

## 超磁歪震源による瑞浪層群内の地下モニタリング —観測壕内で発生した有感地震イベントによる地下構造変化—

國友孝洋・浅井康広・石井 紘・村上 理(東濃地震科学研究所)

### 1. はじめに

東濃地震科学研究所では、2016年に開発した超磁歪震源装置を用いた地下構造と地下の状態変化の常時モニタリングを約3年間にわたって継続している。2017年9月からは、中新世の堆積層である瑞浪層群内の変化とその原因を解明するために、送信周波数帯域を、それまでの100.5-200.5Hzから100.5-300.5Hzに広げ、より時間・空間分解能を向上させた観測を行っている。本報告では、瑞浪観測壕内に設置した地震計アレイによって観測された、瑞浪層群内で発生した有感の岩盤破壊現象とそれによるグリーン関数の変化(散乱構造の変化)とについて報告する。

### 2. 観測概要

#### 2-1. 地震計アレイと超磁歪震源の発振信号

瑞浪観測壕における超磁歪震源(GMSS: Giant Magnetostriction Seismic Source)および地震計アレイの位置を図1に示す。地震計は、固有周期8Hzの上下動ジオフォンを用い、約65mの測線長で12点に設置した。データロガーには、SC-ADH10K(シモレックス株式会社、4ch)を3台用い、サンプリング周波数1kHzで収録している。超磁歪震源およびデータロガーは、GPSに同期した常時1 $\mu$ s以内の精度で、弾性波の送受信が行われている。超磁歪震源の詳細は、國友ほか(2017)、國友ほか(2018)を参照のこと。超磁歪震源からの送信信号は、100.5-300.5Hzの帯域で、1Hz間隔201個の正弦波を重ね合わせた信号を送信している(図2)。

#### 2-2. 地震計の健全性の確認

地震計の健全性の確認のために地震計アレイで観測した自然地震(2018年4月14日、愛知県西部 Mj4.5、瑞浪の震度2)の例を図3に示す。観測データを物理量(速度値)に換算しただけで、フィルター等の処理は行っていない。波形や振幅が良く揃っており、特に問題のある観測点はないことが分かる。

### 3. 観測結果

#### 3-1. 超磁歪震源からの信号の観測結果(グリーン関数)

壕内地震計アレイで得られたグリーン関数のペーストアップを図4に示す。図では、1日スタックのグリーン関数を2017年9月14日から2018年8月20日までの約340日間、重ね書きしているグリーン関数の計算の詳細は、國友(2014)、國友ほか(2014)を参照のこと。地下構造や送信信号が変化しない場合は細い一本の曲線となるが、太くなっている部分は、地下の特定の場所に変化が生じており、そこを通過するフェーズの走時や振幅が変化していることを示している。

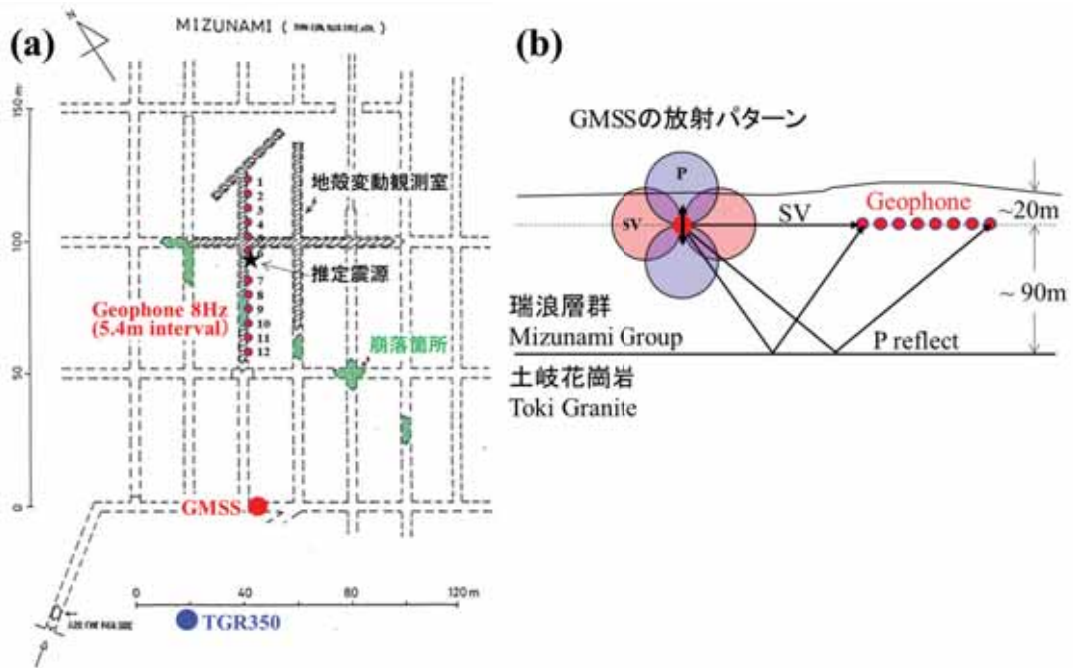


図1. 実験配置図。(a) GMSS(●:超磁歪震源)、Geophone 8Hz(●:固有周期8Hz 上下動地震計、1~12ch)、TGR350(●:ボアホール総合観測装置 GL-350m)。星印(★):2018年3月18日15時26分頃に発生した岩盤破壊の推定震源。黒ハッチ部:コルゲート鋼板で覆われた地殻変動観測室。緑色部:断層破砕帯と見られる崩落箇所。(b)簡略化した地下構造と超磁歪震源の弾性波(P波、SV波)放射パターンと波線の概念図。

