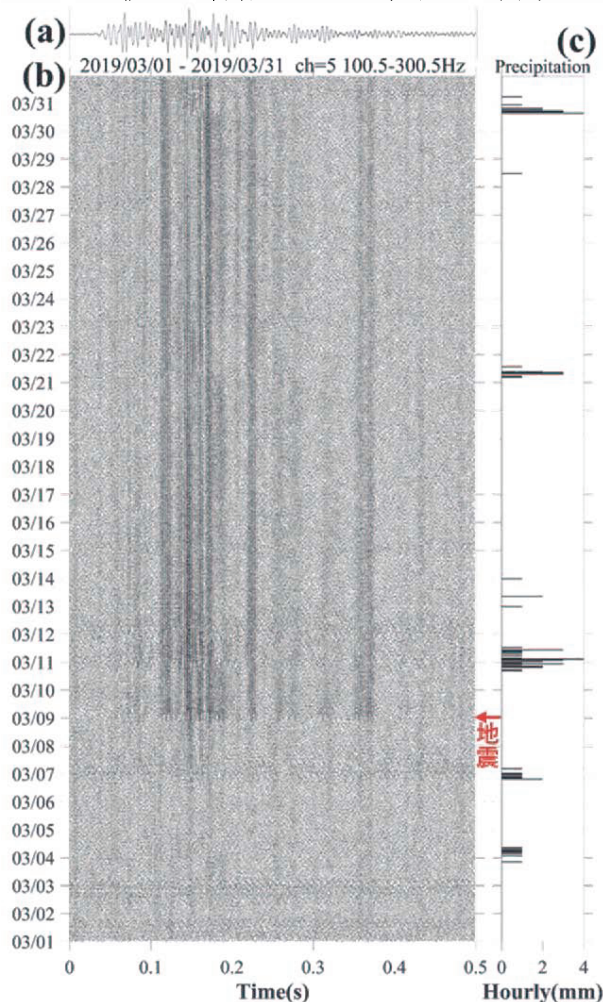


2.3 ACROSS 観測による弾性波(地震波)速度変化と応力、歪変化との関連研究

2.3.1 制御震源の実用化と有用性の検証

平成 22 年度より本事業では、瑞浪観測壕内に超磁歪素子を用いた弾性波制御震源（以下、超磁歪震源装置）の開発と運用を行っている。本事業の主目的は、超磁歪震源の有用性を検証し、弾性波により地下の弾性波速度変化や岩盤や地下水の挙動を明らかにすることである。平成 27 年度には、GPS に同期した任意波形を発生できるシングルフォース型の超磁歪震源（以下、新震源）を新たに開発し、平成 28 年 4 月に地下のモニタリングを開始した。その結果、熊本地震（2016/04/16 M=7.3）前後の直接 P 波の走時変化が土岐花崗岩中の間隙水圧（STG200N）の変化と良く一致していることが判明した。また、平成 28 年 8 月からは、瑞浪観測壕内に小規模な地震計アレイを設置して、瑞浪層群内の地下構造変化のモニタリングを開始した。平成 30 年度には、地震計アレイの観測により有感地震となった壕壁付近の岩盤破壊現象（2018 年 3 月 28 日）で震源近傍の散乱構造が変化していることが判明し、2018 年 7 月以降のデータに、降雨やその後の地下水流動に対応すると考えられる散乱構造の変化が見えていることが分かった。

平成 31（令和元）年度も実験を継続し地震や降雨の影響による変化を調べた。今年度末で新震源による連続稼働実績は 4 年間となった。その間、停電による停止以外は、ほぼ完全にメンテナンスフリーであった。震源の心臓部である超磁歪アクチュエータは、改造前もほぼ連続的に稼働しており、約 10 年間の連続稼働実績を得たことになる。



地震によるグリーン関数変化の一例

(a) 地震計アレイ Ch5 で観測されたグリーン関数。2019 年 3 月の 1 日スタックデータを重ね書き (b) 2019 年 3 月 1 日～3 月 31 日の 1 時間毎のグリーン関数変化 (3 月 1 日 0 時との差分) (c) 瑞浪市の日吉観測所（国交省 庄内川河川事務所）における時間降水量。

グリーン関数は、3 月 9 日午前 1 時頃を境に大きく変化しているが、これは、3 月 9 日 1 時 8 分 3.5 秒に発生した岐阜県美濃中西部の地震（Mj4.4、深さ 42km、瑞浪市での震度 3）による変化と考えられる。P 波部分はほとんど変化しておらず、走時 0.1s 以降の S 波および後続波が大きく変化している。走時 0.15s 付近のフェーズは、地震前から変化している。このフェーズは、走時から瑞浪層群と土岐花崗岩の不整合からの反射波とみられ、不整合面の上下は透水層になっていることから、降雨による地下水流動に敏感であると考えられる。

