

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：21602

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04112

研究課題名（和文）極限環境に適用可能な小型高性能広帯域地震計の開発と耐環境調査

研究課題名（英文）Development of a small-sized high performance broadband seismometer applicable to extreme environments and investigation of its environment resistance

研究代表者

山田 竜平（Yamada, Ryuhei）

会津大学・コンピュータ理工学部・准教授

研究者番号：60647379

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、宇宙機用を開発した小型短周期地震計をベースに広帯域地震計を開発し、極限環境に適用できるようにその耐環境性を調査することを目的とした。そのため、まず地震計の長周期側での観測性能の向上と可搬性のため、地震計の周波数応答を制御する小型低ノイズ負帰還回路を設計開発し、小型サイズを維持して固有周期を1秒から10秒まで拡張できるようにした。また、地震観測所内で市販の広帯域計との比較観測を行い、中サイズの地震に対し遜色ない応答を示す事も確認した。さらに、負帰還回路の高温（ $\pm 80$ ）での周波数応答変化とセンサー部の $-180$ までの極低温下での応答を調べ、観測に必要な特性を維持できる事も実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

広帯域地震計は地震研究や防災の観点から広く配置され利用されている。一方、現状の市販品は海底や火山火口付近、極域等の極限環境に特化したものでなく、観測設置範囲に制約がある。そこで、本研究では宇宙機用を開発された小型短周期地震計をベースに、極限環境に適用可能な小型高性能広帯域地震計の実現を目指し、負帰還回路とセンサーから成る地震計のベースモデルを開発・構築した。また、実際に極限環境で想定される高温下で観測に必要な特性を維持する事も確認できた。今後、この地震計の実用性を高める事で、人が近づきにくい地震災害現場や科学的に重要な観測点に広く展開できる地震観測システムが実現される事になる。

研究成果の概要（英文）：The objectives of this study are development of a broadband seismometer based on the small-sized short period seismometer and investigation of its environmental resistance to apply it to extreme environments. To improve the response in long period region, we have developed the small-sized and low noise feedback circuit to control the frequency response of the broadband seismometer, and the resonant period of 1 sec is lengthened to 10 sec with keeping the small size.

Then, we have performed the observation test of the developed seismometer in a seismic station and confirmed that it can response to middle-scale earthquake as well as the reference broadband seismometer (CMG-3). The frequency response of the feedback circuit was investigated from  $-80$  to  $+80$  and the required response was kept within the temperature range. Then, we have also verified the sensor of the broadband seismometer had the required characteristic for observation under extreme low temperature until  $-180$ .

研究分野：地球物理学、月惑星探査、ロボット工学

キーワード：地震計 広帯域化 負帰還回路 極限環境 地震観測 温度特性

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

固体天体の内部構造や地震活動度を網羅的に調べるには、地震観測ネットワークの拡張、高密度な展開が必須であり、特に、人が容易に立ち入れない極限環境下(火山地域、海底、極域、月惑星等)への地震観測網の展開は、観測の網羅性を高め、人が容易に近づけない未知領域へのアプローチを可能とする。また、海溝域や活火山の火口付近への地震計の設置は、海溝型地震や噴火の予兆をいち早く捉えられることで、防災の観点からも重要となる。

一方、極限環境域への多数の地震計配置は一般に容易ではなく、極力、少ない観測点で多くの観測成果を得るため、広い観測周波数帯域をカバーする高感度広帯域地震計を設置する事が望まれる。現状、幅広く極限環境に適用でき、かつ極力無人で極限環境まで運搬、設置可能な可搬性を有した小型の広帯域地震計は存在しないため、科学的かつ防災の観点からも一級の地震観測データを得るため、極限環境に適用可能な小型高性能広帯域地震計の開発と観測への適用が重要となってくる。

### 2. 研究の目的

研究代表者はこれまで宇宙機用としての小型高感度の固有周期 1 秒の短周期地震計の開発を実施してきた。この地震計は月惑星探査に適用できるように小型軽量、高感度を実現している。また、無人で観測点を展開するのに優れた投下型貫入プローブであるペネトレータに搭載できるよう、高い耐衝撃性も有している。研究代表者は、この極限環境用として高いポテンシャルをもつ短周期地震計をベースに広帯域地震計(PNT-CDS(Penetrator Capacitive Displacement Sensor))の開発を進めてきた。この開発では、短周期地震計の振子とケースの両端に電極板を張り付け、検波回路を接続して容量変位計として使用できるようにし、更に長周期側の感度を拡張する負帰還回路を接続して、広帯域地震計への改良を図った。研究開始当初、設計・製作した負帰還回路で固有周期 1 秒から 10-30 秒までの長周期側の感度拡張を達成できていたが、一方で、長周期側の観測波形はノイズが支配的であり、現状、十分に観測に適用できるレベルではなかった。また、極限環境への適用性を検証するための、PNT-CDS の現状の耐環境性も調査されていなかった。

