

令和 3 年 6 月 17 日現在

機関番号：12614

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13937

研究課題名(和文) 海底熱水噴出孔における流体流量の定量的観測方法の開発研究

研究課題名(英文) Development of Quantitative Observation Technique for Fluid Flow Rate at Hydrothermal vents

研究代表者

井原 智則 (Ihara, Tomonori)

東京海洋大学・学術研究院・助教

研究者番号：70767350

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)：海洋資源のひとつである海底熱水鉱床について、その能力を測るためには熱水噴出流量の定量的な測定が必要となる。また、活動期間も調べる必要があることから、長期間の観測も望まれている。しかしながら、これまでの流量計では熱水の性質により長期間にわたる流量の観測が阻まれてきた。本研究では、超音波流速分布計測法を基にし、流動そのものを計測することで噴流流量を定量的に計測する手法の開発を行い、その適用可能性を実深海底熱水噴出孔において検証することを目指した。研究においては、実験室による検証を行い、その妥当性を確認し、深海底実環境への適用できる装置の開発を行い、提案する手法の適用可能性について明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で行った内容は、開空間における熱水噴流流量の直接計測による定量的観測方法の開発という新しい研究であり、実験流体力学の最先端手法を応用することでこれまで計測が困難であった、長期間の熱水噴出流量の観測を実現することを目指した。その実現に向け、地球最後のフロンティアと言われる深海において超音波流速分布計測(UVP)法を世界で初めて適用することに成功した。また、熱水特有の困難さについても、ある程度の解決を見たことから、今後我が国が海底資源開発を行う上で重要な知見を得たと考える。

研究成果の概要(英文)：Quantitative measurement of hydrothermal vent flow rate is necessary to determine the capacity of hydrothermal deposits, which are one of the important marine resources. In order to measure the capacity of hydrothermal vent as "a resource conveyor from the crust", it is necessary to measure the flow rate quantitatively. In addition to that, long-term observation is desired to investigate the period of activity. However, long-term observation of the flow rate was difficult due to the nature of the hydrothermal fluids for conventional flow meters. In this study, we developed a method to quantitatively measure the flow rate of hydrothermal jets by measuring the flow itself based on the ultrasonic velocity profile method. The idea of the method was firstly experimentally validated in the laboratory scale experiment. Then, the applicability of the method to the actual deep-sea hydrothermal vents was evaluated.

研究分野：実験流体力学

キーワード：海底熱水鉱床 超音波流速分布計測 深海熱水場 噴流

1. 研究開始当初の背景

海洋資源の開発は我が国において国策として進められており、そのひとつに水深 **1,000** メートルを超える深海における海底熱水鉱床がある。海底熱水鉱床では、地下に入り込んだ海水がマグマ等で熱せられ、地殻より溶出した元素を伴って **200~300** の熱水として海底に噴出している。この熱水は外海水により冷却されることで元素の析出を起こし、噴出孔の周囲に鉱床を形成する。日本近海においては、「伊豆小笠原海域」と「沖縄トラフ海域」が海底熱水域として知られており、これらの海域には天然の熱水噴出孔の存在が複数確認されている。また、**2010** 年に沖縄トラフ海域で行われた海底掘削調査の結果できた掘削孔からも熱水が噴出し、人工熱水孔を形成しており、そこで資源の養殖を行う計画も進められている。上述のとおり、海底熱水鉱床における資源の供給源は噴出する「熱水」であり、それぞれの鉱床の「生産力」を評価するためには、定量的に熱水の流量を計測する必要がある。

噴出孔からの熱水流量の計測は、資源評価のみならず地球科学的な見地からも重要である事から、これまでに数多くの試みがなされてきた。しかしながら、高温流であるがゆえに一般的な流量計の適用は困難であった。さらに熱水は噴出後すぐに元素の析出が始まり、タービン式流量計などにあっては析出物などが回転部を障害し、短時間で計測が不能となる。析出粒子を光学的に観測することで流量を計測する手法もあるが、計測装置が煩雑となる。また、これら従来型の流量計測法では **ROV** 等による操作が必要となることから観測が数時間程度の短期間に制約され、最終的な資源量を評価するためには必要な数ヶ月におよぶ長期間の観測による熱水噴出孔の流量変化を検出することは難しかった。こうしたなか、深海底の環境において熱水の噴出流量を長期間定量的に観測可能な計測手法の開発が求められている。

