

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760147

研究課題名(和文) 高温環境における液体金属中の流速分布計測技術の研究

研究課題名(英文) Research of velocity measurement technique in high temperature liquid metal

## 研究代表者

大林 寛生 (Obayashi, Hironari)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門J-PARCセンター・研究員

研究者番号：40446464

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：高温環境における液体重金属流動場は、熱流動挙動および材料腐食の問題と密接に関連する。この流動場を評価・計測する技術を実現するため、音響伝播管センサユニットの研究開発を行った。信号透過挙動の材質依存性、容器壁面が信号透過に与える影響、媒体中へ透過した後の信号強度に関して予測計算と実験計測の両面から調べ、アルミニウムとステンレス鋼、クロムモリブデン鋼製のセンサユニットを試作した。また、試作したセンサユニットを実際の溶融鉛ビスマス流動場計測へ適用し、非接触方式で300 温度条件における流速分布計測に成功した。接触方式では800時間の間安定的な出力が得られ、長期計測へ適用できる見込みを得た。

研究成果の概要(英文)：The flow of high temperature heavy liquid metal is closely related to the problem of thermal-fluid behavior and material erosion/corrosion. In order to realize the velocity profile measurement technique, development of the ultrasonic sensor unit was performed. The experimental/analysis research has been performed for the transmission behavior of material dependence, the wall effect for signal transmission, the signal intensity in target medium. The developed sensor unit was successfully applied to the actual Pb-Bi flow measurement with the contactless method. And the prospect to a long-term operation was provided by the contact method with 800 hours experiment.

研究分野：流体工学、計測技術

キーワード：液体重金属 高温 超音波

## 1. 研究開始当初の背景

液体金属の流動は、原子力発電所に代表される高エネルギーを発生させる装置の冷媒や核破砕反応を用いた高強度中性子源、金属材料の生産過程や電磁流体力学発電、地球流体力学の基礎研究など、様々な分野に深い関係を持つ。流動する液体金属の挙動は、その物理的な性質によって複雑化しやすいため、最適な装置設計・制御、および安全管理には流動場の状態を詳細に調べる必要がある。

原子力機構では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, LBE) を用いた加速器駆動核変換システム (Accelerator Drive System, ADS) の研究開発を実施しており、このなかで、材料腐食の発生、装置伝熱特性の評価が課題とされており、これらと密に関連する LBE 流動特性の把握、腐食防止技術の確立、系の最適化が強く求められている。

液体金属流動に対し、これまでに数値解析を基に様々な研究が行われているが、実験的検証例が少なく、問題解決には未だ課題が多い。実験的検証が少ない大きな理由は、先に述べた流れの複雑性に加え、不透明である点が挙げられる。現在、流れ場の計測は、PIV をはじめとした光学的手法が主流であり、計測精度や得られる情報量の面から極めて有効な手法である。一方、計測に光を用いる特性上、不透明である液体金属や装置配管などの内部流れに直接適用することは不可能である。このため、流体の透明性を問わずに流れ場の計測を可能とする超音波計測技術の適用が盛んに行われている。

しかしながら、大半が比較的低い温度条件での実験計測であり、対象も液体金属の中では取り扱いの容易な水銀、ガリウムなどに限られる。本研究の成果が計測対象とする流れ場は 300 ~ 500 以上の温度条件における LBE 流動場であり、その局所速度場を計測した例は極めて少ない。本研究により得られる最も大きな成果は透明性を問わず「高温状態」にある流体の挙動を把握する技術の実現にあり、もたらされるデータは多岐に渡る分野に極めて有用なものとなり得る。

## 2. 研究の目的

本研究課題では、高温液体金属流動場を取り扱い、計測に用いる超音波計測技術について、これまでは計測が困難であった 300 以上の高温領域に適用できる技術の構築を目指した研究開発を実施した。具体的には、耐熱温度に限界のあるセンサ各構成要素の改良によるアプローチではなく、振動子の前面に「音響伝播管」を設置することにより、高温流体/容器表面からセンサに与えられる熱的負荷を軽減し、かつ両者間での超音波信号の効率的な輸送を実現するセンサユニットを開発した。

これにより、流動状態を考慮した最適な流路設計や装置制御が可能になると共に、近年

問題視されている装置材料腐食と液体金属流動との関連性解明に資するものである。

## 3. 研究の方法

本研究では、以下に示す課題項目を設定し、研究開発を実施した。

(1)音響伝播管を備えた高温対応型超音波センサの開発

センサユニットの設計検討

送信信号の基本周波数、送信波数、伝播管および装置壁面材質をパラメータとして、波動方程式等を用いた数値計算により、振動子から計測媒体へ透過する超音波信号の伝播挙動を調べる。

