

令和元年5月10日現在

機関番号：14401
研究種目：若手研究(B)
研究期間：2016～2018
課題番号：16K18334
研究課題名(和文)液体金属リチウム鉛の電磁流体伝熱機構の解明と制御

研究課題名(英文)Heat Transfer and Control of Lead-Lithium Flows

研究代表者
植木 祥高(UEKI, YOSHITAKA)

大阪大学・工学研究科・助教

研究者番号：50731957
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：核融合エネルギーは次世代動力源に利用すべく研究開発が進められている。核融合エネルギーの取り出しにはブランケットと呼ばれる伝熱機器が使用され、工学設計の確立が重要である。炉内に使用される冷却材には高温液体金属を使用することが検討されており、液体金属の熱流動場の把握というのはブランケット設計において不可欠な知見である。本研究において液体金属の流れを計測すべく、超音波ドップラー流速分布計測法に着目し、測定に不可欠な環境と条件について調査を行った。結果、超音波プローブ接液材に対する液体金属の濡れ性や化学反応が超音波の界面伝達挙動に著しい影響を与えていることを明らかにし、測定の高高度化に繋がる知見を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義
高温状態の液体金属の流動計測には、光学的手法が適用できないため、超音波計測が有用である。本研究においては核融合炉に使用が見込まれている高温液体金属を対象として、超音波計測手法の高高度化に向けた知見を得て、核融合炉の研究開発に貢献したことに社会的な意義を有する。また、高温液体金属の界面における超音波伝達挙動については、濡れ性や界面状態に大きく依存するが、高温液体金属は化学反応を伴うこともあり、その現象は複雑なものとなる。本研究において超音波伝達挙動を酸化反応に伴う濡れ性の変化の観点から調査したことが学術的意義として挙げられる。

研究成果の概要(英文)：Nuclear fusion energy is considered a future energy source and its R&D has been performed. A heat removal component, called a blanket, is planned to be employed in fusion reactors. Establishing a design of blankets is important. In the fusion reactors, liquid metals have been considered coolants. Comprehension of liquid metal flows and their heat transfer is necessary for the blanket design. Based on the background, in the present study, an ultrasonic flow measurement technique, ultrasonic Doppler velocimetry, had been focused on and investigated to clarify what environment and conditions were inevitable for the stable ultrasonic measurement. As results, liquid metal wettability and chemical reactivity to a solid material of the ultrasonic probe significantly influenced the ultrasonic transmission at the material interface and then the flow measurement. Those knowledge is going to help to stabilize and to improve the measurement instrumentation and technique.

研究分野：核融合学

キーワード：高温液体金属 超音波計測 濡れ性 界面現象 流動計測 超音波

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

将来のエネルギー源として国際熱核融合実験炉 (ITER) を中心とし核融合炉の研究開発が国内外問わず行われている。商業の核融合炉を継続的に運用するには、燃料となる三重水素 (トリチウム) を炉内において増殖する必要がある。トリチウムを増殖する材料を用いる形態として、液相にて用いる設計案が提案されている。トリチウム増殖材に液体金属を使用することが検討されている。液体材料を使用することで、伝熱媒体として兼ねることも可能となり、機器構造の簡素化が可能となるなど利点を有している。核融合炉において、トリチウム増殖、エネルギー変換機能、それに加え、放射線遮蔽機能を持たせた機器はブランケットと呼ばれ、核融合反応が起きる領域を取り囲んで配置される。前述のトリチウム増殖材を液相で使用するものは液体ブランケットと呼ばれ、先進的なブランケット設計案である。液体増殖材として使用されるものは、核変換してトリチウムに変換する元素であるリチウムを含む必要があり、リチウム鉛 (リチウムと鉛の合金) が挙げられる。

液体金属の熱流動場の把握はブランケット設計を確立するにあたり不可欠な知見である。しかしながら、高温液体金属は不透明流体であるため、流れ場を実験的に把握するにも光計測手法が適用できないことや高い化学反応性も伴い、核融合炉熱流動に関する実験的知見が不足している。

