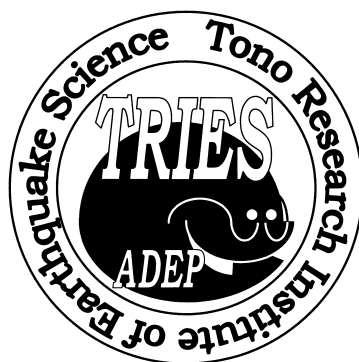


深地層の研究施設を使用した試験研究成果に基づく
当核施設の理解促進事業費補助金

東濃地域における深地層研究施設を活用する 試験研究等に係わる事業

令和3年度 東濃地震科学研究所事業報告書



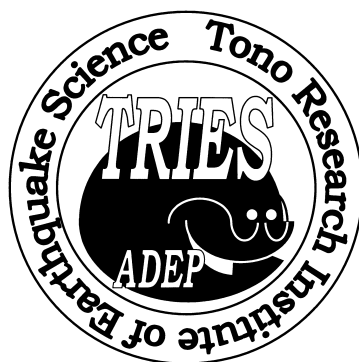
2022年3月

公益財団法人 地震予知総合研究振興会

深地層の研究施設を使用した試験研究成果に基づく
当核施設の理解促進事業費補助金

東濃地域における深地層研究施設を活用する 試験研究等に係わる事業

令和3年度 東濃地震科学研究所事業報告書



2022年3月

公益財団法人 地震予知総合研究振興会

令和3年度 東濃地震科学研究所事業計画

本事業計画は、深地層研究施設の設置および運転の円滑化に資するため、瑞浪超深地層研究所施設の活用による内陸地震の研究および東濃地域に資する地震防災に関する研究を推進するものである。

事業の内容は、

1. 深地層・地下空間における観測機器・技術の開発研究および地下水流動研究
2. 内陸地震および活断層地域における地震の発生機構および関連現象の総合的研究

の2本の柱で構成している。

当研究所は、平成9年の設立以来、日本原子力研究開発機構の立坑を中心に深部ボアホール総合観測網、および東濃地域に高密度地震観測網を展開するとともに、臨時地震観測、水準測量観測網による上下変動測量や重力計による重力観測を実施してきた。

事業の実施にあたっては、その円滑な運営を図るため、外部有識者を委員とした東濃地震科学研究所運営委員会を開催している。

なお、これらの研究および研究開発に対する目標、成果等の妥当性については「経済産業省技術評価基準」を準用し、外部有識者を委員とした第5回目の中間評価検討会を平成29年度に実施、高い評価を得たところである。

令和3年度においては、日本原子力研究開発機構が定めた「令和2年度以降の超深地層研究所計画」に示された坑道の埋め戻し作業が本格化することを踏まえ、立坑の埋め戻しによる状態変化の研究を重点的に推進する。

観測体制の特徴

地殻活動総合観測装置は、地下深部（1km）において総合観測が可能である。この観測機器は、日本原子力研究開発機構の立坑を利用して、当研究所で開発した計器であり、世界的にも例を見ない画期的な観測計器と言える。研究所が設立されて以来、構築してきた観測体制から、蓄積され続けている応力計・歪計・傾斜計・地震計・温度計・水圧計・磁力計などのデータにより、今までに出来なかった新たな研究が可能になり、事業の効果的な推進が可能となった。

一方、立坑の各ステージに設置した観測システムについては、令和2年度から本格化する立坑の埋め戻し作業に耐えられないことから、平成31年度においては、埋戻し期間中や埋め戻し後においても観測が継続できるよう、対策工事を実施したところであり、経費と作業可能時間のために観測の継続は、500mと200mに設置した観測システムのみとなった。埋め戻し工事の都合により、データ伝送システムの休止や移設が行われたが現在、連続した貴重なデータを得ることが可能となった。

目次

事業報告概要

1. 深地層・地下空間における観測技術の開発および地下水流動研究	1
1.1 立坑埋め戻しによる状態変化の研究	1
1.1.1 地下500m・200mでの観測計器の埋め戻し対応準備	1
1.1.2 水準測量による上下変動の研究	3
1.1.2.1 立坑の掘削深度および湧水・地下水位変動と近傍での上下変動の 時間変化(2004-2021)	3
1.1.2.2 時系列変化に基づく地下水位低下と沈降のメカニズム考察	4
1.1.2.3 沈降と立坑南東の地下水盆の分布	6
1.1.2.4 埋め戻しによる湧水の消滅と地下水位低下と沈降の回復	6
1.1.3 地下500mでの埋戻しに伴う応力・水圧・歪変化の連続観測	8
1.1.4 立坑埋め戻し工事に伴う重力関連現象検出の試み	10
1.2 地球物理学的方法による地下水流動の研究	13
1.2.1 揚水実験と立坑内の湧水により生じた歪・傾斜変化とNNW断層	13
1.2.1.1 観測状況と観測結果	13
1.2.1.2 解析結果と地下水流動・断層・歪・傾斜に関する議論と考察	14
1.2.2 インテリジェント小型歪計を用いた応力解放法による測定について (その2)	17
1.2.2.1 はじめに	17
1.2.2.2 応力の絶対量計測の実施手順	17
1.2.2.3 応力の絶対量計測の解析原理	17
1.2.2.4 屏風山および陶史歯の森で実施された応力開放法による測定結果と その解析	18
1.2.2.5 おわりに	19
1.2.3 重力計水平アレイ観測	21
1.2.4 超磁歪起震装置の開発・改良による地下水流動研究	23
1.2.5 トンガの海底火山噴火により観測された記録例	26
2. 内陸地震および活断層地域における地震の発生機構および関連現象の総合的研究	27
2.1 東濃地域の地震活動および地殻活動の研究	27
2.1.1.1 12年間の研究について	27
2.1.1.2 陶史の森観測点(TOS)の応力計で観測されたマントル共鳴	27
2.1.2 東濃地震科学研究所の歪計・応力計で記録された地震動収録の終了 と最終版 TRIES_SSS_DBの構成	30
2.1.3 コア変形法による岩盤応力の測定と応力開放法による測定の比較による 信頼性の検討	34
2.1.3.1 はじめに	34
2.1.3.2 コア変形法による岩盤応力の測定法の概要	34
2.1.3.3 釜石鉱山における円錐孔底応力測定とコア変形法に使用した コアの採取位置	34
2.1.3.4 釜石鉱山のコアに対する測定結果	35
2.1.3.5 まとめ	36
3. 広報活動など	38
3.1 地元イベントへの参加:おもしろ科学館 in 瑞浪	38
4. 研究成果の発表	39
4.1 成果の発表	39
4.2 最新研究発表会	39

参考資料

研究組織・各種委員会等名簿	41
---------------	----

事業報告 概要

事業報告概要

1. 深地層・地下空間における観測技術の開発および地下水流動研究	1
1.1 立坑埋め戻しによる状態変化の研究	1
1.1.1 地下500m・200mでの観測計器の埋め戻し対応準備	1
1.1.2 水準測量による上下変動の研究	3
1.1.2.1 立坑の掘削深度および湧水・地下水位変動と近傍での上下変動の 時間変化 (2004–2021)	3
1.1.2.2 時系列変化に基づく地下水位低下と沈降のメカニズム考察	4
1.1.2.3 沈降と立坑南東の地下水盆の分布	6
1.1.2.4 埋め戻しによる湧水の消滅と地下水位低下と沈降の回復	6
1.1.3 地下500mでの埋戻しに伴う応力・水圧・歪変化の連続観測	8
1.1.4 立坑埋め戻し工事に伴う重力関連現象検出の試み	10
1.2 地球物理学的方法による地下水流動の研究	13
1.2.1 揚水実験と立坑内の湧水により生じた歪・傾斜変化とNNW断層	13
1.2.1.1 観測状況と観測結果	13
1.2.1.2 解析結果と地下水流動・断層・歪・傾斜に関する議論と考察	14
1.2.2 インテリジェント小型歪計を用いた応力解放法による測定について (その2)	17
1.2.2.1 はじめに	17
1.2.2.2 応力の絶対量計測の実施手順	17
1.2.2.3 応力の絶対量計測の解析原理	17
1.2.2.4 屏風山および陶史歯の森で実施された応力開放法による測定結果と その解析	18
1.2.2.5 おわりに	19
1.2.3 重力計水平アレイ観測	21
1.2.4 超磁歪起震装置の開発・改良による地下水流動研究	23
1.2.5 トンガの海底火山噴火により観測された記録例	26
2. 内陸地震および活断層地域における地震の発生機構および関連現象の総合的研究	27
2.1 東濃地域の地震活動および地殻活動の研究	27
2.1.1.1 12年間の研究について	27
2.1.1.2 陶史の森観測点(TOS)の応力計で観測されたマントル共鳴	27
2.1.2 東濃地震科学研究所の歪計・応力計で記録された地震動収録の終了 と最終版 TRIES_SSS_DB の構成	30
2.1.3 コア変形法による岩盤応力の測定と応力開放法による測定の比較による 信頼性の検討	34
2.1.3.1 はじめに	34
2.1.3.2 コア変形法による岩盤応力の測定法の概要	34
2.1.3.3 釜石鉱山における円錐孔底応力測定とコア変形法に使用した コアの採取位置	34
2.1.3.4 釜石鉱山のコアに対する測定結果	35
2.1.3.5 まとめ	36
3. 広報活動など	38
3.1 地元イベントへの参加：おもしろ科学館 in 瑞浪	38
4. 研究成果の発表	39
4.1 成果の発表	39
4.2 最新研究発表会	39

1. 深地層-地下空間における観測機器-技術の開発研究および地下水流動研究

1.1 立坑埋め戻しによる状態変化の研究

1.1.1 地下 500m・200m での観測計器の埋め戻し対応準備

令和元年 10 月～12 月に、瑞浪超深地層研究所 (MIU) 立坑内深度 500m 研究アクセス南坑道 125m 計測横坑および深度 200m ボーリング横坑 (換気立坑) に掘削したボアホール内に埋設・設置、連続観測を行っている応力計 (立坑用埋設・設置計器 ; STG500 および STG200N) の光・電気複合無外装ケーブル (信号・電源ケーブル) を換気立坑巻上機室内 (地上) に延長し、同室内に各応力計の電源・通信部の設置を行った。

今年度は換気立坑巻上機室内(地上)に設置した電源・通信部を、MIU 敷地外の瑞浪市市有地へ移設する工事を行った (工事期間 ; 令和 3 年 6 月)。具体的には光・電気複合ケーブルを延長し、市有地に設置した冷却キャビネット内に観測装置地上部を収め、観測と観測データ送信を行えるシステムを構築した (図 1)。今後、令和 8 年 12 月以降に JAEA が予定している MIU 施設の基礎部撤去作業の前まで、STG200N(応力)と STG500 (応力と水圧) の観測を継続する予定である (地震予知総合研究振興会が観測システムの維持管理を実施)。

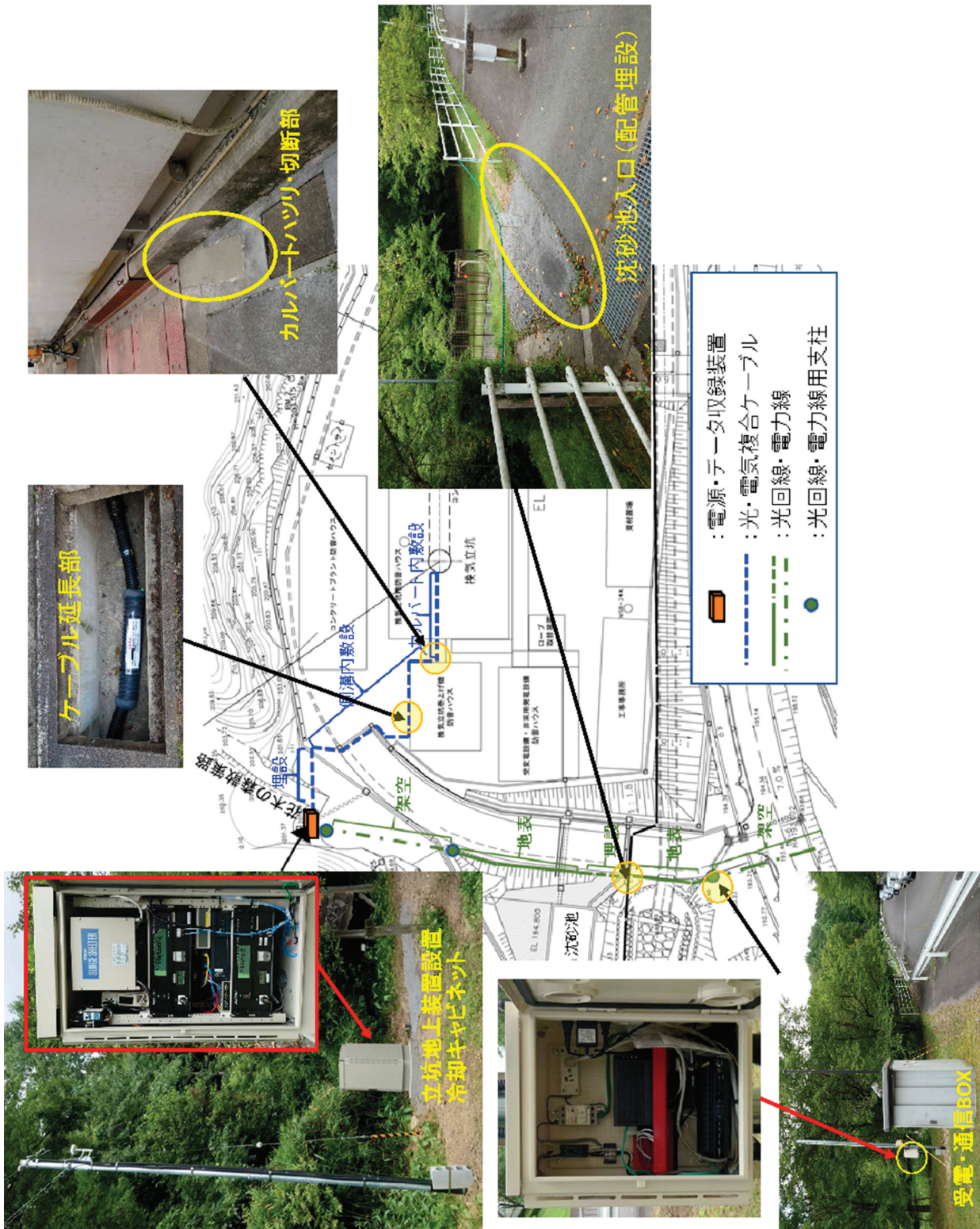


図1 立坑内観測点地上設備移設工事 概略完成図 (JAEA 資料に加筆)

1.1.2 水準測量による状態変化の研究

1.1.2.1 立坑の掘削深度および湧水、地下水変動と近傍での上下変動の時間変化 (2004 - 2021)

JAEAは2002年から20年間、瑞浪市で立坑掘削実験を行っている。この実験で500m深の立坑を2本掘削し、2021年に埋め立てた。東濃地震科学研究所は立坑周辺域で図1に示す観測井で地下水位観測と立坑近傍に設けたBM2などの水準点で水準測量による上下変動の観測を行い、掘削に伴う地下水流動と上下変動の調査研究に取り組んできた。

図2に示すように立坑が掘削されると、立坑から湧水が生じた。観測井 TGR350 では地下水位低下、BM2 の水準点では沈降が観測され始め、湧水の増加で水位低下は 90m、沈降は 23mm に達したが、2021年に立坑の埋め立てにより水位は上昇、上下変動は隆起に転じた。JAEAは湧水観測を主と換気の両立坑で深さ 20-100m ごとに 2019年3月まで実施し、立坑からの排水は消滅する 2021年5月まで継続された。湧水は掘削工事が完了する 2014年3月まで最大 900m³/day に増加し、掘削工事完了で減少に転じ、2020年8月に 800m³/day を割った段階で、埋め立て工事は始まり、2021年5月に地表まで 50m 深に達した段階で消滅した。湧水の特徴として、掘削が深くなるに従い、主たる湧水も深さ 200m の堆積層、花崗岩の 300m 深の横坑、500m 深の横坑と深くなる。そして、浅部での湧水は深部で湧水が増加すると直ちに減少に転じる。一時 600m³/day を超える湧水が生じた 200m 深までの堆積層では掘削が花崗岩に入る 2008年に既に減少に転じている。

掘削期間中に水準点で観測した沈降について、水準点近傍での「局所的な擾乱」によるものと頻繁に指摘されたが、水準点での上下変動は掘削を通して沈降が進行し、埋め立てで隆起に転じるなど立坑での湧水状況と明らかに相関し、「局所的な擾乱」でなく「立坑掘削実験」に伴う実際の変動であることが明確である。

一方、掘削作業完了で湧水が減少に転じても、地下水位は減速しながらも低下し、2020年に埋め立て作業が開始されると上昇に転じた。同様に水準点 BM2 での沈降も 2014年の掘削終了で減速して停滞にしたが、隆起には転じなかった。埋め立て工事開始後に隆起に転じた。

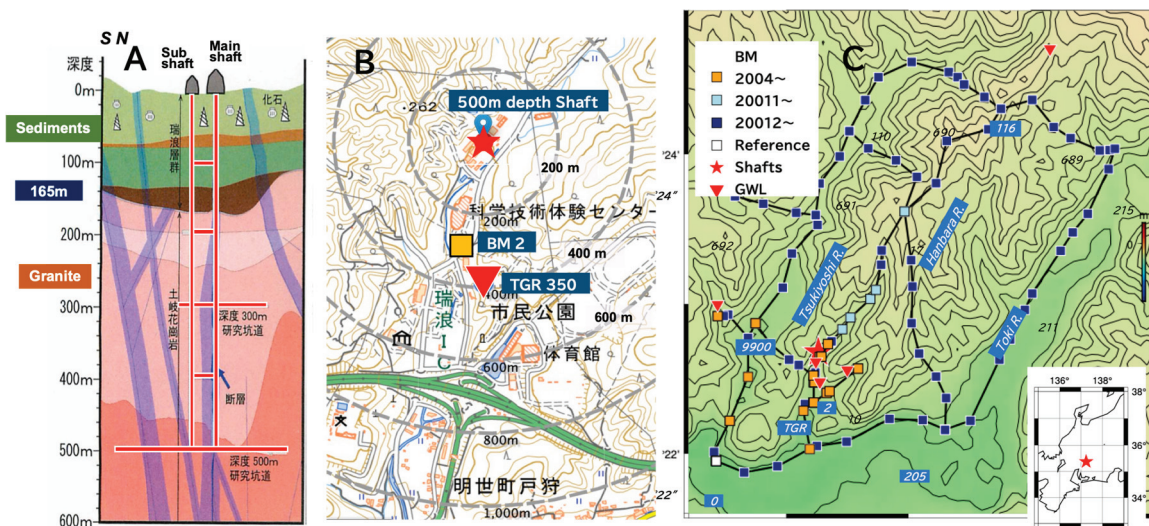


図1 a;立坑の概念図と地質断面図、b;地下水位観測井TGR350と水準点BM2の位置、c;周辺域の水準網の地図。共に立坑を赤★、地下水観測井を▼、水準点を設置年代で色別にする。

