

令和 3 年 6 月 14 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01930

研究課題名（和文）超遠隔かつ過酷環境下におけるレーザ超音波流量計測の基盤技術開発

研究課題名（英文）Basic study on the development of flow rate measurement system under harsh environment conditions

研究代表者

和田 守弘（Wada, Sanehiro）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・主任研究員

研究者番号：60738293

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、従来のセンシング技術では適用が難しい超遠隔・過酷環境下における流量計測の計測基盤技術を構築することを目的としている。その手段として、レーザによる超音波の送受信技術を用いた流速・流量計測システムを構築し、想定される実機大規模の実流試験設備を用いた流量計測試験を実施して流量計測が可能であることを明らかにした。また、関連する超音波パルスを用いた流量計測法の信号処理に関する研究成果も得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超臨界地熱発電は、古火山・古カルデラ下部に存在する可能性が高い超臨界岩体の熱エネルギーを利用するため、地熱発電容量を現在の数十倍以上にできるポテンシャルを有する。超臨界地熱発電プラントの設計・運用には地熱貯留槽における「温度・圧力・流量」のセンシング技術が不可欠だが、唯一「流量」において将来的に実用化見通し可能な基盤技術が見当たらない。これは、超遠隔（4～5 km地下）かつ高温・高圧・高腐食性（～500、～50 MPa、PH～1.5）の過酷環境下における流量計測が極めて困難なためである。従って、その流量センシング法の基盤技術を構築することは、超臨界地熱発電実現への貢献が期待できる。

研究成果の概要（英文）：This report presents the development of measuring flow velocity and flow rate which is applicable to high temperature, high pressure and high corrosion conditions. The measurement system uses the pulsed ultrasound induced by the laser ultrasound and the transmitted pulse is detected by using the laser vibration meter. The flow velocity can be calculated by the delay time of the transmitted pulse. To estimate the developed measurement system, the actual scale flow measurements were conducted at the flow rate calibration facility in Japan. Additionally, a new signal processing technique for flow rate measurement using the ultrasonic velocity profile method was also developed.

研究分野：流体計測、流量計測

キーワード：流量計測 流速計測 超音波 レーザ超音波 炭化ケイ素 流速分布計測

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

2016年4月に策定された「エネルギー・環境イノベーション戦略」において有望な革新技術「超臨界地熱発電」が挙げられている。これは、古火山・古カルデラ下部に存在する可能性が高い超臨界岩体の熱エネルギーを利用するため、地熱発電容量を現在の数十倍以上にできるポテンシャルを有している。超臨界地熱発電プラントの設計・運用には地熱貯留槽における「温度・圧力・流量」のセンシング技術が不可欠となるが、唯一「流量」において将来的に実用化見通し可能な基盤技術が見当たらない。これは、超遠隔(4~5 km地下)かつ高温・高圧・高腐食性(~500、~50 MPa、PH~1.5)の過酷環境下における流量計測が極めて困難なためである。例えば、既存の電子回路・金属配線は300以上の高温環境下では動作不能であるため、従来の流量計測技術は全て使えない。すなわち、超遠隔・過酷環境下へ適用可能な流量センシング法の基盤技術を構築することは、超臨界地熱発電の実現に大きく寄与する。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、主に調査井の段階で特に必要となる超遠隔・過酷環境下における流量計測が将来的に期待できる計測基盤技術を構築することである。具体的には、過酷環境下でも使用可能性を有するセンシング要素技術であるレーザおよび超音波、ならびにケーシング候補材料(耐熱・耐腐食性の高い炭化ケイ素SiC)を用いる。そして、レーザのみで超音波を送受信可能な計測システムを構築するとともに、実機で想定される杭径を考慮した実流試験設備において開発した計測システムの実証試験を実施することを目的とする。また、地上にて計測可能な生産井や還元井の段階に適用し得る流量センシング技術の1つとして超音波流速分布計測法が挙げられることから、実機適用上必要と想定される超音波反射体となる粒子の分布状態が不安定な条件下における測定精度向上技術について開発を行うことを目的とする。

### 3. 研究の方法

(1) レーザによる超音波の送受信システムを構築した。具体的には、超音波の送信部においては、超音波励振を行うためのパルスレーザ照射装置を新たに整備し、そのパルス繰り返し周期およびパワーを制御可能とするシステムを構築、超音波励起の基礎試験を実施した。また、超音波の受信部においては、レーザ振動計をベースに流体中を伝搬する超音波パルスの微小遅れ時間を計測可能な超高速サンプリングシステムを構築した。これらを用いて流体中を伝搬する超音波パルスの基本的な送受信試験を行うことで、構築したレーザによる超音波送受信システムの検証を行った。

(2) 上記のレーザによる超音波送受信システムを用いて実流試験により流速計測の実証試験を行った。超音波の送信部と受信部がそれぞれ機能しているかを確認することを目的に、送信側を通常の超音波トランスデューサにて超音波パルスを発射させ、受信側をレーザ振動計とする組み合わせ、並びに、送信側をレーザ励起による超音波パルスを発射させ、受信側を通常の超音波トランスデューサによる検波とする組み合わせを用いた実流試験を行った。実流試験設備は産総研の液体流量校正設備(作動流体は水)を使用し、配管口径は50mm、流量条件は10 m<sup>3</sup>/h ~ 30 m<sup>3</sup>/hとした。なお、超音波励起部および受信部として厚みを変えたステンレス板および炭化ケイ素板を用いた。