伝播信号の計測試験

(1) で得られたデータを基に、センサユニットを試作する。計測時の可搬性を考慮し、伝播管の形状は直径 5 ~ 20mm、長さは 50 ~ 100 mm の範囲で試作し、常温 (100 以下) 条件において、伝播管前面から計測媒体へ照射される超音波信号の透過率や信号強度、ビーム径を調べ、予測数値計算との比較検証を行う。また、高温条件 (100 ~ 300 ) におけるセンサユニットの適用性を確認するため、LBE で満たされた容器内に移動式のタンゲステン板 (厚さ 2.5mm) を設置し、容器外壁から照射された信号の反射エコーから位置検出の精度を調べる。

(2)液体金属流動場への適用

配管外部からの非接触計測

(1)で得られた課題や知見を基に、試作センサユニットを改良し、実際の LBE 流動場計測へ適用する。既存の LBE ループ試験部配管外壁にセンサユニットを設置し、配管内部の流速計測を行う。

配管部挿入状態での伝播管接触計測

LBE と鋼材表面との濡れ性が十分でない場合、(2) で行う完全非接触計測の方式では両者の境界面で大半の信号が反射されてしまい、計測が不可能となる。このため、伝播管を液浸させた状態での流速計測を行い、(2) を通じて本研究課題で開発した超音波センサユニットの適用性を調べる。

## 4. 研究成果

(1)音響伝播管を備えた高温対応型超音波センサの開発

センサユニットの設計検討

流動計測には振動子から発振される縦波の超音波信号を使用する。一方、本研究では振動子前面に音響伝播管を設置するため、固体伝播管中を伝わる過程において、境界面での反射散乱、横波へのモード変化等の影響を受ける。固体中の信号挙動を実験的に計測することは困難であるため、本項目では波動方程式を用いた予測計算により、伝播管の材質、形状等を評価した。

送信信号の周波数を 4MHz、振動子直径を 5mm とし、各材質の厚さ方向に対する信号透過率を図 1 に示す。材質ごとの信号波長を

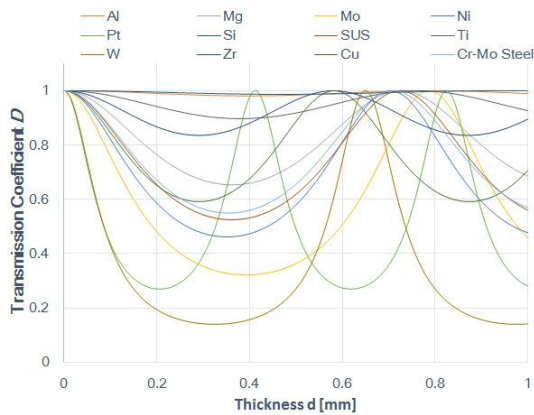


図1 各材質の厚さ方向に対する信号透過率

$\lambda$ とした場合、厚さが  $1/2\lambda n$  の際に最大の透過率が得られることがわかった。また、厚さ  $\lambda$  における平均透過率は、音響インピーダンス ( $Z$ ) の値が LBE ( $Z=19.6\text{MRayl}$ ) と近い Al ( $Z=17.1\text{MRayl}$ , 99%) の他、Si ( $Z=17.46\text{MRayl}$ , 99.4%) が最も高く、反対に値が大きく異なる Pt ( $Z=69.96$ , 52%) や W ( $Z=100.9\text{MRayl}$ , 32.7%) が最も低い結果となった。伝播管先端部に容器外壁 (SUS316、厚さ 2mm) を設置した 2次元解析では、Al、Si 共に 30%程度 の透過率へ減少することが明らかになった。これは、伝播管/容器外壁材質の音響インピーダンスの差による影響の他、主として伝播管側面で生じる信号の乱反射による影響が大きく、伝播管の径の一部を 15mm 以上とすることで 5~6%改善される結果が得られた。一方、容器と同じ SUS316 を用いた場合では、Al、Si と同程度の透過率が得られており、非接触で計測する場合に適用可能であることがわかった。

#### 伝播信号の計測試験

LBE 中を伝播する信号の挙動を実験的に計測することは、温度条件、濡れ性の他に専用の計測機器開発が必要であり、極めて難しい。このため、伝播先の媒体に水やシリコンオイルを用い、信号の透過率、強度、ビーム径について予測計算結果と実験計測結果の比較を行った。