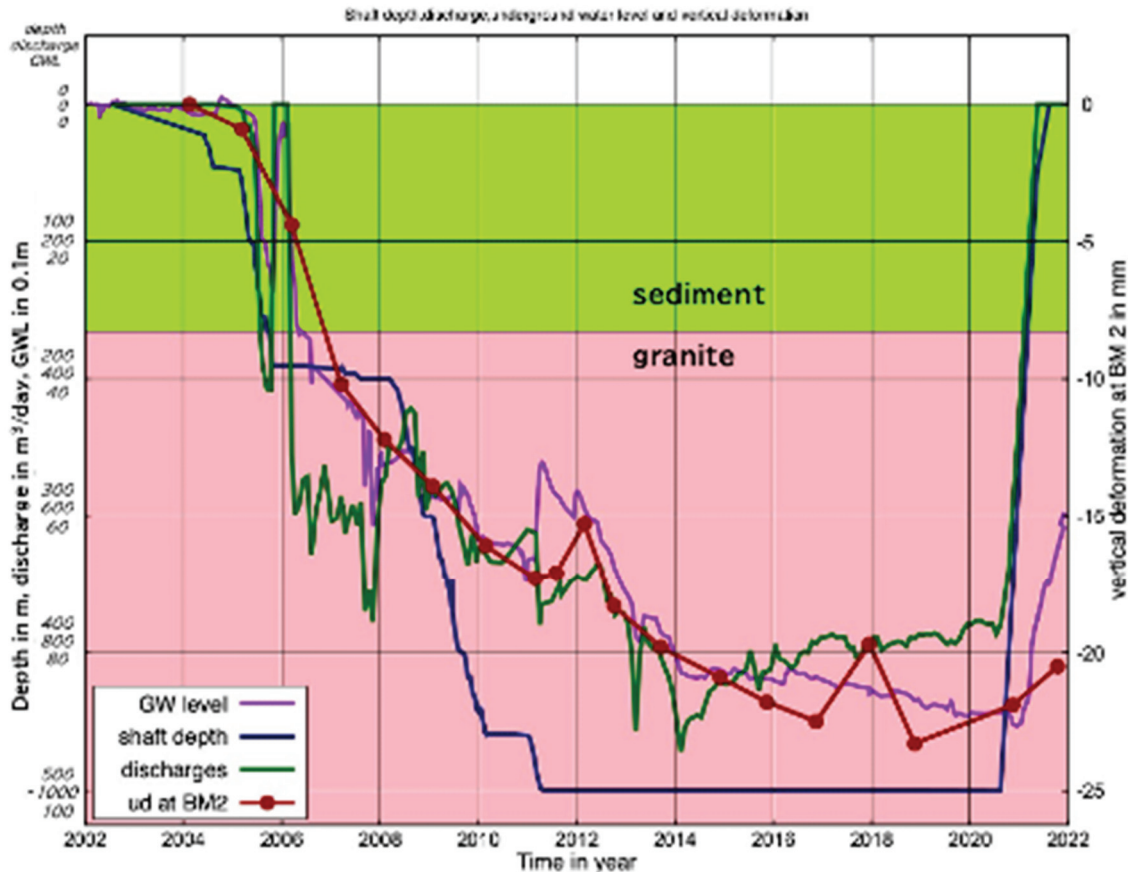


図 2 立坑における掘削深度、および立坑での湧水、TGR350 における地下水位変動と水準点 BM2 での上下変動の時系列変化(2002-2021)。堆積岩と花崗岩の分布深度を緑と桃で表す。

湧水の増加に対し、地下水位が低下でなく上昇、上下変動が沈降でなく隆起を観測したのが 2011 年東日本太平洋沖地震発生時、逆に湧水の減少に対し、水位低下と上下変動で沈降を観測したのが、掘削を完了した 2014 年以降の期間である。

立坑近傍の BM2 で観測した沈降が周辺域でいかに分布するかを検討するために、2012 年以前に設置し 2021 年まで観測した水準点での上下変動時系列変化を図 3 に示す。図 3 で 17 年間に沈降が、15-20mm と大きい水準点 (BM2, 6, 10) を赤丸、10-15mm の水準点 (BM C1, 9900, 9) を緑丸、5-10mm の水準点 (BM 692, C2, 3, 691) を濃青の丸と 3 グループに分類して示す。なお、BM205 は 2012 年に設置したが 10 年間で 13mm の沈降が検出され、大きな変動のグループに加えた。沈降が 5-10mm の水準点は C2 を除けば立坑から北西方向に 1km 以上離れ、15-20mm と大きい水準点は立坑から 500m 以内の近傍に位置し、概略ながらも沈降が立坑近傍を中心に分布すると示唆される。

時系列変化にもう一つの特徴を指摘する。ほとんどの水準点において、沈降は概して変動量に関わらずに掘削工事完了となる 2014 年前後で明らかに減速し、立坑の埋め立てが始まる 2020 年に隆起に転じることである。

1.1.2.2 時系列変化に基づく地下水位低下と沈降のメカニズムの考察

沈降が立坑を中心に立坑周辺域で観測されたので、沈降のメカニズムを立坑からの湧水と沈降の時系列変化から検討する。図 2 に示す立坑での湧水と地下水位低下と沈降の時系列変化で 2 期間は相関が高くない。最初は掘削が深さ 165m の堆積層から花崗岩に入る期間で、次が掘削完了から埋め立て開始までの期間である。前者は花崗岩上面 (165m 深)

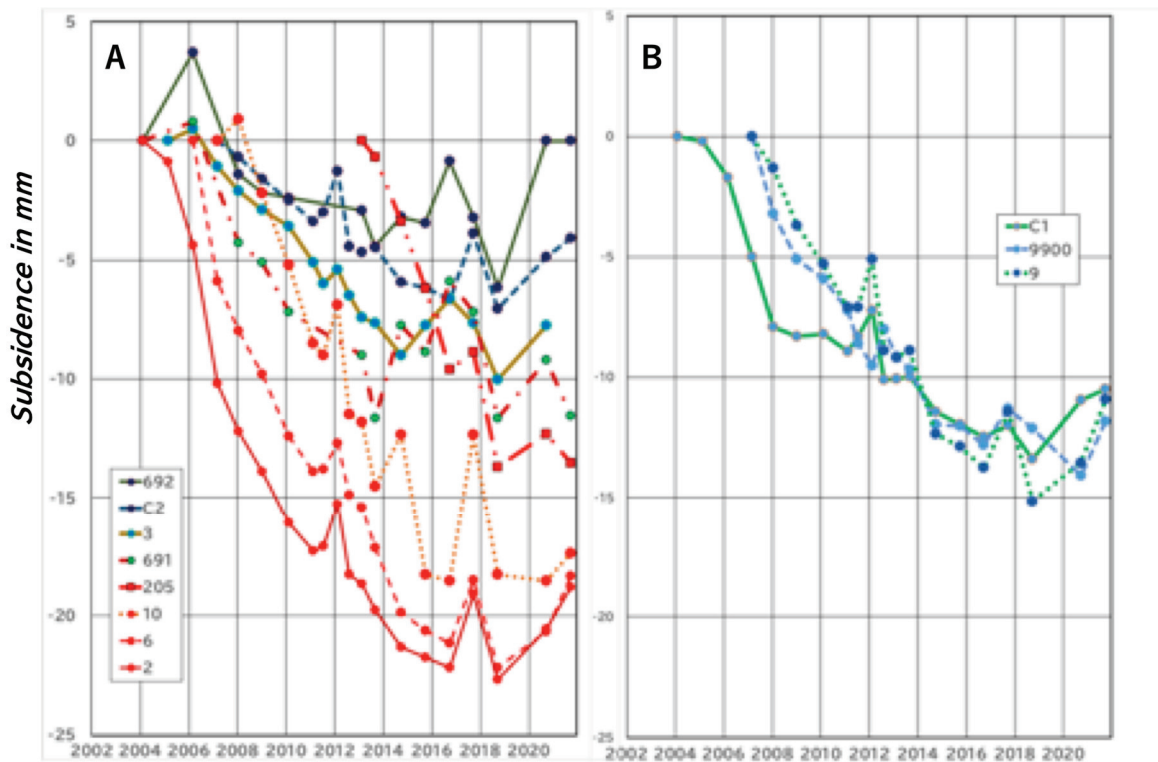


図 3 2004-2011 年に設置された水準点における上下変動の時系列変化。
 a; (左)変動が-10mm を超える水準点(赤丸) と-10mm 以下の水準点 (濃青丸)
 b; (右)変動が-(10-15)mm (淡青丸)

でも湧水が多量に生じ、後者は湧水が減じながらも水位と上下変動はともに減速しながらも低下と沈降が継続する。

JAEA は立坑の湧水を深度 20-100m ごとに 2019 年 3 月まで観測し、データとして公開する。データによると、立坑湧水は掘削で始まり 2014 年の掘削作業完了まで増加するが、各深度での湧水は 2014 年まで増加が継続するわけでない。堆積層での湧水は 2008 年までの短期間で一気に 600m³/day に達するが、2008 年に掘削が花崗岩に入ると直ちに減少に転じ、その後も緩やかに減少し、2019 年も 100m³/day 前後で継続する。一方、花崗岩でも、とりわけ長さ 100m 前後の横坑が掘削された 300m 深と 500m 深で湧水は 600 m³/day となり、2014 年の掘削完了で花崗岩での湧水は減少に転じる。300m 深の花崗岩での湧水を詳細に検討すると、500m 深での掘削が始まると 300m 深での湧水は明らかに減少に転じている。このように立坑での湧水は全体として 2014 年の掘削完了時まで増加するが、主たる湧水の深度は 200m 深までの堆積層から、300m 深の花崗岩、500m 深の花崗岩と深いところへ掘削に伴って移行する。

一方、地下水位低下と地盤沈下は、200m 深までの掘削期間にもっとも大きな変化を示し、以降は減速しながらも継続する。となれば、地下水位低下と沈降は立坑全体の湧水よりも、掘削の初期に急増し、掘削が花崗岩に入ると減少に転じた 200m 深までの主に堆積層での湧水に対応すると考える。200m 深までの主に堆積層での湧水量と地下水位低での沈降を図 4 に時系列変化で示す。地下水位低下と水準点 BM2 での沈降は、図 2 に示す立坑全体の湧水よりも堆積層(深さ 200m まで)の湧水の方が相関は明らかに高い。

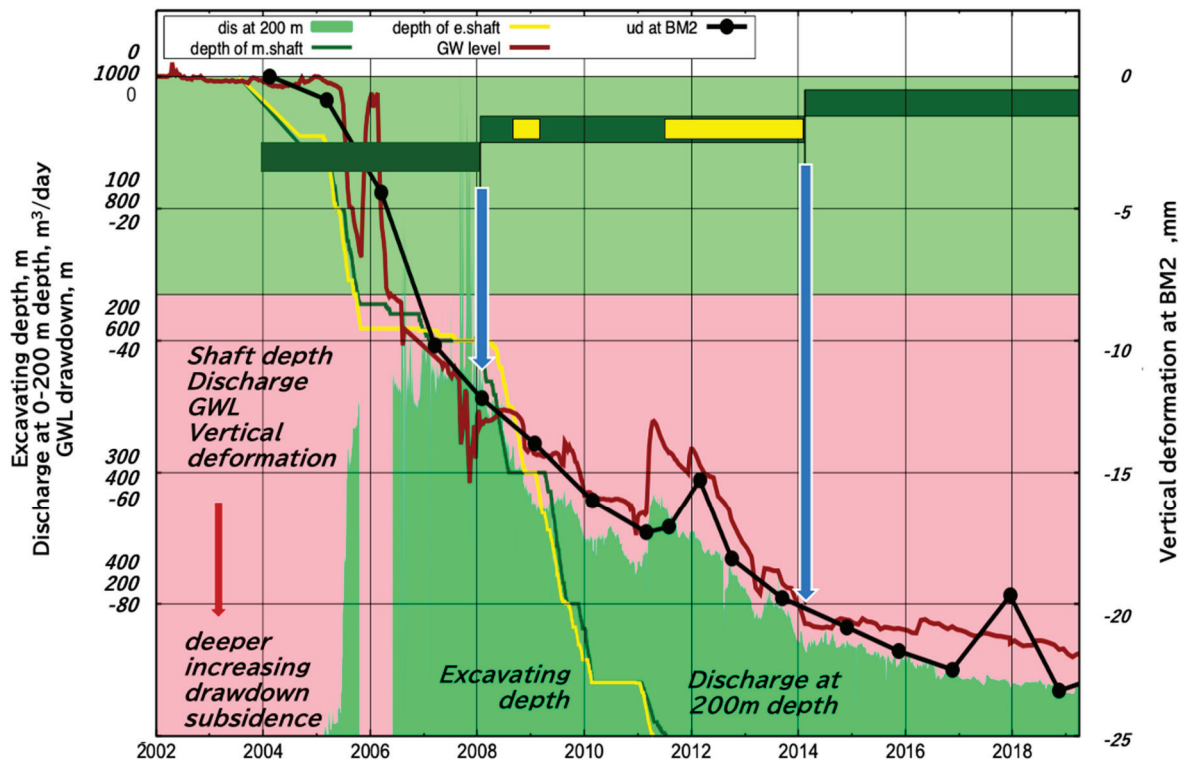


図4 立坑の掘削深度、および深さ 200m からの湧水と TGR350 での地下水位変動と BM2 での上下変動の時系列変化 (2002-2019)。掘削作業の特徴(堆積層の掘削、花崗岩の掘削、掘削作業完了)を3本の緑の帯、300m 深と 500m 深での横坑掘削期間を2本の黄の帯で示す。矢印は掘削が花崗岩に入った2008年と掘削完了の2014年の時期を意味する。なお、湧水の深度ごとの観測は2019年3月に終了した。

1.1.2.3 沈降と立坑南東の地下水盆の分布

沈降のメカニズムを検討する目的で2012年に水準網を周辺域に拡張して沈降分布の検出を試みた。水準測量は誤差が環閉合で2mm前後、変動が立坑近傍で1-2mm/yrほどであり、2021年の測量が一部の水準網に限られたので2012-2020年の8年間で上下変動を議論する。

変動のコンターマップを図5aに示す。水準網の北部では8年間で変動は±2mm以内と顕著な変動は観測されていない。一方、立坑が位置する南部では立坑から南東方向に最大10mmの沈降が検出される。

JAEAなどが本地域で花崗岩上面の地形分布を航空磁気や地震波の探査から推定する(図5b)。それによる立坑の南東1-2kmに相対深度80mとなる土岐地下水盆が存在する。立坑はこの地下水盆の西端を掘削し、堆積層からの湧水は地下水盆に滞留する地下水が流出したと考える。沈降域はちょうど地下水盆の南端の下流側に分布する。このように沈降は花崗岩上面の地形分布と関連し、堆積層が厚くなる地下水盆の推定域を中心に分布することが明らかである。すなわち、堆積層での地下水流出が沈降と密接に関連することを沈降の分布域からも明らかになる。

1.1.2.4 埋め戻しによる湧水の消滅と地下水位低下と沈降の回復

図2に示すように、立坑の埋め立ては2020年8月から開始され、2021年5月に50m深まで進み、立坑からの湧水が消滅した。埋め立てに伴い、地下水位は低下から上昇に転じ、上下変動は沈降から隆起に転じた。沈降は2021年10月に3mm(全沈降量の13%)回復し、地下

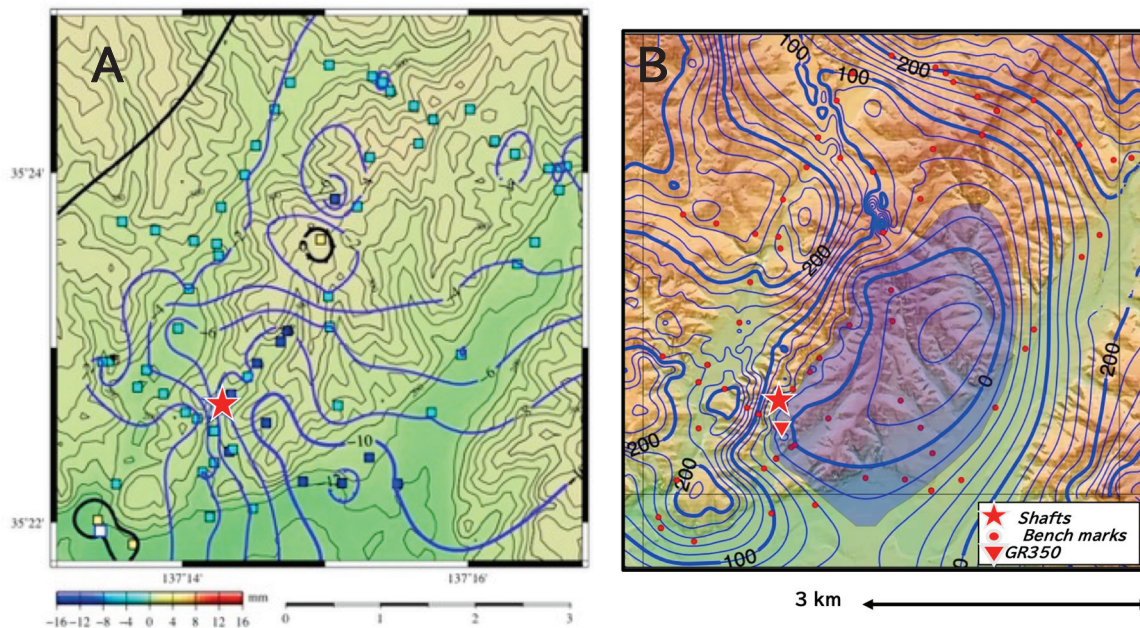


図 5 立坑周辺域で観測された上下変動のコンターマップと同域の花崗岩上面の地形分布 (JAEA)。

a; (上) 上下変動コンターマップ (2012-2020)。

コンターは 1mm ごと、立坑と水準点と参照水準点の位置をそれぞれ赤の★、濃青の■、□で示す。

b; (下) 花崗岩上面の地形分布コンターマップ (データは JAEA 提供)。コンターは 20m ごとに細線、100m ごとに太線、立坑と地下水位観測井 TGR350、および水準点と参照水準点の位置をそれぞれ赤の★と▼、●、○で示す。

水位は 2021 年 12 月に 30m (全低下量の 33%) 上昇した。この段階で、一般の地盤沈下域における地下水汲み上げ規制による水位上昇と沈降の僅かな隆起の観測と同じ傾向を示す。今後、如何なる形で水位と沈降が回復するかは非常に重要と考えるが、課題として残ってしまった。

2012 年以降の水準測量に際し、日本大学文理学部の森済客員講師と村瀬雅之准教授には多大な協力をいただいた。また日本原子力研究開発機構、核燃料・バックエンド研究開発部門東濃地科学センターのリーダー笹尾英嗣氏には湧水に関する貴重な助言を頂いた。これら 3 氏に謝意を表す。

1.1.3 地下 500m での埋め戻しに伴う応力・水圧・歪変化の連続観測

日本原子力研究開発機構（JAEA）の二本の立坑（主立坑と換気立坑）は 2020 年 8 月から埋立てが開始された。当研究所は立坑内の 500m レベルと 200m レベルの横坑に掘削されたボアホールに連続観測用のボアホール応力計・歪計・水圧力計を設置している。埋戻されてもデータが取得できるように対策し観測を継続している。2021 年 11 月に埋戻しを完了したがその間の観測データを収集している。この報告では立坑の 500m レベルに設置された (STG500) 応力計と水圧計の記録および立坑から約 300m 離れた位置に掘削された深度 320m のボアホール (TGR320) に設置された歪計および水位計の記録を報告する。TGR320 観測点は計器の更新のため 2020 年 10 月の終わりからデータが得られている。

図 1 は立坑の構造と 500m レベルの計器の位置を示している。また、2021 年 11 月 26 日現在の埋め戻し状況も示している。地表まで埋め戻し完了のマークが印されている（JAEA 東濃地震科学研究所地科学センター）。図 2 は TGR320 ボアホール観測点と立坑の位置および NNW 断層の位置を示している。

観測されたデータの一部が図 3 に示されている。白丸のプロットは埋め戻しの到達深度である。このデータはほぼ 1 週間ごとに報告されている（JAEA 東濃地震科学研究所地科学センター）。STG500 の応力計鉛直成分と水圧計は 6 月ころから 10 月の終わり頃まで工事の都合で観測を停止していたためデータが得られていない。この期間は埋め戻しが実施されていない期間にも対応する。両者とも埋め戻しの深度に対応して変化している。しかしながら 2021 年 3 月から 4 月のデータを見ると埋め戻しの深度は直線的に浅くなっているにもかかわらず 3 月の終わり頃から応力計鉛直成分と水圧計の変動速度が急に小さくなり埋め戻し深度の変動と異なっている。この時期は TGR320 の水位と鉛直歪も変動速度が急に小さくなっている。この時期は埋め戻し深度が 100m 程度になっている。この深度は TGR320 付近では土岐花崗岩から堆積層に変化する深度である。この時期以降は STG500 の応力計鉛直成分の変動はなくなっているが STG500 の水圧計と TGR320 の水位・鉛直歪は直線的に変動が継続している。

