

東濃地震科学研究所25年のあゆみ

— 設立から終了まで —



令和4年3月（2022/3）

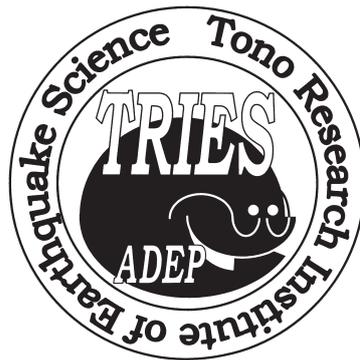
公益財団法人 地震予知総合研究振興会 東濃地震科学研究所



25 years progress from establishment to finish
Tono Research Institute of Earthquake Science (TRIES)
Association for the Development of Earthquake Prediction (ADEP)

東濃地震科学研究所25年のあゆみ

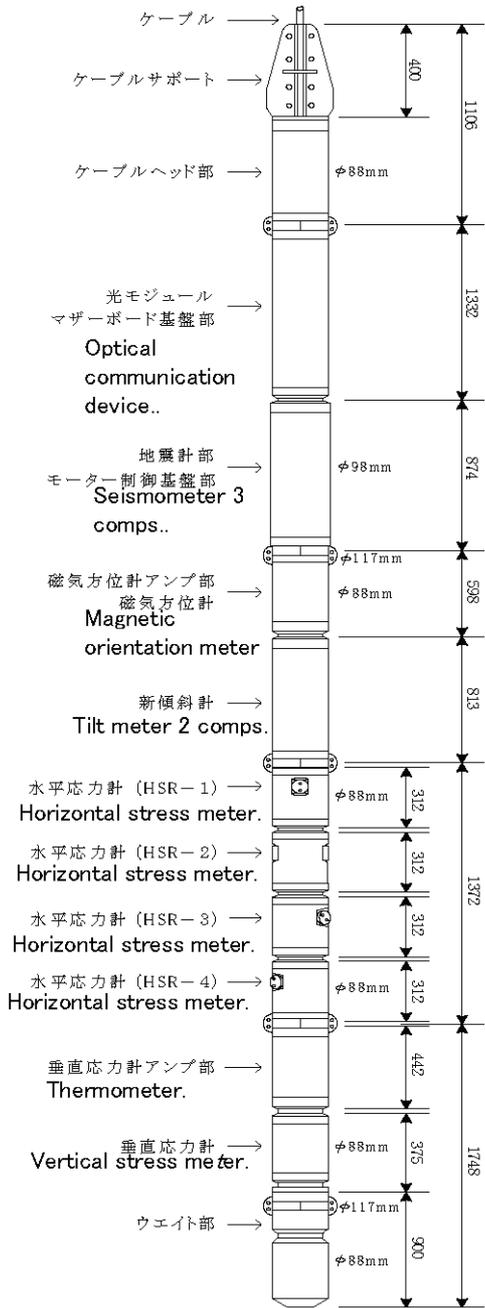
— 設立から終了まで —



令和4年3月（2022/3）

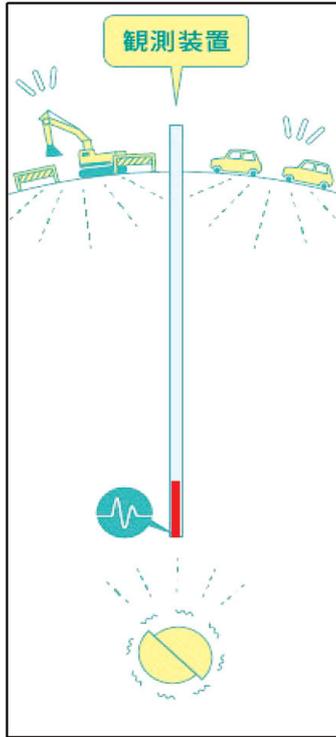
公益財団法人 地震予知総合研究振興会 東濃地震科学研究所

開発したボアホール地殻活動総合観測装置 設置風景・観測された応力地震波動の例



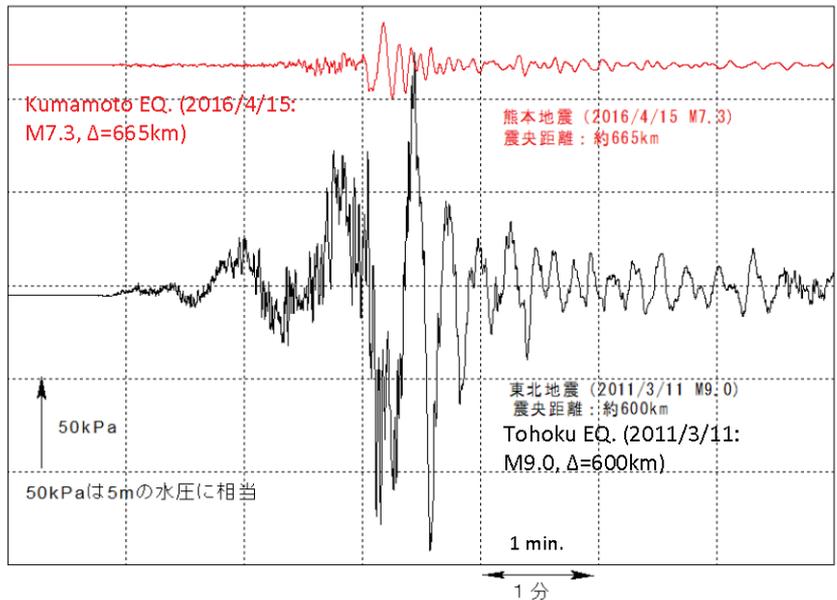
当研究所で開発したボアホール地殻活動総合観測装置 (TOS観測点に設置)

Multi-component borehole instrument developed by TRIES



Installation of the instrument

応力地震動記録の例 (東濃地震科学研究所: TOS観測点、深度512m)



Examples of stress seismogram (TOS station: depth 512m)

製作した総合観測装置の実物大模型

日本地球惑星連合2015年大会 東濃地震科学研究所 展示ブース 写真



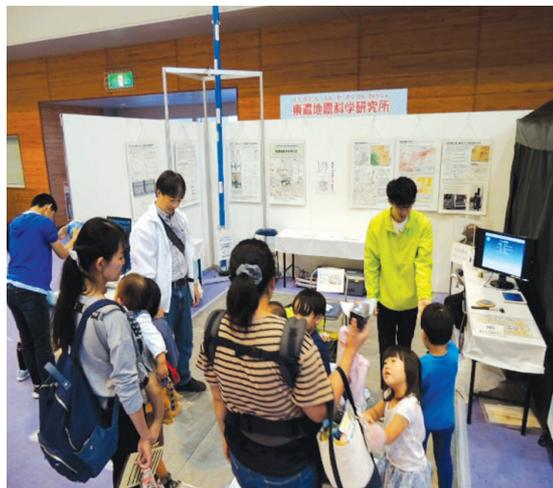
日本地球惑星連合大会が2015年5月24日から28日まで幕張メッセにて開催された。東濃地震科学研究所は24日から27日午前まで展示を行った。
展示場所 ブース番号61

東濃地震科学研究所の出展内容

研究内容の紹介(ポスター)

開発した計器の紹介

- 実物大のポアホール総合観測装置の模型展示(全長 約 8m)
- デモ用歪計の展示: 岩石に歪計を埋設設置したモデルで実際に操作してもらい計器の高感度を体験してもらう。
- 応力計の展示
- 総合観測装置の内部がわかる部品の展示
- 深部ポアホールへの総合観測装置設置のビデオ放映
- 東濃地震科学研究所のデータベースのオンライン閲覧
- 地下深部から地上への観測データの光ケーブルによる伝送システムの展示

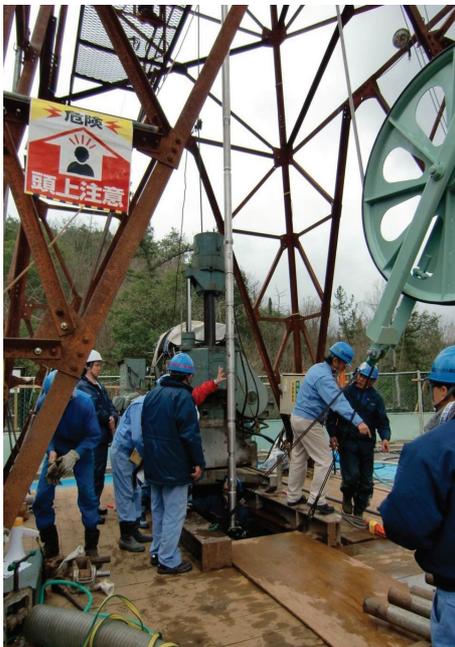


おもしろ科学館 in 瑞浪 2019/10/26-27



「地震による人間被害と健康被害に関する瑞浪国際シンポジウム」参加者の集合写真:2010/11/15 - 16 地域交流センター「ときわ」

2017/7/31 IASPEI 国際会議におけるブース展示



ボアホール総合観測装置の埋設・設置作業とメンバーの集合写真



立坑周辺の水準測量



中間評価委員会

目 次

1. まえがき	1
2. 設立に至る経緯	1
3. 研究体制	1
4. 研究目的	2
5. 研究施設の概要	2
6. ボアホール観測計器の開発・改良	3
6.1 概要	3
6.2 歪計・応力計に関する論文	4
7. 設立以来の研究状況の経過概要	5
8. 研究所の外部評価	6
8.1 外部評価実施期日	6
8.2 過去3回の総合評価意見	6
9. 特許等	11
10. 学位論文の取得	12
11. 研究内容の概要抜粋	12
11.1 深地層・地下空間における観測機器・技術の開発および地下水流動研究	12
11.2 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	19
11.3 地域の地震防災に貢献する調査研究	29
12. 補助事業による成果（原子力発電所、地震予知、地域の地震防災 関連のみ）	35
12.1 地震予知研究への貢献および将来の南海地震など	35
12.2 高レベル放射性廃棄物処分に重要な地下水流動に関する新しい解明	35
12.3 活断層などの活動時期、切迫性などの推定と原子力発電所	35
12.4 地域への防災関連知識の向上	35
12.5 地域へ防災関連情報提供	35
13. 研究成果リスト	35
14. 研究結果の抜粋	53
15. トピック	86
15.1 立坑の掘削と埋め立てにおける変動	86
15.1.1 深さ500mの立坑掘削に伴い観測した地盤上下変動と地下水位変動(2002–2021)	86
15.1.2 立坑の埋め戻しによる深部ボアホールで観測された応力・歪・水位・水圧変動	97
15.2 地震予知計画開始（1965）以来の深部ボアホール観測を含む地殻変動連続観測の流れ および当研究所が関連した研究・成果の概要（総合報告：測地学会誌掲載）	99
15.3 研究所における研究から得られた将来の地震予知研究に関する私見	129
16. 資料	131
16.1 東濃地震科学研究所発足の頃 初代研究所長 青木治三	132
16.2 十字アレー地殻活動総合観測網 観測点リスト	134
16.3 定林寺ボアホール観測点：ボアホール構造と総合観測装置	135
16.4 陶史の森ボアホール観測点：ボアホール構造と総合観測装置	136
16.5 歴代運営委員会委員	137
16.6 歴代中間評価委員会委員	138
16.7 職員履歴	139
16.8 研究所パンフレット	140
16.9 東濃地震科学研究所のボアホール観測網	152

§1. まえがき

当研究所は1997年4月に設立され現在まで20年以上経過している。当初、研究所は瑞浪市の施設を間借りし、研究員2名と事務員2名で出発した。当研究所の目的である日本原子力研究開発機構の立坑を利用した研究、地下水流動研究、内陸地震および活断層地域における地震発生機構及び関連現象の総合的研究、および地域の地震防災に貢献する研究などを遂行するためにその後、研究員、契約研究員などを採用した。また、少ない人数でも最大の成果を上げるために全国の研究者との交流および研究推進のために地殻活動に関する委員会、地震防災に関する委員会を立ち上げ毎年2回委員会を開催するとともに成果を印刷した。また、現在まで外部有識者による外部評価は5回行われており、それによる意見も考慮して研究所の運営を進めてきた。外部評価の内容は中間評価報告書として印刷されている。全国の研究者の応援などもあり、それなりの成果も蓄積されて来た。世界的に見ても他では行われていない研究・開発の成果も得ることが出来た。

20年経過した時点で研究所の設立以来の経過や成果の概略などをまとめて「東濃地震科学研究所20年のあゆみ」を出版した。その後、日本原子力研究開発機構は研究を終了し立坑が埋め戻されることになった。それに伴い深地層研究施設を活用し研究を進める当研究所の研究も終了することになり2022年度で研究所は閉じることになった。それに伴い創立以来25年の経過及び成果をまとめることとした。

§2. 研究所の設立から終了に至る経緯

(独立行政法人、その後、国立研究開発法人)日本原子力研究開発機構(この後、JAEA)は岐阜県瑞浪市(結晶質岩)及び北海道幌延町(堆積岩)において、高レベル放射性廃棄物の地層処分にに関する研究の目的で「深地層研究施設」の建設を進めた。このうち、瑞浪市の深地層研究施設については、動力炉・核燃料開発事業団(現在のJAEA)が平成7年8月に深地層の調査研究計画を公表して以降、地元からの要望として、深地層研究施設を活用した研究を行う地震研究所の設置及び同所における地震研究の推進が提案された。平成8年8月、地元の意を受けた科学技術庁(当時)から、(財団法人、その後、公益財団法人)地震予知総合研究振興会に、岐阜県東濃地域における地震研究所の設立等について要請があり、同年12月、深地層研究施設整備促進補助金制度が制定された。これに基づき地震予知総合研究振興会から補助金申請書を科学技術庁に提出して承認を受け、平成9年4月に東濃地震科学研究所が開設され、同研究所における研究に対し、本補助金による補助がなされることとなった。それにより東濃地震科学研究所はJAEAの深地層研究施設を活用しながら、ボアホール観測機器開発などを推進し、観測結果などにより内陸地震やプレート境界地震の発生機構に関する研究及び地元の要望である地域の地震防災に貢献してきた。

その後、JAEAは研究を終了し立坑が埋め戻されることになった。それに伴い深地層研究施設を活用した当研究所の研究も終了することになり、25年間にわたる活動も2021年度で閉じることになった。

§3. 研究体制

研究所は(公益財団法人)地震予知総合研究振興会に属しており研究部門と支援部門からなっている。研究部門は常勤の研究員と客員研究員から構成されている。

このほかに研究所の運営を進めるために運営委員会があり外部有識者から構成されており年に1回か2回委員会が開かれる。研究の面においては「地殻活動研究委員会」と「地域地震防災基準に関する基本問題研究委員会」があり、それぞれ全国の大学や研究所などの20名以上の研究者から構成されている。新しい研究分野の開拓や情報交換のために年2回程度開催され研究発表が行われ、成果は東濃地震科学研究所報告に印刷されている。

§ 4. 研究目的

東濃地震科学研究所の目的は、JAEAの深地層研究施設を活用しながら、内陸地震やプレート境界地震の発生機構に関する研究及びそれに伴う観測、機器開発などを推進し、地元の要望である地域の地震防災に貢献することである。これによって深地層研究に対する地元の理解を深め、深地層研究施設整備の促進を図るものである。

当初の事業計画は

- (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) 深地層における地震発生関連現象の総合的研究
- (3) 活断層地域における内陸地震の発生機構に関する研究
- (4) 地域の地震防災に貢献する調査研究
の4本で進め、の柱からなる。その後平成29年度からは研究を効率的に行うため
- (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
- (3) 地域の地震防災に貢献する調査研究
の3本の柱に集約した。

§ 5. 研究施設の概要

1997年4月の研究所発足当時は観測点も観測施設もなかった。研究目的を達成するために観測点を徐々に建設した。地盤振動を調べるための観測点と地殻活動を調べるための深部ボアホールによる観測点の2種類の観測点を建設した。

瑞浪市及び周辺の地盤の振動を調べるために地震観測点を建設した。約4m深度のボアホールを掘削し地震計をボアホール底に設置した。当初は太陽電池で電源を供給しデータ・ロガーにデータを取り込んだ。その後電話回線やインターネットを利用し研究所にデータを集中するようになった。

地殻活動を調べるための深部ボアホールによる観測点はJAEAの立坑を中心にして10km四方の領域の中に十字アレイのボアホール観測点を建設する計画を作成し、実行した。設置した計器は主にボアホール地殻活動総合観測装置とし平面的な分布のみならず深さ方向にも変化をもたせ大規模な地殻活動とローカルな地殻活動を調べることを目的とした。地上における観測では人工的なノイズや気象のノイズにより高精度の観測ができないので地下深部に設置可能なボアホール地殻活動総合観測装置を開発した。当初は1台で歪計3成分、傾斜計2成分、地震計3成分、磁力計3成分、高感度温度計を搭載し総合的なデータを得るものであった。その後、応力計を開発しさらに性能を向上させた。ボアホール地殻活動総合観測装置は深いボアホールを掘削し孔底に膨張性のセメントで岩盤と固める。ボアホール掘削に要する経費は高額である。したがって1台の計器で多種類多成分の測定ができればチャンネル当たりの経費は安くなる。毎回、総合観測装置を設置する機会には改良を加えてよりよい計器にすることをを行った。

§ 6. ボアホール観測計器の開発・改良

6.1 概要

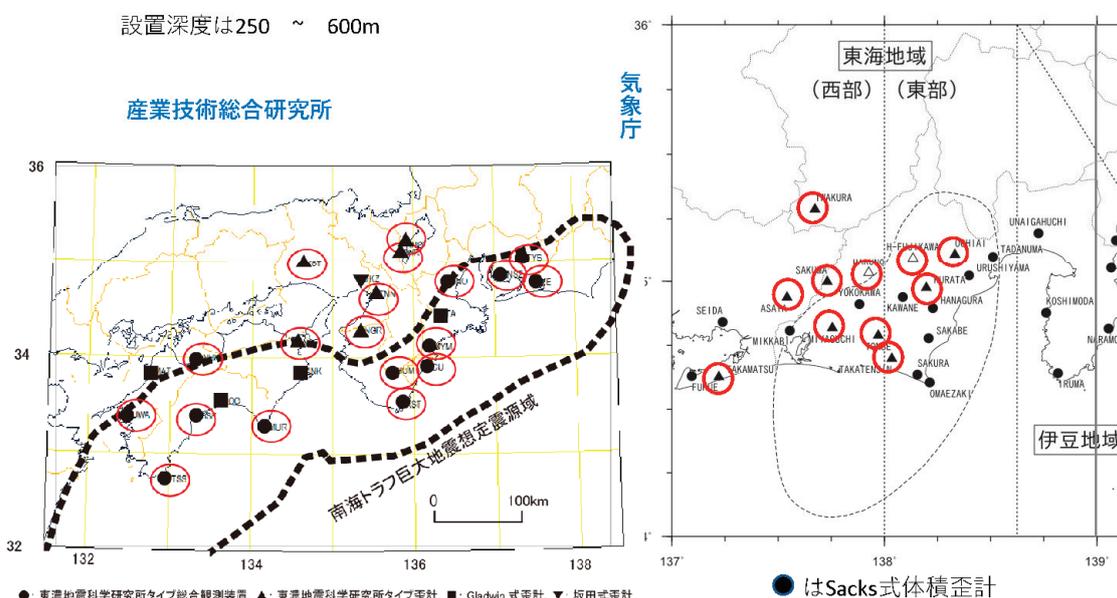
地震や地震予知の研究を進めるには地震に関連した微小な信号を正確に観測することが最も重要である。我々の身近における経験でも物が壊れるときは突然壊れるのではなく何らかの前兆現象があるのを経験している。地震は岩盤に作用した応力により生じた歪の蓄積による岩盤の破壊である。しかしながら地震は地下深部で発生する。地上における観測では地下深部から伝わる地震に関連した信号は減衰する上に人工的なノイズにより乱され微小な信号の観測を困難にする。地震に関連した信号を確実に観測することが地震学および地震予知研究に寄与すると考えている。このためには地下深部において各種の地球物理学的情報を観測する計器を開発することを進めた。地震に関連した信号を観測するには地表よりも地下深部で観測の方が人工的なノイズや気象によるノイズの影響が小さく微小な信号を観測することができる。

特に岩盤の変形・傾斜を観測するための計器の開発を進めた。当研究所に隣接する原子力研究開発機構の立坑（深度 500m）は地下に入坑することが可能であり、地下深部で観測可能なボアホール計器を開発するには良い条件であった。この施設も利用し当研究所では地下深部において 1 台の計器で複数の物理量の観測が可能な計器（ボアホール地殻活動総合観測装置）の開発を進めた [Ishii et. al. (2002)]。この計器は 1 台で歪計 3 成分、傾斜計 2 成分、地震計 3 成分、磁力計 3 成分、高感度温度計を搭載している。地下深部で観測するには深部ボアホールを掘削し計器を設置するがボアホール掘削には経費が掛かるため 1 台の計器で多種類多成分の観測をすることが費用対効果を上げることになる。

