

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 21 日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2016

課題番号：16K14531

研究課題名(和文) 新型炉用汎用多種冷却材対応流量計測システムの開発

研究課題名(英文) Development of general flow-rate measurement system for various coolants of advanced reactors

研究代表者

森 治嗣 (MORI, MICHITSUGU)

北海道大学・工学研究院・特任教授

研究者番号：00611485

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：次世代の革新的原子炉として安全性の高い液体金属冷却炉等の流量計測の精度改善のため、流速分布に依存する変換係数が不必要な流量計測システムの構築をこの一年間の研究期間で実施した。測定液体金属はガリウム・インジウム・スズ(Ga/In/Sn)からなる、通称ガリンスタンと呼ばれる液体金属を利用して実施している。高さ1100mm、幅1848mm、奥行き310mmの液体金属流量測定装置を製作し、配管内径20mmの水平配管試験部を設置し計測法等の最適化を測り、今後のデータ蓄積により新型炉用汎用多種冷却材対応流量計測システム開発に資する。

研究成果の概要(英文)：In order to improve the accuracies of flow-rate measurement in highly-safe liquid-metal cooling reactors as the next-generation innovative nuclear reactor, the flow rate measurement system eliminating the profile factor dependent on the flow velocity profile is made during the research period of this one year. Measurement coolant is selected with the liquid metal called Galinstan, which consists of gallium, indium and tin (Ga / In / Sn). A liquid-metal flow-rate measuring system was fabricated, having the sizes of a height of 1100 mm, a width of 1848 mm, and a depth of 310 mm, in which a horizontal piping test part with a pipe inner diameter of 20 mm was installed. The optimization of the measuring method and the flow-rate measurement have been carried. Future data accumulation will contribute to development of flow-rate measurement system for general and various coolants for advanced reactors.

研究分野：原子力システム安全工学

キーワード：新型炉 革新炉 液体金属 流速分布計測 流量測定 ガリンスタン 変換係数 流量測定試験

## 1. 研究開始当初の背景

軽水炉の流量測定は、図1に示すようなベンチュリーなどの差圧式流量計とともに、非接液式の伝搬時間差式超音波流量計や電磁流量計の導入が進められてきた。これら従来の流量計は配管断面の平均流速に対する超音波伝搬時間差や起電力を計測し、それらに流速分布に依存する変換係数(PF:Profile Factor)を乗じて流量を推定している。それ故、図2に示すように、流速分布によって変化するPFは、非対称流れや旋回流、レイノルズ数等の影響を受け大きく変化することから、大規模な校正試験施設でPFを事前に求めて、ある精度の範囲で保証している。しかしながら、液体金属や熔融塩などを対象とした大規模で高精度な校正試験は世界的に見ても例がなくPFの精度を水流量計並に保証することは困難である(M. Mori, et al., *Journal of Power and Energy Systems* 5(3), 400-405, 2011)。