そこで、本研究では、

- (1)長周期側での地震観測を実現するための最適な負帰還回路開発と低ノイズ化
- (2)想定される極限環境下での PNT-CDS の特性調査

を実施する事を目的とし、PNT-CDS の実用性を高める事を目指した。

### 3. 研究の方法

上記、目的(1)、(2)に対して実行した研究手法について記載する。

- (1)長周期側での地震観測を実現するための最適な負帰還回路設計と低ノイズ化

研究開始当初、PNT-CDS の固有周期が 1 秒から最大で 30 秒になるよう負帰還回路を設計していたが、長周期側の感度を上げすぎることによってノイズが必要以上に増幅されている可能性があった。そこで、本研究では、固有周期 10 秒、20 秒用の負帰還回路も設計・製作し、そのノイズレベルについてモデル計算と実験からどの回路が最適であるか検証を行った。また、回路に使用する OP アンプについても、低ノイズの OP アンプを数種類(OP97, OP27, OPA827, TLC2201)選択・用意して、観測に最適な OP アンプについても選別を行った。

更に、現状の負帰還回路は試作用で約 20cm 四方の Box 型にしていたため、センサーサイズ(5cm x 5cm)よりも大きく、またノイズ混入経路も多い事が懸念されていた。そこで、上述したノイズ低減に最適な負帰還回路設計ができれば、その回路のセンサーサイズ程度への小型化も行い、PNT-CDS の可搬性と性能の向上も見込む。そして、小型負帰還回路の製作後は、地震観測所において製作した回路を接続した PNT-CDS の周波数応答調査とリファレンス地震計との比較地震観測を行い、性能を評価する。

加えて、PNT-CDS のブラウンノイズの低減を行うことも考慮して、地震計を真空チャンバー内に封入し、真空下での PNT-CDS の性能を調査する事も計画した。

- (2) 想定される極限環境下での PNT-CDS の特性調査

本研究では火山火口付近や極域、月惑星表面のような高温、低温環境を想定して、その温度環境を模擬した中に地震計を曝して、その周波数応答や出力を調べるようにした。なお、後述するよう、現状、このような極限環境下で振子の中立位置(地動検出可能範囲)を維持するのは困難であったので、今回は、センサー部(短周期地震計)と負帰還回路部とを分け

て、それぞれで特性を調査した。

まず、回路部に関しては、恒温槽の中に入れて-80 ~ +80 まで周辺温度を変化させて、その周波数応答を調べるようにした。短周期地震計として機能する PNT-CDS 地震計センサー部に関しては、2027 年に打ち上げ予定の NASA の土星衛星探査計画ドラゴンフライミッションに提供する予定であり、探査地であるタイタン表面の温度-180 での地震観測を想定して極低温下での特性を調べるようにした。この極低温環境を実現するため、地震計センサー周辺を液体窒素で満たした状況で、センサーデータを取得できる試験環境を構築して、実験を行った。

#### 4. 研究成果

(1), (2) に対する研究成果、及び本研究のまとめと今後の展望を以下項目に分けて記載する。

##### (1) 長周期側での地震観測を実現するための最適な負帰還回路開発と低ノイズ化

###### 最適な負帰還回路設計

3. (1)に記載したよう、センサーと接続してそれぞれ固有周期 10 秒、20 秒、30 秒を実現する負帰還回路を設計、試作した。そして、実際に広帯域地震計として設計どおりの周波数応答(振幅応答、位相応答)を実現する事を FFT アナライザによる測定で確認した後に、入力ショートノイズを測定して、各回路のノイズレベルを評価した。この際、上述した 4 つの低ノイズ OP アンプ(OP97, OP27, OPA827, TLC2201)を入れ替えて、各 OP アンプと組み合わせた際のノイズレベルについてもモデル計算と実験により評価した。結果、現状の回路構成においては、固有周期 10 秒モデルと OP97 の組み合わせで最もノイズレベルが低くなる事を示せた。

