超音波流速分布計測法による液体金属流動計測*

(第1報, LBE ターゲットの流動計測)

大林 寛生^{*1}, 田坂 裕司^{*2}, 森 永聖人^{*1}
武田 靖^{*2}, 菊地 賢司^{*3}

Measurement of Liquid Metal Flow using Ultrasonic Velocity Profiler

(1st Report, Flow Measurement of LBE Target)

Hironari OBAYASHI^{*4}, Yuji TASAKA, Masato MORINAGA,
Yasushi TAKEDA and Kenji KIKUCHI

^{**4} Division of Mechanical Science, Graduate School of Engineering, Hokkaido University,
N 13 W 8, Kita-ku, Sapporo-shi, Hokkaido, 060-8628 Japan

Ultrasonic Velocity profiler (UVP) is a powerful tool to measure an instantaneous velocity profile especially on a velocity measurement of an opaque liquid flow, such as liquid metal. In this study, UVP is applied to a velocity field measurement of a fluid flow of Lead Bismuth Eutectic (LBE) in the Accelerator Drive System (ADS). At a lower temperature, wetting of LBE to stainless steel that is a material of target loop is too poor. We solved this problem by solder coating of the measurement window of the target loop. We performed velocity measurement on the centerline of the loop and confirmed basic performance of the loop. It was found that there was intermittent release of eddy from the re-circulation region formed on a wall surface of an inner cylinder and behind the edge. We made then a measurement for an angular direction of circumference around the central axis and observed 3-dimensional structure of LBE flow of the loop. From these results, we made clear that UVP is highly effective in a measurement of the flow field of liquid metal.

Key Words: Liquid Metal, LBE, Ultrasonic Velocity Profiler, Instantaneous Velocity Profile, Wetting

1. 結 論

ナトリウムや水銀などの液体金属は, その他の液体に比べて熱容量が非常に大きい, 高エネルギーを発生させる装置の冷媒として広く使用されている。しかしながら, 液体金属の挙動は非常に複雑であり, その影響を考慮した装置の設計, およびその制御は非常に困難である。液体金属の挙動を把握するためにはその流動場を詳しく知る必要があり, またその制御のためには, 従来のような温度変化の監視だけではなく, 瞬時流動場を常にモニタリングする必要がある。しかしながら, そのような手法は現在のところ実現されていない。また液体金属は, MHD や地球流体力学の基

礎的な研究に使用されている^{(1)~(4)}。磁場や熱, 回転など設定パラメータが多いこれらの研究分野では, 効率よくその流動場を計測できる手法の開発が望まれている。しかしながら液体金属は不透明であるため, LDA や PIV などの光学的な手法は使用できない。

液体金属の流動計測法としては, 例えば中性子を用いて液体金属内の気泡や粒子の運動を調べる方法^(5,6)などがある。これらの手法は基本的に流れ場の面計測であり, 得られる情報量も膨大である。しかしながら, 取扱の面から上記の目的にはそぐわない。そこで本研究では, 超音波バーストを用いた流速分布計測法 (Ultrasonic Velocity Profiler, UVP) ⁽⁷⁾ による, 種々の液体金属の流動場計測を行う。

UVP は流体の透明性を問わず, 瞬時速度分布の計測が可能であることから, 近年, 実験流体力学における有効な手法^(8,9)として, また流体力学における計測法^(10,11)として応用されている。UVP の特徴は, 大規模な装置や煩雑な操作, また計測結果を得るためのポ

* 原稿受付 2005 年 6 月 8 日。

^{*1} 北海道大学大学院工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8)。

^{*2} 正員, 北海道大学大学院工学研究科。

^{*3} 正員, 日本原子力研究開発機構東海研究所 (〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4)。

