

平成30年9月7日現在

機関番号：21602

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K21600

研究課題名(和文) 極限環境域への地震観測網展開を目指した広帯域地震計の開発研究

研究課題名(英文) Development of the broadband seismometer to construct a seismic network in ultimate environmental areas

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・特別研究支援者

研究者番号：60647379

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、月探査ペネトレータ用に開発した短周期地震計をベースに極限環境域(海底、火山地域、極域、月惑星)に展開可能な広帯域地震計の開発を行った。この開発では地震計の周波数応答の広帯域化のための負帰還回路を設計・製作して、地震計の固有周期を1秒から約30秒まで拡張することができた。そして、高感度で、かつ小型軽量の広帯域地震計の初期モデルを構築することができた。実際に、地震観測所で市販の広帯域地震計と比較観測を行ったところ、地震のみでなく微小な振動に対しても応答可能な事を確認できた。また、今後、地震計のノイズ低減や温度特性調査が課題となる事も認識できた。

研究成果の概要(英文)：In this study, I have developed a broadband seismometer applicable to ultimate environmental areas such as ocean bottom, active volcanic area, polar region and lunar and planetary bodies. This broadband sensor is designed based on the short-period sensor loaded on the penetrator system for lunar exploration. I have designed and manufactured the negative feedback circuit and enlarged the resonant period of the seismometer from 1 second to 30 seconds, and this achieved the preliminary model of high sensitive, small and light-weights broadband seismometer. The ground test has been performed to investigate the response to ground motions in comparison to a commercially broadband seismometer in the seismic vault, and it found that our broadband sensor could response to not only seismic events but also micro tremor. It has been recognized that reduction in the noise caused from the seismometer and investigation of the temperature characteristic should be future works.

研究分野：固体地球惑星物理学

キーワード：広帯域地震計 地震観測 極限環境域 回路設計

## 1. 研究開始当初の背景

極限環境域（海底、火山地域、極域、月惑星）への地震観測網の展開は、運搬・設置・運用上の制約で、従来未調査であった領域の内部構造を明らかにするのに有用だけでなく、地震・火山等のモニタリング地点を増やすことで、防災上の観点でも有用となる。例えば、海溝域への地震計の設置は、海溝型地震の予兆を素早く捉える点で有効となり、また人が立ち入れないような火山噴火地域に地震計を設置することで、火山噴火前後のモニタリングが効果的に行えるようになる。

一方、極限環境域への多数の地震計配置は容易でなく、少数観測点でより多くの観測成果を得るため、観測周波数帯域が広く、かつ高感度な広帯域地震計を配置することが望まれる。例えば、周期 1 秒付近の短周期のみでなく、10-20 秒程度の長周期側にも高い感度を実現することで、実体波だけでなく、表面波の観測や、マグマ溜りの振動とされる長周期の火山性震動を捉える事も可能となる。

現在、一般に広く使用される広帯域地震計に Streckheisen 社の STS-2 や Gauralp 社の CMG-3 がある。これらは、0.083-50 Hz に及ぶ広い帯域で高感度の観測を実現できるが、設置が容易でなく、極限環境域での使用に際して必ずしも汎用性が高いわけではない。申請者等はこれまで、月探査ペネトレータ搭載用の固有周期 1 秒の短周期地震計(PNT-SP)の開発を行ってきた。PNT-SP は、(1)同タイプの地震計と比較しても小型、軽量、高感度、(2)無人での観測装置の設置が可能な投下型ハードランディングプローブであるペネトレータに搭載可能、(3)微小地動観測の実績を有する、といった点で、極限環境域に運搬設置し、地震観測を実行するのに有利である。

本研究では、この短周期地震計に着目して、その周波数応答の広帯域化を図り、極限環境域に適用可能な新型の広帯域地震計を確立することを検討した。

## 2. 研究の目的

本研究ではマグネット・コイル式の地震計である PNT-SP に容量変位計とフィードバック機構を取り付けて周波数応答の広帯域化を図り、0.033-50Hz の帯域で高感度(約 2000V/m/sec)を実現して、地震観測が実現可能である事を確認するのが目的となる。ここで目指す帯域と感度は、広帯域地震計として汎用的な CMG3-ESP と同等である。一方、PNT-SP をベースとした広帯域地震計(PNT-CDS と呼ぶ)のサイズと重量は CMG3-ESP の 1/2~1/3 程度となる。本研究を通じた開発により、汎用的な広帯域地震計と比較して、より極限環境域への地震観測網展開に適したセンサーが確立される事が期待される。