(3) 超音波流速分布計測法は流体中に分布する粒子の速度を計測することにより流速・流量を計測する手法であり、その計測精度は粒子の分布状態、特に数密度に大きく依存する。そこで粒子の数密度が低下もしくは不安定な状態になることによる誤差要因を特定するため、実際の超音波パルス波形を模擬した入力波を作成し、SN比を変化させて信号処理のシミュレーション計算を行った。この際、超音波パルスと測定体積の相対位置を注目パラメータとした。

(4) 上記のシミュレーション結果の検証のため、産総研の液体流量校正設備を使用して、実流試験を行った。用いた配管口径は200 mmであり、流量は200 m<sup>3</sup>/h ~ 400 m<sup>3</sup>/hとした。超音波パルスの反射体として微小気泡を用いており、その数密度を変更可能な注入装置および粒子径分布を得るための画像計測システムを構築して液体流量校正設備に導入した。実流試験における数密度の条件は3つ設定し、いずれも通常の超音波流速分布計測法で用いられている数密度よりも十分に低い値となるよう試験を行った。

#### 4. 研究成果

(1) 図1に超音波の送信部および受信部ともにレーザを用いた試験結果を示す。これは静止流体中距離を20 mmおよび30 mmに設定した時の超音波受信波形であり、図より超音波送受信部の流体中距離に相当する遅れ時間が計測されていることが確認できる。この結果からレーザにより送信部で励起された超音波パルスが流体中を伝搬し、受信部にてレーザにより計測可能であることがわかる。なお、図1は送受信部に厚さ1 mmのステンレス板を用いた結果であるが、炭化ケイ素板を用いても同様の結果が得られており、3 mmの厚みがある炭化ケイ素を用いても超音波パルスが送受信可能であることが確認された。また、図2にレーザ照射後の超音波励起部の写真を示す。ステンレスではレーザ照射部に損傷が見られたが、炭化ケイ素では損傷が確認されなかった。これらの結果より、高い耐熱・耐腐食性の炭化ケイ素を超音波送受信部に十分適用可能であることが確認された。

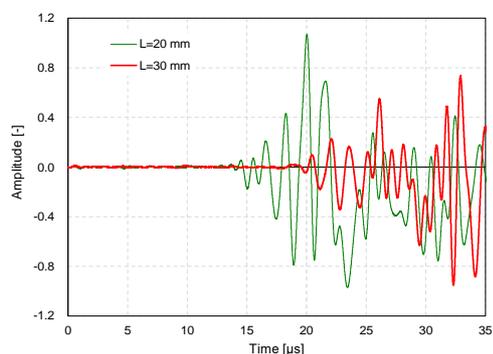


図1 超音波受信波形

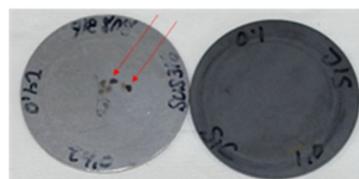


図2 レーザ照射後の超音波励起部  
(左：ステンレス、右：炭化ケイ素)

(2) 図3に液体流量校正設備における実流試験の様子を示す。図は送信部に超音波トランスデューサを用い、受信部はレーザを用いた例である。超音波の伝搬経路は配管軸に対して18度傾けて設置されており、その伝搬経路長は約80 mm ~ 100 mmとなるよう設定した。図4に実流試験における超音波の受信波形の全体図と拡大図を示す。図より超音波の送信部および受信部いずれも超音波の励振と受信に成功していること、また、最大100 mm程度離れた送受信部であっても超音波パルスを十分検波可能であることが確認できる。さらに拡大図において流量に依存した遅れ時間が検出されていることも明らかである。図5は横軸に実流試験における流量、縦軸に超音波パルスの遅れ時間から換算した流れ方向の平均流速を示したグラフであり、流量に依存した流速計測が十分可能であることが確認された。

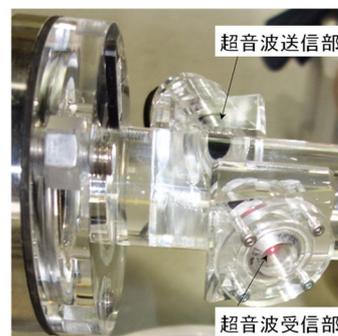
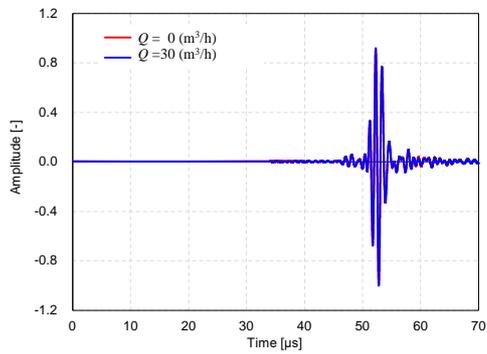