E-mail: oobayashi@ring-me.eng.hokudai.ac.jp

ストプロセッシングを必要としないことである。よって、補正を必要としない瞬時の速度分布であれば、リアルタイムでのモニタリングが可能である。これが他の流動場計測手法と一線を画す点である。さらに、測定速度範囲や測定速度成分の拡張を目的とした改良⁽¹⁴⁾⁽¹⁶⁾が行われており、不透明液体の流動場計測に関しては類を見ない非常に強力な手法である。このように、非常に利便性の高い UVP であるが、目に見えない超音波の特性上、使用に際しては種々の注意が必要となる。そこで本研究では、UVP を液体金属流動に適用する上での問題点を指摘し、その対処法を示す。

現在、日本原子力研究所で開発が進められている加速器駆動核変換装置（Accelerator Drive System, ADS）の核破砕ターゲットおよび未臨界炉の冷却材として、溶融鉛ビスマス（Lead Bismuth Eutectic, 以下 LBE と略記）を使用することが検討されている。しかしながら実用化にあたり、LBE による装置材料の腐食予測や伝熱特性の評価など課題は多く、またそれらを解決するためには LBE の流動状態を把握することが必要である。これまでに、高レイノルズ数と高ペクレ数を想定した伝熱特性の数値シミュレーションが行われてきたが、陽子ビーム入射窓の除熱設計に際し、伝熱特性が用いる計算モデルによって計算結果が異なるなどの問題が生じている。特に LBE が構造物と衝突して流れが乱れる箇所では、局所流れの把握無しに伝熱特性を評価することは困難である。このため、LBE の流動計測は不可避であるが、これまでにその計測を行った例は極めて少ない。その理由として、LBE の融点が 125℃ と高温であること、光学的計測が不可能な不透明流体であることなどが挙げられる。本報告では UVP を LBE の速度場計測に適用し、得られた結果について考察する。

2. UVP の測定原理

UVP は、超音波バーストを微小な反射体を含ん

だ流体中に照射し、返されるエコー信号を解析することで、瞬時の速度分布情報を時系列で獲得する手法である。得られる速度成分は、流れ場の速度ベクトルを測定線（超音波ビームの飛行方向）に投影した成分であり、これが測定線に沿って計測される。このとき、時刻 t における瞬時速度分布 $V(x, t)$ と測定位置 x は以下の式で決定される。

$$V(x, t) = \frac{c f_D}{2 f_0} \quad (1)$$

$$x = \frac{c \tau}{2} \quad (2)$$

ここで、 c は流体中の音速、 τ は超音波パルスの飛行時間、 f_0 は超音波パルスビームの基本周波数、 f_D はドップラーシフト周波数を表している。UVP における測定限界等の詳細は、文献⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾を示してここでは説明を省略する。

UVP による計測において注意すべき点として、計測線上に存在する気液または固液界面の状態が挙げられる。解析対象となる微粒子からの反射波に、そのような界面からの多重反射波など、想定外の強い反射波が重畳する場合、微小な反射体からの反射波に対する SN が悪くなり、得られる速度分布に影響を与える。結果として計測の正当性が保証されなくなるため、十分な注意が必要である。

3. ターゲット内部流動場計測の概要

計測対象となる核変換ターゲットモデルループ⁽¹⁷⁾ JAERI Lead Bismuth Loop-2 (JLBL-2) の概略を図 1 に示す。ループは円筒 2 重管となっており、内円筒の内径は 35.5 mm、外形 63 mm である。また、内円筒と外円筒の間隙 3 mm、全長は 1504.5 mm であり、重力方向に対して水平に設置されている。ループ中に満たされた流体は、円筒 2 重管の外部に取り付けられた電磁ポンプにより駆動され、円筒間の間隙を通過する。その後、湾曲した形状を持つ端部で合流・反転し、内円筒中に