気象庁や産業技術総合研究所（産総研）によりボアホール地殻活動総合観測装置は採用されて東海地方・紀伊半島・四国などに設置され、将来の東海・東南海・南海地震に関するデータを蓄積している。図は気象庁と産総研が当研究所で開発したタイプの観測装置を設置している観測点分布で現在約 30 観測点がある。観測された成果は、気象庁における南海トラフ地域のプレート間固着状態の変化を検出するため 24 時間監視対象データとして活用されている。また、学会等での発表に加えて地震予知連絡会等に毎回報告され、将来の地震発生の検討に重要な貢献をしている。

次に開発したのはボアホール応力計である。媒質に作用する応力により歪変化が生ずるが、その値は媒質の弾性定数により異なる。従って歪の観測よりも応力の観測の方が本質的である。また、佐藤・他（1989）によると地震の発生を考える場合には媒質に応力が蓄積され断層（割れ目）の剪断すべりにより応力が解放されるという過程を考察するのが物理的な思考であり応力が最終的に必要な観測量と述べている。そこで、応力観測の必要性を考慮し更に新しく応力の連続観測が可能な計器を開発した[Ishii and Asai (2015)]。この応力計は応力のみではなく歪も観測可能である。この開発により、その後のボアホール地殻活動総合観測装置は1台に応力計6成分、歪計6成分、傾斜計2成分、地震計3成分、磁力計3成分、高感度温度計などを搭載できることになり、それらの任意の組み合わせも可能になった。

東濃地震科学研究所タイプの総合観測装置あるいは歪計が設置されている観測点（赤丸）：30カ所



良好な深部ボアホール観測を成功させるには計器本体の開発のみでなく孔底から地上へのデータ伝送方式の開発や岩盤と計器を固めるのに岩盤の亀裂や水みちのない位置に設置する方法の確立が必要であるがそれらについても方式・方法を確立し特許等を取得している。

6.2 歪計・応力計に関する論文

ボアホール地殻活動総合観測装置を開発し、1台で応力計、歪計、傾斜計、地震計、磁力計、高感度温度計などを搭載して総合観測を可能にしている。この中で当研究所が開発したのは応力計、歪計、傾斜計であり他は市販の計器である。ここでは歪計・応力計に関する論文をまとめた。1. は歪計と傾斜計の開発を述べている。歪計は円筒の変形をメカニカルな拡大システムで拡大し、磁気センサーで電圧に変換する新しい方式を開発したものである。傾斜計は恒弾性材質のバネを2枚使用しており、ダンパーにはオイルなどを使用せず電氣的に制動をかける方式を開発したものである。オイルを使用していないので従来の傾斜計では大きな地震などがあつたときに観測できなくなるがこの傾斜計では傾斜ステップを正確に記録できる。2. はボアホールタイプの応力計の開

発を述べている。連続観測可能な応力計はいままで開発されておらず今回初めての計器である。この計器で東北地震 (M_w 9.0) もスケールアウトせずに応力波形を記録することができた。3. は東北地震の時に汎用の気圧計にも気圧地震波を記録でき応力地震波形との特徴を述べている。また、地面の上下変動を微分すると観測した気圧変動になり、観測した気圧変動を積分すると観測した上下変動になることを示した。4. は観測した応力計が信頼できる観測をしていることを弾性体力学の不変量を用いて証明した。5. は長周期地震計と応力計で観測された地震波形の特徴を比較議論した。また、応力計は長周期地震計よりダイナミックレンジがかなり広いことも示し、今後発生する大きな地震もスケールアウトすることなく記録できることを示した。6. は応力計の特徴をまとめた。とくに歪観測と異なり応力計による応力値は弾性定数に無関係に求まることを示した。

1. Ishii H, Yamauchi T, Matsumoto S, Hirata Y, Nakao S, 2002, Development of multi-component borehole instrument for earthquake prediction study: some observed example of precursory and co-seismic phenomena relating to earthquake swarms and application of the instrument for rock mechanics. *Seismogenic Process Monitoring*, Balkema, The Netherlands, 365–377.
2. Ishii, H. and Y. Asai, 2015, Development of a borehole stress meter for studying earthquake predictions and rock mechanics, and stress seismograms of the 2011 Tohoku earthquake ($M9.0$), *Earth, Planets and Space* 67:26. doi:10.1186/s40623-015-0197-z.
3. Ishii, H. and Y. Asai, 2016, Characteristics of the stress and barometric seismograms produced by the 2011 Tohoku Earthquake ($M9.0$) and vertical movements derived from barometric seismograms, *Earth Planets and Space* 68: 61, doi:10.1186/s40623-016-0434-0.
4. 石井 紘・浅井康広, 2017, ボアホール歪・応力観測計器により観測された弾性体力学の不変量と計器の信頼性, *地震* 2, 69, 49–58. doi:10.4294/zisin.69.49.
5. 石井 紘・浅井康広・古本宗充, 2019, 連続観測用ボアホール応力計で観測される応力・歪の観測レンジは如何に広いのか? —長周期地震計の波形およびGNSSデータとの比較から得られた観測データの特徴, *地震* 2, 71, 139–149. doi:10.4294/zisin.2018-3.
6. 石井 紘・浅井康広, 2019, 連続観測用ボアホール応力計の特徴に関するまとめと考察——応力と歪を観測・応力は岩盤の弾性定数に無関係・二次元不変量と鉛直成分の相似・分解能とダイナミックレンジ——*地震* 2, 72, 43–51. doi:10.4294/zisin.2018-9.
7. 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.

§ 7. 設立以来の研究状況の経過概要

平成9年度に発足した第1次5ヵ年計画 (平成9～13年度) においては、東濃地域における観測研究の立上と地震観測点等の整備が中心であり、データの収集および活断層地域の深部構造調査等により、東濃地域の地殻活動のおよその様相を把握した。続く第2次5ヵ年計画 (平成14～18年度) では、地殻活動総合観測点の整備が強化され、その高性能な観測機能が国内外の大地震の観測で検証された。また、地震動と地下水変動の関係、地下水位変動と地殻歪の関係などでも大きな成果が得られた。特に、地殻活動総合観測点の整備に関しては観測機器開発の成果として、平成17年度の外部評価委員会で高く評価され地震防災についても地域の防災に資するユニークな研究とし

て高い評価を得ている。

第3次5カ年計画（平成19～23年度）においては、当研究所において開発された地殻活動総合観測装置が産総研や気象庁により採用され、将来発生が予想される南海地震、東南海地震や東海地震のための観測に利用されている。現在、その地殻活動総合観測装置は更に改良され、機能は一層向上したものとなっている。また、本質的な観測である応力の観測が可能な応力計を開発し、4カ所の深部ボアホールに設置し、興味あるデータを蓄積している。平成20年度の第2回外部評価委員会では、「さまざまな研究がおこなわれているにもかかわらず科学的・技術的価値が高く、人材確保等が困難な状況にもかかわらず十分な成果を上げている。」との評価を受け、平成23年度の第3回外部評価委員会においては、「研究内容は地震の現象理解にとって重要なものであり、極めて有用かつ重要な研究事業であるといえる。」との評価も受けている。

第4次5カ年計画（平成24～28年度）においては、ボアホール観測点の増設と、機器の更なる開発に重点を置き、第3次計画の継続進展と平成23年度および平成26年度に実施された「中間評価委員会」の評価結果を考慮しながら、計画を進めた。平成26年度の外部評価では「デジタル式地殻活動総合観測システムや応力計は世界最高水準であり、このシステムをボアホールの異なる深さに複数設置し、高品質の観測データを長期にわたり取得していることは地球物理学の研究発展に大きく貢献している」との評価を受けた。

また、研究に対する状況変化については、立坑の掘削に伴って発生した大量の地下水（湧水）の処理およびその地下水の水質改善設備の建設に伴い、立坑掘削の工事が大幅に遅れた。しかしながら、湧水とその排水に伴う変動は、当研究所の複数のボアホール総合観測において大きな変動として観測している。これ等のデータは間隙弾性体の研究や地下水の振る舞いに関する有益な情報を提供している。その後、再冠水試験が実施され新たな地下水流動研究を進めることとなった。

第5次5カ年計画（平成29～33年度）については、第4次計画の継続進展と、これまでの評価委員会による事業評価を尊重し、課題解決を図るとともに、従来の4本柱からなる事業計画のうち、「活断層地域における内陸地震の発生機構に関する研究」と「深地層における地震発生関連現象の総合的研究」の2本の柱を、「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1つにまとめ、3本の柱で一層効率よく研究を進めこととした。

§ 8. 研究所の外部評価

8.1 外部評価実施期日

外部の有識者による研究所に対する評価は5回実施されている。その結果は中間評価報告書として印刷されている。以下には印刷された年月と評価した期間を示している。

- 第1回： H18.3 (H9 - H16)
- 第2回： H21.3 (H17 - H19)
- 第3回： H24.3 (H20 - H22)
- 第4回： H27.3 (H23 - H25)
- 第5回： H30.3 (H26 - H28)

8.2 過去3回の総合評価意見

外部の有識者による評価は総合評価、テーマごとの評価、提言など述べられているがここでは過去3回（H24, H27, H30）の総合評価のみを記述する。

8.2.1 事業に関する総合評価(H24)

【肯定的意見】

- 事業は国の施策として行うべきものであり、当該施設における新技術・研究等は初期の目的を充分達成している。
- 東濃地域での深地層高密度地殻活動総合観測は、国の施策として進められ、結果として、ここまでの展開と成果が得られたといえる。それを実現したスタッフの努力にも敬意を表したい。もうひとつの中山間地域における地震防災の取り組みも、都市型地震防災が脚光を浴びる中で、日本の現実として、中山間地域の重要性を意識している上で、優れた視点であり、その成果も優れている。
- すべての研究が研究者の赴くままとなるものでない。課題が限定されている中で研究課題は十分に存在する。この意味で、深地層研究施設を利用した本事業は、やるべき課題と同時に、本施設ゆえの観測研究体制の確立を目指し、確実に成果を得ていると評価する。そして、地域発ながらも世界に発信できる内容を着実に育てていると考える。
- 地震予知に関係した基礎研究は、どうしても長期間に亘る観測データを蓄積し、それらを分析することによって物理的なパラメータ相互の因果関係を検出することが基本である故、時には研究の軌道修正も必要であるが、それ以前に観測業務の長期間継続といった地道な努力が必要であると考えられる。それには国の機関による長期間安定したサポートが必要不可欠になるものと思われる。
- 瑞浪深地層研究施設を活用しての各種観測・研究事業は、特殊な施設を利用することにより得られるデータのため、地震防災対策上非常に重要な事業であると認識している。また、研究成果を基にした地域防災の貢献も高い評価となっており、今後もより一層地域住民のために努めていただきたい。瑞浪深地層研究施設は、高レベル放射性廃棄物を安全に地層処分するための研究施設で大変重要な施設であり、東濃地震科学研究所が行なっている「深地層研究施設整備促進補助事業」は、地元住民の信頼維持のため欠くことのできない重要な事業である。
- 高精度地殻変動観測装置の開発に関する研究、内陸地震に関する研究等、この施設でなければできない研究がなされているだけでなく、その研究内容も地震の現象理解にとって重要なものであり、極めて有用かつ重要な研究事業であるといえる。そのような重要な事業が、ほぼ計画どおりに推進されていることは、大いに評価できる。また、研究所のある地域の地震防災への貢献にも配慮されており、アウトリーチ活動も大いに評価できる。

【問題点・改善すべき点】

- 事業目的には「地元理解」があげられているが、成果が見えにくい。地元メディアを利用するなど積極的に地元への理解を深めるべきである。
- 多くの解明すべき問題があるので、プロジェクトが多岐にわたらざるを得ない点はあるが、少ないスタッフながら、プロジェクト間のコラボレーションがさらにもっと良いように感じた。プロジェクトの総括的考察も期待したい。
- これまでの努力から、深地層の振る舞いとして非常に内容豊かなデータが蓄積されつつある。しかしながら、人材が徹底的に不足することから、内容豊かなデータにもとづく研究が十分に進展しているわけでない。そのためには、二つのことが求められる。一つは人員の増加である。とにかく研究面で中心的な人材を確保す

ることが必要である。その上で、第二として、国内や海外の研究者との共同研究の発展である。データ提供だけでなく、観測を含めた共同研究が成熟できるように、それなりの資金を用意すべきである。地域に依拠しながら、世界にアピールすることだと考える。

- 研究事業の一層の推進には、研究にかかわる人員の増強が必要であろう。事業の長期的な計画の中で人員構成について計画を策定してほしい。研究プロジェクト間の連携が進むと、本事業の意義が一層高まると思われるので、今後の計画の策定に際して、研究プロジェクトの連携を視野に入れて頂きたい。また、本事業の研究成果をより有意義にするため、可能であれば全国の研究者と連携して研究を推進し、日本の地震科学全体に貢献することも視野に入れた事業の拡大も望まれる。

8.2.2 事業に関する総合評価(H27)

【肯定的意見】

- 事業設立の意義や研究施設の立地を背景として、その特徴を活かした最大限の活用を目指そうとする事業計画であり、着実に研究体制が確立されてきた。これを基盤として、さらにユニークな研究成果が期待される。
- 地道な観測や関連機関との連携により、限られた研究員数ながら想定以上の成果が得られている。データもオープンにするなど、外部との研究協力体制は良く機能していると思うが、更なる大学・研究機関との連携により資金、員数の支援が必要である。
- 地元住民に対する説明、啓発などは学校訪問や地域のイベントを利用して随時行われており、理解を得るための努力が成されている。
- 本事業は(1) 深地層研究施設を活用した内陸地震の研究と、(2) 東濃における地域地震防災の研究の二本立てであり、どちらも広範囲の研究領域にわたる研究事業である。(1) では深部基盤からの強震動の増幅のメカニズムや地震発生による様々な物理量の変化などをとらえることに主眼を置いており、今後の研究成果が期待される。
- 地下深部空間を利用した応力など地殻活動や地震動観測は貴重であり、観測計器の開発も含めて今後も継続して進めて欲しい。
- 東濃地震科学研究所(TRIES)で開発・改良を続けているデジタル式地殻活動総合観測システムや応力計は、世界最高水準の装置である。このシステムをボアホール異なる深さに複数設置して、高品質の観測データを長期にわたって取得していることは地球内部物理学の研究発展に大きく貢献している。
- 深地層研究所施設を活用した技術の開発研究等は、地震発生関連現象を高精度で観測研究ができ、確実に成果を得ていると評価する。
- 石井所長を中心に開発を進めてきた深部ボアホール総合観測計器は、気象庁や産業総合技術研究所、大学等において地殻活動観測に広く活用され、南海トラフ沿い巨大地震の予知のための監視にも用いられて、多大な成果をあげている。
- 若い有能な研究者が採用されて、研究陣も大いに充実したと見受ける。保有している観測機器や設備を生かして適切な研究課題を設定した上で研究を進めれば、科学的に第一級の研究成果を上げることも十分に期待できる。

【問題点・改善すべき点】

- 観測施設は、そのユニーク性故に極めて貴重なデータが得られつつある。これらを

基に、地殻活動に対する普遍的な課題に何処まで迫れるかを意識して取り組んでいただきたい。

- 問題点の多くは、限られた人数と資金によるところが大きい。現在の限られた体制にもかかわらず期待される以上の成果を生み出しているとは思いますが、この先の発展には更なる人的支援により時間的な余裕を確保することと資金面での援助が必要となる。それが叶えられれば、極めて大きな効果や事業化への発展を見込むことが出来よう。
- しかしながら、ここ数年、毎年資金が減少している現実からして、研究テーマの本目の細かな検討に基づく重点化を行い、焦点を絞ることも肝要となるであろう。
- 本来の目標の一つである地域の地震防災に資するには、更なるデータの蓄積と研究が必要である。また、それを普及するための方法についても追求していただきたい。
- 国の原子力行政や地震発生状況に応じて、研究者の意識も変わってくると思うので、これまでの研究を活かしてより発展的に軌道修正出来るような体制があってしかなるべきである。現状に硬直せず、フレキシブルに対応することが求められる。外部からの意見を取り入れることも効果的なので、より外部の研究者と連携した研究を推進することが望まれる。
- 東濃における地域地震防災の研究では主に表層地盤の特性によるゆれやすさの広域分布の解明を主たる目的とした事業であるが、地域の防災・減災に直結した実用的な成果を得るには別の観点からの検討が必要であると思われる。当該地震での強震記録データベースが作成されており、これらの活用が期待される。
- 観測中心の事業計画になっているので致し方のない面はあるかもしれないが、研究成果に観測事実や一次解析結果の羅列が目立ち、研究開発の目標とその達成への手順がかならずしも明確でない印象を受けるのが残念である。
- 「2. 目標」の H17～H25 第 4 次中間時の「目標・指標」には「内陸地震の研究」と書かれているが、評価時点の「目標・指標」では「プレート境界地震活動の観測」となっている。そして、「設定理由・根拠等」には「東濃は海陸プレート相互作用の場」と書かれているが、通常プレート境界地震という用語は、M9 前後の海溝型巨大地震を指すので、もう少し丁寧な説明が必要であろう。
- 研究委員会では外部の研究者による研究紹介も行われているが、その内容は研究所での課題研究の推進に必ずしも直結していないものもあるように思われる。毎回とまでは言わないまでも、時折、テーマを絞りながら、地域の一般の人たちも参加できるような形で研究発表会を開くことも、研究所の存在意義や研究へのモチベーションを高めることにつながるのではなかろうか。

8.2.3 事業に関する総合評価 (H30)

【肯定的意見】

- 構成人員が非常に限られていながら、多くの課題に取組み、それぞれの課題で想定以上の成果が得られており、目標とする水準には達している。その成果の一つとして、ボアホール総合観測システムはすでに実用化され、気象庁、産総研、大学等との連携のもと各地で実践に供され他の観測では得られない貴重なデータが蓄積されている。これは特殊な環境を意識して研究テーマを設定し挑戦してきた結果であり、事業として高く評価できる。研究成果は随時地元住民にも公表・説明しており、地

域の理解を得るための努力がなされていて、地域の地震防災にも貢献している。

- 東濃地震科学研究所(TRIES)の石井 紘所長らが開発したデジタル式地殻活動総合観測システムや最近新たな改良が進んだ応力計は、地下深部空間を活用して、地震前後の地殻変動をこれまでに例のない高い精度で地下深部に向けて微細に明らかにできると期待される。
- 限られた空間スペースで観測可能な歪計、応力計を開発し、それらを深地層に設置して、例えば、大規模地震によって生じた変動を高ダイナミックレンジで記録できることを示したり、鉱山再冠水に伴う地下水変化に関連した歪変化を観測したりするなど、興味深い新たな知見が得られている。地下水、地殻変動、重力変化、地震防災に関するアウトリーチ活動など、多岐にわたる調査研究課題を少ない人員でよく遂行している。
- 日本において他に類を見ない深層立坑を十分に活用して意義の深い成果を挙げており、高く評価できる。とりわけ、少ない研究者数で活発に研究活動が行われていることは賞賛に値する。また、アウトリーチ活動も大変活発に実施されていることは特筆に値する。
- 地下深部空間等を活用する技術開発、観測研究などの目標に対しての取り組みが、適切に示され、実施されている。また、その成果が広く報告され、新たな研究にもつながっている。

【問題点・改善すべき点】

- 研究者の数が少ないので、研究会や委員会をとおして、各研究機関や大学と連携して研究協力体制を築いているところであるが、観測体制を維持することが難しくなってきたことは否めない。特に、若い研究者が専属で従事する環境を整えることは逼迫した課題である。そのためにはユニークな研究の成果を示すことで研究所の魅力アピールしていくこと、および将来性のある研究計画を示し続けることが必然となる。
- 地震に関連した地殻変動と地下水変動の相互作用に関する研究は、地球物理学の第一級の1研究テーマであるが、TRIES はそれらの研究にとって絶好のフィールドであると言える。TRIES の研究者を中心として、過去3年間に地殻変動と地下水変動に関する多くの研究成果が公表されているがそれらの相互作用を深く論じた論文はまだ少ないように思われる。
- いろいろなイベント時における地下水位変動は興味深いものがあるが、地下水流動に関して、統一した明確な解釈は、まだなされていないように見受けられる。それが難しい問題であることはわかるが、地下水が面的にどのような形態で分布し、地下水の流れはどうなっているかについて、現時点での観測結果を総合的な視点で整理されてみられたらどうだろうか。どのような知見が、まだ欠けているか、どのような観測をしたら、必要で重要な知見が得られる可能性があるか、みえてくるかもしれない。
- 本研究の目的の一つである「地域の地震防災に資する」には、地域特有のハード、ソフト両面の防災力を明確に分析する必要がある。限られた研究者に加えて、外部の有識者等の活用・協力を得る努力も必要かと思われる。

