

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 14 日現在

機関番号：34412

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360330

研究課題名(和文)スラグ・メタル・ガス3相流動制御による精錬プロセスの効率化

研究課題名(英文)Enhancement of refining efficiency due to fluid flow control of slag, metal and gas

研究代表者

井口 学 (Iguchi, Manabu)

大阪電気通信大学・工学部・教授

研究者番号：00043993

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,200,000円、(間接経費) 4,260,000円

研究成果の概要(和文)：鉄鉱石とコークスを高炉に挿入し、反応させることによって作られた溶鉄の中には炭素、硫黄、リンなどの多くの不純物や介在物が含まれており、これらを除去しないと製品にはならない。除去操作を精錬というが、このとき不純物や介在物と反応する物質を溶鉄浴内へ投入して攪拌しなければならない。溶鉄浴の温度は非常に高いので攪拌にはガス吹き込み攪拌が一般的に用いられている。精錬効率を上げるのはスラグ・メタル・ガス3相流動現象を明らかにして制御する必要がある。本研究では浴内へ吹き込まれたガスがスラグ表面から大気中へ放出されるまでの一連の挙動を、高速度カメラを用いた可視化実験と数値シミュレーションで明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Molten iron can be produced in the blast furnace due to metallurgical reaction between iron ore and coke. Many kinds of impurities and inclusions however are contained in it. They must be removed by adding refining agents in the bath of reactors such as a converter. This process is called refining. The temperature of the bath is very high and, hence, mechanical agitation using an impeller cannot be applied because of severe erosion of the impeller. Gas injection method based on the gas-lift effect is therefore commonly used to agitate the bath. Enhancement of the refining efficiency is closely associated with control of the dynamic behaviors of bubbles, molten iron, and slag in the bath. Clarification of these behaviors were done on the basis of flow visualization using a high-speed camera and numerical simulation.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・金属生産工学

キーワード：高温材料プロセス 鉄鋼製錬 ガスインジェクション スラグ 気泡 旋回噴流

1. 研究開始当初の背景

近年、低炭素化社会の推進が叫ばれている。民主党鳩山前政権が掲げた「炭酸ガスの25%削減(1990年比)」という数値目標を達成するためには、産業界の中でも特に炭酸ガスの排出量が多い鉄鋼業や非鉄工業分野(産業界の約27%)での技術革新が切望される。

鉄鋼業や非鉄工業分野では、脱ガス・脱硫などの精錬反応の促進、介在物の分離、組成・温度の均一化のために不活性ガス、炭酸ガス、酸素ガス、燃料ガスなどが反応容器内に吹き込まれる。現在鉄鋼業で用いられているガスの吹き込み方法は、とにかく多量のエネルギーを投入(高流量の気泡噴流の形成)することで溶融金属に流動を与え、反応促進を図っている。流体力学的に考察すると、攪拌の強さを向上させるためには出来るだけ小さなスケールの乱流渦を多量に生成する必要がある。その乱流渦のスケールはKolmogorovによって与えられており、投入する気泡噴流のエネルギーの1/4乗に比例する。つまり、現在鉄鋼業で行われている高流量の気泡噴流を形成する方法は非常に効率の悪いことがわかる。このように反応容器への気泡の吹き込み方法に関して、今までに十分な検討がなされていない。

鉄鋼業や非鉄工業分野において見られる反応容器内部で気泡を介して起こるプロセスは、例えば反応容器底部に取り付けられた単孔ノズルからガスが吹き込まれる場合には次のように分類される。

(1) ノズル出口で生成された気泡が溶融金属中を上昇する。

(2) 上昇気泡は溶融金属とスラグの界面を通過する。

(3) スラグ層から大気中へ放出される。その際、気泡はスラグと大気の界面で破裂し、スピittingが起る。それによって飛散した非常に高温な微小液滴群による環境汚染への影響は甚大である。

以上のように、反応容器内への気泡吹き込み方式、および、吹き込まれた気泡挙動の解明は低炭素化の推進に向けた省エネルギープロセス開発を実現することのみならず、環境汚染への被害を抑えるために非常に重要である。

2. 研究の目的

低炭素化社会の推進が叫ばれている昨今、産業界の中でも特に炭酸ガスの排出量の多い鉄鋼業や非鉄工業分野での技術革新は急務である。本研究は、これらの分野で見られる反応容器内部で気泡を媒介として起こる反応プロセスの高効率化を飛躍的に促進し、低炭素なプロセスを実現するモデルを提案する。具体的には、(1) ノズルから吹き込まれる気泡の最適な離脱条件、(2) 溶融金属内を上昇する気泡噴流による攪拌効果の促進、(3) 溶融金属とスラグ界面を通過する気泡が生成する溶融金属滴とマイクロな気泡群を制