そうしたなか、申請者が開発を行ってきた超音波流速分布計測(**Ultrasonic Velocity Profiling; UVP**)法は流体内に超音波パルスを送信し、その反射信号のドップラー周波数を解析することで速度分布を求めることが出来る計測手法である。本手法では、速度分布を積分することで流量を算出できる。また、計測に超音波を用いる事から原理的に非侵襲計測であり、析出粒子による機構的障害を受けづらく、必要電力量も小さいことから海底における長期間観測に適している。海底熱水鉱床の熱水を適用先と考えたときに、上述の特徴をもつ **UVP** 法を基にした流量計測手法は極めて有望な計測手法であるといえる。

2. 研究の目的

上記の背景を基に、本研究では、これまでになかった熱水流量の定量的観測方法の開発を行い、実際の深海底における熱水噴出孔にて長期間観測を行うことで、熱水鉱床の「生産量」を定量的に評価するための手法を創出することを目的とした。その中で、流体力学的な知見をもとに流動構造を考慮することで開空間への噴流流量計を実現することを目指した。また、深海底熱水噴流という複雑な事象を実験的手法によって要素分解し、定量的な観測を目指す。その上で、実環境においてフィジビリティスタディーを行い、開発した手法の適用可能性について明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、海底熱水噴出孔からの流体流量の定量的観測方法の開発を目的とした。その実現の上で課題となるのが、流動構造を考慮した定量的な流量の導出、熱水起因温度場の計測への影響、深海底実環境への適用可能性などになる。研究においては、これらを段階的に調査し、随時実験航海の機会を実環境での試験を試みた。なお、実環境としては中部沖縄トラフ伊平屋海域にある熱水域を対象として行った。

4. 研究成果

まず、実験室での模擬体系において流動構造を考慮した定量的な流量の導出に取り組み、実験体系の構築および改良を進めた。実験体系としては常温常圧下の透明円筒容器を採用し、超音波による計測と並行してその対となる光学計測を行い、それらの結果を比較することで計測の妥当性について担保しながら評価を進めた。レーザシート光による可視化を行い、**PIV** 法で計測した流速分布を図 1 に示す。実験体系では整流が機能しており左右対称の分布が得られていることが分かる。計測結果と併せて境界層理論による噴流の流速分布を赤線で、ガウス分布によるフィッティングを緑線で示している。既往文献にもあるように、円形垂直噴流はガウス分布によるフィッティングによく従うことが確認出来た。従って、本研究が目的とする流速分布は、ガウス分布を積分する形で求めることが出来る。**PIV** 法で求められた流速分布を基に算出した流量と初期流量との比を計算したところ、エントレインメントにより、噴流の発達に従っ

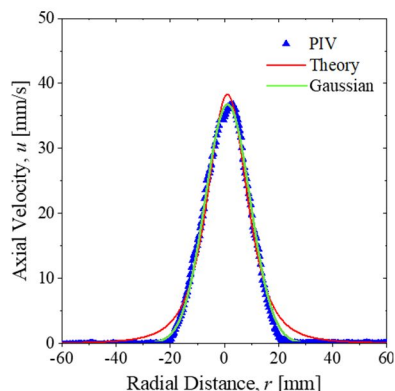


図 1. PIV 法による流速分布

て、流量が増大していることが確認出来た。続いて、**PIV**法と**UVP**法の同時計測による速度分布の比較結果を図2に示す。**UVP**法の場合、計測線方向の速度成分を算出する形となるため、主流方向に対して10°角度を付けた計測としている。そのため、速度分布は左右対称にはならない。**PIV**法と**UVP**法は概して良い一致を見せているが、全体的に速度分布も過小評価する傾向にあった。これは、噴流の初期径が10 mmであるのに対し、超音波ビーム径が4 mmとなることに起因すると考えられる。噴流の軸対称性を仮定してガウス分布によるフィッティングをした上で求めた流量についても、同様に初期流量と比して過小評価する傾向にあった。この影響は、実験体系特有の物であると考えられることから、実環境については十分噴流径が大きく問題にならず、手法としては妥当であると思料する。また、実験室におけるトレーサ粒子濃度を制御できる環境と異なり、実深海では自然界にある粒子をトレーサ粒子として用いる必要がある。そのことから、トレーサ粒子濃度と計測精度がどのような関係にあるかについて、理論と実験の両面から評価を行った。その結果、振幅強度を得ることだけでは低粒子濃度でも差し支えないが、ドップラー効果を検出するには不十分である事が実験から示された。

