

特別講演

□第175回春季講演大会学術功績賞受賞記念特別講演
(平成30年3月21日)

電磁場利用プロセスの研究

Materials Processings Using Electromagnetic Fields

岩井一彦 北海道大学
Kazuhiko Iwai 大学院工学研究院
教授



*脚注に略歴

1 はじめに

このたびは、栄えある学術功績賞をいただきましたこと、身にあまる光栄です。小職の主たる研究分野である材料電磁プロセッシングに関しては、すでに名著^{1,3)}があるのでそちらを参照していただき、本稿では小職が従事してきた研究の一部を紹介させていただきます。

2 コールド・クルーシブル

コールド・クルーシブルは、非接触を特長とする活性金属等に適した融解プロセスである。小職の研究はこのコールド・クルーシブルを対象とした数値解析および実験が最初であった。スリットを入れた銅パイプを模擬クルーシブルとしてセラミックの上に載せ、その内で融解させたアルミニウムを取り出した後の写真をFig.1⁴⁾に示す。底部に置かれたセラミックの変色箇所がわずか数ミリ幅のスリットに対応していることから、アルミニウムが融解時に大きく変形していたことが一目瞭然である。この研究を通じて、明瞭で分かりやすい結果を得るためには、実験に工夫を凝らすことが重要であることを学んだ。

3 交流磁場印加による液体金属運動

交流磁場を液体金属に印加することで励起される波動、流動などの運動形態は周波数に大きく依存する。そこで、交流成分に直流成分を重畳させた電流とはなるものの、出力可能な周波数帯が広範囲である溶接電源を用いて、液体金属の運動形態を調査した。具体的には、円筒容器内に液体金属(ガ

リウム)で満たし、その周囲に配置したコイルに通電したときに生じる液体金属表面の乱れの時間平均を求めた。その結果をFig.2⁵⁾に示す。横軸は周波数であるが、ある係数を掛けることで、容器サイズを電磁浸透厚みで無次元化したシールドングパラメータ、 R_ω と見なすことができる。

$$R_\omega = 2 \frac{R^2}{\delta^2} = 2\pi f \sigma \mu R^2 \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 f は周波数、 R は円筒容器内半径、 δ は電磁浸透厚み、 μ は透磁率、 σ は電気伝導度、である。

シールドングパラメータが1より小さい周波数を低周波数、1より大きい周波数を高周波数とすれば、液体金属表面の乱れは低周波数、高周波数のそれぞれにピークがあり、中間のシールドングパラメータが1近傍に対応する周波数で

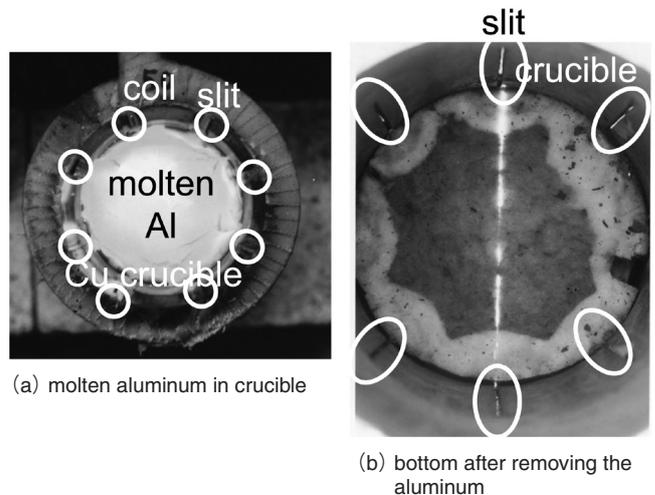


Fig.1 (a) molten aluminum in crucible and (b) bottom after removing the aluminum⁴⁾.

* 平成5年名古屋大学大学院工学研究科博士課程後期課程修了。直ちに、同大学助手、平成8年同講師、平成12年同助教授、平成24年北海道大学教授。

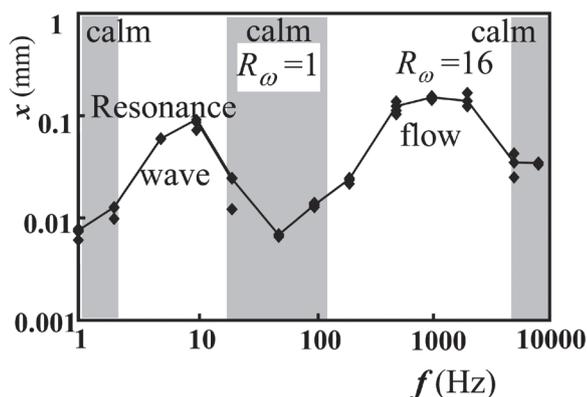


Fig.2 Surface disturbance induced by quasi-sinusoidal magnetic field⁵⁾.

