



私の論文

／ 今振り返ってみて、行間にこめた思い、エピソード

電磁振動による介在物除去に向けて Toward Inclusion Removal Using Electromagnetic Vibration

北海道大学
大学院工学院

丸山明日香
Asuka Maruyama

北海道大学
大学院工学院工学研究科
教授

岩井一彦
Kazuhiko Iwai

1 はじめに

この度は、日本鉄鋼協会、依論文賞をいただきまして誠にありがとうございます。また、拙著「振動電磁場の印加下における導電性流体中の非導電性粒子挙動に及ぼすバセット力の影響」¹⁾を紹介する機会を与えてくださった編集委員の方々には深くお礼申し上げます。本稿では、研究に至った経緯、結果の概要、成果の応用と今後の展望について述べさせていただきます。

2 電磁振動による介在物除去の提案

様々な製造業において、介在物の含有量が少ない高潔な鉄鋼材料への需要がますます高まっている。一般的に、鉄鋼製造プロセスにおける溶鋼の脱酸処理に伴う介在物生成は避けられないため、介在物の除去工程が必要不可欠である。従来、タンディッシュや連続鋳造機の鉛直部において、介在物と溶鋼との密度差を利用した浮上分離除去が行われている²⁾。しかしながら、介在物の浮上速度は介在物直径の2乗に比例するため、微小介在物の浮上速度は極めて遅く、高潔鋼の生産性は低い。それゆえ、微小介在物の除去は今日の鉄鋼製造分野における解決すべき課題の一つとして注目を集めている。微小介在物間の衝突・凝集は介在物の見かけサイズを大きくし、介在物の浮上速度を増加させる。そこで著者らは、以下に述べる電磁振動を利用した介在物間の衝突頻度促進方法を提案した¹⁾。まず、電磁振動を印加しない場合における介在物間の衝突の模式図をFig.1 (a)¹⁾に示す。介在物は浮力によって浮上するが、直径の異なる介在物間では浮上速度に差があるため、浮上速度の速い直径の大きな介在物

の進行方向に浮上速度の遅い直径の小さな介在物が存在すれば、両者は衝突する。このような衝突は差動衝突と呼ばれる。溶鋼の単位体積当たりの衝突頻度は、直径が介在物の直径の和、高さが介在物間の浮上速度差である円筒体積に比例する。ここで、Fig.1 (b)¹⁾のように介在物に対して水平方向の振動を励起すると、介在物の通過領域が広がるので介在物間の衝突頻度が促進されることが考えられる。

そこで、電磁振動印加下における溶鋼中介在物間の衝突頻度を評価することを目的とし、まずは、電磁振動印加下における単一の介在物挙動を明らかにすることにした。

3 流体中粒子の非定常運動に対する運動方程式

電磁振動印加下における溶鋼中介在物挙動を明らかにするためには、流体中における粒子の非定常運動に対する運動方程式を解く必要がある。流体中における粒子の非定常運動といえ

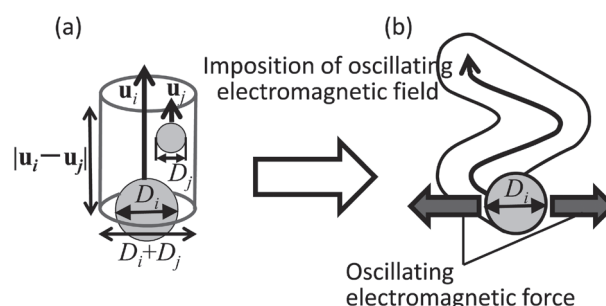


Fig.1 Enhancement of collision frequency by imposing oscillating electromagnetic field; (a) volume in which inclusion of diameter D_i collides with inclusion of diameter D_j per unit time, (b) extension of volume by horizontal oscillating electromagnetic force¹⁾

* [今回の対象論文]

丸山明日香, 岩井一彦: 「振動電磁場の印加下における導電性流体中の非導電性粒子挙動に及ぼすバセット力の影響」, 鉄と鋼, Vol.102 (2016), No.3, pp.106-112 (第80回依論文賞受賞論文)

