The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	液体金属リチウム噴流の表面変動特性と制御に関する研究
Author(s)	沖田, 隆文
Citation	大阪大学, 2022, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/87750
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

様式３

論　文　内　容　の　要　旨

氏　名　（　　沖田　隆文　　）	
論文題名	液体金属リチウム噴流の表面変動特性と制御に関する研究

論文内容の要旨

液体金属は高熱伝導率・常圧で広い液相温度範囲を持つといった特徴から、次世代原子力エネルギーシステムの伝熱材料として注目されている。その中でも液体リチウム（Li）は上記の特徴に加え、重陽子や陽子などのイオンビームの照射を受けると中性子を発生させるという核物理的性質から、加速器駆動型の中性子源においてビームターゲットとして用いられる。国際核融合材料照射施設（IFMIF）を始めとした加速器駆動型中性子源では、重陽子とLiによる核破砕反応が用いられ、その熱的・放射化学的要求から高速噴流のターゲット開発が進められている。核融合材料試験以外の副次的な利用も計画されており、中性子利用の機会の拡大にも繋がる。本論文は、Liターゲットの自由表面噴流の変動特性の解明を目指し、液体Liの流動実験及び数値流体シミュレーションを実施した。また、磁場印加で生じるMHD効果のLi噴流に対する効果を解明するべく検証実験を実施した。

第一章においては、背景として、核融合中性子源や磁場閉込め型核融合炉のブランケットといった液体Liの工学的適用例及びこれまで実施されたLiの流動に関する既往研究について記述し、その後研究の目的を記述した。

第二章においては、実験に使用した大阪大学液体Li循環装置について詳述した。また、流動特性の把握のために実施された表面変動計測及び表面流速計測の用いた機器及び手法について記述した。

第三章においては、実施した液体Li自由表面変動の計測について記述した。電気接触式液面計と光コム距離計の2種の計器を使用、前者による計測結果から、流速の増加と流下に伴う表面波の発達の様子を得た上で、その波高の増加傾向は流速や計測位置といったパラメータに対して線形では無いことを明らかにした。また接触式計測手法であるがゆえに電気接触式液面計の検出精度の評価が必須である。特に、高流速条件においては計測針上にLi液滴が生成、その液滴は計測時間中にも落下と生成を繰り返す。この落下による誤接触信号の影響の評価を実施し、噴流平均厚さを算出するための接触頻度分布に対して十分に小さいことを明らかにした。また光コム距離計を用いた非接触式計測手法との比較を行うことで、接触現象に起因して最大波高が過大・過小評価されていること、接触針の針先径と同スケール以下の波高を持つ波が検出されていないことも明らかにした。加えて、光コム距離計を用いて接触式計測手法ではできなかったビーム照射領域の後流を含めたより広い範囲での同一オペレーション計測を実施した。噴流厚さや波高の大幅な増幅と、その増幅傾向に変曲点があることを明らかにしたが、その位置はノズル角及び側壁から発生する定在波の航跡予測から、その定在波の合流の影響を受けていると考えられた。

第四章においては、大阪大学液体Li循環装置の噴流試験部、及び計測針上に発生するLi液滴をモデル化して実施した流体シミュレーションの結果について記述した。ノズル内部のシミュレーションにより、15 m/s以上でノズル内壁近傍にゲルトラー渦と呼ばれる縦渦が発生することを明らかにし、ノズル吐出後の自由表面下にその影響が伝播することを明らかにした。ノズルエッジに生じている縞状の損傷痕と渦のスケールが一致していたことから、この損傷は長時間流動による流動加速腐食による可能性が高いことを示唆した。また液滴の挙動シミュレーションの結果、アルゴン相の流速やLi液滴の温度によって液滴の挙動が大きく左右されることを明らかにした。

第五章においては、磁場印加によるLi噴流の表面変動の抑制手法、及びその応用として電磁流量計の原理に着眼した自由表面噴流の直接流速計測手法に関する実証実験の結果について記述した。撮影画像の輝度の確率密度分布と既往研究による表面傾斜角と波高の分布、及び表面変動計測結果の3つの比較から、磁場印加による表面平滑化の可能性を示した。また、後者の実証実験では、設定流速の増加に伴う出力電力の線形性を確認できたことから、本原理で液体Li自由表面噴流の流速計測が可能であることを実証した。しかしながら、種々の装置の制約から今回の結果には課題もあり、実際の使用に際しては、より高精度な校正と磁場パラメータの最適化が必要であることも併せて示した。

