

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	マグネティックバーチャルチャネルの形成
著者(和文)	高橋龍太郎, 大島修造, 因幡 和晃, 高橋 航圭
出典(和文)	日本機械学会2015年次大会講演論文集, , , pp. 1-5
発行日	2015, 9

S0520302

## マグネティックバーチャルチャネルの形成

高橋 龍太郎<sup>\*1</sup>, 大島 修造<sup>\*2</sup>, 因幡 和晃<sup>\*2</sup>, 高橋 航圭<sup>\*2</sup>

### Formation of magnetic virtual channel

Ryutaro TAKAHASHI<sup>\*1</sup>, Shuzo OHSIMA<sup>\*2</sup>, Kazuaki INABA<sup>\*2</sup> and Kosuke TAKAHASHI<sup>\*2</sup>

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

Nonmagnetic fluid can be levitated if a very strong magnetic field is applied by a super-conducting magnet. This study suggests noncontact magnetic virtual channel (MVC) in the casting process of nonconductive materials such as glasses to enable the continuous casting in high quality. In this study, we model the MVC by using a magnetic fluid in a weak magnetic field. A rectangular coil is assumed as a source of the magnetic power. The magnetic field distribution of the rectangular coil was calculated and the distribution of the magnetic force is obtained. To confirm whether a liquid column is stable or not, stability analysis is carried out about a liquid film held by magnetic power. As a result, stability is confirmed and further analysis about the floating position and the cross sectional shape of the floating liquid is done. An experiment to let a nonmagnetic fluid float in magnetic fluid was conducted. Tests were done with distilled water and silicone oil and both liquids can be levitated. Observation suggests that the shape of the floating liquids vary according to the boundary tension. Therefore, this accords with the analysis results qualitatively.

**Key Words** : Magnetic levitation, Noncontact levitation, Magnetic fluid, Liquid film stability analysis, Magnetic field distribution analysis

### 1. 緒 言

無接触浮遊を利用した材料製造法が存在する。超高純度ガラスや半導体、新しい金属材料などの製造過程において、試料を坩堝内で溶解する際に坩堝との接触によって不純物の混入が生じる。しかし、浮遊炉を使用し試料を浮かせ周囲と無接触の状態を維持したまま、レーザーなどで加熱溶解させ冷却凝固させることで、地上でも容易に純粋な物質や新素材を生成することが可能となる。しかし、高純度材料を用いた製品の量産化を可能にするためには、連続製造工程における無接触パイプあるいは無接触チャネルの形成が不可欠である。現在、電磁浮遊炉の実操業工程としてはアルミニウムやチタンの連続鋳造法、MEC コールドクルーシブルなどが確立しているが、これらはいずれも高い導電率を有する金属に限定された方法である。

液体は常磁性体と反磁性体に分類することができる。そして液体の磁化率の絶対値は強磁性体に比べて極めて小さい。しかし磁気力は磁界強度の二乗に比例するため、超電磁マグネットを利用し極めて強い磁場を印加すれば、磁気力による浮遊は可能である<sup>[2]</sup>。これはガラスのような非導電性材料についても同様であり、強磁場発生装置と磁場の影響を受けにくい炭酸ガスレーザーを利用したガラスの無容器溶解の成功例がある<sup>[3]</sup>。

また、水やアルコールなどの反磁性液滴の浮遊実験や、密度差の小さな二流体を利用した常磁性液体の磁場によ

<sup>\*1</sup> 非会員, 東京工業大学 大学院理工学研究科 機械物理学専攻 (〒152-8852 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 機械物理学専攻 (〒152-8852 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

E-mail of corresponding author: takahashi.r.an@m.titech.ac.jp

る液面変化の実験が報告されている。さらに、磁性流体を非磁性のシリコンオイル中に滴下し PID 制御された磁界を印加することにより、磁性液滴の非接触浮遊に成功している<sup>[4]</sup>。一方、外部を磁性流体、液滴を非磁性の液体にすれば、磁界の強いほうに磁性流体が引き寄せられ、逆に非磁性の液体が排除されることから、反磁性液滴の浮揚のモデル実験を行うことができる<sup>[2][5]</sup>。

本研究は高純度ガラスのような非導電性材料の新しい製造プロセス開発の基礎研究として、静磁界を利用した非磁性液体の浮遊確立し、連続鋳造工程に適用するためのマグネティックバーチャルチャネルの形成を目的とする。磁化率の高い磁性流体と非磁性流体を用い、弱磁場下にて非磁性流体を浮遊させ、モデル形成を行う。

