



円錐振り子を利用した3  
成分速度型ボアホール地震計の開発

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 宮崎大学工学部 公開日: 2023-11-01 キーワード (Ja): キーワード (En): Mechanism, Seismic system, Seismometer, Halbach magnet array, Nonlinear spring 作成者: 吉松, 爽杜, 盆子原, 康博, 上岡, 野歩, 濱畑, 貴之, 境, 健太郎, 中野, 敦, 寺園, 信一 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10458/0002000285">http://hdl.handle.net/10458/0002000285</a>

# 円錐振り子を利用した 3 成分速度型ボアホール地震計の開発

吉松 爽杜<sup>a)</sup>・盆子原 康博<sup>b)</sup>・上岡 野歩<sup>c)</sup>・濱畑 貴之<sup>d)</sup>・  
境 健太郎<sup>e)</sup>・中野 敦<sup>e)</sup>・寺菌 信一<sup>f)</sup>

## Development of Borehole Seismometer Using Conical Pendulum to Three-Component Velocity Measurement

Akito YOSHIMATSU, Yasuhiro BONKOBARA, Nobo UEOKA, Takayuki HAMAHATA,  
Kentaro SAKAI, Atsushi NAKANO, Shinichi TERAZONO

### Abstract

The aim of this study is to develop a small, inexpensive borehole seismometer that can accurately measure the shot-period velocity signal of three directions. The prototype developed in prior research is composed of a biaxial horizontal electromagnetic sensor in conical pendulum form and a vertical electromagnetic sensor installed on the pendulum axis. The performance of the prototype has been verified experimentally, however, the accuracy of the measurement became degraded due to the elastic vibration and residual vibration of the pendulum axis. As a countermeasure for this problem, the prototype has been improved such as increasing the rigidity of the pendulum axis and adding a magnetic attenuation. In the paper, the performance of the improved prototype was evaluated based on the verification experiment results.

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

## 1. 緒言

日本は、環太平洋火山帯に属す火山大国であり、火山活動の監視および観測が重要である。火山活動を観測する際、火山性微小震動を計測するために高感度地震計が用いられている。高感度地震計は、体感できないほどの微小震動を観測できる地震計であるため、地上から受ける人工的なノイズによる影響を抑制するために、ボアホール(観測井)の中に埋設して利用される。ボアホール型の地震計(ボアホール地震計)の機能としては、東西方向、南北方向、鉛直方向の微小震動を測定することが求められる。しかしながら、穴径が 150 mm から 200 mm 程度と非常に小さいため、装置の大きさに制限がある。現在は、縦長の管の中に各方向の単成分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。ただし、管長が長くなると、ボアホールに挿入する際に困難を生じることがある。

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。先行研究<sup>2)</sup>では、加振振動数が 20 Hz 程度までは正常に機能したものの、それ以降の振動数領域では、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。本報では、この課題に対して試作機の改良を施し、再度検証実験を行ったので報告する。

## 2. 試作機の構造

先行研究で開発した試作機(試作機 1)の構造を図 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。円錐振り子の上部には、2 方向水平センサとして水平方向の各 4 面に磁石を取り付けたブロックを設置している。フレームには、それぞれの磁石の正面にあたる位置にコイルが取り付けられている。フレームが振動した際には、電磁誘導の原理から磁石とコイル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。