- 研究者数に比して実施している研究課題がやや多すぎるように思われる。常勤研究員 6 名＋非常勤12名の計18名で研究実施数が54項目数えられる。一人平均3項目で、それほど多くはないようにも見えるが、非常勤研究員は多くの研究課題はこなせないであろうから、常勤研究員の負担は多いと考えられる。その結果として研究成果を深く追求していくという姿勢にやや欠けるように見受けられる。課題を特に重要かつ興味深いテーマに絞って、深く追求していく姿勢をより強く打ち出すほうがよいように思われる。
- 研究の性質上、また、予算の都合上、数値目標やスケジュール目標を立てにくいものと思うが、そのような目標設定も必要ではないか。

§9. 特許

- 発明の名称：ボーリング孔における観測装置の設置深度測定方法
特許第 4343643 号
登録日 平成 21 年 7 月 21 日
発明者 石井 紘、山内常生、松本滋夫
- 発明の名称：応力および歪み検出装置 H24 報告書
特許第 4976534 号
登録日 平成 24 年 4 月 20 日
発明者 石井 紘、 浅井康広、 菅谷日出夫
- 発明の名称：深度測定システム及び深度測定方法 H25 報告書
特許第 5283144 号
登録日 平成 25 年 6 月 7 日
発明者 石井 紘、 浅井康広、 菅谷日出夫、 板場智史、
村瀬昭彦、 新井栄作
- US 特許
Date of Patent: May 12, 2015
The title: "Stress and Strain Sensing Device"
Patent No.: US9,027,411 B2
Inventors ; Hiroshi Ishii; Yasuhiro Asai; Hideo Sugaya
- 中国 特許
発行日：2016/6/31
発明の名称：応力および歪み検出装置
番号 ZL 2012 8 0001105.8
発明人：石井 紘、 浅井康広、 菅谷日出夫

§ 10. 学位論文の取得

- 田中俊行、H12. 9. 29、日本列島地殻構造モデルの重力ポテンシャルエネルギーとダイナミクス、理学（金沢大学）
- 田原真紀、H16. 7、2000年鳥取県西部地震における市町村の応急対応とそのモデル化に関する研究、工学（東京工業大学）
- 浅井康広、H18. 3 Study on the Mechanism of Co-seismic Groundwater Level Changes, 理学（北海道大学）
- 大久保慎人、H19. 3、ボアホール型ひずみ地震動観測システムの開発とその応用、理学（名古屋大学）

§ 11. 研究内容の概要抜粋

研究内容は多岐にわたっている。詳細は論文・報告書や後述の研究成果抜粋にも述べられているがここでは実施した内容の概略を述べる。

11.1 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

○深部ボアホール観測計器の開発

研究目的を遂行するために大深度地殻活動総合観測網の構築のためにボアホール地殻活動総合観測装置の開発を進めた。なぜなら地震に関連した信号を観測するには地表よりも地下深部で観測する方が人工的なノイズや気象によるノイズの影響が小さく微小な信号を観測することができるからである。この計器は1台で歪計3成分、傾斜計2成分、地震計3成分、磁力計3成分、高感度温度計を搭載している。

○連続観測応力計の開発

媒質に作用する応力により観測される歪変化は生ずるが媒質の弾性定数により異なる。従って歪の観測よりも応力の観測の方が本質的である。そこで更に新しく応力の連続観測が可能な計器を開発し、ボアホール地殻活動総合観測装置に組み込み東北地方太平洋沖地震の応力波形を世界ではじめて記録できた。

○ボアホール計器の改良および設置方法の開発

深部ボアホール計器により良好なデータを得るには解決すべきことが3点存在する。深部観測が可能な計器の開発はもちろんであるが地下深部から地上への多成分データの伝送や一様な岩盤への計器の設置などがある。具体的な内容をここでは書ききれないがこれらの問題点をすべて解決し良好な観測データを得ている。

○ボアホール計器の感度検定システムの開発

深部ボアホール総合計器は個々の計器の感度検定は実施するが組みあがった計器は重さ約300kgで長さは約8mにもなる。特に内蔵されている歪計や応力計は岩盤にセメントで固められる。それらの計器を組み上がった状態で水圧を加えて検定するシステムを横坑内に建設し活用した。

○ボアホール地殻活動総合観測装置で観測したデータの有用性

ボアホール計器により観測されたデータは研究内容を進める上で良好な資料を提供し、研究の進展に大いに貢献している。特に連続観測応力計のデータは今まで他では得られていないデータであり新しい情報を提供している。

○深部ボアホール総合観測網の構築

ボアホール地殻活動総合観測装置の開発に基づいてボアホール観測網の構築を進め、

十字アレイ観測網を構築し各種解析に観測されてデータを有効に活用した。

○観測網のIT化とデータベースの構築

ボアホール地殻活動総合観測装置で観測された多成分の観測データと地盤震動調査のために構築した観測から得られるすべてのデータをインターネットその他の方法により研究所に自動送信するシステムを構築した。更に集められたすべてのデータを蓄積し研究に利用しやすいデータベースを構築した。

○2011年東北地方太平洋沖地震(M_w9.0)の応力地震波形を世界で初めて記録できた

開発したボアホール応力計は東北地方太平洋沖地震(M_w9.0)の応力地震波形を記録した。地震計による波形と異なり応力地震波形を記録したのは世界で初めてである。2010年3月15日に新設した陶史の森地殻活動総合観測点(深度512m)において2011年3月11日に発生した「平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震(M9.0)」による変動が観測された。すべてのボアホール観測点において良好なデータが記録された。特に陶史の森ではこれまで得られなかった応力という新しい情報を得られるようになった。

○2011年東北地方太平洋沖地震に伴う地下水位地震応答

2011年東北地方太平洋沖地震の歪地震動(peak-to-peak 10^{-5} オーダーの最大せん断歪および面積歪)に伴って、戸狩観測点TGR350孔、正馬様観測点SBS110孔、賤洞観測点SN-1号孔およびSN-3号孔において地下水位の地震応答が観測された。特に戸狩観測点では最大1.4mの水位上昇が観測された。

○歪地震動観測による東北地方太平洋沖地震

地殻活動十字アレイ観測網の内、5観測点で観測された東北地方太平洋沖地震(M9.0)による歪地震動記録を用いて地震モーメント、震源方位、震源距離をフーリエひずみ解析法(大久保, 2006)によって推定した。推定結果は地震後3分経過した14時49分時点では、三陸沖方向、560kmの距離に主要な歪源(M8.2~8.8)がある。14時50分時点では、やや南に方位が変化し、震源距離が近づいている。歪地震動から推定される東北地方太平洋沖地震の地震モーメントはマグニチュード8.8程度である。

○SN-1/SN-3号孔における地下水位地震応答の歪地震動閾値候補

2006年6月15日(観測開始)から2011年3月24日までのSN-1/SN-3号孔における地下水位記録から地下水位地震応答(以下、地震応答)を生じさせた地震の歪地震動の地震応答の閾値が存在することが示唆された。SN-3号孔の地震応答は地震発生約1日後までの‘急激な’水位低下とその後の回復、SN-1号孔の地震応答は地震発生数日後までの‘ゆっくりとした’水位低下とその後の回復が特徴である。

○深地層研究所に隣接する500mボアホール観測

深度300mのアクセス坑道(JAEA)掘削中にNNW断層北東側で湧水があり、断層北東側にある地殻活動総合観測点(TRIES:深度500m)で歪と地下水位の変動が初めて観測された(2008年10月4日~24日)。断層反対側のTGR350では、歪変動はあったが水位変動はなかった。一方11月3日から12月8日にかけてJAEAによる深度200mボーリング横坑(換気立坑側)での湧水では、TGR350で水位および歪変動が観測されたが、TRIESでは歪変動だけが観測された。断層を横切る方向には遮水であるが、歪は断層の両側に及ぶことが明らかとなった。

○深地層研究所深度200mボーリング横坑(換気立坑側)における応力・傾斜変動観測

深地層研究所200mボーリング横坑にある既存孔(深度19.53m;土岐花崗岩中)を深度19mまでφ150mmに拡孔掘削整備した。底部に、新規開発の応力計を埋設設置し、

オーバーコアリング法による初期応力測定を行った後、同深度に連続観測用応力計を埋設設置した。続いて、深度 13.8m に傾斜計 (STG200) を設置し、連続観測に入った。深さ 10m に湧水があるので、今後の間隙水圧、応力、傾斜との比較観測に備え、密閉式孔口装置を設置した。

○深地層研究所予備ステージ (100m) における発破に伴う傾斜変動

瑞浪超深地層研究所の主立坑 (φ 6.5m) と換気立坑 (φ 4.5m) の間の横坑に掘削によって生じる地下水位変動を能動的地下水制御と見なし、地下水位変動と地殻歪・傾斜変化の関連性を調査・研究している (観測点名: STG100)。これまでの観測記録から傾斜は時と共に変化したり、発破のショックでステップが出たり、出なくなったり、地下水変動、発破等に複雑な対応を示すことが明らかになった。また、2008年11月14日～12月15日の期間に、深度 200m ボーリング横坑 (換気立坑側) にて掘削されていた調査孔での約 100 リットル/分以上の湧水で 10^{-6} オーダー傾斜変化が観測された。

○200m ステージにおける応力連続観測

東濃地震科学研究所が開発している連続観測可能な応力計を用いて 200m ステージにおいて連続観測を実施した。2009年8月11日駿河湾の地震にともなう応力変化と水圧変化が記録された。記録された応力記録で8月13日までの変化から主応力解析をした。近傍の NNW 断層の走向と観測された最大せん断歪の走向はほとんど一致している。NNW 断層は右横ずれ断層と認識されている。観測結果から得られた最大せん断応力も右横ずれであり、地震波の到着により断層運動に相当する応力変化が生じたという結果が得られた。

○東濃地域で観測された東北地方太平洋沖地震に伴う地下水位変化

2011年3月11日に発生した平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震 (M9.0; 気象庁) に伴う地下水位変化が、岐阜県東濃地域 (震央距離約 560km) にある賤洞 (SN-3・SN-1; 深度 131m および 91m)、研究所 (TRIES; 深度 505m)、正馬様 (SBS110; 深度 110m)、戸狩 (TGR350; 深度 350m)、および定林寺 (深度 1030m) の各ボアホール観測点で観測された。

○超深地層研究所立坑の水位変動に伴う歪変化と主立坑断層のふるまい

瑞浪超深地層研究所 (MIU) の主立坑および換気立坑の掘削が本格化した 2005年6月以降、立坑内に湧水と排水の状態が生じた。これに伴い戸狩地殻活動総合観測点 350m 孔では水位変化が生じ 80m を超える水位低下が発生した。TGR350 孔底に埋設・設置されている石井式ボアホール歪計の歪解析を行った。その結果歪変動と観測された最大せん断歪の変化の方向は存在する主立坑断層の走向に概ね一致しており、水位低下時には主立坑断層に右横ずれの変位、水位上昇時 (区間 B) には左横ずれ変位を生じさせるようにせん断歪変化が生じていることが明らかになった。

○DH-2 号孔における揚水実験に伴う歪変化と主立坑断層のふるまい

DH-2 号孔 (深度 500m; TGR350 から北西約 300m に位置) を用いて行った揚水実験 (100 リットル/分) の定量揚水による歪解析結果によると観測された最大せん断歪の変化は立坑の水位変動の場合より一桁小さいが、水位低下時 (揚水時) および水位上昇時 (揚水停止後の水位回復時) に主立坑断層に立坑の場合に生じたと同様の変位を生じさせるようなせん断歪変化が観測された。

○水位変動に伴う歪変化と主立坑断層のふるまいを説明する定性的モデル案

上記 2 例に述べた水位変動に伴う歪変化と主立坑断層のふるまいを説明する定性的なモデル案を考察した。TGR350 の水位が低下する場合、亀裂構造中の水圧も減少し、亀

裂の幅はそれ以前に比べて縮む。この時、亀裂構造に挟まれた領域では伸びが卓越した歪変化が生じる。一方水位上昇時には、亀裂構造中の水圧が増加、亀裂幅は水圧減少時と比べ広がる。この時、亀裂構造に挟まれた領域では縮みが卓越した歪変化が生じる。

○東濃地震科学研究所周辺岩盤の間隙弾性的ふるまいについて

当研究所で展開しているボアホール総合観測装置は応力計、歪計、傾斜計、磁力計、地震計などを搭載しているので多種類のデータが蓄積されている。この様な場において変動に伴うデータを記録することにより間隙弾性体的ふるまいや地下水流動に関して調べた。これらのデータを解析することにより間隙弾性体に関していろいろ明らかになってきた。主な結果は以下のようである。1. 間隙弾性体のモデルを構築した 2. 弾性体が原因の間隙圧の変化と間隙圧が原因の弾性体の変化の相違 3. 間隙の形とその分布 4. 湧水・揚水による水位変化と断層の動きとの関連性があること

○応力計の観測レンジについて - STS 地震計との比較-

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震(M9.0)においては日本中のSTS地震計はほとんどすべてスケールアウトとなり最大振幅は記録することができなかった。しかしながら当研究所の複数の応力計・歪計は最大振幅も含めて全て良好に波形を記録することができた。海で発生した大きな地震の場合には長周期成分の記録がスケールアウトせずに記録できることが大きな津波発生を判断するうえで重要である。そこで応力計・歪計の観測レンジを調べた。その結果東北地震の震央に最も近い牡鹿(震央距離約80km)で観測したとしてもスケールアウトすることなく記録できたことが明らかになった。

○瑞浪超深地層研究所立坑内および周辺域で観測された熊本地震に伴う間隙水圧・地下水位変化

2016年4月16日1時25分に発生した熊本地震(Mj7.3)の地震動に伴う間隙水圧/地下水位変化が、震源距離665kmの瑞浪超深地層研究所(MIU)内観測点STG200N、STG200およびMIUの南約500mに位置する戸狩観測点TGR350で観測された。

地震に伴う間隙水圧変化および水位変化はそれぞれ6月5日にピークに達し、STG200Nで30.0kPa、STG200で28.0kPaまで水圧が上昇しその後減少、TGR350では2.3mまで水位が上昇しその後低下している。これらの観測点で通常観測される間隙水圧の潮汐応答はほぼ同じであることが明らかになっているがこれらの変化を説明するモデルについて検討した。

○JAEA 深度 500m 再冠水試験後の応力・歪・水圧・水位記録

JAEAの超深地層研究所計画では、「坑道埋め戻し技術の開発」の一環として深度500m研究アクセス北坑道において、坑道埋め戻し試験に先立って坑道の一部を閉鎖し地下水により冠水させる「再冠水試験」を実施している(笹尾、2016)東濃地震科学研究所は、瑞浪超深地層研究所立坑内深度100m、200m、300mの各ステージにそれぞれボアホール観測点を整備し地球物理学的各種観測を行っている。再冠水試験に伴い観測されたデータを解析・考察した。

○地殻活動連続観測から見る瑞浪超深地層研究所周辺の地下水流動

瑞浪超深地層研究所では立坑掘削や試錐孔における水理試験、観測装置の出し入れによって坑道内に毎分数リットルから数百リットルといった大量湧水が生じている。この大量湧水は土岐花崗岩中の間隙水圧の擾乱を生じさせ、立坑およびその周辺域の間隙水圧状態を変化させている。これらの変動を応力計・歪計・水圧計水位計の記録を解析することにより、MIUで生じた土岐花崗岩中の間隙水圧擾乱(振幅100kPa以下)は距離約360m離れたTGR350観測点では水位および歪記録に影響を及ぼしているが、距離約1kmの正馬様SBS105観測点の水位及び応力記録には影響が及んでいないということが判明した。

○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の開発と運用を行っている。本事業の主目的は制御震源の有用性の検証し、弾性波によりその挙動を明らかにすることである。平成 26 年度では時刻の問題を解決すべく、GPS 同期した震源装置を開発した。27 年度になってから、制御装置、記録計、信号設計など全て刷新した。その結果、TGR350 の地震計でも明瞭な弾性波信号を観測することができた。平成 28 年度には、発震効率の良いシングルフォース震源に改造することで、遠方での観測が可能となり、周辺のボアホール観測点 (TGR350 や TRIES) および瑞浪壕内に設置したアレイ地震計での連続観測を開始した。平成 28 年 4 月からの連続観測では、熊本地震 (2016/04/16 M=7.3) に伴い、直接 P 波のステップ状の走時遅延が TGR350 (約 $25 \mu s$ 遅延) と TRIES (約 $60 \mu s$ 遅延) で観測された。これらは、土岐花崗岩内のクラックが開くことによって P 波速度が低下したためと考えられる。

○LaCoste G 型センサーを再利用した絶対重力観測補間手法

FG5 絶対重力計はその名の通り絶対値を取得可能であるが、最速サンプリング速度 10 秒において数ヶ月超の連続稼働には堪えない。したがって、FG5 の弱点を補うためには長期連続稼働用の相対重力計による並行観測が必要である。購入した gPhone (#90) と FG5 とのデータ比較を経て gPhone (#90) の特性を明らかにし絶対重力観測補間をするための観測を実施している。

○重力計鉛直アレイ観測による地下水流動の研究

gPhone#130 (瑞浪超深地層研究所深度 300m 研究アクセス坑道に設置) と gPhone#153 (瑞浪地科学研究館測定室) を用いて、重力計鉛直アレイ観測 (以下、VGA) 減算処理による地下水量モニタリングを行った。ただし、個々の重力計データの段階で、潮汐および気圧応答成分は除去した。VGA 減算処理の結果は、2 台の重力計がはさむ領域の質量変動を捉えていると考えられる。これらから見積もられる間隙率は 0.13 程度である。

○弾性体力学の不変量による深部ボアホール観測 (歪・応力) の信頼性の確認

東濃地震科学研究所ではボアホール地殻活動総合観測装置を開発し、深部ボアホール (最深は 1030m) に設置し地殻活動のデータを蓄積している。その中には応力計・歪計も搭載されている。それらの計器による観測の信頼性を弾性体力学の不変量を利用して調べた。その結果、計器は十分な精度と信頼性のある計器であることが明らかになった。

○立坑地域の構造モデルと応力・水圧のふるまい

JAEA の立坑周辺では種々の観測を行っている。立坑の 200m ステージに設置した応力計と水圧計ではいろいろな現象が観測されている。一例は遠方で比較的大きな地震が発生したときには水圧計は圧力増加の変動を示し、応力計の鉛直成分は圧力減少の変動を示す。300m 離れたところで湧水があった場合水圧計は減少を記録し、応力計は増加を記録した。このほか多くの観測例を説明するたたき台の構造モデルの一例として間隙弾性体モデルを考えた。

○地球物理学的方法による地下水流動の研究

観測開始から 2017 年 8 月 1 日までに応力地震動に伴う指数関数的な水圧変化 (常に増加; 以後、水圧地震応答と略) が 5 地震の地震動に伴って観測された。応力計によってこれらの地震の地震動 (応力地震波形; 以後応力地震動と略) が観測され、応力地震動の継続中に水圧地震応答が始まっていることが判明した。STG200N に埋設・設置したボアホール応力計は水平応力計 4 成分と VSR (鉛直成分) から構成されている。

次の手順で解析を行った。1. 運動の第一法則とは、応力計記録から [第一不変量]=[HSR-1]+[HSR-2]+[VSR]の時系列の地震動全振幅を求める。2. 地震動に伴う間隙水圧変化のピーク時変化量(水圧上昇量)を求める。3. 応力地震動の全振幅と間隙水圧地震応答のピーク時変化量との比較を行う。比較結果から、応力地震動の全振幅と間隙水圧地震応答のピーク時変化量には正の相関があることがわかった。

○2004年から2017年の割石温泉の湯量観測

割石温泉における1976年から2003年までの28年間の観測期間(第Ⅰ期と第Ⅱ期)の湯量観測結果については参考文献に報告した。本報告では2004年から2017年までの約14年間の観測期間(第Ⅲ期)における湯量の観測結果について報告する。

これらの観測では、国内外72個の地震にともなう湯量変動が観測された。割石温泉は間欠泉であり、能登半島地震(M6.7, 2007/3/25 9:42)では地震発生70日前、駿河湾地震(M6.5, 2009/8/11 5:07)では25日前から間欠泉の周期の減少が観測された。また、御嶽山噴火(2014/9/27 11:52)の約1か月前から温泉中のガス量の増減が観測された。

○重力計鉛直アレイ観測による地下水流動研究

gPhone # 130(瑞浪超深地層研究所深度300mステージに設置)とgPhone # 153(研究館測定室)のデータ蓄積が進んだため、重力計鉛直アレイ観測(以下、VGA)減算処理による地下水量モニタリングの評価を行った。そして、正馬様観測点で得られた陸水データ(地下水位、雨量、土壌水分、気圧)と比較した。このような結果から、VGA減算処理は陸水データとの高い相関を示し、間隙率は0.16程度と推定できる。この値は瑞浪層群と花崗岩の実測値の間に収まっている。

