

# 複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 technology to reduce MHD pressure drop using multi-layer coating

東北大・工 橋爪 秀利, 伊藤 悟, 青柳 光裕  
東北大・金研 西島 元  
H. Hashizume<sup>1</sup>, S. Ito<sup>1</sup>, M. Aoyagi<sup>1</sup> and G. Nishijima<sup>2</sup>  
<sup>1</sup> Faculty of Engineering, Tohoku University  
<sup>2</sup> Institute for Materials Research, Tohoku University

### 1. はじめに

現在、次世代のエネルギー源として核融合炉の実用化が期待されており、多くの研究者によって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。様々な形式の核融合炉ブランケットが提案されているが[1], 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も用いて、構造材をバナジウム合金とする Li/V ブランケットに着目する。Li/V 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、ブランケット中での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、絶縁層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[2]。金属層の存在により、絶縁層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[2][3]、三面複層コーティング流路によって MHD 圧力損失がブランケット設計可能な値まで低減できることが確認されている。さらに実験と数値解析の両面から核融合ブランケットへの適用性を評価することを最終目標として、昨

年度は絶縁および導電壁流路での圧力損失測定を行い、定性的に理論値を再現する結果が得られた。その結果を踏まえて本年度は三面複層コーティング流路における圧力損失の測定し、並行して実施した数値解析結果との比較を行った。

### 2. 研究方法

#### 2-1. 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。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抑制する。この流路を 6T-CSM 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 (~5T)、流速 (~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。壁の導電性は底部のステンレス板の厚みによって変化させる。本研究では 0.3、0.1 および 0.02mm の3種類のステンレス板も用いる。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場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。

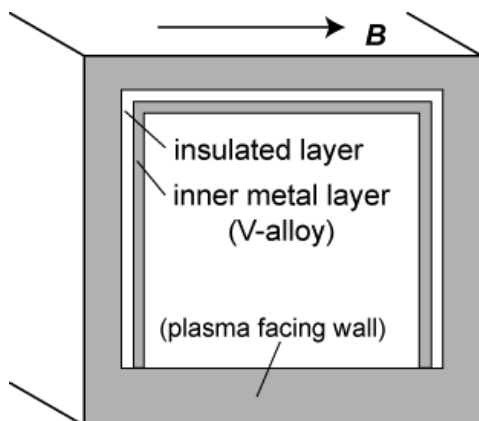


Fig. 1. Three-surface-multi-layered channel

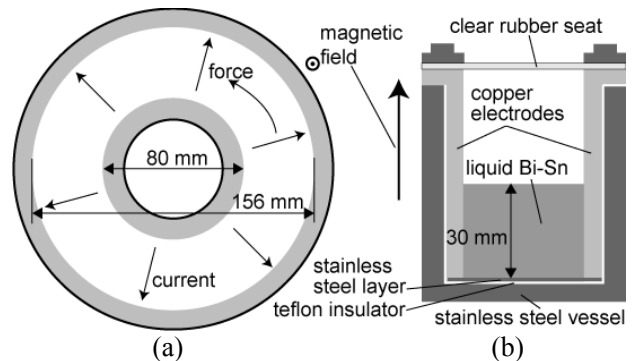


Fig. 2. (a) Top and (b) cross-sectional schematic views of the channel test section

## 2-2. 数値解析

支配方程式は定常2次元の主流成分に関するナビエーストークス方程式(Eq.1)および静電ポテンシャルに関するポアソン方程式(Eq.2)である。

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \mu r \frac{\partial u}{\partial r} \right) - \mu \frac{u}{r^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + JB = 0 \quad (1)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \sigma r \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \sigma \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\sigma r u B) = 0 \quad (2)$$

ここで、 $r$  は半径、 $\mu$  は粘性係数、 $u$  は周方向流速、 $J$  は径方向電流密度、 $B$  は軸方向磁場、 $\sigma$  は導電率、 $\phi$  は電位ポテンシャルである。これらの式を有限体積法により離散化し、連成させて解く。自由表面における境界条件はフリースリップ条件として、液面の変化は考慮していない。他の固体壁ではノンスリップ条件を適用する。格子点数は磁場の強さによって異なり、流体内で  $500 \times 77$  (1T のとき)、 $500 \times 136$  (2T および 3T)、 $500 \times 256$  (4T および 5T) である。

## 3. 結果と考察

### 3-1. 三面複層コーティング流路における圧力損失

Fig. 3 に複層コーティング流路における圧力損失特性を示す。プロット点が実験結果で、実線が数値解析結果である。圧力損失は流速に対しては線形、磁場に対しては2次関数的な変化であるため、横軸は  $UB^2$  で表している。圧力損失はステンレス板の厚さごとにほぼ同一直線となるが、磁場の強さによって直線の傾きが異なっており、ステンレス板が薄い場合ほどその傾向が顕著となる。これは圧力損失の理論式が磁場の2乗に比例する電磁力による項と、磁場の1乗に比例する摩擦力による項によって構成されているためである。0.3mm や 0.1mm の場合には電磁力が支配的となるため、ほぼ一直線になるが、0.02mm の場合には摩擦力の影響も比較的大きいため、ばらつきが大きくなっている。