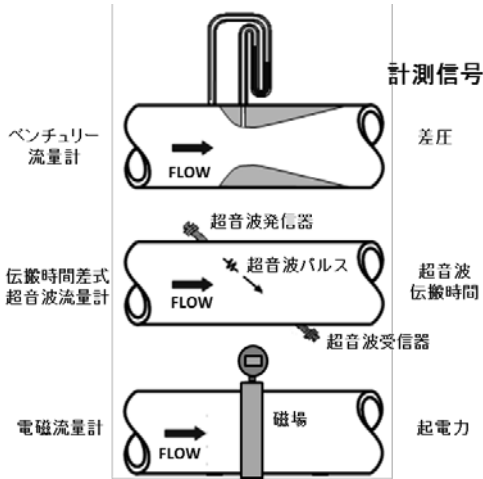


図1. 現状の主な流量計の種類

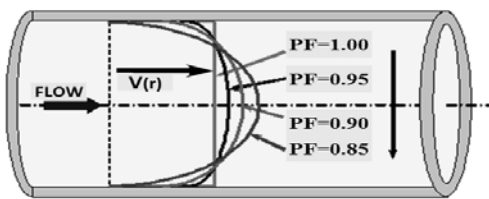


図2. PFに及ぼす流速分布の影響

## 2. 研究の目的

液体金属ナトリウム冷却炉の流量測定では、ファラデーの法則を利用した電磁流量計を用いている。そこでは計測される起電力に、流れの状態に大きく影響される変換係数を乗じて流量を求めているため、汎用としては測定精度は限られ(偏差7.5~10%)、その精度は水流量計(同1~3%)を大きく上回る。熔融塩等の非ニュートン流体では、さらに精度の保証は極めて困難である。これらの流量計測精度が大きく改善されれば、最大出力や増出力評価、また安全性評価において格段のメリットが得られることは、軽水炉の経験からも容易に類推できる。この技術的課題は、液体流の流線を過渡状態で多次元で連続計測することで飛躍的に解決できる。本研究提案では、

液体金属冷却炉や熔融塩炉等において流量計測精度を保証し、出力評価とプラント効率、及びそれらの炉心性能及び安全解析精度を大きく改善する、新型炉用汎用多種冷却材対応流量計測システムの挑戦的な開発を目指す。

## 3. 研究の方法

以上の様な原理的困難さを解決する為には、図1の流量計のような間接測定法によらず、PFを不要とする流量測定法を開発する必要がある。

### (式1)

$$Q(t) = \int V(t) ds = \iint V_x(r, \theta, t) r dr d\theta$$

具体的には、配管内流速分布(m/sec)を測定し、式1のように配管断面(m<sup>2</sup>)で積分すれば流量(m<sup>3</sup>/sec)が求まる。ここで、Q(t):流量、V(t):流速分布、t:測定時間、s:流路断面、V<sub>x</sub>:配管中心軸方向(1次流れ)流れが支配的な場合の流速分布、r、θは断面及び円周方向成分である。流体計測において瞬時に配管内の流速分布を多次元で直接測定することは、Navier-Stokesの式に於いて流線を得ることと同意であり、この方法による流量計測は、従来のパラダイムを変えPFを用いることなく、且つ非軽水炉では校正が極めて困難な大型流量計の精度を、校正を必要としないで大きく改善できる。さらに、非軽水炉液体冷却新型炉の炉心熱出力解析における制限値や事故時の安全性解析評価の精度と信頼性を大きく改善し、その開発を促進することができる。

表1に世界各国で原子炉給水流量計用に現在適用又は適用検討中の超音波流量計を示す。Chordal型LEFMは流量(レイノルズ数)にあまり依存せず、補正係数が安定していると報告されている。一般的にはスプールインで給水流量ラインに設置されるが、接液タイプのためBWRでは圧力バウンダリーに複数の貫通孔が存在することになる。米国で漏洩事例が報告されておりメンテナンスが重要である。

External型LEFMは、超音波の伝搬時間差から流速を求める一般的な超音波伝搬時間差法であり、PFにて補正する。電磁流量計とならんで良く使用される流量計である。流量(レイノルズ数)に依存した補正係数の変化が大きく、高精度計測保証のためには、補正係数のレイノルズ数依存や、上流側配管形状に依存する偏流の影響を明らかにする必要が有る。

CROSSFLOW(クロスフロー)型超音波流量計は、レイノルズ数に依存した補正係数の変化が大きい(森, ながれ35, 21-26, 2016)。本研究で適用する流量計の原型は、表1に示す超音波ドップラー流速分布計測流量計である。超音波反射体からのドップラー信号から流速分布を直接線測定し流量を求める点で、上記の3流量計とは原理が異なる流量計である。流速分布を求めることから大きな誤差影響のあるPFまたは補正係数を不要として現場で測定可能である。理論的には、流動条件(流速、温度、圧力、偏流)によらず高精度計測が可能と考えられる(Mori M., et al., Experi-

