

液体だけど水じゃない～次世代ブランケット・ダイバータ研究開発の現状と課題～
 <伝熱・MHD特性研究の現状>

Current Status of MHD Thermofluid Study

横峯健彦¹⁾, 橋爪秀利²⁾

Takehiko YOKOMINE¹⁾, Hidetoshi HASHIZUME²⁾

京都大, Kyoto Univ.¹⁾, 東北大, Tohoku Univ.²⁾

1. 水とは違う伝熱

液体金属、熔融塩が水のもっとも大きな違いは、磁場下の挙動である。熱物性としては水も熔融塩も高プラントル数流体として特徴付けることができ、一方の低プラントル数流体である液体金属と伝熱機構を区別することができる。水の伝熱データベースは原子炉を設計できるまで充実しているが、液体金属に関しても、高速増殖炉(FBR)の開発における液体Naのデータベースがあり、一般の磁場のない環境下での熱伝達特性、流動は比較的良好に予測することができる。ところが、磁場、特に核融合炉のような強磁場がかかった場合には、液体金属/熔融塩は、“液体だけど水じゃない”姿をみせる。それは、よく知られたMHD圧損だけでなく、伝熱特性も大きく変わってくるが、厄介なのは、その特性を磁場がかかるとこうなると簡単に分類できないところにある。

磁場下における液体金属や熔融塩などの導電性流体の流動には、ハルトマン数およびレイノルズ数が主要なパラメータとして影響する。ここで、ハルトマン数 Ha 、レイノルズ数 Re は、それぞれ $Ha = hB_0\sqrt{\sigma/\rho\nu}$ 、 $Re = UL/\nu$ で表される。ここで、 σ 、 ρ 、 ν 、 U はそれぞれ流体の導電率、密度、動粘度、代表速度、 B_0 は一様磁場 \mathbf{B} の大きさである。 h および L はいずれも代表的な長さスケールであるが、 h は磁場に垂直な方向の代表スケールであり、必ずしも流体運動の代表スケール L とは一致しない。この Ha と Re で整理する、伝熱機構と強く関連するMHD乱流遷移のマップを図1示す[1]。図には各種ブランケットでのMHD乱流がどの領域に含まれるかも示している。領域は大きく、「乱流」および「層流または擬2次元乱流」に分けられる。さらに図には、核融合研の熱・物質流動ループ装置 Oroshee-2 での実験可能条件も載せている。現在準備されている熔融塩 FLiNaK、液体金属 LiPb いずれも乱流-層流遷移をカバーできるようになっている。

3次元乱流が、磁場の影響により2次元化することはこれまでも研究されてきたが、ブランケットなど

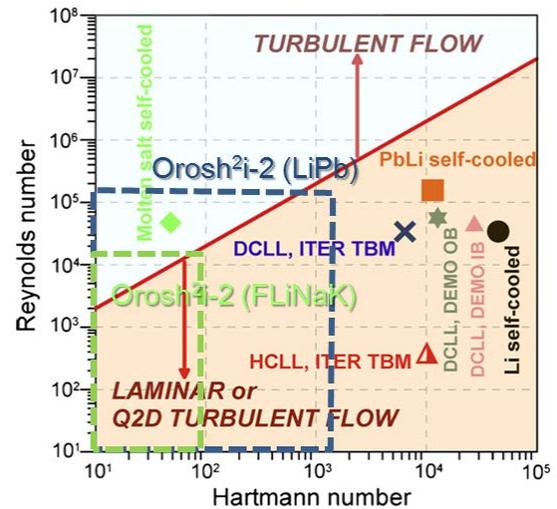


図1 MHD乱流の遷移マップ

実際の工学的な側面から考えると、たとえば、流路壁面で流動スリップが生じる場合、MHD 擬似二次元流がハルトマン境界層(磁場に垂直な壁面近傍の速度境界層)内においてジュール散逸し、粘性散逸が減少するという特異な渦構造となり、流動スリップがない場合に比べて流れが不安定化することがわかっている[2]。また、核融合炉環境下と同等の強磁場が印加される場合において、流れの慣性力の影響が無視できず、流れが不安定化して層流から乱流に遷移することが最新の研究で明らかになっている。例えば、液体金属が導電壁流路を流れる際に印加磁場と平行な壁面の近傍には高速度ジェット流が、主流部では一様流速流が形成されるM字型の流速分布をとる。ジェット流分布が有する変曲点においてはKelvin-Helmholtz型の流動不安定性により、流れが不安定化して最終的に乱流化することが明らかになっている[3]。また別の例として、ブランケット内では液体金属自身の核発熱により流体内に温度差が生じ、鉛直方向に長い流路内では浮力の影響が顕在化しMHD混合対流となる。そうすると、強乱流領域においては渦-壁面相互作用と様々な渦間相互作用が支配的となり、一方、弱乱流領域