2. 研究の目的

上記の背景を受け、本研究において高温液体金属リチウム鉛の流動を計測すべく、超音波ドップラー流速分布計測法に着目し、核融合炉と同様の物理条件においても適用可能な流れ場計測手法の確立と高度化を行い、それを通じて熱流動現象把握に向けた基盤を構築することとした。

3. 研究の方法

(1) 先行研究において不活性グローブボックス内にて実施する比較的小規模な実験体系における計測例が報告されている。これら実験体系はリチウム鉛からの反射超音波信号の確認には適していたものの、回転円盤により駆動した旋回流という複雑な流れ場を対象としたため、定量的な計測精度に適していなかった。このような背景から、本研究においては超音波ドップラー流速分布計測法をリチウム鉛流れに適用した際の計測性能を評価すべく、単純流れ場である発達した円管流れの計測実験を行った。

核融合科学研究所が所有する熱・物質流動ループ装置 (Oroshhi-2) のリチウム鉛流動ループを用いた。Oroshhi-2 ループに図 1 に示す円管試験部を接続して試験した。円管試験部の主たる部分は、内径 41.2 mm、長さ 1900 mm の SUS304 製の円形直管としており、Oroshhi-2 ループには拡大管、縮流管や曲がり管を介してフランジにより接続されている。リチウム鉛の圧力測定を目的に、耐熱性の圧力センサーを主円管の上流側と下流側にそれぞれ設置した。上流側の圧力センサーと後流側に設置している超音波トランスデューサの取り付け位置の距離は円管内径の 40 倍以上として、流速分布測定領域において流れ場が十分発達するようにした。

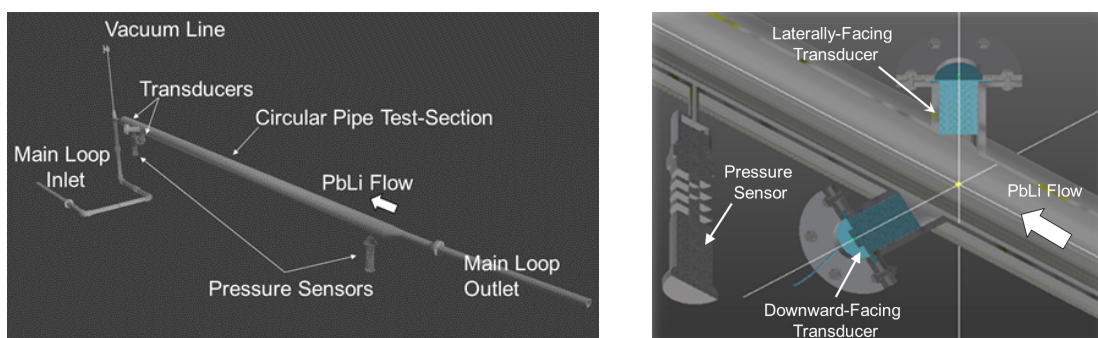


図 1 Schematic drawing of test-section; (left) overview; (right) Transducer region.

(2) 酸化物粒子が十分量含まれていると考えられるリチウム鉛と酸化物粒子が不足していると推察される高純度のリチウム鉛を用いて計測に充分な超音波伝達や反射を実現する方法と条件を調査した。リチウム鉛は酸素との活性が高いため不活性ガスを充填したグローブボックス環境下にて実験を行った。本実験に用いる 2 種類のリチウム鉛の一つに既成品を用いた。これは大気中で合成しているため多量の酸化物粒子が残存している。一方は流動ループと同等の高純度のリチウム鉛である。高純度リチウム鉛はグローブボックス環境下で合成を行い、酸化物粒子が微量であると推察される。図 2 (左) に実験の概略を示す。300°C のリチウム鉛を満たした容器に超音波プローブを導入・固定した。超音波がリチウム鉛に伝達された場合は、図 2 (中央) に示す容器底面からの反射波が確認される。このように反射波を計測評価することに

