

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：34428

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04757

研究課題名（和文）鉄鋼プロセスにおける反応容器内部で起こる気液界面現象の音響学的診断のための研究

研究課題名（英文）Fundamental study for prediction of instantaneous gas-liquid phenomenon in a molten metal bath using 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） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、ガスインジェクション法において生じるメソスケールな気液界面現象を、そのときに発せられる放射音を利用して音響学的に診断するための技術的可能性について検討した。濡れの悪い粒子が溶銑内に貫入するとき形成する、細長く引き伸ばされたキャビティの崩壊によって発せられる放射音の特性について明らかにした。さらに、移動界面を扱うための計算手法の構築を目的として、ペナルティ法に基づく渦粒子法における境界条件の扱い方について明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

鉄鋼プロセスにおけるガスインジェクション法では、溶銑は高温かつ不透明であることから、浴内部の流動を把握することは非常に困難である。本研究では、溶銑内に不活性ガスと共に吹込まれる脱硫剤等の粒子群の浴内分散挙動と化学反応促進に関係する、粒子群背後に形成されるキャビティが崩壊するとき発せられる放射音に着目し、その音響信号から粒子の浴内分散挙動を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過渡的な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 investigated the technical feasibility for understanding instantaneous gas-liquid interfacial phenomena in the gas injection method based on acoustic signals produced during the process. In particular, it is elucidated that the characteristics of the sound produced by the collapse of elongated cavity behind poorly wetted particles entering a bath. Furthermore, we clarified the formulation of the boundary conditions in a vortex particle method based on the Brinkman penalization method that is suitable for the computation of moving boundary problems.

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

鉄鋼プロセスの溶銑予備処理工程では、製品の高純度化のため硫黄といった不純物を極低濃度まで除去することが課題となっている。その脱硫方法には、溶銑に脱硫剤である生石灰 (CaO) 等を投入し浴内に浸漬させた攪拌羽根によって直接攪拌する KR 法と、脱硫剤を不活性ガスであるアルゴンガスとともに浴内に吹き込むガスインジェクション法がある。KR 法は高温 (約 1600K) の溶銑中に攪拌羽根を浸すことになるので、攪拌羽根の溶損に伴う溶銑の汚染が起り、メンテナンスが容易ではない。

本研究では、ガスインジェクション法を対象とする。ガスインジェクション法では、脱硫剤のような微粒子群は不活性ガスと共にノズルから吹込まれる。吹込まれた微粒子群は溶銑とガスの界面を貫通することによって溶銑内に侵入し、脱硫反応を起こす。溶銑内に含有する硫黄を極低濃度にまで除去するためには、それら微粒子が溶銑内で均一に分散する必要があるが、粒子は溶銑との濡れ性が悪いので、ガス噴流を貫通した微粒子はその背後にガス気泡を纏ってしまい、それが浮力となって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。他方、マイクロバブルが生成・崩壊するとき、気泡内部は非常に高温・高圧になることから、化学反応が促進されることが知られている。以上のように、溶銑に吹き込まれる脱硫剤等の微粒子が纏う気泡形状は、ガス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、溶銑が高温かつ不透明であることから、直接観察によって浴内での粒子群の分散挙動を把握することはできず、推測の域を出ていないのが現状である。

本研究では、これまでの研究から引き続いて、粒子が溶銑界面を貫通する際に形成するキャビティが崩壊するとき発する放射音に着目し、その音響信号から粒子群の浴内での分散挙動を把握する手法についての基礎的知見を蓄えることに主眼を置いている。本手法の構築は、ガス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ける過渡的な気液界面挙動を非接触・非視認で把握するための技術として有用であると考えている。

2. 研究の目的

本研究では、ガスインジェクション法における微粒子の溶銑中への侵入挙動について、音響信号から推定するための基礎的知見を得ることを主な目的としている。常温水で行ったこれまでの研究からの展開として、本研究では浴内に侵入した粒子の背後に形成されるキャビティの崩壊によって発せられる放射音の特性に及ぼす流体力学効果と熱効果の影響について実験的に検討する。さらに、キャビティの過渡的な変形振動に伴う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も取り組む。

