

Development of Line Measurement of Vector Velocity in Liquid Metal Flow

（液体金属流動計測のための Vector-UVP の開発）

学位論文内容の要旨

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ため、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、動粘性係数が非常に小さく、容易に乱流遷移するためその挙動は非常に複雑であり、流動現象を予測した装置の設計、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。

液体金属は不透明であることから、一般的に用いられている LDA や PIV などの光学的な手法は使用できない。一方で、液体金属流動場の計測法として近年開発された中性子ラジオグラフィーは、流れ場の面計測であり得られる情報量も膨大であるが、取り扱いが困難でありまた大規模な装置を必要とするため、汎用的な計測手法にはなり得ない。そこで本研究では、液体金属流動場の汎用的な計測法として、超音波流速分布計測法（Ultrasonic Velocity Profiler、以下 UVP と略記）に注目した。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として、また流体力学における計測法として使用されている。その特徴は、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り、この点において他の流動場計測手法と一線を画している。本研究では UVP を用いて実際の液体金属流動場の計測を行い、その有効性と問題点を明らかにすることを目的とした。

UVP は非常に汎用性の高い計測手法であるが、得られる速度情報は実速度を測定線報告に投影した一成分のみである。本研究では、より詳細な流体の動きを把握するため、計測線上の複数方向速度成分を同時に測定できる新たな計測法、「Vector-UVP」の開発を行った。この手法の実現により、レイノルズ応力など乱流の特性を表す量を瞬時に測定することが可能となる。

本論文では、前半部と後半部においてそれぞれ「UVP を用いた液体金属流動計測」と「UVP を用いた流速ベクトル線計測法の開発」について論じている。各部の概要を以下に示す。

UVP を用いた液体金属流動計測の実用例として、融点が 125°C の溶融鉛ビスマス (Lead Bismuth Eutectic、以下 LBE と略記) の流動計測を行った。LBE は、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モデルループにおいて、中性子発生源と冷却材としての使用が検討されている。本実験は、核破砕ターゲットの伝熱特性の評価などを目的として製作された、ターゲットの実機に限りなく近いステンレス製の二重円管モデルループで行った。LBE が構造物と衝突して流れが乱れる箇所に超音波トランスデューサーを設置し、管壁を介して内部流動の計測を行った。また測定に際して、液体金属流動計測の問題点として、液体金属と管壁との濡れ性に対するいくつかの知見を得た。流速計測により得られた結果について考察し、伝熱特性の把握に重要な、LBE の流れ場に以下の結論を得た。

- (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 10 mm 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殆ど変化しない。
- (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。

従来の UVP では、1 本の超音波トランスデューサー (以下、TDX と略記) のみで超音波パルス信号の送受信が行われるが、本研究で開発に取り組む Vector-UVP では複数本の TDX により信号の受信を行う。中央に配置された TDX により超音波パルスビームを流体中に照射し、周囲に配置された TDX により流体中からの反射信号を受信する。受信側の TDX にはマイクロフォンと同様の指向性が存在するため、送信側の TDX によって照射される超音波パルスビームの、測定線上の各位置における反射信号は、時間遅れを伴って各受信用 TDX により取得される。受信用 TDX を 3 本配置することにより、理論的には測定線上の瞬時 3 方向速度成分を計測することが可能となる。この手法の基礎は Lemmin らによって考案され実際に計測が行われているが、彼らの手法では各測定点の測定体積が $\phi 50\text{mm} \times 3\text{mm}$ 程度と極めて大きいことから、基礎的な流体力学や機械工学の分野での使用には適さない。これに対し、本研究において開発した装置では送信側に超音波パルスビームを絞ることのできる特殊な TDX を用いることで、 $\phi 1\text{mm} \times 0.4\text{mm}$ 程度と大幅な測定体積の減少を実現させた。本研究では、まず計測システムの構築に必要な、超音波ビーム特性の把握や伝播時間の検証を、実験と音場の数値シミュレーションにより行った。次に、2 方向速度成分計測を行う装置を開発し、回転円筒内に形成される定常な剛体回転運動の流速ベクトル計測を行った。最後に、非定常流れの流速ベクトル計測として、円柱後流に形成されるカルマン渦の計測を行った。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 武 田 靖

副 査 教 授 藤 川 重 雄

副 査 教 授 菱 田 公 一 (慶応大学理工学部

システムデザイン専攻)

学 位 論 文 題 名

Development of Line Measurement of Vector Velocity in Liquid Metal Flow

(液体金属流動計測のための Vector-UVP の開発)