Fig. 1 Experimental setup and schematic illustration of JLBL-2

逆向きの流れを形成する。実際のターゲットでは、この湾曲部を窓として陽子ビームを入射させるため、この付近の局所的な流動特性が除熱設計を行う上で非常に重要となる。材料の耐腐食性等を考慮して、ターゲットは主にステンレス製であり、ループインベントリー（タンク容量）は25 lとなっている。作動流体であるLBEの温度は、超音波トランスデューサの耐熱温度を考慮し、150℃とした。流量の監視には、原子力研究所により開発された新型の電磁流量計⁽⁸⁾を用いた。計測システムにはUVP Monitor model-Duo (Met-Flow社製)⁽⁹⁾を使用した。超音波バースト信号の送受信には、150℃の高温流動場においてあらかじめ耐熱実験の検証を行った、超音波トランスデューサ (Met-Flow社製)を用いた。トランスデューサの基本周波数は4 MHzであり、使用温度範囲は250℃以下となっている。LBEのタンク自由界面で巻き込まれる空気気泡を、流れをトレースする超音波の反射体として用いた。流動場計測は、仮想陽子ビーム窓部である、厚さ35 mmの湾曲したループ端部で行った。図2(a)は、窓部の正面図である。図のように、計測位置は窓部中央および窓部中央を中心とした半径14 mmの円弧上の、45°間隔の8点である。なお、図2(b)に示すように、超音波

Fig. 2 (a) Measuring position on the measurement window and (b) side view of the measurement part with measuring line

ビームの屈折などを考慮し、トランスデューサは窓部表面に対し、常に垂直となるように設置した。

電磁ポンプで流量を変化させ、窓部中央に固定したトランスデューサにより、それぞれの流速条件についてループ中心軸上の流れ方向速度分布を計測した。また流量を一定値とし、中心軸から14 mmの距離に配置した計8点の測定点において、中心軸周りの角度方向に対しての流動計測を行ない、ビーム窓部近傍における流れ場の3次元性を検討した。図2(b)に示すように、この場合の計測線はループの端部と中心軸を通過し、内円筒内壁に達する。また、周方向の各計測位置における計測線は対称関係にあるため、流動場の角度方向に対する評価が可能である。

4. 濡れ性および超音波の伝播

ADSの運用時において、LBEの温度は500℃に達することが想定されている。これに対し本研究では、前述のようにLBEの温度を150℃と比較的低温に設定している。この場合、融点付近の温度範囲においてLBEの表面張力が大きいため、ステンレス管壁面との濡れ性が不十分であることが予想される。このような不十分な濡れ性は、固体境界面での流れに対する条件を変えるだけではなく、UVPを使用する上で以下のような計測上の問題が発生する。

図3に、UVPによる流動場計測結果の一例を示す。分布は、窓部中央から計測した内円筒中心軸上の瞬時速度分布を平均して得られた、時間平均速度分布を示している。図の横軸は計測開始位置からの距離、縦軸は計測線方向の速度であり、トランスデューサから遠ざかる成分が正の値として表されている。測定された速度は、15 mm付近で急激に増加し、その後徐々に減少しているが、30および43

Fig. 3 Example of time averaged velocity profile on the center line of the inner cylinder

Fig. 4 Photograph of the ultrasonic echo from the LBE flow shown by an oscilloscope

mm 付近に、局所的な速度の落ち込みが見られる。これらの点において、速度はゼロ付近まで減少している。このような速度の落ち込みは、計測線が固体面に接触する際に生じるが、図2(b)に示されるように、計測線上にそのような固体面はなく、これらの速度の落ち込みは明らかに不自然である。

図4は計測中のオシロスコープの画面を撮影したものであり、瞬時速度分布の算出に用いた、流れ場からの超音波エコー信号の状態を表している。なお、画面左端の大きな振幅の波形は、流れ場に照射した超音波バースト信号を示している。図中に示した枠内の位置に、流れ場からのエコーと比較して大きな振幅を持つ信号が確認できる。超音波バーストの発射からこの信号が検出されるまでの時間を、LBE中の音速を用いて距離に換算したところ、計測結果において速度の落ち込みが見られた測定線上の距離、約30mmとほぼ一致した。すなわち、測定結果に現れた速度分布の落ち込みは、超音波エコー信号にこのような予期せぬ信号が含まれていた結果、算出されたものである。この異常な信号は、以下のような超音波の伝播により生じたと考える。装置内壁とLBEとの濡れが不十分な場合、トランスデューサから発射された超音波バーストの一部はループ内のLBEへ透過せず、曲面である窓部内壁面で反射した後ステンレス製の窓部を伝播し、図2(b)に示したフランジ部分で反射される。実際に、オシロスコープにより得られた信号の検出時間を、ステンレス中を伝播する縦波の音速(5790 m/s)を用いて距離に換算したところ、フランジの位置とほぼ一致する距離が得られた。

