

速度型地震計で利用する非線形ばねの試作および基本特性評価

貞方 啓希^{a)}・盆子原 康博^{b)}・濱畑 貴之^{c)}・寺藪 信一^{d)}・前田 貴博^{e)}

Fabrication and Evaluation of Nonlinear Springs for a Velocity Seismometer

Hiroki SADAKATA, Yasuhiro BONKOBARA, Takayuki HAMAHATA,
Shinichi TERAZONO, Takahiro MAEDA

Abstract

The authors have developed a domestic borehole seismometer for observing volcanic microearthquakes. In this kind of seismometer, the L-4C-3D short-period velocity seismograph are generally being used, since it has been designated as a specification criterion of velocity seismograph by Japan Meteorological Agency. In this study, with the L-4C vertical directional short period seismometer as objects to be analyzed, the seismic system structure using nonlinear springs and its vibrational properties are examined. In addition, the simple equipment of a seismic system having nonlinear springs is developed and the vibrational properties of the equipment are compared with that of the actual equipment experimentally.

Keywords: Mechanism, Natural frequency, Seismic system, Seismometer, Nonlinear spring

1. はじめに

我が国は、世界の活火山の約6割を有する環太平洋火山帯にあり、全国には111もの活火山が存在している。宮崎県は、霧島連山をはじめ桜島や阿蘇山などの活火山に囲まれた地域であり、近年の火山活動の活発化により、住民の生命や財産ならびに農畜産業などの経済活動が甚大な影響を受ける危険性が高まっている。気象庁は、平成21年に火山噴火予知連絡会において「火山防災のために監視・観測体制の充実等の必要がある火山」として選定された47火山およびその後追加された3火山に対して24時間体制で常時観測と監視を行っている¹⁾。火山活動を観測する方法としては、震動観測、空振観測、地殻変動観測、熱観測、火山ガス観測などがあり、用途毎に様々な計測器が利用されている。このような背景の中で、本研究では産学連携の一環として、震動観測で用いられるボアホール型地震計²⁾の開発を行っている。

ボアホール型地震計は、火山性微小地震を観測するための地震計の一種であり、地表での人工的なノイズを低減するために、地下数千メートルまで掘削された観測井の中に

設置される。地震計には、観測する状態量や震動の周期や大きさに応じて様々な種類があるが、本研究ではとくにサイゾモ系の測定原理を利用した速度型地震計に着目する。この種の地震計としては、米国のSercel社製の3成分短周期速度型地震計(L-4C-3D)が広く普及している。L-4C-3Dは、気象庁が定めた緊急設置用火山観測装置の製作における仕様基準になっており³⁾、これまでに国内の多くの観測点で使用された実績がある。

本研究では、L-4C-3D相当の性能を達成しつつ、独自の機構を導入した純国産のボアホール型地震計の開発を目指している。そこでまず、L-4C-3Dの構造と構成要素の特性について調べた。L-4C-3Dは上下、東西、南北の3成分の震動を測定する地震計であるが、本報では、上下動成分のみの震動を計測するタイプの地震計(L-4C)を対象として分解と組立を行い、構造の分析を行った。詳細については後述するが、L-4Cでは非線形特性を有するダイヤフラムばね³⁾を利用することで、1 Hz程度の固有振動数を有するサイゾモ系を実現していることがわかった。そこで、このばねの構造と特性について調べるために、実機と同等のダイヤフラムばねを製作するとともに、製作した非線形ばねを用いてサイゾモ系を試作した。そして、実機と試作機に対して打撃試験および加振実験を行って動特性について比較を行い、試作機の性能を評価した。

