

短周期ボアホール地震計に搭載する3成分速度センサの試作

上井 雄輝^{a)}・盆子原 康博^{b)}・上岡 野歩^{a)}・濱畑 貴之^{c)}・寺菌 信一^{d)}

Development of three component velocity sensor for borehole seismometers

Yuki UWAI, Yasuhiro BONKOBARA, Nobo UEOKA,
Takayuki HAMAHATA, Shinichi TERAZONO

Abstract

The experimental model of three component velocity sensor for short-period borehole seismometers have been developed to attain miniaturization and low-cost. This model is composed of a biaxial horizontal electromagnetic sensor in conical pendulum form and a vertical electromagnetic sensor installed on the pendulum axis. The permanent magnets used by the horizontal sensor are arranged in Halbach array in order to increase the magnetic field strength necessary for improving sensitivity. The mechanism of the vertical sensor is similar to that of the commercially available seismometer, L-4C. In the L-4C, the natural frequency of a seismic system can be lowered to about 1.0 Hz. In the paper, the verification experiment results show the performance of the experimental model and some problems to be solved.

Keywords: Mechanism, Seismic system, Seismometer, Halbach magnet array, Nonlinear spring

1. はじめに

日本には多くの活火山があり、火山活動の観測が行われている¹⁾。火山性微小振動を観測するための装置の一つに観測井(ボアホール)に埋設して使用される高感度地震計(以降、ボアホール地震計と呼ぶ)がある²⁾。地震観測では、東西方向、南北方向、鉛直方向の3成分の速度信号を測定する必要がある。地表面に設置される地震計には3成分一体型のものが多くある。一方、ボアホールは地下数千メートルまで掘削された縦穴であり、穴径は200 mm程度と非常に小さい。このため、地表面に設置される地震計とは違い、計測装置の大きさに制限があるため、3成分一体型の地震計を構成することは難しい。そこで現在は、縦長の管の中に単成分型地震計を階層状に搭載したものが用いられることが多い³⁾。このような背景を踏まえて、本研究では、ボアホール内に設置可能な3成分一体型の地震計を開発することを目指して、小型で安価な3成分速度センサの開発を行っている。

開発中の地震計は、円錐振り子型の水平2成分センサに鉛直センサを搭載したものである。これらのセンサはサイズモ変位計の原理を適用した電磁式であり、装置全体の外

径は150 mm以内に収まるように設計している。

本報では、3成分速度センサの基本構造とその特徴について説明する。また、開発した試作機を対象として性能検証を行った結果を示す。

2. 3成分速度センサ

開発した3成分速度センサの試作機を図1に示す。この試作機は100 mm×100 mm×300 mmのフレーム内に、自在継手を介して円錐振り子が吊るされている。振り子の軸の上部には、水平2方向センサが設置されており、その下側には鉛直センサを設置している。鉛直センサは、現在広く普及しているSercel社製の短周期速度型地震計(L-4C)の構造を模して設計を行った⁴⁾。ただし、鉛直センサの試作が間に合わなかったため、本実験の試作機では実際のL-4Cを搭載することとした。

まず、水平2成分センサの構造について述べる。水平センサは電磁式であり、図2に示すように、フレームの4方向にコイルを設置し、これに対面するように磁石を取り付けたブロックを円錐振り子に設置している。x方向とy方向にある2個のコイルは直列に繋がっており、電磁誘導の原理によってコイルと磁石との相対速度に比例した起電力が発生する。円錐振り子は自在継手によって軸まわりに回転できないため、円錐振り子が任意の方向に振れても、コイルに対して磁石の向きが一定に保たれる。これにより、2方向の速度を同時に計測することができる。なお、以下