2.3.2 ACROSS 観測による弾性波(地震波)速度変化と応力、歪変化との関連研究

東濃鉾山にある弾性波アクロス土岐送信所からの弾性波信号を、土岐花崗岩体内に地震計が設置されている TGR350 (GL-350m) および TGR165 (GL-165m) で観測した 2004 年 4 月 6 日～2012 年 3 月 31 日のデータを解析した。送信所および観測点の位置を図 1 に示す。送受信点間の距離は約 2.5km、瑞浪超深地層研究所 (以下、MIU) の立坑と送受信のパスまでの距離は約 0.3km 離れている。MIU では、2005 年 7 月 17 日に立坑掘削工事が開始され、深度 500m まで主立坑と通気立坑の掘削が行われた。その間、予備ステージ (水平坑道) が 100m 毎に設けられ、観測や実験が行われてきた。

SH および SV 波の 1 日毎の走時変化と TGR350 の地下水位を図 2 に示す。TGR350 の地下水位は、MIU 立坑 200m 予備ステージで観測 (2009 年から開始) された間隙水圧と良い対応を示すことが分かっている。S 波の走時は、大きな地震の際にステップ状に遅くなる結果が得られた (図 2、黒数字 1～5)。特に 2011 年の東北地方太平洋沖地震 (M9.0。以下、東北地震) の際に顕著な走時遅延があった。また、TGR165 での走時変化が大きく、同じ観測点では、SV 波に比べて SH 波の走時変化が大きい。これは、土岐花崗岩の浅部ほどクラックが多いこと、また、東北地震によって本地域が伸張場となり、北東-南西方向に延びて主として北西-南東方向のクラックが開いたため、振動方向がこれらのクラック面と直交する SH 波の速度が遅くなったことが原因であると解釈できる。なお、MIU 付近の土岐花崗岩体には、大きな地震の際に間隙水圧が上がる性質があることが知られている。

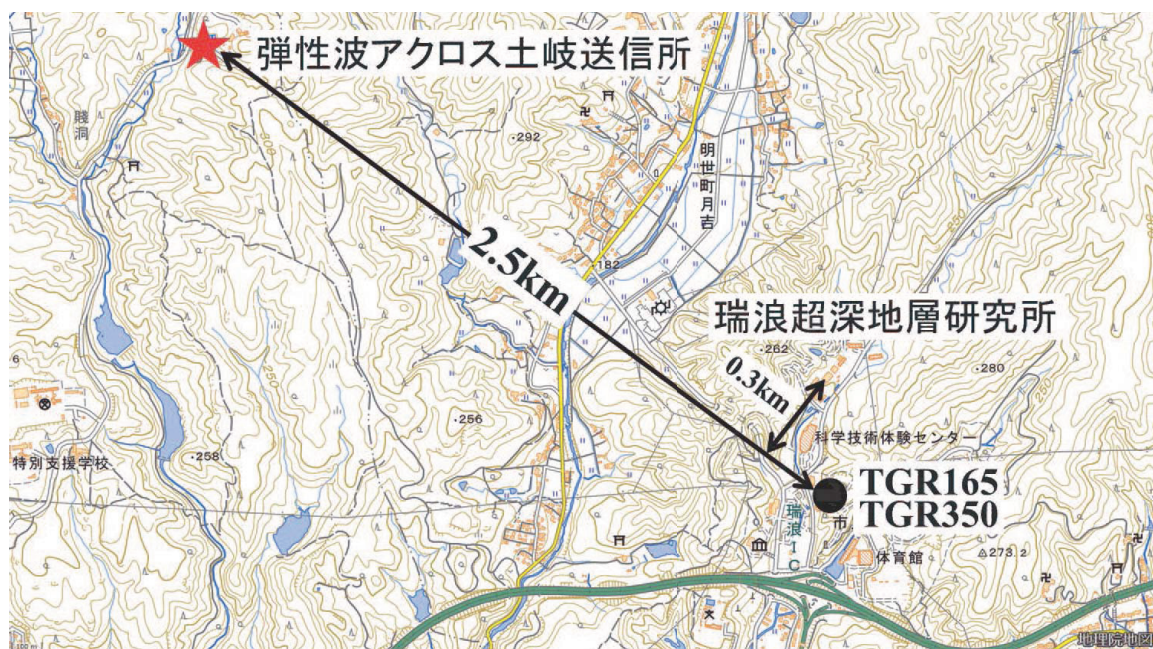


図 1 観測点配置図

図 2 で、大きな地震によってステップ状に走時が遅くなる現象や年周変化のような短期的な変動を無視すると、S 波の走時は 2005 年 6 月 16 日 (赤数字 1) 頃から、掘削の進捗に伴って徐々に早くなっている。これは、掘削深度により異なる“みずみち”からの立坑内への湧水を地上に排水することで、周囲岩盤から地下水が抜けて、クラックが閉じる領