3. 研究の方法

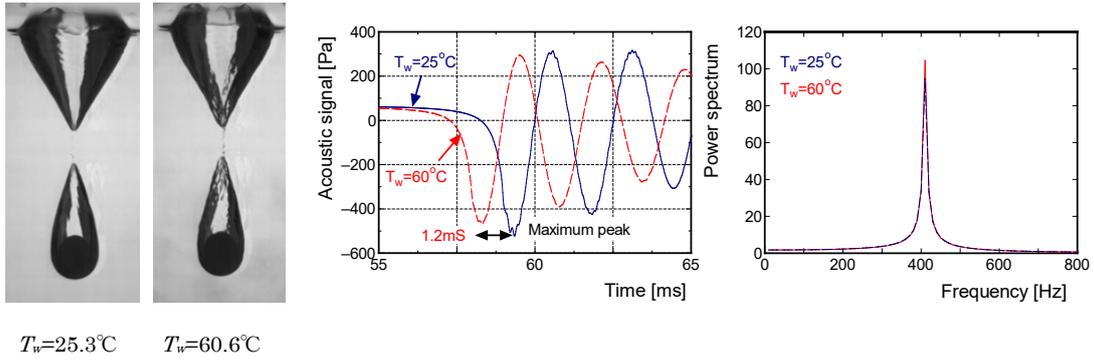
(1) 水没球背後に形成されるキャビティの過渡的振動によって発せられる放射音の熱的・流体力学効果に関する実験研究

密度 $\rho_p=2488\text{kg/m}^3$ 、半径 $r_p=8.5\text{mm}$ のガラス球を、透明なアクリル製矩形水槽 (500mm×500mm×1000mm) の水面から所定の高さでポンプによって吸引しておき、時刻 $t=0$ で自由落下させる。ガラス球の表面には撥水剤を塗布しておき、平衡接触角は 147 度である。水槽は除振台の上に置き、水槽の内側側面と底面には吸音材を貼り付けておき、反射音や外的振動による影響を軽減する。水槽は、さらに大きな外浴で囲まれており、外浴内の水はヒーターで所定の温度まで温めておく。十分な時間が経過すると、実験に用いる内浴も外浴と同じ一定温度に達する。水温 T_1 は、20℃から 60℃まで 5℃毎に変化させて実験を行う。実験中、水面近傍の気温は熱電対によって計測する。

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 (15,000frames/s) で撮影し、その時に発せられる放射音はキャビティの分裂位置近傍に設置された水中マイク (60,000Hz) で同期計測する。音響信号はデータロガーを経由して PC に取り込まれ、Matlab によって FFT 解析を行う。

(2) 数値解析手法の開発

水没する球体とその背後に形成されるキャビティの動的挙動をシミュレートするためには、移動界面に適した数値解析手法が必要となる。本研究では、ペナルティ法に基づく渦粒子法を用いる。渦粒子法では、界面での境界条件で渦度を用いて記述する必要があり、球表面から形成されるキャビティを詳細に計算するためには、界面での境界条件の適切な定式化が重要となる。本研究では、すでに解析解が得られている円柱まわりの非定常流れを対象として、本計算手法における適切な境界条件のモデル化について検討する。モデル化の検討は、特異摂動法を用いた解析によって行う。



$T_w=25.3^\circ\text{C}$ $T_w=60.6^\circ\text{C}$

図1 水温による放射音特性の比較：最大音圧を発するときのキャビティの様子（左図），放射音の時間履歴（中央図），FFT スペクトル（右図）

4. 研究成果

図1には、一例として、水温が $T_w=25.3^\circ\text{C}$ と $T_w=60.6^\circ\text{C}$ のときの最大音圧を発する瞬間のキャビティの様子とそのときの放射音の音響信号を比較した結果を示す。この結果から、水温の上昇につれて最大音圧に達するまでの時間は短くなるものの、放射音の周波数に関して水温の影響は小さいことが分かる。他方、本実験では、放射音の周波数と時間的減衰率はキャビティ形状に強く影響を受けることを明らかにした。