続いて、調査航海研究を通じた実環境におけるフィジビリティスタディーについて述べる。調査航海は沖縄トラフ域にて行い、複数の熱水孔における計測を初年度に行った。計測に用いるための深海用の計測機器を構築し、深海における**UVP**法の適用を世界で初めて行った。計測された結果からは、実験室で行った計測と同様の流速分布が観測することが出来た一方、振幅強度分布の説明に検討が必要であることが分かった。具体的には、噴流の境界において明確な振幅のピークを有する結果が得られており、これは、ポテンシャルコア部で強い振幅のピークが見られた実験室での計測結果とは異なる結果であった。そこで、実験室において熱水起因の物性変化を模擬した体系を構築し、同様の実験を試みた上で深海熱水噴流計測時に見られた同様の計測結果が得られるかについて検討を行った。また、数値解析を併用して超音波の伝播を解析した。深海熱水噴流の音速については参考となる文献が限られているが、適宜データを補間することで、妥当な評価が行えることを確認出来た。これらの結果から、噴流内における熱水由来の急峻な温度勾配が超音波計測において影響を与えていることを示唆する結果を見いだした。速度分布計測については、

ROV搭載のカメラ画像を用いた**PIV**計測と比較することで計測の妥当性検証を行った。図3に**PIV**計測結果を、比較結果を図4に示す。計測速度はほぼ同一のレンジを示しており、定性的に良い一致を見せた。このほかの流速分布結果で良いものもいくつか見られた。その内容については今後論文として報告を予定している。

初年度のフィジビリティスタディーの結果は、熱水の温度分布を評価する必要性を強く示唆する。そこで、研究期間中にもう一度得られた最終年度の航海の機会に際しては、熱水の温度分布を計測するための装置を開発し、その検証を行った。**ROV**を用いた計測では、その絶対位置精度を担保することが困難であることから、グリッド状に温度計測素子を配置した熱水温度分布計を考案し、計測に供することとした。また、熱電効果を用いた計測であることから、計測機器の回路構成が計測誤差に与える影響が懸念されるため、実験室においてその評価を行い、その適用可能性について示した。残念ながら、温度分布計測装置については、海況の関係から温度分布計測までは至らなかったものの、非常に活発な熱水噴流の流速分布計測を行い、そのデータ化を行うことが出来た。得られたデータを基に総合的に熱水の流動を評価し、今後の定量的観測につなげるための基盤につながると考える。一方で、**ROV**を用いた計測特有の課題点もいくつか浮かび上がった。例えば、上述の絶対位置の把握や、ビデオ情報から自然熱水噴出孔の探索を行う技術などがあることで、より潜航の効率を向上することができると思料する。

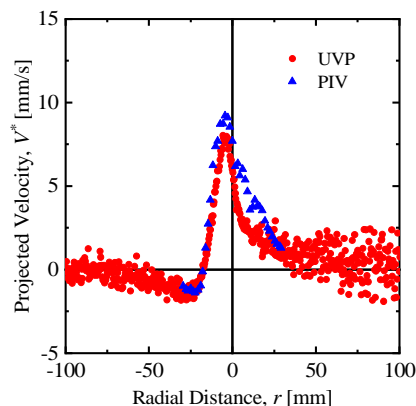


図 2. PIV 法と UVP 法の比較

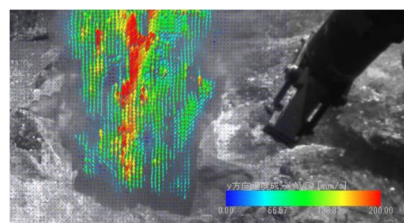


図 3. 自然熱水孔の PIV 計測

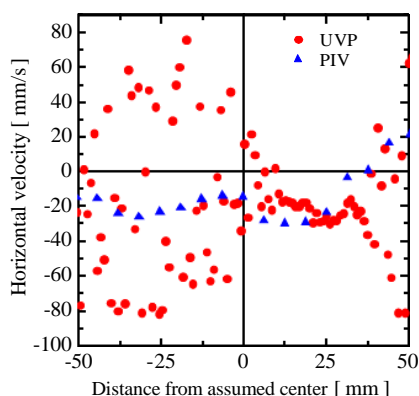


図 4. 自然熱水孔の流速分布計測

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Tomonori IHARA and Tatsuya HAZUKU
2. 発表標題 Measurement Quality of UVP under Low Particle Concentration
3. 学会等名 11th International Symposium on Measurement Techniques for Multiphase Flows (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 井原智則, 波津久達也, 野崎達生, 北田数也, 武田靖
2. 発表標題 UVPを用いた海底熱水噴出孔周り流動の可視化
3. 学会等名 第47回可視化情報シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomonori IHARA, Tatsuya HAZUKU, Tomoji TAKAMASA and Yasushi TAKEDA
2. 発表標題 Preliminary Measurement of Flow Rate of Jet Flow Using PIV and UVP
3. 学会等名 18th International Symposium on Flow Visualization (国際学会)
4. 発表年 2018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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------