液体金属表面の乱れは小さくなる。低周波数の場合、液体金属には印加電流の周波数に応じた表面波動が生じ、その周波数が液体金属の固有振動数と一致したときに乱れ（波動の振幅）が最大となった。一方、高周波数の場合、液体金属内部には流動が生じ、本実験ではシールドパラメータが16程度の時に乱れ（流動）が最大となった。よって、容器内の攪拌を最大にしたければ、シールドパラメータをこの程度の値に設定するのが良いことが推測される。ただし、この値は液深によって変化するので注意を要する。液体金属を静かに保持したければ超低周波磁場（静磁場）、シールドパラメータが1となる中周波磁場、超高周波磁場の三つの選択肢があり、いずれの条件においても容器サイズが大きくなるにつれて、それらに対応する実周波数は低周波側へシフトする。シールドパラメータが1となる中周波磁場は容器内半径の2乗に反比例する（(1)式参照）のに対し、共振によって大きな表面波動が励起される固有振動数は、液深が深ければ容器内半径の平方根に反比例すると見なせるので、容器内半径が大きくなるにつれて両者の差は縮まり、やがて両者は同一周波数となる。このときは、シールドパラメータが1であっても、共振による表面波動が励起されてしまうので、液体金属を静かに保持できる3領域の周波数帯が存在するのはある容器サイズ以下までである。また、超低周波磁場（静磁場）印加では流動抑制、超高周波磁場では液体金属の形状制御と表面近傍での発熱、中周波磁場では液体金属全体での発熱、というそれぞれの周波数帯に応じて、異なる機能が期待できる。

4 強磁場を利用した、導電性液体中の第2相挙動観察実験

静磁場が印加されている溶鋼中を非導電性の介在物が運動すれば、電磁気力が発生する。よって、電磁ブレーキの強度

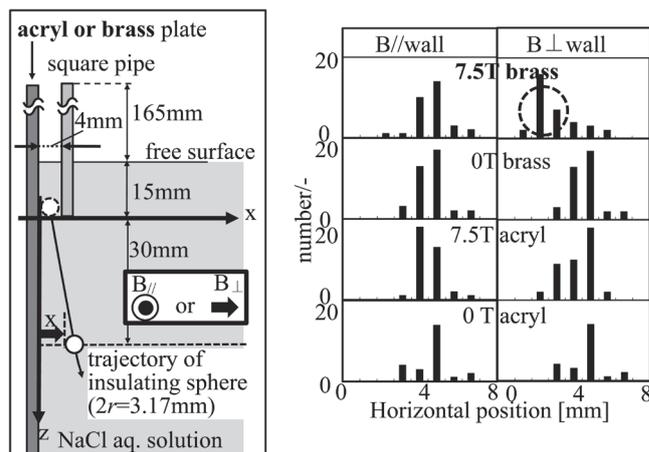


Fig.3 Horizontal distance of falling insulating sphere from wall under static magnetic field imposition⁶⁾.

や有無により、介在物挙動は変化することとなる。しかしながら、流動観察によく利用される水モデル実験では、電磁気力の効果を顕在化することができない。そこで、食塩水と超伝導磁石とを利用した実験系を構築した。食塩水は透明かつ安全なのでモデル実験に適しているが、電気伝導度が溶鋼に比べて104倍以上小さいので、超伝導磁石による強磁場を用いることで電磁気力を顕在化させた。具体的な実験として、導電性の真鍮、あるいは非導電性のアクリルでできた鉛直壁を固液界面に見立てて、壁面に平行、あるいは直交する向きの水平磁場を食塩水に印加しつつ、介在物を模擬した非導電性のテフロン球を落下させた。その結果、ほとんどの条件において、テフロン球は壁から離れる傾向にあった (Fig.3⁶⁾)。真鍮壁に直交する向きの水平磁場を印加したときには、テフロン球が壁から離れなかったが、これは連鋳鉄片長辺側に相当する。ただし、この結果は定性的であり、今後定量的な検討が待たれる。

5 電磁場印加による凝固組織制御

電磁ブレーキと同一レベルの強度である0.3Tの静磁場と、20Aの直流電流とを凝固中の炭素鋼 (S45C) に重畳印加することで、マイクロ組織がデンドライトから等軸へと変化することが分かった (Fig.4⁷⁾)。交流電流でも同様の結果が得られるが、直流電流のほうが効果は強そうである。

