

令和 3 年 6 月 9 日現在

機関番号：34428
研究種目：基盤研究(C) (一般)
研究期間：2018～2020
課題番号：18K04818
研究課題名(和文) 鉄鋼精錬プロセスにおける音響学的診断による浴内粒子分散挙動の予測のための基礎研究

研究課題名(英文) Fundamental study for prediction of particles dispersion in a molten metal bath based on acoustic signals

研究代表者
植田 芳昭 (UEDA, Yoshiaki)
摂南大学・理工学部・准教授

研究者番号：00599342
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)：本研究では、インジェクション法において粒子がガス・溶銑の界面を貫通するときの状況を水モデル実験によって検討した。撥水球が水没するときに形成するキャビティ形状とそのときに発せられる放射音の同時計測から、キャビティが分裂する瞬間に最大の音圧となることが明らかとなった。さらに、キャビティ形状のパターン(粒子に付着する気体体積に關係する)と放射音の周波数および強度には關係があり、本研究で提案する診断方法の可能性はあり得ると考えられた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

鉄鋼業の溶銑予備処理工程では、溶銑は高温かつ不透明であることから、浴内部の流動状態を把握することは非常に困難であり、推測の域を出ていないのが実情である。本研究では、溶銑内に不活性ガスと共に投入された脱硫剤粒子の浴内分散挙動と化学反応の促進に關係する、粒子背後に形成されるキャビティが分裂するときの放射音に着目し、その周波数から粒子の浴内分散挙動を音響学的に診断する手法の可能性を探ろうとするものである。この手法の構築は、直接計測が困難な高温金属材料プロセス分野において気液界面状態を非接触・非視認で把握するための技術として資するところは大きいと考えている。

研究成果の概要(英文)：This study has sought to a feasibility for grasping invisible flow condition in a molten iron bath with the use of an acoustic signals. As a fundamental investigation, this study has measured acoustic signals emitted by a hydrophobic sphere entering water. The primary results obtained give that the signal of sound exhibits the maximum value at the breakup of the cavity. In addition, the frequency and the intensity of the emitted sound are found to depend on cavity pattern.

研究分野：鉄鋼精錬プロセス

キーワード：鉄鋼精錬プロセス

1. 研究開始当初の背景

鉄鋼業では製品の高純度化のため溶銑予備処理工程において、不純物の代表である硫黄を極低濃度まで取り除くことが課題となっている。現在、その脱硫方法として用いられているのが、溶銑に生石灰 (CaO) といった脱硫剤を投入し浴内に浸漬された攪拌羽根によって直接攪拌する KR 方法と、溶銑内にランスを挿入し脱硫剤をアルゴンガスといった不活性ガスとともに浴内に吹き込むインジェクション法である。KR 法は高温 (1600K) の溶銑中に攪拌羽根を晒す必要があるため、攪拌羽根の溶損による溶銑の汚染があり、メンテナンスが容易ではないという問題がある。

そこで本研究では、図 1 に示すインジェクション法について取り上げる。インジェクション法では、脱硫剤といった粒子は不活性ガスとともにノズルから吹き込まれる。吹き込まれた粒子は溶銑とガスの界面を貫通することにより、溶銑内に侵入し、脱硫反応を起こす。極低濃度まで硫黄を除去するためには、ガス・溶銑界面を貫通した粒子が溶銑内で均一に分散する必要があるが、溶銑との濡れ性が悪いことから、貫通した粒子はその背後にガスを纏ってしまい、それが浮力となり溶銑内での均一な分散を阻害してしまうと考えられている (図 1 参照)。他方、微小気泡が生成・崩壊するとき、その温度は数千度にまで上昇し、気泡内部の圧力は非常に高圧になることから、化学反応は非常に促進されることが知られている。このように、溶銑に投入される濡れ性の悪い粒子群が纏う気泡の状態は、インジェクション法における化学反応と密接な関係があるものの、溶銑は不透明であることから、浴内での粒子群の分散挙動を直接観察することはできず、推測の域を出ていないのが実情である。

流体力学的相似則を考慮して溶銑中に侵入する粒子挙動を一般化すれば、水没する撥水球がその背後に形成するキャビティ (空隙) に関する問題に置き換えることができる (水モデル実験という)。この問題は、近年の目覚ましい高速度カメラの進歩と共に注目されており、水没球背後に形成されるキャビティ形状の動力学について論じた報告はいくつか見られるものの、その放射音に関する研究は殆ど見受けられない。

本研究では、粒子がガス・溶銑界面を貫通する際に形成するキャビティが分裂するときに発する放射音に着目し、その周波数から粒子の浴内分散挙動を音響学的に診断する手法の可能性を探る。この手法の構築は、インジェクション法といった特定の対象だけに留まらず、直接計測が困難な高温金属材料プロセス分野において気液界面状態を非接触・非視認で把握するための技術として資するところは大であると考えている。