a)工学専攻機械・情報系コース大学院生

b)機械知能工学プログラム准教授

c)工学専攻大学院卒

d)教育研究支援センター技術職員

e)産学・地域連携センター准教授

f)株式会社アコー代表取締役

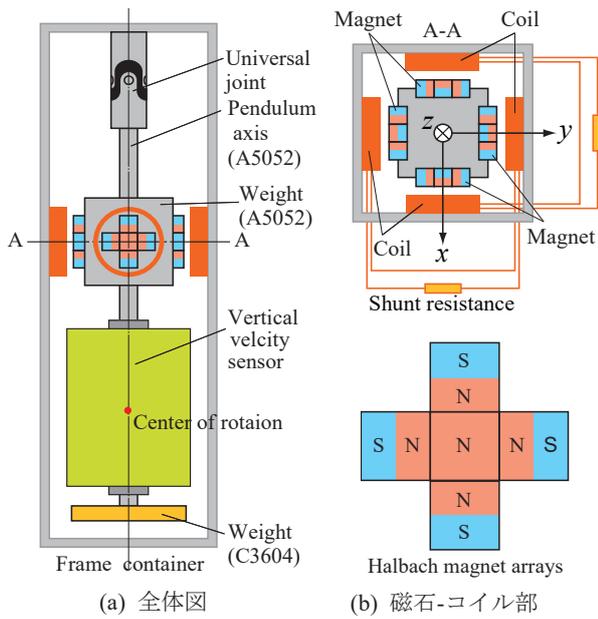


図 1. 試作機 1 の構造.



(a) 試作機 1 (b) 試作機 2

図 2. 開発した試作機の外観.

水平センサの磁石には、 $1.0 \text{ cm}^3$  の立方体のネオジウム磁石をハルバツハ配列に組み合わせた磁石を用いている。これにより、コイル側の磁束密度を高めることで、センサの感度を高めている。

一方、振り子の下部には、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。しかしながら、その開発が間に合わなかったため、試作機 1 では実際の L-4C を用いている。鉛直センサは電磁式であり、円錐振り子の軸に永久磁石が設置されている。さらに、磁石の上下に設置された非線形ダイヤフラムばねを介してコイルが搭載された円筒状のおもりが支持されており、1 自由度ばね-質量系 (サイズモ系) を構成している。なお、振り子が水平方向に振動する際、遠心力の影響により鉛直センサが誤作動することがある。このため、鉛直センサの重心の位置と円錐振り子の回転中心の位置を一致させる必要がある。

### 3. 試作機の改良

先行研究では、試作機 1 の性能を評価するために、スイープ加振実験と打撃実験を行った。具体的な実験結果は後に示すが、実験結果から振動によって振り子軸に弾性変形が生じ、これが原因となって 20 Hz 以上の振動数帯域で計測誤差が生じることが分かった。この問題を解決するために、振り子軸の剛性を高める改良を行った。図 2 に改良前の試作機(試作機 1)と改良後の試作機(試作機 2)を示す。

この改良にあたり、振り子軸自体を変更することが出来なかったため、以下のように振り子軸に補強材を追加することとした。まず、鉛直センサの上下に円板を取り付け、

表 1. 試作機の諸元.

	試作機 1	試作機 2
質量 [kg]	2.35	3.57
固有振動数 [Hz]	1.08	1.04
高さ [mm]	320	400
振り子軸長 [mm]	255	300

その間に 4 本の補強軸を取り付けた。下部の円板は、真鍮製とした。これは、回転中心を鉛直センサ付近に位置づけるためである。次に、水平センサの磁石ブロックについても補強軸を設けた。ただし、磁石とコイル間の相対運動する領域を確保する必要があるため、4 本の補強軸を磁石ブロックに貫通させることとした。この補強軸は、鉛直センサの上面から自在継手の間までを結合している。以上の 2 箇所補強軸を設置することで、振り子軸全体を補強することができる。

鉛直センサの重心位置と振り子の回転中心を一致させるために、振り子長、各要素の質量や慣性モーメントについて最適設計を行った。最終的には、補強軸上の磁石ブロックの設置位置を変更することで、振り子の回転中心の位置を微調整することができる。それぞれの試作機の諸元を表 1 に示す。試作機 2 では、振り子長は 280 mm となり、試作機 1 よりも 45mm 長くなった。フレームのサイズについても、高さが 400 mm と試作機 1 よりも大きくなったが、外径についてはボアホールに挿入可能な制約の範囲に収まっている。また、振り子の固有振動数も 1.04 Hz であり、短周期地震計に求められる条件も満たしている。