## 2. 長方形コイルの磁場解析

本研究は図 1 に示すように、下側のみに長方形コイルを設置し、その磁気力により仮想流路を形成する。図は(1,0), (-1,0)に導線があると仮定している。  $0 \leq x \leq 0.5$ ,  $0 \leq y \leq 1.0$ の範囲について解析を行う。

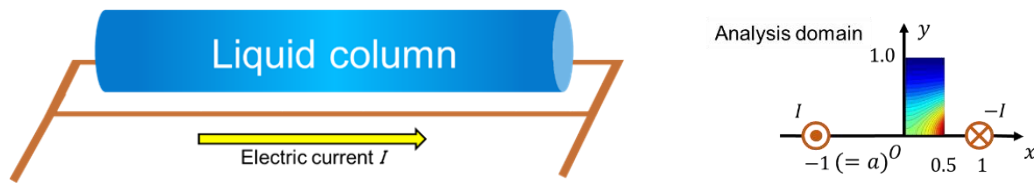


Fig.1 Liquid column floating model with rectangular coil

コイルより生じる鉛直上向き磁気力は式 (1) で表される。

$$F = \frac{\mu_0 \chi}{2} \cdot \frac{dH^2}{dy} \quad (1)$$

式 (1) において、 $\mu_0$ は真空の透磁率、 $\chi$ は磁化率、 $H$ は磁場の強さである。つまり磁気力は磁場の強さの二乗の勾配に比例する。したがって、コイルによって発生する磁場強さの分布と発生する磁気力について解析をおこなうことで、コイルによる液体を浮遊させることが可能かを判断することができる<sup>[6]</sup>

電流  $I$  が流れる電線から、距離  $r$  の位置で発生する磁場の強さは式 (2) で定義される。

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad (2)$$

ここで原点に発生する磁場の強さと代表長さ  $a=1$  によって無次元化した、任意の座標に発生する磁場強さの二乗は式 (3) のようになる。

$$H^{*2} = y^{*2} \left( \frac{1}{r_2^{*2}} - \frac{1}{r_1^{*2}} \right)^2 + \left( \frac{1+x^*}{r_1^{*2}} + \frac{1-x^*}{r_2^{*2}} \right)^2 \quad (3)$$

(式 3) より解析範囲の磁場分布を図 2 に示す。コイル中心  $y$  軸上において横方向に器状の磁場分布が確認できる。

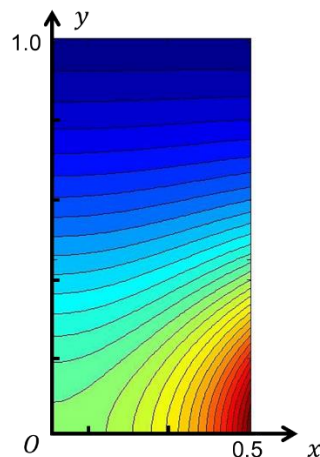


Fig.2 Distribution of the square of the magnetic field strength that occurred from a coil

### 3. 液柱浮遊位置・断面形状の解析

磁気力分布と、運動方程式 (4)・連続の式 (5)・識別関数の移流方程式 (6) を用いて、磁気ボンド数  $Bo$  (表面張力に対する重力の比) を  $500 \cdot 100 \cdot 20$  と変化させた三種類の流体に対し、浮遊シミュレーションを行った。

$$\frac{D\mathbf{v}^*}{Dt^*} = -\frac{1}{\rho_\phi} \nabla^* p^* + \frac{\nu_\phi}{Re} \nabla^{*2} \mathbf{v}^* - \mathbf{j} + \frac{1}{\rho_\phi} \left\{ \frac{N\chi_\phi H^2}{2} - \frac{\nabla^* \cdot \left( \frac{\nabla^* \phi^*}{|\nabla^* \phi^*|} \right) \right\} \nabla^* \phi^* \quad (4)$$

$$\nabla^* \cdot \mathbf{v}^* = 0 \quad (5)$$

$$\frac{D\phi^*}{Dt^*} = 0 \quad (6)$$

原点において重力の 1.25 倍の磁気力を発生させており ( $N=1.25$ )、液柱の半径は 0.25 としている。結果を図 3 に示す。画像は浮遊開始から無次元時間  $t = 5$  時点である。表面張力が大きい液体になるにつれ、断面形状は船底状から円形状へと変化している。浮遊位置には変化がなく、安定浮遊にはすべて成功している。