ば、初速ゼロの粒子が自由落下する運動について、重力、粘性抵抗力、粒子の慣性を考慮した運動方程式を解く問題⁴⁾がよく知られているものの、この運動方程式は流体中における粒子の非定常運動に対する運動方程式としてはかなり簡易化されたもので、すべての系に適用できるわけではない。流体中における粒子の非定常運動をより詳細に記述する運動方程式は、Basset-Boussinesq-Oseen (BBO) 方程式として知られている⁵⁻⁷⁾。粘度 η 、密度 ρ_f の静止流体中において、直径 D 、密度 ρ_s の粒子に対し外力 F が働く場合のBBO方程式は以下のとおりである。

$$\frac{\pi D^3}{6} \left(\rho_s + \frac{\rho_f}{2} \right) \frac{du}{dt} = -3\pi\eta Du - \frac{3\pi D^2}{2} \sqrt{\pi\rho_f\eta} \int_0^t \frac{du/ds}{\sqrt{t-s}} ds + F \quad \dots (1)$$

ここで、 t は時間、 s は時間 t 以前の時間を表す。左辺は慣性による力であり、粒子自身の慣性による力と周囲流体の慣性(付加質量)による力である。右辺第1項から第3項までは順に、粘性抵抗力、バセット力、外力を表す。式(1)から分かったとおり、バセット力の項では注目している時間 t よりも過去に遡って粒子の加速度が積分されている。すなわち、注目している時間 t において粒子に働く抵抗力は、その時点での粒子速度 u や粒子加速度 du/dt だけでなく、時間 t よりも過去における粒子の運動によっても変化する。これは、粒子の運動が周囲流体へ伝わる(速度境界層が発達する)のに時間がかかるため、注目している時間 t における粒子周囲の速度境界層における流速分布が、時間 t よりも過去の粒子運動の影響を受けて変化することに起因する。複雑運動の場合は、バセット力を解析的に求めることができないだけでなく、コンピュータを使って数値的に求めようとしても、運動時間が長くなるにつれて計算時間が非常に長くなってしまいうため限界がある。一方、今回は振動という繰り返し運動を対象としているので、複雑運動に比べればバセット力の評価は容易だろうと推測し、それゆえ、その研究もすでに行われているだろうと考えた。実際に文献調査を進めていくと、溶融金属一介在物系ではないものの、流体中粒子の振動運動に及ぼすバセット力の影響について述べられた論文⁸⁻¹⁰⁾をいくつか見つけることができた。

そこで次に、これらの先行研究の記述を溶鋼一介在物系に当てはめることができるかどうか判断するために、両者を力学的に紐づけることが可能かどうか検討した。

4 流体中粒子の振動運動を特徴づける無次元数の導出および溶鋼一アルミナ介在物系と先行研究との比較

角周波数 ω の振動運動を対象とした場合、式(1)のBBO方程式は以下のとおり書き換えられる⁵⁾。

$$\frac{\pi D^3}{6} \left(\rho_s + \frac{\rho_f}{2} \right) \frac{du}{dt} = -3\pi\eta Du - \frac{3\pi D^2}{2\sqrt{2}} \left(\sqrt{\eta\rho_f\omega}u + \sqrt{\frac{\eta\rho_f}{\omega}} \frac{du}{dt} \right) + F \quad \dots (2)$$

式(1)と比べて、バセット力の項における加速度の積分部分が簡略化されていることが分かる。これは、振動運動なので粒子の加速度が正と負の値を周期的に繰り返すためである。溶鋼一介在物系と先行研究とで力学的相似が成り立つかどうか評価するために、式(2)を以下のとおり無次元化した。

$$\frac{6F}{\pi D^3 U c} = \frac{a}{c} \ddot{u} + \frac{b\omega}{c} \frac{d\ddot{u}}{d\tilde{t}} + \left(\ddot{u} + \frac{d\ddot{u}}{d\tilde{t}} \right) \quad \dots (3)$$

$$a = \frac{18\eta}{D^2} \quad \dots (4)$$

$$b = \rho_s + \frac{\rho_f}{2} \quad \dots (5)$$

$$c = \frac{9}{\sqrt{2}D} \sqrt{\rho_f\eta\omega} \quad \dots (6)$$

$$\ddot{u} = \frac{u}{U} \quad \dots (7)$$

$$\tilde{t} = t\omega \quad \dots (8)$$

式(3)左辺は外力であり、振動の駆動力でもある。対して、右辺は振動の抵抗力であり、第1項から第3項は順に粘性抵抗力、慣性による力、バセット力である。 a 、 $(b\omega)$ 、 c はそれぞれ粘性抵抗力、慣性による力、バセット力を特徴づける値である。さらに、式(3)右辺第1項と第2項の係数 a/c 、 $(b\omega)/c$ はそれぞれ、バセット力で無次元化した粘性抵抗力および慣性による力を表す無次元数である。すなわち、この二つの無次元数 a/c 、 $(b\omega)/c$ が互いに等しい系であれば、粒子に働く3つの抵抗力の比が一致することとなる。

