

液体金属壁面噴流の流動特性の解明 Free-Surface characteristics of liquid-metal wall jet

金村 卓治¹、近藤 浩夫¹、杉浦 寛和²、帆足 英二³、吉橋 幸子⁴、室賀 健夫⁵、
古川 智弘¹、平川 康¹、若井 栄一¹、堀池 寛⁴
T. Kanemura¹, H. Kondo¹, H. Sugiura², E. Hoashi³, S. Yoshihashi⁴, T. Muroga⁵,
T. Furukawa¹, Y. Hirakawa¹, E. Wakai¹, H. Horiike⁴

¹原子力機構、²大阪大学（現三菱重工業株式会社）、³大阪大学、
⁴大阪大学（現福井工業大学）、⁵核融合科学研究所

¹JAEA、²Osaka University (currently MHI)、³Osaka University、

⁴Osaka University (currently Fukui University of Technology)、⁵NIFS

1. 背景

核融合研究分野において様々な液体金属噴流の応用研究が進められている。液体金属を除熱媒体としてダイバータを覆うという先進的なアイデアや、液体リチウム (Li) の壁面噴流を重陽子ビームのターゲットとして使用する国際核融合材料照射施設 (IFMIF) 計画がある。

液体金属壁面噴流が除熱媒体や核反応ターゲットとして実現可能か判断する際に要求される重要なポイントは、実測に基づく流動特性の解明である。そのために、液体金属に適する計測器の開発が必要不可欠である。著者らは、IFMIF の Li ターゲットの流動特性を解明するための基礎研究を 2002 年から着手し、様々な計測器を開発してきた。そして、それらを用いてその流動特性を解明してきた。我々が開発した計測手法は、他の液体金属流れにも適用可能と考えられ、かつ液体 Li の実液試験で得た流動特性は、他の液体金属流れ実験の基礎データとして非常に有益と考えられる。本講演ではこれまでの一連の研究をレビューする。

2. 実験装置

Li 流動特性に関する実験は、大阪大学の液体 Li ループ（以下、阪大ループ）[1]と阪大ループの約 5 倍規模で、IFMIF ループの約 1/3 規模である EVEDA リチウム試験ループ（以下、ELTL）[2]において行った。阪大ループでは、開口部寸法 10 mmH×70 mmW のノズルから最大流速 15 m/s の壁面噴流を水平流路に沿って生成できる。ELTL では、開口部寸法 25 mmH×100 mmW のノズルから湾曲した縦型流路 (IFMIF-Li ターゲットアセンブリを幅のみ 1/2.6 スケールに縮小したモデル) に沿って最大流速 20 m/s の壁面噴流を生成できる。

3. 開発した計測器と明らかにした流動特性

阪大ループおよび ELTL にて開発もしくは適用可能と判断された液体金属壁面噴流用の計測技術は、主要なものを挙げると①高速度カメラ、②触針式液面計、③レーザープローブ法である。

3.1 高速度カメラによる計測

高速度カメラを用いることで、高速で自由表面を可視化でき (図 1)、数 kHz の周波数を有する自由表面波動の波長を画像計測により取得できる。計測波長は、自由表面下せん断層の線形安定性理論による予測値とよく一致した[3]。また、計測波長は、触針式液面計やレーザープローブ法による計測結果を補足するとともに、計測器開発時の基礎データとしても活用した。また、撮影画像を解析して表面波の伝搬速度を計測できる表面波追跡法 (SWAT 法) と呼ぶ手法も開発した[4]。

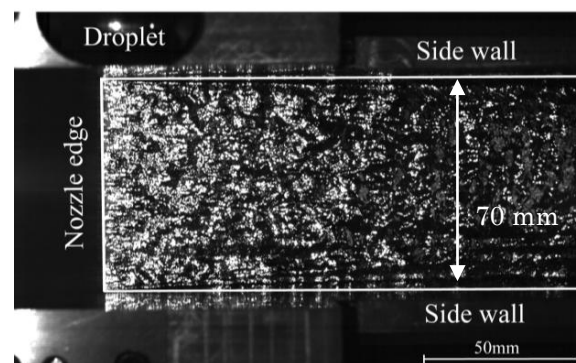


図 1 阪大ループで観察された Li 噴流：ノズルから吐出された Li が右方向に流れる (流速 15 m/s、Li 温度 300°C、Ar 雰囲気 0.12 MPa、撮影速度 20000 fps(frames per second)、シャッタースピード 10 μ s)

3.2 触針式液面計による計測

触針式液面計は、触針と液面との接触信号を計測し、計測信号から統計的に自由表面変動を解析する手法である。得られる特性は、変動の周期、

波長、波高である。それらの確率分布を計測できる点が最大の特徴である。変動周期および波長の分布に関しては対数正規分布、波高分布に関してはレイリー分布を導入し、計測結果がそれらに従うことを初めて示した(図2)[5]。いずれも海洋波等の不規則波群を取り扱う理論で導出される分布であり、計測された自由表面変動は確率的に不規則であると考えられる。

