

平成 30 年 6 月 6 日現在

機関番号：34428

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14452

研究課題名(和文)鉄鋼精錬プロセスにおける界面現象の音響学的診断のための基礎研究

研究課題名(英文)Fundamental study for acoustic evaluation of an interfacial phenomenon in a steel refining process

研究代表者

植田 芳昭(Ueda, Yoshiaki)

摂南大学・理工学部・講師

研究者番号：00599342

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：鉄鋼精錬プロセスにおいて、メソスケールな気液界面現象によって生成されるマイクロバブルの量がプロセスの反応促進にとって非常に重要となることが知られている。しかしながら、熔融金属は不透明であることから、その内部の状態を直接観察によって把握することができない。そこで本研究では、溶鋼と動粘度がほぼ同じである水を用いた水モデル実験を行い、ノズル部での微小気泡の生成・離脱とその際に起こるレイリージェット現象の発生について、直接視認すること無しに音響学的に診断するための基礎的な計測技術を構築した。

研究成果の概要(英文)：In a steel refining process, microbubbles are well known to be an important role for promoting a chemical reaction. However, the state of gas jet (i.e., lots of microbubbles or a gas tube penetrating out of the molten iron bath) injected into a reactor from a nozzle cannot be observed directly because of a molten iron being opaque. The present study attempted to establish a measurement technique for acoustic evaluation of occurrence of a microbubble generation/detachment and Rayleigh jet phenomenon. This experiment was successfully carried out in a water-model experiment, whose the value of the kinematic viscosity is almost identical with that of a molten iron, by synchronizing the recorded results between a hydrophone and a high-speed photograph.

研究分野：流体工学

キーワード：鉄鋼精錬プロセス 流体工学

1. 研究開始当初の背景

鉄鋼業・非鉄金属工業分野では、精錬反応の促進のために反応容器内にガスが吹き込まれる。図1は反応容器内部で気泡を介して起こる反応プロセスを概略表示したものである。ガスは反応容器底部に取り付けられたノズルから吹き込まれ(図1-①)、気泡となって熔融金属中を上昇し、熔融金属に流動を与える(図1-②)。その後、上昇気泡は熔融金属とスラグの界面を通過する(図1-③)。このようなガスを吹き込むことによる攪拌で、プロセスの反応を促進させるためには、(1)図1-②の液流動による攪拌を強くすること、(2)多量のマイクロバブルを生成するなどにより気液界面積を増やすことが必要である(図1-①③)。このうち、前者は容易にコントロールすることが可能であるが、後者については、その現象自体がほとんど分かっていないというのが現状である。

先行研究によれば、マイクロバブルが生成・崩壊するとき、その温度は数千度にまで上昇し、マイクロバブル内部の圧力は非常に高圧になることから、化学反応は促進される。つまり、メソスケールな気液界面現象により生成されるマイクロバブルの量が、プロセスの反応促進にとって非常に重要となるが、実際の鉄鋼精錬プロセスでは熔融金属は不透明であることから、内部の状態を直接観察によって把握できない。そこで、メソスケールな気液界面現象が起こるときの音の変化に着目し、マイクロバブルの生成量を浴外から直接視認することなしに音響学的に診断す

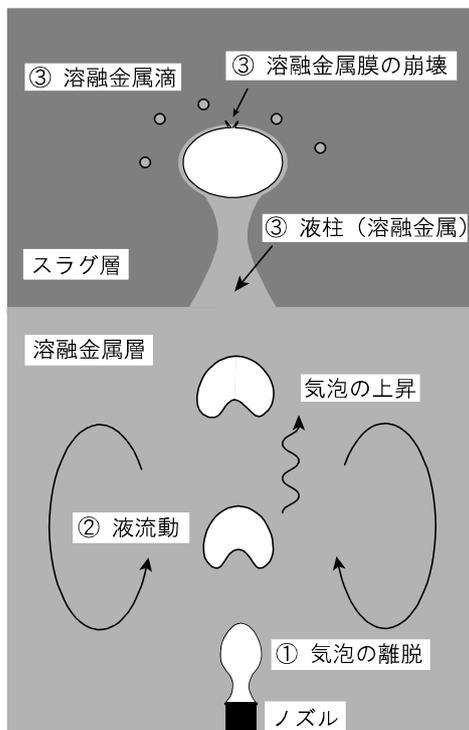


図1 反応容器中での気泡の挙動

る方策が開発できれば、吹き込むガスの投入エネルギーを必要最小限に抑えることができ、炭酸ガスの排出削減が叫ばれている鉄鋼業・非鉄金属工業分野において資するところは非常に大であると考えたことが背景である。