a)工学専攻機械・情報系コース大学院生

b)工学科機械知能工学プログラム准教授

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

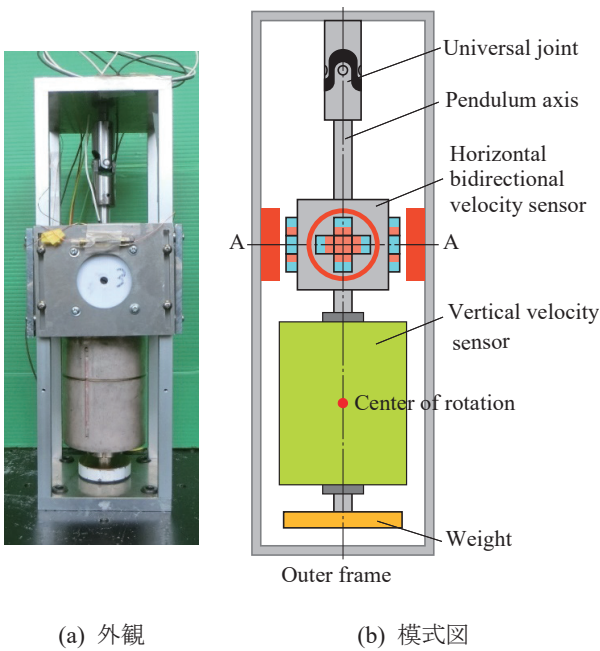


図 1. 開発した試作機

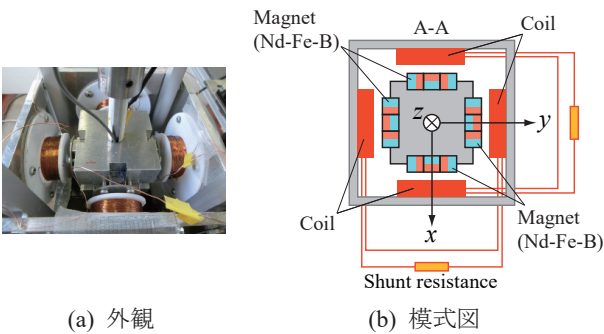


図 2. 水平 2 成分センサ

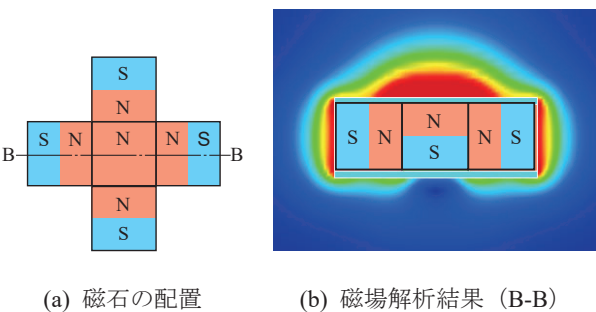


図 3. 組み合わせ磁石

の議論では、 x 方向を N-S 方向、 y 方向を E-W 方向と呼ぶ。
 水平センサの磁石には、 1 cm^3 の立方体のネオジウム磁石を配置した組み合わせ磁石を用いている。図 3(a) に示すように磁石の極の向きをとっている。図 3(b) は、磁場解析により磁石周辺の磁束密度を求めた結果であり、一方向に強い磁界が発生することがわかる。この特徴を利用すれば、安価な磁石でも強い磁界を発生させることができ、センサ

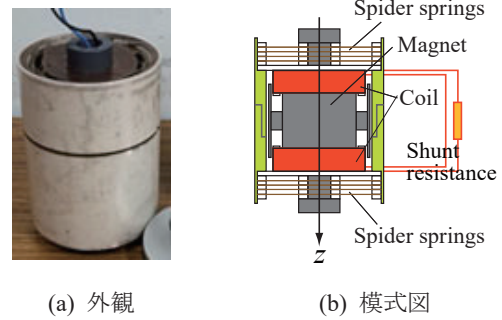


図 4. 鉛直センサ

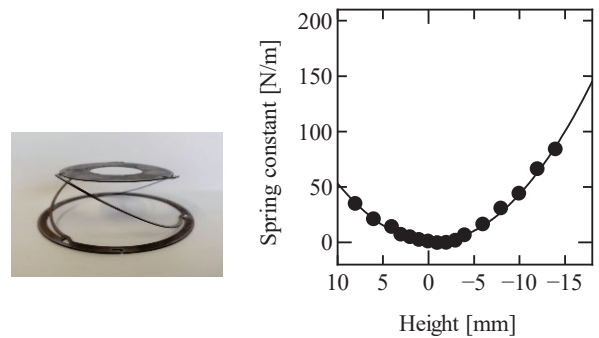


図 5. 非線形ダイヤフラムばね

の感度を向上することができる。磁石とコイルを可能な限り近づけることでも感度を向上させることができるが、円錐振り子の可動範囲を確保する必要があるため、この試作機では磁石とコイル間の距離を約 5 mm とする。