よりプローブ端面における良好な超音波伝達状態を達成するためのプローブのリチウム鉛への最適な導入条件を調査した。

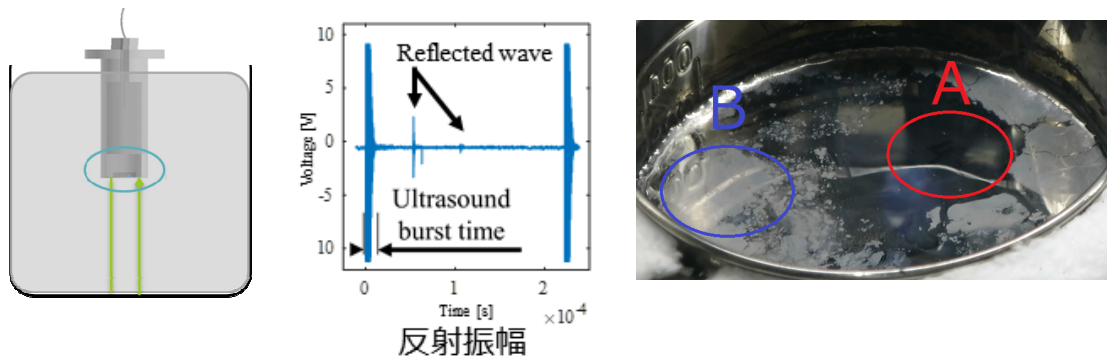


図2 Experimental set-up (left); Waveform of reflected wave (center); Photograph of molten PbLi (right).

(3) 超音波ドップラー流速分布計測に必須の高温液体金属界面における超音波透過性について調査を行った。リチウム鉛は酸素をはじめとして種々の物質に対し化学活性を有する高温の液体金属である。化学反応を伴う界面現象が超音波計測にも影響することがこれまでの研究により明らかとなっている。還元力の異なる液体金属錫と錫鉛合金(図3参照)を対照試料として超音波透過性能を評価し、高温液体金属の濡れ性と関係する界面状態と超音波透過の関係性について調査することとした。本試験は不活性グローブボックス内部にて試験した。

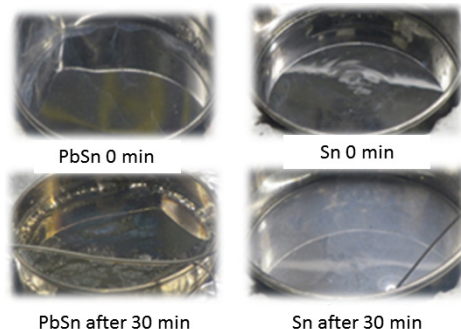


図3 Photographs of PbSn and Sn free surface.

4. 研究成果

(1) 流速の測定値が理論解の予測値と比較して低い結果となった。この原因としては、リチウム鉛に含有しているトレーサー粒子の数密度が本ループにおいて不足していることが推察される。この要因としては、本ループで用いたリチウム鉛は高純度素材を極低酸素環境にて合成したものである一方、先行研究にて用いられたリチウム鉛は大気中で合成されており、トレーサー粒子となる酸化物粒子の含有量が異なることに起因していると推察される。また、リチウム鉛の流量の増減に応じて、測定流速分布の絶対値が増減したことから、トレーサー粒子の数密度は不足しているもののトレーサー粒子からの反射超音波信号自体は受信されていることが確認され、測定対象流体であるリチウム鉛への超音波伝達は良好であったことが示唆される。トレーサー粒子の数密度の不足による計測値が実際よりも低くなる原因であるが、今回用いた計測器はドップラー周波数の評価に時間領域アルゴリズムを使用しているが、トレーサー粒子の不足によりドップラーシフト受信の欠落が存在する場合に評価可能なデータ点が不足することに起因して、ドップラー周波数の過小評価に至ったと考えられる。