a)工学専攻機械・情報系コース大学院生

b)機械設計システム工学科准教授

c)教育研究支援センター技術職員

d)株式会社アコー代表取締役

e)株式会社アコー

2. 上下動成分地震計 L-4C

2.1 基本構造

図 1(a)は、上下動成分地震計 L-4C を分解したときの写真である。L-4C は、アルミ製の円筒シェルの中にサイズモ系 (1 自由度ばね-質量系) を構成するセンサ本体が設置されている。図 1(b)はサイズモ系の模式図である。このサイズモ系は、主に中央にある軸とその軸を貫通する円筒からなる。軸の中央部には永久磁石が固定されており、円筒の上下にはコイルが設置されている。この円筒がサイズモ系における質量要素に相当する。軸と円筒は、図 2 に示すような非線形ダイヤフラムばねによって結合している。非線形ダイヤフラムばねは軸の上下にそれぞれ 4 枚ずつ設置されており、非常に特徴的な特性を有している。

いま、軸を水平な基礎の上で鉛直に立てて静置すると、円筒が軸の中央付近で平衡する。このとき、ばね要素はすべて平坦な状態となる。その後、基礎を上下に振動させると軸も一緒に振動し、軸に固定された永久磁石と円筒に設置されたコイルとの距離が変化する。このとき、電磁誘導の原理によって磁石と円筒の相対速度に比例した起電力

がコイルに生じる。円筒が慣性系において常に静止していれば、発生した起電力から基礎の速度を計測することができる。そのためには、サイズモ系の固有振動数をなるべく低くする必要がある。実際に実機のサイズモ系の固有振動数を測定したところ、約 1.1 Hz であった。コイルを含む円筒の質量は 0.96 kg であり、固有振動数を実現するには、ばね定数は 46 N/m 程度である必要がある。しかしながら、この大きさのばね定数では 1 kg 程の円筒の自重を支持することはできない。この点について詳しく調査した結果、L-4C では、非線形ダイヤフラムばねを利用して固有振動数の低減化を実現していることがわかった。

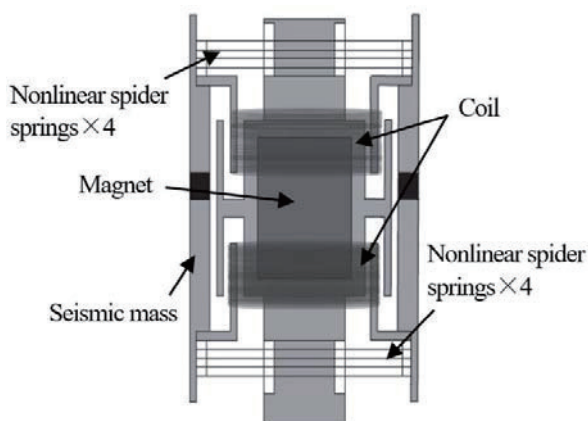
2.2 非線形ダイヤフラムばね

L-4C で使用されている非線形ダイヤフラムばね (以下、単に非線形ばねと呼ぶ) の構造と特性について実験的に調べた。まず、ICP 発光分光分析により成分分析を行った結果、ばねの材質はベリリウム銅(C1720)に近いものであった。形状は、厚さ 0.32 mm の薄板からなり、外径 67.0 mm と 46.7 mm の 2 つのリングが 3 本の細い梁で結合している。また、図 2 に示すように、無負荷時の状態では内側のリングが引き上げられた状態となっている。

次に、非線形ばねのばね特性について調べるため、静荷重実験を行った。図 3 に示すように、非線形ばねを電子天秤の上に置き、内側のリングをハイトゲージに取り付けたアームで押し下げながら荷重の変化を測定した。図 4(a)は、ばねの変位と荷重の関係を求めた結果である。この図では、