6 振動による介在物の除去とバセット力

溶鋼中の介在物を除去するためには、その挙動を把握することが重要である。球形介在物の浮上速度は直径の2乗に比例するので、小さな介在物の除去が困難であることはよく知

られている。そこで、介在物に水平方向の振動電磁気力を与えて、浮上速度の遅い小さな介在物を大きな介在物と合体・凝集させることで、分離・除去するプロセスを提案した⁸⁾。左右に振動しつつ浮上するときの介在物近傍の溶鋼の速度分布は、一様流の中に置かれた介在物周りの速度分布とは異なり、慣性力、粘性力、浮力等に加えてバセット力が作用する。固体が流体中を周期振動するときのバセット力が無視しうるのはか否かについて、溶鋼中のアルミナ介在物と相似条件が成立する過去の研究を調べてみると、無視しうる、無視し得ない、との異なった結論の論文が存在した。そこで、我々も改めて検討したところ、「無視し得ない」との結果を得た。Fig.5⁸⁾に示す通り、バセット力ではなく、慣性力、あるいは粘性力が支配的な領域においても、バセット力を無視することで、介在物の振幅、あるいは振動電磁気力と介在物の運動との位相差には大きな誤差が生じることが分かった。液体中固相の非定常運動解析におけるバセット項の重要性を感じた次第である。

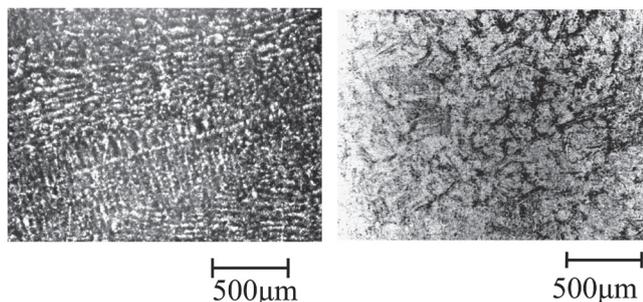


Fig.4 Micro-structure solidified with and without electromagnetic fields⁷⁾.

7 濃度境界層内部の物質移動促進

液体金属のシュミット数は100程度なので、反応が起きている固液界面の液相側に形成される濃度境界層は、速度境界層の内部に存在する。濃度境界層内部の物質移動を促進させる方法の一つとしてバルク流速の増大が挙げられるが、本質的には濃度境界層のみを攪拌すれば良い。そこで、今まで検討されていない方法である、電磁気力による濃度境界層内の局所攪拌と流体力学的不安定性の利用についての基礎的な調査を行った⁹⁾。電極を銅、溶液を硫酸+硫酸銅の水溶液として、Fig.6⁹⁾に示す向きの静磁場を印加しつつ通電を行った。アノードでの銅電極溶解反応により形成される濃度境界層は銅イオン濃度が高く濃い青色を呈するので、溶液の明度として

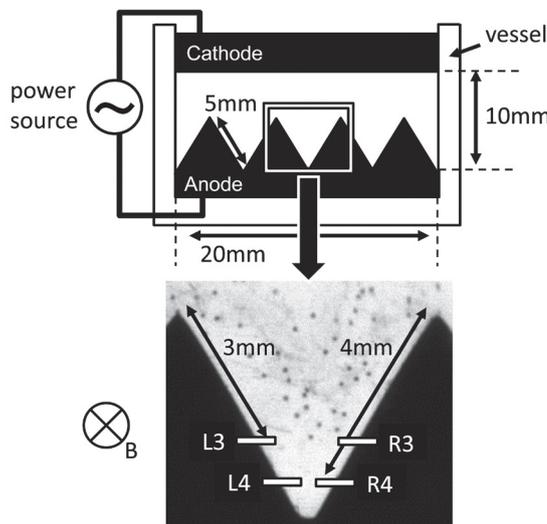


Fig.6 Schematic view of experimental apparatus⁹⁾.

