

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

|        |                                    |
|--------|------------------------------------|
| 論題(和文) | 容器内二相液体の電磁加振に関する研究                 |
| 著者(和文) | 伊藤怜, 大島修造, 因幡和晃, 高橋航圭              |
| 出典(和文) | 日本機械学会2015年度年次大会講演論文集, , , pp. 1-5 |
| 発行日    | 2015, 9                            |

S0520301

## 容器内二相液体の電磁加振に関する研究

伊藤 怜<sup>\*1</sup>, 大島 修造<sup>\*2</sup>, 因幡 和晃<sup>\*2</sup>, 高橋 航圭<sup>\*2</sup>

### Electromagnetic Sloshing of Bilayer Liquids in Converter

Satoshi ITO<sup>\*1</sup>, Shuzo OSHIMA<sup>\*2</sup>, Kazuaki INABA<sup>\*2</sup> and Kosuke TAKAHASHI<sup>\*2</sup>

<sup>\*1\*</sup><sup>\*2</sup>Tokyo Institute of Technology, O-okayama 2-12-1, Meguro, Tokyo, 152-0033 Japan

In the field of steelmaking and refining, phosphorus is impurities. The steel is produced by removing reacted with slug to it. Improving the reaction speed of phosphorus contribute significantly to the reduction of steel making process and it can achievement by increase interfacial area between slug and metal. So the purpose of this research is to increase interfacial area efficiently by electromagnetic force (EMF) instead of inert gas. It revealed that it is possible to sloshing of the liquid metal by electromagnetic force in horizontal directions by numerical simulation and increasing the interfacial area during sloshing. Performs approximate analysis by linear theory for horizontal sloshing of the multiliquid-layer and compered with the numerical value. In addition, new vertical sloshing method that is locally applied electric field and magnetic field is devised.

**Key Words** : Electromagnetic force, Sloshing, converter, multiliquid-layer, liquid metal

### 1. 緒言

鋼の原料となる鉄鉱石に含まれるりんは、鋼の機械的性質に悪影響を及ぼす。これを取り除くために現在の製鋼プロセスでは転炉型脱りん炉を用いて、炉内溶鋼とその上部に積層した生石灰を原料とするスラグの界面で脱りん反応を起こしている。この反応速度は溶鋼-スラグ間の界面積増大に比例して向上するため、転炉の底部には界面積増大及び溶鋼を攪拌させるための気泡発生用ランスが取り付けられており、生成される気泡により界面をかく乱する手法である。同手法では効率的な界面積上昇には微細な気泡の生成が必要となるが、ランスから微細な気泡を放出したとしても気泡同士が凝集して径が大きくなり、効率的な界面積増大は図れていない。

これら現状を鑑み、溶鋼-スラグ間界面の効率的なかく乱とそれに伴う生産性・省エネルギー性の向上を図るため、本研究では電磁力を用いたスロッシングによる界面面積増大及び溶鋼攪拌の手法を提案する。著者らはこれまで水平加振の理論解析<sup>(1)</sup>を行っているが、応用する際に重要となる有限振幅の波動の挙動や2相液体の挙動については未知のままである。そこで今回、電磁力を液体金属に与えた場合の有限振幅の波動の挙動について線形理論による近似解析と数値計算によるシミュレーションを行った。さらに溶鋼部の攪拌と界面積向上を同時に実現するため、局所的に電磁力を作用させる手法を考案した。

<sup>\*1</sup> 非会員, 東京工業大学 大学院理工学研究科 機械物理工学専攻 (〒152-0033 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

<sup>\*2</sup> 正員, 東京工業大学 大学院理工学研究科 機械物理工学専攻 (〒152-0033 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

