

三層コーティングを用いた MHD 圧力損失低減化技術の基礎研究

Fundamental Study on Technique for Reduction of MHD Pressure Drop Using Three-Layer Coating

東北大・工 橋爪 秀利, 結城 和久, 伊藤 悟, 青柳 光裕
東北大・金研. 西島 元
H. Hashizume¹, K. Yuki¹, S. Ito¹, M. Aoyagi¹ and G. Nishijima²

¹ Faculty of Engineering, Tohoku University
² Institute for Materials Research, Tohoku University

1. はじめに

現在, 多くの研究者によって次世代のエネルギー源として実用化が期待されている核融合炉に関する研究開発が進められている。核融合炉ブランケット開発はその研究のひとつである。核融合炉ブランケットとしては, 様々な形式のものが提案されているが, 本研究ではトリチウム増殖材となる液体リチウムを冷却に用いる液体増殖材型ブランケットに着目する。液体リチウムブランケットでは, 燃料プラズマを閉じ込めるために必要な磁場の影響により, ブランケット中で液体リチウムの流れに電磁力が抵抗力として働く MHD 圧力損失が生じるという問題があり, この MHD 圧力損失を低減させることが重要な課題となっている。流路の内側を電氣的に絶縁すれば, 流体に作用する正味の電磁力はゼロとなるため MHD 圧力損失は大きく低減できる。しかし絶縁材は金属と熱膨張率が異なるため, クラックが生じ, そのクラックを通して金属壁に電流が流れることが懸念される。また, 高熱負荷や放射線照射にさらされるプラズマ対向面に絶縁を施すのは不都合であり, さらに, 流路内面の 4 面すべてに絶縁コーティングを施すのは技術的にも困難である。そこで, プラズマ対向面以外の三面のみに絶縁を施し, 絶縁材の流路側にさらに薄い金属層を加えた三面複層コーティング流路 (Fig. 1) が提案されている [1]。金属被膜の存在により, 絶縁材にクラックが生じても電流パスの発生を防止できる。

過去の研究では数値解析による評価が行われ [1][2], 三面複層絶縁流路では導電壁流路と比べて MHD 圧力損失が低減できることが確認されている。本研究では三面複層絶縁流路による MHD 圧力損失低減効果を実

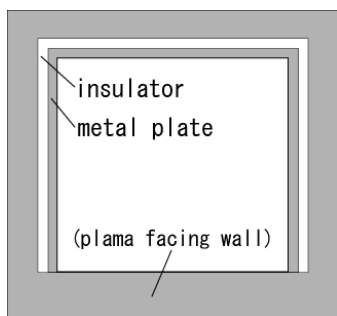


Fig. 1 Three-surface multi-layer channel.

験と数値解析の両面から検証して最終的に核融合炉ブランケットへの適用性を評価することを目的とする。本年度は, 絶縁および導電壁流路での圧力損失測定を行ったので, この結果について報告する。

2. 実験方法

Fig. 2 に実験装置の概略図を示す。試験部は環状のステンレス容器と筒状の内外の銅電極からできており, 内径 80mm, 外形 156mm, 深さ 30mm の環状自由表面流路である。流路底面は電氣的に絶縁されており, 絶縁壁流路体系となっている。作動流体は Bi-Sn 共晶合金 (融点 138°C) で, 作動温度は 150°C である。流路上方はラバーシートで密閉し, アルゴンガスをパージすることで流体の酸化を防ぐ。この流路を超伝導マグネットに挿入することで流れに対して垂直方向の磁場を印加する。この磁場と内外の電極を通して流す径方向の電流により, 流体に周方向の駆動力を発生させる。流路は開流路であるが, 自由表面における境界条件は対称条件と等しいため, チャンネル流れの半領域を模擬した状態である。磁場の強さ (0.5~5T)、流速 (0.05~0.6m/s) および壁の導電性の 3 つをパラメータとして圧力損失の違いを評価する。流速は MHD 流量計の原理で測定できる。これは流れと磁場の相互作用により電界が発生することを利用するものであり, 電極間の電位差と距離、磁場の強さにより平均流速が求められる。圧力損失は駆動電磁力と等価なため, 印加する電流や磁場などから求められる。