## 3. 研究の方法

本研究では図 1 に示すよう PNT-SP の振り子の両端とその向かい合うケース内面に変位検出のための電極板を取り付け、出力端に容量変化検出のための検波回路を接続して静電容量変位計としての広帯域地震計を開発する。

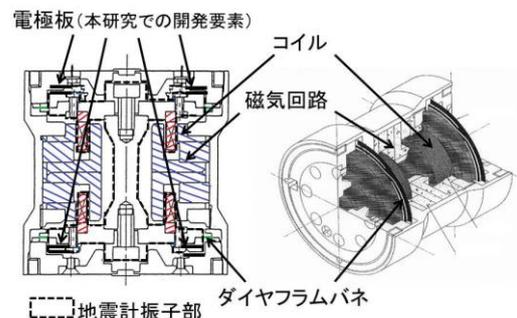


図1.本研究で使用する地震計の断面図と鳥瞰図

図 1 で示すようペネトレータ搭載用として確立した PNT-SP の利点を維持するため、構造は極力維持しながら、要求する性能の実現を目指す。ここでは、基本構造として PNT-SP に取り付ける極板と検波回路、フィードバックコイルには、本研究以前に PNT-SP を製造したメーカーと検討を行い決定した設計値を用いる。そして、そのセンサーの特性に合わせて、要求性能を実現可能な負帰還回路の設計を行うようにした。

設計した負帰還回路の製作後は、実際に容量変位計センサーに取り付けて、期待通りの周波数応答が実現できるかどうか調査を行った。また実際に地震観測所に設置して、CMG3-ESP との比較観測を行い、その地震観測性能について評価を行った。

## 4. 研究成果

### (1)地震計単体の特性調査と負帰還回路設計

本研究では、まずメーカーとの共同で製作した電極板と検波回路を取り付けた容量変位計としての PNT-CDS センサー単体の特性(パッシブ応答)の調査を行った。調査は FFT アナライザを使用して、周波数応答の測定を行い、その測定結果から、センサー単体として、固有周波数 1.72 (Hz)、減衰定数:2.01、変位感度:7.71E+4 (V/m) の値を求める事ができた。

次に、その求めたセンサー単体の応答に合わせて、固有周波数 0.033 (Hz)、固有周波数以上の周波数帯域において速度に対する発電感度約 2000 (V/m/sec)を実現できるような負帰還回路の設計を行った。この設計においては、実際に理論的な周波数応答の式を解いて、目標とする応答を実現できる回路応答と回路に使用する素子(抵抗、容量)を導きだした。その結果、製作したセンサーに対して、

1次の微分回路と2次の位相遅れ/進み回路を接続する事で目標性能を実現できる事が分かった。

#### (2) オフセット調整機構の付加

(1)に基づき、実際に設計・製作した負帰還回路を地震計に取り付け、出力波形の測定を行ったところ、出力が安定せず、頻繁に出力信号が飽和する事が分かった。調査の結果、センサー単体の出力のオフセット変動が大きい事と負帰還回路の初段のアンプのゲインが大きい事により、オフセットが大きくなった際、出力電圧がアンプの電源電圧を超えて出力が飽和する事が示された。そこで、負帰還回路の初段アンプの前にオフセット調整機構も取り付けた。この機構はセンサーからの出力電圧の大きさに応じたフィードバックをかけて、オフセットをキャンセルできるようにしている。この機構を取り付けた結果、安定した信号を出力できる事が確認できた。図2に設計・製作した広帯域地震計センサーと負帰還回路の写真を示す。

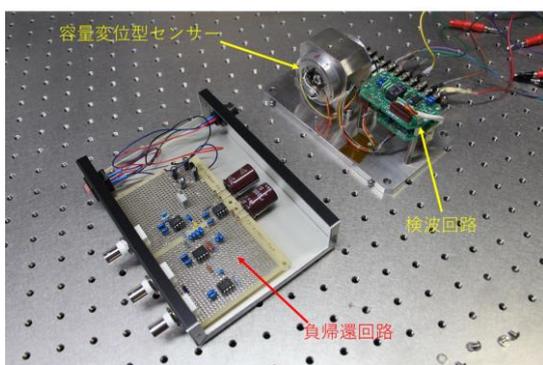


図2. 広帯域地震計 (PNT-CDS)