2. 研究の目的

鉄鋼精錬プロセスにおいて反応を促進するには、ノズルから容器内へガスを吹き込むときに生成される微小気泡とそれらの合泡によるレイリージェット現象、および、吹き込まれたガスが気泡となって熔融金属とスラグ界面を通過するときにかかるメソスケールな気液界面現象が非常に重要な役割を果たす。しかしながら、熔融金属は不透明であることから、直接観察による評価は行えない。

そこで本研究では、溶鋼と動粘度がほぼ同じである水を用いて水モデル実験を行い、ノズル部での微小気泡の生成・離脱と、その際起こる複数気泡の合泡によるレイリージェット現象の発生について音響学的に診断する手法の可能性を探求することを主な目的としている。

3. 研究の方法

(1) 騒音計による浴外からの放射音計測

透明なアクリル製矩形水槽(500mmW×500mmD×1000mmH)の底部中央に内径φ3.0[mm]の単孔ノズルを取り付け、マスフロー・コントローラーから所定の質量流量の空気を送ることにより、連続気泡を生成する。そのときノズルで成長・離脱する気泡の様子を高速度カメラ(5000[frames/s])で撮影し、そのときの放射音をノズル近傍の浴外から騒音計(周波数範囲:20~8000[Hz])により5秒間録音する。騒音計により録音された音圧データは、PCによりFFT解析される。

(2) 水中マイクによる放射音と高速度写真の同期計測

透明なアクリル製矩形水槽(300mmW×300mmD×170mmH)の底部中央に内径φ1.0[mm]の単孔ノズルを取り付け(ノズル出口は水槽底部より10[mm]上方)、シリンジポンプに取り付けたシリンジより所定流量の空気を送ることにより、単一気泡を生成する。ノズルで気泡が生成される様子は、横方向から高速度カメラにより5000[frames/s]で撮影する。

ノズルから気泡が生成される際に発する放射音は、ノズルから約10[mm]離れた位置に設置した水中マイクにより計測する。この水中マイクは増幅率約50[dB]のアンプを通じてオシロスコープに接続されており、PCにて周波数解析を行う。これまでの研究報告から、ノズルから生成される単発の気泡が放射する音は約2.0[kHz]以下であることから、本実験でのサンプリング周波数は5.0[kHz]以下とした(図2参照)。

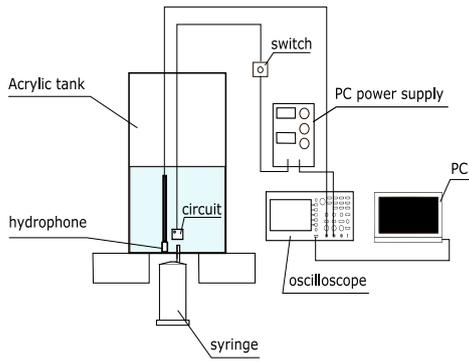


図 2 実験装置図

気泡はノズルで形成され、成長した後、ノズルから離脱する。離脱した気泡は水中を浮上し、水面から大気に放出される。この一連の各現象において、気泡は音を放出する。その中でも、特に、ノズルでの成長・離脱の際と、水面での破裂の際に大きな放射音を発する。本研究では、ノズル部で気泡が発する放射音を測定対象としていることから、水面での破裂の際に放射される音を軽減するため、水面には多孔質体を被せておく。

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。

4. 研究成果

(1) 騒音計による浴外からの放射音計測

図3は、空気流量 $Q_g=4.85$ [L/min] でノズルから吹き込まれる連続気泡が発する放射音を騒音計により浴外から5秒間録音し、その結果をFFT解析した結果である。参考のため、図中には各卓越周波数における主要な離脱気泡の様子を添付しておく。この結果に見られるように、騒音計による録音では、気泡がノズルから離脱・合泡（レイリージェット現象）するときに発する放射音を定性的には把握できるものの、録音データには種々な環境音が混入してしまっている。そのため、ノズ