表 1. 新型原子炉給水流量計測用超音波流量計とその比較

流量計	Chordal型LEFM	External型LEFM	CROSSFLOW型	超音波ドップラー流速分布計測流量計
システム概要				
計測原理	・伝搬時間差法 超音波の伝搬時間差から流速を求める。配管断面の4測線又は8測線を計測することにより各4断面平均流速分布を近似しプロファイルファクタにて補正。	・伝搬時間差法 超音波の伝搬時間差から流速を求める。配管内流速分布をプロファイルファクタにて補正する。電磁流量計と比べて良く使用される流量計。	・クロスフロー法 断面を通過する乱流渦等の情報が保存されるとして、2断面を通過する時間から流速を求め、配管内流速分布をプロファイルファクタにて近似補正する。	・線測定超音波ドップラー法 超音波反射体からのドップラー信号から流速分布を測定し流量を求める。測定値に大きな誤差影響のある補正係数(プロファイルファクタ)が不要。現場で真値を測定可。
取付方法	配管一体溶接式(圧力バウンダリ)。トランスデューサシール部は溶接不可。	クランプオン。配管外付け、配管工事は不要	クランプオン。配管外付け、配管工事は不要	クランプオン。配管外付け、配管工事は不要。ただし He 注入箇所工事又は既設孔が必要。
計測精度	±0.3%(メーカー公表値)	±1.0%(メーカー公表値)	±0.5%(メーカー公表値)	±0.4%以下(計量研検定) ±0.3%(NIST 検定)
国内採用実績	四国電力、中部電力	東電、東北、原電	九州電力	なし
現状と課題	・NRCがアップレート用に認可。 ・流量(レイノルズ数)に依存せず計測値、補正係数が安定。 ・米国で漏洩事例、貫通孔(8~16孔)。 ・メンテナンス。 ・ガウスの求積法に基づく、4測線では7次(2n-1)式で面がよく近似できる必要がある。	・外付けのため取り付けが容易で、国内プラントに設置例多数。 ・流量(レイノルズ数)に依存した補正係数の変化が大きい。 ・高精度計測保証ためには、補正係数の流量(レイノルズ数)依存、上流側配管形状の影響を明らかにする必要がある。 ・米国で過出力事例。	・NRCが過出力判明後以後許認可取消し。 ・流量(レイノルズ数)に依存した補正係数の変化が大きい。 ・高精度計測保証ためには、補正係数の流量(レイノルズ数)依存、上流側配管形状の影響を明らかにする必要がある。 ・移動面同定のため相関法(統計的検出)を適用。ノイズの影響の問題。 ・米国で過出力事例。	・世界4ヶ国の国家標準ループ試験実績 ・一般流量計としては商品化されている。 ・現場で速度分布を直接計測するため、時間差法のような補正係数が不要。 ・理論的には、流動条件(流速、温度、圧力)によらず高精度計測が可能。 ・超音波反射体が必要。給水は高圧のため気泡が存在せずヘリウム注入が必要。 ・日本発の高精度流量計。

ments in Fluids, 32(2002), 153-160 ; Flow Measurement and Instrumentation, Vol.19 (2008) pp.181-187)。即ちNavier-Stokesの式に於いて流線を得ることと同意となる新しい過渡多次元連続流速分布計測システムによる多種冷却材対応の流量計測が可能な高精度流量計測システム(偏差~3%)の開発が可能である。