短周期電磁式センサの場合、円錐振り子の固有振動数を 1 Hz 程度にする必要がある。測定の結果、鉛直センサを含めた水平 2 方向の固有振動数はともに約 1.15 Hz 程度であった。

次に、鉛直センサの構造について述べる。前述したように、この試作機では鉛直センサとして図 4 に示す L-4C を用いている。このセンサは電磁式であり、軸に永久磁石があり、上下に設置されたばねを介してコイルが搭載された円筒が支持された、1 自由度ばね-質量系 (サイズモ系) を構成している。使用されるばねは、図 5(a) に示すようなダイヤフラムばねとよばれる非線形ばねである。この非線形ばねに対して、静荷重応答実験を行った結果を図 5(b) にしめす。ばねを自然長の状態から荷重をかけて圧縮していくと、徐々にばね定数が小さくなり、平坦時に最小となる。このような特徴を利用して、平衡状態のときにばねが平坦となるようばね定数を調整することで、約 1 kg の質量をもつサイズモ系の固有振動数を 1 Hz 程度 (実測値は 1.1 Hz) にすることが可能となる。

サイズモ変位計の原理では、加振時にサイズモ系の質量 (円筒部分) が空間的に不動となる必要がある。円錐振り

子に鉛直センサを設置した状態で水平方向に加振すると、遠心力の影響を受けて円筒部分が鉛直方向に振動する恐れがある。この問題を回避するために、図1に示すように、円錐振り子が水平方向に運動するときの回転中心と鉛直センサの重心とが一致するように鉛直センサの設置位置を調整している。なお、水平センサが回転中心から離れたところにあるが、予備実験の結果、距離に応じて感度が減少するだけで、相対速度と出力電圧との間の比例関係は維持されることを確認している。

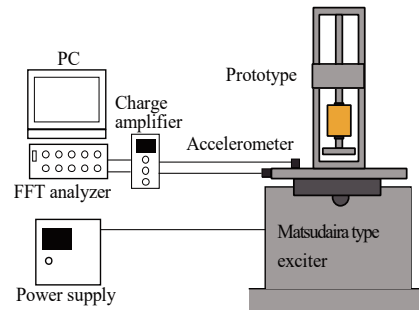


図6. スイープ加振実験装置

3. スイープ加振実験

3.1 実験装置および実験方法

試作機の性能を検証するため、スイープ加振実験を行った。図6に実験装置に示す。この実験では、松平式振動試験機の加振台の上に試作機を固定した。そして、加振振動数を変更しながら試作機をセンサの軸方向である N-S 方向、E-W 方向および鉛直方向にそれぞれ加振し、各センサの出力信号（電圧）を測定した。加振振動数は、0.8 Hz から 50 Hz までの範囲を 1.0 Hz 刻みで設定した。加振台の振幅は片振幅 0.4 mm とした。また、加速度ピックアップで加振台の加速度信号を測定して、さらに積分することで速度信号に変換し、これから参照値となる速度振幅を求めた。

