

超磁歪震源の開発とボアホール観測網による観測試験

國友孝洋・石井 紘・浅井康広 (東濃地震科学研究所)

1. はじめに

超磁歪素子を利用したアクチュエータ(Giant Magnetostrictive Actuator)は、動電加振機など比べて、変位は小さいが発生応力が大きく、扱いが簡便なため、高周波用の人工震源装置への応用が期待される。超磁歪素子の変位は、本研究で使用したのは $70\ \mu\text{m}$ (0.007cm) のタイプで、弾性波アクロス(錘の変位は数 cm から数十 cm 程度)のような比較的low周波の震源と比べて小さいが、圧電素子などに比べると大きい。そのため、弾性波アクロス(低周波:100Hz 以下、探査範囲:100km 程度まで)や圧電素子(高周波:1kHz 以上、探査範囲:100m 程度まで)の中間的な範囲が調査対象として有利であると考えられる。周波数で 100Hz~1kHz 程度、1~2km までの空間範囲をターゲットとして目指す。地下モニタリングの当面の対象は、1) 地下水や地震時の変動に伴う変化、2) 超深地層研究所の再冠水試験による変化、3) 予定されている超深地層研究所の立坑埋め戻し・再冠水に伴う変化の検出などである。

東濃地震科学研究所における超磁歪震源の開発は 2011 年頃から進められて来た[石井ほか(2011)、佐野ほか(2011)、大久保・佐野(2011)、地震予知総合研究振興会(2015)]。しかし、2016 年~2017 年にかけて、震源装置と観測装置の問題点が検証され、新たな装置へと改造が行われた[國友ほか(2017)]。観測装置の問題点とは、多くの GPS 時刻同期型の地震データ収録装置に見られるものであり、スペクトルの整数周波数に表れるクロックノイズである[國友(2017)]。クロックノイズは、データをスタッキングしても除去できないため、送信信号の周波数から外す必要がある。これまでに採用されてきた 500Hz の矩形波信号[大久保ほか(2011)]は、その奇数次整数倍の周波数の高調波から構成されており、全ての送信信号がクロックノイズと重なるため遠方での検出はできなくなる。そこで、任意の周波数の任意波形を発生できるように制御装置を改良した。その結果、従来の加振方式でも 10 日間程度スタッキングすれば、350m 下にある TGR350 でも P 波の到来が観測できるようになった[國友ほか(2017)]。本研究では、さらに加振方式も変更し、700m 離れても 1 時間程度のスタッキングで明瞭な P 波の到来が観測できるようになったことを報告する。

2. 新しい加振装置

新しい加振装置の構成を図1に示す。加振装置と制御装置を合わせて超磁歪震源装置(Giant Magnetostrictive Seismic Source : GMSS)と呼ぶ。加振装置には、放射効率が最も良いシングルフォース方式を採用した[Takei & Kumazawa (1994)]。本加振装置は、加振質量を超磁歪アクチュエータの上で振動させる方式で、上下方向のシングルフォースが発生できる。開発費を抑えるために、従来の構成で利用できるものは利用するという方針のもとに製作を進めた。新期に製作したのは、図1のグレーに着色した部分で、Weight Shaft (1kg)、Weight (1kg) 4個、Weight Shaft Guide および Upper Plate である。これまでは、超磁歪アクチュエータのプッシュロッドを壁面

あるいは床面に押し付ける方式であり、図1とは超磁歪アクチュエータの方向が逆さまになっていた[佐野ほか(2011)]。Upper Plate にあたる部分は、プッシュロッドとは反対側の端面を固定する目的のものであったが、新たに製作した Upper Plate は、Weight Shaft が入るように穴が開いている。Weight Shaft Guide は銅製で、加振質量の横ぶれによる破損を防ぐために採用した。Push rod が、上に乗る重錘に対して細いと考えられたためである。Weight は、Weight Shaft にねじ止めするようになっており、加振質量は、1kg から 5 kg まで変更できる。