#### 4. 研究成果

実験装置の概要を図3に示す。装置は供給タンク、計測試験部、計量タンクを備え、供給タンクと計量タンクのヘッド差で流体が流れる。本超音波ドップラー流速分布計測流量

計は、瞬時の流量を連続的に測定し計測時間で時間積分して平均流量を求めることが出来る。装置は計量タンクで計測時間に流れた流量を測ることで平均流量を求める。被測定液体金属は、Ga(68.5%)/In(21.5%)/Sn(10%)からなる通称ガリンスタンと呼ばれる液体金属を利用して実施した。ガリンスタンの沸点は1300℃と通常の金属とほぼ変わらないが、融点は-19℃と低く常温で液体状態である。比重は6.44、粘度は0.0024Pa・s(常温)、熱伝導率は16.5W/(m・K)と比較的良く体温計として用いられている。金属とは染み込みによる脆化があるが、ガラスやアクリル系材料とは相性が良く濡れ性が良いことから配管内面の固液

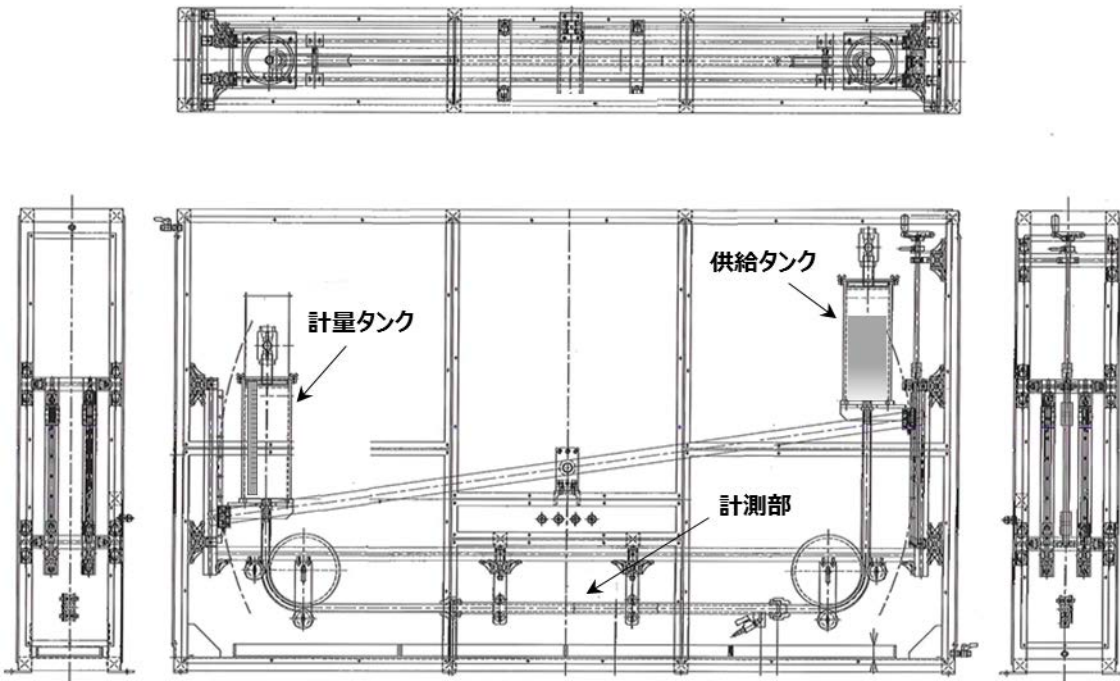


図3. 流量計測実験装置

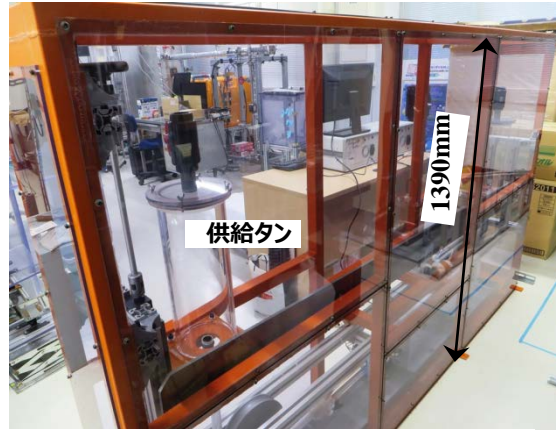