Fig.2¹⁾は、バセット力で無次元化した粘性抵抗力 a/c を横軸に、慣性による力 $(b\omega)/c$ を縦軸にとり、溶鋼一アルミナ介在物系と先行研究⁸⁻¹⁰⁾のそれぞれの値を示したものである。実線は溶鋼一アルミナ介在物系、○の記号はバセット力を考慮すべきと述べられていた文献¹⁰⁾、+と×の記号はバセット力を省略できると述べられていた文献^{8,9)}を示す。Fig.2より、2つの無次元数が溶鋼一アルミナ介在物系と近い先行研究が2件存在することが分かったものの、この2件の文献におけるバセット力の影響に関する記述は相反しており、溶鋼一アルミナ介在物系に対してどちらの記述を当てはめて考えるべきかを判断するには至らなかった。

以上のような経緯から、自分自身でバセット力の影響を評価してみようと考え、当該論文の研究を実施するに至った。

5 モデル実験による評価

当時の当研究室では、電磁振動印加下における固液界面近傍の濃度境界層および液相流動の可視化観察^{11,12)}にも取り組んでおり、導電性を有する透明水溶液に対する交流電流と直流磁場の重畳印加技術、および、ハイスピードカメラによる流動観察技術を確立していた。そこで、これらの技術を応用し、導電性流体中の絶縁性粒子に対する電磁振動印加実験を行い、粒子挙動に及ぼすバセット力の影響を評価することにした。実験装置の模式図をFig.3¹⁾に示す。透明アクリル製容器と平板銅電極から成る電解セルに、溶鋼のモデルである硫酸銅水溶液を満し、そこに介在物のモデルである絶縁性ポリマー粒子を分散させた。平板銅電極に接続した交流電源により鉛直方向交流電流を印加すると同時に、電磁石により水平方向直流磁場を印加した。粒子直径と交流電流の周波数

は、4項で述べた2つの無次元数 a/c 、 $(b\omega)/c$ が、溶鋼—アルミナ介在物系のそれらと一致するように決定した。交流電流の周期に合わせて点滅するよう電気回路に組み込んだLEDを用いて、交流電流の位相、ひいては、粒子に働く電磁気力の位相を可視化した。ハイスピードカメラによって、電気化学セル内の粒子およびLEDの点滅の様子を録画した後、その動画から粒子振動の振幅および電磁気力に対する位相を測定した。そして、粒子振動の振幅、電磁気力に対する位相の実験値と、バセット力あり、なしで求めた理論値とを比較した。その結果、Fig.4¹⁾のとおり実験値とバセット力を省略して求めた理論値との間に明らかな差が生じることが分かった。特筆すべきは、粘性抵抗力や慣性による力がバセット力よりも大きくなる条件であっても、バセット力を省略して求めた理論値と実験値とに差が生じるという点である。高品質鋼製造のために除去が求められる介在物の直径域 ($100\ \mu\text{m}$ 以下) では粘性抵抗力が支配的な抵抗力となるが、バセット力が粘性抵抗力よりも小さくなる条件であるからと言って、バセット力を無視して介在物挙動の予測をしてはいけないということが実証された。