このような、濡れ性が不十分な場合のみならず、管壁等を介して作動流体と非接触で計測を行う場合、管壁材と作動流体との音響インピーダンスの違いから、流体中ではなく管壁を伝播する超音波の影響は

Fig. 5 Averaged velocity profile along the centerline of the inner cylinder, where conditions are: $U_1, U_2, U_3, U_4 = 0.25, 0.50, 0.75, 1.00$ m/s.

避けられない。よってそのような場合には、得られる速度分布とともに、オシロスコープなどにより超音波エコー信号をモニタリングし、その状態を常に観察することが重要である。なお本実験では濡れ性問題解決のため、計測部内壁面にLBEと比較的濡れ性の良いはんだによるコーティングを施し、常にその状態が維持されていることを確認するため、反射波の状態をオシロスコープで監視しながら計測を行った。また、ループを数時間駆動させた後、装置内壁に形成される鉛被膜の厚さは20 μ m以下になるため、ループ内部の流れを乱すことはないと考える。

5. 流動場計測結果

5.1 中心軸上速度分布 図5に、内円筒中心軸上での速度分布計測の結果を示す。図中の横軸は計測位置を表し、装置内壁端面を原点としたターゲット中心軸上の距離に対応している。また縦軸は、計測された速度分布の時間平均結果を表している。計測は、上流の環状部に設置された電磁流量計により計測される平均流速 U を、0.25, 0.50, 0.75, 1.00 m/sの4段階に変化させて行った。

すべての条件において、得られた速度分布は装置内壁端面から10mm付近までは速度ゼロの値を示している。計測開始位置、すなわちループ最端面近傍では外円筒からの流れが互いに衝突するため、その中心部では局所的なよどみ領域が形成されることが予想される。計測結果はこのようなよどみ域を表しており、その領域は中心部では壁面から10mm付近にまで及んでいる。このよどみ域の幅は、流量の増加に対して減少する傾向を示しているが、その減少率は非常に小さく、たとえ装置流量を増加させてもよどみ域の形成は避けられない。陽子ビーム入射時には、このよどみ点が除熱の妨げとなることが予想されるため、流量を増加させること以外の対策

が必要となる。なお一部の分布には、計測開始点近傍に大きな流速が見られるが、これは計測窓部内壁と LBE との境界面で発生する反射波によって引き起こされたものであり、実際の流れによるものではないと思われる。

よどみ域の下流では、速度分布は急激に増加した後に 25 mm 付近で最大値をとり、その後なだらかに減少している。U の増加に対し、速度分布の示す最大流速は比例関係にあるが、その後の減少は比例関係に無い。今回使用したループ形状の性質上、内円筒端部では管壁近傍に流れの再循環領域が形成される。この再循環領域の存在する箇所では主流方向の流れに縮流現象が生じるため、このような計測結果が得られたと考えられる。

5.2 流れの時空間変動特性 図 6 に、ある時刻における一連の瞬時速度分布を示す。これらは、計測開始から 3.675 s 後の 3 時刻にわたり測定されたものであり、各瞬時速度分布の時間間隔は 49 ms である。平均流量条件は $U=0.5 \text{ m/s}$ であり、図 5 に示した平均速度分布の、 U_2 の場合に相当する。

