

技術資料

Technical Data

レビテーション溶解炉における電磁攪拌挙動の数値解析

紙本朝子*¹, 井上晋輔*²

Numerical Analysis of Electromagnetic Stirring of Molten Metal in Levitation Melting Furnace

Asako KAMIMOTO and Shinsuke INOUE

Synopsis

Cold crucible levitation melting (CCLM) is used to produce high-purity ingots of reactive metals, because a solidified shell of the melting material protects the melt from contamination. This paper presents a three-dimensional simulation of the movement of metal in CCLM. To improve the stability of levitation of the apparatus, movement simulation for the metal was carried out by combining electromagnetic field and fluid analysis. The conclusions of this study can be summarized as follows:

1. The calculated magnetic flux density distribution, surface velocity and shape of the molten metal agreed well with the measured value.
2. The development of the method for transferring the shape of the surface of the melt and regeneration of mesh considering skin effect allowed evaluation of the Lorentz force acting on the molten metal.

1. 緒言

水冷銅ルツボを用いたレビテーション溶解炉 (Cold Crucible Levitation Melting : CCLM) は、被溶解物とルツボとの非接触溶解により、高潔¹⁾かつ高温での溶解が可能であり、Tiをはじめとした活性金属や高融点金属の溶解に利用されている。Fig. 1 にレビテーション溶解炉の概略図を示す。レビテーション溶解炉は、高周波誘導コイルと、高さ方向に複数のスリットを設けた円筒状の水冷銅ルツボにより形成される。コイルに電流を印加すると、スリットを介してルツボ内の材料に誘導電流が生じ、ジュール熱により加熱・溶解される。また、コイル電流により発生した磁場と誘導電流の相互作用により、溶湯にルツボ中心方向へのローレンツ力が働

き、溶湯はルツボと非接触で保持される。一方ルツボ底部付近では、溶湯の静水圧がローレンツ力に勝るため、溶湯は水冷ルツボに接触し、凝固層 (スカル) が形成され、溶湯はその上で保持される。当社ではレビテーション溶解炉を用いた Ti 鋼塊の製造に加えて、レビテーション溶解とガス噴霧装置を組合せた CCLM-GA (Cold Crucible Levitation Melting and Gas Atomization) プロセス^{2)~3)}や減圧吸引鑄造法を組み合わせたレビキャスト法⁴⁾を開発し、Ti合金の粉末や精密鑄造品の製造を行っている。

近年では高齢化社会の進展に伴い、人工骨をはじめとした生体インプラントに用いられる軽量かつ生体適合性に優れた医療用 Ti合金の需要が高まっている。現在インプラント用 Ti合金には $\alpha + \beta$ 型合金の代表である Ti-

2019年4月12日 受付

* 1 大同特殊鋼(株)技術開発研究所 (Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

* 2 (株)スターインフォテック星崎センター (Hoshizaki Center, Star Info Tech Co., Ltd.)

6Al-4V合金が広く使用されているが、現行のTi合金を用いた人工骨は生体骨よりもヤング率が高いため、埋入によって周囲骨への応力遮蔽から骨萎縮をきたすストレスシールド現象が起こることが課題となっている。そのため、Tiのヤング率低減に寄与するNb（融点2469℃）やTa（融点3020℃）といった高融点かつ高比重の元素を添加した合金製造のニーズが高まっており⁵⁾、レビテーション溶解炉を活用した生体適合性に優れたTi合金の製造技術の開発が進められている。レビテーション溶解の工程において、溶湯に付与される浮揚・攪拌能力が十分でない場合、高比重元素は溶解時に沈降してスカルの一部となり、合金成分の偏析（重力偏析）や溶け残りが起こる。またスカル部は偏析が大きく健全部（製品部）ではないため、その生成量の増加により、生産性は低下する。

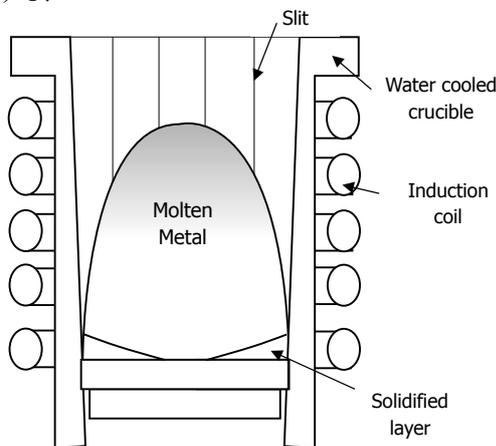


Fig. 1. Schematic view of levitation melting furnace.