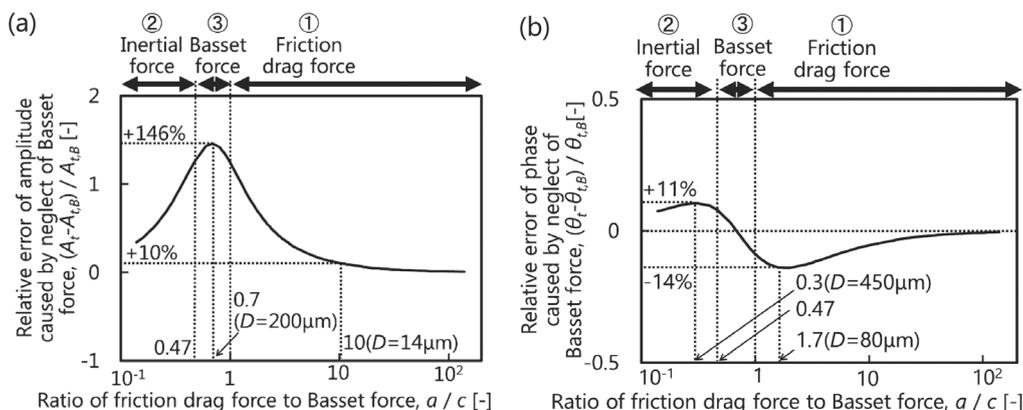


Fig.5 Relative error of Al_2O_3 inclusion motion in molten steel caused by neglect of Basset force as a function of ratio of friction drag force to Basset force, a/c when frequency of oscillating electromagnetic force, $f=50Hz$ and inclusion diameter, $D=1-1000\mu m$: (a) amplitude, (b) phase based on oscillating electromagnetic force as phase reference⁸⁾.

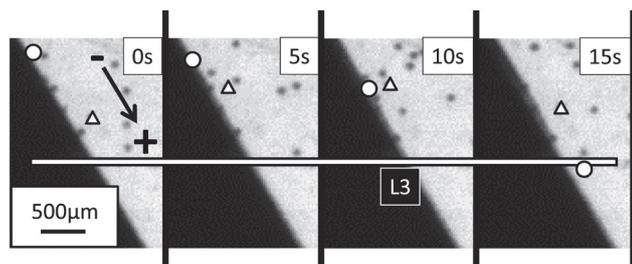


Fig.7 Particles motion near left side slope⁹⁾.

て評価できる。Fig.6⁹⁾のL3近傍における明度の低下は、直流と交流との重畳電流を通電することで、直流通電に比べて抑制された。両者とも同量の銅が溶解するにもかかわらず明度に差が生じた理由は、交流電流を重畳することで振動による局所攪拌が起きたためである。

直流通電時のトレーサー粒子の動きをFig.7⁹⁾に示す。固液界面の最近傍に位置する粒子(○)は常に下降したものの、界面から200ミクロン程度離れた粒子(△)は最初上昇して、その後下降に転じた。L3近傍の電磁気力は常に斜面に平行で上向きに作用する。一方、界面近傍では水溶液中の銅イオン濃度が増加することでバルクに比べて高密度となるので下降流が生じ、その範囲は濃度境界層の形成に伴い広がる。従って、界面から200ミクロン程度離れた粒子は向きを反転したと考えられる。このときの粒子の速度差から、濃度境界層と同一スケールの波長を持つKelvin-Helmholtz不安定性が生じうる(濃度境界層を攪拌できる)と推算された。今後は、マイクロスケールの局所攪拌を電磁場で励起する条件を見いだす方向へ研究を進めていきたい。

8 最後に

恩師である故鞭巖先生、浅井滋生先生をはじめとする大学や公的研究機関、鉄鋼等の民間企業の方々、困難な実験に果敢に取り組んでやり遂げてくれた学生達、多くの事務作業を手助けしてくれた事務や秘書の方々等、授賞は周囲の方々のおかげです。この場を借りて皆様方に御礼申し上げます。あわせて、今後ご指導ご鞭撻のほど、よろしくお願い申し上げます。

参考文献

- 1) 浅井滋生：入門 材料電磁プロセッシング, 内田老鶴圃, 東京, (2000)
- 2) 材料電磁プロセッシング, 日本鉄鋼協会材料電磁プロセッシング研究グループ編, 東北大学出版会, 仙台, (1999)
- 3) S.Asai : Electromagnetic Processing of Materials, Springer, Dordrecht, Heidelberg, London, New York, (2012)
- 4) 岩井一彦, 佐々健介, 浅井滋生：鉄と鋼, 79 (1993), 1053.
- 5) Z.Su, K.Iwai and S.Asai : ISIJ Int., 39 (1999), 1224.
- 6) K.Iwai, K.Kumazawa and I.Furuhashi : ISIJ Int., 51 (2011), 1825.
- 7) K.Iwai and T.Kohama : ISIJ Int., 50 (2010), 1357.
- 8) 丸山明日香, 岩井一彦：鉄と鋼, 102 (2016), 106.
- 9) 横田智之, 丸山明日香, 山田隆志, 岩井一彦：鉄と鋼, 102 (2016), 119.

(2018年5月10日受付)