###### 負帰還回路の小型化

で試作した負帰還回路は試験のため十数 cm サイズの Box 型で製作したものであったが、広帯域地震計として極限環境に持ち込むのに実用的なサイズにし、かつノイズ混入経路を減らすため、負帰還回路の小型化を図った。この回路では、で述べた固有周期 10 秒モデルの構成で OP97 を使用するようし、回路素子(抵抗・コンデンサー)含め表面実装品を用いることで、センサーと同サイズ(5cm 四方)になるよう設計・製作を行った。そして、実際に製作した小型回路の周波数応答を測定し、設計通りの応答を示す事を確認できた。

###### PNT-CDS の性能調査

開発した PNT-CDS を静穏環境が実現できる地震観測所(江刺地球潮汐観測所(岩手県奥州市))に持ち込み、周波数応答調査と地動観測試験を実施した。地震観測所内では、周辺環境ノイズが少ないため、低 S/N の測定データの取得と微小振動に対する応答を調べることができる。まず、観測所内での周波数応答調査ではセンサー+小型負帰還回路の広帯域地震計としての応答を FFT アナライザにより調べ、固有周期 10 秒の設計通りの応答を示す事を確認した。

次に、地動観測試験では、リファレンスとして広く使用されている広帯域地震計 CMG-3 と広帯域化する前の短周期地震計(PNT-CDS センサー部)を用意し、並行観測を行った。その結果、まず、PNT-CDS と短周期地震計との観測波形の比較より、PNT-CDS の方で明らかに 1 秒よりも長周期側で高い感度で地動を観測可能になった事を示せた。また、M4.0 クラスの比較的大きい地震動(最大振幅約 2E-5m/sec)に対しては、PNT-CDS が CMG-3 と 2-3 秒程度の周期まで遜色ない応答を示す事も分かった。一方、更に 1 桁以上低い振幅 1E-6m/sec レベルの微小振動に対しては、PNT-CDS ではうまく地動を検出することができなかった。この原因として、地震計が地動を検出できる振子の可動範囲が狭く、微小振動に対しては、十分な調軸(中立位置合わせ)ができていない事が予測された。そこで、次に PNT-CDS の振子の変位と地震計出力との関係を調査した。

###### PNT-CDS の振子変位と地震計出力との関係調査

この調査においては、レーザ変位計を使用して PNT-CDS センサー部の振子に直接レーザを当て、振子の変位を測定しながら同時に PNT-CDS の出力信号の測定を行った。その結果、振子の可動範囲は約 100  $\mu\text{m}$  あるものの、実際に高感度に信号を出力できる範囲は、数 ~ 10  $\mu\text{m}$  程度しかない事が分かった。これは、小型サイズで高感度を実現するため、負帰還回路中のアンプゲインを高めていた事により、地震計の振子が中立から離れた変位出力が大きい箇所では信号が飽和する事に起因する事も示せた。PNT-CDS で、高感度で安定した地動観測を実現するには、厳密な振子の中立位置調整を行う必要がある事が分かった。

###### フィードバック制御式精密傾斜台(プロトモデル)の開発

PNT-CDS の振子を中立位置付近、数 ~ 10  $\mu\text{m}$  の範囲に安定させ観測を行うには、0.005deg 以下の精度で地震計の設置面の傾斜を制御する必要がある。そこで、PNT-CDS からの出力信号をフィードバックさせて、地震計の傾斜を制御するための精密傾斜台の開発を行った。この傾斜台では、地震計の出力信号のフィードバック量に応じたパルス信号でモータを駆動し、設定した傾斜角度を維持するよう設計する。今回、開発したプロトモデルでは、市販の傾斜計を用いて、傾斜計の 0.000deg からの出力変化量に応じて、傾斜台にフィードバックをかけることで制御の性能を

確かめた。現状、 $\sim 0.003\text{deg}$  以内の精度で傾斜台の傾斜を維持できるようになり、およそ要求精度内での制御が可能となってきた。

#### 真空下での PNT-CDS の性能調査

本研究では、PNT-CDS を真空チャンバー内に封入し、 $1\text{Pa}$  以下の周辺圧力下で地震計のノイズレベルと地動応答を測定・評価する計画も立てていた。そこで、宇宙航空研究開発機構(JAXA)の協力の元、真空下で PNT-CDS の出力信号を測定可能な真空チャンバーと測定系を用意した。一方、上述したように、現状の PNT-CDS では、地動検出可能な振子の可動範囲が狭く、現状の真空チャンバーでは、要求精度での制御が困難である事が分かった。今後、の精密傾斜台の開発後、傾斜台ごとチャンバー内に組み込み、安定した制御を行った状態で真空下での測定を行う必要がある事が分かった。