## 4. スイープ加振実験

### 4.1 実験装置および方法

試作機2の性能評価を行うため、スイープ加振実験を行った。実験装置モデルを図3に示す。本実験では、松平式加振機にそれぞれの試作機を設置し、加振振動数を0.8 Hzから50 Hzの間で変更した。加振振動数の調整は、0.8 Hzから10 Hzまでは1 Hz刻みで、10 Hz以降は2 Hz刻みで行った。加振台の振幅は片振幅0.4 mmとし、N-S方向、E-W方向、鉛直方向にそれぞれ加振を行った。このときの振動台の速度を試作機2により測定した。また、比較のための参照値として、振動台に加速度ピックアップを設置して、加速度信号を積分することにより速度を測定した。なお、予備実験により試作機2の感度を同定した結果、各方向の感度の平均値は、N-S方向が3.47 V/(m/s)、E-W方向が3.44 V/(m/s)、鉛直方向が26.9 V/(m/s)であった。

### 4.2 実験結果

実験結果を図4、図5および図6に示す。図4はN-S方向、図5はE-W方向、図6は鉛直方向にそれぞれ加振したときの応答である。図中の縦軸は速度振幅、横軸は加振振動数を表している。また、改良前後の性能を比較するため、改良前の試作機1の測定値、改良後の試作機2の測定値、および参照値の3つの結果を示している。

まず、水平方向の結果を見ると、N-S方向とE-W方向のどちらの結果も、参照値に対して試作機1では20 Hz付近での測定値に誤差が生じていることが分かる。これに対して、改良を行った試作機2では、20 Hz以降も概ね参照値と一致した結果が得られたことより、円錐振り子を補強した効果が表れていると考えられる。しかし、35 Hz付近以降の加振振動数では、改良後も参照値との差が拡大する傾向が見られた。この原因について調査した結果、鉛直センサの振り子のおもりが横方向に振動する共振が発生したためであることがわかった。この問題については次章で考察する。次に、鉛直方向の結果を見ると、試作機2では45 Hz付近まで概ね参照値と一致しており、試作機1よりも精度が向上していることがわかる。

## 5. 打撃加振実験

### 5.1 実験装置および方法

次に、打撃加振実験による性能評価を行った。実験装置を図7に示す。この実験では、ゴム脚で支持されたアルミ板上に試作機2を設置し、インパルスハンマで打撃したときの振動応答を測定した。打撃を行う際、主にN-S方向と鉛直方向の2方向に対して同時に加振するように、斜め方向に打撃した。また、フレーム側面に加速度ピックアップを取り付けて、3方向の参照値を測定した。感度は前章で示した値を用いた。