図 6 に示した各時刻の瞬時速度分布形状は、全体的には図 5 に示した平均速度分布と大きな差はない。しかしながら局所的には、平均速度分布には現れない、大きな速度の変化が見られる。例えば測定時間 3.675 s の分布では、図中に矢印で示すように 28 mm 付近に局所的な速度の落ち込みが確認できる。この速度の落ち込みは、この時刻の速度分布のみに現れること、また速度がゼロに達するような極端な落ち

Fig. 6 (a) Series of instantaneous velocity profile, (b) Enlarged figure of enclosed part in (a)

込みではないことから、図 3 で示したような予期せぬ反射波の干渉により生じたものではない。この速度の落ち込みの存在領域は極めて狭く、1~3 mm 程度である。また他の時刻の分布から分かるように、この領域は時間経過とともに主流方向へ移動している。3.1 節でも説明したように、内円筒端部では流れの方向が 90° 曲げられるため、管壁近傍に流れの再循環領域が形成される。上記の結果からこの速度の落ち込みは、その再循環領域から放出された渦によるものであると考える。また瞬時速度分布の計測結果から、このような渦放出は周期的ではなく、何らかの要因により非周期的に行われていることが分かる。陽子ビーム入射時の除熱を考えた場合、再循環領域の形成はその妨げとなるため、このような渦放出はむしろ歓迎すべきものである。流れに対して積極的に攪乱を与えることにより、このような渦放出を促進することで、除熱能力をさらに高めることができる。と考える。

5.3 速度分布の非軸対称性 ループが横置きであるため流れに働く重力が軸対称ではないこと、環状流路に対して一様に LBE を流すことが非常に困難であることなどから、陽子ビーム窓近傍や内円筒内においても流れが非軸対称性を有することが予想される。本実験ではこの非対称性を評価するため、図 2 に示したように窓部中心を取り囲む 8 本の計測線について速度分布計測を行った。計測結果を図 7 に示す。結果は、平均流速を示しており、(A)~(H) の各分布はそれぞれ、垂直下部から反時計回りに 45° ごとの測定結果を示している。なお、計測時の平均流速条件は $U=0.50 \text{ m/s}$ である。

得られた速度分布は、図 5 に示した内円筒中心軸上の速度分布と同様に、入射窓近傍に 10 mm 程度の長さの低流速域を有しており、5.1 節で示したよどみ領域が広範囲にわたって存在していることが分かる。この領域を経た後、速度は徐々に増加し内円筒中央(66 mm)よりも手前で最大値をとっている。なお、これらの速度分布計測は窓部中央よりも曲率の大きい面を通して行っているため、先に示した反射波の影響を受けやすく、図 7 に示す速度分布は中心部のものに比べてやや乱れた分布となっている。しかしながら、そのような乱れは局所的であり、流速分布の角度方向依存性を分布全体として評価することに対して大きな妨げにはならない。

ループ垂直断面の速度分布を示す、図 7 (A)と(E)の測定結果を比較すると、ループ上部側 (E) が下部側の (A) よりも高い流速を示しており、最大流速に

Fig. 7 Averaged velocity profiles measured around the centerline of the measurement window at even intervals of angle, where measurement position labeled with (A) to (G) are expressed in Figure 2(a) (velocity condition is 0.50 m/s), Position of the center of inner cylinder on the measurement line is 66 mm.

到達する位置に関しても(E)がより入射窓側に偏っている。このことから、LBEの流れには重力方向に偏りが存在し、5.1節で示したよどみ領域がループ下部方向に偏っていることが考えられる。更に(B)の分布に注目すると、入射窓近傍のよどみ域を

経た後の、速度の増加が他の分布に比べて緩やかであり、測定範囲内では極大値を持たないことが分かる。また(B)に隣接した(C)の分布は、分布形状が(B)と似ており、(B)の分布とその他の分布の中間形状であると見なせる。このことから、重力の影響に

加え、環状部での一様な流が実現されていないことなどにより、低流速のよどみ領域はループ右下部の(B)と(C)側に偏っており、LBEの流れがループ上部に偏っていることが予想される。