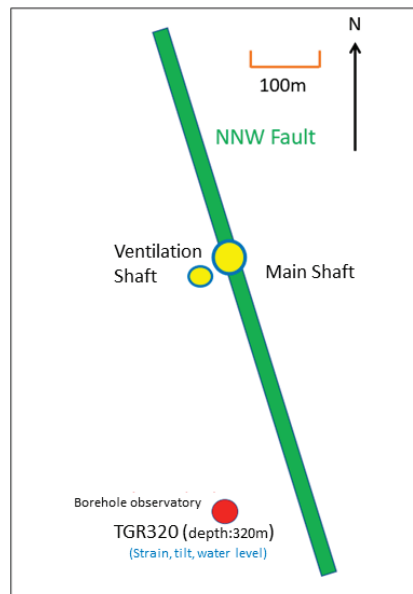
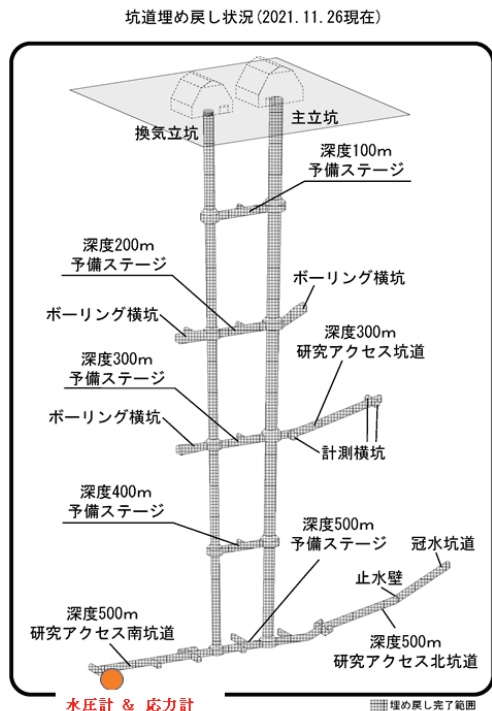


図 2 : 立坑と TGR320 ボアホールの位置

図 1 : 立坑の構造および水圧計・応力計の 1 応力計の設置位置

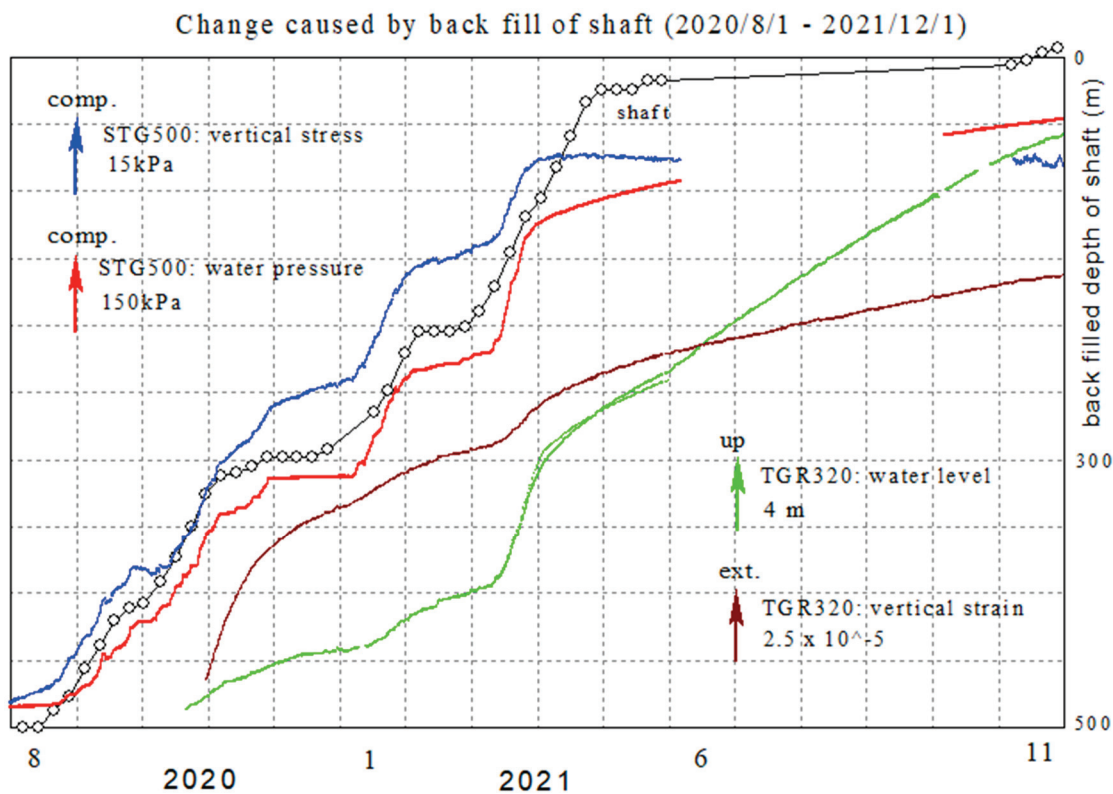


図 3 : 立坑の埋め戻し経過と 500m レベルの応力計・水圧計の記録と TGR320 の水位計および歪計鉛直成分の記録

1.1.4 立坑埋め戻し工事に伴う重力関連現象検出の試み

2017年12月から瑞浪地科学研究館測定室で稼働してきた gPhone#153 は 2021年12月で観測を終了した。今年度は全期間超深地層研究所坑道埋め戻し中であつたので、重力増加のセンスを示すのであろうが、バネドリフト除去のため回帰直線成分除去を行うので、解釈に注意が必要である。

解析結果を図1に示す。データ処理は、スパイク除去等を経て1時間値化した後に Baytap08 (Tamura and Agnew, 2008)により潮汐成分と気圧応答成分を除去し、不規則成分 (a) とトレンド成分 (b) を得た。ただし、gPhone#153 の気圧データ (c) に不具合があつたので、Baytap08 の並行データには戸狩観測壕設置の gPhone#130 の気圧データを用いた。そして、Tsoft (Van Camp and Vauterin, 2005)により、トレンド成分の回帰直線を求めてから、直線残差値 (以下、これを重力値と呼ぶ) (d) を得た。計算負荷の都合により解析期間を前期と後期に分けた (7月に欠測が生じたわけではない)。立坑埋め戻しや建屋撤去の工事の直接の擾乱は少ないと思われる。

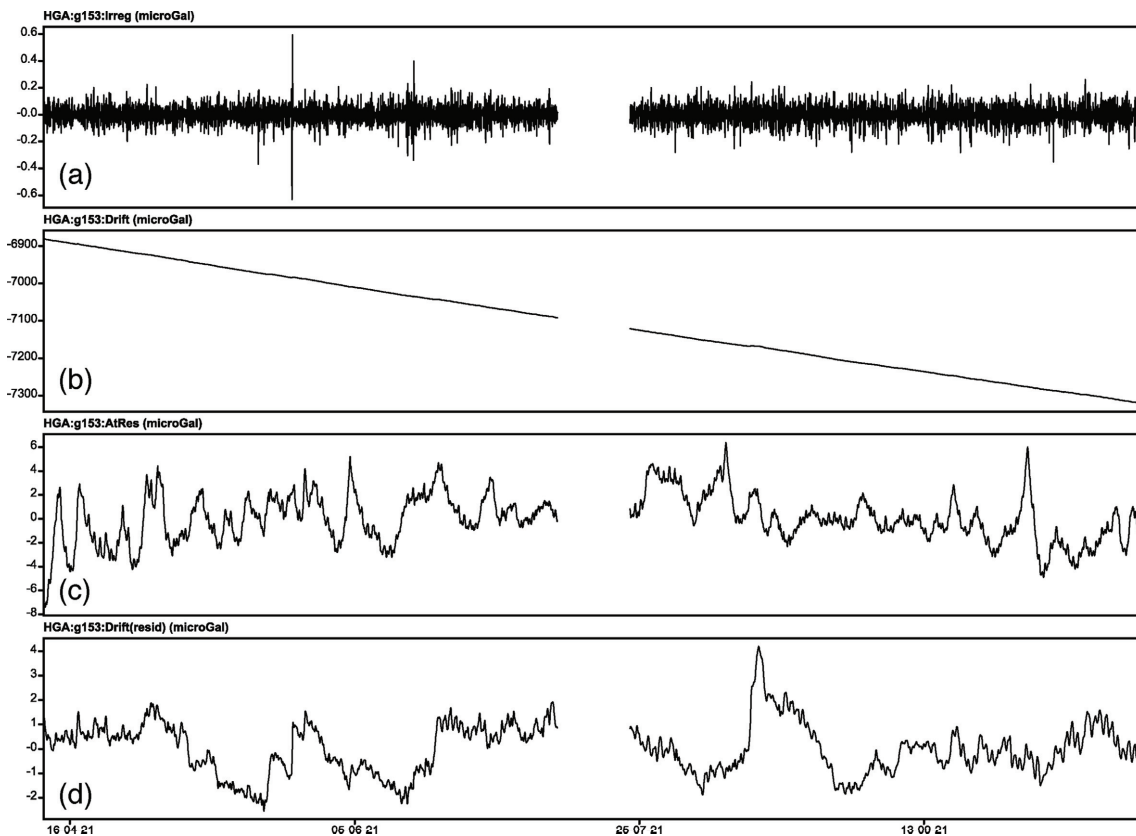


図1 gPhone#153 の測定結果。縦軸の単位は μ Gal、横軸は UT の dd-mm-yy (日-月-20yy 年)。(a) : Baytap08 出力の不規則成分、(b) : 同出力のドリフト (or トレンド) 成分、(c) : 同出力の気圧応答成分、(d) : トレンド成分の回帰直線残差。

比較のため、立坑埋め戻し工事の影響は小さいと思われる gPhone#130 の解析結果を図2に示す。解析方法及びプロットの項目は図1と同じである。両者を比べると、gPhone#130の方が不規則成分の振幅が大きく、工事現場に近いgPhone#153の方がノイズレベルが低いと言える。一方、gPhone#153の重力値に短期的な1~2 μ Galの変動が多く、立坑埋め戻しの充填速度変化を反映している可能性がある。

図3は両重力計の傾斜値を示している。昨年度のgPhone#153に見られた long と cross 両方向の増加（北傾斜に相当）は、今年度のデータでは夏季以降反転しているの、季節変動であって立坑埋め戻し工事の影響ではないと思われる。gPhone#130は昨年度同様パルス状の変動に加え、ステップ状の変化も見られた。gPhone#130は縁切りされた観測基台ではなく、床面に直接設置しているためと考えられる。なお、AD Unitsで ± 500 以内の傾斜は重力値への影響は小さい（補正されている）が、1秒サンプリングデータでプラスマイナス数千AD Unitsを超えるケースでは重力値への影響は残る。

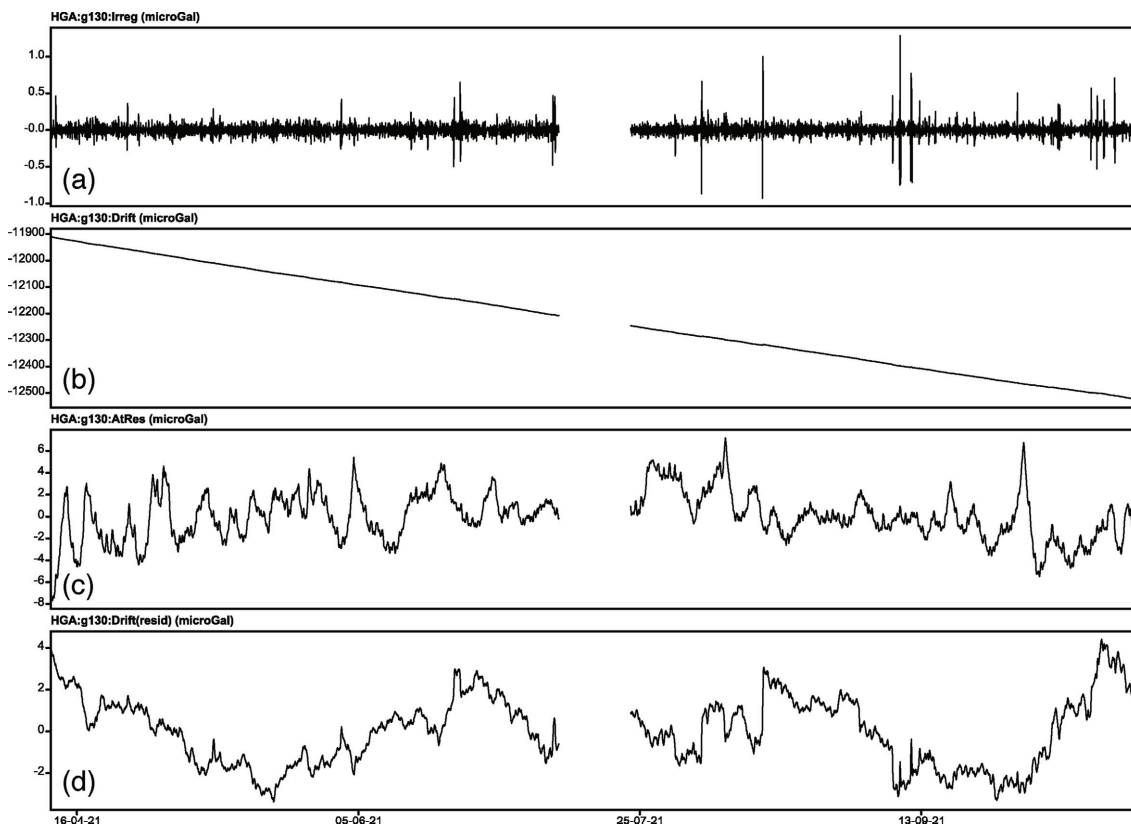


図2 gPhone#130の測定結果。縦軸の単位は μ Gal、横軸はUTのdd-mm-yy（日-月-20yy年）。(a) : Baytap08出力の不規則成分、(b) : 同出力のドリフト（orトレンド）成分、(c) : 同出力の気圧応答成分、(d) :トレンド成分の回帰直線残差。

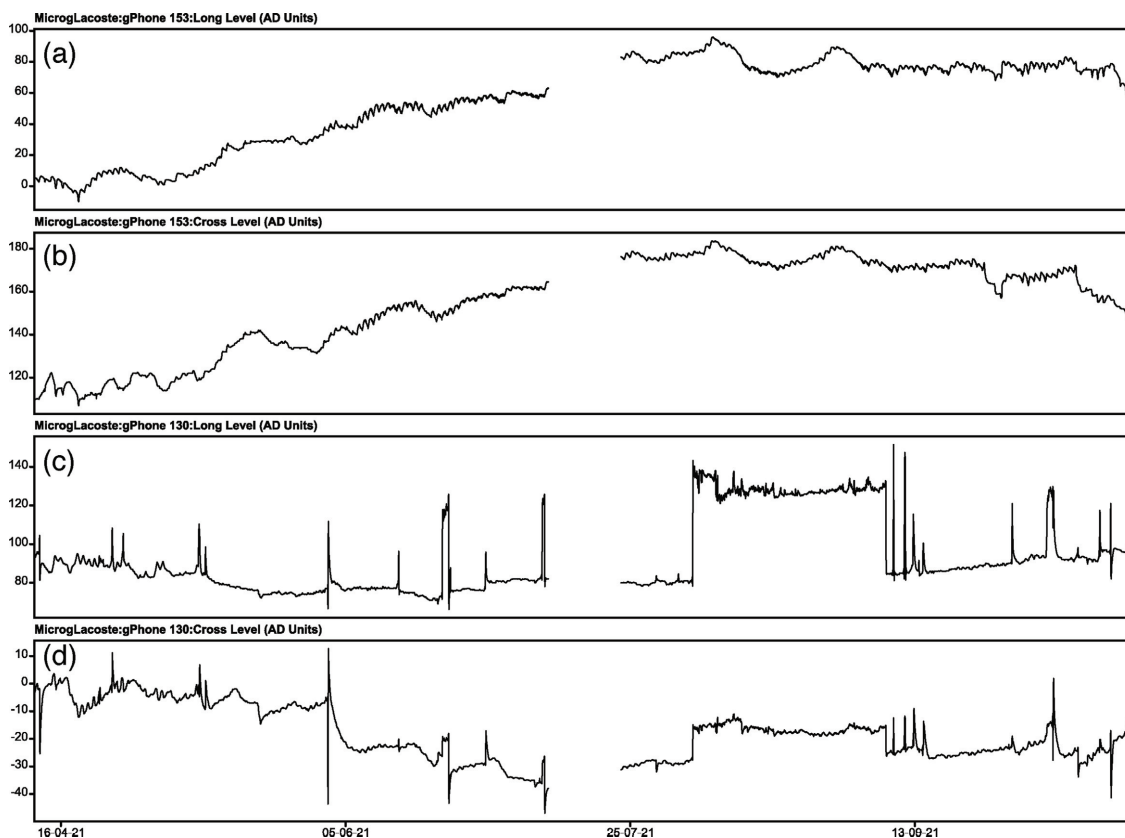


図 3 重力計搭載の傾斜計の出力。gPhone#153 の測定結果。縦軸の単位は AD Units (これに 10^{-7} オーダーの係数を掛けると radian 単位になる)。横軸は UT の dd-mm-yy (日-月-20yy 年)。(a) : gPhone#153 の long 成分、(b) : gPhone#153 の cross 成分、(c) : gPhone#130 の long 成分、(d) : gPhone#130 の cross 成分。

1.2 地球物理学的方法による地下水流動の研究

1.2.1 揚水実験と立坑内の湧水により生じた歪・傾斜変化とNNW断層

1.2.1.1 観測状況と観測結果

東濃地震科学研究所 (TRIES) は岐阜県瑞浪市に位置している。地震に関連した微小な信号を観測するために、地下深部での観測が可能なボアホール地殻活動総合観測装置の開発研究を行うとともに、それを設置し、利用して内陸地震などの研究を実施している [東濃地震科学研究所(2021)]。

研究所の近くには地質断層であるNNW断層が存在している。断層近くには当研究所のボアホール地殻活動総合観測装置が深度350mと深度165mに設置されている。ボアホール地殻活動総合観測装置には歪計・傾斜計・地震計が搭載されている。また、断層近くの横坑には伸縮計が設置されている(図1)。

