

令和 3 年 5 月 21 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01758

研究課題名(和文) 固液混相の流動抵抗評価と磁場による流動抑制

研究課題名(英文) Control of liquid motion in liquid-solid mixed phase using magnetic field

研究代表者

岩井 一彦 (Iwai, Kazuhiko)

北海道大学・工学研究院・教授

研究者番号：80252261

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,600,000円

研究成果の概要(和文)：磁場は液体金属の流動抑制機能を有する。ここでは、固相と液相とが共存している固液混相を模擬した系に対して磁場の流動抑制機能効果を調査した。磁場印加の対象系として、単純な円柱形状固体棒を円管中に挿入した系と、固体球を円管内に充填した充填層系の二つを採用した。磁場印加の対象系によらず、アルミナ(セラミックス)を固相材質とした系よりも、銅を固相材質とした系のほうが、磁場印加による液体錫の流速低減効果は大きかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

強度や耐食性など、様々な特性を向上させるために、金属材料は種々の元素を添加して合金とすることが多い。しかしながら、 casting中に添加元素が不均一となり、その特性を十分に発揮できないことがある。 casting中の液体金属の流れの抑制がその防止に有効なので、固液混相への磁場印加が、流動抑制にどの程度影響を与えるのかの解明を試みた。その結果、「研究成果の概要」で述べた結果を得た。これは、電磁流体力学の発展に寄与する。また、鉄鋼をはじめとする金属産業のみならず、金属を使用する産業全てへ将来的には波及するものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：A static magnetic field has a function of electrically conductive liquid motion suppression. This function is useful for producing an alloy with high quality.

In this study, effect of the magnetic field on liquid velocity decrease has been examined using two systems. A liquid-solid mixed phase during solidification of an alloy was modeled in these two systems. One was coaxial system composed of a hollow cylinder and a solid cylinder. And the other was packed bed system. In both systems, copper or alumina ceramics was adopted as a solid material. The liquid tin velocity flowing in these systems was evaluated with a and without the magnetic field. In both cases, the liquid motion suppression effect was larger when the solid was copper than that when the solid was alumina ceramics.

研究分野：材料工学

キーワード：電磁流体力学 固液混相

1. 研究開始当初の背景

われわれの日常で使用される金属は、腐食の防止や機械的強度の向上など様々な目的で純金属ではなく合金とすることが多い。種々の金属を液体状態で混合、攪拌した後に固体へと変化させる鑄造プロセスで、成分が不均一に分布する現象である偏析が生じる。固体状態で高温保持するなどの方法である程度は低減可能であるが、成分の不均一分布が mm オーダーより大きなスケールで生じているときにはこの方法では解決困難である。偏析をより高度に抑制するためには、鑄造プロセスにおける液体の流れを抑制することが有効である。

2. 研究の目的

鑄造プロセスでは初期に液相だった合金が徐々に固相へと変化して最終的にすべて固相となる。すなわち、途中段階では固相と液相とが共存している状態である。一方、磁場は液体金属の流動を抑制する機能を有する。かつ、外部から非接触で流動を抑制可能なため、鋼の連続鑄造では電磁ブレーキとして工業化されている。しかしながら、固相と液相とが共存している固液混相状態における、磁場の流動抑制機能については十分に解明されていない。そこで、固液混相状態における、磁場の流動抑制効果の解明を行う。

3. 研究の方法

固相と液相のそれぞれが磁場に対して運動をすれば、いずれの相にも誘導電流、すなわち電磁力が生じるので現象が大変複雑となる。そこで単純化のために、固相運動による電磁気力が無視しうる系を研究対象とする。加えて、固相が単純形状であるときの現象、あるいは無磁場下での現象が明らかな系であれば、実験、数値解析の検証が可能なので好ましい。一方、デンドライトと等軸晶は合金が液相から固相へと変化するときの代表的な形状といえる。そこで、本研究では上述のことを考慮しつつ、デンドライトを模擬した単純な円柱形状固体棒を円管中に挿入した系、および等軸晶を模擬した固体球を円管内に充填した充填層系、の二つを研究対象とした。実験における液相としては比較的低温で液相となる錫を用いた。固相と液相との電気伝導度の差が磁場の流動抑制効果に影響を与えるため、実験における固相としては、液体錫よりはるかに電気伝導度の高い銅、および絶縁体であるセラミックス（アルミナ）を採用した。鑄造中の固液混相状態における実際の現象は、銅を固相とした場合とアルミナを固相とした場合の間にあるので、両者の結果を比較することで推定可能である。