E-mail: itou.s.ag@m.titech.ac.jp<sup>\*1</sup>

## 2. 主な使用記号

$\mathbf{B}_0$  : 印加磁束密度ベクトル,  $B_0$  : ボンド数,  $\mathbf{E}$  : 電場ベクトル,  $E_s$  : 定常電場,  $E_m$  : 交番電場  
 $g$  : 重力加速度,  $h$  : 液深,  $\mathbf{i}$  :  $x$  軸方向 (水平方向) 単位ベクトル,  $\mathbf{J}$  : 電流密度ベクトル  
 $\mathbf{j}$  :  $y$  軸方向 (鉛直方向上向き方向) 単位ベクトル,  $L$  : 容器半幅 ( $\beta=L/h$ ),  $N$  : スチュアート数  
 $p$  : 圧力,  $t$  : 時間,  $u, v$  : 速度,  $\mathbf{v}$  : 速度ベクトル,  $x, y, z$  : 座標,  $\eta$  : 最大液面高さ,  $\gamma$  : 表面張力  
 $\omega$  : 角振動数,  $\phi$  : 識別関数,  $\rho$  : 密度,  $\sigma$  : 導電率

## 3. 解析手法

本数値解析で使用する支配方程式は、運動方程式 (1)、電荷保存則 (2)、オームの式 (3)、連続の式 (4)、識別関数の移流方程式 (5) である。識別関数  $\phi_1$  はスラグ・空気層で 0.5, 溶鋼層で -0.5 をとり,  $\phi_2$  は空気層で 0.5, 溶鋼・スラグ層で -0.5 の値をとる。気相と液相の間に中間値をとる遷移層を 3 メッシュ設けている。界面は  $\phi=0$  の曲面で表される。計算にはスタッガード格子を用い, HSMAC 法<sup>(2)</sup>により計算を行った。

$$\frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\frac{1}{\rho_\phi} \nabla p - \mathbf{j} + \frac{1}{\rho_\phi} N \mathbf{j} \times \mathbb{B}_0 - \frac{1}{\rho_\phi} \frac{1}{B_0} \nabla \left( \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right) \nabla \phi \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{j} = 0 \quad (2)$$

$$\mathbf{j} = \sigma_\phi (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbb{B}_0) \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \phi = 0 \quad (5)$$

## 4. 解析結果

### 4.1 水平加振

#### 4.1.1 線形理論による近似解析

2 相液体における水平加振について、線形理論による解析を行った。解析では、印加磁場は静磁場とし、外部回路により強制電流を与えるものとする。また、図 1 に示すような座標系を用い容器は長方形とし外部電場および液体金属中を流れる電流は磁場と直交するものとする。

基礎方程式は次のように表される。

溶鋼の運動方程式：

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} = -\frac{\partial p_1}{\partial x} + E_1 - N_1 u_1 \quad (6)$$

$$\frac{\partial w_1}{\partial t} = -\frac{\partial p_1}{\partial z_1} \quad (7)$$

スラグの運動方程式：

$$\frac{\partial u_2}{\partial t} = -\frac{\partial p_2}{\partial x} + E_2 - N_2 u_2 \quad (8)$$

$$\frac{\partial w_2}{\partial t} = -\frac{\partial p_2}{\partial z_1} \quad (9)$$

溶鋼の連続の式：

$$\frac{\partial u_1}{\partial x} + \frac{\partial w_1}{\partial z_1} = 0 \quad (10)$$

スラグの連続の式：

$$\frac{\partial u_2}{\partial x} + \frac{\partial w_2}{\partial z_2} = 0 \quad (11)$$

以上の式より $\eta_{1n}$ ,  $\eta_{2n}$ を求め、各周波数における溶鋼・スラグの最大変位を算出した。溶鋼、スラグの変位と周波数の関係を図2に示す。

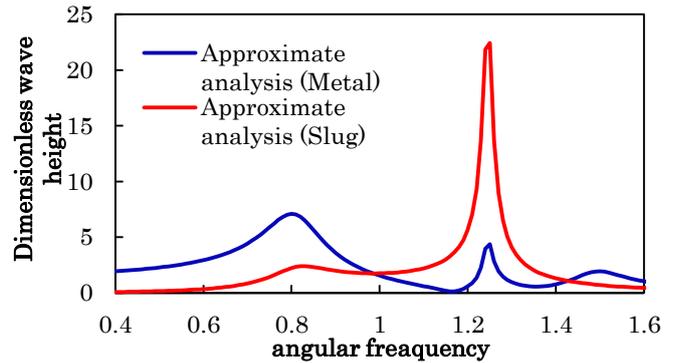
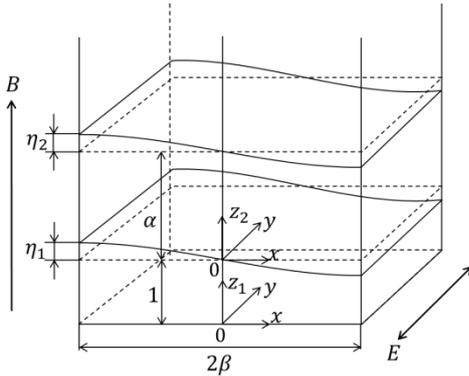