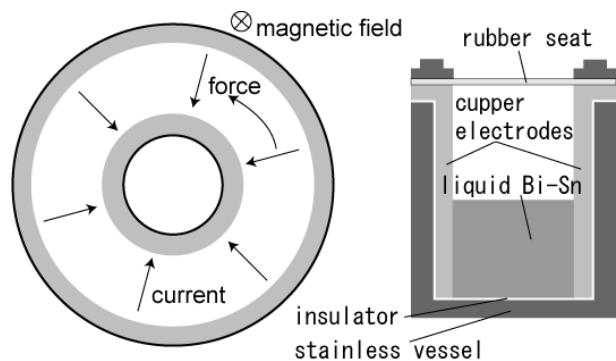


Fig. 2 Experimental set-up.

3. 結果と考察

3-1. 絶縁壁流路での圧力損失特性

Fig. 3 に絶縁壁流路における圧力損失特性を示す。このグラフより圧力損失は流速と磁場に対して線形変化していることがわかる。MHD 流れは磁場下の平行平板間流れであるハルトマン流れを仮定すれば流速分布を解析的に求めることができるため、壁面での速度勾配より圧力損失の解析解が分かる。解析解は式(1)に示すとおりである。

$$\left| \frac{dp}{dx} \right| = \frac{\sqrt{\sigma\mu UB}}{d} \quad (1)$$

ここで σ は流体の電気伝導率、 μ は粘性係数、 U は平均流速、 B は磁場の強さ、 d は代表長さである。この解析解はチャンネル流れでも一致することが数値解析により確認されている[3]。式(1)は圧力損失が流速と磁場に比例することを示しており、今回の実験結果は定性的には理論値通りの結果であると言える。

Fig. 3 で「+」のプロット点に着目すると、0.5Tの最大流速(0.6m/s)の場合には他と比べて大きな圧力損失が生じているが、この原因として乱流遷移の可能性があることが考えられる。MHD 流れでは磁場の影響により層流化が起こることが知られており、その臨界値はレイノルズ数(Re)と磁場の強さに比例する無次元数であるハルトマン数(Ha)の比によって決定され、ハルトマン流れの場合に $(Re/Ha)_{cr} = 225$ である[4]。今回の実験では0.5Tかつ0.6m/sの場合に $(Re/Ha)_{max} = 180$ であり層流域だが、後述する液面での浮遊物の影響により乱れが促進され、層流化の臨界値が低下している可能性がある。

Fig. 4 に圧力損失の実験値と理論値の比を示す。実験値は理論値に対して、低 UB 域では2倍以上、高 UB 域では1.6倍程度となっており、実験値と理論値の間に大きなずれが生じている。この原因として液面に酸化物などの浮遊固形物があるため、液面でもせん断力が作用していることが考えられる。流動の状況を装置上方からカメラによって観察した結果、0.5Tかつ1m/sの場合に

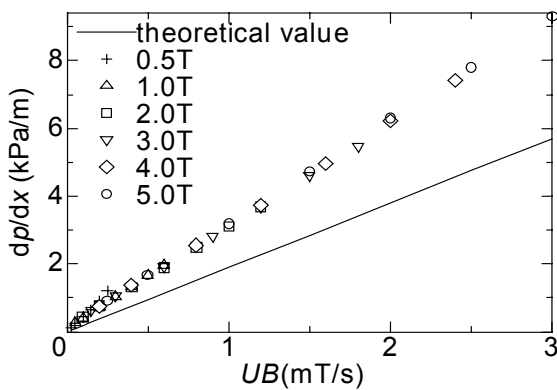


Fig. 3 Characteristics of pressure drop in the case of insulated wall.