(a) 外観



(b) 模式図

図 1. 上下動成分地震計 L-4C



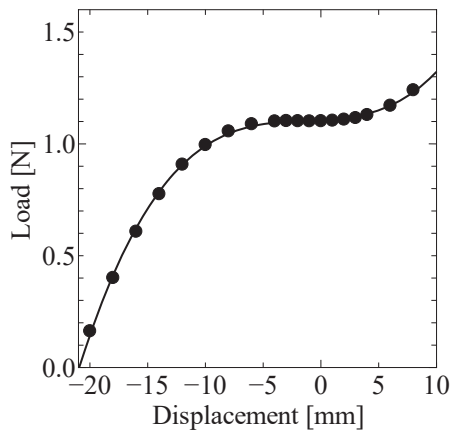
図 2. 非線形ダイヤフラムばね



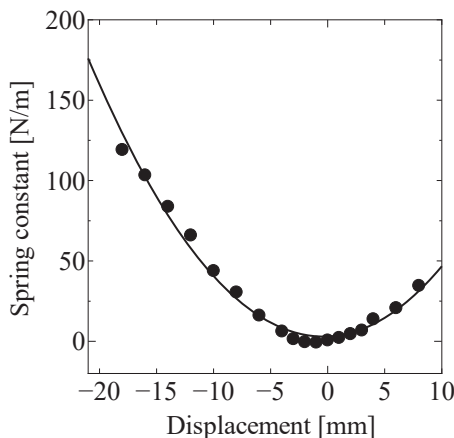
図 3. ばね特性試験の様子

ばねが平坦になったときを原点(0 mm)としている。図中の横軸は、内側のリングの位置(下向きを正)を示し、縦軸は荷重の大きさを示している。図 4(b)は、図 4(a)で求めた荷重変位曲線の勾配からばね定数を求めた結果である。

図 4(a)の結果を見ると、無荷重時(-21 mm)の位置からばねの変位が大きくなるにしたがって荷重が増しているが、その変化は線形的ではなく、原点付近では曲線の勾配が非常に緩やかになり、原点を過ぎるとまた勾配が大きくなっている。これは、図 4(b)に示すように、初期状態の付近ではばね定数が大きく、平坦位置近傍ではばね定数が非常に小さくなるという非線形ばね特性を有していることを表している。したがって、ばねが平坦になる位置がブロックの自重に対する静的平衡位置となるようにサイズモ系を設計すれば、平衡点まわりではばね定数が非常に小さくなるので、サイズモ系の固有振動数を大幅に低減することができる。L-4C では、このようなばね特性を利用して、1 Hz の固有振動数を実現している。



(a) 荷重-変位特性



(b) ばね定数-変位特性

図 4. ばね特性試験結果

3. サイズモ系の試作

3.1 非線形ばねの製作

本報では、実機の特徴を再現する目的で、実機を参考にしてサイズモ系の試作を行った。非線形ばねの製作にあたっては、ばねの材料には実機のものと同じベリリウム銅(C1720)製薄板を用いた。形状については、実機と同一に設計した。ただし、実機では上下 8 枚とも板厚 0.32 mm の材料を用いているが、入手が困難だったため、板厚 0.30 mm と 0.35 mm の薄板を組み合わせる使用することとした。具体的な製作方法は次の通りである。まず、放電加工によりベリリウム銅薄板から原型となるばね要素を切り出す。次に、切り出したばね要素を適当に引き伸ばした状態で治具に固定し、そのまま電気炉に入れて熱処理(焼きなまし)を行い、残留応力を除去する。このときの熱処理の時間は 180 分、温度は 315 度とする⁴⁾。その後、十分な時間炉冷することにより、図 2 のような非線形ばねが完成する。

本検討では、上述の方法により非線形ばねを複数個製作した。そして、上下 4 枚ずつ組み合わせて、なるべく実機に近いばね特性が得られるように、使用するばね要素を選定した。その結果、試作機では上下とも板厚 0.30 mm のものを 3 個、板厚 0.35 mm のものを 1 個用いることにした。ばねを上下 1 枚ずつではなく、4 枚ずつ用いることの利点としては、ばね定数の調整が容易となることが挙げられる。試作したばねでは、同一条件で熱処理を行ってもばね特性に多少のばらつきが生じた。図 5 に、ばね特性に極端な差違が生じた場合の一例を示す。図中の 2 つのばねでは、熱処理後のばねの高さに違いがあり、これがばね特性に大きく影響しているようである。特に、ばねの高さが 18.0 mm よりも高くなると、原点(0 mm)付近におけるばね定数が負になってしまう。このように、1 枚のばねで所望するばね特性を得ることは困難であり、大小差異のあるばねを複数組み合わせる方が効率的である。その他の利点としては、ばね表面の応力の軽減やおもりの運動を拘束するガイドとしての役割が挙げられる。