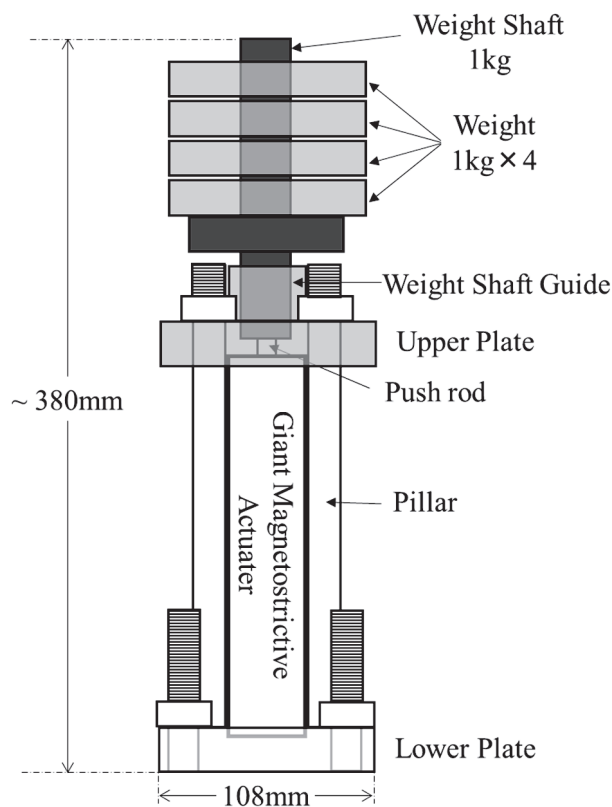


図 1. 新規に構築した加振装置

超磁歪アクチュエータのスペックを表 1 に示す。また、最大変位 $70 \mu\text{m}$ の場合の、発生力(加振力)と周波数との関係を加振質量ごとに示す(図2)。発生力は、 $MR\omega^2$ で計算できる。M は加振質量(kg)、R は加振質量の変位振幅(m)、 ω は角周波数($2\pi f$)、f は周波数(Hz)、 $R\omega^2$ は加振質量の加速度を表す。本研究に用いた超磁歪アクチュエータの最大発生力(Maximum Dynamic Force)が 890N(91kgf)であるため、図2の水色の範囲内の曲線が実際に稼働できる周波数-加振力の範囲となる。高周波で加振する場合は、質量を小さくするか変位を小さくするかを選択となる。超磁歪アクチュエータには、入力電流と変位との間に非線形性があるため、質量を大きくして変位を小さくする方が信号波形のくずれ(高調波成分)を小さくできる。

| | |
|------------------------------|-------------------|
| AA-140J013-MS1 | |
| Maximum Displacement | ± 70μm |
| Eigen Frequency | 2400Hz |
| Frequency Range | DC~1.25kHz |
| Maximum Dynamic Force | ± 890N |
| Maximum Current | ± 3.0A |
| Inductance | 3.5mHz |
| Weight | 2400g |