御することによる精錬反応の促進、(4) スラグ表面から放出されるスピittingの制御からなる。(5) 最後に、数値流体力学シミュレーションによる全体解析を行い、系全体としての高効率化を促進するモデルを提案する。

3. 研究の方法

本研究では、反応容器内に吹き込まれたガスがノズルから離脱し、スラグ表面から大気中へ放出されるまでに、精錬反応の促進と抑制に対して気泡が重要な役割を果たす現象を抽出し、それらを、おのおの高速度カメラを用いた可視化実験および数値流体力学シミュレーションにより解析し、精錬反応を促進する最適な条件を特定する。それらの個別研究から得られた知見をもとに、筆者らがこれまでに携わってきた混相流に関する数値流体力学シミュレーションを用い、反応容器内全体に対する解析を行う。これによって、低炭素な反応プロセスを実現させるモデルを提案する。

4. 研究成果

精錬反応には溶融金属中に存在する不純物と吹き込まれた気体との気液間反応、不純物とスラグとの反応、不純物と通常は固体の状態での反応などに大別される。このような精錬反応の促進に最も大きく寄与するのは反応界面積を増加させることである。そのためには気泡径はできるだけ小さく、スラグ中のメタル滴はできるだけ小さくする必要がある。ところが、例えばノズルからの気泡生成にはノズルと溶融金属との濡れ性が大きな影響を及ぼし、気泡を小さくすることは容易ではない。また、あまりに気泡が小さいと溶融金属中を浮上しにくくなり、溶融金属中に取り込まれて気泡性欠陥の原因ともなる。スラグ中のメタル滴に関して、メタル滴があまりに小さいと、気泡と同じようにスラグ中に取り込まれ損失の原因となる。したがって、気泡やメタル滴の大きさ制御は非常に重要な課題の一つである。

本研究では、上記研究目的に記述した流れに沿って実験的ならびに数値的に現象解明を行った。まず、(1) ノズルから吹き込まれる気泡の最適な離脱条件については、多くのノズルを用いて生成させた気泡の大きさや上昇挙動ならびにガスリフト効果によって誘起された浴内の溶融金属の流れを明らかにした。(2) 溶融金属内を上昇する気泡噴流による攪拌効果の促進については、気泡噴流の旋回現象に着目し、反応時間に直接関係する均一混合時間がどの程度短縮できるのかを明確にした。(3) 溶融金属とスラグの界面を通過する気泡が生成する溶融金属滴とマイクロな気泡群を制御することによる精錬反応の促進については、実験と数値シミュレーションの両面から界面形状の時間的変化やメ

タル的の生成機構について理解を深めた。ただし、スラグ中へ侵入した気泡表面で表面張力波によって生成される微細なメタル滴の数値シミュレーションについては、計算格子数と計算時間の制約から、まだ成功していない。(5) 最後に、数値流体力学シミュレーションによる全体解析を行い、系全体としての高効率化を促進するモデルを提案すべく、鋭意研究を進めており、上記微細なメタル滴の計算が可能になれば、全容を理解できると考えている。

なお、精練プロセスでは、反応容器や流路と熔融金属との濡れ性が重要な役割を演じることが分かってきた。本研究では濡れ性と流動ならびに流動抵抗に関する基礎的研究も行った。

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 34 件)