レビテーション溶解炉における溶湯の浮揚・攪拌能力やスカルの生成量は、ルツボ・コイルの形状や配置、および電源などの炉体設計因子の影響を受ける。また電源から供給される電力のうち、一部のみがルツボのスリットを介し溶湯へ印加されるため、投入電力エネルギーの効率（電力効率）も炉体設計因子の影響を受ける。目的に合ったレビテーション溶解炉を設計するためには炉体設計因子が溶解挙動におよぼす影響を予測することが重要となる。

本研究では、高融点合金の溶解や高効率な溶解が可能な装置を設計するために、レビテーション溶解炉において炉体設計因子が溶湯の攪拌やスカルの生成におよぼす影響をコンピュータシミュレーションによる数値解析を用いて高精度に予測する技術を確認することを目的とした。

レビテーション溶解炉における溶湯の挙動を再現するには、電磁場・伝熱・溶解・凝固の相互作用を考慮した複雑な計算を実施する必要がある。本研究では数値解析の基盤技術の構築に重点を置き、段階を踏んだ解析モデ

ルの作成および実測値との比較を行った。段階は以下のステップに分けて考えた。

第1ステップ：等温モデルを仮定した溶湯の電磁攪拌挙動の解析

第2ステップ：溶湯から水冷銅ルツボへの伝熱（抜熱）を考慮したスカルの生成挙動の解析

本報では、第1ステップとして取り組んだ、レビテーション溶解炉における溶湯の電磁攪拌挙動を再現するシミュレーション技術の構築について報告する。

2. 数値解析の概要

2. 1 解析手順

レビテーション溶解における電磁攪拌挙動を解析するにあたって、電磁場と流体の双方向連成解析を採用した。手順を以下に述べる。はじめにルツボ内に所定容量の円柱形状のTi溶湯を配置し、有限要素法による電磁界解析ソフトウェア（株式会社JSOL製：JMAG-Designer Ver. 15）を用いた電磁場シミュレーションにより、Ti溶湯に働くローレンツ力密度の分布を求める。出力されたローレンツ力密度分布を流体解析ソフトウェア（シーメンスPLMソフトウェア・コンピュータショナルダイナミクス株式会社製：STAR-CCM+ Ver. 12.04）へ入力する。マッピングしたローレンツ力密度をTi溶湯の運動力ソースとして与え、一定ステップ数の流体解析を実施する。溶湯の表面形状の変化はVOF（Volume of Fluid）法にて界面を捕捉し評価する。続いて、求めた溶湯表面の形状をJMAGに出力し、形状変化後のTi溶湯に働くローレンツ力密度の分布を求める。JMAGとSTAR-CCM+間でのローレンツ力密度分布と溶湯表面形状のデータの授受を複数回繰り返す。連成の前後における溶湯盛り上がり高さの変化率（式1）が1%以下となったところで、定常状態に到達したと判断し解析を終了した。

$$X = \frac{H_n - H_{n-1}}{H_0} \times 100 \quad (1)$$

X ：変化率 [%], H_n ：連成 n 回目における溶湯高さ [m]

H_{n-1} ：連成 ($n-1$) 回目における溶湯高さ [m]

H_0 ：初期溶湯高さ [m]

本報で採用した手法の特徴は、流動によって変動した溶湯表面の位置をJMAG解析モデルに反映し、変動後の形状で表皮効果を考慮したメッシュを再設定して磁場解析を実施したことである（Fig. 2）。本手法を選定した理由は、今回対象とする「レビテーション溶解炉（高周