表1. 超磁歪アクチュエータの諸元

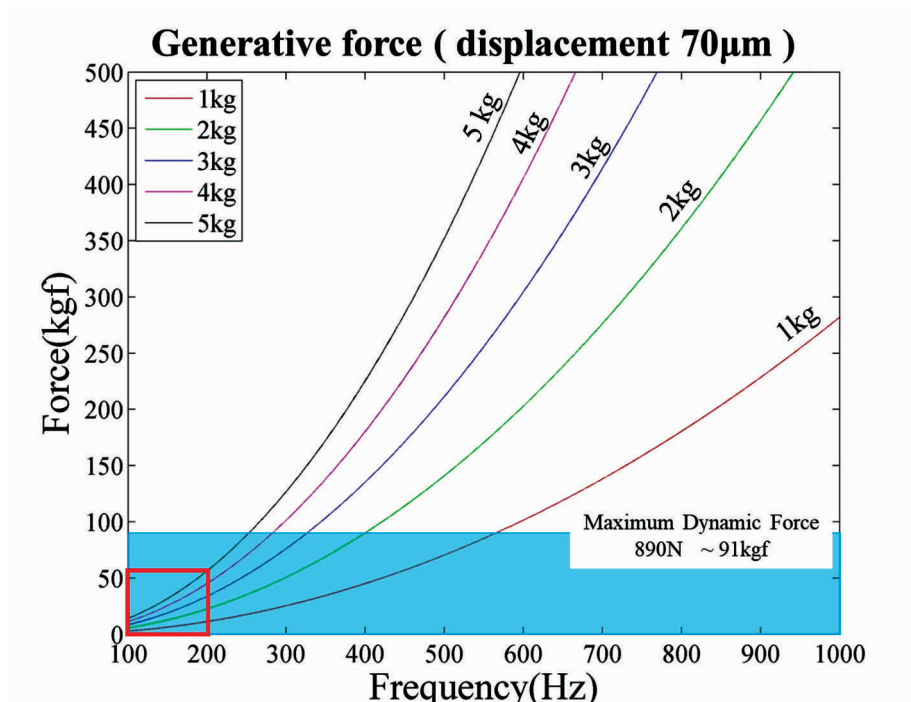


図2. 周波数と発生力との関係

3. 新しい超磁歪震源による送信実験

3.1 送信信号のデザイン

超磁歪震源の送信信号のデザインを図3に示す。任意波形が使用できるため、周波数の異なる正弦波を重ね合わせる方式とした。この方式は、周波数スイープなどと比べて、各周波数の振幅を任意に決めことができ、周波数帯域の制限も行いやすい。本実験では、100.5Hz～200.5Hzで1Hz毎の同じ振幅の正弦波を101個重ね合わせた。周波数に100.5Hzのように小数が含まれているのは、整数周波数に入るクロックノイズを避けるためである。各周波数の位相をラ

ンダムに与え、合成後の最大振幅が最も小さくなる組み合わせを選んだ。図3には、最終的に採用した位相の組み合わせによる波形とスペクトルが描かれている。

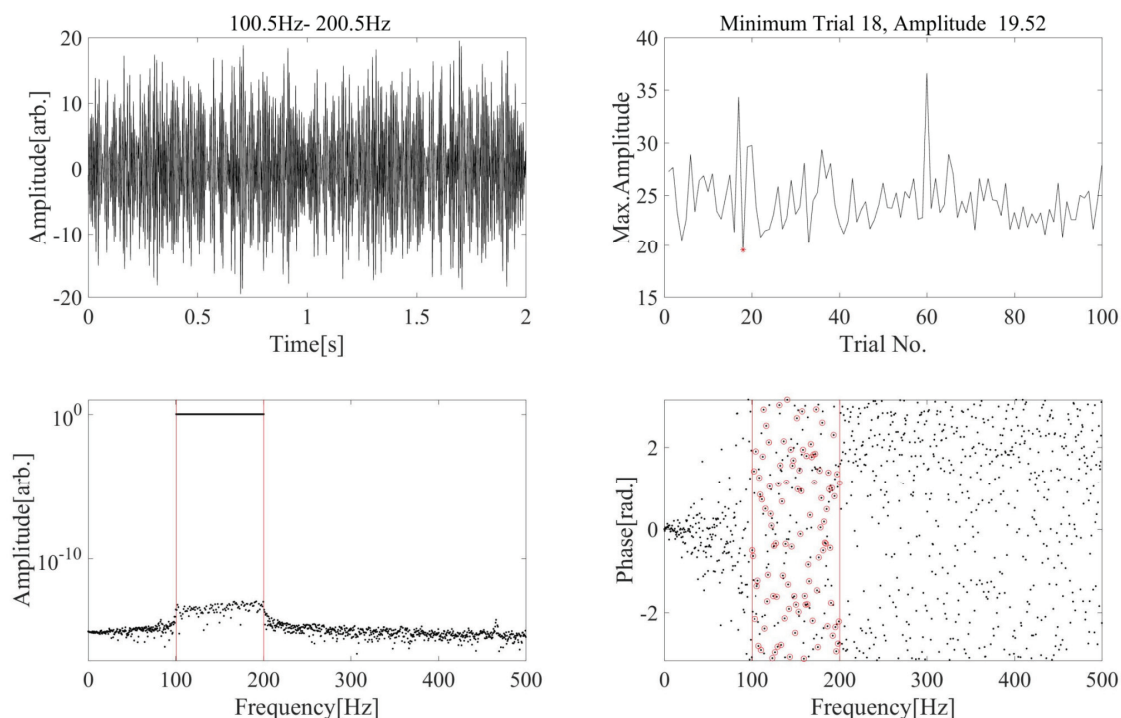


図3. 送信信号デザイン (a) 18 番目の試行での合成波形 (b) それぞれの試行における合成波形の最大振幅。18 番目の試行の結果が、最も最大振幅が小さい (c) 18 番目の試行での振幅スペクトル。 (d) 18 番目の試行での位相スペクトル。赤丸は、信号周波数。

3.2 実験サイト

超磁歪震源装置の全体写真と実験サイトの地図を写真1および図 4 に示す。また、地下構造の概略図と2層構造とした場合の波線を図5に示す。超磁歪震源装置は、瑞浪観測壕内の計測室の地震計検定台用のコンクリートベース上に設置した。このコンクリートベースは、瑞浪層群の固結した砂岩層に造成されている。超磁歪震源装置は、コンクリートベースにアンカーボルトで固定されたステンレス板に、ボルト留めされている。計測室内の温度は、年間を通して 1°C 以内であり、温度変化による加振装置や制御系の変動を抑えることができる(図 6)。なお、図 5 に示されるように、超磁歪アクチュエータの表面温度は 25°C 前後(室温に比べて $+8.5^{\circ}\text{C}$ 程度)であり、冷却のための付加装置を必要としない。