Strasberg の理論解析によると、球形気泡の振動によって発せられる音圧 p_B は次式のように求められる。

$$p_B \approx -\rho_w \frac{R_0^2 \omega_0}{r} \dot{R}(0) e^{-\beta t} \sin \omega_0 t \quad (1)$$

ただし、 ρ_w は液体の密度、 $\dot{R}(0)$ は球形気泡の初期半径、 ω_0 は固有振動数である。音圧は時間と共に減衰率 β で減衰するが、粘性、熱拡散、放射による影響はそれぞれ次式の通りである。

$$\beta_{\text{visc}} = \frac{2\mu}{\rho R_0^2}, \quad \beta_{\text{thermal}} = \frac{3\omega_0 n-1}{2} \frac{(2Dg)}{\omega_0}, \quad \beta_{\text{rad}} = \frac{\omega_0 R_0}{2c} \quad (2)$$

本実験では、放射音の周波数は、式(1)の ω_0 に含まれる気泡の時間的体積変化に関する固有振動数とほぼ一致するが、減衰率に関しては特に高周波数を発するキャビティにおいて、式(2)の減衰率よりも大きくなることが分かった。本実験結果の考察から、放射音の減衰率はキャビティの気泡径（特に先端形状の振動数）に関係すると推察された。

そこで、本研究では水没球背後に形成されるキャビティが細長形状をしており、その先端が振動しているという仮定のもとで、細長物体理論に基づく解析を行った。解析の詳細については割愛するが、撥水球の水没速度を u_0 、キャビティの長さを L 、キャビティの表面形状を \hat{a}_1 、ポルトローブ指数を n としたとき、減衰率 β と固有振動数 ω_0 は次式のように求められる。

$$\beta = u_0 + \frac{2\nu}{R_0^2} + \nu \frac{\hat{a}_1}{LR_0}, \quad \omega_0^2 = -\frac{2\sigma}{\rho R_0^3} + 2n \frac{p_{B0}}{\rho R_0^2} - 4 \frac{\nu u_0}{R_0^3} + 12\nu u_0 \frac{\hat{a}_1}{LR_0^2} \quad (3)$$

この結果から、キャビティ先端の曲率半径 R_0 が小さくなるほど、減衰率 β の値は式(2)の第1式 β_{visc} よりも大きくなる（式(3)の第1式右辺第3項による影響）可能性が示唆される。

数値解析手法の開発では、ペナルティ項を加味した渦度方程式を支配方程式として、円柱を過ぎる非定常流れの漸近解析を試みた。その結果、ペナルティ項の積分から抗力係数を求める（アプローチ1）と、Badr & Dennis (1985) による解析解の半分になってしまうことが分かった。このとき、物体表面上における圧力の接線方向勾配によって、物体表面上での渦度の法線方向の微分が不連続になることをつきとめた。

さらに、円柱に回転運動が伴った問題についても漸近解析を試みた。この解析では、物体の外側と内側の間に圧力のジャンプがあると仮定して、流体力学的な力を計算するための代替式（アプローチ2）を解析的に導出した。この解析により、アプローチ1で現れる抗力係数の値の差異は物体表面上での圧力のジャンプが原因であることを明らかにした（図2参照）。

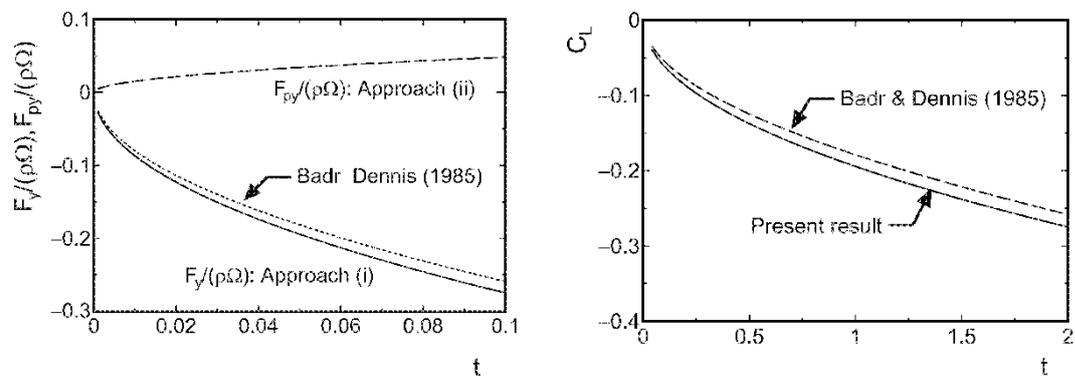


図2 揚力に関するアプローチ1とアプローチ2による結果とBadr & Dennis(1985)による結果の比較.