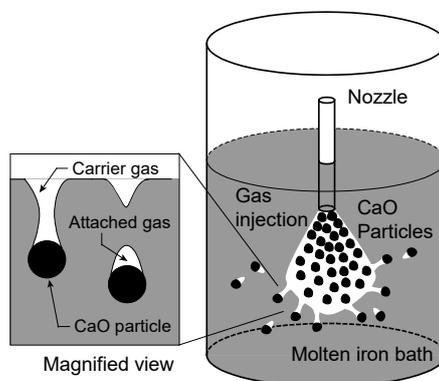


図 1 インジェクション法による溶銑中への粒子の侵入挙動

2. 研究の目的

本研究では、インジェクション法における溶銑中への粒子の侵入度合について、浴外から非接触・非視認で診断する手法の可能性について検証することを主な目的としている。それにあたり、溶銑中へ侵入する粒子を撥水球で模擬することにより水モデル実験を行う。撥水球が水没する際に形成するキャビティの分裂現象とそれによって発せられる放射音を高速度カメラと水中マイクで同期計測することにより、キャビティが分裂した後、固体球に付着する気体量と放射音の周波数の関係について調査する。さらに、キャビティの動力学とその圧力変動によって生じる放射音の発生メカニズムを解明するために有用となる数値解析手法の開発に取り組む。

3. 研究の方法

(1) 水没球背後に形成されるキャビティの動的現象とそれによって発せられる放射音の同期計測

透明なアクリル製矩形水槽 (500mm×500mm×1000mm) に十分な深さまで水で満たしておく。種々な直径および濡れ性を有する球体は、バキュームポンプにより水面から所定の高さで保持しておく。バキュームポンプの吸引を停止することにより、球体は自由落下し水没する。水没した球体は、水面への侵入速度と濡れ性の関係によって数パターンのキャビティ形状を形成しながら水中を沈降する。このキャビティ形状のパターンによって、キャビティ分裂後に球体背後に付着する気体体積は異なることになる。

水没中の球背後に形成されるキャビティの動的挙動は、高速度カメラ (15,000 [frames/s]) で撮影し、その時の放射音は球体からおおよそ 50 [mm] 離れた位置に設置した水中マイク (サンプリング周波数 60,000 [Hz]) によってマイクロ秒のオーダーで同期計測する。この水中マイクはアン

プを通じてデータロガーに接続されており、PCにて周波数解析を行う。

キャビティは球体の着水から形成し始め、球体の水没と共に成長し分裂する。この一連の現象の中で、放射音が発せられる。本研究では、水槽の微振動に伴う音響信号（水中マイク）への外乱の影響を軽減するため、水槽は除振台の上に配置しておき、各要所には防振ゴムを取り付け、撮影窓を除く水槽壁面には吸音材を貼り付けておく。さらに、実験の際には、水中での音速は空気中のそれよりも約4倍速くなることにも注意を要する。

(2) 数値解析手法の開発

水没する球体とその背後に形成するキャビティの動的挙動とその際に生じる圧力変動によって発せられる放射音を数値解析するための手法の開発に着手する。この数値解析手法の骨子には、渦粒子法を利用する。渦粒子法では境界条件は渦度で与える必要があり、球表面から形成されるキャビティを詳細にシミュレートするためには、界面での渦度に基づく境界条件を精度良くモデル化しなくてはならない。そこで本研究では、界面で生成・拡散する渦度に基づく境界条件の高次近似モデルについて漸近解析を用いて導出する。

4. 研究成果

本研究結果の一例として、図2には水面から高さ $h=60$ [mm] の位置から直径 $d=15$ [mm] の鉄球を自由落下により水没させたときに球背後に形成するキャビティ形状を撮影した可視化写真を示している。水没球には撥水剤を塗布しており、水温 24°C の条件のもとで、静的接触角は 147° である。自由落下した撥水球が水面に接触する時刻を $t=0$ [s] とし（図2(a)参照）、時間の経過とともに球表面から形成されるキャビティが成長していく様子が見てとれる（図2(b)~(c)参照）。その後、成長したキャビティは図2(c)~(d)のようにくびれが生じ、図2(e)でキャビティは分裂する。キャビティ分裂後、その下部が球背後に付着したまま球体は沈降する（図2(f)参照)。「研究開始当初の背景」でも言及したように、インジェクション法において、この球背後に付着したキャビティ（気体）がその後の球体の運動挙動に影響を及ぼすことになる。