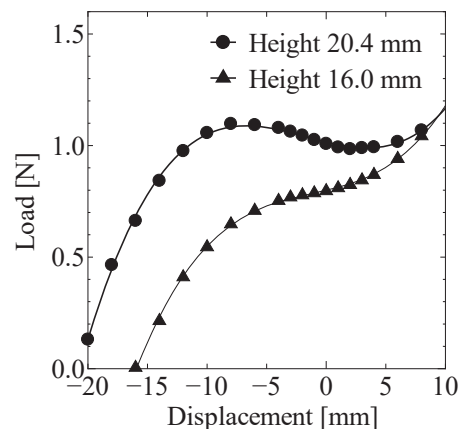


図 5. ばねの高さと特性の関係

図6は、上側の4枚の非線形ばねを組み合わせた状態で、前章と同様の方法で静荷重実験を行った結果である。図6の表示は図4と同様であり、比較のため、実機の非線形ばねを用いて同様の実験を行った結果も示している。この結果を見ると、製作した非線形ばねの特徴は実機と類似しており、ばね要素の平坦位置近傍でばね定数が最小となることが確認できる。ただし、ばねが平坦になるときの荷重は実機よりも0.3N程度小さくなっており、ばね定数は若干大きくなっている。

3.2 試作機

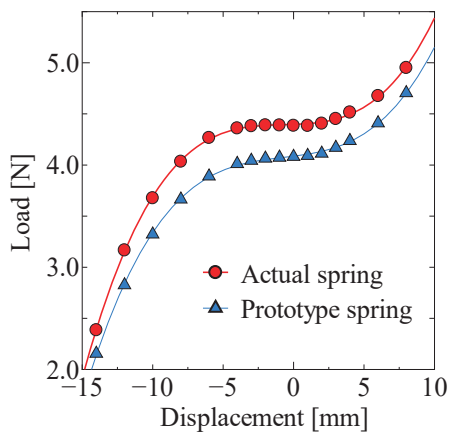
製作した非線形ばねを用いてサイズモ系の試作機を製作した。図7に試作機を示す。ばね要素以外に製作したのは、実機のコイルを含む円筒部分に相当するブロックである。ただし、本実験では振動特性についてのみ検討するため、ブロックにはコイルは設置しておらず、炭素鋼(S45C)とアルミ合金(A5052)とを組み合わせて質量を調整しながら

ら製作した。その他、中心の軸やばね間に設けるスペーサー等については実機のものを使用し、永久磁石については設置していない。ブロックを調整したところ、質量を約0.84kgとすれば、実機と同様に平衡位置で非線形ばねが平坦となった。ブロックの質量が実機の円筒よりも小さくなったのは、図6に示したように製作した非線形ばねでは支えられる荷重が実機よりも小さいことに起因している。