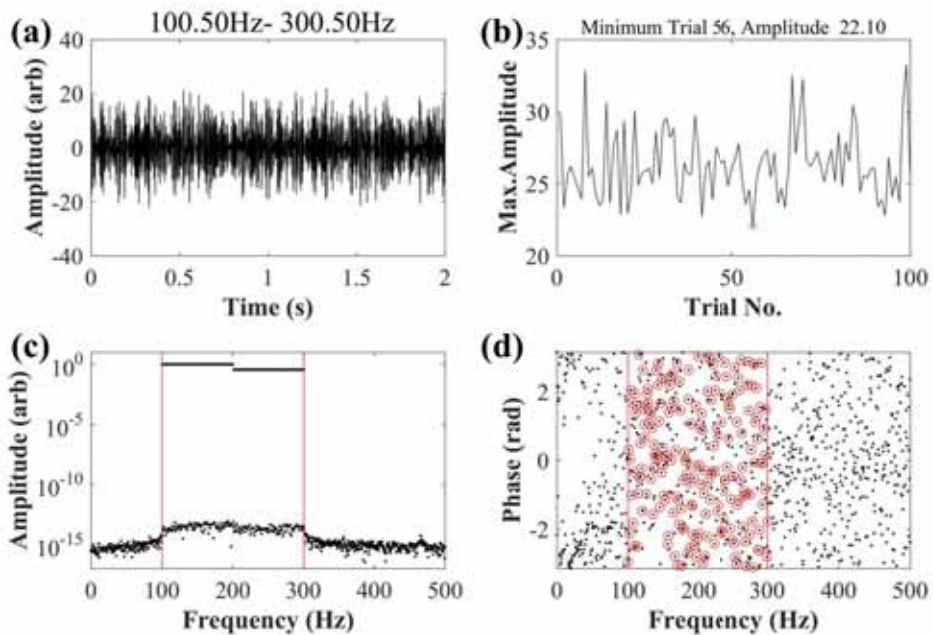


図2. 送信信号デザイン。100.5-300.5Hz の帯域で 1Hz 間隔の周波数の正弦波の位相をランダムに振って合成波形を計算し、100 回の試行で最大振幅が最小となる位相の組み合わせを選択した。(a) 合成波形 (b) 各試行における合成波形の最大振幅 (\*: 最少となった 56 番目の試行)。(c) 振幅スペクトル。100.5-200.5Hz は、以前と同様に一定振幅としたが、201.5Hz 以上の周波数では錘の加速度の平均値がそれぞれの帯域で同じになるように振幅を下げていく。(d) 位相スペクトル(黒点)。赤丸は、送信信号信号周波数。それ以外の黒点はノイズ。

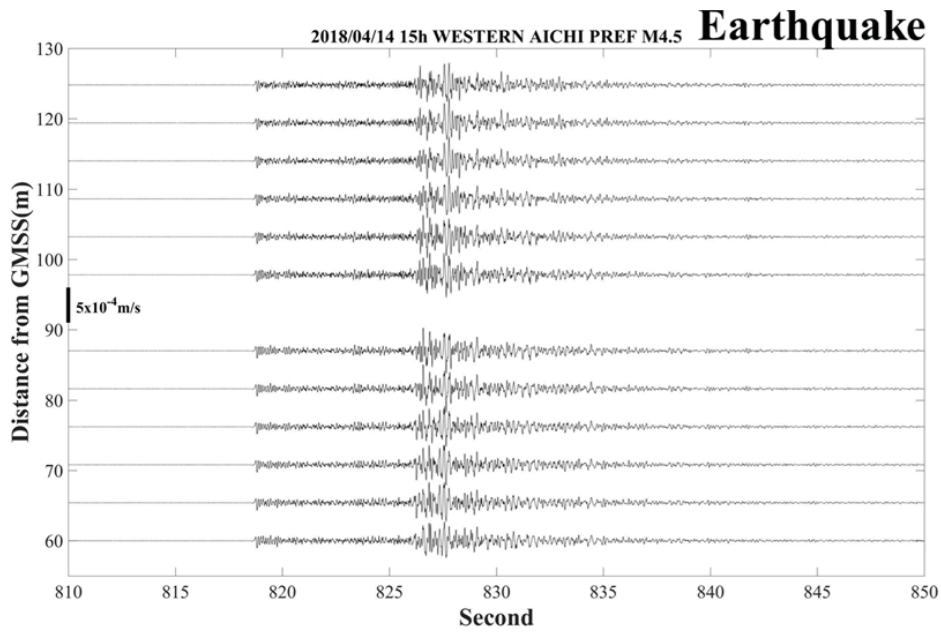


図3. 地震計の健全性の確認。愛知県西部の地震。2018年4月14日 (M4.5、瑞浪市で震度2を観測)。スケールバーは、 $5 \times 10^{-4}$  m/s。各観測点間で振幅や波形が良く揃っており、フェーズの追跡を容易に行うことができる。