図3は、水中マイクにより計測した水没球が発する放射音の時系列データである。図2で示したスナップショットの状態と対応付けるために、図中には図2(a)~(e)の記号を記している。球の水没によって成長したキャビティにくびれが生じる頃から（図2(c)参照）、運動エネルギーの影響が増大し、それによって負の圧力が急激に増大する。キャビティが分裂したとき（図2(e)参照）、放射音の強度は最大となる。図3の音響信号をFFT解析した結果を図4に示す。この結果から、キャビティ分裂によって発せられる放射音は、卓越周波数が 420 [Hz] のほとんど単音で

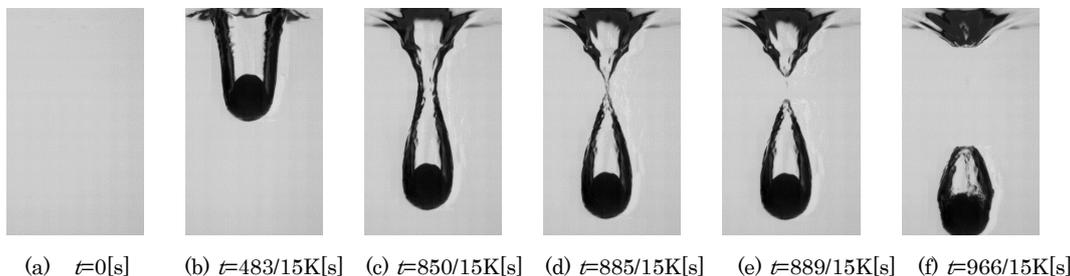


図2 水没する撥水球が形成するキャビティの様子（直径 $d=15$ [mm] の鉄球が高さ $h=60$ [mm] から自由落下する場合）

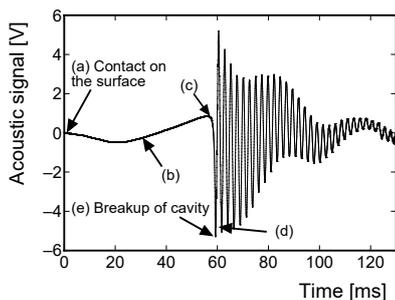


図3 水没球が発する放射音の計測結果

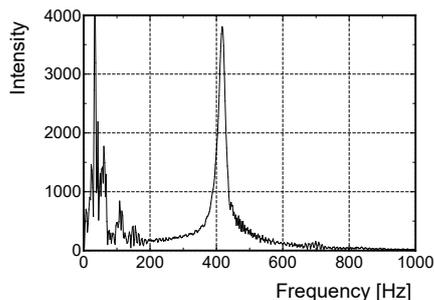


図4 FFT解析結果

あることが分かる。詳細は割愛するが、キャビティ分裂に伴って発せられる放射音の卓越周波数と強度は、キャビティの分裂挙動（換言すれば、キャビティ分裂後の球背後に付着する気泡体積）に関係する。このことから、インジェクション法における球に付着する気泡体積（脱硫剤の溶銑での運動挙動に関係する）を音響学的に診断する手法の可能性はあり得ると考えられる。

本研究では、撥水球が水没する際に形成するキャビティの動的挙動の観察とそれによって発せられる放射音の同期計測結果をもとに、細長物体理論（Slender Body Theory）に基づく理論解析を行い、放射音の発生メカニズムについて検討を行った。水中に浸けられたノズルから離脱する単一気泡が発する放射音について調べた既往研究により、ノズルから離脱する気泡が発する音圧は、ノズルでの気泡の体積流量 dV/dt （つまり、気泡の平均半径方向速度 dR/dt ）に関係することが明らかとなっている。そこで本解析では、図5に示すような座標系をとり、流体は非粘性流体とし、キャビティの形状は z 軸方向に十分細長く（ $r_c = \varepsilon R_c$, $\varepsilon = o(1)$ ）軸対称であると仮定して行った。理論解析では、球体およびキャビティ近傍の流れを内部領域とし、流れ場全体を外部領域として特異摂動解析を行った。外部解と内部解の接続により求められた速度ポテンシャルと、非定常のベルヌーイの式から、キャビティ半径 r_c の成長速度 dR/dt が求められる： $dR/dt \sim dh/dt - dh_e/dt$ 。上述のように、このキャビティ径の成長速度 dR/dt が音圧に関係することから、キャビティの没水速度 dh/dt とキャビティ端の速度差が大きくなると大きな音圧が発せられると推定される。

以上から、インジェクション法における溶銑中への粒子の侵入度合について、音響学的に診断する方法の可能性は見出すことができたと考えている。しかしながら、実作業では用いられる脱硫剤の径が非常に小さいこと、溶銑の温度は 1600°C 程度であるため浴内に計測機器を浸けることはできず、浴外から騒音計を通して卓越周波数と強度を把握する必要があること、これら二点が主たる困難な問題として挙げられる。特に後者では、外環境からのノイズ成分の混入が避けられず、本研究で得られた FFT 解析結果を考慮した適切な周波数分析を必要とするが、これらについては今後の検討課題である。