波誘導炉)における溶湯の電磁攪拌現象」の解析では、流動に応じて大きく変化する溶湯表面形状の捕捉と溶湯表面に集中する誘導電流およびローレンツ力を精度よく評価できるメッシュの設定が重要であるためである。

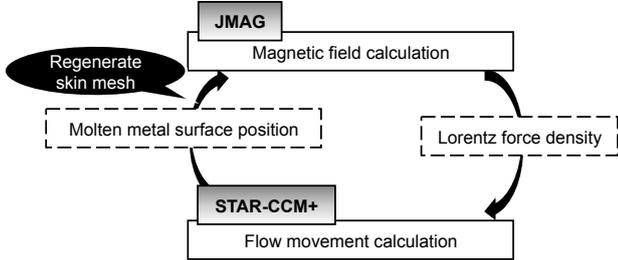


Fig. 2. Schematic view of the simulation flow.

竹内⁶⁾は相変化・形状変化を伴う金属の誘導加熱・溶解現象をJMAGとSTAR-CCM+の連成解析によって取り扱った。既報ではSTAR-CCM+で計算した熔融金属の形状情報を導電率に各要素の液体体積分率を乗じた値として出力し、JMAG上の各要素に割り当てることで、熔融金属の形状変化を考慮した解析を行った。しかし本手法では、形状変化後の相の境界面をJMAG上で容易に定義することができないため、今回の解析に適用した場合、溶湯表面の形状変化を反映した表皮メッシュの生成ができず、溶湯に発生する誘導電流およびローレンツ力の解析精度が低下するという課題がある。既報で取り扱った現象は本報告で取り扱うTi溶湯と比較して流体表面の形状変化が小さく、対象金属の表皮深さが厚いため、導電率を用いた手法が適用可能であったと考えられる。

上記課題を解決するため、著者らは連成解析におけるデータの受け渡し手法を検討した。STAR-CCM+で求めた溶湯表面の位置をデータテーブルとして取り出してJMAG解析モデルに反映することによって、溶湯の形状変化を反映した表皮メッシュを生成可能となり、高周波誘導炉における溶湯の電磁攪拌現象を精度よく再現可能とした。

2. 2 解析条件

Table 1 にシミュレーションに供したレビテーション溶解炉の仕様を示す。また Fig. 3 に解析モデルの形状を示す。本モデルはルツボ内径 150 mm の実機をシミュレーション用に簡略化し作成したものである。対称性を考慮し、解析モデルは 1/32 対称境界モデルとした。

Table 2 に電磁攪拌解析における電磁場解析の条件を示した。計算手法は 3 次元周波数応答解析とし、回路の電流および周波数は実機にて実測した値を用いた。本シミュレーションでは系内の物質は等温を仮定し、物性

Table 1. Specifications of the cold crucible and induction coil.

Power supply	
Power	450 kW
Frequency	15 kHz
Crucible	
Size (mm)	170 ^{top} ~150 ^{bot} D×330H
Number of slits	32
Slit width (mm)	1
Capacity	15 kg-Ti
Coil	
Size (mm)	220D×150H×7Turn

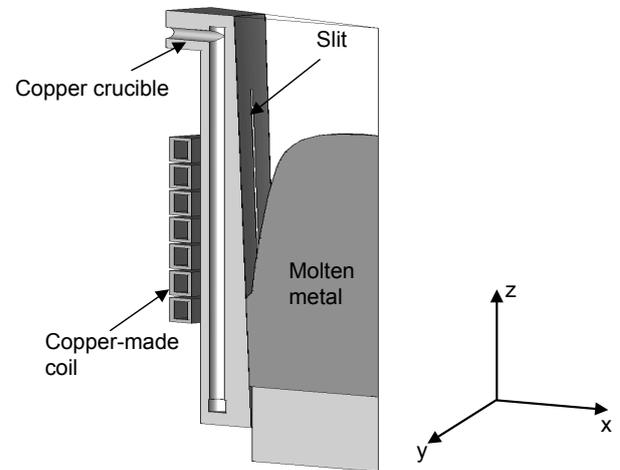


Fig. 3. Schematic view of the simulation model.