域が拡大していくためであると考えられる。排水の影響であることは、TGR350 の地下水位が同様のパターンで低下していることから裏付けられる。一方、地震とは関係なく S 波走時が遅くなり、TGR350 の水位が上昇している期間がある（赤数字 2 と 3 の間）。この期間は、排水中のフッ素などの濃度が環境基準を満たしていないということから、その対策のために排水が停止していた期間である（2005 年 10 月 27 日から 2006 年 2 月 20 日）。排水が停止したことで、MIU 周辺の岩盤の間隙水圧が上昇し（TGR350 の地下水位も上昇し）、岩盤中のクラックが開くことで S 波速度が低下したと考えられる。地下水位（間隙水圧）が元のレベルに戻るとともに S 波走時も元のレベルに戻っている。排水および掘削が再開されると、地下水および S 波走時は排水停止時のレベルに戻り、掘削深度が深くなるとともに、徐々に地下水位が低下、走時が段々早くなる傾向に戻っている。なお、排水停止期間および東北地震、それぞれの地下水位の変化と S 波走時の遅延の大きさを比べると、相対的に東北地震の際の方が S 波走時（速度）変化の割合が大きくなっている。これは、排水停止による S 波速度変化が MIU 近傍に限られるのに対して、東北地震による S 波速度変化が S 波経路全体を含む広域に及んでいるためと考えられる。

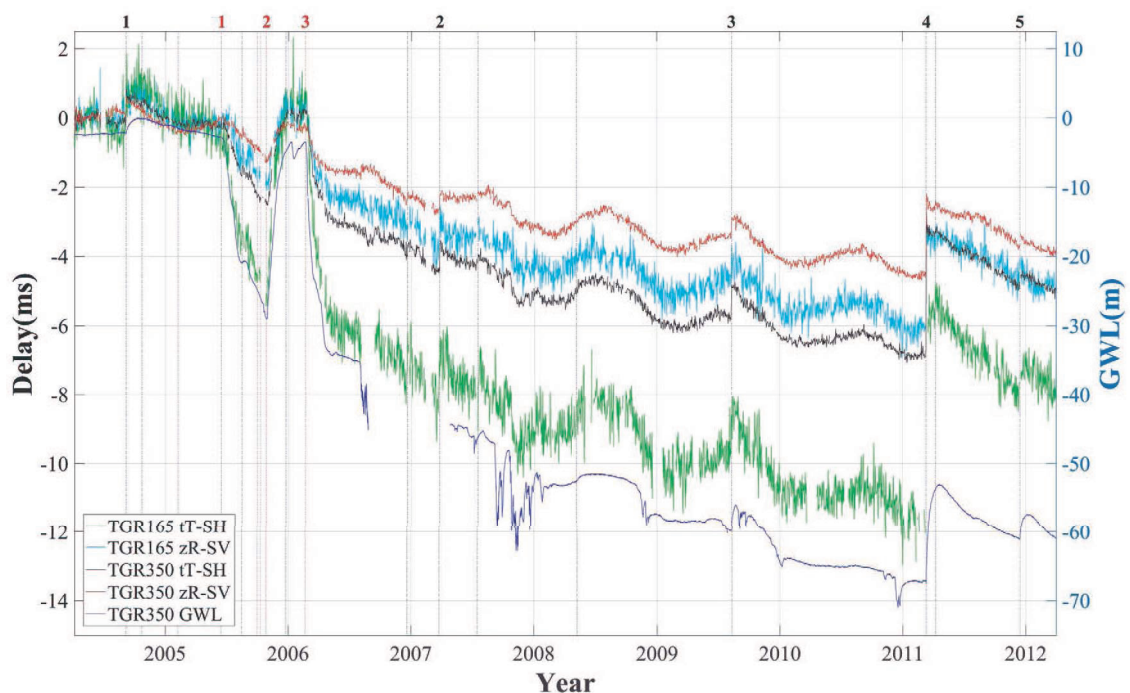


図 2. TGR165 および TGR350 で観測された 2004 年 4 月 6 日～2012 年 3 月 31 日の 1 日毎の SH および SV 波の走時変化。赤数字は MIU 立坑の掘削イベントで、1：100m 予備ステージ貫通、2：排水停止、3：排水開始。黒数字は地震で、1：2004/09/05 三重県南東沖（M7.4 震度 3）、2：2007/03/25 能登半島沖（M6.9 震度 3）、3：2009/08/11 駿河湾（M6.5 震度 3）、4：2011/03/11 東北地方太平洋沖（M9.0 震度 3）、5：2011/12/14 美濃東部の地震（M4.3 震度 3）。震度は瑞浪市の値。