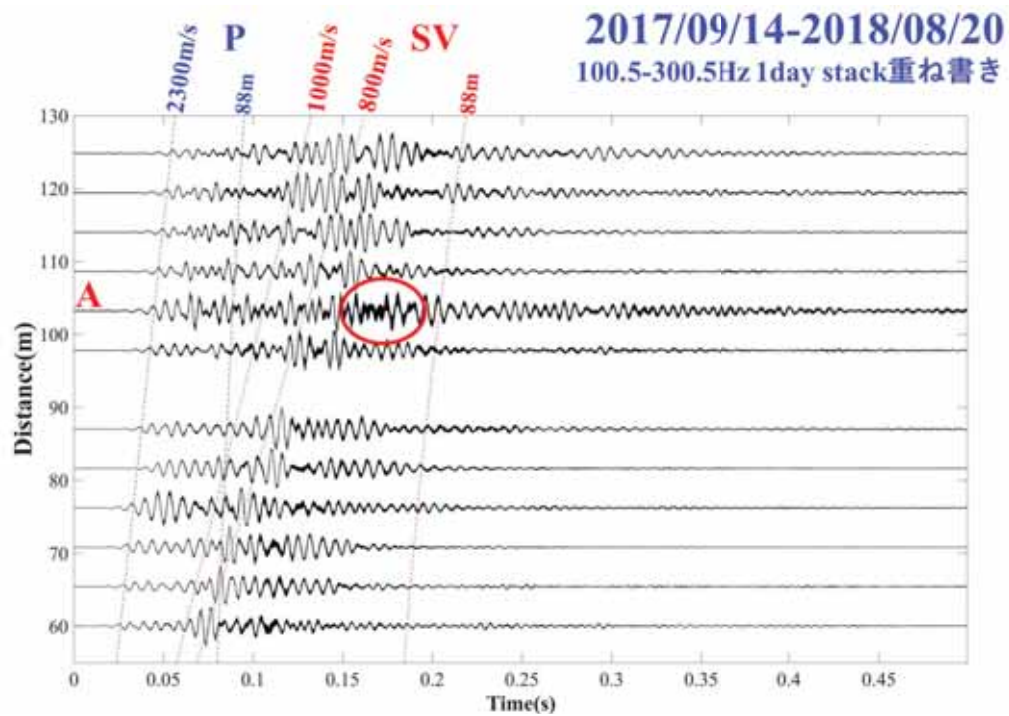


図4. 地震計アレイで観測されたグリーン関数のペーストアップ。1日毎のグリーン関数を重ね書きした(2017年9月14日～2018年8月20日)。振幅は、最大振幅で規格化した。特に観測点A(ch5)で変化が大きく線が太くなっている部分がある(赤丸)。破線は、 $V_p=2300$  m/s、 $V_s=1000$  m/s(直接波 $V_s=800$  m/s)、土岐花崗岩の深度を88mとして計算した走時曲線である。青 2300m/s:直接 P 波、青 88m:土岐花崗岩からの反射 P 波、赤 800m/s:直接 SV 波、赤 1000m/s:屈折 SV 波、赤 88m:不整合面からの反射 SV 波。

この期間では、距離 103m にある観測点 A (図 1 の 5) の 0.17s 付近の曲線が特に太くなっており、このフェーズが通過する地下の特定領域で変化が大きいことを示している。P 波部分や屈折・直接 SV 波は、ほぼ一本の曲線に見えており変化が小さい。他の観測点でも、直接 SV 波 (800m/s の走時曲線) の後続部分は線が太くなっており、変化が比較的大きいことが分かる。

### 3-2. 瑞浪観測壕で発生した有感地震イベント

2018 年 3 月 28 日 15 時頃、有感地震イベントが瑞浪観測壕内で発生したことが、その時に現地で作業していた者によって報告されている (浅井私信)。壕壁の崩落が疑われたが、伸縮計のある地殻変動観測室内 (図 1 黒ハッチ部) はコルゲート鋼板が巻かれており、その変形など目視で確認される異常はなかった (図 5)。また、観測室外の素掘りの壕壁についても崩落が起こった跡は確認されなかった。



図5. 震央付近の様子。地殻変動観測壕で直交する坑道の交点付近である。

有感地震が発生した時間帯に地震計アレイで観測された大振幅イベント (以下、Event X) のペースタップを図 6 に示す。Event X の発生は、2018 年 3 月 28 日 15 時 26 分 17.9 秒。振幅は、ch6 が最大で、ch5 (観測点 A) とともに顕著に大きい。その 2 点から離れると、振幅は急激に減少している。このことから Event X の励起源は、ch6 (97.8m) 付近にあると見られる。初動を直線フィットさせると、ch6 と ch7 の間に交点 (震央) が得られる。ch6 および ch5 のみで大振幅であることを説明するためには、地震計アレイのそばに震源を想定する必要がある。Event X で発生した振動の継続時間は、1 秒程度である。この時間の記録を TGR350 および TGR165 の 10kHz サンプルデータで確認したが、対応する波形は認められなかった。一方、瑞浪観測壕観測室の端 (図 1.STS) にある STS-1 では、水平動 (EW 成分、N77E) が、Event X の発生のタイミングで大きくドリフトする現象が観測された (図 7)。上下動成分への影響はわずかで、NS 成分 (N347E) は、フィードバックレンジをオーバーしていたため地動データが観測されていなかった。この水平動の異常は、Event X の衝撃によるものとみられるが、詳細は不明である。