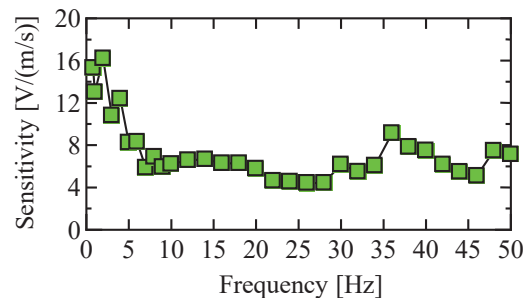
3.2 感度の同定

まず、スイープ加振実験の結果から各方向のセンサの感度を同定した。参照値の速度振幅は、加振振動数に対して比例的に増加していることを確認した。そこで、各センサの出力信号の平均振幅を参照値で除することセンサの感度を同定した。図7に各方向のセンサについて感度を求めた結果を示す。各図とも、横軸は加振振動数であり、縦軸は加振振動数ごとの感度を示している。これらの結果を見ると、感度が固有振動数である 1 Hz 付近で大きく変化している。これは、参照値を求めた加速度センサの精度の悪化によるものである。いずれの結果も 6 Hz くらいからほぼ一定の値となっているが、30 Hz を超えるとまた値にバラツキが生じている。これらの結果から、N-S センサの感度は、加振振動数 6 Hz～30 Hz の範囲の感度を平均して求めることとした。また、E-W センサでは 6 Hz～30 Hz の範囲、鉛直センサでは 6 Hz～38 Hz の範囲で平均をとり感度を求めた。求めた感度の結果を表1に示す。

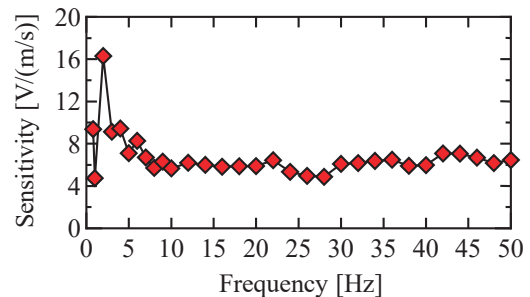
3.3 実験結果

前節で定めた感度を用いて、スイープ実験結果で測定した試作機の出力信号を速度信号に変換し、参照値と比較した。センサ毎の測定結果を図8に示す。図中の横軸は、加振振動数であり、縦軸は各軸方向の速度振幅を示す。

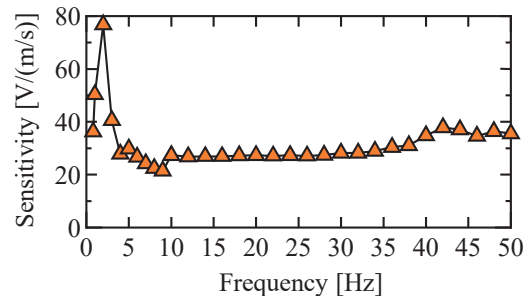
それぞれの結果を見ると、加振振動数が低次から 20 Hz までは、試作機の結果と参照値はほぼ一致していることが



(a) N-S 方向加振時



(b) E-W 方向加振時

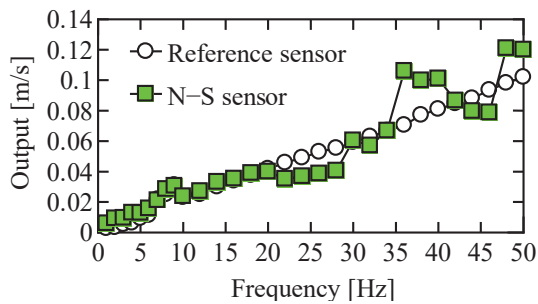


(c) 鉛直方向加振時

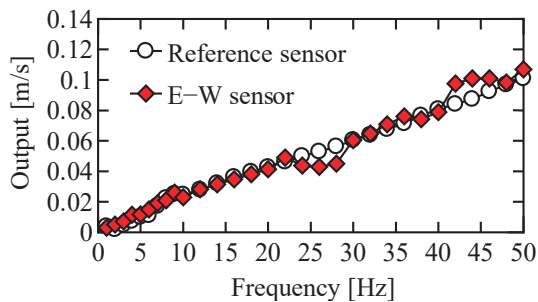
図7. 感度の同定実験結果

表1 各センサの感度平均値

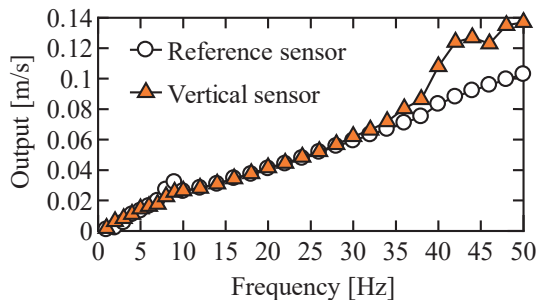
Direction	N-S	E-W	Vertical
Sensitivity [V/(m/s)]	6.04	6.10	28.2