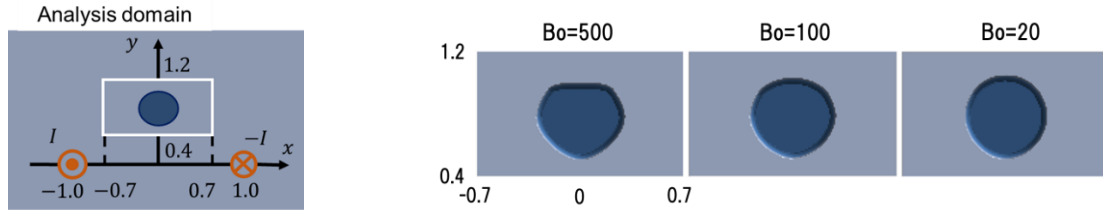


Fig.3 Stable floating domain and cross-section of the liquid column

### 4. 液柱浮遊位置・断面形状の解析

磁気力によって保持された液膜の安定性解析を行う。これはコイルによる磁気力で保持された液柱が、分断せず安定した状態を維持できるかに密接に関連する。解析モデルとして図 4 に示す磁気力で保持された液膜のモデルについて、その角振動数  $\omega$  について解析し安定であるか調べる。

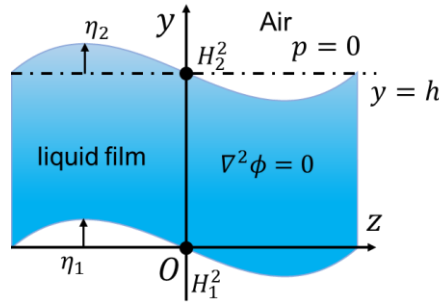


Fig.4 Stability analysis of a liquid film held by magnetic force

$y = 0$  と  $y = h$  において、それぞれ連続の式 (7)・拡張されたベルヌーイの定理 (8)・界面の運動学的条件 (9) を用い、磁気力と重力の釣り合いの式を立てる。

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (7)$$

$$\rho \frac{\partial \phi^*}{\partial t} + \frac{1}{2} v^2 + U + P \quad (8)$$

$$\frac{DF}{Dt} = 0 \quad (9)$$

得られた 2 式を連立することで、以下に示す角振動数  $\omega$  についての方程式 (10) を得ることができる。

$$\rho^2 \omega^4 + \frac{1}{2} \mu_0 \chi \rho k \left( \frac{dH_2^2}{dy} - \frac{dH_1^2}{dy} \right) \coth kh \cdot \omega^2 - k^2 \left( \rho g - \frac{1}{2} \mu_0 \chi \frac{dH_2^2}{dy} \right) \left( \rho g - \frac{1}{2} \mu_0 \chi \frac{dH_1^2}{dy} \right) = 0 \quad (10)$$

この方程式について、まず判別式が正であることと、そして二次の項が正であり定数項は負であることから解と

係数の関係を考え、 $\omega^2$ は異なる二つの正の実数解を持つと判明する。つまり角振動数 $\omega$ は実数であり、これによって磁気力によって保持された液膜が安定であることが示された。

### 5. 浮遊実験

実験用のコイルを製作した。コイルのxy断面が $32 \times 32$ の正方形になるよう直径1mmの銅線を計1024回巻きつけた。コイル中央にアクリルケースを設置し、磁性流体を注いだ後に2.0Aの電流を流して磁気力をかけ、上面から非磁性流体を注入する。ケースは磁場分布解析結果を元にコイル中央に設置した。ケース内側の寸法は高さ12mm、奥行き12mm、幅30mmである。非磁性流体として蒸留水とシリコンオイルの2種類について浮遊実験を行う。実験ごとの非磁性流体と磁性流体の密度、ならびに懸滴法によって計測した非磁性流体と磁性流体との界面張力と計測結果より計算したボンド数を以下の表1に示す。なお、滴下した蒸留水の液滴同士が結合しやすくなるよう、界面活性剤として中性洗剤を少量混入した。

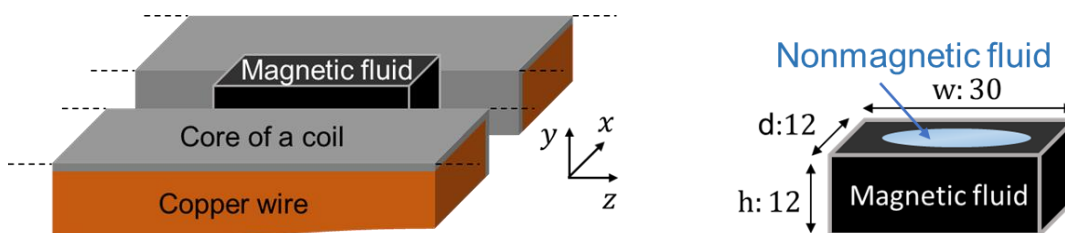


Fig.5 Experimental equipment

Table 1 Density and interfacial surface tension of the nonmagnetic fluid and magnetic fluid