6. 結論

超音波流速分布計測法(UVP)を用いて、溶融鉛ビスマス(LBE)の流動計測を行った。速度データに欠損がある場合の速度分布と超音波エコーの波形を示し、液体金属流れの計測における問題点を示した。すなわち、液体金属は融点付近での表面張力が大きく濡れ性が非常に悪いいため、固体壁からの反射波の影響を受けやすい。そのため、超音波エコーの状態を常に観察する必要があることを指摘した。得られた速度分布を解析することにより、以下の結論を得た。

- (1) LBEが旋回・合流する陽子ビーム入射窓近傍には、広範囲にわたり10mm程度の幅のよどみ域が形成されており、この範囲は流量を増加させてもほとんど変化しない。
- (2) 内円筒管壁の近傍に形成される再循環領域からは、非定期的に小さな渦が放出されており、除熱効果を上げるためにはこのような渦放出を活発にさせる必要がある。
- (3) ループ内の流れには強い三次元性が存在し、流れはループ上部に偏っている。

これらの結果から、ループ内の流れをある程度予測することは可能である。しかしながら計測法の特性上、ループ内の流れ場全体を把握することは容易ではない。よって実際には、数値計算結果との比較によりその妥当性を確認し、それらの結果を相補的に用いることによりループ内の流動を評価する必要がある。

7. 謝辞

本研究の一部は、電源開発促進対策特別会計法に基づく文部科学省からの受託事業として、日本原子力研究所が実施した平成16年度「加速器駆動核変換システムの技術開発等」の成果です。

また、本研究の実験を遂行するに際し、助川電気工業(株)手塚正雄氏の協力を得たので、謹んで謝意を評します。

参考文献

- (1) Morley, N. B. and Burris, J., *Fusion Sci. Technol.*, **44-1**, (2003), pp.74-78.
- (2) Borgstedt, H. U., et al., *J. Nucl. Mater.*, **212/215**, (1994), pp.1501-1503.
- (3) Rossby, H. T., *J. Fluid Mech.*, **36**, (1969), pp.309-338.
- (4) Brito, D., et al., *Phys. of Earth & Planet. Int.*, **91**, (1995), pp.77-98.
- (5) Mishima, K. et al., *Nucl. Eng. Design*, **189**, (1999), pp.391-403.
- (6) Saito, Y., et al., *Appl. Radiation & Isotopes*, **61**, (2004), pp.667-674.
- (7) Takeda, Y., *Int. J. Heat Fluid Flow*, **7**, (1986), pp.313-318.
- (8) Takeda, Y., *J. Fluid Mech.*, **389**, (1999), pp.81-99.
- (9) Schouveiler, L., et al., *Exp. Fluids*, **26**, (1999), pp.179-187.
- (10) Mori, M., et al., *Exp. Fluids*, **32**, (2002), pp.153-160.
- (11) Ouriev, B., et al., *Meas. Sci. Technol.*, **14**, (2003), pp.1963-1972.
- (12) Ozaki, Y., et al., *Exp. Thermal Fluid Sci.*, **26**, (2004), pp.253-258.
- (13) Sandrin, L., Manneville, S. and Fink, M., *Appl. Phys. Lett.*, **78**, (2001) pp.120-124.
- (14) Ohbayashi, H., Takeda, Y. and Yamaguchi, K., *Proc. 4th Int. Symp. Ultrasonic Doppler Method on Fluid Mech. and Fluid Eng.*, (2004) pp.125-128.
- (15) Takeda, Y., *invited paper to JSME Int. Journal*, **B38**, (1995) pp.8-16.
- (16) 日本機械学会編, 熱流体力学の新しい計測法, (1998) pp.148-163.
- (17) 菊地賢司他, 特開 2002-148400, (2002).
- (18) 菊地賢司他, 特願 2004-232028 号, (2004).
- (19) Met-Flow SA, Lausanne, Switzerland, <http://www.met-flow.ch/>.