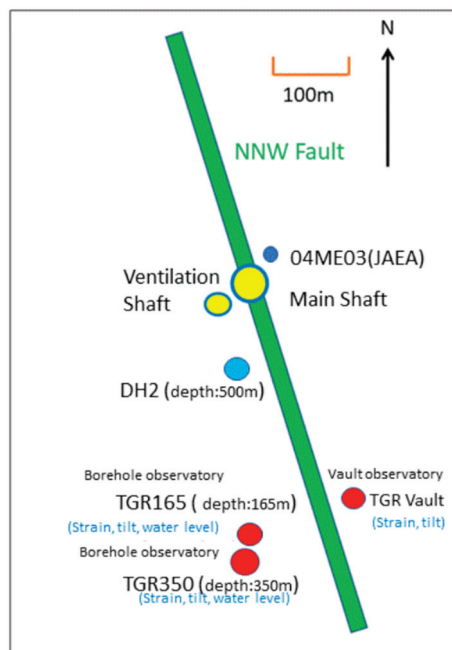


図1：観測点、DH2 ボアホールとNNW断層の位置

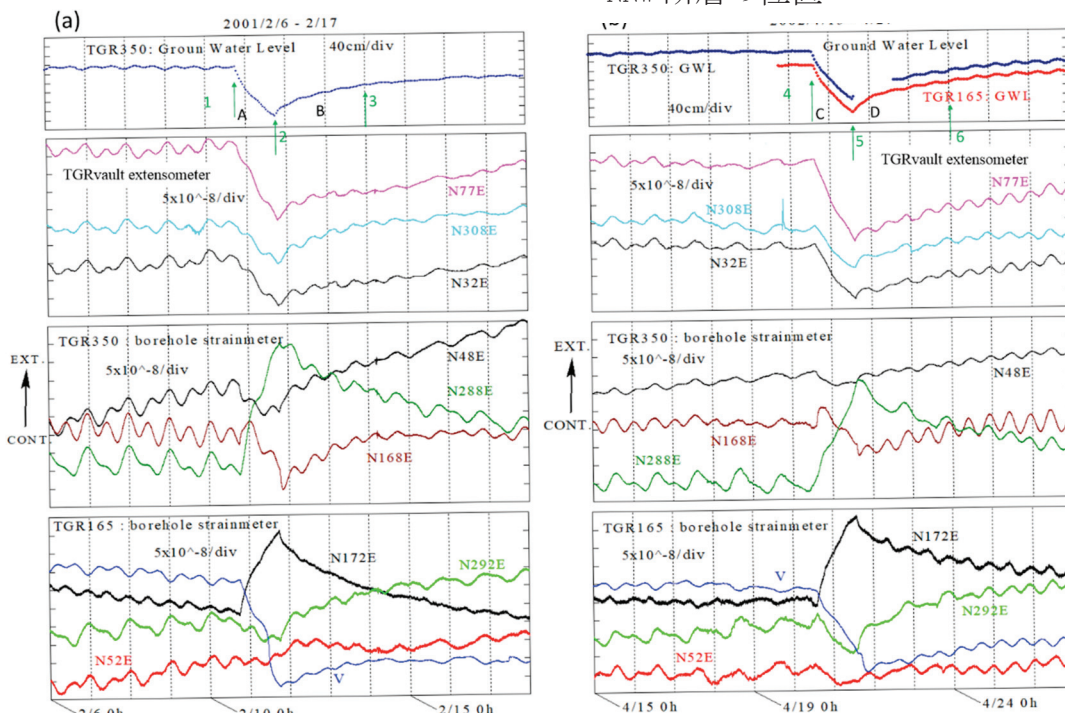


図2：DH2 ボアホールでの揚水試験の結果。TGR350 の水位変化・TGRvault 伸縮計、TGR350 の歪計、TGR165 の歪計のデータ

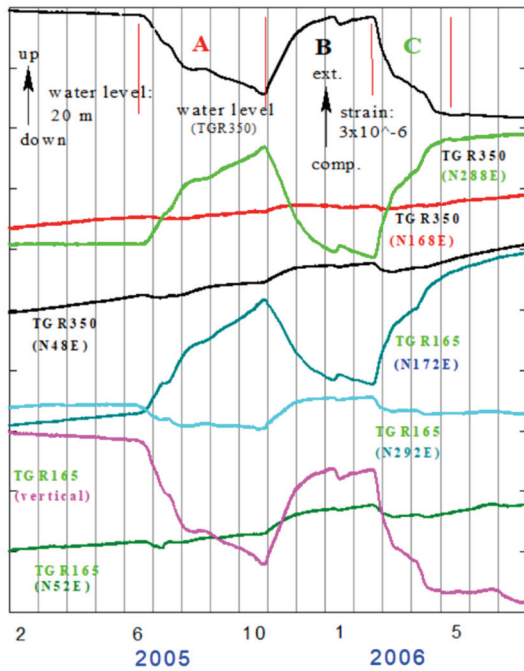


図3：立坑内の湧水に対する TGR350 と TGR165 ボアホールの歪変化

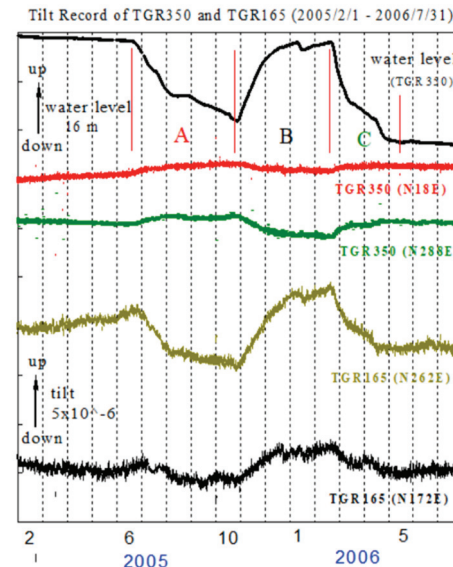


図4：立坑内の湧水に対する TGR350 と TGR165 ボアホールの傾斜変化

この論文においては断層近傍での歪変化を調べるために断層近傍に存在する深度500 mのDH-2ボアホールにおいて揚水実験を2001年2月および2002年4月に実施した。

また、当研究所の近くには、研究開発法人原子力研究開発機構（今後 JAEA と表記）の研究用の立坑(深度 500 m)が存在しており、直径 6.5mの立坑を横切って地質断層であるNNW断層が存在している。立坑掘削の途中で立坑内に湧水が発生し、研究所のボアホール地殻活動総合観測装置や水位計に異常変動が観測された。観測されたデータは図2、図3と図4に示されている。

揚水実験と立坑内湧水の結果と合わせて歪計や傾斜計の異常変動を解析しNNW断層との関連も示唆される結果が得られたので報告する

1.2.1.2 解析結果と地下水流動・断層・歪・傾斜に関する議論と考察

Asai (2006)を考慮し観測領域における地下水のふるまいを以下のように理解している。TGR350の花崗岩中350m以浅には、発達した層理や節理から成る帯水層が大別して2箇所存在する。TGR350の近傍には北北西の走行を持つ地質断層（NNW断層）があり、通常、花崗岩中の地下水は、地質断層の北東側（上流）から南西側（下流）へ流動している。地質断層はこれらの帯水層を破碎しており、通常、破碎箇所は断層粘土や礫が充填され低透水性が維持されている。流動した地下水は下流に排出され平衡状態が維持され地下水位も一定のレベルを維持している。

揚水実験の揚水をした場合 TGR350 の水位は上昇し、揚水をやめると水位は上昇する。立坑内揚水を排水すると TGR350 の水位は低下し、排水を辞めると水位は上昇する。3種類の異なる状況（2回の揚水実験と立坑内湧水）の場合のいずれにおいても同様な主歪変動が得られた。TGR165 においても同様である。すなわち、水位低下・水位上昇の場合に歪変動の振幅は湧水の場合と揚水実験の場合と異なるが変動のパターンは同一である。TGR350 の主

歪変化はいずれも水位低下の場合、WWN-EES 方向の最大主歪、NNE-SSW 方向の最小主歪と NNW 方向の最大せん断歪で右横ずれ変動である。水位上昇の場合、NNE-SSW 方向の最大主歪、WWN-EES 方向の最小主歪と NNW 方向の最大せん断歪で左横ずれ変動である。TGR165 の主歪変化の場合、N-S 方向の最大主歪、E-W 方向の最小主歪と NW-SE 方向の最大せん断歪で左横ずれ変動である。水位上昇の場合、E-W 方向の最大主歪、N-S 方向の最小主歪と NW-SE 方向の最大せん断歪で右横ずれ変動である。TGR350 の場合とは完全に異なっている。横坑 TGRvault 内の伸縮計は湧水の時には作動していなかったが TGRvault の歪変動は浅井・石井 (2022) に示されているように水位低下の場合は全て縮みであり、水位上昇の場合は全て伸びである。TGR350 と TGR165 の歪変動のように同時に伸びと縮みの成分は出現しない。TGRvault の伸縮計は堆積岩中に設置されていることによると考えられる。

以上の観測結果によると歪変動は湧水に対する排水・排水停止や揚水実験の揚水・揚水停止として仕分けることなく水位の上昇、水位の低下として仕分けることができる。すなわち間隙に水が入ると間隙圧が上がり水位が上昇し、間隙から水が出ていくと間隙圧が減少し水位が低下すると考えられる。間隙圧が変化することにより歪変化が発生するが間隙の分布と間隙の形は一定しているため水位変動による間隙への水の流入・流出により間隙弾性体の歪変動は再現される。間隙の分布と形状がどのようにして生成されたかは明らかではないが、TGR350 の媒質においては一度それができた場合には水位の上下に伴って NNW 方向の最大せん断歪がくり返し発生するため NNW 方向の亀裂が生成される可能性も考えられる。

傾斜に関しては Quélitsch *et al.* (2014)は TGRvault 内の深度 10m のボアホールに設置した傾斜計のデータを解析したが媒質が等方的であれば傾斜方向は立坑の排水地点を向くが NNW 断層が存在するために NNW 断層と直角方向の傾斜になったと理解している。大山他 (2008)

Summary of behavior of tilt and strain for water level change

observation station	Tilt: Maximum descending direction		Principal and Maximum shear strain	
	water level down	water level up	water level down	water level up
TGR165 (depth:165m)				
TGR350 (depth:350m)				
TGR (vault) (depth:10m)				
04ME03(JAEA) (depth:10m)				

表：揚水実験と立坑内湧水による水位の上下変動に対する歪・傾斜変化のまとめ

や竹内（2016）は主立坑の北東 50m の位置の深度 10m のボアホール (04ME03)での傾斜観測の結果を報告している。それによると水位の低下時期(2005/4/16–2005/10/26)の傾斜は主立坑方向に下降する傾斜でその後の水位上昇時期(2005/10/28–2005/12/10)は主立坑方向に下降する傾斜が回復する傾斜を示している。今回の TGR165 観測点の結果も彼らと同様のNNW断層と直角方向の傾斜変動を示している。深度の深いTGR350観測点は変動の振幅も小さい上に異なる傾斜変動を示している。得られた水位変動と歪・傾斜変動を表にまとめて表示した。以上のような得られた結果から地下水流動・断層・歪変化・傾斜変化などのデータを検討した結果、地下水流動が地下構造や断層の変動と関連している可能性のあることが推定された。詳細は投稿中の浅井・石井（2022）と石井・浅井（2022）に述べられている。以上のような得られた結果から地下水流動・断層・歪変化・傾斜変化などのデータを検討した結果、地下水流動が地下構造や断層の変動と関連している可能性のあることが推定された。

参考論文

1. 浅井康広・石井 紘、東濃地震科学研究所近傍に存在する断層近辺で観測された地下水位・歪変化 – 揚水実験の場合 –、地震、投稿中、2022.
2. 石井 紘・浅井康広、東濃地震科学研究所近傍に存在する断層近辺で観測された地下水位・歪・傾斜変化 – 立坑内湧水に対する排水・排水停止の場合 –、地震、投稿中、2022.

1.2.2 インテリジェント小型歪計を用いた応力解放法による測定について(その2)

1.2.2.1 はじめに

東濃地震科学研究所ではボアホール設置型ひずみ計や応力計を開発し、設置後の連続観測による岩盤内ひずみ変化や応力変化を高精度で計測してきた。これらは観測機器を設置したときの状態を基点とした相対変化である。一方、地殻応力の絶対量を計測するために、ボアホール歪計の小型化とメモリ内蔵によるワイヤレス化により、地殻応力の絶対量測定手法の開発研究が実施された[例えば石井ほか2004; 山内ほか, 2004; 山内ほか 2005]。ボアホール設置型ひずみ計や応力計を設置する直前に地殻応力の絶対量計測を行うことにより、その後のひずみ計あるいは応力計による連続観測結果(相対量)と初期測定結果(絶対量)を組み合わせることにより、地殻ひずみあるいは地殻応力の絶対量の経時変化が高精度でモニタ可能となった。

応力解放法は鉱山学や土木工学の分野で古くから発達しており、ボアホールを使うか否か、あるいは孔径変位を計測するか壁面ひずみを計測するかなど、さまざまなバリエーションがある。例えば[横山, 2004; 坂口, 2004; 佐野他, 2004]に解説されている。その他の測定手法も含めた地殻応力測定手法全般について広く紹介した総説としては、菅原[1998], 水田[2002], 佐野.[2005], Sano et al.[2005]が詳しい。変形あるいはひずみの計測には、無限に変形しやすいとみなせる「媒体」にひずみゲージがモールドされた計測装置が採用される。一般に、モールド「媒体」の弾性限界を超える水圧下では計測に適さないため、深い鉛直孔での計測はきわめて困難である。一方、東濃地震科学研究所で開発された小型インテリジェントひずみ計は相対的に剛な媒体の使用により深さ 1km程度までの水圧に耐えられるよう設計されている。この手法の確立により、1km 程度の深さまでのボアホールを利用した地殻応力の絶対量の長期モニタリングが可能となる。すでに 2001 年に屏風山のボアホール(BYB), 深さ 350m, 2002 年には同じ屏風山のボアホール(BYB), 深さ 700m, さらに 2009 年に陶史の森のボアホール(TOS), 深さ 500m で初期応力測定が実施されたが、後述する残留応力が生じるような条件での三次元解析はこれまで実施されていなかった。本報告では、実施された初期応力測定結果を例として三次元解析を実施する。

1.2.2.2. 応力の絶対量計測の実施手順

応力の絶対量計測を目的として実施される応力解放法の測定手順について昨年度の報告書に比較的詳しく示したので、ここでは簡単な説明にとどめる。まず地表から大口径ビットで測定位置近傍まで掘削する(ステップ1)。つぎに、その孔底から小口径のパイロット孔を掘削し、パイロット孔内にひずみ計をモルタルで固定する(ステップ2)。次の段階(ステップ3)で大口径ビットを用いて掘削する(オーバーコア)。この作業により、オーバーコア径より内側は周辺岩盤から切り離され、遠方応力場により生じていた応力集中の場は解放される。ただし後述するように、パイロット孔内の充填物の弾性率が周辺岩盤の弾性率より十分小さい場合は完全に解放されるが、内部の弾性率が相対的に無視できない場合には、残留応力が生じる。

1.2.2.3. 応力の絶対量計測の解析原理

応力解放法による初期応力測定の解析は、未知数である遠方応力場(ボアホール擾乱の影響を逃れる程度に離れた位置の応力場)の応力テンソル σ_{ij} を解く問題であるが、二つのステップに分けることができる。すなわち

- (1) 実施手順のステップ2の状態、遠方の応力テンソル σ_{ij} の各成分が単位量作用した場合に生じるパイロット孔周辺の応力集中問題を解き、オーバーコアにより生じる壁面位置の応力場を求める。
- (2) オーバーコア壁面に(1)で求めた応力と大きさが等しく逆向きの力をかけたときのひずみ計内、各ひずみセンサに生じるひずみあるいは変形を計算する。

この二段階の解析の結果、未知数の応力テンソル σ_{ij} の各成分がひずみ計内部のセンサにおよぼす影響、すなわち感度係数が計算される。ここで N 番目のセンサの出力値を S_N とし、N 番目のセンサの各成分 σ_{ij} に関する感度係数を C_{Nij} とすると、観測値は式(1)で与えられる。

$$S_N = C_{Nij} \sigma_{ij} \quad (1)$$

ただし、式(1)の引数、i および j はテンソルの規約にしたがうが、N は単なる添え字である。式(1)で示された連立方程式で、未知数以上の独立な観測値があれば、遠方応力場を知ることができる。なお、この式(1)は、すでに報告した応力計(変化計)の解析と同じ形であるが[佐野ほか, 2015; 2016 ; 2017; 2018;], 連続観測用のボアホールひずみ計や応力計の場合はボアホールにモルタルで固定された状態で、周辺外力がセンサにおよぼす影響(感度係数)を解く問題であるのに対して、応力解放法の解析では、ひずみ計

をモルタルで固定する前の状態の周辺外力による応力集中を解いた結果にもとづき、大きさが等しく逆向きの力をオーバーコア壁面に作用した場合のひずみセンサの応答(感度係数)を求める問題である。

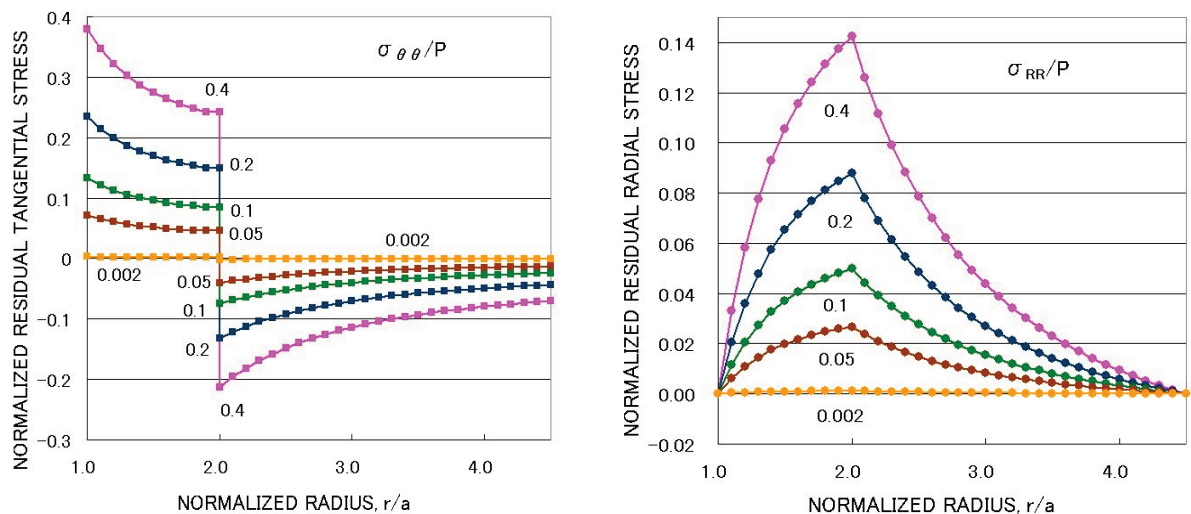


図1. パイロット孔に埋設する媒体の弾性率が無視できない場合に生じる残留応力の解析例[水田ほか, 2006]. 引張応力が正.

解析(2)の段階ではすべての応力成分を逆向きにかける解析が一般的に行われる。この解析でえられる結果は岩石コア内の応力が完全に解放される場合は正しい。しかし、パイロット孔に埋設する媒体の弾性率が周辺岩盤の弾性率と比較して無視できない場合やパイロット孔とオーバーコア径の比が小さい場合には、誤差が生じる[例えば金川ほか, 1986; 水田, 2002]。埋設媒体の弾性率が周辺岩盤の弾性率と比較して無視できない場合の解析手法について、水田ほか[2006]が求めた解析解をもちいて計算された残留応力を示すと図1のとおりである。解析解は二次元の二層媒体を対象としたもので、等方外力 P が仮定されている。左図は半径方向の直応力 σ_{RR} であり、右図は接線方向の直応力 $\sigma_{\theta\theta}$ が、いずれも外力 P で正規化されて示されている。横軸はボアホール中心からの距離で、内側の層(埋設媒体)の内半径で正規化されている。 $R=2$ はパイロット孔半径(埋設媒体と岩石の境界)、 $R=4.5$ はオーバーコアにより生じた岩石の自由表面境界である。また、図中の数値は埋設媒体のヤング率を岩石のヤング率で正規化したものである。

図中、明らかなように、媒体のヤング率が小さい場合には残留応力が生じないので、完全応力解放状態である。しかし媒体のヤング率が大きくなると残留応力が無視できなくなる。オーバーコア境界にすべての応力成分をかける通常的手法ではオーバーコア境界面の完全応力解放が仮定されるので、図中、 $R=4.5$ の点で、強制的に残留応力をゼロとした状態を解くことになり、誤差が生じる。残留応力が生じる不完全な応力解放状態の場合に考慮されるべき境界条件は、図1の $R=4.5$ の点で σ_{RR} がゼロであることからわかるように、自由表面という条件を与えて解くことである。

1.2.2.4 屏風山および陶史の森で実施された応力解放法による測定結果とその解析

2001年12月に屏風山 350m, 2002年6月に屏風山 700m, さらに2009年3月に陶史の森でインテリジェント小型歪計による初期応力測定が実施された。この計測の後、屏風山ではボアホールひずみ計が、陶史の森ではボアホール応力計が設置され、ひずみあるいは応力の相対変化の連続観測が始まったので、初期応力測定結果と組み合わせることにより、地殻応力の絶対量の変化を知ることができる。掘削および測定の手順、ひずみ計の構造など、詳細は住鋳コンサルタント[2002]、住鋳コンサルタント[2009]、および向井[2009]に記述されている。屏風山で用いられたひずみ計の基本構造は外形 42mm, 厚さ5mmのSUS 筐体の内部に水平センサ3方向と鉛直センサが組み込まれたものであり、陶史の森で用いられたひずみ計の基本構造は外形 22mm, 厚さ 2mm の SUS 筐体の内部に斜めセンサ 4 方向および水平センサ4方向が組み込まれたものが使用された。陶史の森の測定では独立な測定量が8つあるので、遠方応力場の独立な6つの応力テンソル成分を誤差も含めて解くことができる。一方、屏風山の測定では独立な測定値は4つしかないので、主応力方向の一つが鉛直方向と仮定することにより、観測方程式を

解くこととした。求められた鉛直応力と岩盤の密度から推定される被り圧を比較することにより、測定および解析結果の妥当性を検討する。

感度係数の計算は一辺5mの立方体モデルによる三次元有限要素法解析を採用した。境界条件として、一般的な変位自由条件を適用した。計算に用いた弾性率、すなわちヤング率とポアソン比はそれぞれ、SUS 210 GPa, 0.33, 花崗岩 40~55 GPa, 0.25, モルタル 10 GPa, 0.20 である。応力の完全解放が仮定される場合、オーバーコア境界面上の残留応力はゼロなので、境界面にはすべての応力成分について逆向きに向けた場合の変位センサの解析結果から感度係数が求められる。一方、残留応力が生じる場合にはオーバーコア境界面で仮定される条件は自由表面だけである。したがって逆向きに加える応力成分は自由境界面に垂直な方向を添え字の一つとしてもつ応力成分のみであるが、今回採用した数値計算モデルおよび境界条件では遠方の鉛直方向を引数とする応力成分の感度が不定となり、解析不能であった。そこで、オーバーコア境界面で生じる残留応力は $\sigma_{\theta\theta}$ のみという条件で解くこととした。

屏風山 700m (BYB700) および陶史の森(TOS)の測定結果にもとづきえられたキー座標系に関する遠方応力テンソル成分を示すと表1のとおりである。表中に示された誤差は未知数6に対して測定量が8という条件から統計的に評価される標準誤差である。陶史の森(TOS)でえられた鉛直応力 σ_{zz} は岩盤の密度と測定深度(約 0.5 km)から推定される被り圧とおおむね一致していると考えてよい。いずれも最大圧縮応力は鉛直であり、正断層レジームであるが、屏風山でえられた鉛直応力は被り圧と比較してかなり大きい。これについては今後の課題としたい。

表 1. キー座標系に関する遠方応力テンソル成分。ただしキー方向をX, 単位は MPa.

