716 磁場増加区間の液体金属磁性流体流れにおける流体駆動力の生成

Generation of Fluid Driving Force in Liquid-Metal Magnetic Fluid Flowing in Increasing Magnetic Field

○学 藤里 淳史 (姫工大院) 学 瓶子 直矢 (姫工大) 大角 友一 (姫工大)
正 熊丸 博滋 (姫工大院) 正 伊藤 和宏 (姫工大院)

Atsushi FUJISATO, Himeji Institute of Technology, Shosha, Himeji-shi, Hyogo
Naoya HEISHI, Tomokazu OKADO, Hiroshige KUMAMARU, Kazuhiro ITOH

Three-dimensional numerical calculations have been performed on the generation of fluid driving force in liquid-metal magnetic fluid (liquid-metal including ferromagnetic particles) and water magnetic fluid (water including ferromagnetic particles) flowing in an increasing magnetic field. It has become clear from the calculations that the liquid-metal magnetic fluid including ferromagnetic particles with volume concentrations greater than 0.0007 can produce the magnetic force which overcomes the Lorentz force. Next, experiments on water magnetic fluid and numerical calculations corresponding to the experiments have been performed. The numerical calculations can predict experimental results qualitatively; however, it is necessary to improve the numerical calculations in order to predict liquid-droplets two-phase flow behavior.

Key Words: Magnetic Fluid, Magnetic Force, Liquid Metal, Ferromagnetic Particle, Lorentz Force

1. 緒言

磁場勾配を有する磁場区間に液体金属磁性流体(液体金属+強磁性微粒子)を流すと、ローレンツ力による流動抵抗が生じるが、それを上回る磁気力による流体駆動力が発生するため、機械的な駆動部なしに流体を流すことができる。磁場増加区間の流体駆動部と、液体金属を用いたMHD発電機を組合せた高効率のエネルギー変換システムなどが提案されている。本研究では液体金属磁性流体および水磁性流体(水+強磁性微粒子)の磁場増加区間の流れについて数値解析を行うとともに、水磁性流体の流れについて実験および数値解析を行った。

2. 数値解析

均質流を仮定する。連続の式(1)、3方向の運動方程式(2)、3方向の誘導方程式(3)を用いる^{1),2)}。

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left[\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right] = -\nabla p + \eta \nabla^2 \mathbf{v} + \frac{1}{\mu} (\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B}_0 + \mu_0 \Phi \mathbf{M} \nabla \mathbf{H}_0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}_0) + \frac{1}{\sigma \mu} \nabla^2 \mathbf{B} \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{v}=(u,v,w)$:流速、 $\mathbf{B}=(A,B,C)$:誘導磁場、 $\mathbf{B}_0(0,B_0,0)$:印加磁場、 $\mathbf{M}$:(強磁性微粒子の)磁化の強さ、 $\mathbf{H}_0(=\mathbf{B}_0/\mu)$:印加磁場の強さ、 ρ :流体の密度、 η :粘度、 σ :導電率、 μ :流体の透磁率、 μ_0 :真空の透磁率、 Φ :強磁性微粒子の体積濃度

図1に、解析領域を示す。 z 軸方向に流体を流し、 y 軸方向に印加磁場をかける。管路の断面積は $2a \times 2b$ とする。 $0 \sim z_1$ 間は磁場なし区間、 $z_1 \sim z_2$ は磁場勾配区間、 $z_2 \sim z_0$ は磁場一定区間になっている。なお、管路断面を4

Fig.1 Calculation Domain

分割して、第一象限のみを計算対象とした。

数値計算にあたり、代表長さ a 、代表速度 $\bar{w}$ などを用いて、基礎方程式の無次元化を行う。印加磁場の強さを表す無次元数のハルトマン数を使用する。

3. 実験

図2に実験装置を示す。試験部はアクリルで流路断面積は $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ である。差圧測定孔は試験部の入口から 50mm 間隔で18箇所設定した。差圧はペローズ式微差圧計で測定する。試験部の長さは 1300mm 、助走区間は 1000mm となっている。流体として水にコバルト粉末($2\mu\text{m}$)を分散させたものを流量 2.0l/s で流し、試験部の入口から 50mm の測定孔を基準とし、各測定孔との圧力差を測定した。

Fig.2 Test Equipment

4. 結果と考察

図3は、液体金属磁性流体($Re=1000$)、図4は同じレイノルズ数の水磁性流体について、入口部の圧力を0として出口部までの数値解析による圧力変化を示す。図より、磁場なし区間 $z=0 \sim 20$ では、磁場勾配がないため磁気力が発生せず圧力増加は起きない。磁場勾配区間 $z=20 \sim 40$ は磁場勾配に比例して磁気力が発生するため圧力増加が起きる。磁場一定区間 $z=40 \sim 60$ では、磁気力は磁場勾配に比例して発生するために、圧力増加は発生しない。図3において強磁性微粒子の体積濃度 Φ が0.0007の時、ローレンツ力と磁気力がほぼ等しくなる。体積濃度がさらに大きくなるとローレンツ力を十分に上回る磁気力が発生し、大きな圧力増加が得られる。

図5は、水磁性流体($Re=3400$, 体積濃度 $\Phi=0.0005$)についての実験値と実験を対象とした数値解析および数値解析において磁気力を0.3倍とした場合の結果を有次元で示す。入口からの距離が $0 \sim 0.1m$ は磁場なし区間であり、管摩擦による圧力減少が見られる。 $0.1 \sim 0.2m$ の区間は磁場勾配区間であり磁気力が発生し圧力上昇が得られた。 $0.2 \sim 0.45m$ の区間では磁場一定で磁場勾配がないために磁気力は発生しないが、管摩擦による圧力減少が見られる。圧力上昇についての実験値と数値解析の相違は、磁化の強さを式(2)に示すように ΦM と与えているが、磁性流体としての実際の値は ΦM より小さい値となるためだと考えられる。また、実験では、試験部の壁面にコバルトが付着することで、速度が上昇することによって、数値解析よりも大きな圧力減少が起きたものと考えられる。

5. 結言

数値解析および実験より次のことが分った。

- (1) 液体金属磁性流体について、強磁性微粒子の体積濃度が0.0007よりも大きい時は、ローレンツ力に比べて十分に大きな磁気力を得られる。
- (2) 実験と数値解析の値は、定性的に一致する。今後、数値解析について固液二相流としての取扱いを行うなどの改良が必要がある。

Fig.3 Pressure Change For $Ha=100$
(Liquid-Metal+Ferromagnetic Particles)

Fig.4 Pressure Change For $Ha \approx 0$
(Water+Ferromagnetic Particles)

Fig.5 Pressure Change For $\Phi=0.0005$

6. 参考文献

- (1) 高城敏美他, 数値流体力学シリーズ, 5 燃焼・希薄流・混相流・電磁流体の解析, 東京大学出版会 (1995), pp.131 ~ 143.
- (2) 神山新一, 磁性流体入門, 産業図書株式会社, (1989), pp. 58 ~ 60.