実験装置の概略を図1に示す。

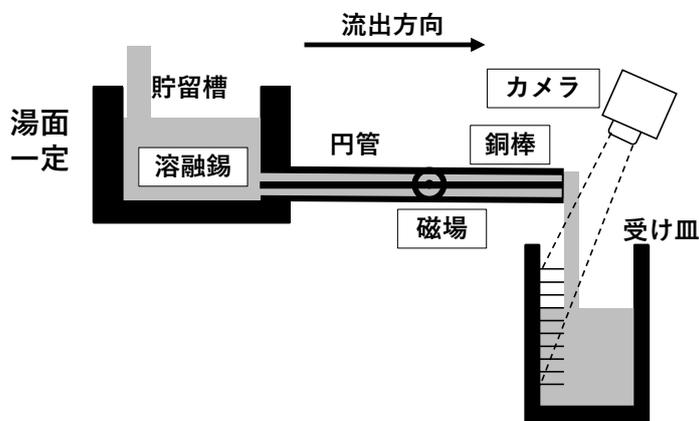


図1 実験装置の概略

実験装置は、液体錫を貯めておく貯留槽、（銅棒を挿入した、あるいは中間に充填層を挟み込んだ）円管、円管から流出した液体錫を受ける受け皿、受け皿内の液体錫の液面高さを解析するためのカメラから構成される。実験手順は以下の通りである。

- (1) 円管内の液体錫流れとは直交する向きの磁場印加
- (2) 貯留槽内の液体錫油面高さを一定に維持した条件下での、液体錫の貯留槽への流入
- (3) 受け皿内の液体錫の湯面上昇速度をカメラで計測
- (4) カメラデータを用いて液体錫の流速を算出

上述の実験パラメータは以下の通りである。

A. 磁場印加の対象系：

- A-1. 単純な円柱形状固体棒を円管中に挿入した系
- A-2. 固体球を円管内に充填した充填層系

B. 固相材質

- B-1. 銅
- B-2. アルミナ(セラミックス)

それぞれの系を対象に研究を行った。

4. 研究成果

(1) 磁場印加による流速低減効果

受け皿内の液体錫の油面上昇速度から求めた流量の例を図 2 に示す。この場合の円管材質はセラミックスである。図からわかる通り、磁場印加により流速は低下した。この例の場合には 12% の低下である。

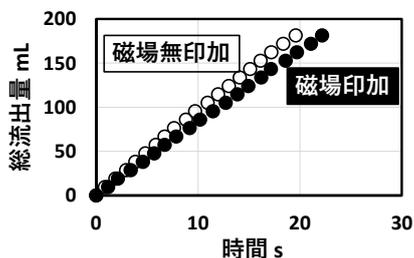


図 2 セラミックス円管を用いたときの磁場印加による流速変化の例

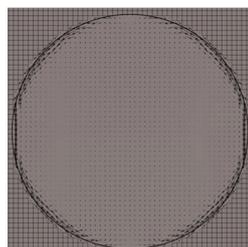


図 3 磁場印加した時のセラミックス円管縦断面における誘導電流分布の例

セラミックス円管に磁場印加した時、円管縦断面における誘導電流分布を数値計算で求めた。その結果を図 3 に示す。円管中央部で誘導電流は下部から上部に流れる一方、壁面近傍では壁面に沿って上部から下部へ向かう誘導電流が集中していることが分かる。この場合、磁場の向きは左から右なので、電磁気力の向きは中央部で紙面手前から奥向き、円管壁面近傍では紙面奥から手前向きとなり、円管内の位置により力の向きは反転する。言い換えると、流動を抑制する領域と加速する領域とが存在するが、総和としては、抑制する向きの力が大きいので磁場印加によって流動抑制されることとなる。

上述の研究条件、A-1 についての結果について述べる。3 mm の銅棒が設置された内径 6 mm の円管へ溶融錫を流した。表 1 は円管の材質を銅あるいはアルミナとした時の、磁場印加していないときの液体錫流速に対する磁場印加時の液体錫流速の比率とその時の印加磁場強度をまとめたものである。この表から液体錫に磁場印加することで、円管の材質によらず錫の流速が抑制されていることが確認できる。銅円管の場合、アルミナ円管と比較して弱い磁束密度でも、液体錫の流動抑制効果が大きくなることが明らかとなった。また、銅円管の場合は、工業的に大規模な装置にも印加可能な磁束密度 0.3 T 程度でも、流動が 50% 以上も抑制されることが確認できた。