1. Steady approach of unsteady low-Reynolds number flow past two rotating circular cylinders, *Journal of Fluid Mechanics*, 736 (2013), doi: 10.1017/jfm.2013.503, pp. 414-443. 査読あり
Yoshiaki Ueda, Teruhiko Kida, and Manabu Iguchi
2. Formation Behaviors of Microchannels in Ni-Al Alloys by Sacrificial Core Method, *J. JSEM*, 13-Special Issue (2013), pp. s209-s212 査読あり
Yuya Teshirogi, Tatsuya Ohmi, Takehiko Kumagai, and Manabu Iguchi
3. Dynamic Behavior of Low-Density Spheres Vertically Penetrating into a Water Bath, *J. JSEM*, 13-Special Issue (2013), pp. s24-s29 査読あり
Yusuke Sakai and Manabu Iguchi
4. 急縮小部を有する微小流路内気液二相流の気泡速度に及ぼす流路高さの影響
混相流, 27-2(2013), 168-174. 査読あり
深澤慧、熊谷剛彦、大参達也、岩井和彦、井口学
5. Rupture of cavity film due to water entry of horizontal superhydrophobic circular cylinders
International Journal of High Temperature Materials and Processes, 31(2012), DOI 10.1515. 査読あり
Yoshiaki Ueda and Manabu Iguchi
6. Numerical Simulation of Gas-Liquid Two-Phase Flow in a Horizontally Placed Hydrophobic Rectangular Channel (Part 2, Influence of Abrupt Contraction)
International Journal of High Temperature Materials and Processes, 31(4-5) (2012), pp.411-413. 査読あり
Yoshiaki Ueda, Tomoya Nakajima, Toshio Ishii, Ryoji Tsujino, and Manabu Iguchi
7. Numerical Simulation of Gas-Liquid Two-Phase Flow in a Horizontally Placed Hydrophobic Rectangular Channel (Part 1, Influence of Abrupt Expansion)
International Journal of High Temperature Materials and Processes, 31(4-5) (2012), pp. 405-410. 査読あり
Yoshiaki Ueda, Tomoya Nakajima, Toshio Ishii, Ryoji Tsujino, and Manabu Iguchi
8. Comparison of mixing time values between gas injections from centered and off-centered L-shaped top lances in the presence of swirl motion
ISIJ International, Note, 52-10 (2012), pp. 1921-1923. 査読あり
Norifumi Kochi, Koji Mori, and Manabu Iguchi
9. 撥水性傾斜平板に沿って降下する液滴の移動挙動に及ぼす液滴物性値の影響
鉄と鋼, 98-8 (2012), 389-396. 査読あり, 酒井祐介、井口学
10. Fabrication of free-form pipes containing microchannels from metal-powder raw materials
J. JSEM, 12-Special Issue (2012), pp.s226-s231. 査読あり
Yutarou Shitara, Tatsuya Ohmi, and Manabu Iguchi
11. Mixing time of a cylindrical bath agitated by gas injection through an off-centered L-shaped top lance
J. JSEM, 12-Special Issue (2012), pp.s69-s74. 査読あり
Norifumi Kochi and Manabu Iguchi
12. Characteristics of poorly-wetted two spheres penetrating into a water bath
J. JSEM, 12-Special Issue (2012), pp.s63-s68. 査読あり
Yusuke Sakai and Manabu Iguchi
13. Water model experiment on the

- entrapment of slag using polymerization
J. JSEM, 12-Special Issue (2012), pp.s40-s45. 査読あり
Manabu Iguchi, Yutaka Sumida, Koji Mori, Tatsuya Ohmi, Yoshiaki Ueda and Keiji Nakajima
14. Integral representation of low-Reynolds-number Hydrodynamics (Study of Stokes' paradox)
J. JSEM, 12-Special Issue (2012), pp.s34-s39. 査読あり
Yoshiaki Ueda and Manabu Iguchi
15. Flow past a square prism with cut corners (Effect of angle of attack)
J. JSEM, 12-Special Issue (2012), pp.s23-s28. 査読あり
Yoshiaki Ueda, Mitsuo Kurata, Teruhiko Kida and Manabu Iguchi
16. Cold model study of spout eye area with the slag layer simulated by low density particles
J. JSEM, 12-Special Issue (2012), pp.s7-s10. 査読あり
Asuka Maruyama and Manabu Iguchi
17. Micro droplets generated on a rising bubble through an oppositely charged oil/water interface
Journal of Visualization, 15-2 (2012), pp. 119-124. 査読あり
Tomomasa Uemura, Yoshiaki Ueda, and Manabu Iguchi
18. Water entry of stripe coated hydrophobic circular cylinders
Journal of Visualization, Short Paper, 15-1 (2012), pp. 33-35. 査読あり
Yoshiaki Ueda and Manabu Iguchi
19. 一对の固体球が水浴内に同時に浸入するときの動的挙動
鉄と鋼, 98-1 (2012), pp.1-7. 査読あり
酒井祐介, 井口学
20. 4つのタイプの空気吹き込みノズルを用いた場合の気泡噴流の熱輸送・混合の実験的評価
実験力学, 11-4 (2011), pp.371-376. 査読あり
藤林晃夫, 井口学, 石井俊夫
21. Numerical observation of flow field around the water column behind a rising bubble through an oil/water interface
ISIJ Int. Note, 51-11 (2011), 1940-1942. 査読あり
Yoshiaki Ueda, Norifumi Kochi, Tomomasa Uemura, Toshio Ishii, and Manabu Iguchi
22. Mixing time in a cylindrical bath agitated by gas injection through an L-shaped top lance in the absence of swirl motion
ISIJ International, 51-11 (2010), 1755-1761. 査読あり
Norifumi Kochi, Koji Mori, Yasushi Sasaki, and Manabu Iguchi
23. 底吹き円筒容器内におけるスラグを模した低密度粒子層に形成されるスパウトアイ
鉄と鋼, 97-10 (2011), pp.519-524. 査読あり
丸山明日香, 井口学
24. 気泡流内のレイノルズ応力と乱流熱流束-単孔ノズルの実験的評価-
実験力学, 11-3 (2011), pp.96-102. 査読あり
藤林晃夫, 井口学, 石井俊夫
25. Relationship between mixing time and the number of holes of a top blowing immersion nozzle in a cylindrical bath
ISIJ International, Note, 51-9 (2011), pp.1561-1563. 査読あり
Hirofumi Ooyabu, Koji Mori, and Manabu Iguchi
26. Fabrication of microchannels in metallic wire bundles by a sacrificial-core method
J. JSEM, 11-Special Issue (2011), pp.S288-S292. 査読あり
Tatsuya Ohmi, Masayuki Sakairi, and Manabu Iguchi
27. Fabrication of oxide coating on Ni-Al microchannel wall for catalyst supporting
J. JSEM, 11-Special Issue (2011), pp.S284-S287. 査読あり
Yutaro Nagase, Tatsuya Ohmi, Akira Yamauchi, and Manabu Iguchi
28. Fabrication of Ni-Al alloy transpiration cooling device by powder-metallurgical microchanneling process
J. JSEM, 11-Special Issue (2011), pp.S272-S275. 査読あり
Masataka Omura, Tatsuya Ohmi, Takehiko Kumagai, and Manabu Iguchi
29. Gas-liquid two-phase flow through an orifice in millimeter-scale rectangular channel
J. JSEM, 11-Special Issue (2011), pp.S53-S58. 査読あり

