

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04101

研究課題名（和文）火山観測に用いられる超低周波音測定器の感度校正法の開発

研究課題名（英文）Development of the sensitivity calibration method for infrasound measurement devices used in volcanic activity observations

研究代表者

山田 桂輔（Yamada, Keisuke）

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：90613993

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）：本研究では、超低周波音モニタリングによる防災技術への貢献を目的とし、未確立であった0.1 Hz～1 Hzにおけるマイクロホン感度の校正法の開発を行った。超低周波数領域に特化したマイクロホン感度校正法として水柱型音圧発生装置を用いた校正システムの開発を行うと共に、従来の校正法との比較と不確かさの評価により校正結果の信頼性の確認を行った。結果として、トレーサビリティを確保した信頼性のある校正を0.2 dBの不確かさで行うことを可能とした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超低周波音は遠方まで届くため、火山噴火など大規模自然災害の観測に利用して防災に役立てる研究が進んでいる。しかし観測に使用する計測器の校正方法が確立していないことが課題であった。本研究の成果により超低周波数領域におけるマイクロホンの感度が校正可能になることで、複数点での観測結果の正しい比較・統合が可能となり、超低周波音モニタリングによる防災システムの実用化の加速が期待できる。

研究成果の概要（英文）：This study developed a calibration method for microphone sensitivity from 0.1 Hz to 1 Hz, which had not been previously established, with the aim of contributing to disaster prevention technology through infrasound monitoring. We developed a calibration system using a liquid-column type sound pressure generator as a microphone sensitivity calibration method specialized for the infrasound frequency range, enabling reliable calibration with traceability and an uncertainty of 0.2 dB. The results of this study allow for accurate comparison and integration of infrasound observation data from multiple locations, which is expected to accelerate the practical application of disaster prevention systems utilizing infrasound monitoring.

研究分野：音響工学

キーワード：計測 校正 音響 超低周波音 火山 防災 マイクロホン

## 1. 研究開始当初の背景

人が音として知覚できない 20 Hz 以下の超低周波音は、可聴音に比べて減衰しにくいため音源の情報が遠方まで伝わる。この特徴を利用し、超低周波音を観測して火山噴火の研究・監視に利用する試みが行われている。超低周波音の観測結果を地震計や映像などの他のデータとも併せることで、噴火における一連の力学的過程の解明や、迅速かつ正確な警報発令に貢献することが期待されている。現在、観測範囲の拡大とより多角的なデータの入手のために日本全国に超低周波音の観測網を構築することが計画されている。

しかしこの観測網の構築にあたり、超低周波音の計測器の同等性に関する問題が発生している。火山観測における超低周波音の測定には超低周波数領域に特化したマイクロホンが用いられているが、測定に用いるマイクロホンの型式が異なると同一の火山噴火に対して観測される音圧波形に違いが生じることがある。このような計測器による差は、観測網の各測定点のデータを比較・統合する際に特に問題となる。

この問題の解決法の一つとして、観測網に用いる計測器の型式の統一が挙げられる。しかし既に稼働している機器の置き換えが必要になると共に、将来的な機器の更新の際にデータの連続性に問題が生じる。さらに、すべての観測点に同じ型式の計測器を使用できたとしても、その型式で測定される音圧波形が最も信頼できるものであるという保証はない。

一般的に、計測器の同等性と信頼性を担保するのは「トレーサビリティ」と呼ばれる、国家計量標準まで繋がる校正の連鎖である。例えば可聴域の音響計測では、計測に用いられるマイクロホンは校正の連鎖により国家標準である標準マイクロホン音圧感度校正装置に繋がっている。これにより測定器の信頼性が担保されると共に、メーカーの異なるマイクロホンの同等性が確保される。超低周波音の測定においても、使用する計測器に対しトレーサビリティを確保した校正を実施できれば、使用する測定器の型式が異なっても同等かつ信頼性のあるデータを収集可能となる。

しかし研究開始時点で、国家標準である標準マイクロホン音圧感度校正装置による校正可能範囲は 1 Hz 以上の周波数に限られていた。火山の観測においては 0.1 Hz 程度の低い周波数まで測定が行われているが、0.1 Hz ~ 1 Hz においてはトレーサビリティを確保した校正が可能ではなかった。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、超低周波音計測の信頼性の向上のため、トレーサビリティを確保したマイクロホン校正を 0.1 Hz ~ 1 Hz の周波数範囲において可能にすることである。

従来、マイクロホン感度の校正は音響カプラを用いた相互校正法と呼ばれる方法(以下従来法)により行われてきた。しかし、今回対象とする 1 Hz 未満の周波数では従来法は使用できない。従来法は音響カプラ内の圧力変動過程を断熱変化と仮定して発生音圧を計算するが、カプラ壁面からの熱伝導が起こりやすい超低周波数領域では圧力変動過程が等温変化に近づき、計算値と実際の発生音圧との乖離が大きくなるためである。

それに対し本研究では、独自に開発する液柱型音圧発生装置を用いた校正を行うこととした。液柱型音圧発生装置は液柱圧力計の原理を応用したもので、液柱の高さの変動により圧力変動を発生させる。従来法と比べ、より直接的に圧力を発生させる方式であり、圧力変動過程として断熱圧縮と等温圧縮のどちらを仮定しても、発生音圧にはほとんど影響がない。このため、超低周波数領域においても高精度なマイクロホン校正が可能となる。

## 3. 研究の方法

本研究ではマイクロホンの 0.1 Hz ~ 1 Hz における感度校正法の開発を行った。トレーサビリティが確保された校正には、校正値だけでなく校正の不確かさの値も必要とされるため、開発した校正の不確かさ評価も併せて行った。