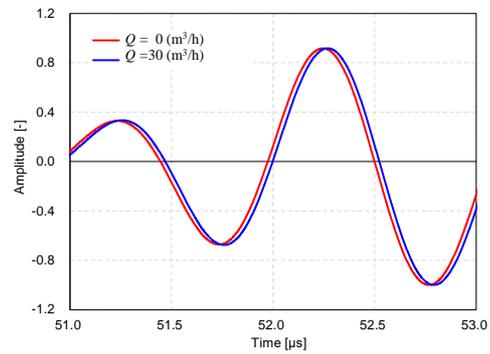
図3 実流試験の超音波送受信部例

(3) 超音波流速分布計測法における信号処理シミュレーション結果より、流速計測精度を低下させる要因の1つに超音波パルスの誤検出があることが確認され、その誤検出頻度はSN比に依存していることを明らかにした。また、検波された超音波パルスと測定体積との相対位置に着目すると、測定体積にパルスの一部が侵入するケースにおいて誤検出率が増加することを確認した。この条件下においては流速を過大または過少評価する確率が高くなるために流量計測精度が低下することが推定された。(詳細は引用文献を参照)

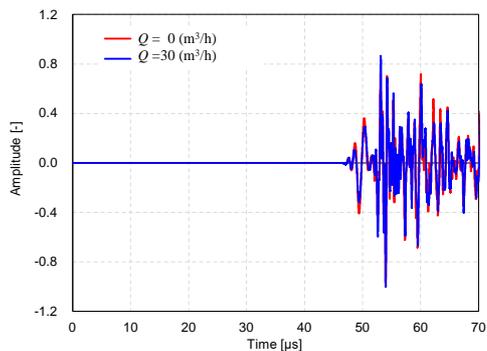
(4) 超音波流速分布計測法を用いた実流試験結果より、超音波反射体としての微小気泡の数密度を制御可能な注入装置が構築できたことを確認し、数密度が十分に低い条件を実現できることを明らかにした。また、瞬時検波した超音波パルス信号から流速の誤検出が発生するケースを確認し、上記シミュレーション結果と整合することを明らかにした。そこでシミュレーション結果と実流試験結果より流速の誤検出を低減させる手法を考案した。具体的には、流速を過大または過少評価する確率が高いケースを流速算出過程から除去するプロセスを導入する方法を採用することで、測定精度を向上させることに成功した。また、これらの結果から、超音波流速分布計測法を実機適用する場合における信号処理パラメータの適切な推奨値について明らかにした。(詳細は引用文献を参照)



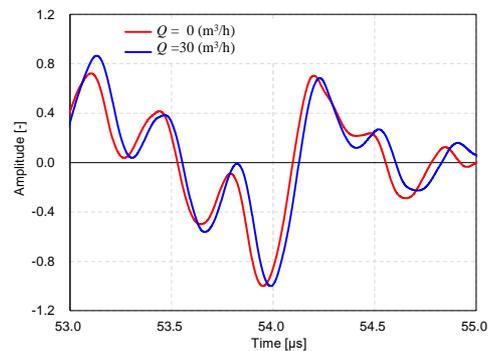
(a-1) トランスデューサ送信 - レーザ受信  
(全体図)



(a-2) トランスデューサ送信 - レーザ受信  
(拡大図)



(b-1) レーザ送信 - トランスデューサ受信  
(全体図)



(b-2) レーザ送信 - トランスデューサ受信  
(拡大図)

図4 実流試験における超音波受信波形

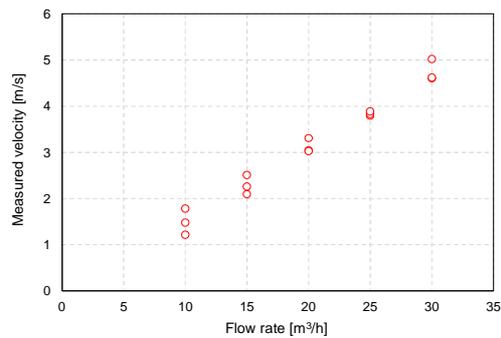


図5 実流試験における流量と測定流速

<引用文献>

S. Wada, N. Furuichi, Improving accuracy of pipe flow rate measurement with ultrasonic time-domain correlation method under small number density of reflectors, Measurement 179 (2021) 109439.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Wada Sanehiro, Furuichi Noriyuki	4. 巻 179
2. 論文標題 Improving accuracy of pipe flow rate measurement with ultrasonic time-domain correlation method under small number density of reflectors	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Measurement	6. 最初と最後の頁 109439 ~ 109439
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.measurement.2021.109439	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 和田守弘、古市紀之
2. 発表標題 超音波時間領域相関法を用いた流速分布計測における誤検出低減手法の検討
3. 学会等名 日本機械学会第 97 期流体工学部門講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	遠山 暢之 (Toyama Nobuyuki) (60344165)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・研究グループ長 (82626)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------