第六章にて本研究についての結言を記述した。

様式 7

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名　（　沖田　隆文　）		
論文審査担当者	（職）	氏　名
	主 査　准教授	帆足　英二
	副 査　教授	村田　勲
	副 査　教授	佐藤　文信

論文審査の結果の要旨

本研究は、加速器駆動型中性子源の液体 Li ターゲット開発に資することを目的に、大阪大学が保有する大型の液体 Li 循環装置を用いて表面変動の計測を実施、接触式計測手法と非接触計測手法の両方を実証、さらに精度検証を行うことで Li 噴流の流動特性を明らかにするものである。加えて、数値流体シミュレーションを駆使し、不可視な液体金属である Li 噴流内部の詳細な渦構造と、それが表面変動とどのように相関しているかを明らかにするとともに、磁場を用いた実験を行うことで改良・応用技術を提案するものである。本論文は 6 章で構成されている。

1 章では、液体金属は高熱伝導率・常圧で広い液相温度範囲を持つといった特徴から次世代原子力エネルギーシステムの伝熱材料として注目されていること、その中で Li が中性子源のターゲットや核融合炉における液体金属機器（ブランケット、ダイバータ）での使用が検討されており、工学的な応用範囲が広いことを述べている。これまで行われてきた既往研究を精査し、その上で中性子源開発において求められている Li ターゲットの流動特性の解明の重要性について論考している。

2 章では、大阪大学が保有する大型の液体 Li 循環装置について述べ、流動特性把握のための表面変動計測および表面流速計測の原理、使用機器について述べている。

3 章では、電気接触式液面計を用いた表面変動計測、光コム距離計を用いた非接触表面変動計測の結果と考察を行っている。接触式計測から、流速の増加と流下に伴う表面波の発達を得た上で、その波高の増加傾向は流速や計測位置といったパラメータに対して線形では無いことを明らかにしている。また電気接触式液面計において計測針先端近傍に形成される液滴が計測データに与える影響について、高速度ビデオカメラと信号計測を同期させ、計測結果への具体的な誤差を得て、Li 噴流の平均厚さを算出するのに必要な接触頻度に対して誤差 1%にも満たない、十分に小さいことを明らかにしている。また接触・非接触式計測手法の比較を行い、未検出の変動成分があることを明らかにしている。加えて、ノズル吐出から下流に渡る広範囲の計測を実施し、噴流厚さや波高の大幅な増幅と、その増幅傾向に変曲点があることを明らかにし、実機における Li 噴流モニタリングに対して具体的な方法を提案している。

4 章では、まず大阪大学液体 Li 循環装置を対象とした数値流体シミュレーションを実施、ノズル内壁でのゲルトラー渦の発生及びノズル吐出後の自由表面下の詳細な流動構造がゲルトラー渦の形成と密接に関係しており、それが表面変動を形成することを明らかにしている。また、計測針上に発生する Li 液滴を対象としたシミュレーションも実施し、液滴挙動に周辺の流動場と液滴温度が大きく寄与していることを明らかにすることで、液滴の形成に関わるパラメータについて分析している。

5 章では、液体 Li 循環装置に磁場印加装置を設置、磁場による Li 噴流の表面変動の抑制効果の検証、及び電磁流量計の原理を応用した自由表面噴流の直接流速計測手法に関する実証実験を実施している。前者では高速度ビデオカメラを用いて Li 噴流表面の輝度分布から磁場による表面平滑化の効果を明らかにしている。また、後者の実証実験では、流速と出力電力の線形性を確認し、本原理で液体 Li 自由表面噴流の流速計測が可能であることを実証している。

6 章では、3〜5 章の研究成果を総括し、Li ターゲット開発において重要となるモニタリングシステムへ計測方法および具体的な設置方法を提言している。

以上のように、本論文はこれまでなされてこなかった液体金属である Li 噴流の広範囲に渡る流動特性を、実験および数値流体シミュレーションの両方を駆使して定量的に解明し、そこで使用する計測機器の精度検証も行いつつ、その成果を基にモニタリングシステム開発への提言を行っており、加速器駆動型中性子源における Li ターゲット開発に寄与するところが大きい。加えて、現在の設計では想定されていない磁場印加についても検証することで、Li ターゲットの改良・応用技術への提言も行っており、実用化の先を見据えた先駆的な研究成果も得ている。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。