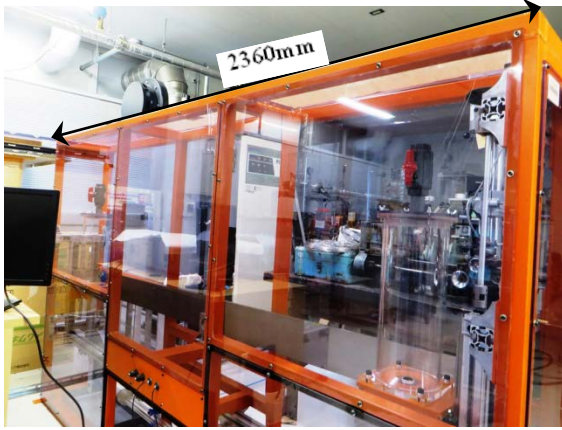


図4. 流量計測実験装置概観

界面での超音波の透過は良いと考えられ、また可視化ができることから流量測定試験部をアクリル系材で製作した。高さ1100mm、幅1848mm、奥行き310mmの鋼材枠内に、流量測定が左右両方向で選択可能な配管内径20mmの水平配管試験部を設置し、配管両端には供給タンクと計量タンクである液体金属タンクを設けて、交番に流量を流し計測を行う事がで

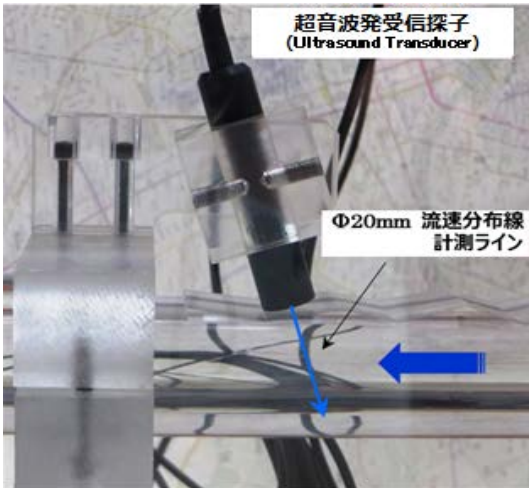


図5. 流速分布計測試験部

きる。図4に装置概観を、図5に流速分布計測試験部を示す。内径20mmのアクリル管に、超音波入射角度となる超音波発受信探子 (Ultrasound Transducer) の設置面切り込み部複数設けている。超音波ドップラーエコーを得るため、レーザードップラー計測法のように計測ラインが一次流れ方向に垂直では計測できないので、最適な入射角度を選択することが重要となる。