値はCuについては温度 50 °C (電気抵抗率 $1.90 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$), Tiについては 1700 °C (電気抵抗率 $1.72 \times 10^{-6} \Omega\text{m}$) の値を用いた。メッシュのサイズは一律で 2 mm としたが、誘導電流の影響を表現するため導体 (Cu, Ti) の表層には表皮効果を考慮したメッシュを生成した。具体的には、表皮深さの計算式

$$d = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu}} \quad (2)$$

d : 表皮深さ [m], ρ : 加熱物の比抵抗 [Ωm]
 f : 周波数 [Hz], μ : 加熱物の透磁率 [H/m]

に基づいて表皮深さを求め、その倍の厚さを層状に分割した。また導体同士の仮想的な接触による通電現象の影響を排除するため、電磁場解析では銅ルツボと Ti 溶湯の間に厚さ 0.1 mm の空気層を挿入した。

Table 3 に電磁攪拌解析における流体解析の条件を示した。乱流モデルは Realizable k-ε モデルを用い、オイ

ラー混相流モデルによる気液二相流解析を行った。流体解析ではルツボ内部の流体領域 (Ti, 空気) のみを計算対象とし, 流体の密度は一定 (Ti: 4110 kg/m^3 , 空気: 1.18 kg/m^3) として扱った。メッシュは一律 2 mm のポリヘドラルメッシュとした。併せて気液境界層へはプリズムメッシュを作成し, 電磁場解析で設定したメッシュと同等のメッシュ設定とした。

Table 2. Analysis conditions of JMAG.

Analysis type	3D magnetic field analysis, frequency response analysis
Model size	1/32 model
Coil frequency	12700 Hz
Coil current	4300 A
Number of elements	604159 elements

Table 3. Analysis conditions of STAR-CCM+.

Analysis type	3D implicit transient state analysis
Model size	1/32 model
Analysis model	Eulerian multiphase (gas-liquid two-phase flow : Ti and Air) - VOF method Turbulence (k - ϵ)
Time step	$5.00 \times 10^{-5} \text{ s}$
Number of cells	27879 cells

3. 実験方法

解析の精度を検証するため, モデルと同形状のレビテーション溶解炉実機を用いて実測を行い, 解析結果との比較を行った。実験項目を以下に述べる。

- (1) ルツボ内部の磁束密度分布: 直径 0.12 mm のエナメル被覆銅線を内径 3 mm の軸に 20 回巻いて製作したサーチコイルを用いて, 熔融金属を含まない空のルツボの内部に発生する磁束密度を測定した。測定時の投入電力は 45 kW とした。
- (2) 溶解時の溶湯形状: Ti 溶湯の上方より厚さ 3 mm の Al の薄板を挿入して, 薄板の溶解形状から溶湯の形状および盛り上がりの高さを求めた。また炉内凝固した銅塊の断面をマクロ腐食して求めたスカルの高さから, 溶湯とルツボの接触高さを推定した。
- (3) 溶湯表面の流速: Ti 溶湯の上方より流動中の溶湯表面を高速度カメラにて撮影し, PIV (粒子画像流速測定法) 解析により流速を求めた。溶湯の輝度が高いため, レンズに遮光板を装着して観察し, 撮影速度は 500 fps とした。PIV 解析には流体解析ソフトウェア FlowExpert2D2C (株) カトウ光研製) を用いた。

4. 結果および考察

4. 1 ルツボ内部の磁束密度分布

連成解析を行う前に, 電磁場解析の精度を検証するため, 熔融金属を含まない空のルツボの内部に発生する磁束密度分布について実測値と比較した。本解析の電源条件は磁束密度実測時のコイル電流の実測値と合わせ, コイル電流: 1340.7 A , 周波数: 15700 Hz とした。Fig. 4 に磁束密度の解析結果および実測位置を示す。また Fig. 5 にスリット近傍部位 (①) およびルツボ中心部位 (②) における磁束密度分布の解析値および実測値を示す。耐火物を用いた誘導溶解炉の解析とは異なり, レビテーション溶解炉を対象とした電磁場解析では Ti 溶湯と合わせて水冷銅ルツボの渦電流を考慮した解析を行った。いずれの位置においても解析値は実測値とよく一致し, 電磁場解析の精度を確認した。