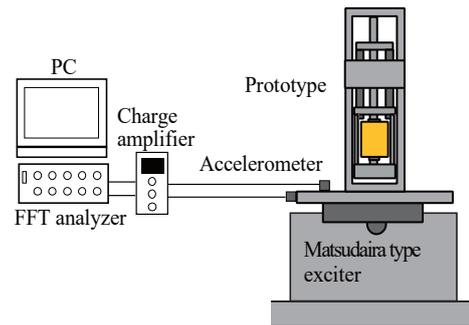


図3. スイープ加振実験装置。

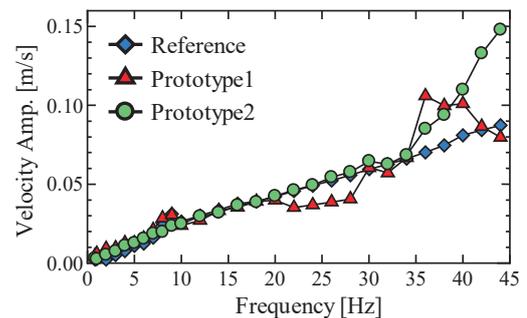


図4. N-S方向に対するスイープ加振実験結果。

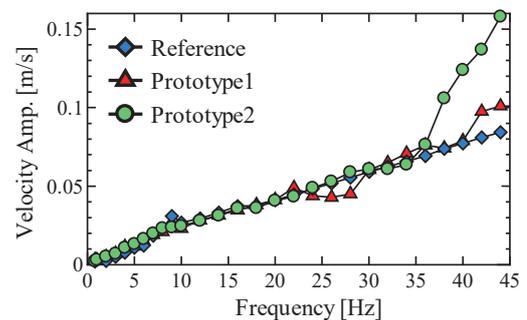


図5. E-W方向に対するスイープ加振実験結果。

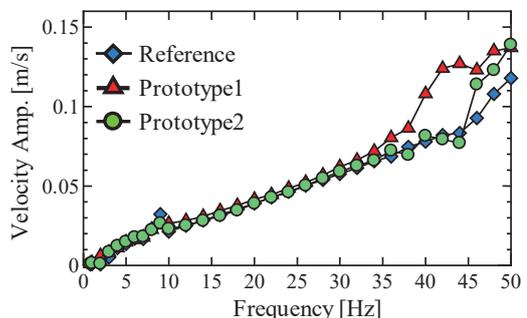


図6. 鉛直方向に対するスイープ加振実験結果。

### 5.2 実験結果

実験結果の一例を図8に示す。これは、N-S・鉛直両方向に振動が発生するように打撃したときの結果である。図8(a)がN-S方向、図8(b)が鉛直方向の時刻歴応答結果であ

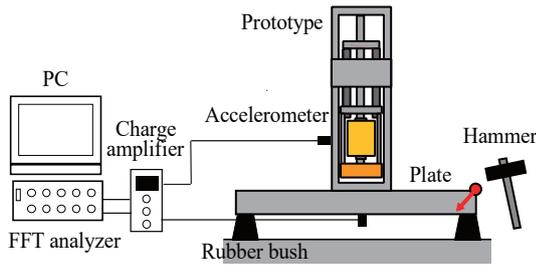
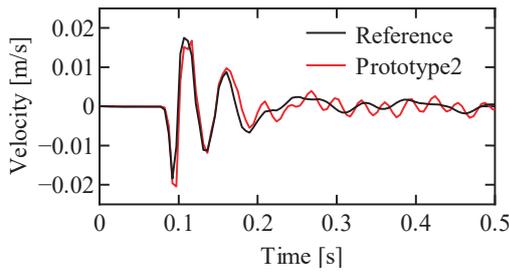
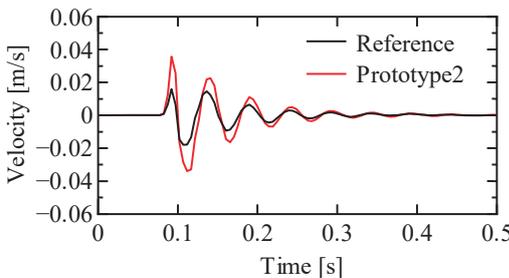


図 7. 打撃加振実験装置.



(a) N-S 方向



(b) 鉛直方向

図 8. 打撃加振実験結果.

り、それぞれ、試作機 2 の結果と参照値を示している。

まず、打撃直後の試作機 2 と参照値の結果を比較すると、水平方向、鉛直方向ともに周期は概ね一致していることがわかる。鉛直方向では、打撃直後で振幅に差が見られるが、これは参照値の測定点と試作機の測定点の差が原因であると考えられる。また、0.2 秒以降の応答を見ると、N-S 方向の結果では微小振動が生じていることがわかる。この原因については、次章で詳細を述べる。