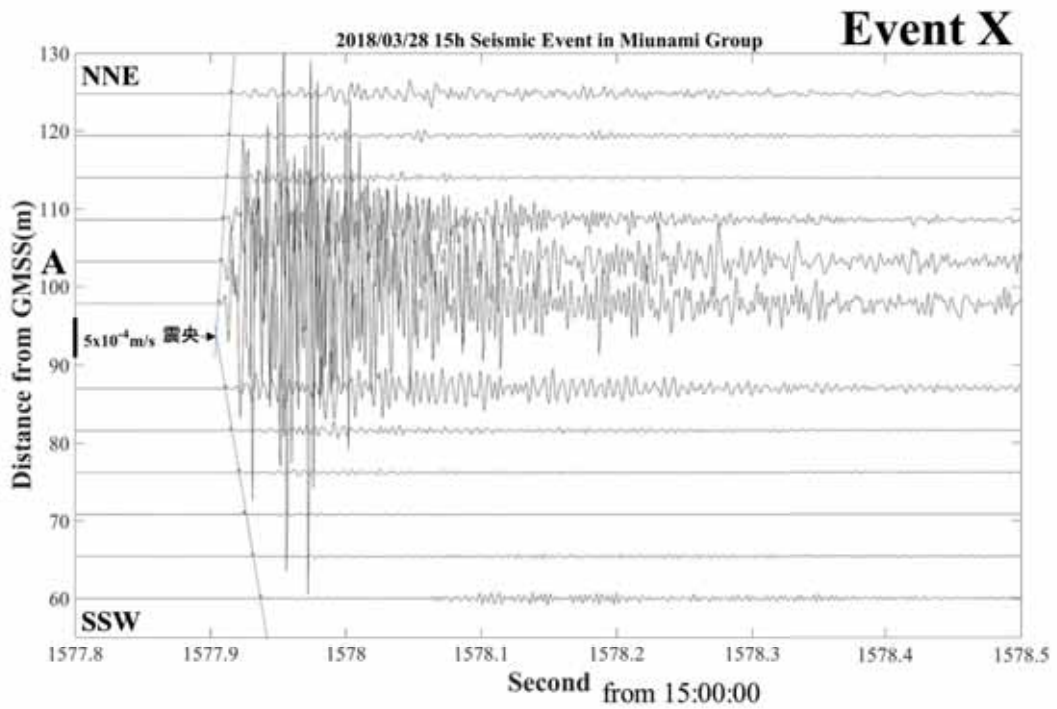


図6. 瑞浪観測場で発生した有感地震イベントの地震計アレイによる観測波形。赤点は、初動の走時を示す。横軸は15時0分0秒からの経過秒数。青線は、震央と書いた点からNNE側とSSW側それぞれの初動を最小二乗フィットさせた直線。