Fig.1 Coordinate system of the approximate analysis

Fig.2 Frequency response of the slug and metal displacement

#### 4・1・2 数値解析

図3のように直方体容器内で磁場を鉛直方向に、交番電場を水平方向に印加するとそれらと直交する水平方向に加振力が発生する。その結果、図のように振幅の大きな波動を励起することができる。水平加振時の運動方程式は式(12)のように表される。計算に際して格子サイズは0.03125とした。また、本解析では $B_0 = 0.1T$ ,  $F_m = 0.05$ ,  $h_1 = h_2 = 1.0$ とした。

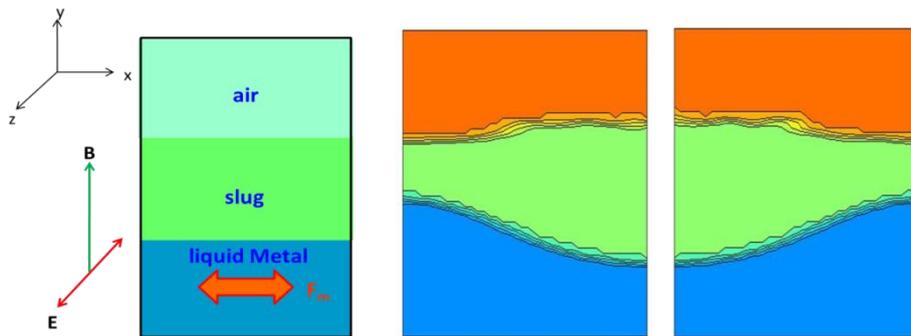


Fig.3 Horizontal sloshing

$$\frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\frac{1}{\rho_\phi} \nabla p - \mathbf{j} + \frac{\sigma_\phi}{\rho_\phi} (E_m \sin \omega t - Nu) \mathbf{i} - \frac{1}{\rho_\phi} \frac{1}{Bo} \nabla \left( \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right) \nabla \phi \quad (12)$$

図4に数値解析によって得られた各加振周波数 $\omega$ における溶鋼-スラグ界面振幅とスラグ-空気界面振幅を示す。

数値計算によって得られた共振点は近似解析によって得られたものよりも低周波側へシフトしていることが分かる。溶鋼とスラグのモード1における固有振動数 $\omega_1$ ,  $\omega_2$ は式(13)に示す2相液体加振時の振動数方程式<sup>(3)</sup>より $\omega_1 = 0.81$ ,  $\omega_2 = 1.25$ と求まり、共振点は固有振動数の0.9倍付近に存在する。これは深い容器を振動させる通常のスロッシングと同様の現象<sup>(4)</sup>であると考えられる。また、溶鋼のモード1の固有振動数付近で数値計算によるスラグの波高が近似解値よりも大幅に増大している。近似解析は微小振幅の線形波について解析を行ったが、数値計算では電磁力により波頂部が高く、波底部が浅い非線形波が引き起こされたためだと考えられる。溶鋼の攪拌状況を確認するため図5に示すように流れ関数の等高線を示す。これより、水平方向電磁力では溶鋼部は波動的な流れが支配的となることが明らかになった。

$$\omega^4(h_1 \cosh \beta_n h_2 + \mu h_1 \sinh \beta_n h_2) - \omega^2 g \beta_n \sinh \beta_n (h_1 + h_2) + (1 - \mu)(g \beta_n)^2 \sinh \beta_n h_1 \sinh \beta_n h_2 = 0 \quad (13)$$