○気圧変動および潮汐に伴う地下水の質量移動

東濃地震科学研究所では、地下水の変動の監視等を目的として、重力加速度の連続的な観測をおこなっている。こうした観測から得られるデータから地下水の変動を解析するには、多くの解析で利用されている間隙水圧 p をパラメータにするよりも、地下水の質量に関連する流体の体積変化 ξ をパラメータとした方が都合が良い。そこで本研究では、気圧変動や潮汐にともなう上下方向の水の移動の様子を解析的に調べた。

○活断層と地下水の関連性に関する研究：観測された上下変動と地下水系

水準網の北東側では上下変動は最大でも2mm以下と大きくない。誤差を考慮すれば有意な変動がないといえる。この地域は堆積層も薄く僅かしか存在せず、花崗岩が露出する地域である。一方、2mm/yearの沈降が観測される水準網南東側は、地下水系から推定される地下水盆周辺、厚さ200mの堆積層が存在する地域である。このように地表基盤を反映した上下変動が高精度な水準測量の反復実施から明らかになった。積層の厚さや地下水系分布が上下変動に影響すると考える。

○陶史の森(TOS)の観測結果と理論地震波形の比較

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震による応力波を陶史の森に設置された応力計で観測し、その結果を式で示される観測方程式に代入してえられた遠方応力場を求めた。理論計算では鉛直応力がゼロと仮定されている。観測方程式の解と理論波形が比較的良好に一致していることが明らかになった。完全に一致していないのは、どちらが正しいという問題ではなく、後述のように、条件の違いであり、応力計が含水状態の岩盤の「有効」応力変化を正しく捉えている証拠である。

○瑞浪超深地層研究所立坑内観測点 STG500 整備と応力計の埋設・設置

平成 27 年度 8 月より JAEA が行っている瑞浪超深地層研究所深度 500m 研究アクセス北坑道冠水坑道における「再冠水試験」によって生じる冠水坑道周辺域の間隙水圧回復過程を観測することを主な目的として、平成 30 年 8 月より瑞浪超深地層研究所深度 500m 研究アクセス南坑道 125m 計測横坑内に新規 STG500 孔を掘削した (PI 123.0mm, 床面からの掘削深度 16.3m) 埋設・設置後の約 1 か月後、2018 年 12 月 5 日に発生した New Caledonia の地震 (Mw7.5;USGS) も良好に記録できている。今後は水圧観測を再開し、冠水坑道周辺の間隙水圧回復過程や瑞浪超深地層研究所立坑内での人為的水圧変動に伴う土岐花崗岩中の応力変化検出を行うため観測を継続して行う。

○地震時の急激な水圧変動と地震後の緩和な水圧変動

コサイスマックな水圧変動の後、数日から数ヶ月にわたって水圧が変化し続けることがあり、地震動にある種の閾値があるなど、地震にともなう水圧変動に関する多くの研究成果が報告されている [例えば、浅井, 2010 ; 2011 ; 浅井・石井, 2014 ; 浅井ほか, 2009]。以下の報告では 2016 年 4 月 16 日に発生した熊本地震にともなうコサイスマックな応力および水圧変化、およびその後の応力と水圧変化について、瑞浪の超深層縦孔 200 メートルレベルの水平坑道から掘削されたボアホールに設置された応力計 (STG200n) および水圧計により記録された結果をもとに議論した。

○精密水準測量による周辺域の上下変動

東濃地震科学研究所は JAEA の原発廃棄燃料地層処分研究として超深度掘削計画が発表されてから超深層掘削に伴う課題を追求する。その一つの課題が、多量の湧水排水に伴う地下水流動などの環境変化の解明である。上下変動をより議論するため、より広い範囲に水準網を 2012 年に拡張し、以後、毎年測量を繰り返した。この網における閉合誤差は概して 2-3mm となり、それを超えるような変動は有意と考えられる。2013 年 3 月から 2018 年 11 月までの 5 年間に観測された上下変動 (図 1.13 左) は、非常に特徴的である。まず、掘削坑から北東側では± 2mm ほどの小さな変動しか観測されないに対して、南西側は 1cm の沈降など、大きな沈降が観測されている。今後は沈降のメカニズムを明らかにすること、そして、掘削坑の埋め戻しが予定されるだけに、埋め戻しによる地下水位の回復に伴い、地下水流動の回復過程を明らかにするために精密水準測量による上下変動の観測を継続する。

○連続観測用ボアホール応力計の特徴に関するまとめと考察

当研究所で開発した連続観測用のボアホール応力計に関しては Ishii and Asai (2015) に述べられている。連続観測用ボアホール応力計はその他にもいろいろな特徴があり、それらを理解しておくことは今後の地震研究にも役立つと考えられる。ここではした結果をまとめた。考察考察した内容は以下の様である。

1. 「応力計は応力と歪の両方を観測できる」 2. 「応力計により観測される応力は歪と異なり岩盤の弾性定数が未知でも求められる」 3. 「観測された応力や歪の地震波形などをみると長周期変動の場合、二次元不変量成分と鉛直成分は相似波形で位相が逆になっている」 4. ボアホール応力計で観測される変動の分解能は地上において観測する変位などより 2 桁近く分解能がよい。 5. 「応力計・歪計の dynamic range は如何に広いか」

○地上観測用高感度歪計の開発

当研究所で開発した連続観測用のボアホール応力計に関しては Ishii and

Asai (2015) に述べられている。このボアホール用応力計は観測するダイナミックレンジも広く、地震波形もきれいに記録している。しかしながらボアホールを掘削するには経費も掛かり簡便に地震波形を観測することができない。そこで地上で簡便に観測可能な歪計の開発を試みている。現在 $1\ \mu$ の変位が約 1.6volt の出力に変換され変位が約 55 倍増幅されているシステムを開発した。今後実際の観測システムに組み込む予定である。

11.2. 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

○東北地方太平洋沖地震 (2011/3.11) により観測された気圧地震動とそれから求められた上下変動

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震 (M_w 9.0) に関して当研究所の深部ボアホール最深の深度 1030m) 観測網 (震央距離: 約 600km) の地震計、応力計、歪計などで良好な地震記録が観測された。その他に気象観測用の複数の気圧計 (横河電子製 F4711) にも気圧地震動が記録されている。今回は記録された気圧地震動と上下変動との関係を調べた。綿田ほか (2006) が確認したように気圧変化は上下変動の速度に比例していることが確認された。それに加えて上下変動は気圧変化の積分と一致することも新たに明らかになった。

○東濃鉱山再冠水に伴う地下水/歪変化

東濃鉱山 (日本原子力研究開発機構) 内に BH-1 観測点がある (坑道からの深さ 50m のボアホール; 坑道の深度は GL-125m)。ボアホール孔底の土岐花崗岩内に地殻活動総合観測装置 (石井式ボアホール歪計 3 成分、傾斜計 2 成分、温度計) が埋設・設置されている。東濃鉱山では閉山措置が進められ、2012年3月に地下坑道の充填作業 (埋め戻し) を開始、2014年12月9日に東濃鉱山坑道内に設置されていた排水ポンプの停止。この時点から坑道内の冠水が始まった。12月27日18時50分頃から BH-1 歪計各成分に急激な歪の縮みが始まり、急激な変化が終息の傾向になった。その過程における歪・傾斜変化、水位変化などのデータを用いて解析した。

○東濃鉱山の坑道閉鎖後の再冠水による地震波 (S 波、P 波) 速度変化の研究

弾性波アクロス土岐送信所 (名古屋大学) が設置されている東濃鉱山 (日本原子力研究開発機構、岐阜県土岐市) では、2012年3月から地下坑道 (本延坑道は GL-125m) の充填作業が開始され、2014年12月9日に排水ポンプを停止、2015年3月には坑道の閉鎖が完了した。平成 27 年度の事業報告では、ポンプ停止後、充填後の地下坑道内では地下水位が上昇し、ほぼ同期する形で BH-1 号孔 (本延坑道から約 40m 下) での歪変化 (短縮) が観測されたこと、また、それらとほぼ連動する形で、98SE-01 号孔で S 波走時が約 4ms 低下するのが観測されたことを報告した。これらの現象は、充填坑道への再冠水による間隙水圧の上昇とクラックの開口により説明できる。特筆すべきは、P 波の走時変化である。ポンプ停止後の 2014 年末ないし 2015 年初め頃からは、全ての観測点の P 波走時が遅延を示しているが、北方 (HYS、N.YOTH) および南方 (TOS) の観測点では、2014 年の中頃から走時が徐々に早くなっており、2015 年末ないし 2015 年初め頃には 0.5~1.0ms 程度早くなっている。これらの原因を考察し解釈した。

○東濃地域周辺の時系列情報を含む地震活動度分布図 (時間円表示図) の作成

気象庁一元化震源を用いて、東濃地域周辺の最近 12 年間 (1998 年~2009 年) の時系列情報を含む地震活動度分布図 (時間円表示図) を作成した。これらの図から、最近 1 2 年間の微小地震の活動度の地域分布と多発した場所と時期、それらと M4.0 以上の主な地震との対応関係を読み取ることができ、深さ 25 km 以浅では、2009 年

8月の駿河湾の地震 (M6.6) をはじめM4~5クラスの地震に伴う余震が多く発生しているが、深さ25km以深では、少ないことがなど分かってきた。

○瑞浪超深地層研究所における高密度・高速サンプリングの地震計アレイ観測

高密度・高速サンプリングの地震計アレイ観測のデータを用い、瑞浪超深地層研究所の断層破碎帯周辺の地震波速度構造を調べた。瑞浪超深地層研究所では2本の深度500mまで延びる立坑とそれを深度100m毎に結ぶ水平坑道(ステージ)の掘削が行われ、2013年時点では深度500mステージの掘削工事を行っている。今年度は昨年度設置できなかった300mステージの換気立坑側に観測点を設置して合計18台の地震計により500mステージ掘削のための発破を観測した。その結果、堆積層の速度は 2430 ± 40 m/s、基盤層の速度は 5400 ± 30 m/s、層境界の位置が深度171mを得た。得られたP波速度と岩石試験による弾性波速度との比較から、基盤層内と堆積層内の不均質性を推定した。

○大きい余震の活動の急速な減衰に関する調査

2011年3月11日に発生した2011年東北地方太平洋沖地震 (M9.0) の余震域は、長さ約500km、幅約200kmの広大なものであったが、この本震の震央と2日前の9日に発生したM7.3の地震の震央を含む長さ100km、幅50km程の領域では、M5.0程度以上の大きめの余震の活動が本震後5日位で急減し、以後発生しなくなった。このような現象が過去の巨大地震や大地震についても見られるかどうかを調査したところ、内外の多くの地震について、対象とする領域と余震のMの下限(閾値)を適当に設定すると、同様な事例が多いことが分かった。

○2011年東北地方太平洋沖地震直前のb値

2011年3月の東北地方太平洋沖地震 (M=9.0) の51時間前に発生した宮城県はるか東方沖地震 (M=7.5) の余震のb値は有意に低い。M9.0との距離は44km。直前までのデータは、M=7.5の周り半径40km以内に79個あった。これをM=9.0前震と考えると $b=0.4$ である。比較のために、同じ海域で過去8年間(赤線)では $b=0.5 \sim 0.6$ である。勾配の直線性は良くないが差は有意である。

○ポアホール観測網のデータを用いた東北地方太平洋沖地震による地震波速度変化の研究

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震 (M9.0、以下、東北地震) の際には、東濃地域では震度3の揺れを感じ、地下水や歪などの地殻活動観測データや弾性波アクロスによる走時観測データに大きな変化が検出された。この研究では、東濃地震科学研究所のポアホール観測網のデータを用いた解析を、弾性波アクロス信号のみならず歪・応力計データについても進めた。その結果、この地域の基盤岩(土岐花崗岩)のクラック異方性の存在と、東北地震に伴うクラック異方性の変化とが明瞭に捉えられた。

○北朝鮮の核実験による地震波の観測

北朝鮮による核実験は現在まで6回実施されている。当研究所では同じ観測点の同じ計器でその全ての波形を記録している。2016年9月の地下核実験まで5回の実験による地震波形はほとんど同じ波形・振幅を示し、震源はほぼ同一場所と考えられる。しかし2017年9月に実施された実験による波形はそれまでの波形より1.5倍程度大きな波形を記録した。

○房総半島先端部で生じた周期15-20秒のハイパーレゾナンス

2011年東北地震の時に得られたGPS1秒サンプリング記録の解析を行った。2011年東北地震の時に房総半島南端と三浦半島で、地震学が経験したことのない、周期15秒~20秒、振幅1mの巨大なハイパーレゾナンスが生じたことが分かった。現時点では原

因は分からない。それ以外にも、千葉県中央部で生じた周期 10 秒～15 秒、荒川沈降帯で生じた周期 5 秒～10 秒のレゾナンスが、GPS 1 秒サンプリング記録で良く認識できた。荒川沈降帯の周期 5 秒～10 秒のレゾナンスは、いわゆる長周期地震動に対応する。

○地球を周回してきた巨大表面波によるダイナミックトリガーの可能性

地球を周回してきた巨大表面波によるダイナミックトリガーの可能性について調べた。東北地震の直後、数 MPa の激烈地震動が震源域を揺らし、多くの M5.5 以上の余震を誘発した。それから 2 分ほどして中部地方に到達した巨大地震動(弱)は、飛騨山脈の焼岳や立山、箱根、神津島などの火山帯で最大 5 弱の誘発群発地震を起こした。50 分ほどすると、震源域でも、中部地方でも、地震活動は低下した。しかし、東北地震のほぼ 1 時間半後から 3 時間後に帰ってきた表面波が通過中は震源域の M5.5 以上の余震活動は再活性化したが、それらが通り過ぎた後、再び余震活動は低下した。これは、地球を 1 周してきた巨大な表面波による余震活動の再活性化(トリガー)の世界で最初の観測である。この研究において、次の 2 点で、応力計記録は決め手になった。第一に、多くの長周期地震計がスケールアウトしている中で、震源から放出された 1 MPa 近い巨大な地震動を完全に記録していたことである。第二に、余計な換算の煩わしき無しに記録から直ちに応力が分かることは大変理解の助けになったことである。

○P波とS波の間で観測される長周期地震動

本研究所で設置しているボアホール型の高感度歪計の記録に、P 波と S 波の間に長周期変動が観測されることがある。2015 年 5 月に宮城県沖で発生した Mw6.8 のイベントの際にも、歪計や応力計に長周期な変動が観測されていた。S 波よりも先に到達していることから震源から観測点までの構造に起因する P 波由来の波であると想定される。同じ宮城県沖のイベントについて、F-net 観測点の速度波形鉛直成分を見ると、震央距離 600km 程度から P 波初動とほぼ同時刻に到達する長周期な変動が顕著になり、震央距離約 1400km の観測点でも同様な変動が観測されていた。このような長周期な波が観測されるイベントのマッピングを進めた。

○2011 年の東濃地域で発生した地震の発生機構

東濃地域で発生する地震活動の特徴を明らかにするため、東濃地震科学研究所 (TRIES) の地震観測網の地震波形データと高密度地震観測網 (Hinet) の地震波形データを用いて、①内陸活断層の地震、②沈み込むフィリピン海プレート(フィリピン海スラブ)内の地震について調べている。震源決定および発震機構解の推定を行った。調べた地震は①恵那の地震[2011 年 6 月 30 日 11 時 49 分]②岐阜県美濃東部の地震[2011 年 12 月 14 日 13 時 01 分]である。

○フィリピン海プレート内で発生した岐阜県美濃東部の地震 (M5.6) の発生メカニズム

2011 年 12 月 14 日 13 時 01 分に岐阜県瑞浪市直下を震源とする M5.6 のスラブ(沈み込むフィリピン海プレート)内地震が発生した。瑞浪市のある東濃地域は、M8 クラスの巨大地震が約 150 年間隔で繰り返す東海地震発生域の北西延長上にあたる。今回の地震は東濃地域の内陸地震発生に強く関与しているフィリピン海プレートのテクトニクスを理解する上で重要であり、また瑞浪市ではこの地震で最大震度 4 を観測し、地元自治体においても非常に関心の高い地震であった。我々は瑞浪市を中心として高密度の地震観測を行っており、本震とそれに続く余震を観測できたことから、その発生メカニズムを調べた。

○紀伊半島における深部低周波地震 (LFE) 発生域周辺の異方性構造

研究所では、M8 クラスの東海・東南海・南海地震の発生に深部低周波地震の発生が

大きく影響すると考え、深部低周波地震の研究を行っている。2009年12月から2010年5月までの約半年間、紀伊半島において66台の地震計からなる高密度アレイ観測が行われた。我々は深部低周波地震(LFE)発生域周辺の異方性構造を明らかにするため、地殻内地震とスラブ内地震を用いてS波偏向異方性を解析した。その結果、異方性が上部地殻だけでなく、マントルウェッジや、下部地殻もしくはスラブ内に存在することを示唆している。地震波速度トモグラフィの結果からはマントルウェッジに蛇紋岩の存在が示唆されており、本研究によりその蛇紋岩層が異方性を示すことを明らかにした。

○阿寺断層系重点地震観測

平成18年より東濃地震科学研究所では、断層を通過する地震波の特徴を解明するため、岐阜県中津川市加子母地区および下呂市大鹿野地区において、北部阿寺断層系を横断するように設置した地震観測点で1984年長野県西部地震の余震による地震動を観測している。2014年御嶽山噴火によるものであると考えられる大きな振幅をもつ地震動が観測された。地震波形記録からは大きな被害を出した主となる噴火以前にも火山噴火を予見させるような地震活動が非常に活発であったことが見て取れる。

○2014年長野県北部の地震による長周期地震動

大地震の発生により内陸の特に盆地構造では、長周期地震動が卓越することが知られており、1985年メキシコ・ミチョアカン地震によるメキシコシティでの例が有名である。本研究所で設置しているボアホール型の高感度歪計の記録では、2014年長野県北部の地震のP波とS波の間にも長周期なフェーズが観測されていた。このような長周期なフェーズは東北沖の地震でも観測されており、この長周期なフェーズの成因について研究を進めている。この観測事実は、歪記録による長周期地震動の早期検出が可能なことを示唆している。

○手賀野断層精密重力異常調査

昨年度に名古屋大学重力データベースに統合したデータを用いて、手賀野断層(恵那市から中津川市にかけての市街地にあり、第四紀後期に活動した可能性が高い)の重力異常分布の解析を行い、反射法探査(東濃地震科学研究所報告No.5)を拘束条件に重力異常から推定した基盤岩上面深度を求めた。

○東北地方太平洋沖地震により瑞浪で観測された応力場

現在、当研究所では約10カ所の深部ボアホール観測点において総合観測を実施している。そのすべての観測点において2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震(MW9.0)の応力地震波と歪地震波を良好に記録している。観測された応力地震波は応力ステップも記録しており明らかに震源に作用している応力に関する情報を反映していると考えられる。東北地方太平洋沖地震によって生じた陶史の森観測点における最終主応力およびそれに達するまでの時間変化を求めた。

○地殻応力連続観測記録に関する研究

地震の素性を理解する基本は、発震機構や滑り分布など、空間的要素を定めることだということ出来る。現在は、高性能な地震計が、日本も含めて世界に数多く展開されており、地震の空間的要素は、地震が起こると直ちに求められるようになった。地震理解のもう一つの要素は、断層滑りや断層面の拡大を駆動したテクトニック応力である。そのために必要なのは、ライズタイムであり、滑り速度(～滑りの大きさ/ライズタイム)である。しかし、地震記録は、ライズタイムに鈍感で、決めにくい。そこで、GPS1秒サンプリング記録に、ライズタイムに敏感な応力記録を併せ用いてライズタイムを決める試みを行った。

○重力時間変化の観測

過去全ての研究館 (MGA)、正馬様観測点 (SBS)、そして戸狩観測壕 (TGR) における絶対重力測定の結果を解析した。2011 年以降いずれの観測点においても重力値が低い傾向が継続している。過去の地震重力応答および地下水位データとの対比から、2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震による広域地下水変動が主要因であると考えられる。今後も複数の gPhone の並行観測を実施し、降雨および不圧帯水層の重力応答の深度による違いを含めて検証する。

○跡津川断層帯の茂住祐延断層近傍における観測

跡津川断層帯の茂住祐延断層近傍においてボアホール歪計による観測を実施している。歪計の特徴的変動が破碎帯の動きと関連しているという結果が得られているが、その後のデータ解析も同様に破碎帯の動きと関連した歪変動が観測されているという結果が得られた。

○阿寺断層・屏風山断層の構造調査

阿寺断層・屏風山断層の構造調査を実施した。方法は地質調査、地震探査、重力探査により実施した。結果は東濃地震科学研究所報告の No. 5 と No. 8 にまとめられている。