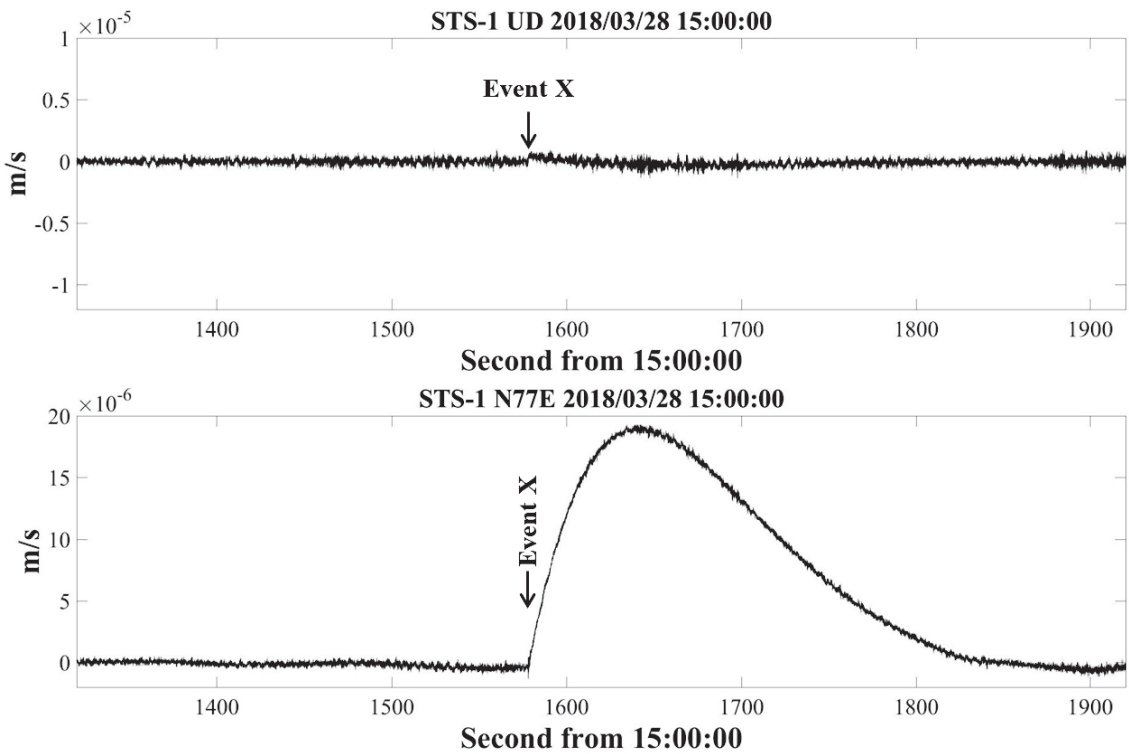


図7. Event Xによる瑞浪観測場内のSTS-1地震計への影響。横軸は、15時0分0秒からの経過秒数。

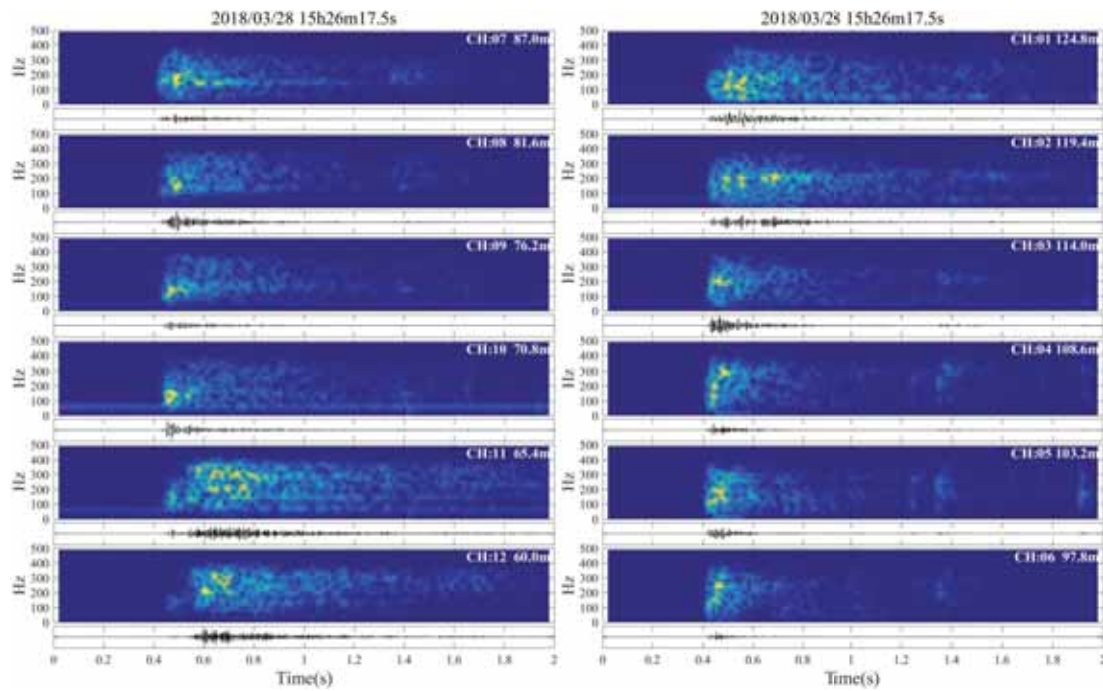


図8. Event X のランニングスペクトル。暖色部の振幅が大きい。0.05s の時間区間にハニング窓を適用し、0.01s ずつずらしながらスペクトルを計算。

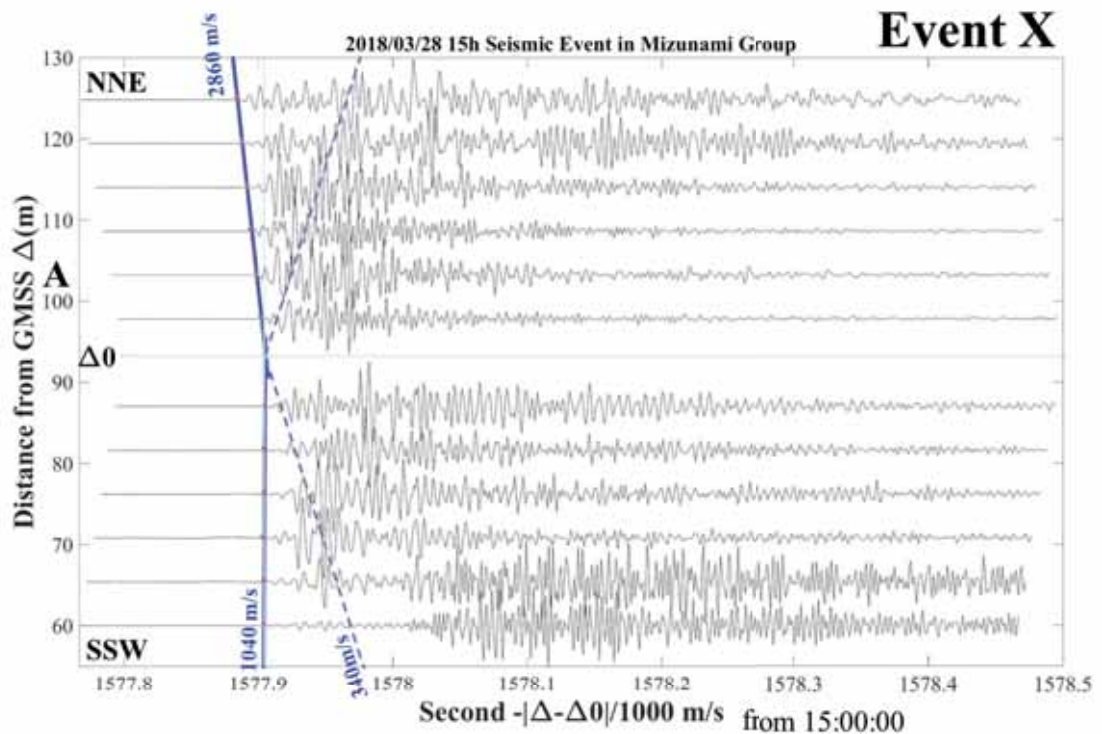


図9. 走時を1000m/sでリデュースしたEvent Xのペースアップ。各観測点の振幅は、最大振幅で規格化している。NNE 方向には、2860m/s で、SSW 方向には 1040m/s で初動が伝播している。

図 8 に Event X のランニングスペクトルを示す。Event X は、200Hz 前後の高周波成分に卓越しており、100Hz 以下の低周波成分をあまり含んでいない。