

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 21 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24654145

研究課題名(和文) 地下深部における地震波モニタリングのためのボアホール型シングルフォース震源の研究

研究課題名(英文) Study of Single-force seismic source for deep borehole and seafloor deployment

研究代表者

山岡 耕春 (Yamaoka, Koshun)

名古屋大学・環境学研究科・教授

研究者番号：70183118

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円、(間接経費) 870,000円

研究成果の概要(和文)：ボアホールや海底下など、十分に電力エネルギーが供給できない場所において稼働させるための震源装置の基本設計と試作を行った。少ない電力エネルギーで稼働させるためには、おもりの自由落下による衝撃力を用いた震源が良いことが、シングルフォースとモーメントテンソルとの比較によって明らかになった。またおもりの落下は、内部の摩擦抵抗によってばらつくため、落下軌跡を常時モニタリングすることが必要であることが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：A seismic source for long-term monitoring of propagation property by deploying in deep-borehole and seafloor are designed. We produced trial models for such a seismic source to test the feasibility of our conceptual design. The difficult requirement in borehole and seafloor environment is low-power consumption, i.e. 50watts. We developed a model with falling mass in a cylinder body to produce single-force, which is suitable to produce low-frequency signal with small body. Experiments using trial model shows that falling-mass source works well but falling trajectory varies substantially due to friction of mass and mass guide. This requires the monitoring of the mass falling.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学 固体地球惑星物理学

キーワード：観測手法 震源装置 地震波伝播変動

1. 研究開始当初の背景

地球を構成する物質中を伝播する弾性波（地震波）の伝播特性は、物質の性質を反映している。地球内部を伝播する地震波を調べることにより、地球の内部構造が研究されてきた。また、地殻の浅部においては地震波構造を詳細に調べることが石油などの資源探査の強力なツールとなってきた。さらに地下構造の調査により地震波の増幅特性が明らかになったり、液状化の可能性もわかるなど、地下構造調査は防災上も非常に重要な手法である。

このような地下の構造に関する知見を深めるだけでなく、近年では構造の変化を捉えることも注目され始めてきた。例えば、地下に水などの流体が浸透することによって地震波伝播速度が変化することは、実験的にも理論的にも知られている。このことは、逆に地震波速度の変化を捉えることができれば地下の流体の動きを推定することができることを示唆している。またS波（横波）は、媒質中のクラックの方向とS波の振動方向との関係によって伝播速度が異なることが知られている。これは異方性と呼ばれる。S波の異方性の変化を捉えることによってクラックの変動を推定することができ、ひいてはクラック中を移動する流体の動きやクラックの分布を変化させる応力を推定できると考えられる。

このような現象を知ることができる地震波伝播速度の変化を捉えるための手法の開発研究が本課題でめざすところである。

2. 研究の目的

本研究では、地震波伝播特性の時間変化を

知るために、ボアホール中や海底下など十分に電力エネルギーの供給できない環境下において定常的に弾性波を発生する装置を試作するものである。従来、地震波伝播特性の時間変化を知る方法としては ACROSS 震源装置（Kumazawa and Takei 1994 など）がある。しかし、現在の ACROSS 震源は大型のモータを使うなどその基地に簿が大きいだけでなく消費電力も大きいため、ボアホールや海底下への設置は不可能である。本研究では、振動発生原理を一から見直し新たなコンセプトによる震源装置の開発を行う。

3. 研究の方法

シングルフォースの検討

本研究では、構造の不均質性の影響を受けない比較的低周波に卓越する弾性波を発生させるため、シングルフォースの震源を開発することにしている。

その理由を説明するため、無限弾性体中におけるシングルフォースとモーメントテンソルによる遠地における波動の式を表してみる。まずシングルフォースの場合

$$u_{Sp}(r,t) = \frac{1}{4pra^2 r} f(t-r/a)$$

となる。一方、モーメント震源を表すため、シングルフォースを微小距離 r だけ離れた場所に配置した場合の遠地における波動の式を表すと、

$$u_{Mp}(r,t) = \frac{1}{4pra^2} \left\{ \frac{1}{r+dr} f(t-(r+dr)/a) - \frac{1}{r} f(t-r/a) \right\} \\ \approx \frac{1}{4pra^2} \frac{1}{r} \{ f(t-(r+dr)/a) - f(t-r/a) \}$$