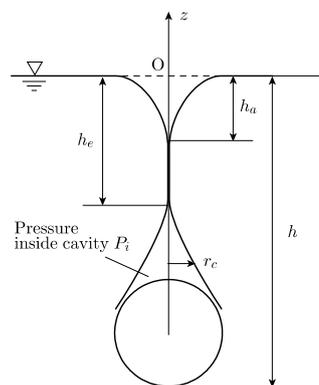


図5 解析モデルと座標系

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Shingo SATO, Jun OKADA, Yoshiaki UEDA and Manabu IGUCHI	4. 巻 60
2. 論文標題 Visualization of an intermittent splash with a gas blowing from a top lance ~Breakup of cavity surface making a splash~	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ISIJ International	6. 最初と最後の頁 掲載予定
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 Shingo SATO, Makoto ANDO, Jun OKADA, Yoshiaki UEDA and Manabu IGUCHI	4. 巻 105
2. 論文標題 Prediction of plunging depth induced by top lance gas blowing onto a low-melting-point metal bath	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ISIJ International	6. 最初と最後の頁 10-19
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 Yoshiaki Ueda and Manabu Iguchi	4. 巻 19
2. 論文標題 Computational mixing-time of self-induced rotary sloshing caused by an upward liquid jet in a cylindrical container	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本実験力学会論文集	6. 最初と最後の頁 40-46
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 Kato Kenji, Wakimoto Tatsuro, Ueda Yoshiaki, Iguchi Manabu	4. 巻 30
2. 論文標題 Residual bubble volume formed behind a sphere plunging into liquid bath (meniscus breakdown with finite velocity of sphere penetration)	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 082106 ~ 082106
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5040315	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 Y.Ueda	4. 巻 867
2. 論文標題 Numerical analysis of flow-induced rotation of S-shaped rotor	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 77-113
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5040315	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 Y.Ueda and T.Kida	4. 巻 108
2. 論文標題 A note of two-dimensional vorticity creation-diffusion model on vortex particle methods	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Far East Journal of Applied Mathematics	6. 最初と最後の頁 1-26
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

〔学会発表〕 計9件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 明田真矢, 秋元悠希, 植田芳昭, 井口学
2. 発表標題 連続精練プロセスに関する基礎的研究 (貫入噴流による気泡巻き込み量)
3. 学会等名 日本鉄鋼協会・日本金属学会関西支部鉄鋼プロセス研究会・材料化学研究会 令和元年度合同講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryunosuke Osaka, Yoshiaki Ueda and Yusuke Sakai
2. 発表標題 Design of a modified raceway pond based on experimental flow visualization
3. 学会等名 AlgaeEurope 2019 International Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤新吾, 安藤誠, 岡田淳, 中井由枝, 植田芳昭, 井口学
2. 発表標題 上吹きランスによるガスジェットの低融点金属浴への貫入深さの予測
3. 学会等名 日本学術振興会 製鋼第19委員会 反応プロセス研究会第80回会議
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤新吾, 久保典子, 植田芳昭, 井口学
2. 発表標題 上吹き条件がスピitting発生現象に与える影響
3. 学会等名 日本鉄鋼協会第178回秋季講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryunosuke Osaka, Yoshiaki Ueda and Yusuke Sakai
2. 発表標題 Experimental measurement of particle sedimentation in modified raceway ponds
3. 学会等名 Asian Pacific Confederation of Chemical Engineering (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Kinoshita, Y. Ueda and T. Nakajima
2. 発表標題 Sound emission from a bubble generated of an underwater nozzle (Influence of the bubble size)
3. 学会等名 Proc. 13th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 R. Osaka, Y. Ueda, A. Kasubuchi and Y. Sakai
2. 発表標題 Numerical simulation of flow in modified raceway ponds for algae cultivation
3. 学会等名 Proc. 13th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Ueda, Y. Sakai and R. Kawamura
2. 発表標題 Prediction of Volumetric Mass Transfer in Bubble Column from an Immersed Downward Nozzle
3. 学会等名 Proc. Grand Renewable Energy 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 木下卓, 平田将, 植田芳昭, 中嶋智也
2. 発表標題 水没するガラス球による放射音の計測方法の確立
3. 学会等名 日本設計工学会関西支部平成30年度研究発表講演会
4. 発表年 2018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
研究 分担 者	中嶋 智也 (NAKAJIMA Tomoya) (80207787)	大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・講師 (24403)	

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
---------	---------