においては流れの渦は速度分布の変曲点近傍に局所的に存在するなど、複雑な流動を示す[4]。

先に、伝熱機構は MHD 乱流に強く相関すると書いたが、これら複雑な乱流遷移、流動現象に対応する伝熱機構に関する実験研究は、まだ緒に就いたばかりであり、Oroshii-2 に大きな期待が寄せられている。

2. 水とは違う圧損

伝熱機構に加え、液体金属が水と大きく異なるのは、核融合炉で使用する際の最大の課題である MHD 圧力損失である。MHD 圧力損失を低減するためには、流路壁内側に絶縁材を設け、電氣的に絶縁することにより発生する電流を抑制する必要があるが、絶縁材料として主に想定されるセラミックには、金属で構成される流路壁との熱膨張率の違いによりクラックが生じる可能性が高く、また、セラミックは熱伝導率が低い材料であるため除熱性能が低下するといった問題もある。

これらの問題を解決するために、図 2 に示すような三面複層コーティング流路が提案されており[5]、金属層厚さ 0.10 mm の三面複層コーティング流路の試作が行われ、図 3 に示すように磁場 1.8 T の環境下での MHD 圧力損失低減効果が実験により実証された[6]。

しかしながら、実際の核融合炉ブランケットに適用するためには圧力損失の観点から金属層の厚さは 0.02 mm 程度の厚さにすることが要求される[5]。この厚さの金属層を実炉において用いることを考えた場合、強度が問題となることが想定される。そこで、圧力損失はハルトマンウォールの金属層構造に依存することが明らかにされていることから、図 4 に示すような金属層に補強材を配置した金属層構造にすることによって金属層の強度を高めることが提案されている[7]。様々な金属層構造と MHD 流動場の関係性について評価が行われた結果、金属層構造の最適化により、MHD 圧力損失低減、金属層強度、除熱性能の 3 つの要求性能をすべて満たすことができるような補強材付三面複層コーティング流路を設計できる可能性が示された。

Reference

- [1] A. Sagara et al., Fusion Science and Technology, 68, 2 (2015) 303-307.
- [2] S. Smolentsev, Theoretical Comput. Fluid Dynamics 23 (2009) 557-570.
- [3] S. Smolentsev et al., Phys. Fluids 24,

(2012) 024101.

- [4] N. Vetcha et al., Physics of Fluids 25, (2013) 024102.
- [5] H. Hashizume, Fusion Eng. and Des., 81 (2006) 1431-1438.
- [6] M. Aoyagi, NTHAS8, Beppu, Japan, Dec.9-12, (2012)
- [7] Isshiki, ITC25, Nov.3-5,(2015)

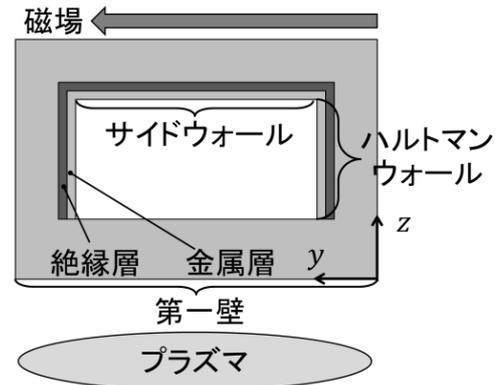


図 2 三面複層コーティング流路

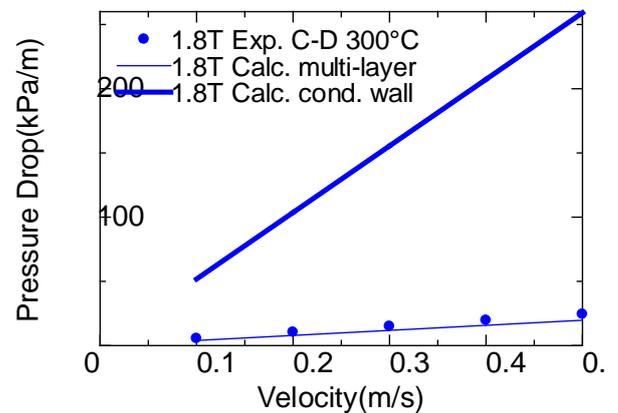


図 3 三面コーティング流路での MHD 圧力損失低減結果

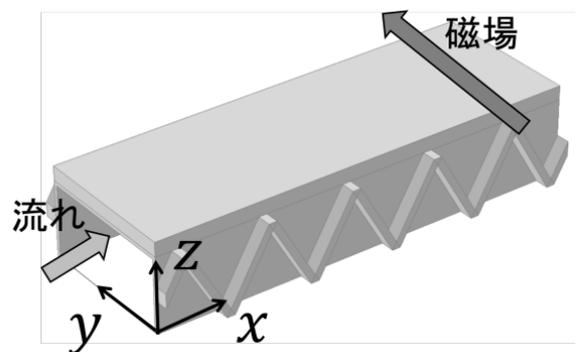


図 4 補強材付金属層