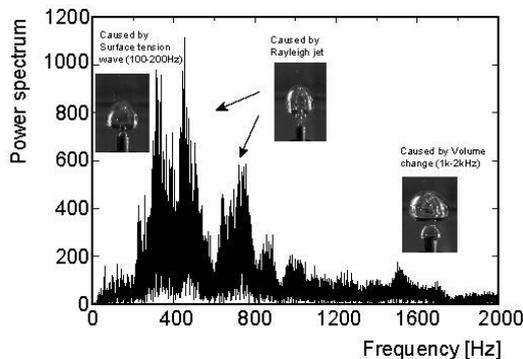


図 3 単孔ノズルから放出される連続気泡が発生する放射音のFFT解析結果(ノズル内径 $d=3.0$ [mm], 流量 $Q_g=4.85$ [L/min])

ル部での気泡の変形に伴って放射される非定常な音圧を時々刻々に同期計測することは困難である。

(2) 水中マイクによる放射音と高速度写真の同期計測

騒音計を用いて浴外から放射音を計測する場合、環境音の混入が避けられず、ノズルから気泡が離脱・生成する際の気泡画像と放射音を時系列で同期計測することは困難であった。そこで本実験では、単孔ノズルから吹き込まれる気泡がノズル部で離脱する瞬間の放射音を、水中マイクを用いて同期計測を行った。

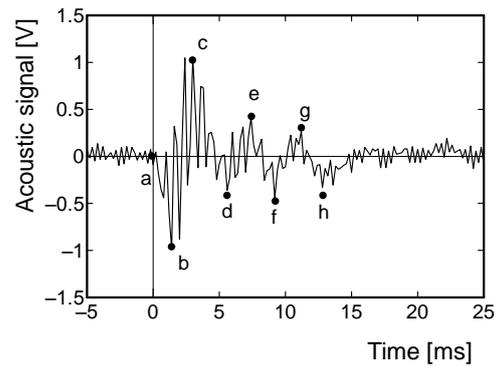


図 4 ノズルから離脱した単一気泡が発する放射音の計測結果

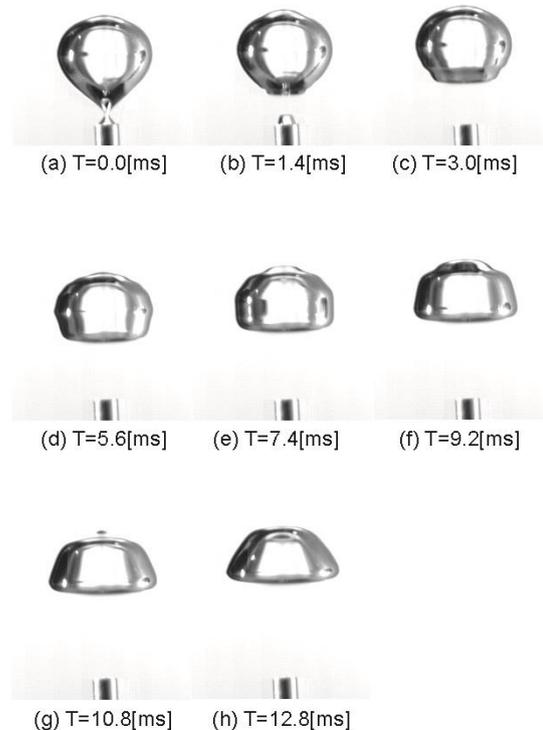


図 5 ノズルから離脱した直後の単一気泡の様子

図4には、球体積等価直径が $d=4.9$ [mm] の単一気泡がノズル出口で成長・離脱する際に放射する音圧を水中マイクにより計測した結果を示す。また図5には、図4で放射音がピークを示す時刻における高速度カメラの撮影画像を示してある。これらの結果から観察されるように、ノズル部で気泡が成長する過程において、音圧はほとんど計測されず、ノズルから気泡が離脱した瞬間から音圧が計測され始める。したがって、図4では、気泡がノズルから離脱した瞬間を時刻 $T=0.0$ [s] と設定している。図4および図5(a)–(f)において、気泡後端がノズルから離脱し、円錐状になった先端が振動するのに応じて、強い放射音が発せられている様子が観察される。図5(h)の後、ノズルから離脱した気泡は、扁平な形状となり浮上するが、その際に発する音圧は非常に微弱である(図4参照)。

図6–7はそれぞれ図4の計測結果をもとにFFT解析した結果とスペクトログラムを描いたものである。これらの解析結果から、本実験の場合、およそ280 [Hz]と1400 [Hz]に卓越した周波数が存在し、それら2種類の周波数からなる強い放射音は、気泡がノズルから離脱後4.0 [ms]以内に放射されていることが観察される。