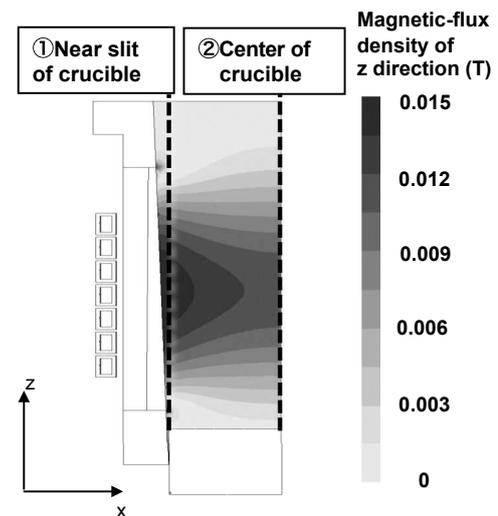


Fig. 4. Analysis data and measurement position of magnetic-flux density in cold crucible.

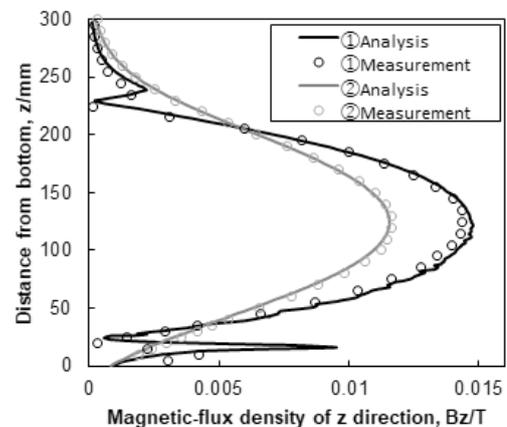


Fig. 5. Magnetic-flux density of z direction in cold crucible.

4. 2 溶湯の電磁攪拌挙動

4. 2. 1 解析結果

JMAGで求めた初期円柱形状のTi溶湯に発生するローレンツ力密度分布を Fig. 6 に示す。Ti溶湯に働くローレンツ力は溶湯表面に集中しており、その向きはルツボ中心方向に働いている。求めたローレンツ力密度のデータを流体解析にマッピングし、Ti溶湯の運動量ソースとして与え、10000ステップの解析を行った。なお、計算では溶湯の初期形状に円柱形状を仮定したが、これは実現象における溶湯の形とは異なり、特に溶湯の上部は実態よりもルツボとの距離が近くなっている。そのため、初期の円柱形状の溶湯に電磁場解析で求めたままの強度でローレンツ力を与えた場合は過剰な運動力がかかり、急激な流動による計算の発散に繋がる。発散を抑えるため、初期の5000ステップの解析においては溶湯に働くローレンツ力の出力を徐々に上げるように調整した。Fig. 7にSTAR-CCM+にて10000ステップ計算後の溶湯形状(VOF)と溶湯流速ベクトルの解析結果を示す。溶湯の上部はローレンツ力を受けてルツボ壁から離れ、初期よりも盛り上がった形状に変化した。STAR-CCM+で求めた溶湯の形状をJMAGに受け渡し、2回目の双方向連成操作として、JMAGにて電磁場解析を実施し、求めたローレンツ力密度をSTAR-CCM+に受け渡して10000ステップの流体解析を行った。今回の解析ではこのJMAGとSTAR-CCM+の連成操作を計6回実施した。Fig. 8に連成解析1回目から6回目における溶湯形状の推移を示す。連成解析の初期(1~2回目)はローレンツ力を更新するタイミングで溶湯形状が大きく変化した。解析を繰り返すにつれて溶湯に働くローレンツ力と静水圧が均衡に近づき、湯面の変位が小さくなった。6回の連成解析により式1で定義した溶湯高さの変化率が1%以下となったため、定常状態に到達したと判断して解析を終了した。