	完全解放条件(TOS)	*不完全解放条件(TOS)	完全解放条件(BYB700)
σ_{xx}	2.52 ± 0.18	2.44 ± 0.18	39.1
σ_{yy}	3.98 ± 0.18	4.15 ± 0.18	1.3
σ_{zz}	15.00 ± 2.32	15.53 ± 2.19	77.3
σ_{xy}	-0.67 ± 0.06	0.76 ± 0.07	18.0
σ_{yz}	-0.01 ± 0.17	-0.01 ± 0.16	----
σ_{zx}	-0.17 ± 0.17	-0.17 ± 0.16	----

注 *不完全応力解放解析では残留応力は $\sigma_{\theta\theta}$ のみと仮定されている。

1.2.2.5 おわりに

東濃地震科学研究所で開発されたインテリジェント小型ひずみ計をもちいた初期応力測定システムは、通常、工学分野で用いられるひずみ計測装置と比較して、相対的に剛なひずみ計とモルタル充填を採用することにより、1 km 程度の鉛直で深いボアホールでの計測を可能とした。しかし通常の応力解放法とは異なり、完全な応力解放が実現されないため、通常の解析手法は使えない。本報告では残留応力が生じるような条件で実施された結果にもとづき初期応力解析を実施した。その結果、鉛直応力がほぼ主応力であり、上載荷重から計算される被り圧とほぼ一致する結果がえられた。これは測定手法および解析手法の信頼性の高さを示している。

謝辞 初期応力測定結果は石井紘博士, 山内常生博士, 浅井康広博士らによって測定されたものである。

参考文献

- 石井紘, 山内常生, 松本滋夫, 浅井康広, 深部ボアホールを用いた応力開放による応力測定法と結果の解析について, 月刊地球, 26-2, 66-73, 2004.
- 金川忠, 日比野敏, 石田毅, オーバーコアリング法による3次元地圧計測法, 電力中央研究所研究報告, 385033, 32p. 1986.
- 水田義明, 孔内載荷による大深度岩盤応力測定の実状と問題点, 資源と素材, 228, 361-368, 2002.
- 水田義明, 陳渠, 平田篤夫, ひずみ計埋設型オーバーコアリング法による計測量と初期応力場の関係について, 3D内部報告, 23p. 2006.
- 坂口清敏, コンパクトオーバーコアリング法に基づく応力解放法の提案と高精度化, 月刊地球, 26-2, 59-65, 2004.
- 佐野 修, 地殻応力計測手法と岩石力学, 地学雑誌, Vol. 114, No. 6, pp. 1003-1021, 2005
- Sano, Osam, Y. Kudo, Y. Mizuta, Experimental determination of elastic constants of Oshima granite, m Barre granite, and Chelmsford granite, J. Geophys. Res., 97, B3, 3367-3379, 1992.

- 佐野修, 伊藤久男, 水田義明, 地殻応力測定法の信頼性を損なう要因について, 月刊地球, 26-1, 39-55, 2004.
- 佐野修, 伊藤久男, 水田義明, 編集者からの問題提起と著者の回答, 月刊地球, 26-2, 114-122, 2004.
- Sano, Osam, Hisao Ito, Atsuo Hirata, Yoshiaki Mizuta, Review of methods of measuring stress and its variations; Bull. Earthq. Res. Inst., Vol. 80, pp. 87-103, 2005.
- 佐野修, 大久保慎人, 浅井康広, 石井紘; 新開発応力計と岩盤のカップリングおよび感度について一遠方応力評価にむけて一, 地殻活動研究委員会報告書(平成 26 年度), 2015, pp. 1-8
- 佐野修, 浅井康広, 石井紘; 新開発応力計と岩盤のカップリングおよび感度について一遠方応力評価にむけて一 その2, 地殻活動研究委員会報告書(平成 27 年度), 2016, pp. 155-160
- 佐野修, 大久保慎人, 徳永朋祥, 愛知正温, 本田亮, 鶴岡弘, 浅井康広; 新開発ボアホール応力計の信頼性評価について一固体地球潮汐との比較一, 地殻活動研究委員会報告書(平成 28 年度), 2017, pp. 27-32
- 佐野修; 新開発ボアホール応力計の信頼性評価について一理論地震波形との比較一, 地殻活動研究委員会報告書(平成 29 年度), 2018, pp. 27-36
- 菅原勝彦, 岩盤応力測定に関する研究の動向, 資源と素材, 114, 834-844, 1998.
- 住鋌コンサルタント(株), 地殻活動測定井掘削工事(屏風山観測点)報告書, 2002.
- 住鋌コンサルタント(株), 土岐市陶史の森における深部初期応力測定及び地殻活動総合観測井施設整備工事報告書, 2009.
- 山内常生, 石井紘, 浅井康広, 大久保慎人, 松本滋夫, 吾妻瞬一, 深部ボアホール観測のための地殻活動総合観測装置および地殻応力測定装置の開発と興味ある成果の例, 地震 第2, 58, 1-14, 2005.
- 山内常生, 石井紘, 松本滋夫. 深いボアホール(深度 1km程度まで)においてオーバーコアリングによって応力測定を可能にする計器の開発と測定例について, 月刊地球, 26-2, 74-79, 2004.
- 横山幸也, 応力解放法の現状と課題, 月刊地球, 26-1, 13-19, 2004.

1.2.3 重力計水平アレイ観測

重力計水平アレイ観測 (HGA) の解析は、波形の視認性の観点から2期 (前期: 2021/4/11 - 7/10、後期: 2021/7/23 - 10/21) に分割した。データ処理は、1.1の重力関連の項目で述べたとおりである。

図1 a, bに前期と後期それぞれの各 gPhone の変位 (1, 2)、傾斜補正 (3, 4)、両 gPhone の重力値の差 (5) を示す。重力の2回積分量の変位は地震動検出に有効である。傾斜補正は cross と long の両方向の傾斜に対する補正量 (重力換算値) であり、日射や人工擾乱の影響評価に有効である。本来この補正により重力観測値が適性に補正されるべきだが、大振幅傾斜は重力値に影響が残ることがある。

前期の重力値の差には、自然地震由来の擾乱は小さく、gPhone#130 の傾斜補正に見られる傾斜の影響がある。立坑周辺に地震地下水応答をトリガーしうるマグニチュードの2つの地震 (宮城沖とチンハイ省の地震) に関連する重力変化は明瞭でない。

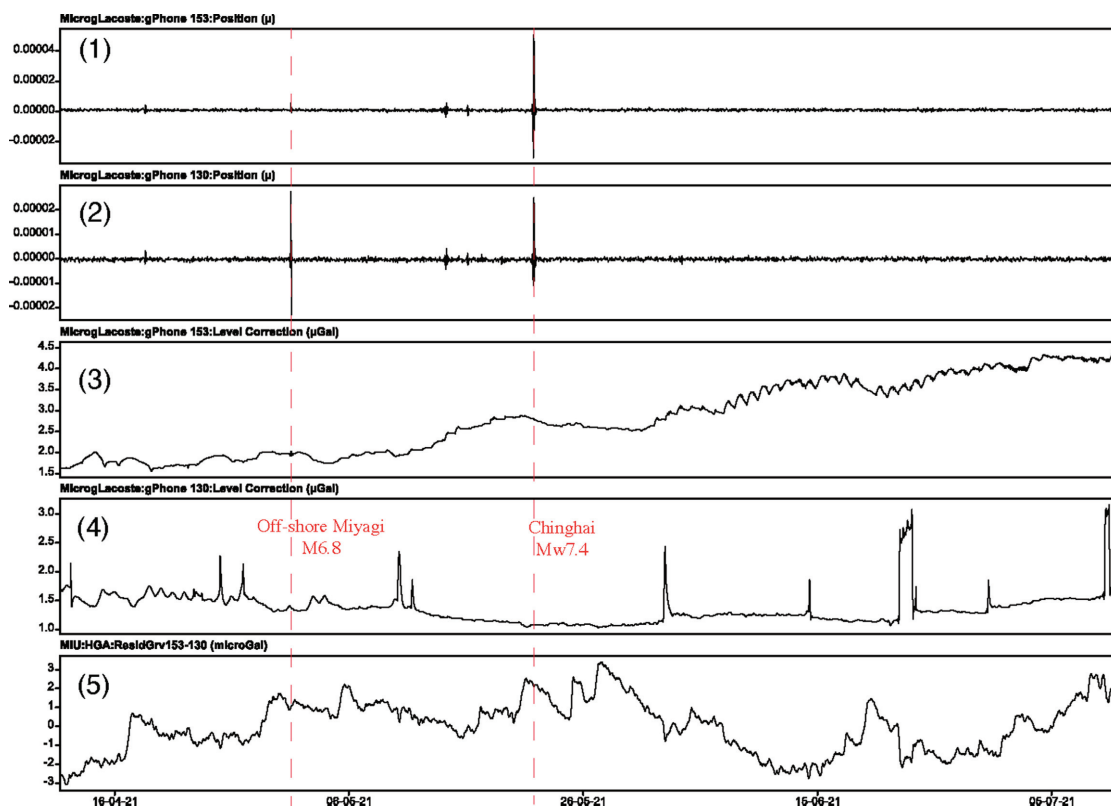


図1 a 前期 (4/11 - 7/10) の戸狩観測壕第三前室の gPhone#130 と瑞浪地科学研究館測定室の gPhone#153 の自然地震および傾斜変動と2つの重力計観測値の差の比較。(1): gPhone#153 の変位、(2): gPhone#130 の変位、(3): gPhone#153 の傾斜補正、(4): gPhone#153 の傾斜補正、(5): gPhone#153 重力値から gPhone#130 重力値の減算値

後半はグローバルの地震活動が活発であった。また、gPhone#130 の傾斜補正が台湾地震 (M6.3) でトリガーされて、メキシコ地震 (Mw7.4) で元に戻るといった現象が見られた。お盆の頃には地震が頻発して解釈は困難であるが、gPhone#153 の方には地下質量増加を示唆する重力変動が現れた可能性がある (立ち上がりの緩い重力増加)。

なお、2020年3月から戸狩観測壕第三前室にて観測を開始した相対重力計 gPhone#130 は2021年11月に観測を終了した。

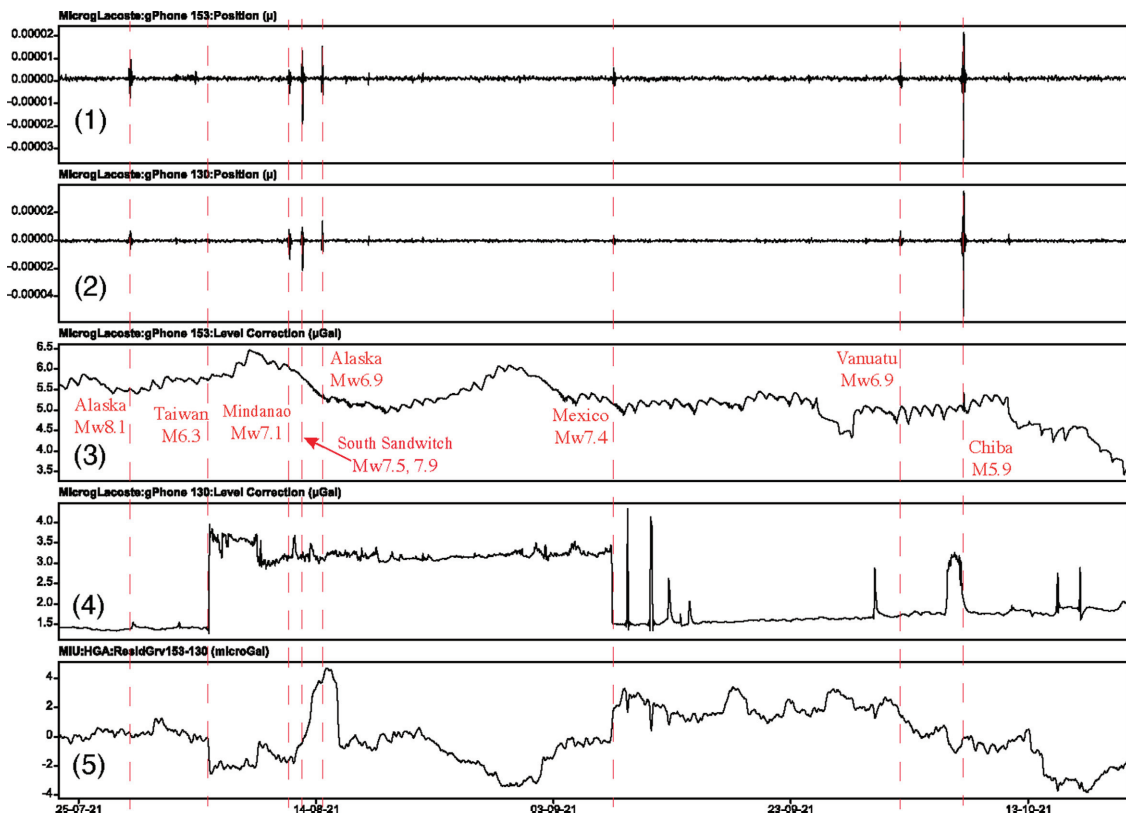


図1b 後期(7/23 - 10/21)の戸狩観測壕第三前室のgPhone#130と瑞浪地科学研究所測定室のgPhone#153の自然地震および傾斜変動と2つの重力計観測値の差の比較。(1): gPhone#153の変位、(2): gPhone#130の変位、(3): gPhone#153の傾斜補正、(4): gPhone#130の傾斜補正、(5): gPhone#153重力値からgPhone#130重力値の減算値

1.2.4 超磁歪起震装置の開発・改良による地下水流動研究

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(2015)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メーション型の超磁歪震源(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 P 波および SV 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。

その後、瑞浪超深地層研究所の埋め戻しが、令和 2(2020)年 2 月 4 日から始まり、土岐花崗岩中の地下水流動の変化が検出されると期待された。しかし、超磁歪震源の信号を観測していたボアホール観測点が廃止され(令和 2 年 1 月 9 日に TRIES、令和 2 年 6 月 30 日に TGR350)、直接波(P 波および SV 波)の走時変化から花崗岩中の間隙水圧に対応した変化を検出することはできなくなった。しかし、瑞浪層群と土岐花崗岩の不整合面付近の地下帯水層に埋め戻しによる影響が及べば、瑞浪観測壕の地震計アレイによって反射波の変化として見えてくることも考えられたため、令和 3 年度も観測を継続した。

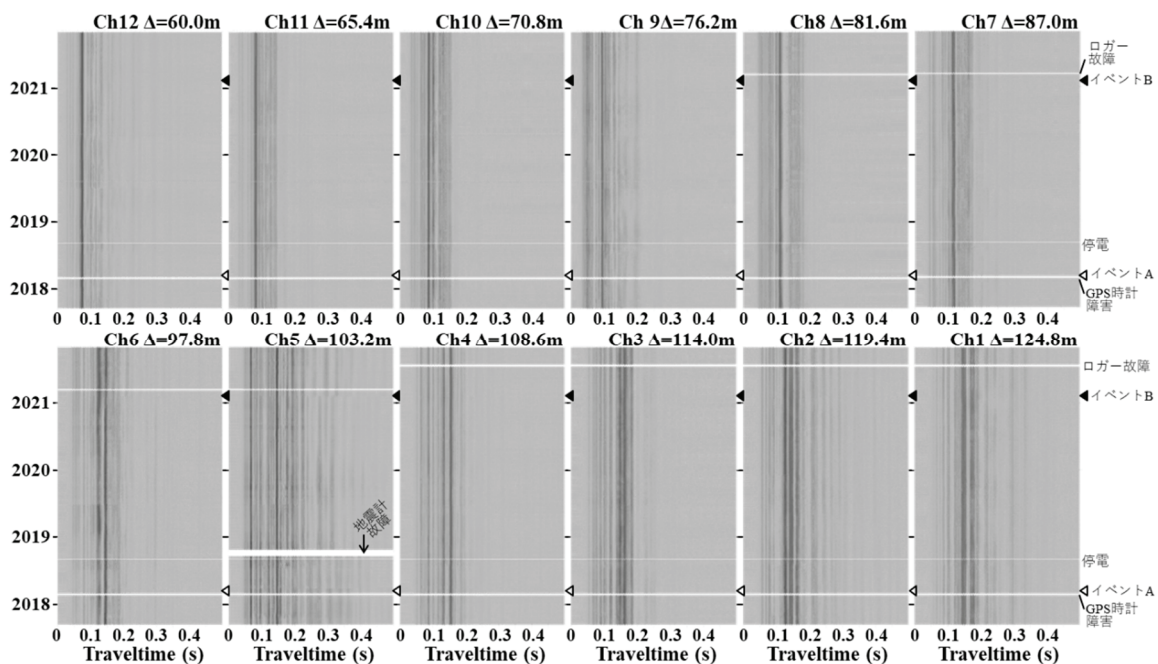


図 1. 瑞浪壕内のアレイ観測を行った 2018 年 9 月 13 日～2021 年 10 月 31 日の 1 日毎のグリーン関数。水平方向の白いラインは欠測で、欠測原因を波形中および右に記載。Δ は、超磁歪震源からの距離。イベント A および B については後述する。

図 1 に瑞浪観測壕の地震計アレイによる観測を開始した 2017 年 9 月 13 日から観測を終了した 2021 年 10 月 31 日までの 1 日毎のグリーン関数の変化を示す。波形が抜けて水平

の白い帯となっている部分は欠測を示している。この期間、超磁歪震源本体の不具合によって停止した事象はなく、欠測は、ロガーの故障(1つのロガーが故障すると4ch分が欠測する)、停電、GPS時計の壕内での受信不良およびその対応が原因である。図1には、埋め戻しの期間に対応する明瞭な変化は見えていない。反射波の埋め戻しの影響は、長期間をかけて徐々に表れる小さな変化と考えられるため、それに適した解析手法の適用・開発が必要である。図2にTGR350(2020年10月21日からTGR320)の地下水位の変化を示す。GWLとHGWLとのオフセットを除いてデータを連続的に見るために、2011年の平均値を合わせている。2021年11月時点では、立坑が深度300mに達した2008年頃の水位に戻ったにとどまっている。掘削前の状態に地下水が回復するまで観測を継続することができれば、グリーン関数を並べるだけでも、浅部の反射波の変化が確認できたかもしれない。



図2. TGR350 (2020年10月21日からTGR320)の地下水位データ。GWLと高分解能のHGWLがある。両者とも相対値であり、データを繋げてみるために、2011年の平均値を一致させてい

アレイ観測の期間中には、瑞浪観測壕内での比較的大きな岩盤破壊イベント(山はねないし崩落)が2回観測された(図3。A:2018年3月28日とB:2021年2月6日)。壕内のコルゲート壁で岩盤の破壊部は見えないが、両者とも振幅および走時からCh6とCh5付近(超磁歪震源から約100m)に震源があると推定される。Ch6およびCh5の振幅はイベントAの方が大きい。イベントBは低周波成分を多く含み、Ch1での振幅はイベントBの方が大きく、また、その奥にあるSTS-1でも三成分とも明瞭に波形が記録されている(図4)。特にN77E成分の振幅が他の成分と比べて顕著に大きい。崩落(重錘落下)であれば、水平方向にはSV波が起振され、上下動が卓越すると考えられるが、特定方向の水平動(SH波)の振幅が大きいのは、この岩盤破壊が、横ずれの成分が卓越した断層運動であることを示しているのかもしれない。なお、両イベント共に高周波の現象であり、STS-1の高周波特性が成分毎に揃っているのかどうか心配であるが、近地地震にハイパスフィルターをかけた波形では、特に成分毎に高周波特性が異なっているということはない(図5)。