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 南智彦, 加藤健司, 脇本辰郎, 植田芳昭, 井口学	4. 巻 23
2. 論文標題 スラゲーメタル界面に接触したメタル滴の動的挙動	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本実験力学学会論文集	6. 最初と最後の頁 56-63
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 植田芳昭, 脇本辰郎, 加藤健司, 井口学	4. 巻 23
2. 論文標題 回転する撥水性円柱が水没するときの運動挙動に及ぼす濡れ性の影響 - 回転円柱の運動方程式に基づく一考察 -	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本実験力学学会論文集	6. 最初と最後の頁 51-55
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 Ueda Y., Iguchi M.	4. 巻 25
2. 論文標題 Measurement of underwater sound produced by a hydrophobic sphere entering water	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Visualization	6. 最初と最後の頁 443 ~ 447
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s12650-021-00811-w	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 Ueda Y., Kida T.	4. 巻 929
2. 論文標題 Asymptotic analysis of initial flow around an impulsively started circular cylinder using a Brinkman penalization method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jfm.2021.869	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 Tatsuro Wakimoto, Kokichi Abe, Kenji Katoh, Yoshiaki Ueda, Manabu Iguchi	4. 巻 6
2. 論文標題 Static and dynamic surface tension of molten eutectic solder under various oxygen concentrations	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Advanced Experimental Mechanics	6. 最初と最後の頁 21-26
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 -

1. 著者名 Ueda Y., Kida T.	4. 巻 988
2. 論文標題 Asymptotic analysis of hydrodynamic forces in a Brinkman penalization method: case of an initial flow around an impulsively started rotating and translating circular cylinder	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jfm.2024.420	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5件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 植田芳昭
2. 発表標題 撥水球が水没するときに発する放射音の計測とその発音メカニズムに関する一考察
3. 学会等名 日本実験力学会 サステナブル・エンジニアリング分科会研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 H. Mizuno, Y. Ueda, T. Wakimoto, K. Katoh, M. Iguchi
2. 発表標題 Measurement of sound due to a hydrophobic steel sphere entering water
3. 学会等名 International Workshop on Advanced Experimental Mechanics for Students and Young Researches 2022 (IWAEM'22)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 植田芳昭
2. 発表標題 水没する撥水球によって発せられる放射音について
3. 学会等名 日本実験力学会 サステナブル・エンジニアリング分科会研究会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yoshiaki UEDA, Hiroaki OHASHI, Tomoya NAKAJIMA, Manabu IGUCHI
2. 発表標題 Thermal Effect on Sound Emission Due to Water Entry of a Hydrophobic Sphere
3. 学会等名 Proc. 16th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Wakimoto, K. Katoh, Y. Ueda, M. Iguchi
2. 発表標題 Dynamic surface tension of molten solder in oxidative environment
3. 学会等名 Proc. The 11th International Conference on Multiphase Flow（国際学会）
4. 発表年 2023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	井口 学 (Iguchi Manabu) (00043993)	大阪公立大学・大学院工学研究科・客員教授 (24405)	

6. 研究組織（つづき）

	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	加藤 健司 (Kenji Katoh) (10177438)	大阪公立大学・大学院工学研究科・教授 (24405)	
研究分担者	脇本 辰郎 (Tatsuro Wakimoto) (10254385)	大阪公立大学・大学院工学研究科・准教授 (24402)	
研究分担者	中嶋 智也 (Tomoya Nakajima) (80207787)	大阪公立大学・工学（系）研究科（研究院）・講師 (24405)	削除：令和5年4月1日

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