- Takashi Oke, Takehiko Kumagai, Olsegun J. Ilegbusi, and Manabu Iguchi
30. Mixing time in a cylindrical bath agitated by gas injection through a multi-hole nozzle
J. JSEM, 11-Special Issue (2011), pp.S43-S46. 査読あり
Hirofumi Ooyabu, Ryoji Tsujino, Olsegun J Ilegbusi, and Manabu Iguchi
 31. Behavior of a droplet impacting on a flat plate
J. JSEM, 11-Special Issue (2011), pp.S25-S30. 査読あり
Yusuke Sakai, Yoshiaki Ueda, Toshio Ishii, and Manabu Iguchi
 32. Swirl motion in a cylindrical bath caused by top lance gas injection
ISIJ International, 51-7 (2011), pp. 1080-1085. 査読あり
Jinlong Wang, Hirofumi Ooyabu, Fuming Jinlong, and Manabu Iguchi
 33. Numerical simulation on penetration stage of a rising bubble through an oil/water interfac
ISIJ Int. Note, 51-6 (2011), pp.1011-1013. 査読あり
Norifumi Kochi, Yoshiaki Ueda, Tomomasa Uemura, Toshi Ishii, and Manabu Iguchi
 34. Estimation of slip velocity on a hydrophobic wall.
International Journal of High Temperature Materials and Processes, 30-4/5 (2011), pp. 311-315. 査読あり
Manabu Iguchi and Yoshiaki Ueda
- 〔学会発表〕(計 21 件)
1. キャピラリージェット法による液体金属の動的表面張力測定
日本鉄鋼協会第 165 回春季講演大会講演論文集, 東京、(2014 年 3 月 27~29 日)
脇本辰郎, 前田光輝, 加藤健司, 井口学
 2. 水中に侵入する物体が形成するキャビティに関する研究
日本鉄鋼協会第 165 回春季講演大会講演論文集, 東京、(2014 年 3 月 27~29 日), p.
加藤健司, 南亮輔, 脇本辰郎, 井口学
 3. 流れ学(製鋼プロセスの攪拌を対象として)鉄鋼精錬プロセスにおける精錬
- 反応の基礎と応用を学ぶ」セミナー
(2014 年 1 月 15 日), pp.1-5.
井口学
4. 液中に侵入する粒子後方に形成されるキャビティの挙動に関する研究
日本実験力学会講演論文集、分科会合同ワ - クショッブ 2013, 淡路島、(2013 年 12 月 6, 7 日), pp.
加藤健司, 南亮輔, 脇本辰郎, 井口学
 5. Effect of heating rate on microchanneling behavior in Ni-Al reactivr-sintered specimens
Proc. 7th Int. Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics, ISEM-7, The Grand Hotel, Taipei, Taiwan, Nov. 8-11 (2012), No. .
Yuya Teshirogi, Tatsuya Ohmi, Takehiko Kumagai, and Manabu Iguchi
 6. Alkali Leaching of Cu-Al Alloy Microchannel Lining Layer
Proc. 7th Int. Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics, ISEM-7, The Grand Hotel, Taipei, Taiwan, Nov. 8-11 (2012), No. .
Asuka Maruyama, Tatsuya Ohmi, Masatoshi Sakairi, and Manabu Iguchi
 7. Experimental investigation for flow around the turbine with cylindrical core (Effect of the mounting angle of blade)
Proc. 7th Int. Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics, ISEM-7, The Grand Hotel, Taipei, Taiwan, Nov. 8-11 (2012), No. .
Tomoya Nakajima, Yoshiaki Ueda, and Manabu Iguchi
 8. Dynamic Behavior of Low-Density Spheres Vertically Penetrating into a Water Bath
Proc. 7th Int. Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics, ISEM-7, The Grand Hotel, Taipei, Taiwan, Nov. 8-11 (2012), No. .
Yusuke Sakai and Manabu Iguchi
 9. Numerical simulation of swirl motion caused by an upward periodic jet in a cylindrical container
Proc. 7th Int. Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental

- Mechanics, ISEM-7, The Grand Hotel, Taipei, Taiwan, Nov. 8-11 (2012), No. .
Yoshiaki Ueda, Tomoya Nakajima, Tomomasa Uemura, Yasushi Sasaki, and Manabu Iguchi
10. 非定常ガス吹込みによる円筒容器内旋回現象の振幅の測定
 日本実験力学会 2012 会年会講演会講演論文集、豊橋技術科学大学、愛知県豊橋
 (2012年7月14日-7月15日), pp. .
 酒井祐介、設楽守良、中嶋智也、植田芳昭、井口学
11. Water model experiment on the entrapment of slag using polymerization
 Proc. 6th Int. Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics, ISEM-6, International Conference Center, Kansai Airport, Osaka, Nov. 3-5 (2011).
Manabu Iguchi, Yutaka Sumida, Koji Mori, Tatsuya Ohmi, Yoshiaki Ueda and Keiji Nakajima
12. Fabrication of free-form pipes metal-powder raw materials
 Proc. 6th Int. Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics, ISEM-6, International Conference Center, Kansai Airport, Osaka, Nov. 3-5 (2011).
 Yutarou Shitara, Tatsuya Ohmi and Manabu Iguchi
13. Mixing time of a cylindrical bath agitated by gas injection through an off-centered L-shaped top lance
 Proc. 6th Int. Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics, ISEM-6, International Conference Center, Kansai Airport, Osaka, Nov. 3-5 (2011).
 Norifumi Kochi and Manabu Iguchi
14. Cold model study of spout eye area with the slag layer simulated by low density particles
 Proc. 6th Int. Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics, ISEM-6, International Conference Center, Kansai Airport, Osaka, Nov. 3-5 (2011).
 Asuka Maruyama and Manabu Iguchi
15. Characteristics of poorly wetted two spheres penetrating into a water bath
 Proc. 6th Int. Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics, ISEM-6, International Conference Center, Kansai Airport, Osaka, Nov. 3-5 (2011).
 Yusuke Sakai and Manabu Iguchi
16. 水銀浴中に設置した単孔ノズルで生成した気泡の上昇挙動
 日本設計工学会 2011 年度秋季講演講演論文集(2011年10月20-21日)
井口学、千原知幸、森幸治、西原一嘉
17. 各種攪拌法の特徴と効率改善 (基調講演)
 日本実験力学会 2011 会年会講演会講演論文集、奈良県文化会館、奈良(2011年8月30日-9月1日). .
井口学、植田芳昭、西原一嘉
18. 斜めに水没する撥水性円柱によって形成されるキャビティ
 混相流学会年会講演会 2011 (第12回), 京都, (2011.8.6-8.8).
植田芳昭、井口学
- 他 3 件
- 〔図書〕(計 0 件)
- 〔産業財産権〕
 出願状況 (計 0 件)
 取得状況 (計 0 件)
- 〔その他〕
 ホームページ等
 なし
- 6 . 研究組織
 (1)研究代表者
井口学 (大阪電気通信大学・工学部・教授)
 研究者番号 : 00043993
- (2)研究分担者 (2011、2012 年度)
植田芳昭 (元 北海道大学学術研究員)
 研究者番号 : 00599342