実験における送信(制御)信号は、3.1 で説明した波形を用いた。Function Generator を GPS Clock の 10MPPS 出力に同期させるモードで発信させ、信号送出のタイミングには、GPS Clock の正時の分パルスを送りトリガーとして与えた。Precision Power Amplifier は、CC モード、つまり外部からの電圧入力波形と同じ電流波形が超磁歪アクチュエータに出力されるモードで用いた。超磁歪アクチュエータを駆動する最大電流振幅は、Function Generator の出力電圧で調整し、 $\pm 2.4\text{A}$ とした。超磁歪アクチュエータの入力最大電流は $\pm 3.0\text{A}$ であるが、上限電流付近では非線形性

(入力電流と超磁歪素子の変位が比例しない)の程度が大きくなるため、最大電流を少し低めの値に設定した。

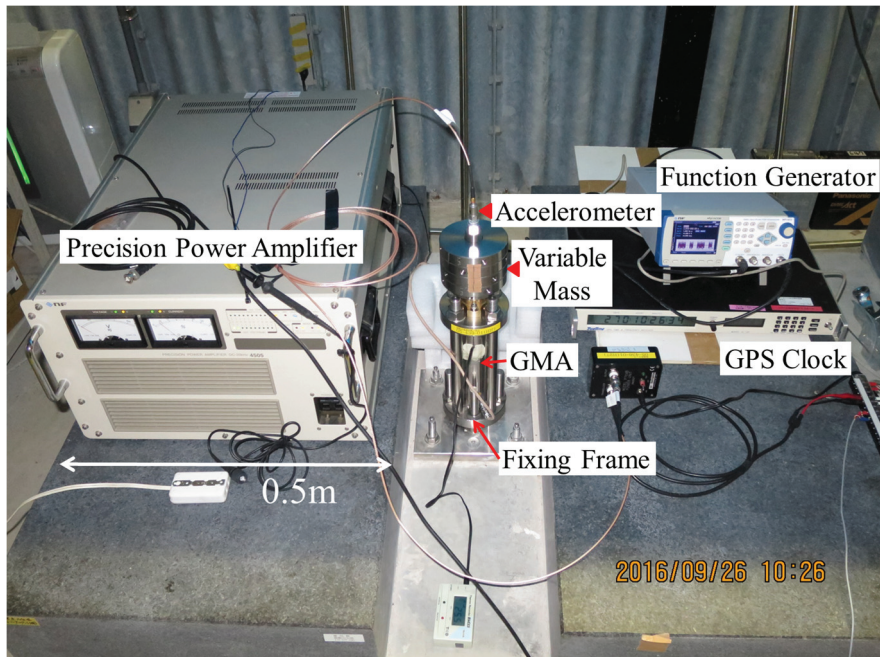


写真1. 超磁歪震源と機器類の配置。瑞浪観測壕の地震計検定台の上に設置した。