(2) 本研究により容器底面からの反射波を捉えるにはプローブをリチウム鉛に導入する前に液温以上に昇温する必要があることが明らかとなった。この原因として、リチウム鉛の液温以下の状態でプローブを導入することで、冷温部にリチウム鉛中の酸化物粒子が凝集するコールドトラップが生じ、超音波の伝達を妨げていると推察される。次に、プローブ導入時に自由界面に凝集している酸化物粒子の付着を避ける必要があることを明らかとなった。図2(右)はリチウム鉛表面の酸化物の除去を十分に行った後のプローブ導入直前の熔融リチウム鉛自由液面を示す。Aを金属光沢の見える部分、Bを酸化物微粒子が浮遊している部分とし、2箇所からのプローブ導入による反射波の違いの比較を行った。その結果、部分Bから導入した場合、反射波の確認はできなかった。極微量の微粒子であってもプローブ端面に付着すると端面の表面状態が変化し、超音波がリチウム鉛に伝達するのを阻害したと推察される。

長時間リチウム鉛に浸漬する場合にもプローブ端面の表面状態が変化し、超音波伝達性が変

化することが明らかとなった。繰り返し実験の後にプローブ端面における超音波伝達性の悪化が確認された。リチウム鉛を溶解する酢酸試薬を用いて実験後にプローブ端面を洗浄していたが、酢酸試薬には溶解しない化合物の薄層が形成されていた。端面はリチウム鉛と濡れが良く音響結合性の良い純チタンを用いているが、XPS による表面分析を行うことで、リチウム鉛と接液したチタンがチタン酸化物に変化したことを確認した。薄層であってもチタン酸化物がプローブ端面における超音波伝達を悪化させていることが推察される。また、本研究では表面研磨を行うことによりチタン酸化物を取り除く事が可能であることを実証した。表面研磨によりチタン酸化物を除去し界面における良好な超音波伝達を回復することにより、流速分布の計測が可能となることが今回の結果より考えられる。超音波ドップラー流速分布計測を実施するために必要な条件が明らかとなった。

(3) 図4 (左) に各液体金属における超音波入射振幅に対する、ステンレス鋼表面にて反射の後に液体金属 - チタン界面を透過した振幅割合の時間変化を示す。錫鉛合金及び錫では計測振幅が増大することが確認されたことに比べリチウム鉛では計測振幅が変化しなかった。これまでの知見より湿度濃度を今後低下させることで超音波透過増大が予想される。しかしながら、リチウム鉛が接液直後から比較的高い超音波透過割合を示したのは、予め自発的に形成された超音波プローブ表面上のチタン酸化膜層は高温液体金属との濡れ性が悪いことに起因して界面における超音波透過を阻害するが、リチウムにより接液後短時間に還元消失したためだと推察する。その一方、リチウム鉛におけるチタンの溶解度が低いためチタンの溶出が生じにくく超音波振幅の増大が24時間では確認されなかったと示唆される。図4 (右) に熔融錫に浸漬したチタン試験片のSEM/EDX結果を示す。相界面においてチタンの錫への溶出が確認でき、錫及び錫鉛合金における超音波透過強度の増大と相関すると考えられる。以上から超音波透過界面の形成には、(I)液体金属内でチタン酸化膜が除去され透過が生じる、(II)チタンが液体金属に溶出し音響特性が向上するという2段階の過程が存在することが示唆された。本研究により固液界面における超音波透過機構の詳細が明らかにした。高温液体金属を対象とした際に不可欠となる超音波ドップラー流速分布計測に求められる環境と条件に関する知見が整理された。