## 6. 試作機の改良および検証実験

### 6.1 微小振動の原因調査

まず、水平方向の結果で見られる微小振動の原因調査を行った。発生振動数を調べた結果、図 9 に示すように試作機 2 の速度波形には 31 Hz と 33 Hz の成分が含まれていた。そこで、装置各部について打撃試験による原因調査を行ったところ、図 10 に示すように円錐振り子の打撃実験において打撃加振実験と同様に 30.6 Hz と 32.6 Hz の成分でピークが見られた。また、図 11 に示すように、円錐振り子の 5 箇所を打撃する実験を行い、円錐振り子の固有モードを求めた。その結果、30.6 Hz と 32.6 Hz の固有振動数に対

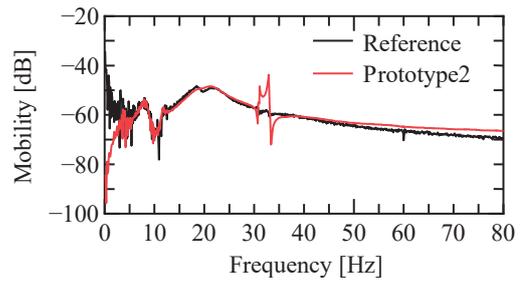


図 9. 打撃加振の周波数応答結果(N-S 方向).

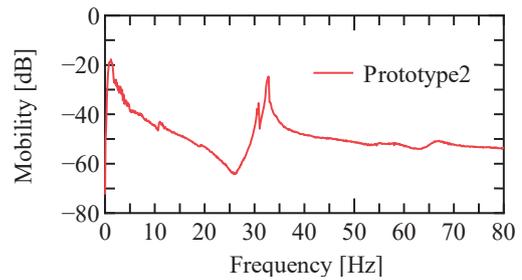
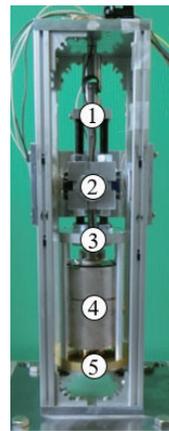
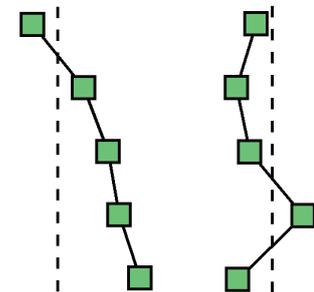


図 10. 円錐振り子に対する打撃試験結果.



(a) 打撃点



(b) 30.6 Hz

(c) 32.6 Hz

図 11. 円錐振り子の弾性振動モードの測定結果.

応する固有モードが、それぞれ図 11(b)および(c)のように得られた。打撃点④の応答をみると、鉛直センサのおもりと振り子軸との位相差が生じていることがわかる。これは、鉛直センサのおもりを支える非線形ダイヤフラムバネがおもりの水平方向の運動を拘束しているが、その剛性が十分ではなく、30 Hz 付近の共振点において振り子軸に対しておもりの相対変位が生じた結果を示す。このことから、打撃加振実験では、鉛直センサのおもりが水平方向に運動する自由振動が励起されることで水平 2 成分センサの応答にも影響して、微小振動が計測されたものと推察される。また、スイープ加振実験結果でも 34 Hz 付近から誤差が大きくなった原因についても、鉛直センサのおもりの共振が原因であると考えられる。この問題を改善するために、円錐振り子軸に減衰を付加する検討を行った。

## 6.2 磁気減衰の付加

本来であれば、鉛直センサに直接減衰要素を付加して振動を抑制することが望ましいが、構造上困難であった。そこで、円錐振り子に磁気減衰を付加して振り子自体の振動を抑えることを試みた。磁気減衰は、磁石とアルミニウムや真鍮などの電気導体板が相対運動するとき発生するローレンツ力を利用した機構である<sup>3)</sup>。この機構は構造が非常に単純であり限られた空間に設置することができる。試作機の円錐振り子下部にはおもりとしての真鍮製の円板があるため、その下に磁石を設置するだけで減衰を付加できる。