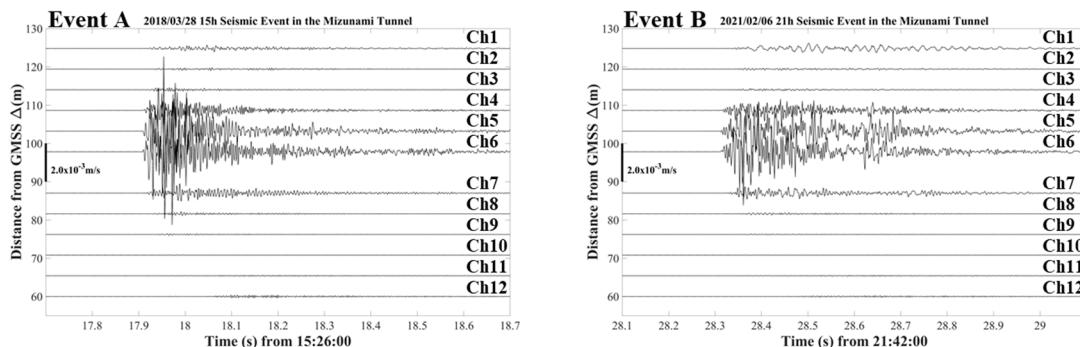


図 3. 観測期間中に瑞浪観測壕内で発生した比較的大きな岩盤破壊イベント。1 秒間の波形を表示。EventA : 2018 年 3 月 18 日 15 時 26 分 17.9 秒。EventB : 2021 年 2 月 6 日 21 時 42 分 28.3 秒。縦軸は超磁歪震源からの距離。

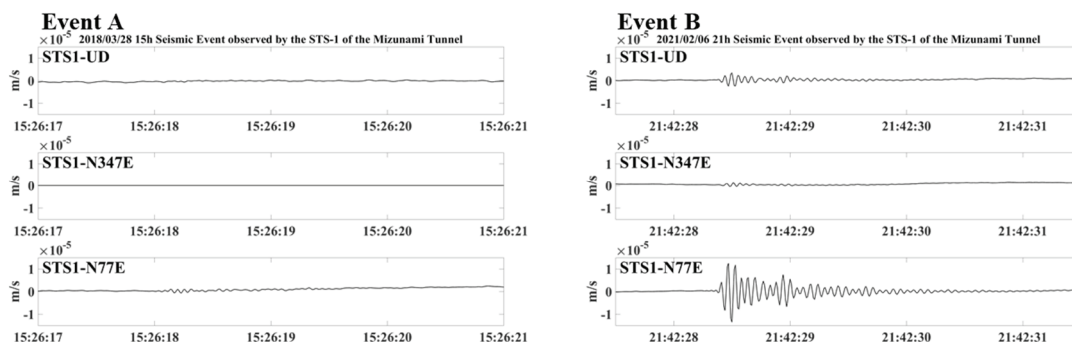


図 4. 瑞浪観測壕の奥に設置された STS-1 による EventA と EventB の観測波形。4 秒間の波形を表示。EventA の STS1-N347E 成分は、振り子のレンジオーバーで、観測できていない。

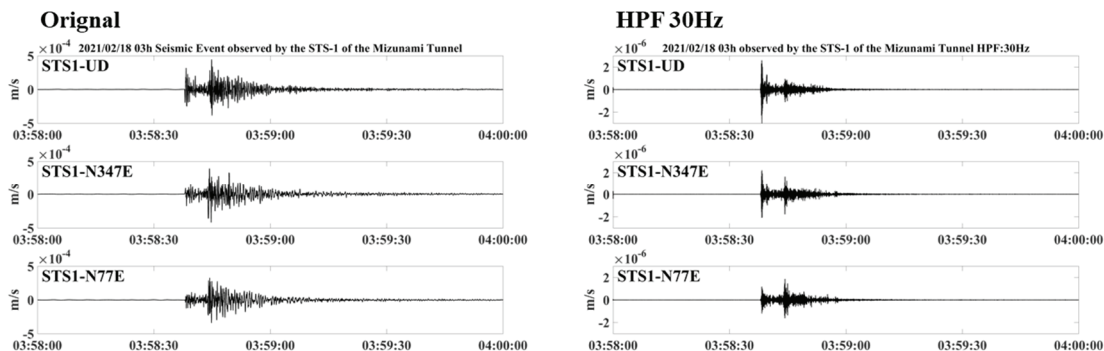


図 5. STS-1 の高周波側の特性確認のため、自然地震（愛知県西部 2021 年 2 月 18 日 3 時 8 分頃 M4.2）の観測データ（左図）に、30Hz のハイパスフィルターを適用した（右図）。

1.2.5 トンガの海底火山噴火により観測された記録例

2022年1月15日13時頃トンガ島北方約65kmにある海底火山「フンガ・トンガ・ハアバイ」が噴火した(図1)。それに伴って当研究所の気圧計、水圧計、歪計などに変動が観測された。

当究所において記録した変動の一部を図2に示した。

噴火は15日3時過ぎに発生したが19時過ぎに異常変動が観測されている。通常の気象観測用の気圧計に2hPa程度の気圧変動が発生している。それに伴って

TGR320 ボアホール観測点(深度320m)の歪計にも 1×10^{-8} 程度の変動が観測されている。

STG500 ボアホール観測点(深度500m)の水圧計にも対応した水圧

変動が観測された。噴火地点から観測点までの距離は約8000kmであり、到達時刻を考慮すると変動は約320m/secで伝搬してきたことになる。



図1 NHK NEWS WEB より

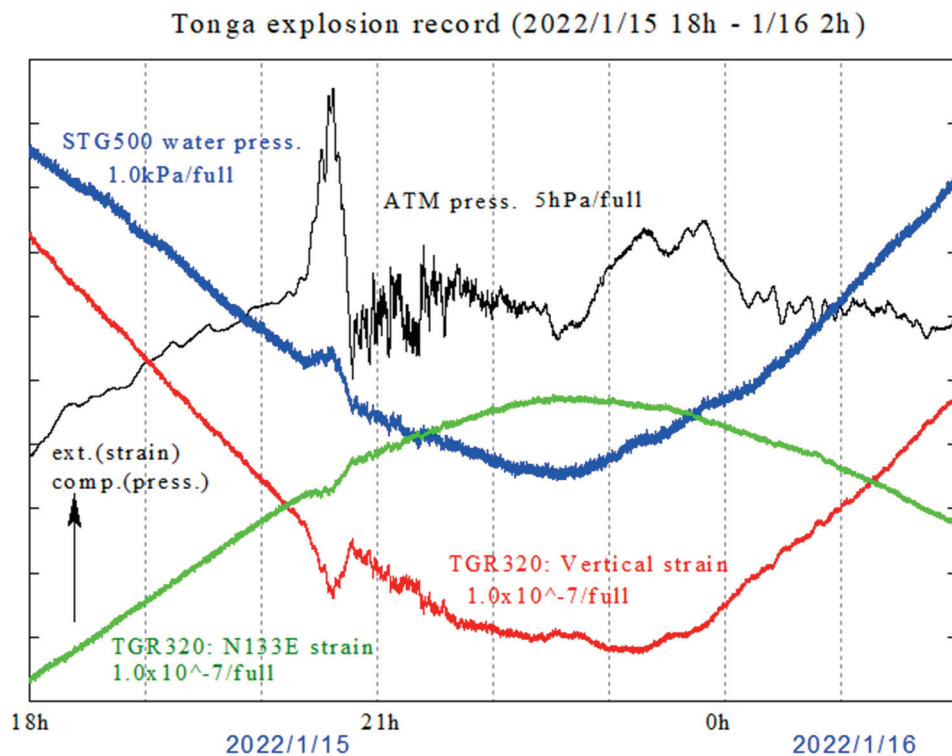


図2 トンガの海底噴火に伴って観測された記録例

2. 内陸地震および活断層地域における地震の発生機構および関連現象の総合的研究

2.1 東濃地域の地震活動および地殻活動の研究

2.1.1 12年間の研究について

科学研究の目的は、「まだ誰も知らないことを知る」、「誰も見たことがないものを見る」ことであろう。その目的のために必要な主たる要素は、①新しいタイプの観測計器を作って新しいタイプのデータを取る、②観測が行われたことの無い場所で観測する、③新しい理論を導くことであろう。それに、④データを自分の目で見ると、⑤思い切って飛躍した新しいアイデアが加わる。

東濃地震科学研究所では、石井紘と浅井康広が一貫して①を目指し、陶史の森の応力計を設置し、地殻応力の連続記録を蓄積してきた。筆者と同時に在籍するようになった佐野修を中心に応力計からの出力と広域応力場の関係を詳細に検討した。筆者と関係者は④の自分の目で見ると、⑤思い切って飛躍した新しいアイデアが加わる。他の方々も多方面の貴重な貢献を行ってきたが、ここでは省略する。敬称は省略した。

本年度は、まず。以上の様な問題意識を踏まえ、まず川崎や佐野が東濃地震科学研究所に在籍した2010年度から2020年度まで11年間の成果の要点を整理しておきたい。それは、大きく分けて、次の4つに分類できる。引用は省略する。

- (1) 2011年東北地震に伴ったM 8.4スーパーサブイベント、周期70秒から100秒の先行津波、房総半島南端部の厚さ15km程の第三紀付加体堆積層の周期70秒から100秒の共鳴、数時間続く周期10秒から20秒の地殻の共鳴、火山地域における日遅れ月遅れの誘発群発地震。
- (2) 地震本部の主要活断層の長期評価を過去100万年程に外挿した累積地震性地殻変動と大阪層群の海成粘土層の堆積構造の比較から得られた近畿地方中央部の50万年前以前の70m/10万年の定常的沈降、富山平野から金沢平野の化石産出の標高や海成段丘高度との比較などから得られた120m/10万年に達する50kmスケールの第四紀後半の定常的沈降。
- (3) 1991年吾妻一金沢人工地震観測、1996年集中観測、重力異常による超低密度層などの立山黒部アルペンルート直下の深部地震波速度構造と、黒部川花崗岩体の同位体年代、十二貫野などの高位段丘の離水時期、GEONETのGPSデータなどから復元した、黒部峡谷を中軸とする高速隆起の復元。
- (4) 東北地震後の飛騨上高地地域から立山黒部地域の月遅れ・年遅れの群発地震現象。特に2020年飛騨上高地群発地震の時空間分布とそのメカニズムの推定。

以上のテーマの内の(1)のMw8.4スーパーサブ地震や地殻からマンツルの長周期レゾナンスは、データを見ることを計算機にまかせるのでは無くデータを自分の目によって見る試みから、「誰も見たことがないものを見る」試みとその成果の報告と言えよう。

(2)の第四紀後半の定常的沈降は地球科学から分野の境界を越えて考古学に架橋する試み、(3)の立山・黒部の深部地殻構造と第四紀隆起の復元像は、地震学、重力探査、熱水地球化学、同位体年代学、立山黒部アルペンルートGPSなどの研究成果を総合して立山・黒部の第四紀後半の高速隆起を復元する試み、(4)の「飛騨上高地群発地震」は1998年と2020年の群発地震の震源分布の比較から推定した時空間的に分離した不規則な群発地震の移動現象のメカニズムの推定の試みである。それは、「まだ誰も知らないことを知る」試みである。

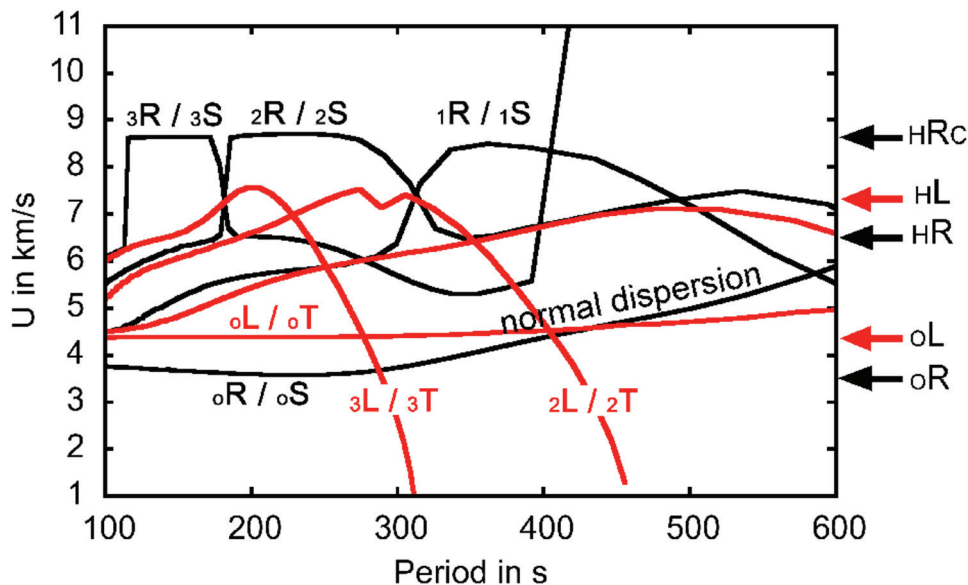


図1 Dziewonski and Anderson (1981).のPREM (Preliminary Reference Earth Model)による地球の自由振動の群速度の分散曲線。黒線Sは伸び縮み振動(spheroidal oscillation), 赤線Tは捻れ振動(toroidal oscillation)

2.1.1 陶史の森の応力計で観測されたマントル共鳴

図1は地球の自由振動の伸び縮み振動(S) (平衡性層構造ではラーリー波Rに対応), 赤線は捻れ振動T (同ラブ波L)の群速度の分散曲線である。

図2 (左)は2011年3月11日の東北地震後30時間ほどの東濃地震科学研究所の陶史の森観測点の(A)から(D)まで四つの時間帯の4時間33分(10^{14} 秒)の応力記録である。

主要なフェーズはすべて地球を1回以上周回して日本列島に戻って来たラーリー波とラブ波のエアーフェーズと前方分散である。

通常, マイナーアークを通過してきたラーリー波をR1, そのあと地球をn回周回してきたラーリー波をR2n+1, メジャーアークを通過してきたラーリー波をR2, そのあと地球をn回周回してきたラーリー波をR2n+2と名付ける。東北地震から放出されたR2とR3, R2nとR2n+1はほぼ同時に日本列島に戻ってくるので, ここではR2とR3を合わせてR2+3, R4とR5を合わせてR4+5と表示する。それより多く地球を周回するラーリー波についても同じである。

(A)の記録上の100秒より長周期の主要フェーズは次の通りである。

黒色波形のHR2+3は高次モードのラーリー波のエアーフェーズ,

赤色波形のHL2+3は高次モードのラブ波のエアーフェーズ,

赤色波形のoL2+3は基本モードoL/oTのラブ波のエアーフェーズ,

黒色波形のoR2+3は基本モードoR/oSのラーリー波のエアーフェーズ,

黒色波形の1R2+3とoR2+3の間が, 図1の基本モードoR/oSの周期300秒~1000

秒の部分のnormal dispersion (前方分散)と示した部分の長周期成分から順次到達したもの。

波形振幅は, おおむね, 時間帯(A)のnormal dispersionの部分では3kPa程度, (B)では全体0.3kPa程度, (C)では0.2kPa程度, (D)では0.1kPa程度と減衰して行く。

本年度に至るまで, うかつにも, それはノイズが減少して行っているものとみなしていた。今年度, 30秒の移動平均と3000秒の移動平均の差をとって3秒以下のノイズと潮汐をのぞき, スペクトルを計算してみると, 図2(右)の様に, 卓越周期が, (A)では160秒~250秒, (B)で250秒~700秒, (C)では300秒~1000秒, (D)では500秒~1000秒と系統的に長周期側にシフトしていることが分かる。

PREM (Dziewonski and Anderson, 1980)によれば, 伸び縮み振動のQは周期200秒前後で150程度, 周期700秒前後で340程度である。それはスペクトルの主要周期帯の振幅の減衰の割合とおおむね調和的である。従って, (B)から(D)の長周期の準調和的な地震動は, 地球を最大7周したラーリー波の前方分散(normal dispersion) (群速度4km/sから6km/s)が重なったものであることが

分かる。

oR/oSの固有関数は上部マントルに根を持っており、周期 500 秒より長周期の normal dispersion の部分のモードの固有振動は下部マントルにまで根を持っているので(A)から(D)はまとめて全マントルの共鳴と言うことが出来る。

この発見の事実は、逆に、陶史の森の応力記録は、30 秒より長周期帯では、0.1kPa まで安定的に記録している優れた記録だということを示している。

全マントル共鳴については、現在、Unique characteristics of ultra-broadband seismograms for the 2011 Mw 9.1 Tohoku Earthquake from high-rate GNSS and continuous stress records (Kawasaki et al.) の一部として EPS へ投稿中である。

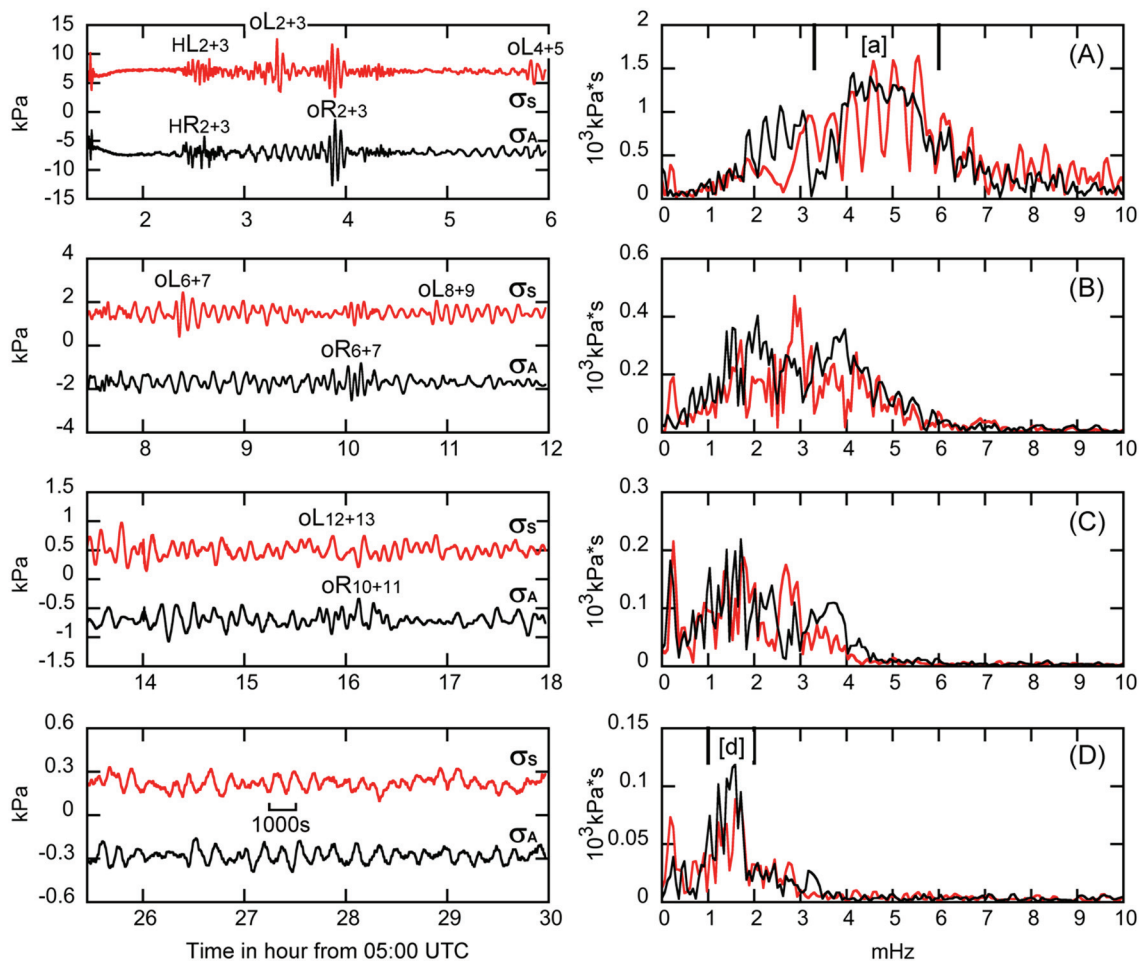


図 2 (左)2011 年 3 月 11 日の東北地震の時の東濃地震科学研究所の陶史の森観測点の各時間帯の応力記録と(右)その FFT スペクトル。赤の波形は剪断面応力 ($\sigma_{N359E} - \sigma_{N89E}$)、黒の波形は ($\sigma_{N359E} + \sigma_{N89E}$)。上から順に、日本時間で (A) 15 時 27 分から 20 時まで、(B) 21 時 27 分から 12 日の 2 時まで、(C) 3 時 27 分から 8 時まで、(D) 15 時 27 分から 20 時までの各 4 時間 33 分 (10**14 秒)。気象庁による地震発生時刻は 14 時 46 分 18 秒。