それでは、溶鋼中介在物挙動に及ぼすバセット力の影響は

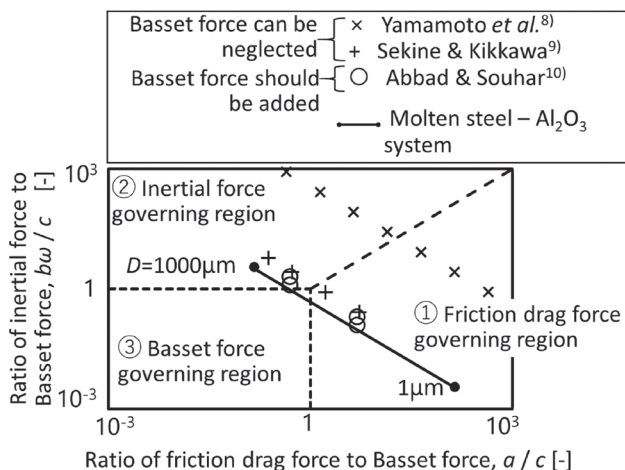


Fig.2 Effect of Basset force on oscillating particle motion in previous studies as a function of ratios of inertial, Basset and viscous forces, and these force ratios acting on Al_2O_3 inclusion in molten steel when frequency of oscillating electromagnetic field, $f = 50\text{Hz}$ and inclusion diameter, $D = 1-1000\ \mu\text{m}^{-1}$

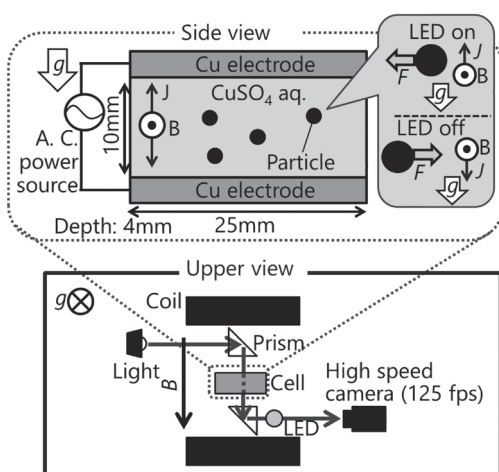


Fig.3 Schematic of experimental apparatus¹⁾

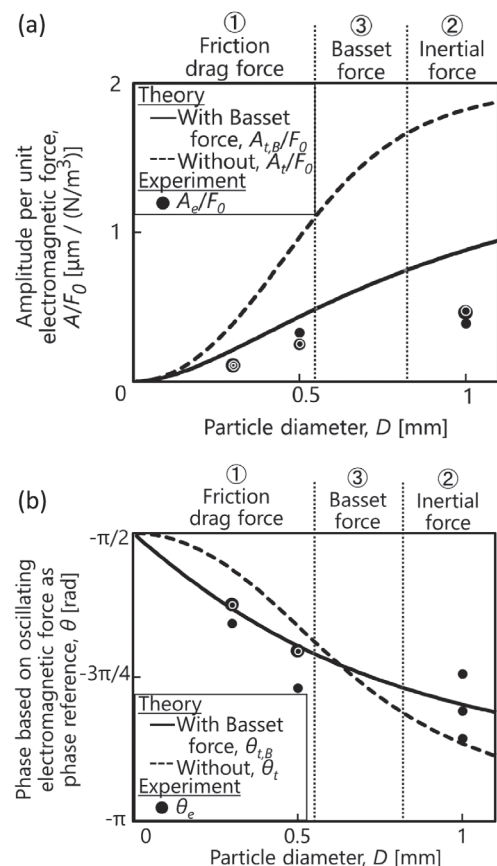


Fig.4 Comparison of experimental data with theoretical predictions with and without Basset force ; (a) amplitude, (b) phase based on oscillating electromagnetic force as phase reference¹⁾

どれほどのものであろうか。Fig.5¹⁾に溶鋼-アルミナ介在物系における、バセット力の省略による介在物振幅の予測値の誤差を示す。振幅の予測値の誤差は最大で実際の値の146%にも及ぶ。また、粘性抵抗力が支配的になる $a/c > 1$ の条件であっても、バセット力の省略によって実際の値の数十から100%強もの誤差を生むことが分かった。

6 成果の応用、今後の展望

溶鋼中介在物の振動運動の予測にはバセット力を考慮する必要があることが明らかとなったため、電磁振動印加下における溶鋼中介在物間の衝突について、バセット力を考慮に入れて衝突頻度の評価を行った¹³⁾。そして、電磁振動無印加(差動衝突)の場合よりも衝突頻度が数倍になる電磁振動印加条件を見出した。しかしながら、交流電流と直流磁場を重畳印加する方法を用いる場合、交流電流の印加強度を非常に大きくする必要があることも分かった¹³⁾。