本研究では、新たなマイクロホン感度校正法として、液柱型音圧発生装置を用いた校正法の開発を行った。図 1 に校正装置の模式図を示す。校正系は、マイクロホンを設置した上部円筒、加振器により上下振動が可能な下部水槽、およびレーザ干渉計による変位測定系からなる。

マイクロホン感度の決定は以下の手順で行われる。まずマイクロホンをセットした円筒を水槽内に挿入し、円筒の大気圧バランス用のバルブを解放した状態で水槽を水で満たす。円筒の下端まで水で満たされたら、大気圧バランス用のバルブを閉める。この状態で水槽下部の加振器を駆動すると、水槽の水位が変動し、それに伴って円筒内の圧力が変動する。レーザ干渉計で測定した水槽の振動変位から水槽の水位と円筒内の水位の差を計算することにより、円筒内部の圧力変動すなわちマイクロホンにかかる音圧が求められる。同時にマイクロホンの出力電圧を測定することで、マイクロホンの感度を決定できる。

本音圧発生方式においても従来法と同様に円筒内部からの熱伝導は発生するが、熱伝導によ

る円筒内部圧力の変化は水槽の水位と円筒内の水位の差によって補填される形になる。そのため水槽の断面積を円筒の断面積と比べて十分大きくとれば、熱伝導の影響を従来法と比べて非常に小さくでき、超低周波数領域においても発生音圧を高精度に求めることができる。

校正の不確かさは、結果にばらつきを与える要因（不確かさ要因）を個々に挙げ、それらの要因により校正結果がどの程度ばらつくのかを実験や計算で求めることにより評価される。本校正法における主な不確かさ要因には水槽振動の安定性や振動振幅の測定精度などが挙げられる。これらの不確かさ要因を精査し、校正の不確かさを求めた。

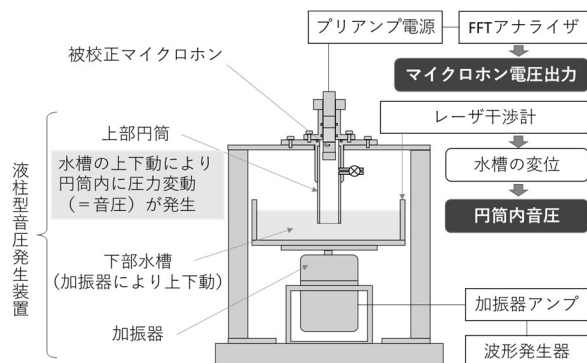


図 1：液柱型音圧発生装置を用いた感度校正システムの模式図

#### 4. 研究成果

研究期間内の目標は、新規校正法による校正値が、1 Hz において従来法の校正値と 0.2 dB (従来法の校正の不確かさ) の範囲内で一致すること、および校正の不確かさが、0.1 Hz ~ 1 Hz の範囲内で 0.2 dB 以下となることであった。一部周波数で当初予定していた方法から変更はあったものの目標は達成され、0.1 Hz ~ 1 Hz においてトレーサビリティを確保した校正が可能となった。マイクロホンに対する感度校正結果の例を図 2 に示す。

開発において主な問題となったのは、暗騒音（外部ノイズ）およびシステム内の流体運動に伴う余剰圧力の発生であった。このうち暗騒音に対しては、専用の遮音箱を新たに設計することで影響を十分に小さくすることに成功した。流体運動の影響に対しては、理論計算により補正式を構築することで影響の低減をはかった。しかし周波数が高くなるほど流体運動の複雑化により補正の信頼性が低下し、1 Hz では目標とする不確かさにわずかに届かなかった。そこで新規校正法の開発に問題が生じた場合の計画に従い、従来法における発生圧力の補正法を改良することにより、校正の下限を 0.5 Hz まで拡張することに成功した。0.5 Hz において、新規校正法と従来法は連続性が確認できている。

なお、これらの内容は国際論文誌へ投稿中である。

本研究成果は超低周波音測定の信頼性を向上させ、超低周波音による火山観測技術の発展を促進する。また、超低周波音観測網を構成する計測器を同一型式で揃える必要を無くし、観測網の拡大を容易にする。さらに、次のステップとして現在気圧計で測定されているような大気圧変動（津波や台風などにより発生、0.01 Hz ~ 0.1 Hz) のマイクロホンによる測定が視野に入り、超低周波音観測網による測定データの利用範囲拡大が見込まれる。

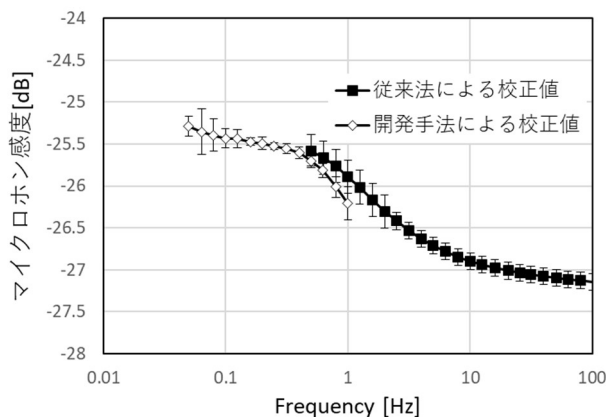


図 2：マイクロホンに対する感度校正結果の例。エラーバーは校正の不確かさを示す。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 平野琴、山田桂輔、高橋弘宜、野里英明
2. 発表標題 超低周波域におけるマイクロホン感度評価装置の開発
3. 学会等名 2022年度 計量標準総合センター 成果発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 平野琴，山田桂輔，野里英明，高橋弘宜
2. 発表標題 液柱型音圧発生装置による超低周波域でのマイクロホン感度校正の実現 - 液柱型音圧発生装置の基礎的評価 -
3. 学会等名 日本音響学会2022年春季研究発表会
4. 発表年 2022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
---------	---------