○重力測定および精密水準測量による超深地層研究施設周辺モニタリング

地下水流動によりこの地域にいかなる地殻変動が生じているかを解明する一つとして、研究所から 2km の地域において精密水準測量を 2004 年から実施している。成果として、①本研究所近傍で 2cm を超える沈降、②2011 年東北太平洋沖地震後にわずかながらも隆起に転じたことなどが明らかになった。水準測量の実施と同時に、水準網の拡充も課題とした。2011 年 3-8 月の水準測量から得られた上下変動は、2011 年東日本太平洋沖地震に伴う水位変化により生じたことなどが明らかになった。

○重力測定および精密水準測量による超深地層研究施設周辺モニタリング

研究館 (MGA)、正馬様観測点 (SBS)、そして戸狩観測壕 (TGR) で得られた絶対重測定の結果、東北地方太平洋沖地震による地震地下水応答に対応した過去最大の重力低下が観測された。

○GPS 記録と応力連続記録による 2011 年 3 月 11 日東北地方太平洋沖地震の断層モデルの再検討

国土地理院の GEONET の GPS 1 秒サンプリング記録と、東濃地震科学研究所の陶史の森観測点の応力連続記録を用いて、2011 年 3 月 11 日東北地方太平洋沖地震の断層モデルの再検討を行った。主たる目的は次の 3 点である。逆解析の解の一意性を上げるには異質の記録を併せ用いれば良いことは一般に知られていることであるが、東北地震についてはその様な試みはない。東北地震について応力記録という異質の連続記録を併せ用いることによって解の分解能を上がるかどうかをチェックした。主地震断層モデルによって、陶史の森の応力記録の主要動の最初のパルスは説明出来るが、後続パルスはまったく説明できない。そこで副パルスと応力記録の後続パルスを説明する副地震断層モデルを求めた。その結果、走向 N145E、ほぼ垂直面上の左横ずれ型、気象庁発震時から 65 秒後に破壊が始まり、ほぼ 30 秒かけて Mw8.4 に匹敵するモーメントを解放する断層モデルが求まった。

○精密水準測量によって検出された2014年噴火の準備過程

2006 年から 2014 年の水準測量データを用い、2014 年噴火に至る噴火準備過程の解明を試みた (Murase et al. 2016)。過去の水準測量結果から上下変動の時間変化を検討すると、2006 年以降は山頂方向の隆起を示す変動パターンであることが明らかとなった。2007 年の小噴火後も、その隆起は沈降に転ずることはなく、2009 年まで隆起傾向

が継続している。短い区間の測量ではあるが 2013 年の測量結果からも、山頂方向の隆起が 2013 年まで継続していたことが示唆される。そして、2014 年噴火をはさむ 2009-2014 年の測量では、山頂方向の沈降が検出された。

○2014 年御嶽山噴火前における割石温泉（岐阜県飛騨市）の間欠泉でのガス噴出回数の増加

地震活動に伴う温泉での湯量増加や震動、間欠泉周期の変動を捉える目的で、岐阜大学が割石温泉（自噴泉、岐阜県飛騨市）などで 1998 年から電磁流量計を用いて湯量などの観測を開始し、現在は東濃地震科学研究所が引き継いでいる。これまでに、周辺域での地震発生に伴い湯量が増加し、その後、緩やかに減少する現象がしばしば観測されてきた。2014 年 9 月の御嶽山噴火では顕著な湯量増加は観測されなかったが、自噴時のガス放出回数が 2014 年 8 月から確実に増加し、噴火でピークに達し、その後に減少したことが観測された。

○制御震源による弾性波速度構造調査

瑞浪超深地層研究所建設に伴う発破を人工震源と見立て、震源近傍で地震動の観測を行うことで立坑周辺の地震波速度構造推定と波線経路の岩石中に含まれる不均質（含水した空隙など）を定量的に推定した。解析から亀裂は花崗岩中には 31%、瑞浪層群中には 41%含まれており、その亀裂は花崗岩では 100%飽和、瑞浪層群では 70%程度飽和していることが示唆される。

○gPhone 重力計を利用した絶対重力観測補間手法

gPhone 重力計は precision が $1\mu\text{Gal}$ なので絶対重力測定と同程度であり、長期の連続観測を 1Hz 以上のサンプリングレートで行う事が出来る相対重力計である。重力観測の効率を上げるにはなるべく絶対重力計 FG5 の消費を抑えながら相対重力計で補完する事が今後重要である。FG5 の依存度を下げても、高品質な重力観測を維持するには相対重力計データの品質と解析手法の向上が不可欠である。そこで、御嶽山山腹（御岳高原ホテル）における gPhone 連続観測で得られたデータを用いて解析方法の確立を目指した。

○重力時間変化の観測

過去全ての研究館（MGA）、正馬様観測点（SBS）、そして戸狩観測壕（TGR）における絶対重力測定の結果を解析した。2011 年以降いずれの観測点においても重力値が低い傾向が継続している。過去の地震重力応答および地下水位データとの対比から、2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震による広域地下水変動が主要因であると考えられる。

○絶対重力計と相対重力計による絶対重力の測定

絶対重力測定を、瑞浪地科学研究館測定室（MGA）、正馬様観測点（SBS）、そして戸狩観測壕（TGR）の 3 点において最近 10 年間実施してきた。2010 年後半を境に重力値の減少する傾向がみられる。重力値の減少は 2011 年東北地方太平洋沖地震に起因するとも解釈できる。この重力値減少の傾向は、国土地理院の GEONET 観測網で検出された東日本太平洋沖地震による上下変動でも、東濃地方では隆起傾向（1cm 程度）が認められること（「全国の地殻変動概況」の「地震後の地殻変動（上下）-累積-」サイト）、および衛星重力ミッションから得た日本列島の重力変化（例えば、Wang et al., 2012）でも重力減少のエリアに東濃地方は位置し、推定される重力減少の値と矛盾しない。

○地殻活動の総合的研究

新しい研究分野の開拓を目的として地殻活動研究委員会の活動を継続している。これは全国の地殻活動研究者（約 30 名）が委員であり年 2 回研究会を開催し、研究会を開催している。

○時系列情報を含む地震活動度分布図（時間円表示図）の作成

気象庁一元化震源を用いて、東濃地域周辺の時系列情報を含む地震活動度分布図（時間円表示図）を作成した。また、同じ手法で、2011年東北地方太平洋沖地震の余震活動や誘発地震活動の地域的特徴を概観する図を作成した。

○2011年の東濃地域で発生した地震の発生機構

東濃地域で発生する地震活動の特徴を明らかにするため、東濃地震科学研究所 (TRIES) の地震観測網の地震波形データと高密度地震観測網 (Hinet) の地震波形データを用いて、①内陸活断層の地震、②沈み込むフィリピン海プレート（フィリピン海スラブ）内の地震について震源決定および発震機構解の推定を行った。調べた地震は

①恵那の地震[2011年6月30日11時49分] ②岐阜県美濃東部の地震[2011年12月14日13時01分]である。

○3次元アレイ観測によるプレート境界に発生する深部低周波地震の研究

内陸地震の発生には、プレートの沈みこみ運動が関連している。フィリピン海プレートが沈み込んでいる東海地域からの西日本では、海溝型巨大地震の発生だけでなく、内陸下の深部でスロースリップや深部低周波地震 (LFE) が発生している。LFEは微小で、初動が不明瞭であることにより、その発生原因は不明で、通常な観測では正確な震源決定も困難である。そのため豊田市下山地区周辺に地震計を10台配置し、アレイ観測 (SMYアレイと呼ぶ) を行い、LFEの検知能力を向上させた。平成28年度はそれら観測データの解析に努め、高精度の震源決定に挑戦した。すなわち、このSMYアレイのデータと他機関の観測データと併合し、600m深のボアホール型地震観測点をもつ3Dアレイを構築し、その観測データの解析を進めた。その結果LFEと普通地震の震源は、3Dアレイの直下では深さ約36kmを境にして上下に分かれていて、両者の発生場所は明らかに違うことが分かった。

○2017年長野県南部の地震 (Mj5.6) 地震波放射エネルギーの推定

2017年6月25日に長野県南部を震央とするMj5.6の地震が発生した。この地震の震源は、1984年長野県西部地震の震源域近傍にあり、2014年に噴火した御嶽山から5kmほど東に位置する。また、本震は規模のわりに有感だった領域が広く、この地震の地震波放射エネルギーが相対的に大きかったことが示唆される。そこで、活発な余震を利用して、本震と一部の余震の地震波放射エネルギーを推定した。

○アレイ観測による深部低周波地震とプレート内地震の研究

平成29年度はそれら観測データの解析に努め、Hi-netのデータを加えて高精度の震源決定に挑戦した。更にプレート内地震 (Intraslab earthquakes) の震源決定も行い、LFEの震源と比較した。それによると、LFEは海洋プレートがマントルウエッジと接触しているプレート境界周辺に分布し、そこはS波速度の遅い領域である。一方、プレート内地震はLFEよりやや深く、海洋モホ面に近い海洋マントル内に分布しているように見える。

○直下に存在する沈み込むフィリピン海プレートスラブ内の地震活動

これらの地震観測データをHinet地震観測網と結合して処理することにより、沈み込むスラブ内で発生する地震活動の震源情報はより高精度になり、発生メカニズムをより詳細に検討できる。地表付近では横ずれを示唆するメカニズムが多く、一方、スラブ内では、東西方向の伸張場を示唆する正断層タイプのメカニズムを示す地震が卓越する。とりわけ、東濃地方の直下、ちょうど沈み込むプレートスラブの底面に該当するところでは正断層型タイプのメカニズムを持つ地震が多い。今回明らかにした沈

み込むフィリピン海プレート スラブ内の地震は、このスラブ形状により生じる応力変化を反映したメカニズムを示すと考える。

○応力計・歪計を利用した PL 波の研究

当研究所が展開しているボアホール型の地殻活動総合観測装置には、応力計／歪計とともに加速度計も備えており、多項目の物理量の同時観測が可能である。国内で発生した大地震の一部で、P 波と S 波の間の長周期地震動が、応力計／歪計で観測されている。このような長周期地震動は、P 波到達直後から始まっていることから、W phase でなく、PL 波であることが推測される。このような PL 波について、当研究所が展開しているボアホール歪計の鉛直成分記録を解析した。S/N 比のよい 27 イベントの歪計記録の振幅スペクトルの形状から 3つのカテゴリーに分類した

○北朝鮮の核実験による地震波の観測

昨年度に引き続き、今年度においても、2017 年 9 月 3 日に北朝鮮による核実験が行われた。過去に行われた核実験と比べると観測された地震波の振幅が 10 倍ほど大きく、気象庁や USGS などの機関が推定したマグニチュードが、過去のものよりも 1桁近く大きいことと調和的である。今回の核実験および当研究所のボアホール観測点の一つである観測点 TGR350 で観測された過去の核実験との波形の比較をした。その結果過去の核実験による波形との位相の適合度は、かなり高いことがわかる。しかし、 $t=12$ 秒付近のフェーズを見ると、過去の核実験による波形に比べて高周波成分が少ないように見える。

○御嶽山周辺の上下変動

本研究所は、名古屋大学、日本大学、気象庁などを行う御嶽山周辺の水準共同測量に参加し、その考察に加わる。2016 年までの測量から、御嶽山では 2014 年の噴火を契機に山頂方向の沈降が観測されている。2017 年は 4 月 23-28 日に実施した。なお、水準路線は噴火後ながらも拡張され、王滝山頂から東に 3.5km まで水準点が設置されている。その結果、2016 年 9 月からの 9 ヶ月間に山麓部では大きな沈降が検出されなかったが、王滝山頂にもっとも近い水準点で 5mm の沈降が観測された。これは山頂部での地震活動や噴気活動の低下に対応し、火山活動低下を示す内容である。

○2018年愛知県西部の地震の地震波放射エネルギーの推定観測体制の特徴

2018 年 4 月 14 日 15:13 (JST) に愛知県西部において Mj4.5 の地震が発生し、東濃地域でも有感であった(瑞浪市で震度 2) この地震の最大の特徴は、Mj4.5 の地震発生の約 5 時間前に Mj3.6 の地震が発生したことであり、これら2つの地震の震源は非常に近く、メカニズム解もかなり類似している(図 2.1) これらの地震は、1945 年三河地震の震源付近に位置するため、この領域における地震の物理を理解することは重要である。そこで、本研究では、これらの地震の地震波放射エネルギーを推定した。

○2011年東北地震による短周期先行津波

東北地震の時に得られた GPS 1 秒サンプリング地震記録によれば、富山平野の地震動は、周期が 60 秒から 200 秒、最大振幅は東に 60cm 程度、南に 30cm 程度、鉛直上方に 30cm 程度である。それと同時に、富山港の気象庁の潮位記録(15 秒サンプリング)に、周期 60 秒程度、最大振幅 10cm 程度の短周期先行津波が現れた。潮位記録の最初の 1 サイクルほどは、GPS 1 秒サンプリング地震記録の水平東西成分(UEW)とよくピーク・ピークの対応するように見えるが、上下成分とはあまり対応しない。GPS 1 秒サンプリング地震記録と潮位記録の比較によって、初めて、

地震動が津波 に転換される過程の一端と考えられる。

○陶史の森・日吉・正馬様・深地層研ステージ（応力）観測点の結果

東濃地震科学研究所では 2003 年 3 月 30 日、多成分歪計の屏風山観測点への設置以降、現在まで、多成分歪計・応力計の設置されたボアホール観測点 6ヶ所から成る十字アレイが稼働している。弾性 論の不変量のひとつである直交 2 成分の和、すなわち面積応力の最大振幅に注目して、2016 年末までに記録された全地震について、面積応力の最大振幅（ σ , Kpa）と震源距離（R, km）と地震の規模（MJMA）の関係を整理した。その結果、観測される面積応力震動の最大振幅の対数は、震源距離 1,000km 以内では、地震規模に比例し、距離の 2 乗で減衰し（実体波的）それ以上では、距離の 1 乗で減衰する（表面波的）関係式が得られた。

○地震の表面波の鉛直応力と水圧の解析

研究所により設置された歪み計・応力計アレイにより、これまで非常に多くの地震波形が得られて きている。これらのデータから様々な現象や特徴についての知見が得られつつある。その中の一つ として、地震波通過時の鉛直方向の応力の存在と水圧との関係がある。今期、半無限弾性体内のレイ リー 波の場合の応力分布を計算し、間隙弾性を考慮した地下水圧の大きさから有効弾性応力と応力 計の応答を考慮して、観測されるべき鉛直応力計の出力量と水圧 の関係を調べた。

○制御震源の実用化と有用性の検証

2010 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。2018 年度には、地震計アレイ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 月以降のデータには、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。

○2017 年 6 月 御嶽山近傍で発生したM5.6 地震の断層モデルの考察

2017 年 6 月 25 日に、本水準網の直下で M5.6 の地震が発生し、軽微ながら被害が生じた。地震観 測から推定された震源情報をもとに、この地震前後に検出された上下変動データ、最大 28mm の隆 起から断層モデルを推定した。その結果、長さとお行きがそれぞれ 4km 前後で北東南西方向に走向する傾き 45 度の断層が、北西側が最大 88mmほど隆起という正断層の断層モデルが推定された。大学などで求めた震源分布と一致する結果である。

○トンガの海底火山噴火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。それに伴って 8000km 離れた当研究所の気圧計、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。通常的气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。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。

○掘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

東濃地震科学研究所（TRIES）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、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。観測された歪・傾斜変動を解析し主歪や最大傾斜変動などを求めた。その結果のまとめが下図左に示されている。その結果、1. TGR350（深度：350m）においては水位の上下に対応して NNW 断層と同様な左横ずれ・右横ずれの最大せん断歪が得られた。TGR165 観測点の傾斜は断層に直角な傾斜が観測された。

○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。

○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

ー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ー

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 1 km 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、1 km 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 350 m、2002 年には同じ屏風山のボアホール (BYB)、深さ 700 m、さらに 2009 年に陶史の森のボアホール (TOS)、深さ 500 m 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。

○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

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な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 箇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、釜石鉾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鉾山のコアに対する結果を報告する

○歪変化の空間分布による短期的スローイベント発生源モデルの再考

沈み込み帯で検出される各種スロー地震は、通常の地震と同様に断層運動としてモデル化されるが、これらがスローかつ非定常な現象となるメカニズムは不明である。深部スロー地震の一つである短期的スロースリップイベント (S-SSE) について、発生域における変形様式を考慮して、発生源モデルの再推定を行った。本研究では、S-SSE 発生源で断層すべりならびに断層面に対して法線方向への変形が生じると仮定し、それらの変形量を歪計・傾斜計のデータから推定した。

11.3 地域の地震防災に貢献する調査研究

○地震観測網の構築と地盤震動調査

瑞浪地域に地盤震動調査を目的に約 50 点の地震観測点を高密度に配置した観測網を構築し地盤の揺れやすさ分布などを調べた。

○超高密度地震観測網による震度分布（東北地方太平洋沖地震）

超高密度地震観測網によって 2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震 (M9.0) の東濃地域における震度分布が求められた。震源に近い岐阜県中津川市や恵那市の盆地部では最大震度 4 の揺れが観測され、瑞浪市を含め広範囲で震度 3 相当のゆれが観測されている。

○地盤震動特性の調査研究

地盤振動特性の調査研究として、岐阜県東濃地域に約 50 点の地震計を高密度に配置し（超高密度地震観測網）、自然地震による振動を観測する地震観測を行ってきた。IT 化事業の推進によって、データ収録作業が効率化し、有効な解析データ量が増えた。超高密度地震観測網によって観測される地震動記録を用いた、準リアルタイムで計測震度相当の地盤震動分布を解析するシステムを継続して運用した。加えて気象庁計測震度相当の地震動分布だけではなく、キラーパルスと表現されるような振動に対応する最大加速度 (PGA 震度) や長周期振動や建物被害に大きく影響すると考えられている、最大地動速度 (PGV 震度) の分布もあわせて解析するようにシステムを拡張した。

○東濃地盤震動特性と地盤のゆれやすさマップの比較

高感度地震観測による Site Effect (研究所報告 seq. 23) と内閣府防災情報ページの「地盤のゆれやすさ全国マップ」および防災科学技術研究所の J-SHIS 「全国地震動予測地図の表層地盤」との比較を行った。東濃地域では、J-SHIS 表層地盤増幅率の大半は個々の観測点における増幅率の標準偏差と同程度である。表層地盤増幅率のマップは統計的にみれば地震観測と同じ結果であるが、地震被害予測の立場からすれば、被害の過少評価となる可能性がある。

○地域地震危険度研究

地震時の人間被害の発生・減災に注力した研究を進めてきており、いわゆる関連死につながるような長期にわたる心的・健康被害に関する学際研究を進めている。震災関連疾患のうち、PTSD (心的外傷後ストレス障害) に代表される精神系疾患に注目し、文献調査をベースに定量化モデル構築に向けて助走的研究を実施した。併行して、震災関連疾患の時系列変動性解明に向けて平常時—地震時の救急活動を通じた研究を始めた。これらの一連の研究を含め、地震に伴う人間被害に関する学際研究の一段の進展を図った。

○激甚被害研究

2004 年新潟県中越地震に伴う被災・地域住民対応等に関する総合調査データの解析を進め、特に余震多発がもたらす住家被害の累加・生活への影響等に注目した要因分析に力を入れた。他方、「既往地震を視る」ことを主眼とした映像記録 (ビデオフィルム、アニメ等) を収集し、防災普及への資源充実に努めた。また、地震に伴う健康被害発生の諸問題を中心に学

際的・分野横断的に考究を続けており、近年はこの流れの中で消防官署が管轄する救急車-地域が保有する防災インフラ資源の1つの活動記録に注目し地震時の活動の実態を分析することで「地震に伴う多様な疾病の消長関係」を把握し、「救急車活動に関する平常時-異常時の需給関係」の把握に努めている。

1995年兵庫県南部地震は地震に伴う健康被害を幅広く捉え、被害発生の要因を分析し軽減策を見出すべく本格研究開始に貴重な一石を投じた。地震に伴う健康被害といえれば従来は地震のユレの最中・直後の死傷者発生問題に限定、ないしは最優先の扱いに終始してきた。これを大きく突き破り、被害（疾患）対象を時間的に拡大して考究することは勿論のこと、取り扱う被害（疾患）種別も一段と拡大した。このような発展の経緯と現状を理解し、さらに問題点を探ることを目的としてわが国医学研究文献の代表である医学中央雑誌（医中誌）文献DBを材料とする文献書誌学的研究を実施した。

○地域基準研究

1大課題「地域地震危険度研究」、 「激甚震害研究」に大きく区分して研究を続ける一方で、適宜の融合を計ることで成果の一体化を心がけ、また成果の地域還元を意を用いている。前者では「孤立中山間地の地震防災問題」を採り上げ、後者においては地震に伴う人間被害について継続的に研究を続けており、さらに兵庫県南部地震、中越地震、中越沖地震における人間（健康）被害の調査研究を推進する。また、「地域地震危険度研究」、 「激甚震害研究」の研究成果を地域に還元すべく「地域基準研究」を開始した。手始めに、救急車の活動がこれを写す鏡となり得るとの視点に立ち、瑞浪市においてその時間消長把握に努め、併せて平常時・地震等異常時における救急活動の需給関係について考察を行なった。