#### (3) 周波数応答調査結果

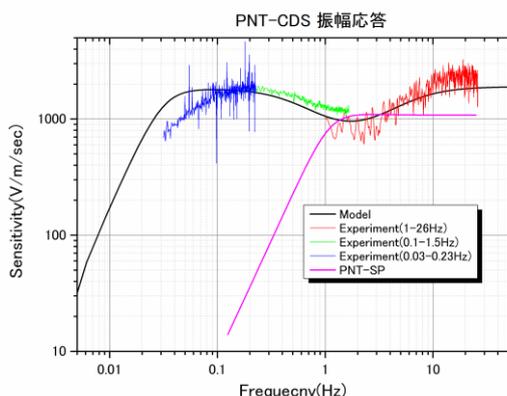


図3. 地震計振幅応答 (モデルと実測値)

製作した PNT-CDS の周波数応答の調査と地動応答調査を国立天文台水沢の江刺地球潮汐観測施設で実施した。周波数応答調査は(1)に記載したのと同様、FFT アナライザを用

いて実行した。図3に PNT-CDS の振幅応答の理論曲線と測定結果、及び PNT-SP の振幅応答とを比較した結果を示す。

図3の黒線が PNT-CDS の振幅応答の理論曲線、赤、青、緑が周波数帯域ごとに分けた測定結果である。図より 0.03Hz 程度まで約 2000V/m/sec の高感度が達成できている事が分かる。また、図の紫線が PNT-SP の振幅応答であり、地震計の広帯域化が実現できた事が示される。

#### (4) 地動応答調査結果

PNT-CDS の地動応答を評価するため、PNT-CDS と広帯域前の短周期計 PNT-SP、市販の広帯域地震計 CMG3-ESP の3台の地震計を江刺地球観測施設内に設置して、比較観測を実施した。図4に試験コンフィグレーションを示す。

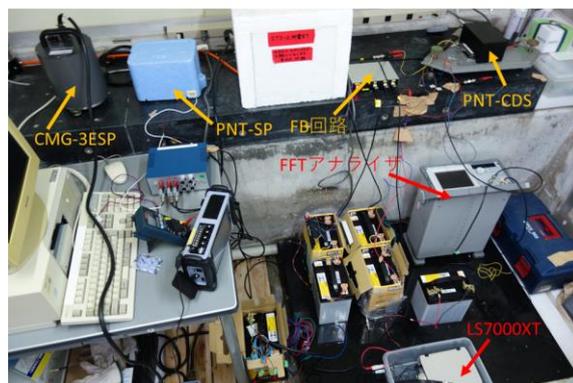


図4. 試験コンフィグレーション

図4で示すコンフィグレーションで観測を行った観測波形を図5に示す。

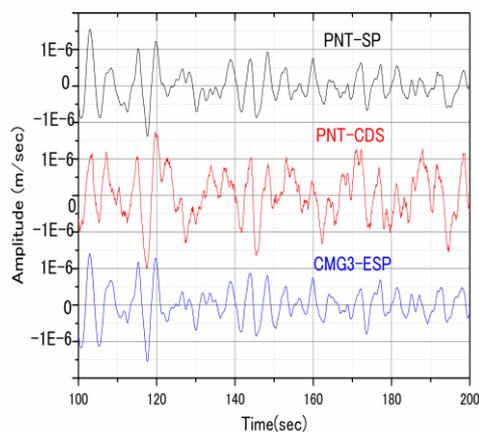


図5. 周波数特性補正波形の比較 (0.05-6.00Hz BPF)

図5は PNT-SP, PNT-CDS, CMG3-ESP の3台の地震計で 1E-6 (m/sec) 程度の地動を観測した

100 秒の波形の例を示している。図 5 で示す各波形には 0.05-6.00Hz の範囲でのバンドパスフィルタをかけており、特に PNT-SP と PNT-CDS で観測した波形は図 3 で示す周波数応答を補正した結果を示している。図 5 での各波形の比較より、PNT-CDS の波形にある程度のノイズはのっているものの、各波形は概ね類似した形状を示し、PNT-CDS は 0.05-6Hz の帯域で  $1E-6$  (m/sec) 程度の常時微動に対して応答可能な事を示している。また、常時微動よりも振幅値の大きい地震イベントに対しては、CMG-3ESP とより高い一致度で地震波形を捉えられることも示した。