となる。両式をフーリエ変換して比をとると、

$$U_{Mp}(r,w) / U_{Sp}(r,w) = e^{iw/w_c} - 1 \\ w_c = a/dr$$

となる。ここで U_{SF} は地震波速度である。この関係を図示すると、図1のようになる。モー

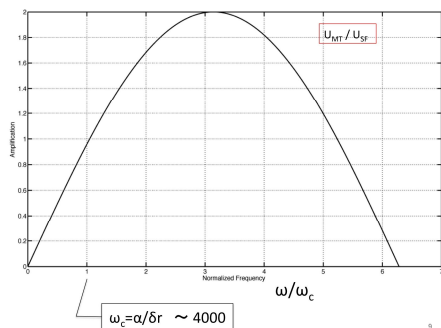


図1:モーメントテンソル型震源に対するシングルフォース震源の、遠地における信号振幅の比

メント型震源とシングルフォース型震源の振幅が等しくなる角振動数はモーメント震源におけるシングルフォース間の距離を 1 mとした場合、4000 程度となる。周波数にすると 700Hz 程度で有り、それよりも低い周波数帯ではシングルフォース型のほうが圧倒的に有利である。つまり、シングルフォースを用いた震源はサイズが小さくても低周波を発生させることができるということである。モーメント型の震源では低周波を発生させるためにはそれなりのサイズが必要となる。

シングルフォース発生方法の検討

具体的にボアホール内において、シングルフォースを発生する震源として、おもりを円筒のケーシング内でつり上げた後に落下させて衝撃力で力を発生する方式とし、様々な方式の可能性を検討した。検討事項は、1) つり上げ機構、2) 脱着機構、3) エネルギー回収機構である。

検討の結果、つり上げ機構としては「回転型モータでネジを回すことにより回転運動を直線運動に変換しておもりを持ち上げる機構」、脱着機構としては「機械的な方法」、エネルギー回収機構としてはバネを用いた「ひずみエネルギーによって回収する」方法



図2:シングルフォース震源の試作モデル。左側は、「ドアノブ型」の落下機構を持つモデル。右側は、ホースジョイント型の落下機構を持つモデル。

を採用することとした。ただし、落下機構の具体的な方法として2通りの方法が提案され、優劣がつけがたいことから2方式で試作することとした。

試作モデルの概要

作成した最初の試作モデルの写真に図2に示す。左側のモデルは、「ドアノブ型」と称する脱着機構を持ったモデル。つまり左右から張り出したツメでおもりを持ち上げ、ツメを解除することによって落下する。右側のモデルは、「ホースジョイント型」と称する脱着機構を持ったモデル。市販のガスホースなどのジョイントと類似の機構によって結合を解除して落下する機構のモデルである。

使用しているモータはDCモータ、おもりは 3 kg、シリンダー長は 330mm、シリンダー外径は 80 である。またモータはPLC (Programmable Logic Controller) で制御している。ロジック制御によって、突然の停電や復電に対しても問題が発生しないようなロジックで構成されている。また最下部に

はスプリングが設置され、バネの落下による運動エネルギーをスプリングの縮みによるひずみエネルギーに変換し、再びバネが伸びるときにおもりを情報に補織り上げることによって運動エネルギーに戻す。

4. 研究成果

試作機の試験

試作機の試験を実験室内で実施した。レーザ変位計を用いておもりの上下の計測と、地震計による振動計測を行った。試作モデルはシリンダーの直径が80mmと細いため、内部にレーザ変位計を仕込むことができない。そのためおもりの変位は外部にレーザ変位計を設置して測定することとした。レーザ変位計の光路をシリンダー内部に設置したミラーによって折り曲げ、おもりの落下を計測するようにした。

おもりの上下運動

図3にはレーザ変位計で計測したおもりの上下運動の様子を示す。上の図は1000秒間におけるおもりの上下運動の様子(青色の線)と、震源から1mの距離に設置した地震計の記録(緑色の線)である。