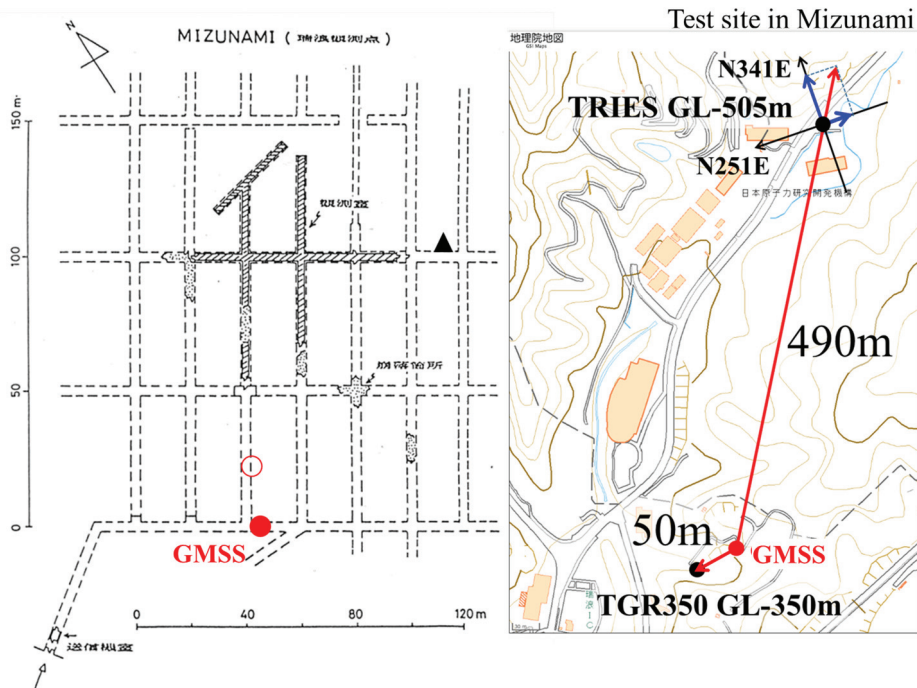


図 4. 観測点配置 (a) 瑞浪観測壕内の超磁歪震源(GMSS)の位置(赤点)。赤丸は以前[佐野ほか(2011)]の設置位置。(b) 観測点の配置。TGR350 は水平距離約 50m、深さ 350m。TRIES は、水平距離約 490m、深さ 505m (超磁歪震源設置標高との差は、485m)。赤矢印は波線の方向。黒矢印は水平動地震計の設置方位を示す。

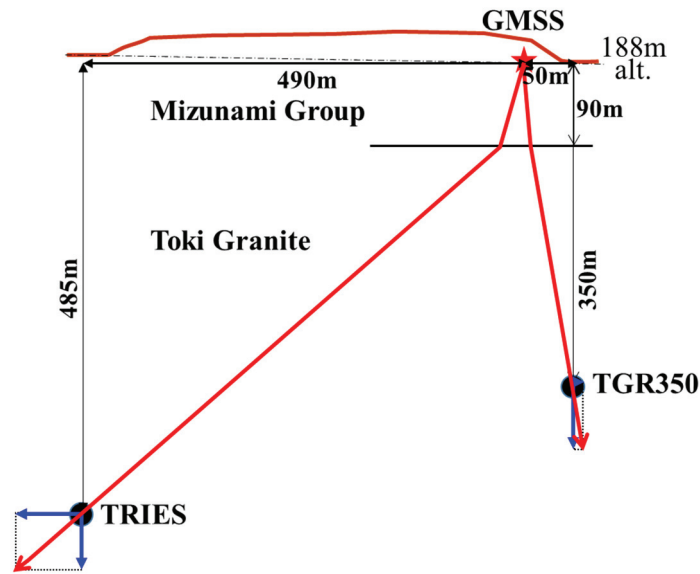


図 5. 実験場所の地下構造の概略図と水平 2 層構造での波線

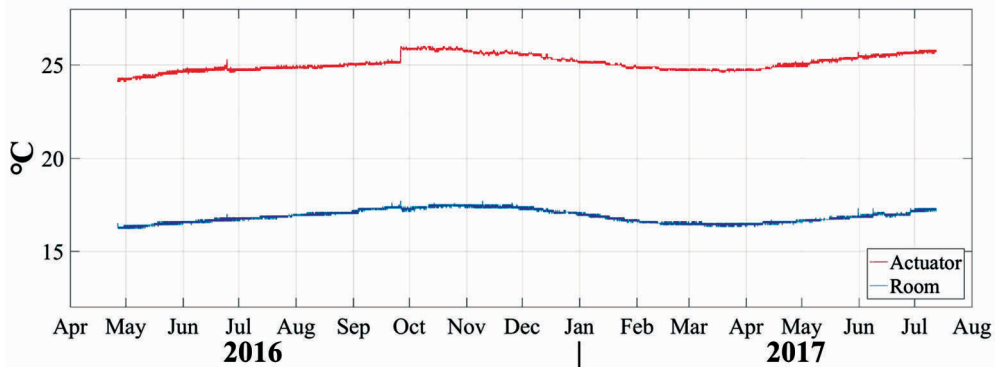


図 6. 超磁歪震源のアクチュエータ表面温度(赤線: Actuator)と設置場所の室温(青線: Room)。2016 年 9 月の Actuator の温度ステップは、温度計を交換したために生じた機器差とみられる。