4. 2. 2 実測との比較

6回の連成解析終了後の溶湯形状および溶湯表面の流速を実測と比較し、解析精度の検証を行った。Fig. 9に溶湯形状の解析と実測の比較、Table 4に溶湯の盛り上がり高さおよび溶湯とルツボとの接触高さの解析と実測の比較を示す。解析で求めた溶湯の形状は実機の溶湯にAl板を浸漬して転写した形状とよく一致している。また溶湯の盛り上がり高さおよび溶湯とルツボの接触高さについて実測と解析の誤差は15%以内であり、実機における挙動を再現するにあたって十分な精度があることを確認した。Fig. 10に溶湯の表面流速の解析と実測の

比較を示す。溶湯の盛り上がり部分はルツボ中心から壁方向へ向かって流動し、その流速は0.1~0.2 m/sとなり実測と解析で等しい傾向を示した。今回採用した手法によりレビテーション溶解炉における溶湯の浮揚・攪拌現象を精度よく再現することが可能となった。

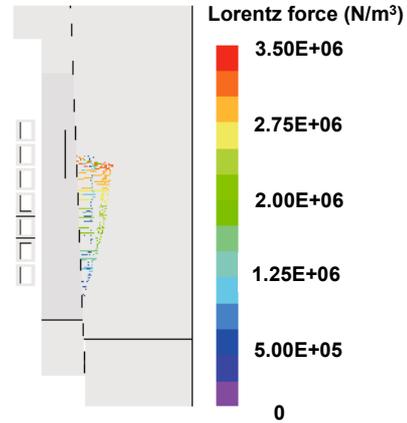


Fig. 6. Analysis data of Lorentz force in cold crucible.

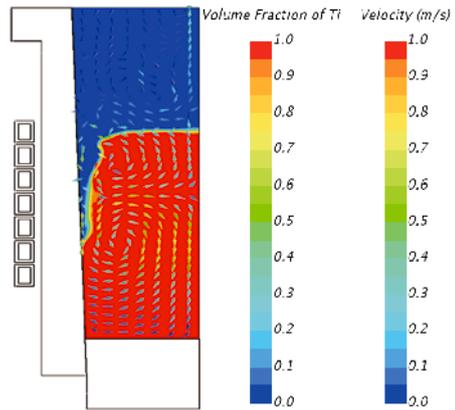


Fig. 7. Molten metal shape (VOF) and flow velocity (vector) after first 10000 step calculation.

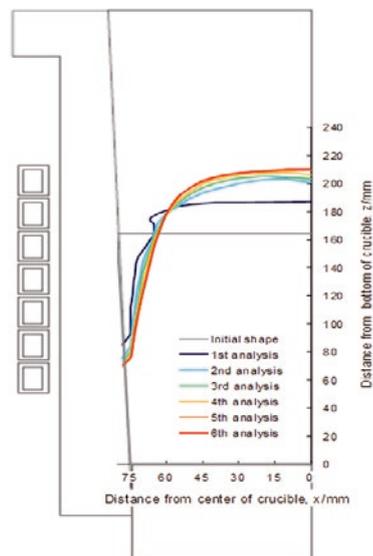


Fig. 8. Change of molten metal shape per analysis step.