流速分布計測試験部に於いて、超音波発受

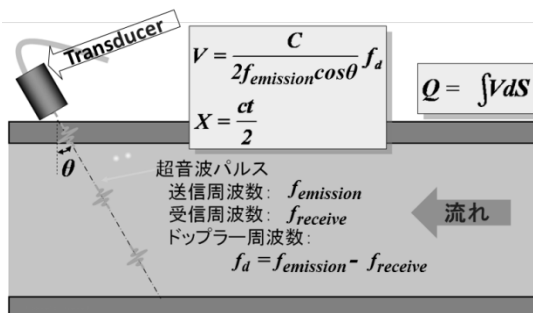


図6. 超音波ドップラーパルス流速分布測定法

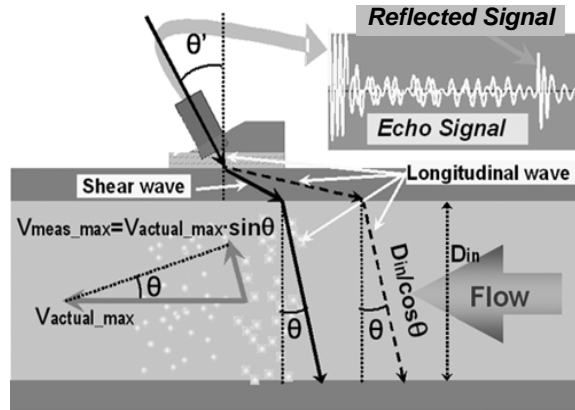


図7. 配管内流量測定時の超音波の種類と透過パス(経路)及び反射

信探子から基本周波数で流体中に繰り返し発信し、流体中の超音波反射体から得られるドップラーエコーを超音波発受信探子 (Transducer) で受信する。図6に本提案に於ける瞬時流速分布計測法の原理を簡易に示す。超音波発受信探子から配管内の水流体に対しては研究例はあるが (Mori, et. al., Flow Measurement and Instrumentation, Vol.19 (2008) pp.181-187), 非軽水炉冷却材流れに対してはまだ未知の領域である。測定線上の位置  $X$  は音速と超音波のトラベル時間から特定でき、またその点の流速  $V$  は音速、発信基本周波数、ドップラー信号から得られる。得られた速度分布を面積分することにより、瞬時流量  $Q$  を求める。本研究での液体金属流速分布測定に関する基礎技術を展開し  $dr \cdot d\theta$  方向の2重積分による直接計測手法により、非軽水液体冷却新型炉用の高精度な汎用多種冷却材対応流量計測システムの技術開発に繋がる。これにより新型革新的液体金属ナトリウム冷却炉や鉛ビスマス冷却炉、熔融塩炉等の性能解析及び安全解析の精度と信頼性が大きく改善され、また原理的に標準ループでの校正が不要な非軽水用流量計の流量計測におけるパラダイム変化をもたらすと考えられる。流体が水の場合は、一般的には図7のような超音波経路をとる。クランプオンで配管外面から超音波を液体流の場合は配管内面から液体への入射角が異なってくるので、この物理的な解明を明らかにし最適化を図る必要がある。

本研究では超音波パルスドップラー法を採用するので、Nyquist Theory により測定可能な最大測定深度 ( $X_{max}$ ) と最大流速 ( $V_{max}$ ) は、音速  $C$  と繰り返し発振周波数 ( $f_{PRF}$ )、基本周波数 ( $f_0$ ) により以下の式で制限される。

$$X_{max} \leq C / (2 \cdot f_{PRF}) \quad (\text{式 2})$$

$$V_{max} \leq C \cdot f_{PRF} / (4 \cdot f_0) \quad (\text{式 3})$$

上記 2 式から、基本周波数  $f_0$  は、最大測定深度と最大流速によって制限される。

$$f_0 \leq C^2 / (8 \cdot X_{max} \cdot V_{max}) \quad (\text{式 4})$$

すなわち、測定可能な最大測定深度と最大流速を大きくとるためには、低基本周波数を採用しなければならない。ただし流れが順流または逆流の一方方向流れであれば、最大流速は同一  $f_0$  及び繰り返し発振周波数  $f_{PRF}$  に対し式 4 から実測定上は、

$$-|C \cdot f_{PRF} / (4 \cdot f_0)| \leq V_{max} \leq +|C \cdot f_{PRF} / (4 \cdot f_0)| \quad (\text{式 5})$$

となり、順方向の流れが仮定できれば、

$$0 \leq V_{max} \leq 2 \cdot C \cdot f_{PRF} / (4 \cdot f_0) \quad (\text{式 6})$$

となり、式 4 の制限値の 2 倍となる。ここで図 6 に示すように  $\sin \theta$  成分が測定対象になるので、入射角は入射強度との関係で重要なパラメータとなる。今回は図 8 のように配管に直接超音波発受信探子設置面を設け、アクリル管から縦波のみで液体金属流れに入射するので、液体金属の音速がアクリルの音速より小さい場合は図 8 で  $\theta_1$  の入射角で、また大きい場合は  $\theta_2$  の入射角で液体金属中に伝搬する。液体金属の音速についてはほとんど情報が無いが、配管内流の音速は配管内を被測定対象の流体で満たし、超音波発受信探子を配管表面に垂直に設置して、幾何学情報と反射時間から求める。文献のよれば (竹内ら, 物性研究, 12(6), 524-525, 1969), 液体ビスマスの音速は 1649 m/s とあり温度とともに減少する。今回、ガリンスタンの音速を常温で計測したところ、2740m/s であった。アクリルの音速は常温で 2730 m/s であるので、