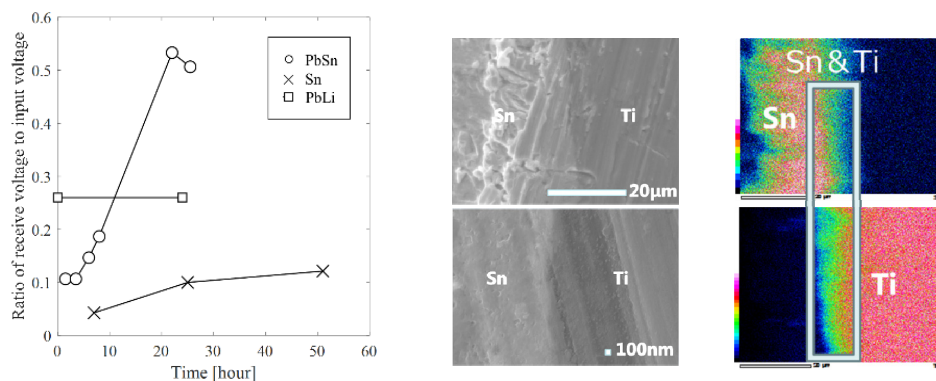


図4 Time change in transmitted ultrasound amplitude (left); SEM & EDX analysis of cross-section of Sn-immersed Ti specimen (right).

(4) 新たに高温液体金属と音響結合性の高い候補材を選定し評価を行なった。本研究の結果から、既存品と比較して一層適合性の高い材料を超音波プローブの接液材として使用することにより、リチウム鉛流動ループ環境においても超音波ドップラー流速分布計測を高感度化・高安定化することが可能であると考えられる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Y. Ueki, Y. Noguchi, J. Yagi, T. Tanaka, T. Yokomine, M. Hirabayashi, K. Ara, T. Kunugi, A. Sagara, “Ultrasonic Doppler Velocimetry Experiment of Lead-Lithium Flow with Oroshhi-2 Loop”, Fusion Science and Technology, 72(3), pp. 530-536 (2017). (査読有)
<https://doi.org/10.1080/15361055.2017.1330636>
- ② 植木祥高, 「リチウム鉛流れのUVP計測と核融合炉工学研究(特集 UVPによる流体の可視化)」, 可視化情報学会誌, Vol.36, No.142, pp.16-20, (2016). (査読無)
https://doi.org/10.3154/jvs.36.142_16

[学会発表] (計 7 件)

- ① Y. Ueki, Y. Noguchi, M. Shibahara, “Qualification Experiment of Ultrasonic Doppler Velocimetry of Lead-Lithium Flow,” 11th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing (PSFVIP-11), 2017.
- ② Y. Ueki, Y. Noguchi, J. Yagi, M. Hirabayashi, M. Shibahara, K. Ara, T. Kunugi, A. Sagara, “Ultrasonic Doppler Velocimetry Experiment of High Temperature Liquid Metal Lead-lithium,” 1st Asian Conference on Thermal Sciences (ACTS2017), 2017.
- ③ Y. Ueki, Y. Noguchi, J. Yagi, T. Tanaka, T. Yokomine, M. Hirabayashi, K. Ara, T. Kunugi, A. Sagara, “Ultrasonic Doppler Velocimetry Experiment of Lead-Lithium Flow”, 10th International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering (ISUD10), 2016.
- ④ Y. Ueki, Y. Noguchi, J. Yagi, T. Tanaka, T. Yokomine, M. Hirabayashi, K. Ara, T. Kunugi, A. Sagara, “Ultrasonic Doppler Velocimetry Experiment of Lead-Lithium Flow with Oroshhi-2 Loop”, 22nd Topical Meeting on the Technology of Fusion Energy (TOFE), 2016.
- ⑤ 植木祥高, 野口雄矢, 芝原正彦, 八木重郎, 田中照也, 相良明男, 「高温液体金属界面の音響特性」, 第12回核融合エネルギー連合講演会, 2018年.
- ⑥ 野口雄矢, 植木祥高, 八木重郎, 芝原正彦, 相良明男, 「PbLi 流れのUDV 計測条件に関する基礎的研究」, 日本機械学会関西支部第92期定時総会講演会, 2017年.
- ⑦ 植木祥高, 野口雄矢, 八木重郎, 田中照也, 横峯健彦, 平林勝, 荒邦章, 功刀資彰, 相良明男, 「PbLi 流動ループ Oroshhi-2 における超音波ドップラー流速計測」, 第44回可視化情報シンポジウム, 2016年.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

該当なし

〔その他〕

researchmap (植木 祥高)

<https://researchmap.jp/yoshitakaueki18/>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

該当なし.

(2) 研究協力者

該当なし.