表 1 単純な円柱形状固体棒を円管内に挿入した系での、磁場印加の有無による流速の比

Material	Magnetic flux density	Velocity ratio
Alumina	0.53 T	0.82
Copper	0.34 T	0.44

次に、研究条件、A-2 についての結果について述べる。条件 B-1, B-2 のそれぞれの結果を表 2 に示す。電気的絶縁性のアルミナを用いた場合、磁場無印加のときの流速に対する磁場印加時の流速の比は 0.95、良導電性の銅を用いた場合、磁場無印加のときの流速に対する磁場印加時の流速の比は 0.88 であった。両者の磁場強度はわずかに違うものの、銅の場合のほうが流動抑制効果は大きいことが明らかとなった。

表 2 固体球を円管内に充填した充填層系での、磁場印加の有無による流速の比

Material	Magnetic flux density	Velocity ratio
Alumina	0.28 T	0.95
Copper	0.29 T	0.88

(2) まとめ

単純な円柱形状固体棒を円管中に挿入した系、あるいは固体球を円管内に充填した充填層系を対象として、磁場印加による流速低減調査を調査した。その結果、いずれの場合も固相材質が、銅の場合、アルミナ(セラミックス)に比べて、流速低減効果は大きかった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 0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 飯村奨太 岩井一彦 上野和之	4. 巻 14
2. 論文標題 磁場印加された溶融錫と周囲固相の電気伝導度の差が錫流動に及ぼす影響	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 第14回日本磁気科学会年会講演要旨集	6. 最初と最後の頁 14, 15
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 無
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 飯村奨太, 岩井一彦, 上野和之	4. 巻 32
2. 論文標題 磁場印加下での溶融錫流動に及ぼす円管内銅棒の配置効果	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 材料とプロセス	6. 最初と最後の頁 501
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 無
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 飯村奨太 岩井一彦 上野和之	4. 巻 1
2. 論文標題 銅棒が軸方向と平行配置された円管内を流れる溶融錫への磁場印加	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 第13回日本磁気科学会年会講演要旨集	6. 最初と最後の頁 13 - 14
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 無
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 飯村奨太 岩井一彦 上野和之	4. 巻 1
2. 論文標題 銅棒が軸方向と平行配置された円管内の溶融錫流動抑制のための磁場印加	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 平成30年度日本鉄鋼協会日本金属学会両支部合同冬季講演大会概要集	6. 最初と最後の頁 1-1
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 無
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 飯村奨太 岩井一彦 上野和之	4. 巻 32
2. 論文標題 銅棒が軸方向へ配置された円管へ磁場印加したときの熔融錫の流動	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 材料とプロセス	6. 最初と最後の頁 152-152
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 無
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7件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 飯村奨太 岩井一彦 上野和之
2. 発表標題 磁場印加された熔融錫と周囲固相の電気伝導度の差が錫流動に及ぼす影響
3. 学会等名 第14回日本磁気科学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岩井一彦
2. 発表標題 磁場による固液混相の流動抑制
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 「凝固過程の偏析及び欠陥の解析と定量化」シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 飯村奨太 岩井一彦 上野和之
2. 発表標題 磁場印加下での熔融錫流動に及ぼす円管内銅棒の配置効果
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 岩井一彦
2. 発表標題 電磁場の基礎と鉄鋼プロセスへの適用
3. 学会等名 日本鉄鋼協会第146回特殊鋼部会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 飯村奨太 岩井一彦 上野和之
2. 発表標題 銅棒が軸方向と平行配置された円管内を流れる熔融錫への磁場印加
3. 学会等名 第13回日本磁気科学会年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 飯村奨太 岩井一彦 上野和之
2. 発表標題 銅棒が軸方向と平行配置された円管内の熔融錫流動抑制のための磁場印加
3. 学会等名 平成30年度日本鉄鋼協会・日本金属学会両北海道支部合同冬季講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 飯村奨太 岩井一彦 上野和之
2. 発表標題 銅棒が軸方向へ配置された円管へ磁場印加したときの熔融錫の流動
3. 学会等名 日本鉄鋼協会第177回春季講演大会
4. 発表年 2019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	上野 和之 (UENO Kazuyuki) (20250839)	岩手大学・理工学部・教授 (11201)	

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