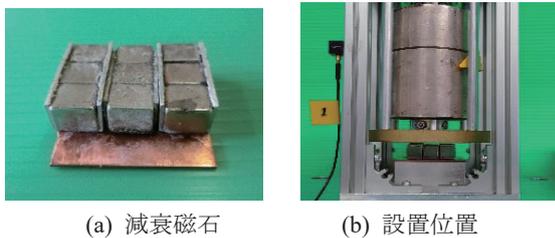
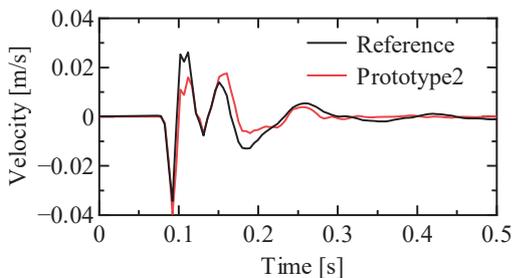


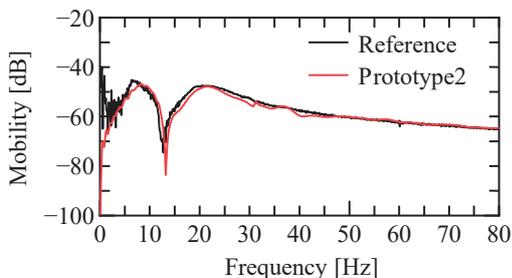
図 12. 磁気減衰の付加.

表 2. 減衰比の測定結果.

磁気減衰	無し	有り
減衰比	0.08	0.4



(a) 時刻歴波形



(b) 周波数応答

図 13. 磁気減衰導入後の打撃加振結果.

図 12(a)に製作した磁気減衰用の磁石を示す。この磁石は、ハルバツハ配列で並べた磁石をアルミ製の溝形鋼にはめ込み、エポキシ系接着剤(アラルダイト)で接着している。この磁石を図 12(b)に示すように、振り子におもりとして取り付けている真鍮円盤の下部にできるだけ近づけて設置した。自由振動実験によって減衰比を調べたところ、表 2 に示すように、減衰比が 5 倍に増加した。

この改良を加えた上で、前章と同様の打撃条件で打撃加振実験を行った。水平方向の結果を図 13 に示す。図 13(a)の時刻歴波形を見ると、図 8(a)で生じていた微小振動が発生していないことがわかる。また、図 13(b)の周波数応答結果においても、30 Hz 付近のピークが完全に表れていないことがわかる。以上より、鉛直センサのおもりの振動は磁気減衰の付加により低減可能であると考えられる。

## 7. 結言

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、先行研究で開発した 3 成分速度センサを搭載した試作機の改良を行った。得られた結果は以下の通りである。

- (1) 円錐振り子の軸の弾性振動の発生を抑制するため、振り子軸の剛性を高める改良を行った。スイープ加振実験を行った結果、水平 2 成分センサでは 30 Hz 付近、鉛直センサでは 45 Hz 付近までは参照値と同等の精度で測定可能となった。
- (2) 上記(1)の改良後に打撃加振実験を行った結果、水平方向の応答に約 30 Hz の微小振動が発生した。調査の結果、鉛直センサのおもりが水平方向に運動する自由振動が励起され、水平 2 成分センサの応答にも影響して、微小振動が発生することがわかった。
- (3) 上記(2)の対策として、円錐振り子に磁気減衰を付加した結果、微小振動の発生を防ぐことができた。

## 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) 上井雄輝, 盆子原康博, 上岡野歩, 濱畑貴之, 寺菌信一, “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”, 宮崎大学工学部紀要, No.51, pp. 107-112, 2022.
- 3) 背戸一登, 磁気減衰を利用した振動制御法, 日本機械学会論文集(C 編)56 巻 525 号, pp.1079-1086, 1990.