図 6 は 3 台の地震計の観測波形に対して PSD (Power Spectral Density) を求めて、周波数領域で比較した結果を示している。

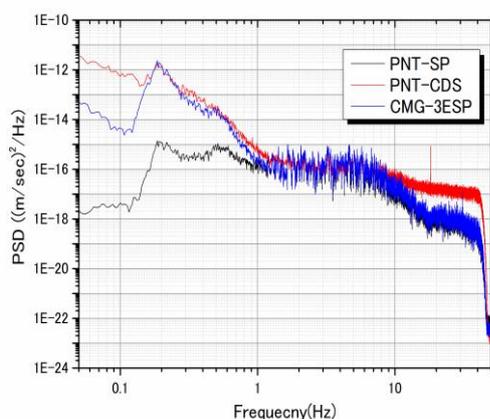


図 6. PSD の比較

図 6 の PSD は地震計の周波数応答の補正は行っていない。この図から、広帯域化を行う事で、PNT-CDS の長周期側の感度が向上し、特性補正を行わなくとも、PNT-SP よりも長周期側の地動が観測できるようになっている事が分かる。一方で、0.2Hz よりも長周期側 (低周波数側) では、CMG3 に比べて、PNT-CDS に卓越したノイズが載っている事が分かる。これは、図 5 で PNT-CDS の観測波形に載っている長周期成分のノイズを示したものと考えられる。このノイズの原因として負帰還回路中のアンプの電気ノイズ、真空引きを行っていない事によるブラウンノイズなどが考えられるが、今後の調査を要する。

#### (5) まとめと課題

本研究では、極限環境域に地震観測網を展開するのに有利な、ペネトレータ搭載用に開発された小型軽量の短周期地震計をベースとした広帯域地震計の開発を行った。この開発により、固有周波数約 0.033 (Hz)、発電感度約 2000 (V/m/sec) を実現でき、かつ小型軽量の広帯域地震計 (PNT-CDS) の初期モデルを開発する事に成功した。また、地震観測所内で市販の広帯域地震計 CMG3-ESP と比較観測を実施したところ、少なくとも 0.05-6.00Hz

の帯域で PNT-CDS は  $1E-6$  (m/sec) 程度の微小な地動に対しても応答可能な事を示すことができた。一方、0.2Hz よりも長周期側では、PNT-CDS では CMG3-ESP には見られない卓越したノイズが観測波形に載る事も示されている。以上の結果を踏まえ、今後、更にロバストなモデルを構築するため、以下の課題を推進する必要な事が分かった。

#### ① 地震計の低ノイズ化

PNT-CDS のノイズモデルを計算した結果、PNT-CDS の 0.2Hz よりも長周期のノイズは負帰還回路中のアンプの電気ノイズ ( $1/f$  ノイズ) か、大気振動で地震計の振り子が振動する事で生じるブラウンノイズが支配的である事が予測される。そこで、ノイズの低減策として、 $1/f$  ノイズを生じないチョッパ型のアンプを負帰還回路に適用する事が一つとして考えられる。また、STS-2 や CMG3 はセンサー内部が真空引きされているので、PNT-CDS でも同様に真空引きを行いノイズが低減されるかどうかを検証する必要がある。

#### ② 温度試験

今回は常温でのみの測定を行ったが、実際の極限環境ではより高温や低温環境での観測も予測される (月惑星環境まで視野に入れた時、最大  $-150^{\circ}\text{C}$  ~  $+150^{\circ}\text{C}$  の範囲の温度変化が予測される)。想定される温度環境下でどの程度特性が変化するか調査し、実観測時にその特性変化をどのように補正するか対応策を今後検討していく必要がある。

#### 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)

[雑誌論文] (計 1 件)

[学会発表] (計 2 件)

(1) ○R. Yamada, H. Shiraiishi, K. Asari, T. Nébut, P. Lognonné, H. Hanada, S. Tanaka, Development of the new broadband seismometer for moonquake observation, Asia Oceania Geosciences Society 2016, China National Convention Center, 中華人民共和国, 北京, 2016 年 7 月 31 日-8 月 5 日

(2) 山田竜平、白石浩章、浅利一善、田中智、極限環境域への地震観測網展開を目指した広帯域地震計の開発、かごしま県民交流センター、鹿児島県鹿児島市、2017 年 10 月 25~27 日

〔図書〕（計 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況（計 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

山田 竜平 (Ryuhei Yamada)  
会津大学コンピュータ理工学部  
特別研究支援者

研究者番号：60647379

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：

### (4) 研究協力者

( )