続いて著者らは、誘導加熱などで用いられる交流磁場印加による介在物除去の検討を行った¹⁴⁾。この方法は、タンディッシュに設けられたチャンネル内の溶鋼に対して交流磁場を印加することで、介在物振動による介在物間の衝突促進およびピンチ力によるチャンネル壁面への介在物のトラップを利用するものである¹⁵⁾。電流印加の必要が無いだけでなく、溶鋼加熱と介在物除去を同時に行うことができるという特長がある。著者ら¹⁴⁾は、チャンネル中心を初期位置とする介在物が浮力と電磁気力によって振動しながら浮上する挙動について、簡易な解析系を用いた数値シミュレーションを行い、介在物の除去時間を求めた。その結果、印加磁場強度が一定の場合、介在物の除去時間を最短にする最適周波数が存

在することを見出した。この結果はチャンネル内のすべての介在物に適用できるものではなく、また、チャンネル内における介在物間の衝突頻度もより詳細に評価する必要があるなど、まだ明らかにすべき課題は残されているものの、将来的に有効な介在物除去法の一つとなればと期待している。

7 おわりに

以上のとおり、電磁振動印加下における介在物間の衝突頻度を評価するという目的のために、単一の介在物に働く抵抗力の一つであるバセット力の影響という、極めて原始的な問題に立ち返って研究を始めることとなってしまった。当初の目的の達成は遅れてしまったものの、結果的には、学術的にも工業的にも意味のある知見を得ることができた。今回、その成果が評価されたことを大変光栄に思うとともに、日本鉄鋼協会ご関係者の皆様には深くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 丸山明日香, 岩井一彦: 鉄と鋼, 102 (2016), 106.
- 2) 江見俊彦: 鉄と鋼, 100 (2014), 31.
- 3) 谷口尚司, 菊池淳: 鉄と鋼, 78 (1992), 527.
- 4) 矢野健太郎, 石原繁: 基礎解析学 (改訂版), 裳華房, 東京, (2008), 27.
- 5) C.M.Tchen: PhD thesis, Technical University of Delft, The Netherlands, (1947)
- 6) J.O.Hinze: Turbulence, McGraw-Hill Inc., New York, (1959), 460.
- 7) R.Clift, J.R.Grance and M.E.Weber: Bubbles, Drops and Particles, Academic Press Inc., New York, (1978), 285.
- 8) 山本博美, 高曾徹, 速水洋, 平田敬一郎: 九州大学機能物質科学研究所報告, 8 (1994), 141.
- 9) 関根正人, 吉川秀夫: 土木学会論文集, 387 (1987), 209.
- 10) M. Abbad and M. Souhar: Exp. Fluid, 36 (2004), 775.
- 11) 横田智之, 丸山明日香, 山田隆志, 岩井一彦: 鉄と鋼, 102 (2016), 119.
- 12) 横田智之, 丸山明日香, 山田隆志, 岩井一彦: 日本金属学会誌, 81 (2017), 516.
- 13) 丸山明日香, 岩井一彦: 鉄と鋼, 102 (2016), 113.
- 14) 丸山明日香, 岩井一彦: 鉄と鋼, 103 (2017), 499.
- 15) 谷口尚司, J.K.Brimacombe: 鉄と鋼, 80 (1994), 312.

(2018年9月28日受付)

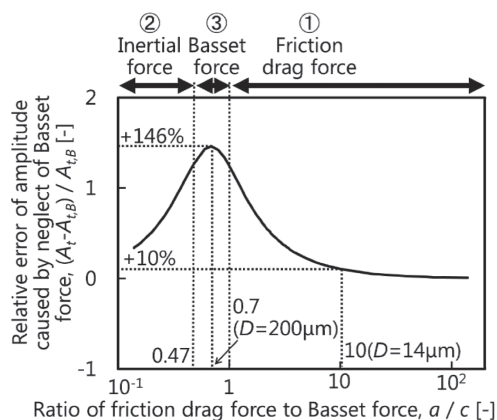


Fig.5 Relative error of Al_2O_3 inclusion amplitude in molten steel caused by neglect of Basset force as a function of ratio of friction drag force to Basset force, a/c when frequency of oscillating electromagnetic force, $f = 50\text{Hz}$ and inclusion diameter, $D = 1\text{-}1000\ \mu\text{m}$ ¹⁾