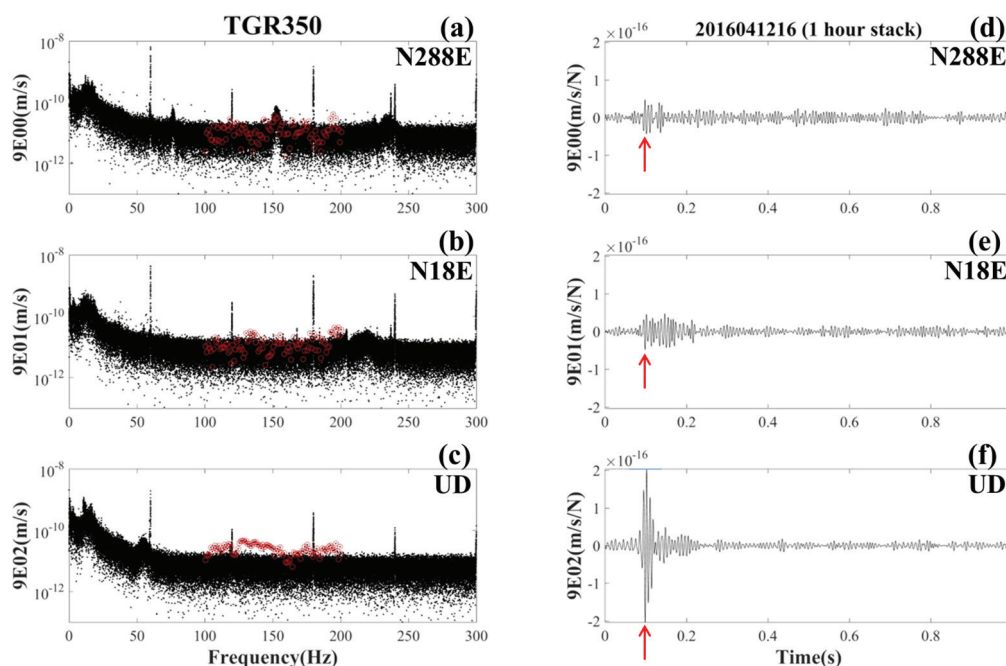
3.3 ボアホール総合観測装置での観測結果

TGR350 (震源距離 353m) と TRIES (震源距離約 700m) での観測スペクトルとグリーン関数を示す。図 7 は、1 時間スタックデータ、図 8 は、3 日間スタックデータである。スタッキングは、200 秒間の時間区間により行った。観測スペクトルから送信周波数だけを抜き出し、これを、送信スペクトルで割り算して伝達関数を求め、フーリエ変換により時間領域に戻すことによりグリーン関数を計算した。加振装置の Weight Shaft の上端には加速度計が取り付けられており、送信スペクトルは、加速度波形のスペクトルから計算している。伝達関数およびグリーン関数の計算の詳細は、國友ほか(2014)を参照のこと。

図7(a)~(c)、(g)~(i)は、1 時間データをスタッキングした後の 200 秒間データを DFT (離散フーリエ変換) して得られた観測スペクトルで、各周波数での振幅値が 0.005Hz (1/200) 間隔でプロットされている。黒点が周波数毎の振幅値を表し、そのうち超磁歪震源からの信号周波数が赤丸で

囲われている(100.5~200.5Hz の帯域で1Hz 間隔)。つまり黒点だけの部分や黒点に埋没している赤丸部分はノイズの振幅となる。10-20Hz に見られるスペクトルのピークは、弾性波アクロス土岐送信所からの送信信号である。60Hz およびその整数倍の周波数にあるピークは、電源ノイズ(ハム)である。また、記録計のサンプリングクロックに由来するノイズが整数の周波数に表れるが、10Hz とその整数倍の周波数での振幅が特に大きい。図 8 は、TGR350 の UD 成分、TRIES の N341E 成分について、3 日間スタッキングした結果を示している。ノイズ(黒点)の振幅が、全体として一桁近く下がっており、超磁歪震源の信号がより明瞭に確認できる[図 8 (a)(c)]。アクロス信号および記録計のクロックは GPS 時刻に同期しているため、スタッキングしても信号レベルは下らない。アクロス信号は、飛び飛びの周波数(0.02Hz 間隔)で送信されているため、信号のピークの 2 桁近く下に見えるノイズフロアと比較することによって S/N 比が確認できる。図 8(c)では、1Hz 毎のクロックノイズが明瞭であるが、超磁歪震源の信号は 0.5Hz ずれているため、ちゃんと分離されている。電源ノイズは商用電源の周波数が管理されており、スタッキングしても消すのは難しいが、GPS 時刻と完全に位相同期されていないのでスタッキングによる振幅の低下がある程度は認められる。