液体金属は不透明であることから、一般的に用いられている LDA や PIV などの光学的な手法は使用できない。一方で、液体金属流動場の計測法として近年開発された中性子ラジオグラフィは、流れ場の面計測であり得られる情報量も膨大であるが、取り扱いが困難でありまた大規模な装置を必要とするため、汎用的な計測手法にはなり得ない。そこで本研究では、液体金属流動場の汎用的な計測法として、超音波流速分布計測法 (Ultrasonic Velocity Profiler、以下 UVP と略記) に注目した。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として、また流体力学における計測法として使用されている。その特徴は、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り、この点において他の流動場計測手法と一線を画している。本研究では UVP を用いて実際の液体金属流動場の計測を行い、その有効性と問題点を明らかにすることを目的とした。

UVP は非常に汎用性の高い計測手法であるが、得られる速度情報は実速度を測定線報告に投影した一成分のみである。本研究では、より詳細な流体の動きを把握するため、計測線上の複数方向速度成分を同時に測定できる新たな計測法、「Vector-UVP」の開発を行った。この手法の実現により、レイノルズ応力など乱流の特性を表す量を瞬時に測定することが可能となる。

本論文では、前半部と後半部においてそれぞれ「UVP を用いた液体金属流動計測」と「UVP を用いた流速ベクトル線計測法の開発」について論じている。各部の概要を以下に示す。

UVP を用いた液体金属流動計測の実用例として、融点が 125℃ の溶融鉛ビスマス (Lead Bismuth Eutectic、以下 LBE と略記) の流動計測を行った。LBE は、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モデルループにおいて、中性子発生源と冷却材としての使用が検討されている。本実験は、核破砕ターゲットの伝熱特性の評価などを目的として製作された、ターゲットの

実機に限りなく近いステンレス製の二重円管モデルループで行った。LBE が構造物と衝突して流れが乱れる箇所に超音波トランスデューサーを設置し、管壁を介して内部流動の計測を行った。また測定に際して、液体金属流動計測の問題点として、液体金属と管壁との濡れ性に対するいくつかの知見を得た。流速計測により得られた結果について考察し、伝熱特性の把握に重要な、LBE の流れ場に以下の結論を得た。

- (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 10 mm 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殆ど変化しない。
- (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。

従来の UVP では、1 本の超音波トランスデューサー（以下、TDX と略記）のみで超音波パルス信号の送受信が行われるが、本研究で開発に取り組む Vector-UVP では複数本の TDX により信号の受信を行う。中央に配置された TDX により超音波パルスビームを流体中に照射し、周囲に配置された TDX により流体中からの反射信号を受信する。受信側の TDX にはマイクロフォンと同様の指向性が存在するため、送信側の TDX によって照射される超音波パルスビームの、測定線上の各位置における反射信号は、時間遅れを伴って各受信用 TDX により取得される。受信用 TDX を 3 本配置することにより、理論的には測定線上の瞬時 3 方向速度成分を計測することが可能となる。この手法の基礎は Lemmin らによって考案され実際に計測が行われているが、彼らの手法では各測定点の測定体積が $\phi 50\text{mm} \times 3\text{mm}$ 程度と極めて大きいことから、基礎的な流体力学や機械工学の分野での使用には適さない。これに対し、本研究において開発した装置では送信側に超音波パルスビームを絞ることのできる特殊な TDX を用いることで、 $\phi 1\text{mm} \times 0.4\text{mm}$ 程度と大幅な測定体積の減少を実現させた。本研究では、まず計測システムの構築に必要な、超音波ビーム特性の把握や伝播時間の検証を、実験と音場の数値シミュレーションにより行った。次に、2 方向速度成分計測を行う装置を開発し、回転円筒内に形成される定常な剛体回転運動の流速ベクトル計測を行った。

これを要するに、著者は、高温条件下における液体金属流動計測を行い、これを成功させた。過去における LBE の流動計測の例は極めて少なく、著者は速度分布計測により得られた結果から定量的な実験結果の評価を行い、実機の問題点の指摘を示している。これにより、これまで見過ごされてきた ADS ターゲットモデルループにおけるの問題が、再考されることが期待できる。また本研究により、液体金属の流動場計測法を確立させ、ベクトル線計測が可能となる Vector-UVP の開発を行った。これは、流体力学の基礎研究のみならず、熱工学や原子炉の安全管理など、工学の実務的な分野に対し大きく貢献するものである。よって、著者は北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格があるものと認める。