○瑞浪国際シンポジウム(Mizunami International Symposium on Earthquake Casualties and Health Consequences)と防災講演会の開催

1999年12月9日と10日に、研究所主催の「人間被害の発生と削減のワークショップ 1995～現在～今後」が開催され、延べ50名の参加者・発表論文30篇を数えた。以降、10年という月日がたち人間被害に関する研究も相応の進展をみた。その一方で、この間に発生した国内外の激甚地震は学ぶべきことがさらに多いことを教えてくれた。そこで、1995年の兵庫県南部地震から15年、ワークショップから10年という月日における人間被害について、調査・研究の到達点を国際比較を含め再度確認し、人間被害の抜本的低減に向けて新たな地平を見出すべく、地震による人間被害と健康被害に関する瑞浪国際シンポジウムを開催した。2010年11月15日～16日（2日間）地域交流センター「ときわ」1F多目的ホールで行われた。当課題に関係ある地震工学・災害医学・社会学・防災担当者等、国際的に多方面から両日で延べ66名に達する参加者があり、25篇の発表論文に対し、国内外における人間被害の実情と軽減方策に関する活発な議論が展開された。

○地盤振動特性の調査研究

地盤振動特性の調査研究として、岐阜県東濃地域に約50点の地震計を高密度に配置し（超高密度地震観測網）、自然地震による振動を観測する地震観測を行ってきた。超高密度地震観測網によって観測される地震動記録を用いた、準リアルタイムで計測震度相当の地盤震動分布を解析するシステムを継続して運用した。2011年12月14日13時01分に岐阜県東濃地域の瑞浪直下で発生した地震（マグニチュード5.7）などに対して有効に作動した。

○地域の「ゆれやすさ」解析

超高密度地震観測網で得られたデータから東濃地域の地盤振動増幅特性を求める調査研究として、地域の「ゆれやすさ」を求める手法を開発し、東濃地域における「ゆれやすさマップ」を作成した。(2)。「深地層における地震発生関連現象の総合的研究」において実施している深部ボアホール観測点における地震動を震源から生じ東濃地域の花崗岩基盤では様な地震動と仮定し、地表付近の地震動を比較することにより地表付近での地震動増幅分布を明らかにした。震動増幅の要因としては、花崗岩基盤の上にある堆積層の影響が考えられ、重力異常値や表層の地震波速度構造とよい対応が見られた。表層地震波速度探査や重力探査の結果と組み合わせることによって、長期の地震観測を行えない地域でも「ゆれやすさ」の分布を調査することが可能となると考えられる。

○地域危険度研究

地域の救急活動能力が地震等の異常時には不足し、地域住民の健康支援資源として不十分なことがいわれている。この問題の改善を目標とする実情調査を、研究所が立地する瑞浪市を対象として実施した。その際、結果の一般性を検討すべく人口規模が大きく異なり、また防災先進地域とされている静岡市との対比をこころがけた。

○激甚震害研究

2011年東日本大震災に伴う人間被害（死傷者の多発問題）に注目し、特に死の激甚性を評価するための尺度を構築し、既往地震群との対比を計った。1995年の神戸の地震が震動に起因する家屋倒壊とそれに伴う死傷者多発の抜群事例であって、「負傷者数>死者数」の不等関係があったのに対して、2011年東日本大震災の死傷者では逆に「負傷者数<死者数」の不等関係にあるようにみえる。しかし、このような不等関係が内陸地震と津波を伴う海洋性地震がもつ特徴的な性質かどうかの問題は意外に検討されていない。ここではこういった事情に注意し、上記の2地震の他にいくつかの地震を採り上げてこのような不等関係の成立の有無について調べ、併せて死者多発低減戦略への基本知見充実を計ることを考えた。

○地域地震防災基準研究

地震に伴う死者を減少させるためには、現状を把握することが最重要である。そこで、岐阜県における木造居住者の近年の死者発生危険度の変化を明らかにすべく、平成5年～平成20年における木造家屋の更新状況の変化に伴う平成7年・平成12年・平成17年における木造家屋の倒壊に伴う死者数の推定を行った。

○2011年東日本大震災に伴う人間被害の激甚性(2)既往地震群との対比でみる死者発生の年令等依存性

東日本大震災の人間被害（死者の発生）はきわめて甚大であった。こういった激甚震害の再発を防ぐための基本は死者発生の要因について詳しく調査し、分析を進めることである。この視点から継続調査を進めている。初年度はその全体像把握に注力したが、今年度は個別要因の主要な項目となる「死者発生の年令依存性」に注目した。

○地域への地震情報発信の高度化に関する調査研究

東濃地震科学研究所では地殻活動総合観測として、様々な計器を用いて観測を行っている。これらの観測データは解析の際に統合的に用いられることが多く、観測データ自身の統合も必要である。そのため観測データは特殊なものを除き、全て東大地震研究所が提唱するWINフォーマットに統一して収録を行なっている。平成25年度は引き続き、収録用機器の増強やフェイル・セーフ対策を施し、観測記録に欠落が出ないように運用を行った。また、ほぼ全観測点の状態を準リアルタイムで研究所ホームページ上から

把握することができるシステムも運用継続し、研究にも役立てている。また、地震観測網で得られる地震動波形記録から準リアルタイム（10分ごと）に東濃地域における「揺れ」を解析し、イベントリストを作成するとともに、前節「地域のゆれやすさマップ」作成に資する解析データも生産している。

○濃尾震災の被害資料の検討（地学的立地環境や社会環境からの考察）

1891年濃尾地震において、出現した断層の南西約10kmの濃尾平野と揖斐山地の境に位置する岐阜県神戸町で数kmも離れない町内で家屋全潰がほぼ100%から0%まで著しく異なるのが明確になった。揖斐川の扇状地に立地する同町ゆえと考えられる。

村松郁栄や飯田汲事は、濃尾地震による被害状況を調査研究した。しかし、彼らは時間がなく、町内や字単位で被害状況を議論するまでに至らなかった。昨今、GISなど地図表現では便利なソフトウェアもあり、今回は明治24年岐阜県震災誌附録1市町村別戸口被害一覧表（岐阜県、1891）、および飯田（1979）による愛知県の被害状況を当時の市町村単位で表現することを試みた。

○2011年東日本大震災に伴う人間被害の激甚性（続）

前年に引き続き東日本大震災に伴う人間被害（特に死者の年令依存性）について研究を継続している。一般に地震等の襲来時には災害弱者といわれる乳幼児・高令者において死亡率などが特に高くなることがいわれているが、こういった関係が果たして常に正しいのかについて詳しい分析が出来ているわけではない。こういった疑念から、死者発生率の年令依存性に注目した考察を開始し、漸次考察を深めている。その際、当面の地震にのみ限定するのではなく可能な限り多くの内陸性・海洋性の両地震群の資料を、PubMed等の医学方面の文献DBにも範囲を広げながら探索し、一般特性の把握に努めた。その結果、年令を横軸（右向きに昇順）、縦軸を年令別の死亡率（%）とした関係でみると年令軸の両端に位置する乳幼児・高令者の双方で大きな値をとり、中間の青・壮年期で小さくなる形—英語のU字形—をとるものがあり、さらに加齢に伴って死亡率が右上がりに漸増する—英語のJ字型—分布をもつものも多々あることが判った。

○地域の「ゆれやすさ」

東濃地域における「ゆれやすさマップ」の推定確度の向上と汎用化を目指し、平成26年度は日本全国での「ゆれやすさ」の推定を行った。はじめに気象庁の震度カタログを用いて、司・翠川（1990）による震度の距離減衰式について再解析を行い、式のもつ物理的意味を解釈した。次に、気象庁の震度カタログと距離減衰式から、地震による地域ごとのゆれやすさを計算し、統計処理することで日本全国「ゆれやすさ」分布を推定した。

○濃尾震災の被害資料の検討（地学的立地環境や社会環境からの考察）

1891年濃尾震災は最近にこの地域を襲った最大規模の地震災害と同時に、300人規模の村落での災害状況が詳細に保存されている。この被害資料は次の地震防災に重要な情報をもたらすものである。そこで、当時の被災状況をGISソフトにより表現し、被害の特徴を明らかにし、表層地質などと比較検討した。

○地震津波に伴う死者発生研究

今までの調査・研究を通じて、地震（津波）に伴う死者の年令依存特性が意外に多様であることを明らかにしてきた。その一方で特筆すべきパターンが2つあることも判った。すなわち、横軸に年令を右に向けて昇順にとり、縦軸を死亡率とした座標上でみた場合、その一つは英語大文字のU字型であり、他の一つはやはり大文字のJ字型である。特に、2011年東日本大震災においては後者、すなわちJ字型となる地域が多いこ

とを確認した。そうだとすると、災害弱者といわれる乳幼児の死亡率が高齢者に比べて格段に低いこととなり、このままでは一寸理解し難い。そこで、本論ではこの問題に注目し、2つの異なる視点から考察した。1. 平成年死亡率との対比から 2. 余命年数損失の視点から。

○地域への地震情報発信の高度化および地震動特性の地域的相違に関する調査研究

東濃地震科学研究所では地殻活動総合観測として様々な観測を実施している。H26年度までは、岐阜県に限定した場合、土岐市：1 地点、御嵩町：3 地点、瑞浪市：10 点、恵那市：6 点、中津川市：5 点の計 25 地点の観測網を展開していたが、H27 年度では観測網の簡素化を行い 16 地点で観測している。有感地震があった場合、観測記録から気象庁計測震度に相当する震度に直し、HP で公開し防災への取り組みを喚起している。

○濃尾地震による被害状況の再検討

濃尾地震は国内でもっとも激甚な災害と同時に、岐阜県下では有史以来の自然災害でもある。十分な被害資料が残るとは言い難いが、現在でいう町丁字規模となる町村単位の被災資料が整理される。これは防災の基本がコミュニティベースであることを考える貴重な資料である。濃尾地震時の濃尾平野北部、岐阜県南部での家屋全潰率や 1944 年東南海地震時の名古屋市の学区別の家屋倒壊率などを検討すると家屋の全潰率や倒壊率は現在の町丁字レベルで大きく異なることが明らかになった。この違いは主に人工造成地とか砂層、段丘面、自然堤防面といった表層地形の違いによるものと考えられる。すなわち、地域の地震防災を考える上で、町丁字といったコミュニティベースで災害を考察することが極めて大切なことを示している。

○地震災害における経済損失額の予測と復興に関する調査研究

1995 年の兵庫県南部地震は、都市型災害として想像を絶する被害を出し多くの人々の心に深い傷跡を残したばかりでなく、兵庫県内の直接被害総額は約 10 兆円もの経済損失が発生した。また、南海トラフの巨大地震では約 170 兆円の直接被害額と 50 兆円の間接被害になると予測されている。このように地震災害の規模を『被害額』という形で数量的に表現することは、行政側にとっても震災前後の経済政策が立てやすくなるが、この被害額の予測にはまだ多くの課題が残されている。特に、産業面の被害は、直接的なものから間接的なものまで広い範囲に及ぶため、社会に与えるダメージは大きく、その影響は長期にわたる。また、世帯を単位とした経済力の把握とどのように復興して行ったかを知る事も鍵になるといえる。1995 年以降取り組んできた地震による直接被害額の予測のための情報の整理などを行った。また、世帯を単位とした経済力に関する基礎研究に着手している。

○激甚災害における人間被害の研究

2011 年東日本大震災に伴う死者の年令等依存性 ―乳幼児・高齢者の死亡率は常に高いのか？― を主題とした Series 研究を実施している。今までの調査・研究を通じて、地震（津波）に伴う死者の年令依存特性が意外に多様であることを明らかにしてきた。その一方で特筆すべきパターンが 2 つあることも判った。そこで、この問題に注目し、平成年死亡率との対比と余命年数損失の視点からの分析を行った。

○地表地震断層近傍で人的被害が大きくなる特徴についての考察

濃尾地震震災で指摘される地表地震断層近傍で人的被害が大きくなる特徴をより詳細に調査する目的で、三河地震と北丹後地震、熊本地震について考察を進めた。その結果、地表地震断層近傍でみられる全壊家屋と人的被害に大きな被害の原因は地震断層が地表に達した時のずれやそのずれが止まるときに発生する加速度の変化が主な原因と

示唆される。

○地震による人と経済の被害に関する総合的調査研究

数多ある地震災害のうち、一端奪われたら取返しのできない「人間被害—特に死者の問題—発生に 関する実証的分析とそれに基づく軽減」を第 1 の目標とした研究を続けている。この流れの中で、近年は地震・津波に伴う死者の年齢区分別発生状況に関わる Data の収集と分析に注力している。対象とする地震は国内外の近年の主要地震であるが、中でも我が国近年の特大地震である 1995 年阪神淡路大震災・2011 年東日本大震災時の死者発生問題に注目した分析を進めてきている。その結果、年齢区分別の死者発生率 (%) が大きく 4 区分 (J 字型、U 字型、そして高低 Flat 型) で統括されることを提唱した。

民力総合指数に基づく災害の経済損失推定について、過去に国内で発生した地震について、当時の民力総合指数から既存の推定式で見込まれる経済損失額と実際の経済損失を比較した。その結果、推定される損失額は概して実際よりも少額となった。推定式の妥当性、さらには民力総合指数そのものの、推定方法などに問題点があると考えられる。

○東海地震・東南海地震に対する岐阜県・東濃地域・瑞浪市の地震危険度研究

将来発生が予想される東海地震・東南海地震に対して岐阜県・東濃地域・瑞浪市において予想される震度および地震被害想定を調べ地図上に示した。

○鉛直地震計アレイを利用した site effect の深さ依存性

表層地盤の観測地震波への影響を調べるべく、前年度より超深地層研究所ステージにおける常時地震観測のデータ収録を再開した。一般に、観測される地震波は、時間領域においては、震源の影響・伝搬経路の影響・観測サイトの影響の 3 つの影響の convolution で表現され、周波数領域では 3 つの影響の積で表現可能である。同じ震源についてほぼ同じ場所で観測された地震波は、震源の影響をほぼ同じと仮定できるのみならず、伝播経路の影響もほぼ同じと仮定できる。平成 29 年 6 月 25 日に、1984 年長野県西部地震の震源域近傍において、発生した Mj5.6 の地震を解析した。

○高密度地震観測網を活用した地動特性

2017 年 6 月 25 日に長野県南部を震源とする Mj5.6 の地震が発生した。この地震による地震動は、当研究所の高密度地震観測網においても観測されており、観測された地震波を用いて、計測震度相当を求めた。全体的に、土岐川流域周辺では、計測震度相当 3 の観測点が多く、中山間部の観測点ではそれ未満の観測点が多かったことがわかる。

○地域の地震防災に貢献する研究および市民との積極的な交流

活断層で発生する地震は、個々の履歴も少なくデータの信頼度が低い上に、発生頻度が海溝型地震の 10 倍ほど長い。それだけに、防災対策は厳しいものがある。だが、地元住民に活断層は必ず活動し、大地震が必ず起こることを周知することは大切である。また、地震災害は揺れやすさ分布や活断層の位置関係から、町内と要った規模で大きく異なり、町内をベースにした対策が必要である。このような観点からブックレット「東濃地方の地震活動とその被害」を発行し、市や町内、各種団体が催す講演会にて講演した。

○高密度地震観測網を活用した地域地盤構造とその地動特性に関する研究

東濃地震科学研究所で運用している高密度地震観測網の記録は、これを用いて堆積盆地の地盤応答 を点ではなく面的に把握できる可能性を有している。

高密度観測網の中で地盤の影響の少ない観測点がある か調査した。観測網のうち、

山側に位置するH026（笹平）H029（陶猿爪）H039（明智）について、地震記録のH/Vスペクトル比をとった。次に、付近のボアホール観測点BYB（GL-1020 m）とのスペクトル比を調べた。結果を見ると、H026とH029では、BYBとのH/Hスペクトル比のピークが上述のH/Vスペクトル比のピークと一致する。これは各観測点のH/Vスペクトル比のピークがH（水平動）の地盤増幅に起因することを示す。

§ 12. 補助事業による成果（原子力発電所、地震予知、地域の地震防災 関連のみ）

12. 1 地震予知研究への貢献および将来の南海地震など

- 当研究所はボアホール地殻活動総合観測装置を開発している。これは深度1kmなどの地下深部において地震動、応力、歪、傾斜、地磁気、温度などを高精度で観測する装置である。深部で観測できるため人工的なノイズがなく高精度の観測ができる。このような計器は世界のどこにも存在しない。
- 大学、官庁等が採用し、30ヶ所以上に設置されており、将来の南海地震などの地震予知研究のためのデータを蓄積している（観測点分布などパンフレット参照）。また、この計器により得られた論文・報告も多い。

12. 2 高レベル放射性廃棄物処分に重要な地下水流動に関する新しい解明

- 日本原子力研究開発機構の立坑内や立坑周辺において、応力、歪、傾斜、地震動、地磁気、温度など種々の観測を継続している。これらのデータ解析により地下水と他の地球物理学的観測成分との関連が明らかになりつつある（一部 後述資料：パンフレットに記載）。このような総合観測による解析は、新しい研究手法である。

12. 3. 活断層などの活動時期、切迫性などの推定と原子力発電所

- 地震震発生を研究するには歪の観測よりも直接、地震発生に関連している応力を観測することが求められていた。
- 当研究所ではボアホール応力計を開発し、更にその高度化を進めている。近い将来、当研究所が開発する応力計が、活断層などが存在する原子力発電所敷地内に設置されれば活断層の現在の応力状態および応力の蓄積状態がモニター出来るようになる。それにより活断層が危険な状態なのかまだ活動する状態にないのかなどの推定に利用できる。活動する状態にない場合には活断層地域であっても原子力発電の稼働の可否の判定に資すると考える。

12. 4 地域への防災関連知識の向上

- 講演・講義などを適時行っている。H28年度は講演・実習5、そのほか各種催し物へも積極的に参加している（H28事業報告書参照）。また、防災教育用リーフレットを発刊するとともに、これを講演会等で配布し、地域住民の防災意識の高揚を図っている。

12. 5 地域へ防災関連情報提供

- 研究所のホームページを随時更新し、常に新しい情報を提供しており、地域住民、行政が自由にアクセスし情報を得ることができる。また、市の防災担当課が作成予定の防災マップ等の作成に最新の情報を提供することとしている。

§ 13. 研究成果リスト

これまでの主な研究成果（研究報告書・論文等）を述べる。

研究テーマ特集に関する東濃地震科学研究所報告書

- Seq. No.1 岐阜県東濃地域の地震時安全性に関する調査(170p), 1999年3月
- Seq. No.2 地震時の人的被害に関する総合研究 (282p), 1999年3月
- Seq. No.3 地震時の人的被害に関する総合研究(2) ワークショップ特集号 (240p), 2000年3月
- Seq. No.4 地震防災の教理化に関する総合研究(1) 報文・文献資料収録 (240p), 2000年3月
- Seq. No.5 屏風山断層調査研究委員会報告書 (133p), 2000年3月
- Seq. No.8 阿寺断層構造調査(活断層研究委員会報告書) (158p), 2002年3月
- Seq. No.9 地域防災対応調査特集(299p), 2002年3月
- Seq. No.11 地震防災 人的被害研究特集 (187p), 2003年3月
- Seq. No.13 地震防災分野-岐阜県・東濃地域特集-, 2004年3月
- Seq. No.15 地震防災 震害連鎖特集(190p), 2005年4月.
- Seq. No.17 地震防災 市町村防災対応総括研究. (196p), 2005年12月
- Seq. No.18 地震防災 2004年新潟県中越地震特集. (157p), 2006年3月
- Seq. No.19 地震防災 震害連鎖特集(2). (228p), 2006年11月
- Seq. No.22 地震防災 震害と防災特集(2分冊 & 別冊), (215p & 397p), 2008年3月
- Seq. No.24 地震防災 震害と防災特集. (213p), 2009年3月
- Seq. No.26 地震防災 震害と防災特集. (205p), 2010年3月
- Seq. No.28 人間被害と健康被害に関する瑞浪国際シンポジウム. (182p), 2011年3月
- Seq. No.30 地震防災 震害と防災特集. (131p), 2012年3月
- Seq. No.33 地震防災 実践的地震防災教育・活動(平成25年度). (139p), 2014年3月
- Seq. No.35 地震防災 実践的地震防災教育・活動(平成26年度). (92p), 2015年3月
- Seq. No.37 地震防災 実践的地震防災教育・活動(平成27年度). (209p), 2016年3月

その他の報告書(地震予知総合研究振興会編)

- 岐阜東濃地域の地震災害に対する安全性調査報告書(参考資料付属) 1997年12月.
- 岐阜東濃地域の地震時安全性に関する調査 1999年3月.