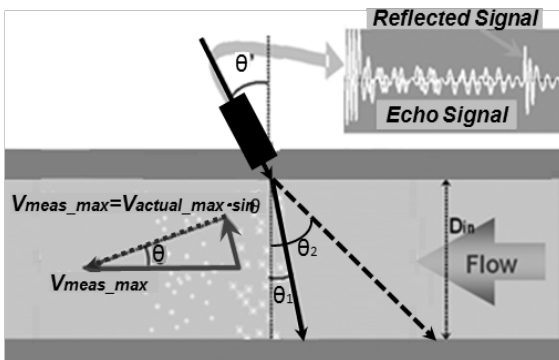


図 8. 液体金属流れとアクリル配管組せ時の超音波透過パス(経路)例

ほぼ音速が同じであることから、アクリル-ガリンスタン界面では、ほぼ超音波発受信探子の入射角より僅かに大きい  $\theta_2$  の入射角で伝搬することになり、その場合は超音波の減衰が小さいと考えられる。ステンレス配管の場合は音速が 5000m/s を超えるので  $\theta_1$  は小さくなる。超音波流速分布計測計、及び超音波流速分布計測流量計としては、UVP-DUO ([http://www.kbk-shinsozai.com/uvp\\_duo/](http://www.kbk-shinsozai.com/uvp_duo/)) または udFlow (NTHAS-6, Proceedings of 6th Japan-Korea Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety, Okinawa, Japan, N6P1147, 2008) を使用した。UVP-DUO による液体金属(ガリンスタン)の瞬時流速分布測定例(未発達流域)を図 9 に示した。まず 1 年の研究期間で基礎開発に挑戦したため、今後更にデータ採取を重ね順次蓄積次第公開する。

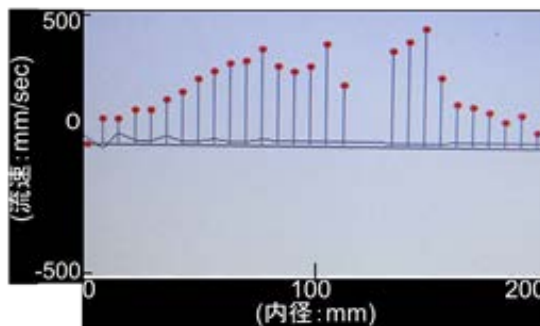
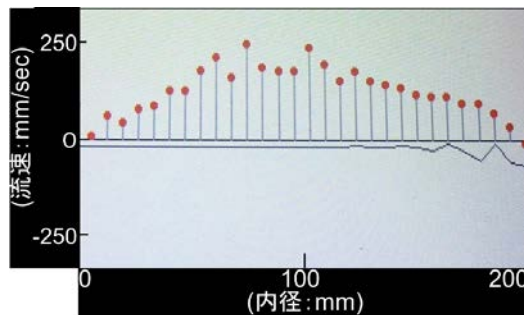


図 9 液体金属(ガリンスタン)流速瞬時分布測定例

## 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)

[学会発表] (計 1 件)

堤亘平, 三輪修一郎, 坂下弘人, 森治嗣,  
“超音波パルスドップラー法による液体金属管内流速分布と流量計測” 2017 日本原子力学会秋大会, 2017 年 9 月 (予定)

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

森 治嗣 (Mori, Michitsugu)  
北海道大学・工学研究院・特任教授  
研究者番号: 00611485