The nonmagnetic fluid	Density	Density of the magnetic fluid	Interfacial surface tension	Bo
①DW	999.8 kg/m <sup>3</sup>	950.6 kg/m <sup>3</sup>	0.6 mN/m	≅500
②Silicon oil	1097 kg/m <sup>3</sup>	1074 kg/m <sup>3</sup>	12.0 mN/m	≅25

蒸留水は磁場をかけた磁性流体中にコイルの長辺z軸方向に細長く浮遊した。これでコイルから発生させた磁気力により液体を浮遊させることに成功した。また、楕円体状にシリコンオイルを浮遊させることに成功した。実験結果の画像はケースの上面を映しているその画像を図6に示す。x軸方向からケース上面、xz平面を写している。



Fig.6 DW and silicone oil in magnetic fluid

蒸留水がコイルの長辺z軸方向に細長く浮遊したのに対し、シリコンオイルは楕円体形状で浮遊した。これは蒸留水の界面張力がシリコンオイルと比較して小さいためだと考えられる。この差に加えて、界面張力の差により浮遊した両非磁性流体の、断面形状にも差が見られると考えられる。そこで断面形状の観察を行った。

断面形状の観察は、シートレーザーをxy平面に照射して観察した。二液の界面の形状から断面形状を目視することができる。浮遊した蒸留水に照射されたシートレーザーの様子は図7のようになった。

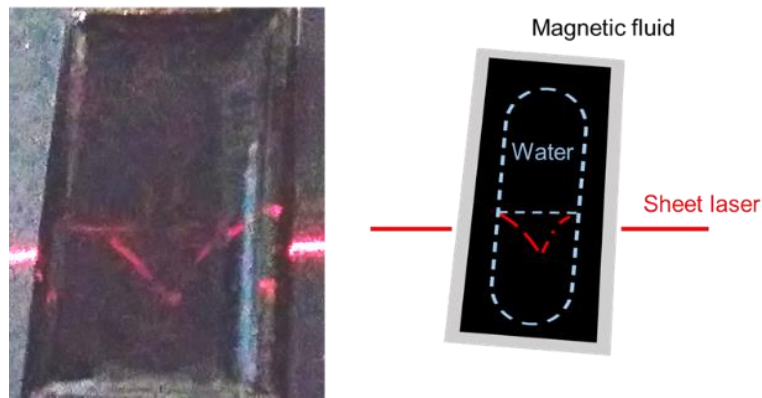


Fig.7 Boundary surface of DW and the magnetic fluid

断面は鋭角の船底状となっている。3章で行った断面形状の解析結果と比較すると、ある程度の差異はあるものの定性的に解析結果と実験結果は一致しているといえる。

シリコンオイルの断面形状については蒸留水と同様の観察方法を試みたが、界面にレーザーは確認できなかった。楕円体状のシリコンオイルがレーザーを屈折させてしまった可能性が考えられる。肉眼では円状に近い形状をしていると観察できた。こちらも解析と定性的に一致している。

## 6. 結言

本研究ではコイルによって発生する磁場分布と磁気力、磁気力によって保持された液膜の安定性について解析を行った。それらの解析結果を元にコイルを作成して液体の浮遊実験を行い、弱磁場下にてマグネティックバーチャルチャネルのモデル形成を行った。液体の浮揚に成功し、断面形状について解析結果と定性的な一致を得た。

## 7. 参考文献

- [1] 千葉工業大学工学部機械サイエンス学科先端材料工学コース小沢研究室 HP
- [2] M.Fujisaki, 磁気力による反磁性液滴の浮揚, 日本機械学会論文集 43-404, 1997.
- [3] 光博北村 直之・本河, “強磁場環境を利用したガラスの無容器融解,” *New Glass*, vol. 15, no. 3, pp. 38–41, 2000.
- [4] 大島修造, 日本機械学会論文集, 41-581, B1995.
- [5] 麦建強, *Oscillation Of Interface In Magnetic Field*, 1999.
- [6] 千葉隼稔, 液相中における弱磁性マイクロ粒子の磁気アルキメデス分離手法に関する研究, 東京大学大学院新領域創成科学研究科基盤科学研究系専攻修士論文, 2008.
- [7] A. A. W. N. Y. ROTENBERG, L. BORUVKA, “Determination of Surface Tension and Contact Angle from the Shapes of Axisymmetric Fluid Interfaces,” *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 93, no. 5, pp. 149–183, 1983.
- [8] A. Wilhelm Neumann, Robert David, Yi Zuo, *Applied surface thermodynamics*. 2nd ed, pp.107-120, October 13, 2010.
- [9] Azhar Iqbal, *Modeling and Control of a Magnetic Fluid Deformable Mirrors for Adaptive Optics Systems* Springer, pp.174-181, 2009.