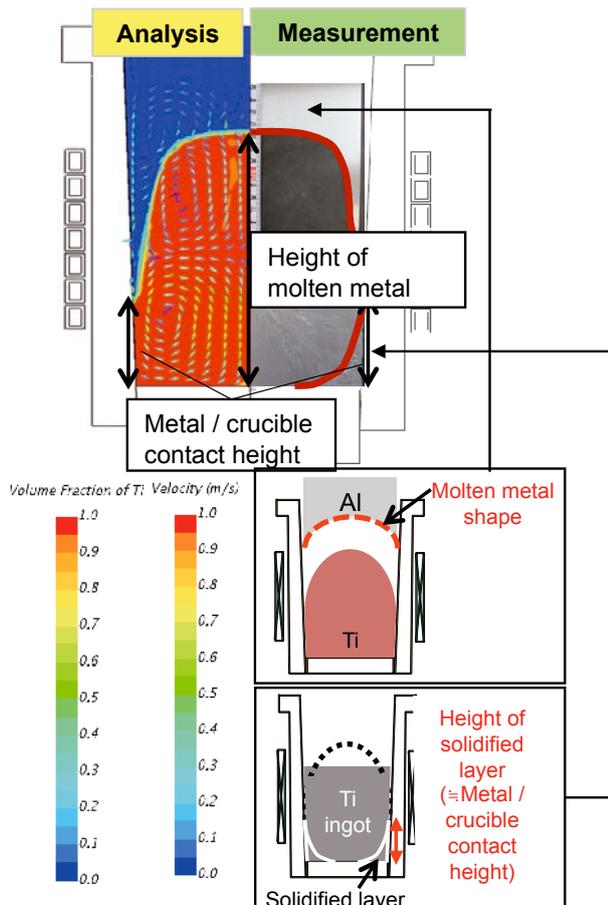


Fig. 9. Comparison of molten metal shape.

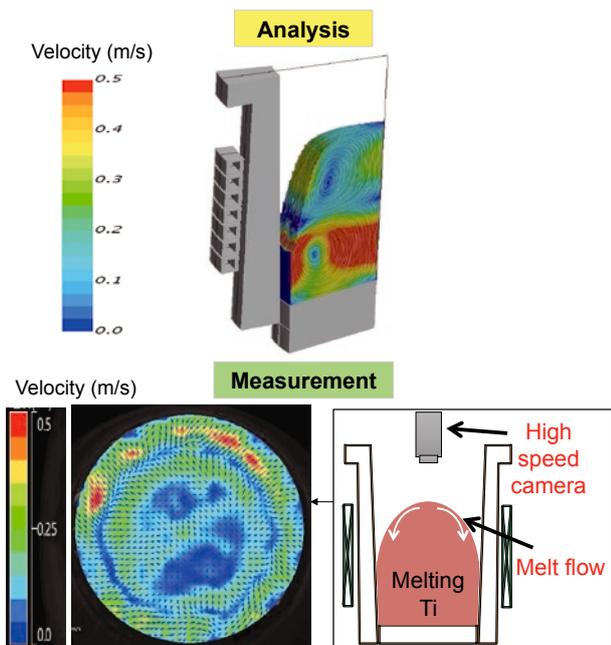


Fig. 10. Comparison of molten metal flow rate.

Table 4. Comparison of measurement and analysis on molten metal shape.

	Measurement	Analysis
Molten metal height	215 mm	210 mm
Metal / crucible contact height	61 mm	70 mm

5. 結 言

レビテーション溶解炉の最適設計技術を確立するため、溶解炉における溶湯の挙動を精度よく再現する解析手法の検討と基礎実験による精度検証を行い、以下の結論を得た。

- (1) 電磁場と流体の双方向連成解析により、溶湯の電磁攪拌挙動(磁場、溶湯形状、表面流速)を実測との誤差 15%以内で再現可能となった。
- (2) 連成解析において、溶湯表面に働くローレンツ力を正確に評価するため、流体解析で得られた気液境界面の形状を電磁場解析モデルに反映し、表皮効果を考慮したメッシュを設定する手法が有用であった。

(文 献)

- 1) M. Garnier and I. Madyam: Pro. of 6th Int. Iron and Steel Cong., ISIJ, Nagoya, (1990), 260.
- 2) 大河内敬雄, 清水孝純: 電気製鋼, 74(2003), 227.
- 3) 奥村鉄平, 芝田智樹, 大河内敬雄: 電気製鋼, 77(2006), 261.
- 4) 出向井登: 素形材, 8(1998), 19.
- 5) 日下恵太, 小柳禎彦, 高林宏之: 電気製鋼, 86(2015), 57.
- 6) 竹内正樹: STAR Japanese Conference 2016 (2016).
- 7) 山本和巳, 芝田智樹: 電気製鋼, 74(2003), 61.



紙本朝子



井上晋輔