Fig. 3 から数値解析結果と実験結果の比較を行うと、ステンレス板が 0.3mm の場合は実験値のほうが小さく、0.1mm の場合にはほぼ同じか実験値のほうがやや小さい、一方でステンレス板が 0.02mm の場合には実験値のほうが大きいという傾向がみられる。また、Fig. 4 に 2T 以下の場合の結果を拡大して示すが、0.3mm の場合の 1T や、0.1mm の 2T 以下の場合では、実験値が計算値を上回っている。したがって流動実験においては、圧力損失を増大させる効果と減少させる効果があり、それら2つの影響を含んだ結果が得られていると推測できる。圧力損失の実験値が計算値を上回るのは、薄いステンレス板や小さな磁場の場合であるが、このような条件のときは摩擦力が比較的大きい。一方で、実験値が計算値を下回るのは、厚いステンレス板で大きな磁場の場合であり、このときは電磁力が支配的になっている。これは  $UB^2$  に対して圧力損失の関係がほぼ直線的に変化していることから伺える。したがって、実験では摩擦力が増大し、電磁力が減少している可能性が考えられる。

複層コーティング流路での流動実験時にも自由液面

に酸化物が浮遊しているため、昨年度実施した絶縁壁流路での流動実験の場合と同様に摩擦力の増大はこの酸化物によって引き起こされている可能性が高い。一方で電磁力の減少はステンレス板表面での接触抵抗であると考えられる。

### 3-2. 接触抵抗の影響

本研究では、流体と壁の導電率比を液体リチウムとバナジウム合金の導電率比(1.5程度)から大きく逸脱させないようにするために底壁の材料として、液体 Bi-Sn と同程度の導電率を持つステンレスを用いている。しかし、液体 Bi-Sn とステンレスの濡れ性は悪い上にステンレスの表面には酸化皮膜が形成されているために、それらの界面には接触抵抗が存在している可能性がある。このため、実質的には接触抵抗の分だけ壁の電気抵抗が増加して圧力損失の変化をもたらす。また、流動実験を行っていく過程で Bi-Sn の濡れやステンレスの表面状態が変化して接触状態が良くなることで、電磁力(圧力損失)の増大につながる可能性も考えられる。

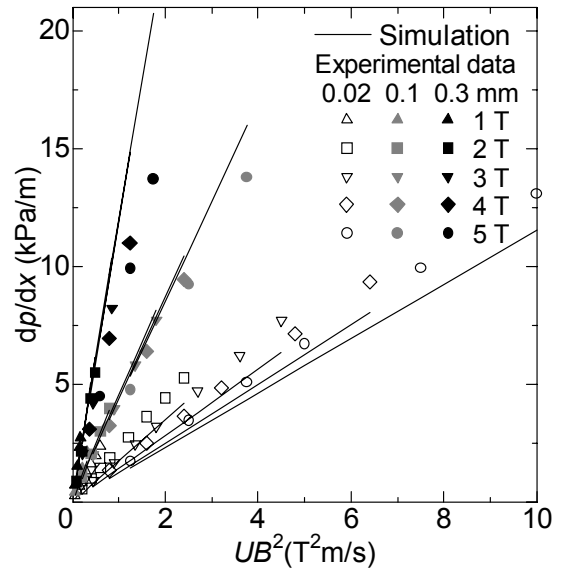


Fig. 3. Experimental (symbols) and simulated (lines) pressure drops for the multi-layered channel

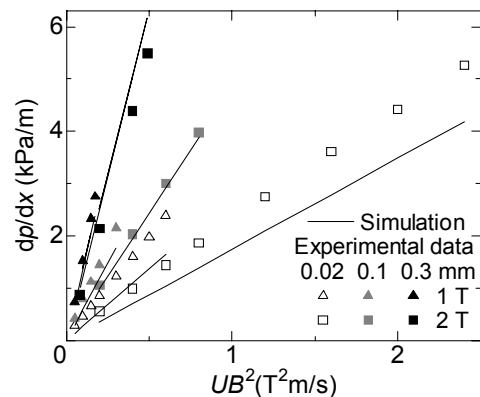


Fig. 4. Experimental (symbols) and simulated (lines) pressure drops determined at 1 and 2 T for the multi-layered channel

溶融 Bi-Sn にステンレス板を浸して通電させ、接触抵抗値を測定すると、測定によってばらつきがあったが、 $1\sim 10\mu\Omega\text{m}^2$  程度の大きさであった。また、 $1\mu\Omega\text{m}^2$  の抵抗値を示したステンレス板の表面を 150 番のサンドペーパーで軽くこすり、エタノールで研磨カスを拭き取った後に測定を行うと、接触抵抗は  $0.2\mu\Omega\text{m}^2$  まで減少し、ステンレスの表面状態の変化によって、接触抵抗が低減されることが確認された。測定で得られた接触抵抗があるときの電気回路を仮定して、壁に流れる電流を計算することで、接触抵抗の影響を加味した圧力損失の概算値を求められる。