垂直入射時と、模擬体表面に対し伝播管を  $5^\circ$  傾斜させた条件において、予測計算とほぼ同様の結果が得られたが、傾斜条件では約 15%まで著しく透過率が減少する結果となった。この原因として、傾斜により生じた間隙で発生する信号の多重反射が挙げられる。このため、実流動場への適用に際しては、試験部配管とセンサユニットを密着させる構造を持つ専用治具を設置して対応した。信号伝播経路上の信号強度および伝播管前面に形成される超音波ビーム径を調べた結果の一例を図 2、3 に示す。それぞれの結果は送信信号周波数が 4MHz、計測媒体を常温水 (20一定) とした場合の計測結果である。どちらの結果についても計算結果とほぼ一致しており、予測計算が正しいことが確認された。

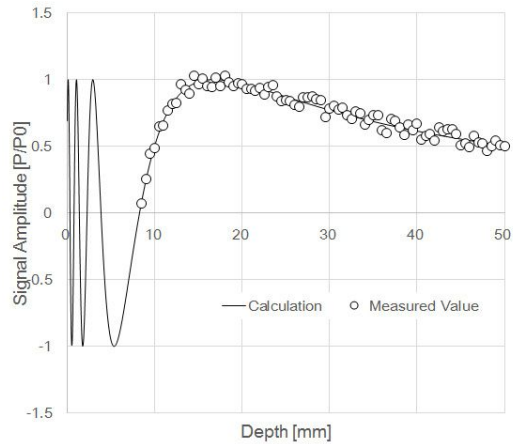


図2 伝播経路上の信号強度計測試験結果

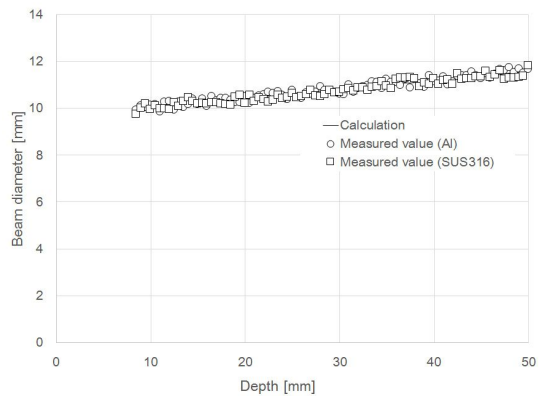


図3 ビーム径計測試験結果

また、実流動場での計測時において重要となる媒体中での計測位置の検出精度について評価するため、LBEで満たした小型のSUS容器内に移動式のタングステン板を設置し、反射エコー発生箇所の位置検出試験を行った。この結果、送信された信号長 (約 0.8mm) に対して 1/10 以下の精度で検出することが可能であり、LBE 中での計測位置検出に問題がないことが確認できた。

#### (2)液体金属流動場への適用

##### 配管外部からの非接触計測

本項目では、開発したセンサユニットを既存の LBE ループへ設置し、計測試験を実施した。試験時の計測条件を表 1 に示す。

表1 流動場計測試験条件

温度条件	300
循環流量	40l/min
試験配管材質	SUS316
試験配管径	42.7mm
送受信信号周波数	4MHz
信号反射粒子	Ar ガスバブル

伝播管は Al、SUS316 製のものを使用した。試験配管内壁には LBE との濡れ性を改善するため、Ni 鍍金 (公称厚さ=20 $\mu\text{m}$ ) 処置を施した。しかしながら、試験開始当初は濡れ性が改善されておらず、速度場計測が不可能な状

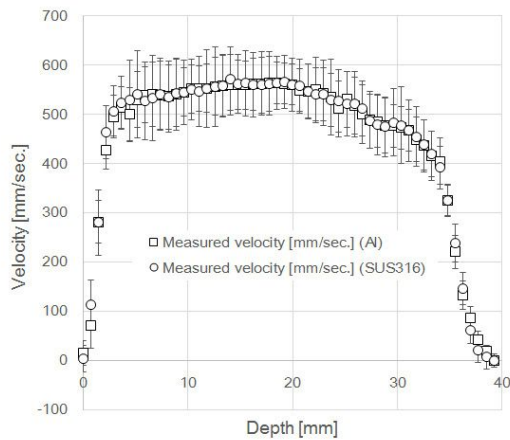


図4 LBE 中での速度分布計測試験結果

態であった。その後、500 時間の連続循環運転によって濡れ性が改善されたため、得られた計測結果を図4に示す。体積流量から算出される平均流速は約0.54m/sであり、ほぼ一致する結果が得られると共に、計測後のセンサユニット破損等も無く、本手法により300 条件でのLBE 中の速度場計測に成功した。一方、手前側と奥行き方向の速度分布が非対称となっている上に、計測深さ方向27~29mm の位置で若干遅い流速が計測されている。これは、深さ方向での信号の減衰の他に、計測領域に対して信号反射粒子が一樣に懸濁されていないことが原因であると考えられる。