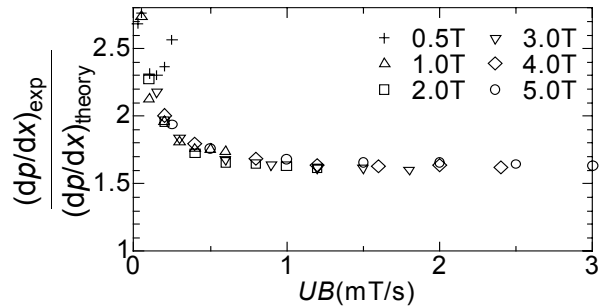


Fig. 4 Ratio of experimental value of pressure drop to calculated value.

液面の移動速度はおよそ0.05m/sで、さらに流速が0.5m/sの場合には液面は静止した状態であることが確認された。このような状況では液面は理想的な自由表面とはなっており、液面でもせん断力が発生するため圧力損失が増大する。Fig. 5 に示すように自由表面流れをチャンネル流れの半領域とみなすと代表長さは流路の深さであるが、浮遊物が存在し液面が静止した状態では液面の深さの半分が代表長さとなるために、式(1)より求められる圧力損失の理論値は2倍になる。また、流体と浮遊物の界面の凹凸によって、界面でのせん断力が増加するため圧力損失はさらに増大する。したがって、高 UB 域では液面の移動速度が主流流速よりも遅いため追加の圧力損失が生じ、理論値の1.6倍程度の結果になったと考えられる。また、低 UB 域では液面が静止し、さらに界面に凹凸があるために理論値の2倍以上の圧力損失になったと考えられる。

3-2. 導電壁流路の場合

絶縁壁流路の場合はFig. 2に示すように、電極および流体とステンレス容器は電氣的に絶縁されている。しかし、この絶縁が不完全なためステンレス容器にも電流が流れ、導電壁が模擬された体系での結果をFig. 6およびFig. 7に示す。Fig. 6より圧力損失は流速に対しては線形変化で、Fig. 7より磁場に対しては2次関数的な変化であることが分かる。壁面せん断力は式(1)で示されるように流速および磁場に対して線形変化である。一方で電磁力は σUB^2 で与えられるため磁場の2乗に比

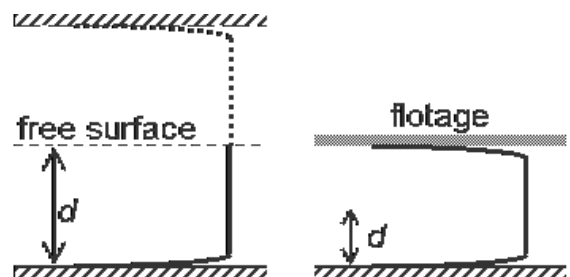


Fig. 5 Flow velocity distribution and characteristic length

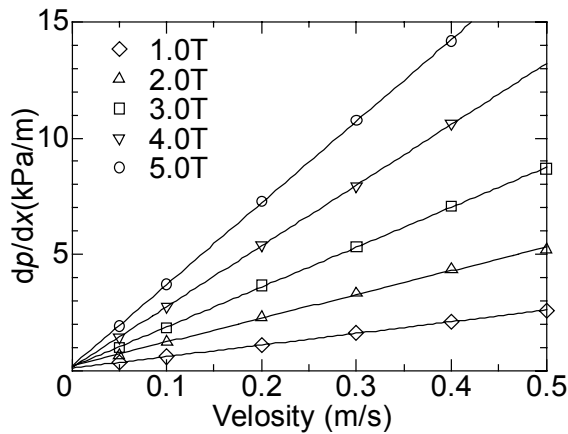


Fig. 6 Relationship between velocity and pressure drop in the case of conductive wall.