図8は、マスフロー・コントローラーで空気流量を $Q_g=300$ [cc/min] に調整された空気を内径 $d=1.0$ [mm] の単孔ノズルから放出することにより生成される気泡とそのレイリージェット現象を撮影した高速度画像である。このときに放射される音を周波数解析したところ、1400 [Hz] 付近に卓越した周波数が観測された。この周波数は、単一気泡がノズル

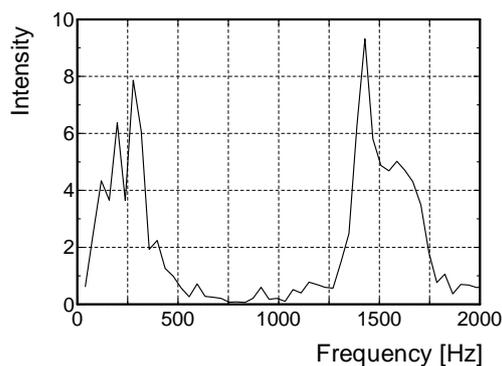


図6 FFT解析結果

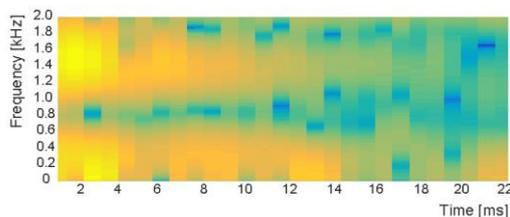
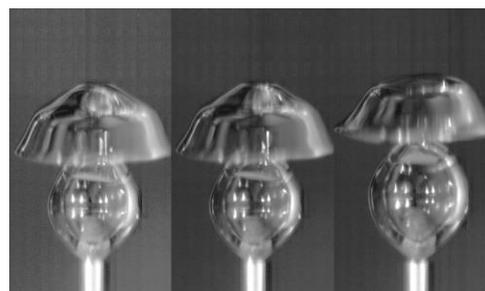


図7 スペクトログラム

から離脱する際に発する放射音の卓越周波数の高周波成分とほぼ同じであることが推察されている。

本研究で構築した放射音と高速度画像の同期計測手法により、ノズルから離脱する単一気泡自身の成長・離脱・崩壊の際に発する音圧スペクトル、および、複数気泡が合泡するときに起こるレイリージェット現象による卓越周波数を捉えることに成功した。このような微小気泡の生成や、レイリージェット現象は浴内の反応効率を促進すると考えられていることから、本研究により、反応プロセスの効率を音響学的診断に診断するための基礎的な計測技術を構築できたと考えている。

しかしながら、実操業では浴内浴鋼の温度は1600度程度であることから、浴内に計測機器を漬けることはできず、浴外から騒音計を通して卓越周波数を把握する必要がある。その際には、本研究の「騒音計による浴外からの放射音計測」で問題となった、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、これについては今後の検討課題である。



(a) $T=0.2$ [ms] (b) $T=0.6$ [ms] (c) $T=4.2$ [ms]

図8 ノズルでの複数気泡の合泡によるレイリージェット (ノズル内径 $d=1.0$ [mm], 流量 $Q_g=300$ [cc/min])

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① Y. Sekiguchi, Y. Ueda, T. Kinoshita and T. Nakajima, Measurement of Underwater Sound Generated by Bubbles from a Nozzle, Proc. International Symposium on Advanced Fluid/Solid Science and Technology in Experimental Mechanics, 査読有, 106 (CD-ROM)

[学会発表] (計 16 件)

- ① 木下卓, 植田芳昭, 関口友貴, 中嶋智也, ノズルから吹き込まれる気泡が発する放

射音の計測, 日本実験力学会 2017 年度
年次講演会, 2017

- ② 木下卓, 植田芳昭, 中嶋智也, 気泡崩壊
時の放射音と高速度写真の同期計測, 日
本設計工学会関西支部研究発表講演会,
2017

[図書] (計 1 件)

- ① T.Uemura, Y.Ueda and M.Iguchi,
Springer, Flow Visualization in
Materials Processing, 2017, Chap. 4, 5,
7

6. 研究組織

(1) 研究代表者

植田 芳昭 (UEDA, Yoshiaki)

摂南大学・理工学部・講師

研究者番号：00599342

(2) 研究分担者

中嶋 智也 (NAKAJIMA, Tomoya)

大阪府立大学・工学研究科・講師

研究者番号：80207787