論文発表(平成9~13年度)

1. 東濃地域活断層調査委員会: 東濃地域の地殻変動: 岐阜東濃地域の地震災害に対する安全性調査, 岐阜県, (1998)
2. 田中俊行・青木治三・大下賢一・石川昌幹・野崎京三・大西正純, 2001, 恵那山断層オーバーステップ域の基盤構造, 地震 2, **54**, 319-330.
3. T. Tanaka, H. Aoki, M. Okubo, M. Onishi, and K. Oshita, 2002, Exploration of subsurface structure across the Atera fault zone, Technical Note of the National Institute for Earth Science and Disaster Prevention 234, Proceedings of the International Workshop on Physics of Active Fault, 316-318.
4. 藤森邦夫・向井厚志・石井 紘, 2001, 地殻変動連続観測における2つの実験, 地殻変動研究委員会報告書, 東濃地震科学研究所報告, 6, 11-17
5. 藤森邦夫・石井 紘, 2001, 石井式歪計により観測された地震に伴う地殻変動, 地殻変動研究委員会報告書, 東濃地震科学研究所報告, 6, 19-24
6. Fujimori, K. H. Ishii, A. Mukai, S. Nakao, S. Matsumoto, and Y. Hirata, Strain and Tilt Changes Measured during a Water Injection Experiment at the Nojima Fault Zone, Japan, The Island Arc, 2001, 10, 228-234.
7. Ishii, H. A. Mukai, K. Fujimori, S. Nakao, S. Matsumoto, and Y. Hirata, Multi-Component Observation of Crustal Activity in the DPRI 800m Borehole Close to the Nojima Fault, The Island Arc, 2001, 10, 282-287.
8. 浅井康広・石井 紘・青木治三・大久保慎人・山内常生, 2003, 東濃おけるボアホールと横坑による3次元多成分アレイ観測および能動実験による地殻変動地下水研究と間隙弾性論への適用, 「地殻変動・地球ダイナミクスの研究とモデル計算の最近の成果・今後の課題」, 京都大学防災研究所研究集会
9. 浅井康広・石井 紘・青木治三・山内常生・松本滋夫, 2002, 小孔径2連式地殻活動観測装置による同一ボアホール内歪アレイ観測 — 同一花崗岩内における5m離れた水平歪同時観測 —, 平成13年度地殻変動研究委員会報告書, 東濃地震科学研究所報告, 10, 29-38
10. 浅井康広, 2001, 東濃地域における地殻変動連続観測—地上および地下深部における観測記録の比較、揚水試験結果(序報), 地殻変動研究委員会報告書, 東濃地震科学研究所報告, 6, 37-45
11. Yasuhiro Asai, Harumi Aoki, Torao Tanaka, Yuuichi Kitagawa and Shun-ichi Azuma, 2001, Comparison of Tidal Changes of Ground Strain and Groundwater Observed at Clustered Boreholes in Tono Region, Central Japan, J. Geod. Soc. Japan, 47, 134-140

12. Kawasaki, I., Y. Asai and Y. Tamura, 2001, Space-time distribution of interplate moment release including slow earthquakes and the seismo-geodetic coupling in the Sanriku-oki region along the Japan trench, *Tectonophysics*, 330, 267-283
13. 浅井康広・青木治三・田中寅夫, 2000, 岐阜県東濃地域における地上および地下深部での地殻変動並行連続観測, 精密地球計測技術に基づく長周期地球ダイナミクスの解明, 京都大学防災研究所研究集会(一般) 12K-08, 80-85
14. C.-Y. King, S. Azuma, M. Ohno, Y. Asai, P. He, Y. Kitagawa, G. Igarashi and H. Wakita, 2000, In search of earthquake precursors in the water-level data of 16 closely clustered wells at Tono, Japan, *Geophys. J. Int.*, 143, 469-477
15. 向井厚志, 藤森邦夫, 石井紘, 中尾茂, 2001, 注水試験に伴うひずみ変化, 月刊地球, 野島断層注水実験と誘発地震, No. 4, 240-244
16. 池田隆司, 小村健太郎, 飯尾能久, 石井紘, 小林洋二, 西上欽也, 山内常生, 2001, 南海トラフ地震にむけた陸域での地殻応力・歪測定, 地学雑誌, Vol. 110, No. 4(976), 544-556.
17. Ogasawara, H., S. Sato, S. Nishii, N. Sumitomo, H. Ishii, Y. Iio, S. Nakano, M. Ando, M. Takano, N. Nagai, T. Ohkura, H. Kawakata, T. Satoh, K. Kusunose, A. Cho, A. J. Mendecki, A. Cichowicz, 2000, Semi-controlled seismogenic experiments in South African deep gold mines, *The south African institute of mining and metallurgy symposium series 27*, 293-300
18. 松本滋夫, 石井 紘, 山内常生, 窪田 亮, 超深度ボーリング孔における初期応力測定のためのオーバーコアリングシステムの開発, 東京大学地震研究所技術報告, No. 6, 1-9, 2000
19. 松本滋夫, 石井 紘, 山内常生, 深部ボーリング孔などを利用した初期応力測定の問題点とその原因の検討および改良について, 東京大学地震研究所技術研究報告, No. 7, 15-30, 2001.
20. 石井 紘, 山内常生, 松本滋夫, 最新の地震・地殻変動計測システムによる地震前兆現象の検出, 月刊地球/号外, 東海地震—その新知見—, No. 33, 188-196, 2001.
21. Ishii, H., Yamauchi, S. Matsumoto, Y. Hirata and S. Nakao, Development of multi-component borehole instrument for earthquake prediction study, some observed example of precursory and co-seismic phenomena relating to earthquake swarms and application of the instrument for rock mechanics, 365-377, *Seismogenic Process Monitoring*, 2001, Balkema.
22. 石井 紘, 2001, 新しいボアホール地殻活動総合観測装置の開発と観測, 地殻変動研究委員会報告書, 東濃地震科学研究所報告, 6, 5-10
23. 浅井康広, 2001, 東濃地域における地殻変動連続観測—地上および地下深部における観測記録の比較, 揚水試験結果(序報), 地殻変動研究委員会報告書, 東濃地震科学研究所報告, 6, 37-45
24. Yasuhiro Asai, Harumi Aoki, Torao Tanaka, Yuuichi Kitagawa and Shun-ichi Azuma, 2001, Comparison of Tidal Changes of Ground Strain and Groundwater Observed at Clustered Boreholes in Tono Region, Central Japan, *J. Geod. Soc. Japan*, 47, 134-140
25. T. Tanaka et al. (2001) Non-uniform distribution of water vapor in the troposphere observed with water vapor radiometers in Uji, southwest Japan, *J. Geod. Soc. Japan* .

論文発表(平成14年度)

1. 青木治三(2003); 阿寺断層周辺地域における地殻歪と地震テクトニクス, 月刊地球 25, No. 2, 137-142.
2. 青木治三(2002); 1944年東南海地震はなぜ浜名湖周辺で止まったのか? 東濃地震科学研究所報告書, Seq. No. 10, 15-12.
3. 石井 紘(2002); 東海と伊豆を動かすプレートカップリングと簡単なモデルについて, 東濃地震科学研究所報告書, Seq. No. 10, 13-20.
4. 山内常生, 石井 紘, 松本滋夫, 田村彰治(2002); 微弱電波を用いるデジタルデータ伝送方式, 東濃地震科学研究所報告書, Seq. No. 10, 21-28.
5. 浅井康広, 石井 紘, 青木治三, 山内常生, 松本滋夫(2002); 小孔径2連式地殻活動観測装置による同一ボアホール内歪アレイ観測, 東濃地震科学研究所報告書, Seq. No. 10, 29-38.
6. 田中寅夫(2002); 水蒸気ラジオメータ観測データの解析に用いる relative coefficients の問題点, 東濃地震科学研究所報告書, Seq. No. 10, 63-68.
7. 野原崇史, 黒柳雅登, 熊崎英明, 島田豊彰, 田中寅夫, 大久保慎人(2002); 東濃地域における地震動のパワースペクトルと地盤の関係, 東濃地震科学研究所報告書, Seq. No. 10, 97-108.
8. 浅井康広・石井 紘・青木治三・大久保慎人・山内常生(2003); 東濃におけるボアホールと横坑による3次元多成分アレイ観測および能動実験による地殻変動地下水研究と間隙弾性論への適用, 「地殻変動, 地球ダイナミクスの研究とモデル計算の最近の成果, 今後の課題」, 京都大学防災研究所研究集会プロシーディングス, 124-131.
10. 石井 紘, 山内常生, 浅井康広, 大久保慎人, 松本滋夫, 東濃地震科学研究所 1200m ボアホールにおける「世界

最深」地殻活動総合観測（応力、地震、歪、傾斜、地磁気、精密温度、能動実験）、京大防災研 地殻変動研究会集
プロシーディングス, 81-87.

11. 山内常生、石井 紘、浅井康広、大久保慎人、松本滋夫 (2003) ; 深部ボアホールにおける 地殻変動・地殻応力測定装置の開発—成果と将来計画—, 京大防災研地殻変動 研究会集プロシーディングス, 64-80.
12. 太田裕・小山真紀, 地震断層からの距離で見た死者発生率分布の事例 (2003) ; 東濃地震科学研究所報告 Seq. No. 11, 1-20.
13. 太田裕・小山真紀・岡崎信弘 (2003) ; 資料 : 兵庫県南部地震に伴う人間行動のアンケート調査—淡路島北淡町—, 東濃地震科学研究所報告 Seq. No. 11, 159-188.
14. 小山真紀 (2003), 2000 年鳥取県西部地震時の被災市町村における直後対策実施状況調査, 地域安全学会論文集, No. 4, pp.127-pp.134.
15. 小山真紀・太田裕・西田良平・清野純史 (2002) ; 2000 年鳥取県西部地震における高密度アンケート調査 —境港市における震度と被害—, 「近年の国内外で発生した大地震の記録と課題」シンポジウム論文集, 101-106.
16. 中嶋唯貴・小山真紀・太田裕 (2002) ; 地域住民の地震防災対応行動変容に関する一調査—2000 年鳥取県西部地震の直前と 1 年後—, 地域安全学会梗概集, No.12, 169-172.
17. Tanaka, T., H. Aoki, M. Okubo, M. Onishi, and K. Oshita (2002) ; Exploration of subsurface structure across the Atera fault zone, *Technical note of the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention*, 234, 316-318.

論文発表（平成 15 年度）

1. 石井紘,2003, 屏風山地殻活動総合観測について, 東濃地震科学研究所報告, **12**, 3-16.
2. 大久保慎人, 石井紘, 2003, 屏風山総合 観測回路の仕様と設計に関して—ハイサンプリングの積算による精度向上, 東濃地震科学研究所報告, **12**, 17-26.
3. 山内常生, 石井紘, 松本滋夫(2003), 三河地殻変動観測所における臨時地殻変動アレー観測, 東濃地震科学研究所報告, **12**, 27-34
4. 青木治三(2003), 沈み込んだフィリピン海プレートの形状とその連続性, 東濃地震科学研究所報告, **12**, 43-60.
5. 田中寅夫(2003), 水蒸気ラジオメータ観測データの解析に用いる retrieval coefficients の問題点, 東濃地震科学研究所, **12**, 109-113.
6. 大井田徹・大久保慎人・青木治三, 2004, 瑞浪市における浅層地下構造探査手法に関する野外実験, 東濃地震科学研究所報告, **13**, 75-107.
7. 太田裕・小山真紀・中嶋唯貴, 岐阜県・東濃地域・瑞浪市を単位とする地震防災基資料の集録, 2004, 東濃地震科学研究所報告, **13**, 1-36.
8. 太田裕・小山真紀, 2004, 所要耐震レベルでみた岐阜県の地震危険度, 東濃地震科学研究所報告, **13**, .55-74.
9. 小山真紀, 2000 年鳥取県西部地震における市町村行政対応事例調査—震度と対応実施状況—, 2003, 地域安全学会論文集, **5**, 269-278.
10. 中嶋唯貴・太田裕, 2003, 学園を単位とした地震防災—通学経路の危険度把握の試み—, 地域安全学会梗概集, **13**, 131-134.
11. 小山真紀, 2003, 覚え書き:市町村防災担当の現状に関わる諸問題—2000 年鳥取県西部地震の聞き取り調査から—, 地域安全学会梗概集, **13**.167-170.
12. 太田裕・小山真紀, 2003, 在来木造住宅の「耐震診断表」の特性に関する一分析, 地域安全学会梗概集, **13**. 183-184.
13. 大久保 慎人, 石井紘, 山内常生,2004, ボアホール歪計アレイが観測した十勝沖地震波形—広帯域地震計による観測との比較—, 「地震」特集「2003年十勝沖地震
14. 山田功夫,大井田徹,山崎文人, 2003, 2000年東海スローイベントと微小地震活動, 月刊地球, 号外**4**, 88-93.
15. Tanaka,T., H. Aoki, A. J. Martin, K. Oshita, K. Nozaki, and M. Onishi, 2004, Subsurface structure under a basaltic monogenetic volcano near the active Atera fault, *Tectonophysics*, **378**, 197-208.
16. 東濃地震科学研究所, 2004, 関東地方地殻下におけるフィリピン海スラブの運動, 地震予知連絡会会報, 71, 374-378.
17. 石井 紘, 山内常生, 松本滋夫、浅井康広、2004、深部ボアホールを用いた応力解放による応力測定法と結果の解析について—屏風山断層近傍 1000m ボアホールでの測定を例にして—, 月刊地球/Vol. 26, No. 1, 66-73.
18. 山内常生、石井 紘、松本滋夫,2004、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/Vol. 26, No. 2, 74-79.

論文発表（平成16年度）

1. 青木治三, 2004, 関東地殻下における太平洋スラブおよびフィリピン海スラブの形状, 東濃地震科学研究所報告, 14, 25-34.
2. 青木治三, 2004, 伊豆半島周辺のプレート構造, 東濃地震科学研究所報告, 14, 35-42.
3. 青木治三, 2004, 計測震度の物理的意味 その1, 東濃地震科学研究所報告, 14, 43-46.

4. 青木治三, 2004, 計測震度の物理的意味 その2, 東濃地震科学研究所報告, 14, 47-52.
5. 浅井康広・大久保慎人・石井 紘・青木治三・山内常生, 2004, 2004年紀伊半島南東沖地震に伴う Strain-step, 東濃地震科学研究所報告, 14, 93-108.
6. 石井 紘, 2004, アメリカのEarth Scope 計画と地殻変動観測について, 東濃地震科学研究所報告, 14, 53-61.
7. 太田 裕, 2005, 近接2地点の震度と住家被害にみる差異—2000年鳥取県西部地震における境港市の場合—, 東濃地震科学研究所報告, 15, 8-19.
8. 太田 裕, 2005, 市民地震防災促進のための震度情報の解説—震度階級関連解説表による震度・被害関係視覚化—, 東濃地震科学研究所報告, 15, 20-34.
9. 大井田 徹・山崎文人, 2004, 一元化震源と構造の地域性を考慮した震源との比較, 東濃地震科学研究所報告, 14, 65-74.
10. 大久保慎人・石井 紘・山内常生, ボアホール歪計アレイが観測した2003年十勝沖地震波形—広帯域地震計による観測との比較—, 2004, 地震2, 105-113.
11. 大久保慎人, 2004, 真福寺観測点におけるVS-2型地震計水平動の特性について, 東濃地震科学研究所報告, 14, 109-114.
12. 大久保慎人, 2004, 中国中国地质装备总公司(CHINA GEO-EQUIPMENT社)製 3成分速度型地震計CDJ-S2Cシリーズの評価, 東濃地震科学研究所報告, 14, 115-126.
13. 田中寅夫・野原崇史・大久保慎人, 2004, 東濃地震科学研究所の地震観測網(TRIESおよび御嵩)におけるS波スペクトルと地盤の関係, 東濃地震科学研究所報告, 14, 127-134.
14. 田中俊行, 2004, 絶対重力計FG5の導入と観測の現状, 東濃地震科学研究所報告, 14, 75-85.
15. 田中俊行, 2004, 御嶽山における絶対重力測定, 東濃地震科学研究所報告, 14, 87-91.
16. 山内常生・石井 紘・浅井康広・大久保慎人・吾妻瞬一, 2004, デジタル式地殻活動総合観測装置について, 名古屋大学地震火山防災・研究センター 2003年度年次報告会.
17. Asai Y, M. Okubo, H. Ishii, H. Aoki, T. Yamauchi, Y. Kitagawa, and N. Koizumi, 2005, Co-seismic Strain-steps associated with the 2004 Off Kii-Peninsula Earthquakes-Observed with Ishii-type borehole strainmeters and quartz-tube extensometers, Earth, Planets and Space, 57, 309-314.
18. Okubo M., Y. Asai, H. Aoki, and H. Ishii, 2005, The Seismological and geodetical roles of strain seismogram suggested from the 2004 off the Kii peninsula earthquakes, Earth, Planets and Space, 57, 303-308.

著書: 田中俊行 (共著), 山本明彦・志知龍一 編, 2004, 日本列島重力アトラス, 東大出版会.

論文 (平成17年度)

1. 青木治三, 2004, 関東地殻下における太平洋スラブおよびフィリピン海スラブの形状, 東濃地震科学研究所報告, 14, 25-34.
2. 青木治三, 2004, 伊豆半島周辺のプレート構造, 東濃地震科学研究所報告, 14, 35-42.
3. 青木治三, 2004, 計測震度の物理的意味 その1, 東濃地震科学研究所報告, 14, 43-46.
4. 青木治三, 2004, 計測震度の物理的意味 その2, 東濃地震科学研究所報告, 14, 47-52.
5. 浅井康広・大久保慎人・石井 紘・青木治三・山内常生, 2004, 2004年紀伊半島南東沖地震に伴う Strain-step, 東濃地震科学研究所報告, 14, 93-108.
6. 石井 紘, 2004, アメリカのEarth Scope計画と地殻変動観測について, 東濃地震科学研究所報告, 14, 53-61.
7. 太田 裕, 2005, 近接2地点の震度と住家被害にみる差異—2000年鳥取県西部地震における境港市の場合—, 東濃地震科学研究所報告, 15, 8-19.
8. 太田 裕, 2005, 市民地震防災促進のための震度情報の解説—震度階級関連解説表による震度・被害関係視覚化—, 東濃地震科学研究所報告, 15, 20-34.
9. 大井田 徹・山崎文人, 2004, 一元化震源と構造の地域性を考慮した震源との比較, 東濃地震科学研究所報告, 14, 65-74.
10. 大久保慎人・石井 紘・山内常生, ボアホール歪計アレイが観測した2003年十勝沖地震波形—広帯域地震計による観測との比較—, 2004, 地震2, 105-113.
11. 大久保慎人, 2004, 真福寺観測点におけるVS-2型地震計水平動の特性について, 東濃地震科学研究所報告, 14, 109-114.
12. 大久保慎人, 2004, 中国中国地质装备总公司(CHINA GEO-EQUIPMENT社)製 3成分速度型地震計CDJ-S2Cシリーズの評価, 東濃地震科学研究所報告, 14, 115-126.
13. 田中寅夫・野原崇史・大久保慎人, 2004, 東濃地震科学研究所の地震観測網 (TRIESおよび御嵩)におけるS波スペクトルと地盤の関係, 東濃地震科学研究所報告, 14, 127-134.
14. 田中俊行, 2004, 絶対重力計FG5の導入と観測の現状, 東濃地震科学研究所報告, 14, 75-85.
15. 田中俊行, 2004, 御嶽山における絶対重力測定, 東濃地震科学研究所報告, 14, 87-91.

16. Tanaka, T., W. Salden, Y. Asai, Y. Fujita, and H. Aoki, 2006, The relationship between absolute gravity and pore water pressure variations at the Mizunami Underground Research Institute construction site, central Japan, *Geochem. Geophys. Geosys.*, 7, doi:10.1029/2005GC001121.