(a) N-S 方向加振時



(b) E-W 方向加振時



(c) 鉛直方向加振時

図 8. スイープ加振実験結果

わかる。しかしながら、水平方向の結果では加振振動数が高くなると両者に差が生じている。とくに、N-S 方向加振の結果は、E-W 方向加振の結果と比べるとかなり誤差が大きくなっている。鉛直方向の結果では、加振振動数が低次から 34 Hz まではほぼ一致しているが、それ以降は参照値と差が大きくなっている。それぞれで差が大きかった点で、測定された速度波形を比較したところ、波形形状は同等であったが、振幅の大きさが異なっていた。また、コイルや磁石の個体差による影響について調べたが、結果に変化は無かった。このことから、試作機ではサイズモ変位計の原理を満たさないような運動が円錐振り子に生じたものと考えられる。

3.4 円錐振り子に対する打撃実験

前節で示したように、水平方向の測定結果で誤差が大きくなった原因を解明するため、円錐振り子に対して打撃試

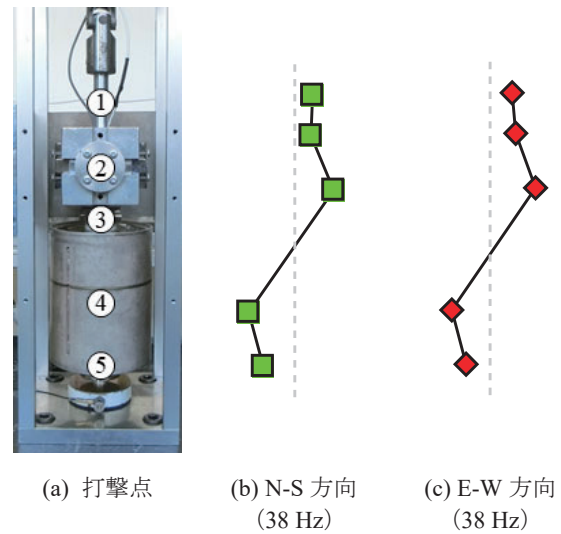


図 9. 円錐振り子の固有モード

験を行った。実験にあたり、振り子の下端にあるおもりに加速度ピックアップを取り付け、図 9(a)に示す 5 点においてインパルスハンマを用いて打撃した。打撃実験は、N-S 方向と E-W 方向に対して各点で 5 回ずつ行い、測定された伝達関数から固有振動数と固有モードを求めた。

測定の結果、N-S 方向と E-W 方向ともに 38 Hz に固有振動数があることがわかった。図 9(b), (c)に 38Hz の固有振動数に対応する固有モードを示す。この結果から、円錐振り子の軸が弾性変形する振動モードが現れていることがわかる。軸が弾性変形すると、測定物の運動とは関係無くコイルと磁石の相対速度が変動するため、サイズモ変位計の原理が成立しなくなってしまう。図 8(a)の N-S 方向の測定結果を見ると、38Hz 付近でとくに誤差が大きくなっている。これらのことから、測定誤差が生じた原因は、円錐振り子が共振して軸が弾性変形したことによるものと考えられる。なお、鉛直方向の結果でも、38Hz 付近から誤差が大きくなっているが、振り子の弾性モードが原因であるかどうかは、まだ解明できていない。

4. 打撃加振実験

4.1 実験装置および実験方法

次に、打撃加振した場合の振動応答を測定する実験を行った。図 10 に実験装置を示す。この実験では、ゴム脚で支持されたアルミ平板の上に試作機を設置する。また、参照値を求めるために、加速度ピックアップも設置する。そして、アルミ平板をハンマで N-S 方向、E-W 方向、鉛直方向の 3 方向に打撃して、打撃方向の振動応答を測定した。