TGR350 および TRIES で得られたグリーン関数では、1 時間のデータスタッキングで明瞭な P 波の到来が確認された[図 7(d)~(f)、(j)~(l)赤矢印]。TRG350 では、超磁歪震源のほぼ真下に地震計があるため、P 波の振幅は上下動[図 7(f)]で最も大きい。TRIES では、N341E 成分の振幅が最も大きくなっている。これは、波線から(図 4-右および図 5)説明できる。図 8(b)(d)で得られた P 波走時は、TGR350 で 0.1003s、TRIES で 0.185s であり、震源距離から計算される P 波の平均速度は、それぞれ、3520m/s と 3800m/s である。図 5 の水平 2 層構造を仮定すると、P 波の走時は、瑞浪層群の平均的な P 波速度を 2000m/s~2100m/s、土岐花崗岩浅部の P 波速度を 4400m/s



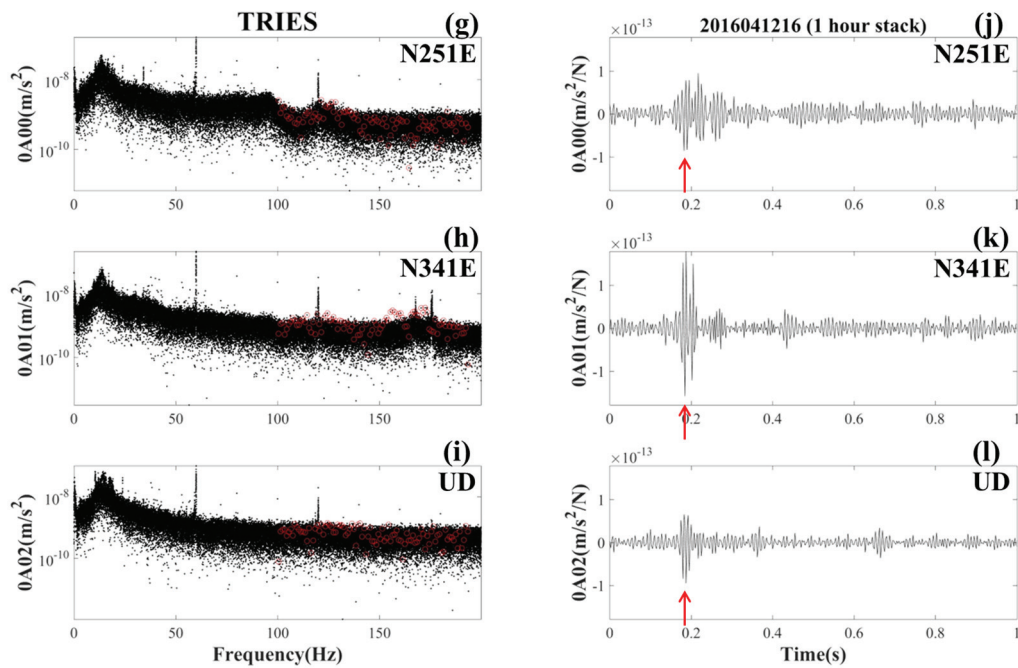


図7. TGR350とTRIESにおける結果(1時間スタッキング)。(a)~(c) TGR350で観測されたスペクトル。送信信号の周波数を赤丸で囲ってある。縦軸のラベルは、チャンネル番号と物理量単位(m/s)。各成分の方位は、右上に表記されている。(d)~(f) TGR350で得られたグリーン関数。赤矢印はP波初動と推定される走時。(g)~(i) TRIESで観測されたスペクトル。縦軸のラベルは、チャンネル番号と物理量単位(m/s²)。設置方位は、右上に表記されている。(j)~(l) TRIESで得られたグリーン関数。赤矢印はP波初動と推定される走時。