2.1.2 東濃地震科学研究所の歪計・応力計で記録された地震動集録の終了と最終版 TRIES_SSS_DB の構成

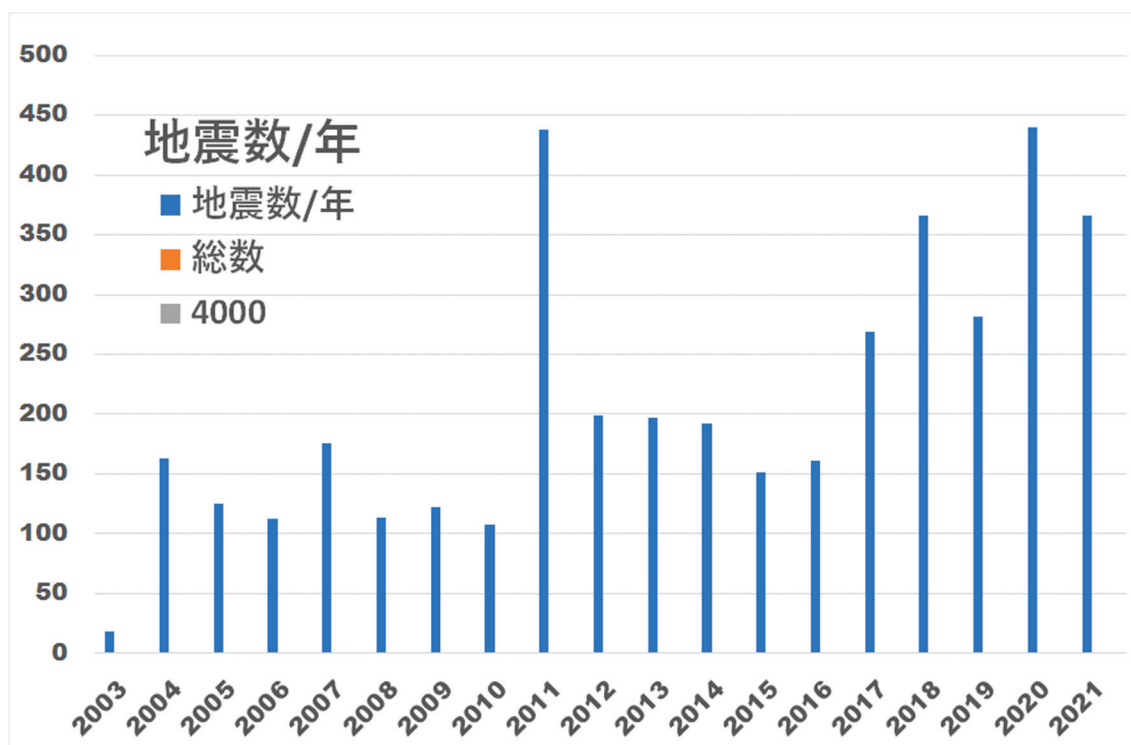
2003 年屏風山観測点 (BYB) の設置以後、高速サンプリングの観測点が増えていった。2016 年 4 月末に、それまでに蓄積されている東濃地震科学研究所の歪計・応力計ネットワークで記録された地震動記録の収録を始めた (笠原、2017)。研究所設立から 25 年を迎えた 2021 年度中にその機能を総て終了せざるを得ないことになり、2021 年 10 月から順次観測点の閉鎖を進めてきた。第 1 図は、それぞれの観測点の稼働状況を示している。開始の年月日 (左の黒字) と終了の年月日 (右の赤字) を示してある。TRIES と HYS と TGR350 の終了時点は、ボアホール内機器の故障によるものである。移管の可能な観測点、BYB、TGR320、SNG 以外の観測点は、第 1 図に示した日時を持って終了した。超深地層研究所の井戸に設置された STG200N と STG500 は、いつまで継続するか未定であるがしばらくは継続されることになっている。それに伴い東濃地震科学研究所 (TRIES) の歪・応力地震動 (Strain-Stress Seismograms) のデータベース (Data Base) も、2021 年 11 月末で収録終了とした。

station/year	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	year/station	
BYB				3/30																					BYB
TRIES							5/16												8/15						TRIES
TOS											3/15												10/13		TOS
HYS												9/18							9/15						HYS
SBS														2/20										11/17	SBS
STG200N																8/19									STG200N
MZN17																	12/6							10/22	MZN17
STG500																			12/15						STG500
kakudai																					1/21	10/22			kakudai
tgr320																							10/15		tgr320
mzn																	4/6							11/30	mzn
tgr350	2000-1Hz					12/8																			tgr350
sng					9/7			9/14																	sng
97FT-01								6/23																10/12	97FT-01

第 1 図 東濃地震研究所歪・応力観測点の稼働状況

第 1 図で、濃い緑色の期間は、対象地震についてチェックされ収録されている期間である。Tgr350 の 2000 年-2003 年の期間は、1 Hz サンプリングが行われていた期間で、日本周辺の M7 以上の地震を対象に収録してある。M7 以上の地震の場合には、1 Hz サンプリングでも有効な地震動記録が得られている。加えて、sng、97FT-01、の 3 観測点は、2005 年から 2006 年にかけて、20/50Hz の高速サンプリングが開始されており、薄い緑の期間について、総てではないが、一部収録されている期間である。

収録された地震数の年毎の変化を、第 2 図に示した。2010 年までの 100 個/年前後の変動は、BYB 観測点の検知能力のレベルを示している。2011 年の増加は、2011 年東日本大地震の影響で、余震活動とともに岐阜周辺の地震活動度も上がった結果である。2012 年から 2016 年、150-170 個/年、さらに、2017 年以降の増加 (250-300 個/年) は、笠原・他 (2020) と笠原・他 (2021) でも指摘している通り、変位センサーの電子ノイズの軽減により検知下限が小さな地震まで広がったからである。また、2020 年のピークは、岐阜長野県境の群発地震の結果である。若干重複して数えているが、収録地震総数は、約 4000 個になっている。データ容量は 36.6Gb になっている。

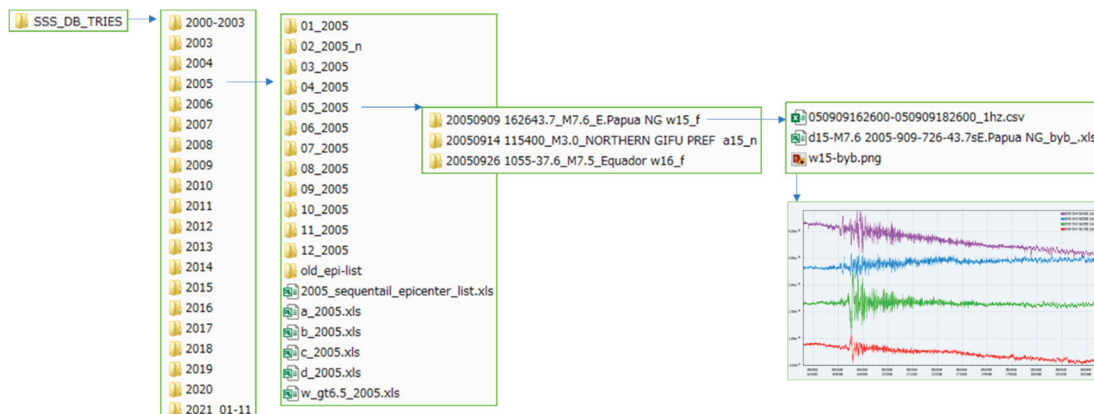


第2図 年毎の収録地震数変化

DB内のフォルダー形式と収録内容に時間変化があるのでそれを述べておく。

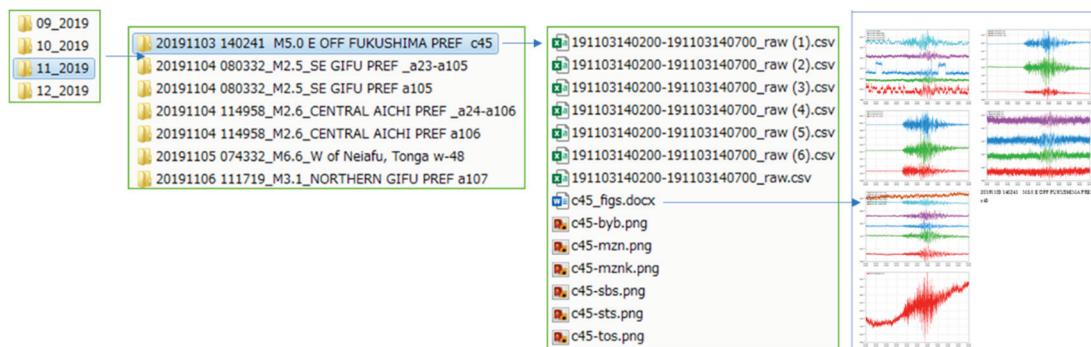
1. 基本的には、親フォルダー (TRIES_SSS_DB) に、各年のフォルダー(2003)があり、その中に、各月のフォルダー(02_2003)とその年の各ゾーン (笠原・他、2020) の収録地震の震源表と総ての地震の時間順の1年間の震源表がある。各月のフォルダーには1地震毎のイベントフォルダーがある。ここでは、時間順に並んでいるので地震発生系列を読み取ることもできる。イベントフォルダー(OT_M_Location)には、オリジナルデータファイル (集録開始時-終了時. csv) と観測点ごとの波形表示ファイル(. png)がある。簡単な波形描画等のための、xls ファイルも、2016年までのものには存在する場合がある。これは、その後の地震数の増加に対応できず、DBの基本方針をオリジナルデータの集録に置いたため、2016年以降のデータにはほとんどない。これが、2003年から2018年までの形式である。第3図参照。
2. 2019年には、観測点が多くなったことから、観測点ごとの波形ファイルでは、参照に時間がかかるために、1ページに全観測点の波形を貼り付けたものを作成するようにした。この年は試行期間であるから、第4図のように混在している。
3. 2020年以降は、波形表示の.pngファイルはやめ、すべて、1ページに全観測点の波形を並べる方式にした。同時に、月毎のフォルダー内にこの波形表示のファイルをおくことにした。これにより、各月のフォルダーを開けば、集録されている地震の波形やS/Nについての情報を得やすくなったと思う。

親フォルダ__年毎__月毎と震源表__イベント毎__ CSV形式データと PNG、



第3図 2003年から2018年までの構成

月毎__イベント毎__ CSV形式データと PNG と集積地震記象

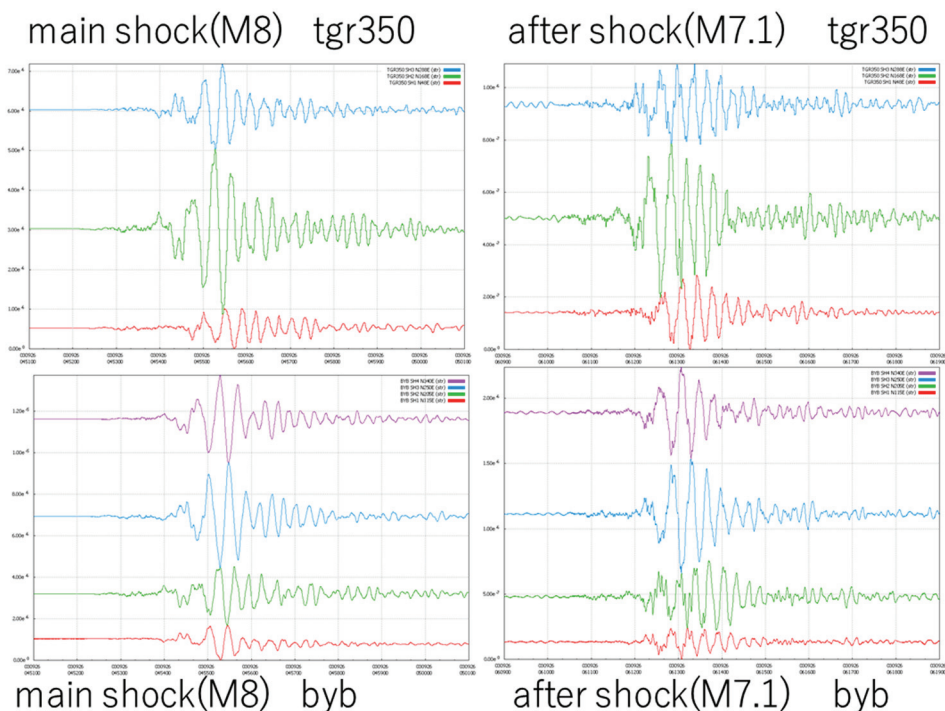


第4図 2019年の構成



第5図 2020年以降の構成

TRIES_SSS_DB 内の、2000-2003 のフォルダーには、先述したように、この期間の M7 以上の地震の、tgr350 の 1 Hz の記録が集録されている。1 例として、2003 年十勝沖地震の本震と余震の byb 観測点との比較を示す(第 6 図)。サンプリングは、byb 20hz、tgr350 1Hz、である。この規模の地震の場合は、1 Hz サンプリングでも十分有効な歪地震動を記録できることがわか



第 6 図 2003 年十勝沖地震本震 (M8) と最大余震 (M7.1) の tgr350 と byb の比較

このデータベースは、地震予知総合振興会のホームページに含まれる東濃地震科学研究所の研究所出版物の資料として公開される予定である。

参考文献

笠原 稔 2017. 東濃地震科学研究所の歪計・応力計十字アレイで観測された地震動記録の収集 その 1 東濃地震科学研究所_歪応力地震動記録の DB の構造. 地殻活動研究委員会報告書、Seq. No. 38、5-22

笠原 稔・浅井 康広・石井 紘 2020. 東濃地震科学研究所の歪・応力地震動データベースの再構築—収録地震の追加とファイル構造の変更. 地殻活動研究委員会報告書、Seq. No. 44、75-86

笠原 稔 2021. 戸狩(TGR350)孔の再整備による新多成分歪計により観測された歪み地震動. 地殻活動研究委員会報告書、Seq. No. 46、23-32

2.1.3 コア変形法による岩盤応力の測定と応力解放法による測定の比較による信頼性の検討

2.1.3.1 はじめに

岩盤応力の測定は、応力解放法や水圧破碎測定法が信頼性の高い方法と思われるが、これらの現場での作業が必要のため多額の費用を要する。これに比べコア法は、ボーリングコアを用いて実験室で応力の測定ができるため安価で簡便であり、いくつかの方法が提案されているが、いずれの方法も信頼性が低い難点があった。最近、ボーリング軸に直交する2次元断面の岩盤応力を、コアの変形を利用して測定するコア変形法(DCDA: Diametrical Core Deformation Analysis)が、船戸・伊藤(2013, 2017)により開発された。この方法は、仮定が単純で従来のコア法と比べ信頼性が高いと思われるため、当研究所では昨年度、ボアホール観測点設置時に回収した JAEA STG 500L, 陶史の森, 屏風山の3箇所の鉛直孔のコアに対して、この方法による岩盤応力の測定を行った。この3カ所では他の測定法による測定結果との比較ができなかったため、今年度は、JAEA 瑞浪, JAEA 幌延, 釜石鉱山のコアを用いてコア変形法による岩盤応力の測定を行い、応力解放法や水圧破碎測定法などの既存の他の信頼性の高い方法による過去の測定結果と比較して、コア変形法の信頼性の検討を行った。ここでは速報として釜石鉱山のコアに対する結果を報告する。

2.1.3.2 コア変形法による岩盤応力の測定法の概要

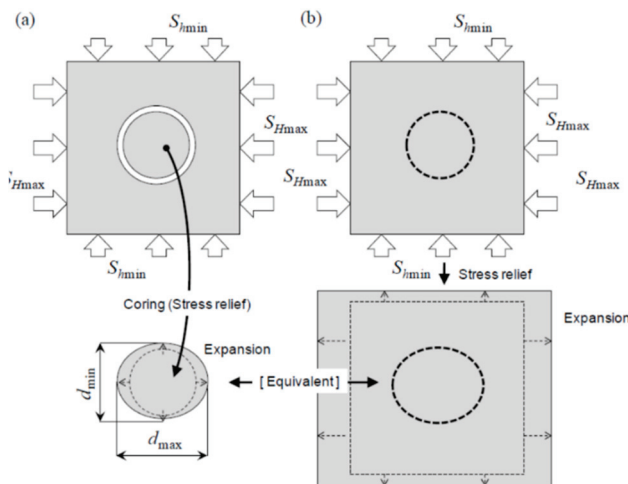


図 1: 応力解放によって生じるコア変形概念図 (a)異方的な応力場から回収されたコアの膨張 (b)外部応力の解放による(a)に等価な円形の岩盤領域の変形(船戸・伊藤, 2013)

船戸・伊藤(2013, 2017)によれば、コア変形法の基本原理と特徴は次の通りである。ボーリングコアは回転するビットによって切削されるから切削された瞬間のコアは真円のはずである。しかし掘削が進んで、コアが周囲の岩体から完全に切り離された状態では、その過程の応力解放によってコアに変形が生じる。応力解放に伴う変形が弾性的と仮定するならば、変形量は解放応力に比例する。従って、コア軸に直交する面内応力が異方的であれば、コアの断面は真円ではなくわずかに扁平となる。この時に生じるコアの断面形状の変化(図 1a)は、図 1b に示すように岩体に描いた円形の領域が応力解放によって変形することと同じである。したがって、コアの直径が最大及び最小となる方向は、孔井直交面内の最大応力 SHmax

及び最小応力 Shmin の方向と一致することになる。コアのヤング率とポアソン比を1軸圧縮試験により求めることにより、孔井直交面内の最大応力差 SHmax—Shmin も求めることができる。

なお、通常採取されたコアは方位が不明であるため、コア変形法で孔井直交面内の主応力方向を知るためには、採取時に方位を調べコアに印をつけていくか、コア採取後にボアホールテレビの画像とコアを対比しながら観察し、測定対象のコアの方位を明らかにする必要がある。

2.1.3.3 釜石鉱山における円錐孔底応力測定とコア変形法に使用したコアの採取位置

釜石鉱山では、1991年から2016年にかけて7回にわたり応力解放法の1種である円錐孔底応力測定により地表下約300mの閃緑岩中で岩盤応力の測定が行われている(Sakaguchi et al., 2017)。2012~2016年にかけては、東北地方太平洋沖地震による地殻応力の変化を調べる。

るため、図2に示すSKO-1~4の4孔がいずれも水平上向き4°でほぼ東西方向(N75W~N77W)に掘削され、図の丸印の位置で測定が行われた。この15回の測定のうち黒丸印の11回の解放ひずみを用いて岩盤応力の決定が行われた。これら測定結果と比較するため、SKO-1, 3, 4の3孔の孔口から19.51~23.48mの深度で採取されたコアを用いてコア変形法による応力測定を行った。なおコアの方位は、この3孔に鉛直方向が表示されるボアールテレビを挿入し、ボアールテレビの画像とコアを現地で対比しながら観察し、測定対象のコアの方位を決定した。