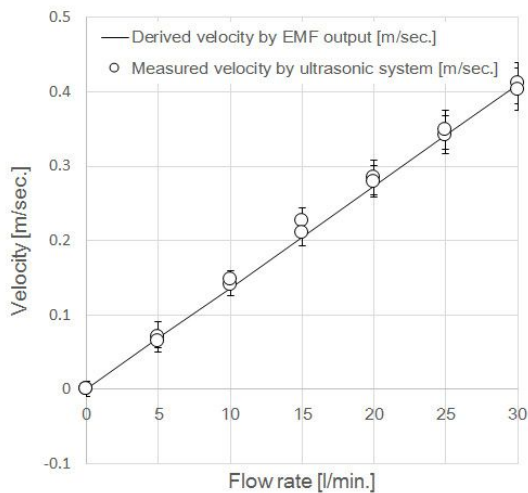


図5 液浸計測時の電磁流量計との比較試験結果

#### 配管部挿入状態での伝播管接触計測

LBE 循環システムの運用において、従来は電磁流量計による流量/流速監視が主体であった。しかしながら、長期間の運用において、検出部の濡れ性や腐食による損耗に起因すると考えられる出力不安定性が問題となっており、長期間安定的にLBE 流動を監視可能である計測技術の開発が必要である。

このため、超音波を用いた流動計測技術のLBE に対する適用性を評価するため、非接触

計測試験の他に、センサユニットを液浸した状態での計測試験を行った。伝播管とLBE との濡れ性を考慮し、伝播管材質には良好な濡れ性が得られる高クロム鋼を採用した。図5 に電磁流量計と比較した結果を示す。各流量条件に対し、計測された流速値が最大誤差10%で一致する結果が得られた。また、温度条件200 時における長期間の計測時(図6)においても、800 時間の期間中、最大約3%の誤差で安定的な出力が得られた。電磁流量計との比較試験に対して長期試験の誤差が減少している理由としては、比較試験では十分程度の短時間で流量を変更して試験を行っており、システム内の流れが安定していない状態で計測した結果であると考えられる。また、通常の流量計測技術のフルスケール誤差に対し、同等以下の誤差で計測されていることから、LBE 系統の循環監視に対し、超音波計測技術が適用可能であることが明らかとなった。

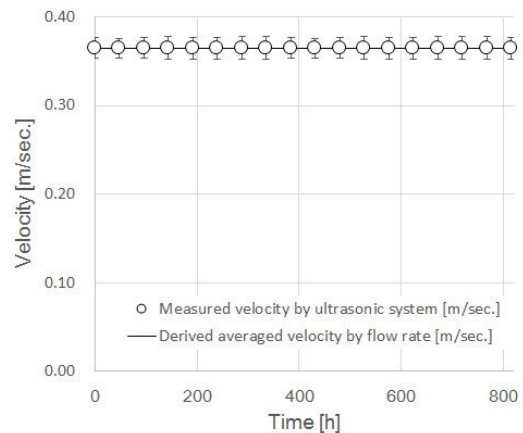


図6 液浸状態での長期間計測試験結果

総括として、予測計算と実験計測の両面から超音波信号の挙動を調べ、計測媒体に対して効率的に信号を輸送する音響伝播管を備えた超音波センサユニットを試作することができた。また、試作ユニットを実際の流動場計測へ適用し、従来のセンサでは計測が困難であった300 の温度条件におけるLBE 中の非接触速度場計測に成功し、液浸状態での計測結果から、精度良く長期間安定して循環運転を監視することができる貴重な成果が得られた。一方で、LBE 中での流動場計測には濡れ性の根本的な改善の他、如何に一樣に反射体粒子を懸濁させるかという課題が残されている。今後は本研究で得られた成果を基に、これらの課題解決に取り組むと共に、液体重金属流動の熱流動解析手法の精度向上に資するデータを取得していくことが重要である。

#### <引用文献>

- Takeda, et al., Nuclear Tech., 1987
- D.Brito, et al., Exp. In Fluids, 2001
- S.Eckert, Exp. In Fluids, 2003

D.P.Lathrop, et al., Chaos, 2005

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計1件)

H.Obayashi, K.Yamaguchi, S.Saito,  
T.Sugawara, H.Takei, T.Sasa,  
“Elemental Technologies for  
Lead-Bismuth Spallation Target  
System in J-PARC”, OECD/NEA  
Actinide and Fission Product  
Partitioning and Transmutation 13th  
Information Exchange Meeting, 23 Sep.  
2014, Seoul (Korea)

〔図書〕(計0件)

6. 研究組織

(1)研究代表者

大林 寛生 (OBAYASHI, Hironari)  
独立行政法人日本原子力研究開発機構  
原子力科学研究部門 J-PARC センター  
研究員  
研究者番号：40446464