#### (2)想定される極限環境下での PNT-CDS での特性調査

##### 負帰還回路の温度特性調査

開発した小型負帰還回路を恒温槽の中に入れて、 $-80$  から $+80$  の間で、 $10$  ずつ温度を変化させて、その周波数応答を FFT アナライザによる測定で調査した。その結果、振幅応答、位相応答ともに、測定した温度範囲内では有意な変化がない事を示せた。なお、先行研究により PNT-CDS のセンサー部である短周期地震計の同程度の温度範囲内での特性は調べられており、容量変化検出部の温度変化による異常が生じなければ、測定した温度範囲内では観測に必要な特性は維持されるものと推測される。

##### PNT-CDS センサー部の極低温下特性調査

本調査では上述した NASA ドラゴンフライミッションを想定して、JAXA 主導の元に地震計周囲を液体窒素環境に満たし、極低温下での地震計の応答を調べられる試験系を構築した。そして、この試験系により常温から $-180$  までの温度下で地震計の出力信号を得る事ができるようになった。この極低温試験の結果、まず、 $-180$  下であっても、地震計の振子は問題なく振動し、地動に対する出力信号を得られる事が分かった。また、常温から $-180$  までの地震計の固有周波数、減衰定数等の特性値の変化も調べる事ができ、極低温下での地震観測が可能である事も示すことができた。

#### (まとめと今後の展望)

本研究課題を通して、極限環境への適用を想定した小型容量変位式広帯域地震計 PNT-CDS のベースとなるモデルを構築する事ができた。このモデルでは、センサー部のみで固有周期  $1$  秒であったのを固有周期  $10$  秒まで拡張し、長周期側の感度を拡張させる事ができた。また、広帯域化を実現する負帰還回路もセンサーサイズ( $\sim 5\text{cm}$  四方)程度まで小型化し、実用的な可搬性を有する事ができた。実際の観測性能については、従来の短周期計と比較して、長周期側で高い感度で地動を観測する事ができるようになり、ある程度大きい地震動( $M4$  程度以上)に対しては、数秒程度までの周期であれば CMG-3 と遜色ない応答を示す事もできる。一方で、地動を検出できる振子の可動範囲が数  $\mu\text{m}$ ~ $10\mu\text{m}$  程度と狭く、現状、安定した観測を行う事が困難である事も示唆された。そこで、センサーからの信号出力をフィードバックさせて傾斜をコントロールする制御式精密傾斜台を開発し、現状、 $\sim 0.003\text{deg}$  精度で安定した傾斜を維持できるようになった。今後、この傾斜台と PNT-CDS との組み合わせを実現したり、負帰還回路のアンプゲイン等も調整して信号が飽和する振子変位の範囲を減らしたりすることで、安定した観測を実現できるようにする事が課題となる。

また、本研究で極低温( $-180$ )から高温( $+80$ )までの温度変化に対する負帰還回路とセンサーの応答を調べた。現状、上述した振子の出力範囲の安定度の問題で PNT-CDS 全体での温度特性は調査できていないが、回路とセンサー部は高低温環境下でも観測に必要な特性を維持し、信号出力が可能であるので、極限環境への適用性を示唆する事ができている。また、本研究課題では計画当初、ペネトレータに搭載して、耐衝撃性も調査する予定であったが、衝撃により地震計内の電極板が破損した際の復旧の目途がつけられなかったため、本課題では安全上の観点から、この調査は行わなかった。

現状、PNT-CDS は実用段階までには至らなかったが、基本的な性能は確立できつつあり、観測の安定度を実現する見通しも立てられている。また、極限環境適用へのポテンシャルも示せたので、今度、更に開発を進めることで、従来にない、極限環境域に適用できかつ小型軽量で高性能の広帯域地震計の実現を目指していく。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔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 山田 竜平
2. 発表標題 極限環境域に適用可能な小型高性能広帯域地震計の開発
3. 学会等名 日本地震学会2022年度秋季大会
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
研究分担者	浅利 一善  (Asari Kazuyoshi)  (40321583)	国立天文台・RISE月惑星探査プロジェクト・特別客員研究員   (62616)	

	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
研究協力者	白石 浩章  (Shiraishi Hiroaki)		

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