### 3-3. 補正した圧力損失

Fig.3 および Fig.4 に示している実験結果は増大していると考えられる摩擦力の影響を含んでいるため、接触抵抗の影響を加味した計算結果であっても単純な比較はできない。そこで、複層コーティング流路でも絶縁壁流路と同じ摩擦力が働くことと仮定して、各圧力損失の結果から昨年度に得られた絶縁壁での結果を差し引く。すると、増大した摩擦力の影響を含まない電磁力のみによる圧力損失を比較できる。なお、差し引く絶縁壁のデータはいずれの条件でも同程度の速度で酸化物の生成が進んだと仮定して、同じくらいの時間経過のデータを用いる。すなわち、初期のデータを参照している  $0.02\text{mm}$  の場合は初期の絶縁壁のデータ、終盤のデータを参照している  $0.3\text{mm}$  ( $76$  時間後) と  $0.1\text{mm}$  ( $77$  時間後) は終盤 ( $75$  時間後) のデータを差し引く。

このようにして補正した圧力損失を Fig.5 に示す。 $0.02\text{mm}$  や  $0.1\text{mm}$  のステンレス板の場合には実験結果がほとんど一直線上にのっており、正しく摩擦力を推定できていると考えられる。一方で  $0.3\text{mm}$  の場合にはややばらつきがみられる。 $0.3\text{mm}$  の場合には接触抵抗の値の変化に対して、圧力損失の変化が大きいため、わずかな接触抵抗状態の変化に影響さればらつきが出た可能性がある。実験値と計算値を比較すると、実験値はおおよそ  $0.2\mu\Omega\text{m}^2$  の接触抵抗を仮定した計算値と  $1\mu\Omega\text{m}^2$  の間となっている。接触抵抗の測定ではサンドペーパーによる研磨によって接触抵抗が  $1\mu\Omega\text{m}^2$  から  $0.2\mu\Omega\text{m}^2$  に変化したことが確認されたが、流動による接触抵抗の変化量が研磨による変化量よりも少なかった可能性が考えられる。

## 4. まとめ

超伝導マグネットと環状の複層コーティング流路、液体金属を用いて、強磁場下における MHD 圧力損失の測定を行った。得られた結果は定性的には MHD 流れの理論と一致する結果であった。さらに、数値解析結果との定量的な比較を行った場合にも、自由液面の浮遊物や接触抵抗の影響を加味すれば、実験値は計算で想定される範囲内になることを示すことができた。したがって、三面複層コーティング流路の MHD 圧力損失低減効果は実験的にも確認できたと考えられる。

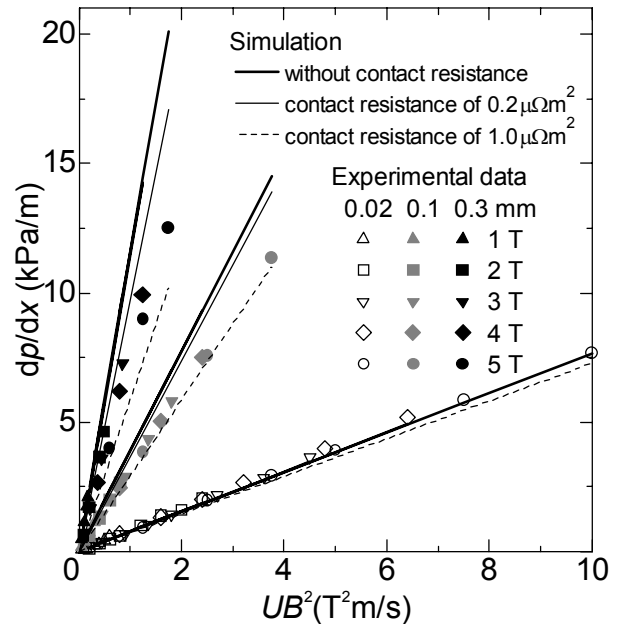


Fig. 5. Experimental (symbols) and simulated (lines) modified pressure drops with and without contact resistance

## 参考文献

- [1] M. Enoeda, M. Akiba, S. Tanaka, A. Shimizu, A. Hasegawa, S. Konishi, A. Kimura, A. Kohyama, A. Sagara and T. Muroga, "Overview of design and R&D of test blankets in Japan", Fusion Eng. Des., 81, pp. 415–424, 2006.
- [2] H. Hashizume, "Numerical and experimental research to solve MHD problem in liquid blanket system", Fusion Eng. Des., 81, pp. 1431–1438, 2006.
- [3] K. Yuki, T. Kobayashi, M. Aoyagi, H. Hashizume, "Magneto-Hydro-Dynamic-Simulation of Square Duct Flow with Three-Surface-Coated Multi Layers", International Journal of Fluid Mechanics Research, Vol.36, No.5, pp. 473–487, 2009.