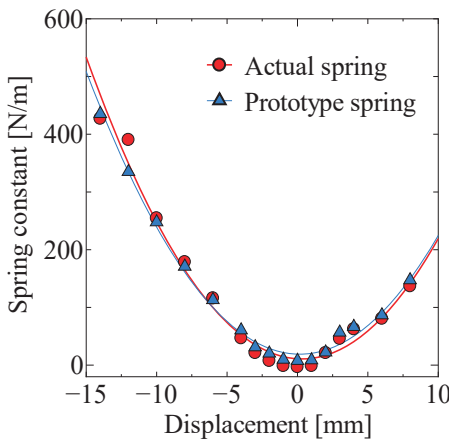
3.3 性能評価

試作機と実機のサイズモ系としての性能について比較した。まず、それぞれのサイズモ系を水平な基礎上に設置し、円筒部分を打撃して自由振動させた。測定した自由振動波形および周波数分析結果を図8に示す。この結果を見ると、試作機の固有振動数は1.25Hzであり、実機に比べて若干高くなっている。これは、図6(b)に示したように、平衡点でのばね定数が実機よりも若干大きいことに起因している。また、図8(a)の自由振動波形から、試作機の減衰は非常に小さいことがわかる。比例粘性減衰を仮定して、減衰比を求めると実機では0.16程度であるのに対して試作機では0.005程度であった。この原因として磁界の影響が挙げられる。実機では軸に永久磁石があり、振動時に磁界の中で導電性の高い円筒が運動すると円筒に渦電流が発生する。その結果、円筒の相対運動を妨げる向きに磁気抵抗力が作用する⁹⁾。ここで、実機を用いた磁石有無による自由振動波形の比較を図9に示す。この図より、磁石ありの場合は約3秒で振動がおさまっているのに対し、磁石なしの場合は20秒後もまだわずかな振動が続いていたため、磁石の有無が減衰に大きく関わっていることが分かる。このことから、試作機には永久磁石を設置しなかったことが減衰が小さくなった最大の原因であると考えられる。

次に、図10に示すように、サイズモ系を加振機の振動台(松平式振動試験器)の上に置き、鉛直方向に加振して振動応答を測定した。実験条件として、加振振動数の範囲0.8Hzから40Hzまで変動させた。加振振幅は、振動数が



(a) 荷重-変位特性



(b) ばね定数-変位特性

図6. ばね特性の比較

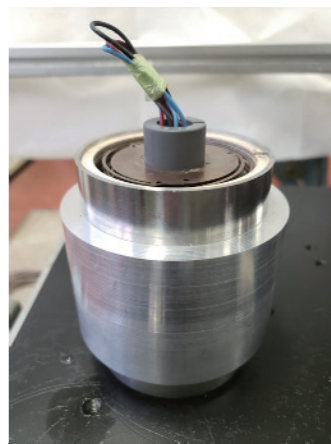
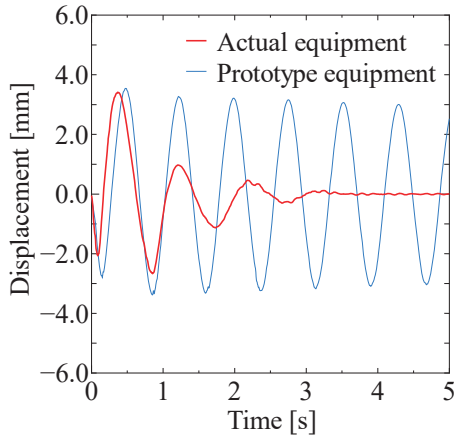


図7. 試作機



(a) 自由振動波形

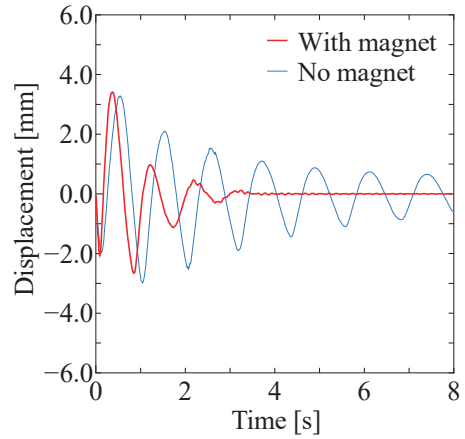
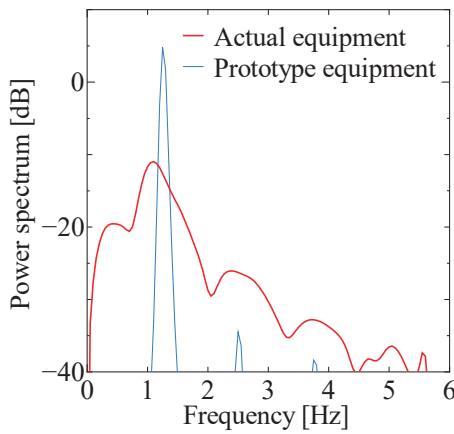


