolution of the rotating cylinder into a water bath.

実際の耐火物の溶解挙動をシミュレーションするため、直径 10mm の CaO 円柱を、1573K において 30CaO-30SiO₂-40FeO スラグ中で回転溶解させ、形状変化を観察して、計算結果との比較を行った。溶解に伴う形状変化を再現できたが、今後は、粒子数を増やして解像度を向上させる必要があると思われる。

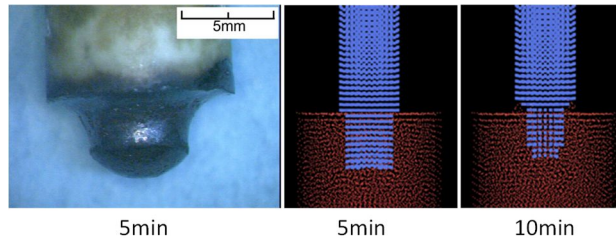


Fig.2 Dissolution of a cylindrical lime into the 30CaO-30SiO₂-40FeO slag bath.

(2) 乾燥破壊現象シミュレーションプログラムの開発

本研究では (2)~(4)式で示す運動方程式、連続の式、変位の式を支配方程式として連成し、計算には SPH 法を用いた。ここで v : 速度、 u : 変位、 σ : 応力、 ρ : 密度である。

$$\rho \frac{dv}{dt} = \nabla \cdot \sigma \dots (2), \quad \frac{d\rho}{dt} = -\rho \nabla \cdot v \dots (3), \quad \frac{du}{dt} = v \dots (4)$$

3つの部分で構成される応力の構成方程式 (5)を用いて各粒子における応力を求め、この値を基に亀裂発生を判定した。ここで σ_{vis} は粘性部分、 σ_{el} は弾性部分、 σ_{dry} は乾燥部分を表している。

$$\sigma = \sigma_{vis} + \sigma_{el} + \sigma_{dry} \quad (5)$$

本研究では、 σ_{dry} は時間に対して線形に変化すると仮定して計算を行った。

Fig.3 は、応力分布の計算結果を、実際の乾燥破壊したペーストの亀裂と比較した結果である。降伏応力の設定によって亀裂自体の分布は変化するが、応力分布と亀裂の分布は良く対応している。本モデルでは、一次亀裂から新たな亀裂(二次亀裂)が発生するという張力変化は確認できなかった。

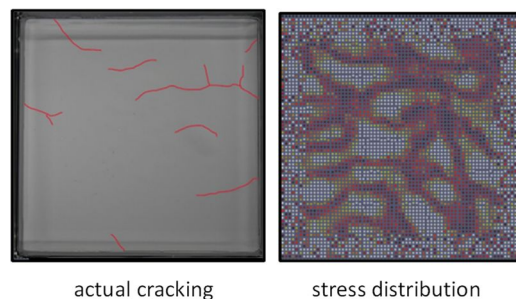


Fig.3 Comparison of the calculated stress distribution with the actual cracking.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Tsurukawa Yuichi, Owada Shinobu, Ito Kazuki, Ito Kimihisa	4. 巻 62
2. 論文標題 Simulation of Thermal Decomposition of Partially Calcined Spherical Limestone Injected into a Molten Iron Bath	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ISIJ International	6. 最初と最後の頁 602 ~ 605
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2021-373	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 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 荒川和輝, 伊藤公久
2. 発表標題 粒子法による液体浴への固体の溶解シミュレーション
3. 学会等名 日本鉄鋼協会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 神場宗治, 伊藤公久
2. 発表標題 溶融鉄浴への固体金属溶解シミュレーション
3. 学会等名 日本鉄鋼協会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 末田暁大, 伊藤公久
2. 発表標題 底吹き気泡の膨張シミュレーション
3. 学会等名 日本鉄鋼協会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 藤池華奈, 伊藤公久
2. 発表標題 乾燥破壊現象のコンピューターシミュレーション
3. 学会等名 日本鉄鋼協会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 林海藍, 伊藤公久
2. 発表標題 日本刀文様の教師無し学習による分類
3. 学会等名 日本鉄鋼協会
4. 発表年 2022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