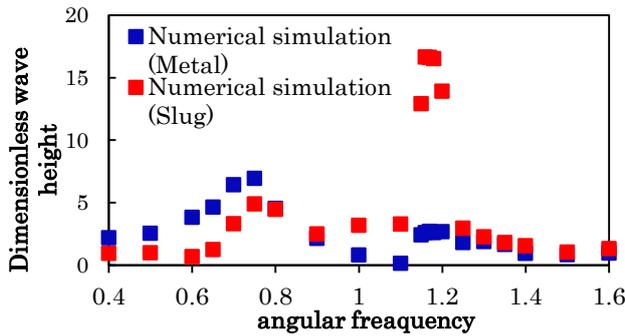


Fig.4 Frequency response of the slug and metal displacement

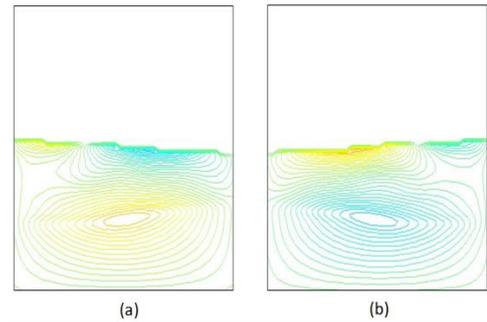


Fig.5 Contour of the stream function in the horizontal sloshing

#### 4・2 局所電磁力による加振

先述したように水平加振では大振幅の波は励起されるものの溶鋼部の攪拌はあまり促進されない。脱りん効率の向上には界面積増大と溶鋼の攪拌を同時に実現する必要があるため、加振方法の改良が必要と考えた。そこで新たに図6に示すような左右壁面近傍に交番電場と水平方向磁場を、容器底部に定常電場と鉛直方向磁場を印加させる加振方法を考案した。印加範囲は左右壁面から16メッシュ、底面から8メッシュとした。液相部流れ関数の等高線を図7に示す。これらより、局所的に電磁力を掛けた場合においても水平加振と同様に大振幅の波を発生させることが可能であり、同時に溶鋼部での循環流の発生も励起できることが明らかとなった。なお、 $F_m = 0.15$ ,  $F_s = 0.10$ である。

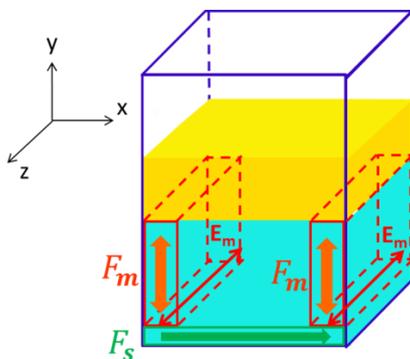


Fig.6 Multiliquid local electromagnetic force sloshing method

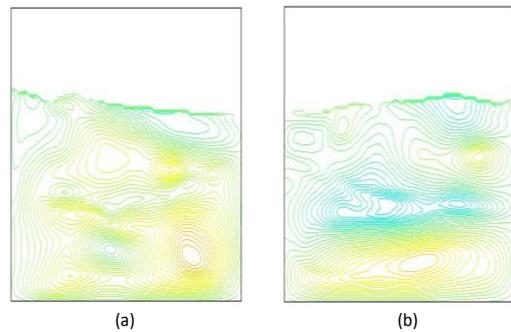


Fig.7 Contour of stream function in the new local electromagnetic force sloshing

## 5. 結言

容器内 2 相液体の電磁加振に関して解析を行った結果、次の結論を得た。

- (1) 水平方向の非定常電磁力を作用させることにより容器内を振動させることなく大振幅の波の励起が可能である。
- (2) 数値計算による共振点は線形理論を用いた解析値よりも低周波側に現れる。
- (3) 局所的に電磁力を印加することで攪拌効果を強めつつ界面積の増加を図ることができる。

## 文 献

- (1) 大島修造, 門岡秀治, 祓川宏樹, 山根隆一郎, 日本機械学会論文集, B 編 56-532 (1991) pp.51-58.
- (2) C.W. Hirt, and J.L. Cox, J. of Computational Phys., 10 (1972) pp. 324-340.
- (3) 半田邦久, 田島清, 日本機械学会論文集, B 編 (1985) pp.1450-1457.
- (4) 葉山眞治, 有賀敬治, 渡辺辰郎, 日本機械学会論文集, C 編 49-437 (1983) pp.22-30.