伝搬するフェーズを同定するために、推定した震央を原点として時間軸を 1000m/s でリデュースしたペースアップを図 9 に示す。初動は、震央の NNE 側には 2860m/s、SSW 側には 1040m/s の見かけ速度で伝播している。音波 (340m/s) として伝搬するフェーズは見えていない。

### 3-3. Event X によるグリーン関数の変化

超磁歪震源からの信号を観測点 A (ch5) で受信して得られた Event X 前後 (3 月 21 日～4 月 4 日) の 1 時間毎のグリーン関数の変化を図 10 に示す。Event X が発生した 3 月 28 日 15 時台を境に、グリーン関数の波形が変化している。特に P および SV の後続波で変化が大きく、変化は走時全体に及んでいる。Event X によって近傍の散乱構造が変化したことが原因と考えられる。

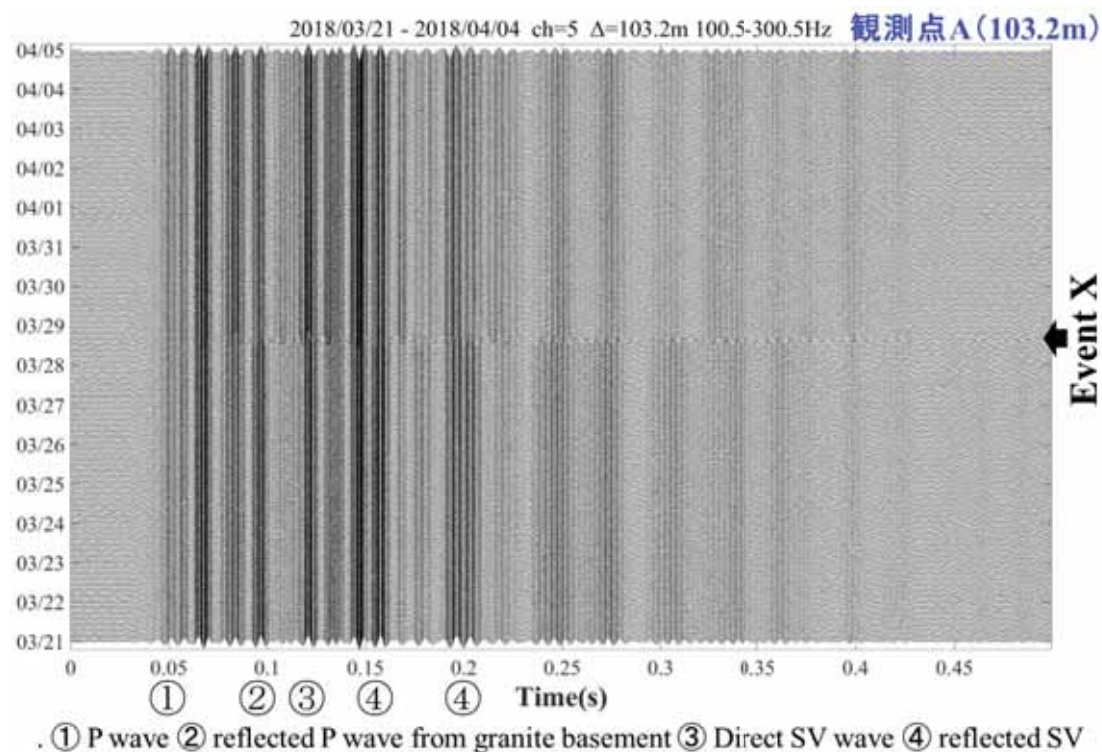


図 10. Event X 前後の 1 時間毎のグリーン関数の波形変化 (2018 年 3 月 21 日～4 月 4 日)