図3の下は、100秒付近のおもりの落下とそれに伴う振動である。97.6秒付近から落下を始め、97.7秒あたりで落下している。落下によってバネが縮み、再びおもりが上方に放

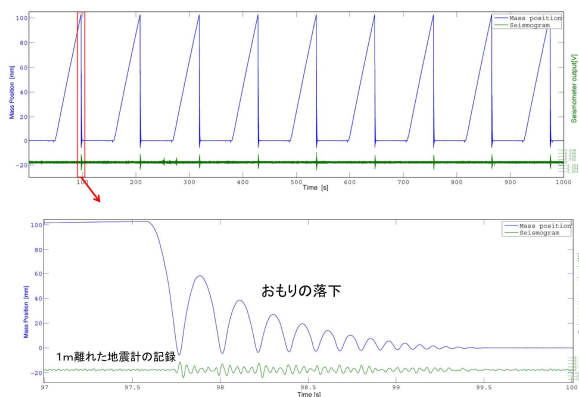


図3：レーザ変位計によって計測したおもりの動き。下の

出される。放出されてから落下するまでの時間は、放出する高さに依存している。この実験では10回程度の明瞭な落下が計測されている。

おもりの落下のばらつき

それでは、おもりの落下はどの程度安定なのであろうか。落下の軌跡がいつも同じならば、信号をそのまま足し合わせるだけでSN比の良い信号記録を得られる。実際に420回分の落下記録を調べてみるとかなり大きくばらつくことがわかる(図4)。特に、バネに衝突する前の最初の落下の軌跡からばらつきが大きく、それに伴って後の軌跡が変化している。

おもりの落下を記述する微分方程式を数値的に解き、実際の落下と比較した結果、速度に依存しない抵抗による落下速度のばらつきが大きいことが明らかになった。そのような抵抗に対応する部品は、シリンダーの内側に設置したガイドレールである。

おもりの落下軌跡がばらつくことは、震源から発生する力が落下ごとに異なることを示している。地震波伝播特性の時間変化を知るためには、震源で発生する力を正確に知る必要がある。したがって、震源装置にはレーザ変位計を内蔵させて落下軌跡を記録しておく必要がある。

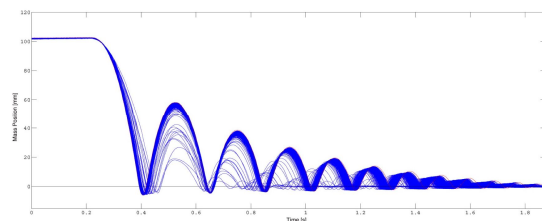


図4：420回分のおもり落下の軌跡を重ねて示したものの。

第二次試作モデル

以上の実験結果を踏まえ、第二次試作モデルを作成した(図5)。落下機構としては、

より摩擦の影響が少ないと考えられる「ホースジョイント型」を採用した。第1次試作モデルからの改良点は以下の通りである。

- ・レーザ変位計をマウントした
- ・モータをブラシレスDCモータとした
- ・ボールネジを採用した
- ・ガイドレールを摩擦の少ない樹脂製とした
- ・ホースジョイント型とした

改良の理由は、以下の通り。レーザ変位計を必要とするのは、おもりに落下の軌跡を記録



図5：第2次試作モデル。

して発生力をきちんと記録しておくためである。ブラシレスDCモータを採用したのは、通常のDCモータではブラシの摩擦による故障が想定されるためである。ボールネジを採用したのは、モータの摩擦負荷を減らすためである。落下時の摩擦を減らすため、ガイドレールを樹脂製とし、落下機構はホースジョイント型とした。

今後の課題

今後は、第2次試作機の実験を行うとともに、1回の落下ごとに発生力が異なる信号をスタッキングするための解析手法の開発が必要である。

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 0件)

〔学会発表〕(計 1件)

山岡耕春 海底への設置をめざしたシングルフォース震源の開発 KANAME 平成25年度研究集会

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

ホームページ等 1

<http://www.seis.nagoya-u.ac.jp/yamaoka/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

山岡 耕春(55) 名古屋大学環境学
研究科 教授
研究者番号：70183118

(2)研究分担者

(3)連携研究者

渡辺 俊樹(50) 名古屋大学環境学
研究科 准教授
研究者番号：50210935