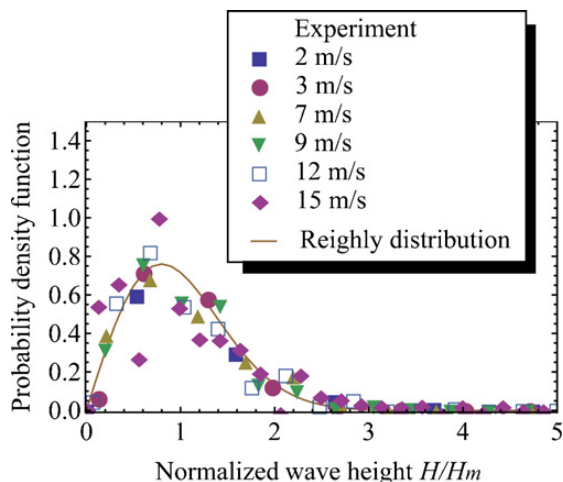


図2 阪大ループで得られた無次元波高分布 (Li 温度 300 °C、Ar 雰囲気 0.12 MPa、計測位置: ノズルから 175 mm 下流)

3.3 レーザープローブ法による計測

レーザープローブ法[6,7]は、触針式液面計の計測手法を踏襲した、レーザーによる非接触の噴流厚みの計測手法である。図3および4にELTLにおいて計測されたLi噴流の厚み分布を示す(座標原点(X,Y)=(0,0)はIFMIF重陽子ビームフットプリントの中心位置。X正方向が流れ方向、Y方向が流れ横断方向、Z正方向が流れ厚み方向)。流体力学的に導出される噴流の厚み分布モデルを導入することで、ELTLにおいて計測された流れ方向の厚み分布を精度よく予測できることを示した(図4)。さらに、IFMIF-Liターゲットの平均厚みの非一様性は±1 mm以内であることを要求されるが、図3-4に示すように、その要求値を十分に満足することを実証した。

4. まとめ

著者らは様々な計測器を独自に開発し、自由表面変動の波高分布モデル、波長分布モデル、厚み分布モデル等を導入し、Li噴流の流動特性を系統的に解明することに初めて成功した。これらの一連の成果は、IFMIFのLiターゲット開発に大きく貢献するものであると信じるが、それだけに止まらず、先進的な液体金属第一壁等への応用や、プラズマ・核融合研究分野の適用範囲を超えた高

強度ビームターゲットにおける先進的応用が期待できるものとする。

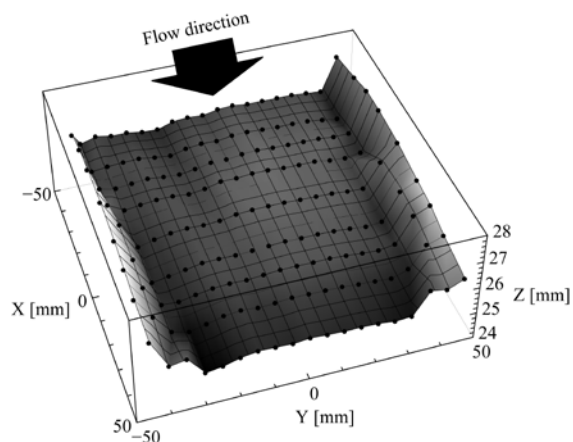


図3 ELTLで計測されたLi噴流の平均厚み3次元分布(流速 15 m/s、Li 温度 250 °C、真空度 3 Pa)

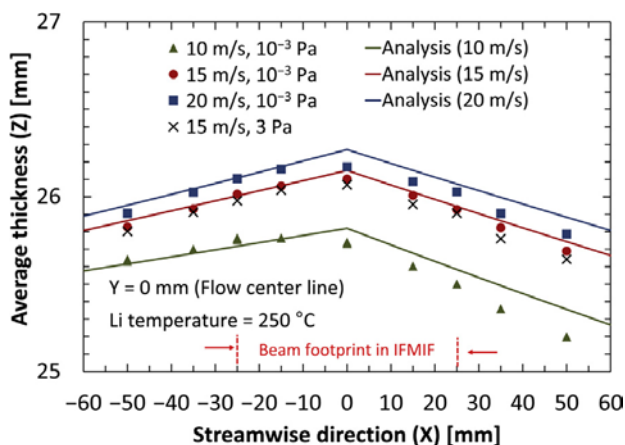


図4 ELTLで計測されたLi噴流の平均厚みの流れ方向分布(Li 温度 250 °C): 記号は実験値、実線は解析予測値を表す。両者は0.5%以内で一致している。

参考文献

- [1] H. Horiike, et al., Fusion Eng. Des. 66-68 (2003) 199-204.
- [2] H. Kondo, et al., Nucl. Fusion 51 (2011) 123008 (12pp).
- [3] H. Kondo, et al., Fusion Eng. Des. 75-79 (2005) 865-869.
- [4] H. Sugiura, et al., J. Nucl. Sci. Technol. 48 (2011) 1230-1237.
- [5] H. Kondo, et al., Fusion Eng. Des. 85 (2010) 1102-1105.
- [6] T. Kanemura, et al., Fusion Eng. Des. 89 (2014) 1642-1647.
- [7] T. Kanemura, et al., Fusion Eng. Des. (2015), <http://dx.doi.org/10.1016/j.fusengdes.2015.06.060>