図 9. 磁石有無の比較



(b) 周波数分析結果

図 8. 実機と試作機の比較



図 10. 加振実験の様子

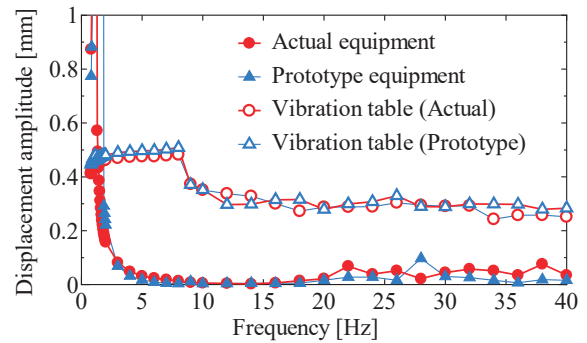


図 11. 加振実験結果

0.8 Hz～8.0 Hz までは片振幅で約 0.5 mm とし、9.0 Hz～40 Hz までは片振幅で約 0.3 mm とした。また、振動台と円筒部分の変位をそれぞれレーザー変位計で測定した。

図 11 に測定結果を示す。図 11 の横軸は加振振動数であり、縦軸は加振台および円筒の変位振幅をとっている。また、実機の結果を丸印で示し、試作機の結果を三角印で示している。地震計では、円筒と基礎（振動台）間の相対速度に比例して起電力が生じるので、円筒の振動振幅が零であることが求められる。図 11 の結果を見ると、両者とも固有振動数である 1.0 Hz 付近に共振ピークがあり、5.0 Hz 以降の振動数では円筒の振幅は零に近い値を取っている。20 Hz 以降では両者とも若干振幅が大きくなっているが、これは実験時にサイズモ系を加振台に固定しておらず、装置に微小な揺れが生じたためである。このように、実機と試作機の振動応答に大きな差がないことから、製作した非線形ばねによって実機のサイズモ系の特性を十分に再現することができたといえる。

4. 結論

火山性微小地震を観測するためのボアホール型地震計の開発を目指して、上下動成分地震計 L-4C の構造分析を行うとともに、サイズモ系の試作機を製作した。L-4C では、非線形ダイヤフラムばねを利用することで、サイズモ系の振子の自重を支えつつ、固有振動数を 1 Hz 程度まで低減していることを確認した。また、この非線形ダイヤフラムばねとそれを用いたサイズモ系を製作し、実機と同程度の性能を達成することができた。以上の結果を踏まえて、

現在、3成分速度型地震計への応用に向けた新しい機構の開発を進めている。

参考文献

- 1) 気象庁地震火山部火山課: 全国 47 火山への火山観測施設の整備, 験震時報 Vol.77 No.4, pp.241-262, 2014.
- 2) 気象庁: 緊急設置用火山観測装置の製作仕様書, 火仕第 97-27, pp.1-7, 2015.
- 3) 鹿熊 英昭, 笠原 敬司, 小原 一成, 汐見 勝彦, 村奈嘉 与一: 非線形ばねを用いたボアホール用上下動地震計の特性, 地震 2 輯 No.64, pp.185-196, 2012.
- 4) 落合 敏正: ベリリウム銅のばね特性におよぼす時効硬化処理条件の影響, ばね論文集 Vol.40, pp.33-36, 1995.
- 5) 神原 浩, 久保田 恭平: 金属板に生じる渦電流によってネオジム磁石球が受ける抵抗力について, 物理教育 Vol. 64 No.2, pp.101-104, 2016.