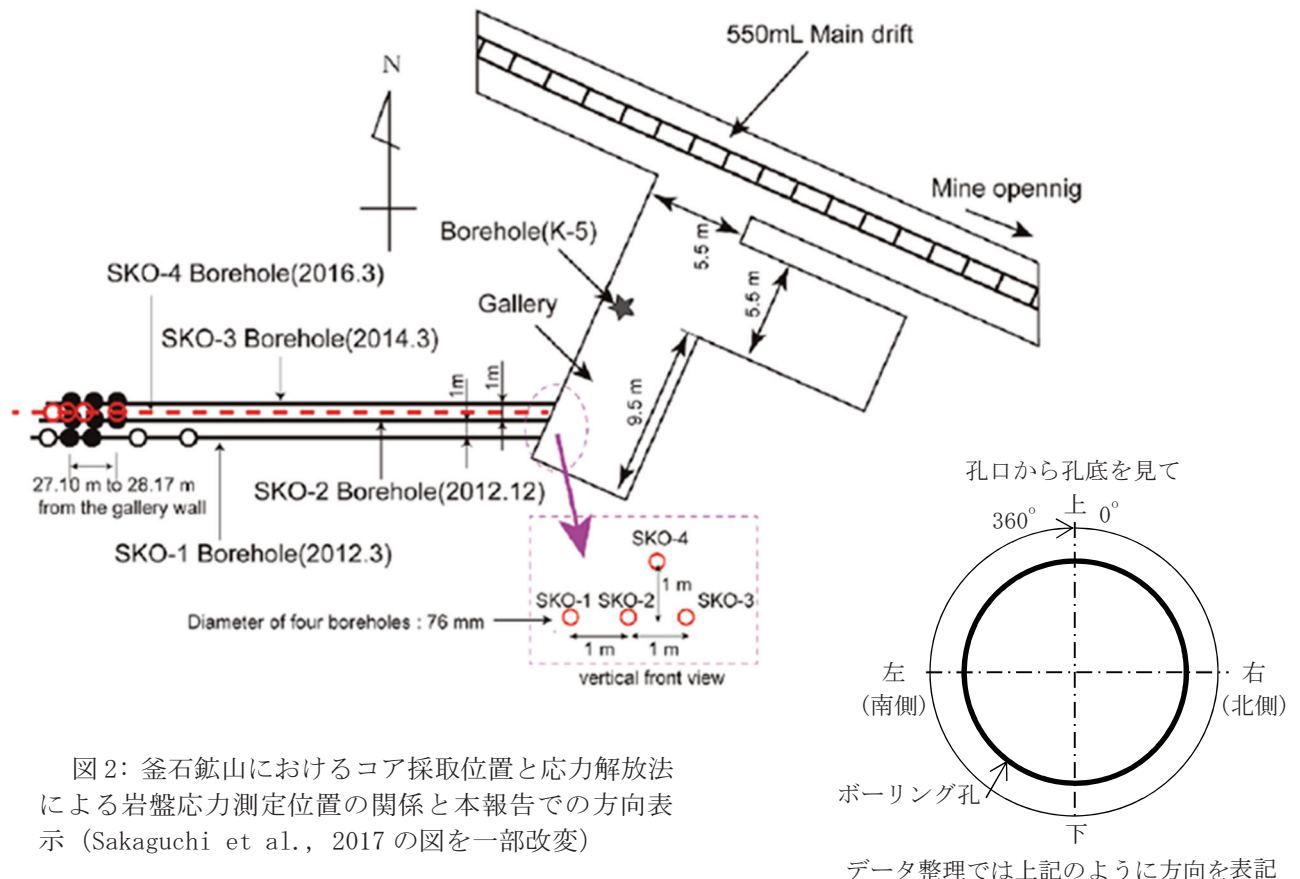


図2: 釜石鉱山におけるコア採取位置と応力解放法による岩盤応力測定位置の関係と本報告での方向表示 (Sakaguchi et al., 2017 の図を一部改変)

2.1.3.4 釜石鉱山のコアに対する測定結果

図3に釜石鉱山のコアに対するコア形状の測定結果の1例として、SKO-1孔の21.01m~21.10mの長さ10cmの間を1cm間隔で10断面測定した結果を示す。横軸は供試体の鉛直上側を0°とし、孔口から孔底を見て時計回りの角度を示し、縦軸はそれぞれの角度の直径であり、ランダムな測定値の突起は、コア表面の結晶の反射などによるレーザー光を用いた測定特有の測定ノイズである。コアの断面が楕円形であると、測定値が正弦波を描くが、ランダムな突起を除けば測定結果は正弦波を描いており、コアの断面が楕円形を示していることがわかる。

図4(a)は図3の測定結果を含むSKO-1孔21.01m~21.50m間のコアの各断面の角度毎の直径の平均値(青丸)と正弦波の近似曲線(赤線)を示す。レーザー変位計の測定精度の公称値±0.15μmに対し直径差は11.8μm、最大直径の方向は87°である。図4(b)は各断面の直径の平均値であり、コアの扁平度をわかりやすく示すためスケールを拡大して示している。

図5にコア変形法と円錐孔底ひずみ法による応力測定結果を比較して示す。円錐孔底ひずみ法では3次元の主応力値と主応力方向が測定できるが、コア変形法は2次元の応力測定なので、コアを取得した孔井の直交面内の主応力の方向と主応力差しか求まらない。図5は

SKO-1, 3, 4 の 3 孔の各孔で測定された円錐孔底ひずみ法の 3 次元応力の測定結果 (Sakaguchi et al., 2017) から計算した各孔の孔井直交面内の最大圧縮応

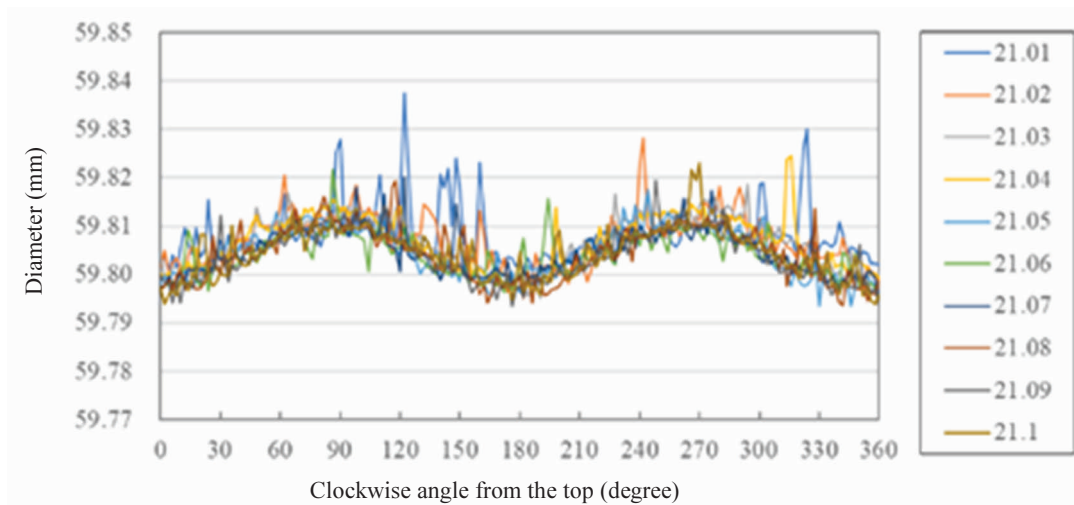


図 3 : 直径測定結果の例 (SKO-1 孔 21.01m~21.10m 間のコア)

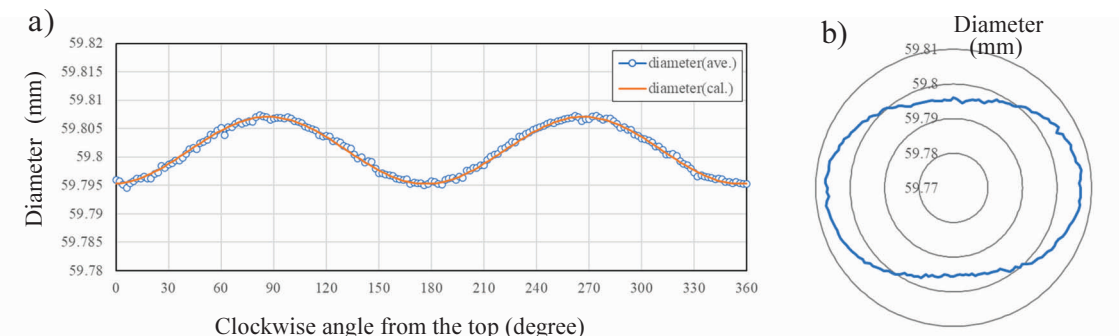


図 4 : (a) 図 3 の測定結果を含む SKO-1 孔 21.01m~21.50m 間のコアの各断面の角度毎の直径の平均値(青丸)と正弦波による近似曲線(赤線). (b) 各断面の直径の平均値

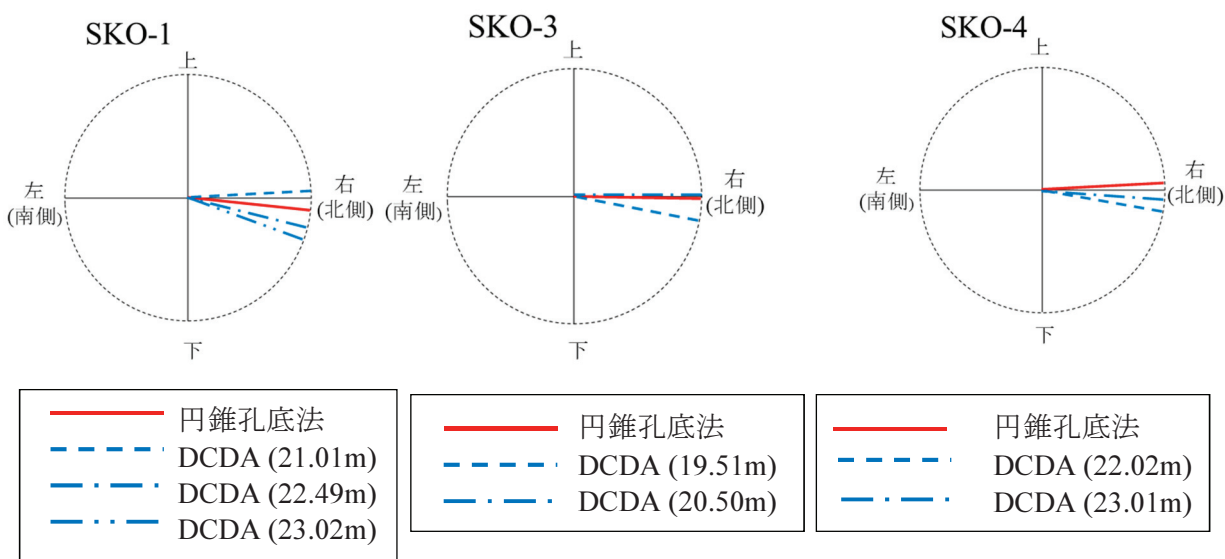


図 5 : コア変形法 (DCDA) と円錐孔底ひずみ法の結果の比較.

力 SHmax の方向を赤線で、コア変形法の深度ごとの SHmax の方向を青線で示して比較したものである。いずれの結果もほぼ南北の水平方向であり、両者の結果が良く一致していることがわかる。コア変形法では、最大圧縮方向だけではなく、孔井直交面内の最大主応力差も決定できるが、そのためにはコアのヤング率とポアソン比が必要である。現時点ではこれらの値が不明であるため、1軸圧縮試験によるこれらの値の決定を待って、円錐孔底ひずみ法の結果と比較して検討したいと考えている。

2.1.3.5 まとめ

釜石鉱山の結果については、コア変形法の孔井直交面内の最大圧縮応力の方向が、円錐孔底ひずみ法の3次元応力の測定結果から計算された各孔の孔井直交面内の最大圧縮応力の方向と良い一致を示し、コア変形法の信頼性が確認された。今後、現在測定作業中の JAEA 瑞浪と JAEA 幌延の結果を含め、主応力差についても比較を行い、信頼性と適用性を総合的に評価したいと考えている。

参考文献

- Funato, A. and Itoh T. (2017) A new method of diametrical core deformation analysis for in-situ stress measurements, 91, 112-118.
doi: 10.1016/j.ijrmms.2016.11.002
- Sakaguchi, K., Yokoyama, T., Lin, W., and Watanabe N. (2017), Stress buldup and drop in inland shallow crust caused by the 2011 Tohoku-oki earthquake events, Scientific Reports, 7: 10242. doi:10.1038/s41598-017-10897-8
- 船戸明雄・伊藤高敏(2013)岩盤応力評価のためのコア変形法(DCDA), J of MMIJ, 129, 577-584.

3. 広報活動など

3.1 地元イベントへの参加:おもしろ科学館 in 瑞浪

今年度もオンライン開催となり、東濃地震科学研究所は石井所長が動画に出演することとなった。開催日は2021/12/17~2022/1/30である。動画製作が委託業者により進められ当研究所も製作に参加した。動画では、石井所長が地殻活動総合観測装置の紹介や歪計のデモを行っている。



02 <small>東濃地震科学研究所</small>	TITLE 瑞浪市にある研究施設へGO!	
	INSTRUCTOR 出演 協力 川角博先生 東濃地科学センター 東濃地震科学研究所	
	CONTENTS 川角先生と瑞浪市にある研究施設へGO! 東濃地科学センターの「年代測定」の研究や、東濃地震科学研究所の「ひずみ計」を使った研究を川角博先生と一緒に動画で学びます。 岩石について学ぼう！わくわく研究室 岩石の種類や特徴を知る「岩石について学ぼう！わくわく研究室」では、学習後にクイズにチャレンジすることができます。いくつか答えられるかな？	



「おもしろ科学館 2021 in みずなみ」公式ホームページ (2020/1/30 まで)

4. 研究成果の発表

4.1 成果の発表

<研究所出版物>

1. 東濃地震科学研究所報告、47, 地殻活動研究委員会報告、(令和3年度)

<出版物>

川崎一朗, 『立山の賦 地球科学から』, 桂書房, 富山県富山市, 2021.

<学会発表等>

1. 木股文昭, 森 濟, 村瀬雅之, 浅井康広 宮島力雄
500m 深立坑掘削に伴う周辺域の地下水位低下と沈降(2002-2021年)
日本測地学会 2021年度秋季講演会
2. 田中俊行, 水平重力計アレイ観測による瑞浪超深地層研究所用地に局在した地震地下水応答の検出, 日本地球惑星科学連合 2021年大会(オンライン, ポスター). SGD01-P01, 2021年5月.

<論文>

1. Tanaka, T., Hiramatsu, Y., Honda, R., Sawada, A., and Okada, S., Gravity gradient tensor analysis and its application to the Eastern Boundary Fault Zone of the Shonai Plain, Northeastern Japan, *Exploration Geophysics*, doi:10.1080/08123985.2021.1960815. 2021.
2. 石井 紘, 地震予知計画開始(1965年)以来の地殻変動連続観測の流れおよび著者等が関連した研究・成果の概要、測地学会誌、67、46-74、2021、doi.org/10.11366/sokuchi.67.46.
3. 浅井康広・石井 紘、東濃地震科学研究所近傍に存在する断層近辺で観測された地下水位・歪変化 - 揚水実験の場合 -, 地震、投稿中、2022.
4. 石井 紘・浅井康広、東濃地震科学研究所近傍に存在する断層近辺で観測された地下水位・歪・傾斜変化 - 立坑内湧水に対する排水・排水停止の場合 -, 地震、投稿中、2022.

<マスコミ>

木股文昭、共同通信配信(中部経済新聞 2021年12月6日朝刊、信濃毎日新聞 12月8日夕刊)「濃尾地震130年」

川崎一朗, 『大伴家持と「立山の賦」 地球科学で見た“都”中心史観』, 論座, 朝日新聞 <https://webronza.asahi.com/science/articles/2021120200001.html>, 2021.

<講演>

1. 木股文昭「火山噴火の防災と予知」2021年10月9日、岐阜県博物館企画展「今日から防災」

4.2 最新研究発表会

2022年1月13日 13:00-

- ・ 石井 紘 地下水の上下変動による歪・傾斜変動とNNW断層について - 揚水実験、立坑内の湧水、立坑埋め戻しの結果から -
- ・ 川崎 一朗 立山黒部マグマ溜まりと第四紀復元像
- ・ 佐野 修 歪計や応力計は何を測り 何が分かったか?

參考資料

参考資料

研究組織・各種委員会等名簿	41
---------------------	----

参考資料

研究組織・各種委員会等名簿

東 濃 地 震 科 学 研 究 所

研究員等名簿

令和 4 年 1 月 現在

副首席主任研究員	石井 紘	(所長・振興会理事)
副首席主任研究員	木股 文昭	
主任研究員	浅井 康広	
主任研究員	田中 俊行	
客員研究員	佐野 修	
客員研究員	川崎 一朗	
客員研究員	笠原 稔	
客員研究員	國友 孝弘	
客員研究員	石田 毅	
参事	可知 勝宏	
事務補助員	内山小百合	

東濃地震科学研究所運営委員会 委員等名簿

(任期：令和2年承諾日～令和4年3月31日)

(委員)

鵜川	元雄	日本大学 文理学部地球科学科 特任教授
小泉	尚嗣	公立大学法人滋賀県立大学 環境科学部環境生態学科 教授
小出	馨	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 核燃料・バックエンド研究開発部門 東濃地科学センター 副所長
佐々木	嘉三	国立大学法人岐阜大学 名誉教授
里村	幹夫	国立学校法人静岡大学 名誉教授 株式会社 日豊 技術顧問
能島	暢呂	国立大学法人東海国立大学機構岐阜大学 工学部社会基盤工学科 教授
長谷川	昭	国立大学法人東北大学 名誉教授
平原	和朗	国立大学法人京都大学 名誉教授 国立研究開発法人理化学研究所 革新知能統合研究センター 嘱託職員
村上	亮	国立大学法人北海道大学 名誉教授 国立大学法人北海道大学大学院理学研究院 附属地震火山研究観測センター 研究員
山岡	耕春	国立大学法人東海国立大学機構名古屋大学 大学院環境学研究科 附属地震火山研究センター 教授
山川	稔	元 財団法人地球科学技術総合推進機構 科学掘削推進部長

(オブザーバー)

岐阜	瑞浪市	清流の国推進部長	丸山 淳
		総務部長	正村 和英

(順不同、敬称略)

地殻活動研究委員会名簿

石原 靖	(国研)海洋研究開発機構 海域地震火山部門	専門部長
板場智史	(国研)産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門	主任研究員
今西祐一	(国大)東京大学 地震研究所 地球計測系研究部門	准教授
大塚成昭	(学)神戸学院大学	名誉教授
加納靖之	(国大)東京大学 地震研究所 地震予知研究センター	准教授
小泉尚嗣	(公大)滋賀県立大学 環境科学部 環境生態学科	教授
鷺谷 威	(国大)名古屋大学 減災連携研究センター	教授
佐々木嘉三	(国大)岐阜大学	名誉教授
高橋浩晃	(国大)北海道大学 大学院理学研究院附属 地震火山研究観測センター	教授
田部井隆雄	(国大)高知大学 教育研究部自然科学系理工学部門	教授
中尾 茂	(国大)鹿児島大学 大学院理工学研究科 地球環境科学専攻	教授
名和一成	(国研)産業技術総合研究所 地質調査総合センター 地質情報研究部門 地球物理研究グループ	研究グループ長
西村卓也	(国大)京都大学 防災研究所附属 地震予知研究センター	准教授
長谷川昭	(国大)東北大学	名誉教授
平原和朗	(国大)京都大学 (国研)理化学研究所 革新知能統合研究センター防災科学チーム 非常勤研究員)	名誉教授
本多 亮	神奈川県温泉地学研究所	主任研究員
三浦 哲	(国大)東北大学大学院理学研究科 地震・噴火予知研究観測センター	センター長
宮岡一樹	気象庁 地震火山部 地震予知情報課	評価解析官
向井厚志	福山市立大学 都市経営学部	教授
村上 亮	(国大)北海道大学 大学院理学研究院附属 地震火山研究観測センター	特任教授
山川 稔	元財団法人地球科学技術総合推進機構 科学掘削推進部長	
山中佳子	(国大)名古屋大学 大学院環境学研究科附属 地震火山研究センター	准教授
吉岡祥一	(国大)神戸大学 自然科学系先端融合研究環 都市安全研究センター	教授 副センター長
渡辺俊樹	(国大)名古屋大学 大学院環境学研究科附属 地震火山研究センター	教授 センター長

(敬称略)

※(国大)国立大学法人 (国研)国立研究開発法人 (公大)公立大学法人 (学)学校法人

令和3年度 東濃地震科学研究所事業概要

令和4年3月

Proceedings of the Tono Research Institute of Earthquake Science

— Summary —

March, 2022

公益財団法人 地震予知総合研究振興会

Association for the Development of Earthquake Prediction, Tokyo, Japan

連絡先

509-6132

岐阜県瑞浪市明世町山野内1-63

東濃地震科学研究所

所長 石井 紘

Correspondence Address

Director General Ph.D. Hiroshi ISHI

Tono Research Institute of Earthquake Science

1-63, Yamanouchi, Akiyo-cho, Mizunami, Gifu Pref., 509-6132, Japan

TEL : (+81)572-67-3105

FAX : (+81)572-67-3108

E-Mail : ishii@mail.tries.jp

印刷・製本 **株式会社 サン・ライン**

岐阜県瑞浪市土岐町1022の3

TEL 〈0572〉67-1171

FAX 〈0572〉68-3078