地震計アレイの全観測点における変化を図 11 に示す。期間は、2018 年 3 月 21 日から 4 月 4 日までである。図 11 では、変化のみを強調するために、3 月 21 日の 1 日間スタックデータによるグリーン関数を基準として、1 時間毎のグリーン関数との差分を表示している。縦方向にみえる黒い帯は、特定の走時のフェーズが時間的に変化していることを示している。このような変化の原因としては、地下水流動が考えられる、本報告では議論しない。別途報告する予定である。震央に近い ch6～ch4 で Event X を境に走時全体に及ぶ大きな変化が見られる。これは、震央付近で岩盤破壊による散乱構造が変化したため、様々なパスでやってくる弾性波が、Event X の震源近傍で散乱しているためと考えられる。

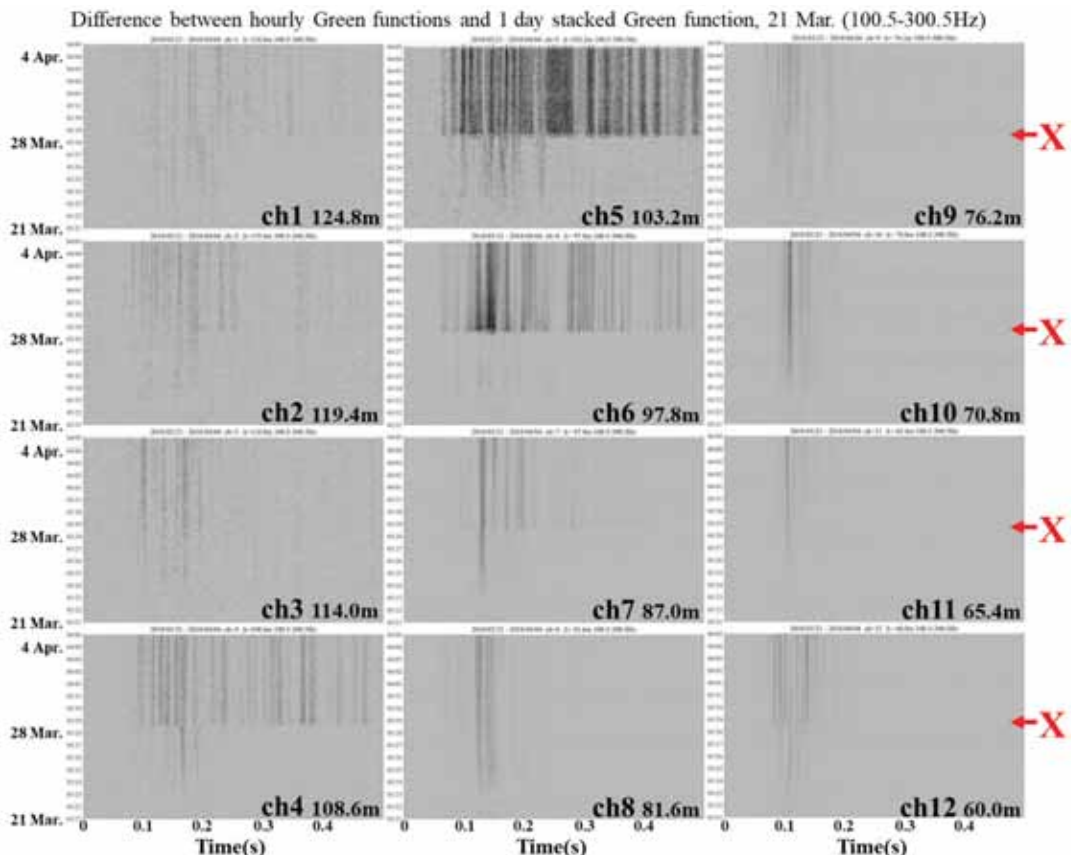


図 11. 全観測点のグリーン関数変化(2018年3月21日~4月4日)。3月21日の1日間スタックグリーン関数と1時間毎のグリーン関数との差分を表示している。

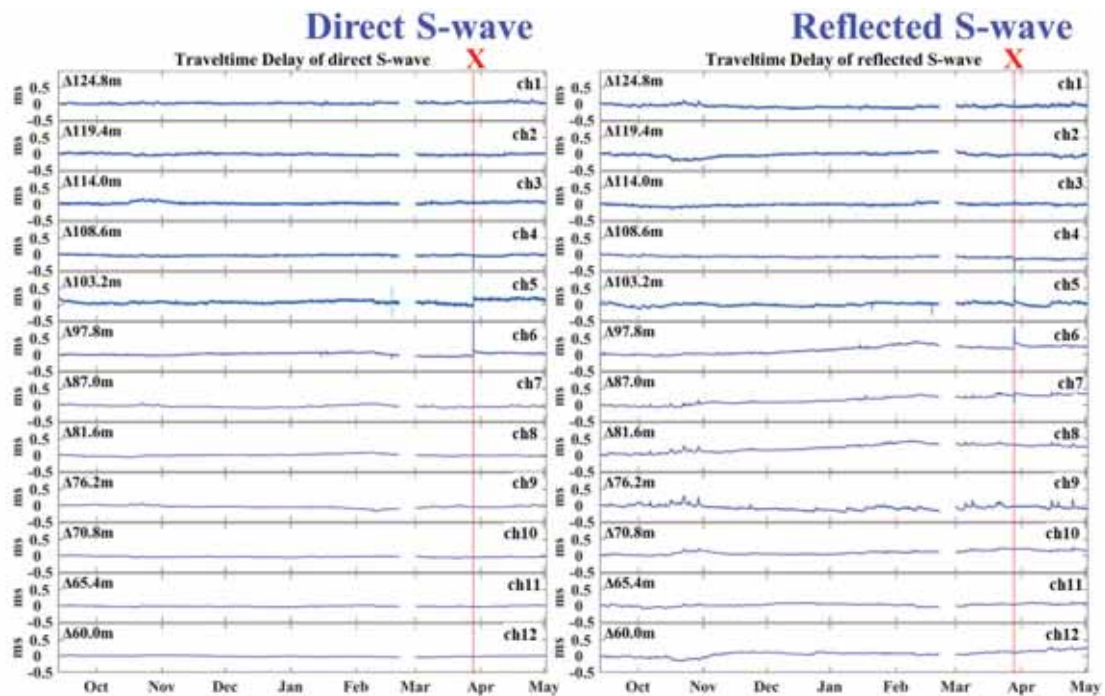


図 12. 1時間毎のSV波の走時変化。各フェーズに対してクロススペクトル法により推定した。上向きの変化が走時遅延を表す。赤線はEvent Xの発生時を示す。(左図)直接SV波(右図)瑞浪層群内の反射SV波。



図 12には、クロススペクトル法[例えば、國友(2014)]で計算した直接 S 波と反射 S 波の走時変化を示す。直接 SV 波(800m/s)は ch6、ch5で、反射 SV 波(直接 SV 波の後に見られる瑞浪層群内での反射フェーズ)は ch4～ch7で 0.1ms～0.3ms 程度の走時変化が認められる。走時変化は、反射 SV 波の ch4を除いて全て遅延である。このように震央近傍の観測点では走時変化が見られるのは、Event X の際に近傍で岩盤破壊が生じたためと考えられる。反射 SV 波の ch5 および ch6 では、Event X で生じた走時遅延が 1 週間程度で回復していく様子も見られる。

#### 4. 議論と結論

Event X は、有感地震となったことから何らかの岩盤破壊現象と考えられる。破壊領域の規模としては、振幅が、地震計アレイの隣り合う 2 点(ch6 と ch5)で最も大きく、その外側(ch7と ch4)で急激に小さくなっていることから、大きくても地震計の間隔(5.4m)程度と考えられる。超磁歪震源からの弾性波の送信周波数が 100.5～300.5Hz で、観測している SV 波(1000m/s)の波長が 3～10m(300～100Hz)程度であることを考えると、岩石破壊によって生成された散乱体の規模もこのオーダー(3～10m)であると想定され、上記の振幅分布による推定とも整合している。