4.2 実験結果

それぞれの方向に打撃したときの速度信号の時刻歴波形を図 11 に示す。参考のため、各図中には、加速度ピックアップで測定した参照値も示している。

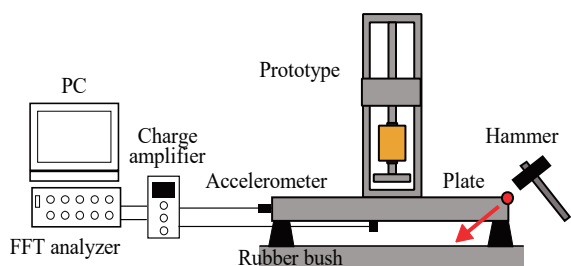
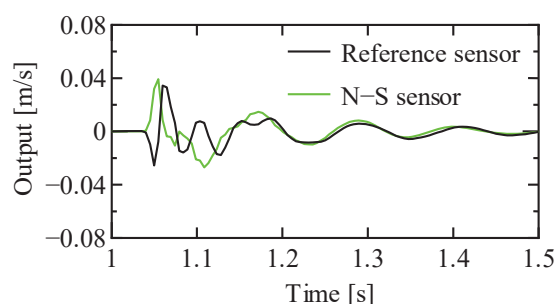
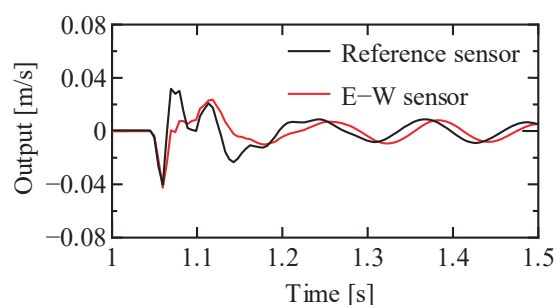


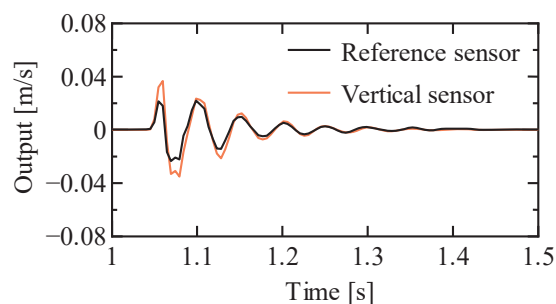
図 10. 打撃加振実験装置



(a) N-S 方向加振時



(b) E-W 方向加振時



(c) 鉛直方向加振時

図 11. 打撃加振実験結果

まず、N-S 方向に打撃した結果を見ると、打撃直後において試作機の結果と参照値とで大きく異なっていることがわかる。E-W 方向に打撃した結果についても、差違の程度は小さいがやはり打撃直後の誤差が大きくなっている。打撃直後は、実験装置に自由振動が励起されるため、円錐振り子が弾性モードで振動し易い。結果が異なったの

は、これが原因であると考えられる。ただし、一定の時間経過後には、両者の波形はほぼ一致していることから、弾性モードの影響が無くなれば、問題無く計測可能であるといえる。一方、鉛直方向に打撃した結果では、試作機の結果と参照値にあまり大きな差違は生じていなかった。

5. 結言

ボアホール内に設置可能な3成分一体型の地震計を開発することを目指して、3成分速度センサの試作を行った。得られた結果は以下の通りである。

- (1) 試作機では、水平2方向成分の速度センサを自在継手を利用した円錐振り子で構成した。また、振り子の軸上に鉛直センサを設置することで、3成分一体型を実現した。
- (2) スイープ加振実験と打撃加振実験により試作機の性能評価を行った。その結果、加振振動数が20 Hz程度までは正常に機能したものの、円錐振り子が共振して弾性モードが励起されることにより、水平方向の測定結果に誤差が生じることが確認された。また、鉛直方向の測定結果にも加振振動が高くなると誤差が生じることがわかった。
- (3) 上記(2)の問題を解決するためには、円錐振り子の剛性を高めて弾性モードの振動の発生を回避する必要がある。また、鉛直センサの測定結果に生じた誤差の原因について詳しく調査する必要がある。

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 第77巻 第4号, 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巻, pp.1-7, 2015.
- 3) 明石 和彦, 福尾 信平: ボアホール型地震計及びびびり計, 精密機械 第43巻 第508号, pp.499-505, 1977.
- 4) 貞方 啓希, 盆子原 康博, 濱畑 貴之, 寺菌 信一, 前田 貴博: 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, 日本機械学会九州支部沖縄講演会講演論文集 第198-3巻, pp.206-210, 2019.