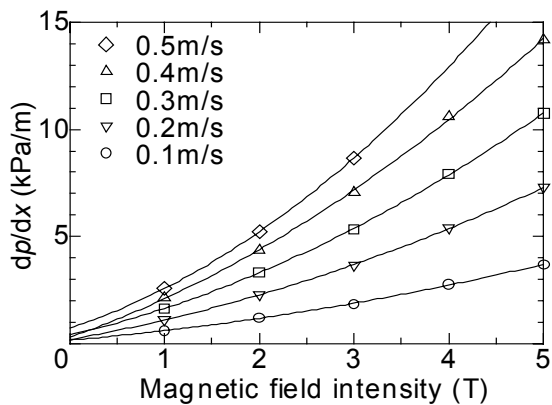


Fig. 7 Relationship between magnetic field and pressure drop in the case of conductive wall.

例して増大する。導電壁流路においては壁面せん断力と電磁力によって圧力損失が発生するため、流速に対しては線形変化、磁場に対しては2次関数的な変化となる。

電磁力はステンレス容器にリークした電流より求められるので、リークパスとなったと考えられる部分の電気抵抗値から算出することができる。抵抗値は概算で $10^{-4} \sim 10^{-5} \Omega$ 程度であるために $5 \times 10^{-5} \Omega$ と仮定する。この抵抗値より算出した電磁力を実験値から差し引いた修正圧力損失特性を Fig. 8 に示す。導電壁の場合と同様に流速と磁場の積に対して線形変化を示している。このことから比較的定量的な電磁力が算出できていると考えられる。

4. まとめ

これまでの実験結果により、絶縁壁流路では圧力損失が流速と磁場の積に比例し定量的には理論式と良い一致を示した。しかし、浮遊固形物の影響により実験値は理論値の1.6~2倍以上の値であった。また導電壁流路では磁場に対して2次関数的変化であり、絶縁壁の

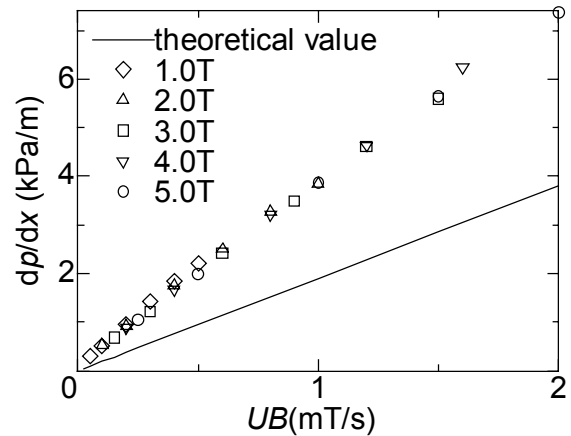


Fig. 8 Characteristics of revised pressure drop in the case of conductive wall .

場合と同様に定量的には理論式を再現する結果が得られた。さらに、電流リーク部分の抵抗値から電磁力を差し引いた圧力損失は絶縁壁の場合と同様な傾向を示し、定量的な電磁力が算出できた。

今後は定量的な圧力損失を測定する体系を確立し、数値計算と比較するためのリファレンスデータの取得や、三面複層絶縁流路を作成し圧力損失の測定を行う。また実験と同体系での数値解析により実験値と計算値の違いを検証し、さらにその結果をもとに計算コードの健全性を示し、最終的にブランケット体系での数値計算により核融合炉での適用性を評価する。

参考文献

- [1] H. Hashizume, Numerical and experimental research to solve MHD problem in liquid blanket system, Fusion Engineering and Design 81 (2006), pp. 1431-1438.
- [2] K. Yuki, T. Kobayashi, M. Satake, H. Hashizume, Magneto-hydro-dynamic-simulation of square duct flow with three-surface-coated multi layers, APCOM'07&EPMESC XI (2007).
- [3] Y. Gonno, Bidimensional Galerkin Method MHD Analysis Code: BIGMAC and Analysis of Double Tube EM Flow Coupler, Master Thesis of Osaka Univ., (1990).
- [4] Murgatroyd, W., Experiments on magneto-hydrodynamic channel flow, Phil. Mag., 44, 354, pp1348-1354, (1953).