これまで述べてきた性質から、Event X を壕壁の単純な崩落で説明するのは難しい。例えば、以下の疑問がある。

- 1) 数 m(数トン)規模の岩塊の落下・衝突によって弾性波が励起されたとすると、低周波成分があまり見られないのは不自然である。
- 2) 岩塊の落下・衝突によって弾性波が励起された場合、主として P 波が励起されると考えられる。伝播速度(見かけ速度)から、初動は、NNE 側には P 波が、SSW 側には SV 波が伝播しているとみられ、このような放射パターンを岩塊の落下・衝突現象で説明するのは難しい。
- 3) Event X による超磁歪震源からの SV 波の走時の遅延(速度の低下)が観測され、下方からのフェーズ(反射 SV 波)については、遅延した走時が 1 週間程度で回復する現象も見られた。上盤の崩落であれば、下方からのフェーズの走時遅延やその回復を説明するのは難しい。下盤の地層内での岩盤破壊現象を見ていると考えられる。また、ch4で遅延ではなく走時が少し早くなっている。これは、岩盤破壊領域のすぐ外側で SV 波の速度が大きくなった可能性がある。

これらの観測結果を総合すると、Event X は、壕壁の崩落現象ではなく、瑞浪観測壕内の床面下の瑞浪層群中で生じた地震(断層運動としての岩盤破壊)である可能性が高い。発生場所は、瑞浪地殻変動観測壕の崩落場所である断層破碎帯の近くでもあり、堆積層群内での極微小地震の発生を捉えたものと思われる。

#### 5. まとめと課題

2018年3月28日15時頃、瑞浪地殻変動観測壕内で、高周波の有感地震イベント(Event X)が発生した。このイベントに伴い、超磁歪震源と地震計アレイを用いて観測しているグリーン関数に変化が見られた。地震計アレイで観測された波形やグリーン関数の変化から、Event X は、壕

内の崩落現象(落盤)ではなく、壕の下盤の地層内で発生した極微小地震である可能性が高いと考えられる。

ch5や ch6 付近で大振幅が観測される同様の地震は、時々発生している。ただし、振幅は、Event X に比べて桁で小さく、グリーン関数にも有意な変化は見られない。また、最も振幅が大きい観測点は、ch5の場合も ch6の場合もある。堆積層群内で発生するこうした地震現象は、壕の大崩壊といった事象に繋がるかもしれず、より詳細な調査が必要と考えられる。

#### 参考文献

- 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.
- 國友孝洋・石井 紘・浅井康広, 2018, 超磁歪震源の開発とボアホール観測網による観測試験, 東濃地震科学研究所報告, Seq. No.40, 71-79.