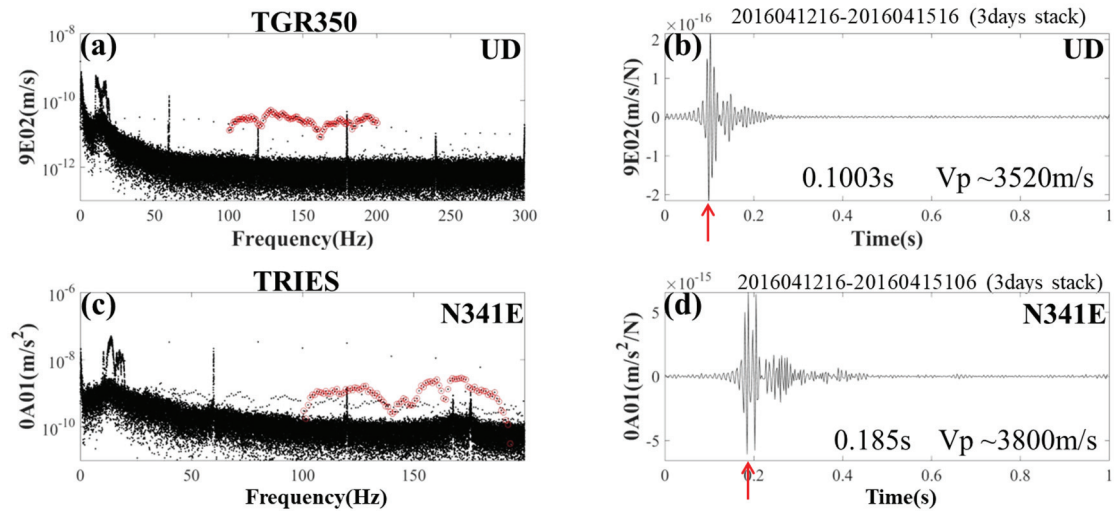


図8. TGR350とTRIESにおける観測結果(3日間スタッキング)。(a) TGR350で観測された上下動のスペクトル。縦軸のラベルは、チャンネル番号と物理量単位(m/s)。(b) TGR350で得られたグリーン関数 (c) TRIESで観測されたN341E成分のスペクトル。縦軸のラベルは、チャンネル番号と物理量単位(m/s²)。(d) TRIESで得られたグリーン関数。

～4600m/s とすれば説明できる。この値は、大久保ほか(2012)による P 波速度の推定結果 [2.3km/s±0.3km/s(瑞浪層群)や 5.1km/s±0.6km(土岐花崗岩)]の下限付近の値であるが、本実験では、パスが亀裂の多い低速度帯を通過しているためかもしれない。

4. まとめ

シングルフォース型の超磁歪震源を開発し、ボアホール総合観測装置による観測試験を行った。震源距離が、353m(TGR350)および 700m(TRIES)の観測点でも、1 時間程度のスタッキングで、P 波初動を明瞭に検出することができた。スタッキングによる S/N 比の向上も良好で、スタッキング時間と変化の時間分解能とのトレードオフとなるが、1km 程度の範囲ならば、十分地下モニタリングに使用できることが検証できた。今後は、長期間の稼働試験を行って、地下の変化のモニタリングへの適用性について調べる予定である。

参考文献

- 石井 紘・森輝夫・佐野 修, 2011, 超磁歪素子を利用した人工振動源の開発, 東濃地震科学研究所報告, Seq. No.27, 3-7.
- 大久保慎人・佐野 修, 2011, 矩形連続波一岩石物性(弾性波速度、周波数応答特性)測定への応用, 東濃地震科学研究所報告, Seq. No.27, 15-23.
- 大久保慎人・雑賀敦・鈴木貞臣・中嶋唯貴, 2012, 地震動観測による地震波速度と岩石物性試験による弾性波速度の関係一 段発破波形の相関による地震波速度構造推定一, 地震 2, 65, 21-30.
- 國友孝洋, 2014, Hi-net データによる走時変化計測の高精度化, 地震 2, 66(4), 97-112.
- 國友孝洋・山岡耕春・渡辺俊樹・吉田康宏・勝間田明男・生田領野・加藤愛太郎・飯高隆・津村紀子・大久保慎人, 2014, 弾性波アクロスによる東海地域の P 波および S 波速度構造の推定, 地震 2, 67(1), 1-24.
- 國友孝洋・石井 紘・浅井康広・大久保慎人・佐野 修, 2017, 超磁歪素子による精密弾性波計測システムの抜本的改良, 東濃地震科学研究所報告, Seq. No.38, 33-38.
- 佐野 修・大久保慎人・石井 紘, 2011, 超磁歪素子をもちいた精密弾性波計測システムの開発, 東濃地震科学研究所報告, Seq. No.27, 9-13.
- 地震予知総合研究振興会, 2015, 東濃地域における深地層研究施設を活用する試験研究等に係る事業, (1)一3制御震源の実用化と有用性の検証, 平成 26 年度東濃地震科学研究所事業報告書, 6.
- Takei Yasuko and Mineo Kumazawa, 1994, Why have the single force and torque been excluded from seismic source models?, Geophys. J. Int., 118, 20-30.