論文（平成 18年度）

1. 青木治三, 2006, 低周波地震帯に隣接する東海地域の地殻活動, 東濃地震科学研究所報告, 20, 3-12.
2. 浅井康広, 2006, 屏風山地殻活動総合観測点で観測された移動性深部低周波微動活動と同期した異常地殻歪変化 - 2006年 1月 -, 東濃地震科学研究所報告, 20, 77-84.
3. 藤井 巖・山内常生・政所 茜, 2006, 低消費電力データロガーの開発と瑞浪観測壕での発破観測, 東濃地震科学研究所報告, 20, 39-42.
4. 石井 紘, 2006, 定林寺観測点 (JRJ) (深度 1030m) の建設と総合観測装置の初期挙動, 東濃地震科学研究所報告, 20, 13-22.
5. 山内常生・石井紘・向井厚志・松本滋夫・清水茂治郎・大西正臣, 2006, 小口径インテリジェント型歪計の開発 - 野外観測用省電力測定機器の開発 -, 東濃地震科学研究所報告, 20, 155-160.
6. Ishii, H., T. Yamauchi, Y. Asai, S. Matsumoto and A. Mukai, 2007, Interesting phenomena detected by the continuous observation of strain and in-situ stress measurements in the vicinity of the active Mozumi-Sukenobe Fault, *Geodynamics of Atotsugawa Fault System*, edited by M. Ando, TERRAPUB, pp 157-162.
7. Azuma, S., H. Ishii, Y. Asai, Y. Kitagawa, H. Wakita, T. Yamauchi, and K. Asamori, 2007, Variation in groundwater levels, pore pressures and crustal strain related to earthquakes in the upper granite and sedimentary formations in the area of western Tono, Japan, *Geodynamics of Atotsugawa Fault System*, edited by M. Ando, TERRAPUB, pp 173-179.
8. Naoi, M., Ogasawara, H., Takeuchi, J., Yamamoto, A., Shimoda, N., Morishita, K., Ishii, H., Nakao, S., van Aswegen, G., Mendecki, A.J., Lenegan, P., Ebrahim-Trollope, R., Iio, Y., 2006, Small slow-strain steps and their forerunners observed in gold mine in South Africa, *Geophysical Research Letters*, vol. 33, L12304, doi:10.1029/2006GL026507.
9. Ogasawara, H., Takeuchi, J., Shimoda, N., Ishii, H., Nakao, S., van Aswegen, G., Mendecki, A.J., Cichowicz, A., Ebrahim-Trollope, R., Kawakata, H., Iio, Y., Ohkura, T., Ando, M. and Research Group for Semi-controlled Earthquake-generation Experiments in South African deep gold mines, High resolution Strain Monitoring During M-2 Events in a South African Deep Gold Mine in Close Proximity to Hypocentres, 2005, *Proceedings of the 6th International Symposium on Rockburst and Seismicity in Mines*, 385-391.
10. Ogasawara, H., Takeuchi, J., Shimoda, N., Nakatani, M., Kato, A., Iio, Y., Kawakata, H., Yamada, T., Yamauchi, T., Ishii, H., Satoh, T., Kusunose, K., Otuki, K., Kita, S., Nakao, S., Ward, A.K., McGill, R., Murphy, S.K., Mendecki, A.J., van Aswegen, G., Research Group for Semi-controlled Earthquake-generation Experiments in South African Deep Gold Mines, 2005, *Multidisciplinary Monitoring of the Entire Life Span of an Earthquake in South African Gold Mines*, *Proceedings of the 6th International Symposium on Rockburst and Seismicity in Mines*, 393-398.
11. 大久保慎人, 2006, 2006年 11月 15日千島列島の地震 (Mw8.3), <http://www.tries.jp/>
12. Okubo M., S. Suzuki, I. Fujii and H. Aoki, 2006, Shallow velocity-structure and the feature of seismic waves in northern Atera fault system, central Japan, 東濃地震科学研究所報告, 20, 113-119.
13. 田中寅夫・大久保慎人・青木治三, 2006, 東濃地震科学研究所地震観測網における 2004年 9月紀伊半島沖地震 (前震) の P波および S波スペクトル, 東濃地震科学研究所報告, 20, 131-144.
14. 大久保慎人, 2007, 2006年 12月 26日台湾の地震 (Mw7.1), <http://www.tries.jp/>
15. 大久保慎人, 2007, ボアホール型ひずみ地震動観測システムの開発とその応用, 名古屋大学博士論文.
16. Yutaka OHTA, Nobuoto NOJIMA and Tadayoshi NAKASHIMA ; An estimation of nationwide earthquake death-toll-in case of Japan- Paper Number: 1355, *Proc. First European Conf. Earthq. Engr. and Seismology*, Geneva, Switzerland, 3-8 September 2006.
17. 太田 裕, 人間被害の発生危険とその低減に関する基礎的研究 第 1 報人間被害記述関係式群のマクロ・系統構成, 東濃地震科研報告, 19, 99-154, 2006.
18. 太田 裕・能島暢呂・中嶋唯貴, 人間被害の発生危険とその低減に関する基礎的研究 第 2 報 適用と算定の事例 - 東海 4 県 -, 東濃地震科研報告, 19, 155-178, 2006.
19. 太田 裕・中嶋唯貴・能島暢呂, 人間被害の発生危険とその低減に関する基礎的研究 第 3 報 適用と算定の事例 - 日本全国 -, 東濃地震科研報告, 19, 179-206, 2006.
20. 太田 裕, 資料「地震動と地震防災 - 先達の歩みをたどって - 」, 東濃地震科研報告, 19, 219-228, 2006.
21. 鈴木貞臣・青木治三, 2006, 土岐市肥田町地内地盤構造調査の概要, 東濃地震科学研究所報告, 20, 93-111.
22. 田中俊行, 2006, 御嶽山群発地震域における重力変化, 東濃地震科学研究所報告, 20, 23-27.
23. 田中俊行, 2006, 絶対重力測定の潮汐帯域の変動について - 絶対重力測定における気圧補正 -, 東濃地震科学研究所報告, 20, 121-130.

24. 古本宗充, 工藤 健, 田中俊行, 2007, 地殻の粘弾性構造と応力に対する応答についての研究, 大都市大震災軽減化特別プロジェクト平成 18年度成果報告書, 683-688.

論文 (平成19年度)

1. 大久保 慎人, USB-LANコンバータを用いた超小型 WINパッケージ収録システム, 2008, 地震 2, 60, 219-223, doi.org/10.4294/zisin.60.219.
2. 小巻あずみ・川崎一朗・森井 互・小久保 一哉・大久保慎人・坪川恒也・今西 祐一, 伸縮計記録を用いたスリヒター・モード検出の試み, 2007, 地球, 28, 9, 623-631, 海洋出版
3. 青木治三, 2007, 伊豆半島北方の内陸部に PHスラブ地震が発生しない理由, 東濃地震科学研究所報告, 21, 19-26.
4. 青木治三, 2007, ボアホール地震計の多段設置—技術開発—, 東濃地震科学研究所報告, 21, 39-46.
5. 鈴木 貞臣・大久保 慎人・藤井 巖・宮島 力雄, 震源域直上小アレーによる深部低周波微動観測の試み—豊田市下山における観測—, 東濃地震科学研究所報告, 21, 47-56, 2007
6. 大久保 慎人, 2007, 深部ボアホールでのひずみ地震動観測とストリーミングひずみ解析法から推測される震源破壊過程, 東濃地震科学研究所報告, 21, 57-76.
7. 田中 寅夫・大久保 慎人・青木 治三, 2007, TRIES超高密度地震観測点で観測された 2004年紀伊半島沖地震のスペクトルおよび常時微動, 東濃地震科学研究所報告, 21, 161-167.
8. 浅井康広・石井紘・青木治三, 2007, 研究所地殻活動総合観測点の整備, 東濃地震科学研究所報告, 21, 85-97.
9. 向井厚志・山内常生・石井 紘・松本滋夫・浅井康広, 応力解放法に基づく3次元初期応力の解析の導出について, 2007, 東濃地震科学研究所報告, 21, 33-38.
10. 向井厚志・山内常生・石井 紘・松本滋夫・浅井康広, 2007, 水圧感度検定による弾性定数の検証, 東濃地震科学研究所報告, 21, 151-156.
11. 太田裕・和藤幸弘, 2008, 震災関連疾患のシミュレーションモデル(1)—定式化と 1995年兵庫県南部地震との対比試算—, 東濃地震科学研究所報告, 22, 201-216. 人間
12. 太田 裕・野添篤毅・榊原真奈美, 2008, 地震に起因する被害の文献学的研究(1)—医学文献DBによる論文の検索と傾向分析—, 東濃地震科学研究所報告, 22, 271-286.
13. 太田 裕・野添篤毅・榊原真奈美, 2008, 地震に起因する人間被害の文献学的研究(2)—医中誌 DBにもとづく関係分野の拡がりに関する考察—, 東濃地震科学研究所報告, 22, 287-322.
14. 太田裕・野添篤毅・榊原真奈美, 2008, 地震に起因する人間被害の文献学的研究(3)—世界の代表文献DB分析にもとづく研究活動の概観—, 東濃地震科学研究所報告, 22, 323-382.
15. 小山真紀・他, 2008. 小千谷市を対象とした 2004年新潟県中越地震に関する全世帯調査(2)—総合解析: 住居・人間被害, 生活再建—, 東濃地震科学研究所報告, 22, 55-88.
16. 古本宗充, 工藤健, 田中俊行, 2007, 地下温度構造による最大地震の規模, 東濃地震科学研究所報告, 21, 13-18
17. 田中俊行, 2007, 重力観測における「携帯型標準気圧計」及び「GPS時刻校正機能付き Rb時計」の導入とその先の課題, 東濃地震科学研究所報告, 21, 77-83.
18. Kudo, T., T. Tanaka, and M. Furumoto, 2009, Estimation of the maximum earthquake magnitude from the geothermal gradient, BSSA. 99, doi:10.1785/0120080946.
19. Tanaka, T., 2006, Correlation Analyses of Horizontal Gradients of Atmospheric Wet Delay versus Wind Direction and Velocity, IAG Symposia Vol.130, Rizos, C. (Eds): Dynamic Planet, Springer, 853-858. 20. Kudo, T., T. Tanaka, and M. Furumoto, 2009, Estimation of the maximum earthquake magnitude from the geothermal gradient, BSSA. 99, doi:10.1785/0120080946.
20. Mukai, A., T. Yamauchi, H. Ishii, and S. Matsumoto, 2007, In situ stress measurement by the stress relief technique using a multi-component borehole instrument, E.P.S..59, 133-139, doi.org/10.1186/BF03352686.

論文 (平成 20 年度)

1. 青木治三・大久保慎人, 2009, 超高密度地震観測による Site Effect の予測, 東濃地震科学研究所報告 23, 3-73.
2. 青木治三, 2009, 深部低周波微動が発生する条件, 東濃地震科学研究所報告 23, 127-132.
3. Atsushi Mukai, Tsuneo Yamauchi, Hiroshi Ishii, and Sigeo Matsumoto, 2007, In situ stress measurement by the stress relief 4. technique using a multi-component borehole instrument, Earth. Planets Space, 59, 133-139, doi.org/10.1186/BF03352686
4. 石井 紘, 2009, 断層は通常どのようにふるまっているか?, 東濃地震科学研究所報告, 23, 151-158.
5. 石井 紘, 地震予知研究に寄せて、月刊誌「産業と環境」(2008年6月号), 55-59.
6. Yasuhiro Asai, Hiroshi Ishii, and Harumi Aoki, 2009, Comparison of tidal strain changes observed at Borehole array observation

system with in-situ rock property in Tono region, central Japan, *Journal of Geodynamics*, 48, 292-298, doi.org/10.1016/j.jog.2009.09.024.

7. 浅井康広・石井 紘・青木治三, 2009, 2008 年 5 月中国四川省の地震に伴う歪地震動と地下水位変化, 北海道大学地球物理学研究報告, 72, 247-256.
8. 浅井康広・石井 紘・青木治三, 2009, 歪地震動に伴う地下水位変化 - 2008 年 5 月中国 四川省地震/茨城県沖地震 -, 東濃地震科学研究所報告, 23, 83-92.
9. 大久保 慎人・青木 治三・鈴木 貞臣・宮島 力男, 2008, 瑞浪観測壕内短周期地震計アレイで観測された断層を通過する地震波の特徴, 東濃地震科学研究所報告 23., 117-126.
10. Nakamichi, H., H. Kumagai, M. Nakano, M. Okubo, F. Kimata, Y. Ito, and K. Obara, 2009, Source mechanism of a very-long-period event that occurred at Mt. Ontake, central Japan: Response of a hydrothermal system to intruded magma beneath the summit, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 187, 167-177, doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2009.09.006.
11. 古本宗充, 工藤健, 田中俊行, 2008, 内陸地震の連動性と確率, 月刊地球, 30, 9, 419-422.
12. 田中寅夫・大久保慎人・青木治三, 2009, 常時微動による地盤軟弱度推定-2004 年紀伊半島南東沖地震および 2007 年能登半島沖地震の場合-, 東濃地震科学研究所報告 23, 75-81.
13. 小山真紀・他, 2009, 小千谷市を対象とした 2004 年新潟県中越地震に関する全世帯調査(3) -余震による木造建物被害の拡大-, 東濃地震科学研究所報告, 24, 39-68.
14. 太田裕, 2009, 地震に伴う人間被害の発生危険とその低減に関する基礎的研究 第 5 報 精神系疾患発症「定量化モデル」構築への助走, 東濃地震科学研究所報告, 24, 103-156.
15. 太田裕, 2009, 1978 年宮城県沖地震の頃そして今後-地震防災学の視点から-, 東濃地震科学研究所報告, 24, 157-168.
16. 宮野道雄・志垣智子・太田裕, 2009, 地震に伴う長期間健康被害関連資料収集調査 (1) 東濃地震科学研究所報告, 24, 169-188.
17. 清野純史・太田裕, 2009, 地域住民の地震対応力向上に資する「防災動画」の試作, 東濃地震科学研究所報告, 24, 189-208.
18. 津村建四朗, 2009, 震度データからみた濃尾地震前後の地震活動(その 1) 東濃地震科学研究所報告, 23, 113-116.
19. 津村建四朗, 2009, プレート内大地震とプレート間巨大地震との関連性についての簡単なシミュレーション, 東濃地震科学研究所報告, 23, 159-162.

論文 (平成 21 年度)

1. 浅井康広, 2010, 岐阜県東濃地域で観測された 2009 年 8 月 11 日駿河湾の地震 (Mj6.5) に伴う地下水位変化と歪地震動, 東濃地震科学研究所報告, 25, 133-140.
2. 津村建四朗, 2010, 高い空間分解能を持つ地震活動のシミュレーション, 東濃地震科学研究所報告, 25, 89-94.
3. 青木治三, 2010, 沈み込んだプレートは平面展開可能か, 東濃地震科学研究所報告, 25, 95-108.
4. 尾上健介・浅井康広・石井 紘, 2010, 断層近傍における水位変化と傾斜変動について, 東濃地震科学研究所報告, 25, 173-184.
5. 田中寅夫・大久保慎人・青木治三, 2010, 常時微動による地盤軟弱度推定 (2) -中小地震の S 波最大振幅と常時微動振幅との関係-, 東濃地震科学研究所報告, 25, 21-28.
6. 小笠原 宏・川方裕則・石井 紘・中谷正生・矢部康男・飯尾能久, 2009, 南アフリカ金鉱山における半制御地震発生実験・地震第 61 巻特集号, S563-S573.
7. 石井 紘・浅井康広, 2010, 駿河湾地震の波動による断層近傍で観測された特徴的応力変動, 東濃地震科学研究所報告, 25, 169-172.
8. 大久保 慎人, 2010, Chongqing Geological Instruments Factory 製 3 成分速度型 1Hz 地震計 CDJ-S1 の評価, 東濃地震科学研究所報告, 25, 109-122.
9. 大久保 慎人, 2010, 阿寺断層南端部坂下地区における振動調査に関する報告, 東濃地震科学研究所報告, 25, 109-122.
10. Ito, T. and M. Okubo and TSagiya, 2009, High resolution mapping of Earth tide response based on GPS data in Japan. *Journal of Geodynamics*, 48 (3-5), 253-259, doi.org/10.1016/j.jog.2009.09.012.
11. 鈴木貞臣・大久保慎人・今西和俊・北川有一・武田直人, 2009, 深部低周波地震の立体アレイ観測 -豊田市下山-, 東濃地震科学研究所報告, 25, 3-10.
12. 田中俊行, gPhone の導入・調整とデータの現状, 2010, 東濃地震科学研究所報告, 25, 75-82.
13. 田中俊行, gPhone の性能評価とその活用計画, 2010, 月刊地球, 32, No. 4, 258-263.
14. 中嶋唯貴・岡田成幸, 2009, 死者低減を主目標とした行政レベルの震災対策意思決定のための多種想定地震の戦略的選択法 -名古屋市におけるケーススタディー-, 日本建築学会構造系論文集, 639, 775-783.
15. 中嶋唯貴・岡田成幸, 2009, 実態を反映させた家屋単位の市町村レベル耐震化戦略評価手法の提案 と愛知県尾張旭市への適用, 地域安全学会論文集, 11, 377-384.

16. 岡田成幸・中嶋唯貴, 2010, 緊急地震情報を利用した個人世帯における負傷回避システムの構築, 日本建築学会総合論文集, 8, 93-98.
17. 中嶋唯貴, 2010, 木造住宅構造特性の地域性を考慮したベイズ更新型損傷度関数構築の試み, 東濃地震科学研究所報告 26, 121-132.
18. 太田 裕, 2010, 地震に伴う人間被害の発生危険とその低減に関する基礎的研究 第 6 報—救急活動記録の分析とシミュレーションにもとづく傷病発症の理解—, 東濃地震科学研究所報告 26, 139-154.
19. 太田 裕・中嶋唯貴, 2010, 地震時建物倒壊に伴う閉じ込め者の生存限界時間に関する極値分析, 東濃地震科学研究所報告, 26, 173-176.
20. 太田 裕, 2010, 金井先生の Academic Activities を概観する—文献書誌学的視点から—, 東濃地震科学研究所報告, 26, 177-186.
21. 太田 裕, 2010, 補遺: 1978 年宮城県沖地震の頃そして今後—地震防災学の視点から—, 東濃地震科学研究所報告, 26, 187-198.
22. 宮野道雄・志垣智子・太田裕, 2010, 地震に伴う長期人間健康関連資料収集調査 (2), 東濃地震科学研究所報告, 26, 155-164.
23. 楯田泰子・武市淳・太田 裕, 2010, 地震に引続く地域住民の「生活維持力評価法」—生活維持力の定義とモデル化—, 東濃地震科学研究所報告, 26, 165-172.
24. Furukawa A., Spence, R., Ohta, Y., and So, E., 2009, Analytical study on vulnerability functions for casualty estimation in the collapse of adobe buildings induced by earthquake, Bull. Earthquake Eng., doi: 10.1007/s10518-009-9156-z.

論文 (平成22年度)

1. 青木治三, 2011, 東濃高密度地震観測からみた地盤のゆれやすさマップ, 東濃地震科学研究所報告, 27, 85-90.
2. 青木治三, 2011, 深部低周波地震が発生する条件(続)—地震発生層の問題—, 東濃地震科学研究所報告, 27, 113-120.
3. 青木治三, 2011, 西南日本・伊豆諸島周辺におけるフィリピン海プレート北東部の変形, 東濃地震科学研究所報告, 27, 121-126.
4. 浅井康広, 2011, SN-1/SN-3 号孔における地下水位地震応答を生じさせる歪地震動の振幅閾値, 東濃地震科学研究所報告, 27, 25-32.
5. 川端訓代・松多信尚・安藤雅孝・浅井康広・小泉尚嗣・田阪茂樹・角森史昭・中村衛・頼文基, 2011, 濃縦谷の玉里断層クリーブ運動—玉里大橋の変形, 地質学雑誌, Vol. 117, No. 1, 口絵.
6. 石井 紘, 2010, 応力連続観測と今後の地震予知研究, 地震ジャーナル, 50, 73-77.
7. 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, 27, 3-8.
8. 大久保慎人, 2011, 矩形連続波—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, 27, 15-24.
9. 大久保慎人, 2011, チリ地震のストーリーミングひずみ解析—SS 相に見られる低速度領域の存在—, 東濃地震科学研究所報告, 27, 53-56.
10. 大久保慎人, 2011, 東濃地域における超高密度地震観測網の IT 化, 東濃地震科学研究所報告, 27, 75-84.
11. 大久保慎人, 2011, 東濃地域の地殻活動観測とその成果—データ流通網への参加のためのワークショップ—, 東濃地震科学研究所報告, 27, 159-162.
12. Kato, A., T. Iidaka, R. Ikuta, Y. Yoshida, K. Katsumata, T. Iwasaki, S. Sakai, C. Thurber, N. Tsumura K., Yamaoka K. T. Watanabe, T. Kunitomo, F. Yamazaki, M. Okubo, S. Suzuki, N. Hirata, 2010, Variations of fluid pressure within the subducting oceanic crust and slow earthquakes—Fluid pressure variations and slow slips—, Geophysical Research Letters, 37, doi.org/ 10.1029/2010GL043723.
13. 太田 裕・中嶋唯貴, 2010, 地震に伴う人間被害—医学文献でみる近年の研究—, 第 13 回地震工学シンポジウム, 1730-1735.
14. 太田 裕, 2011, 地震に伴う人間被害の発生危険とその低減に関する基礎的研究第 7 報—岐阜県瑞浪消防の地震時救急対応力に関するシミュレーション的考察, 東濃地震科学研究所報告, 28, 151-168.
15. 川崎一朗, 2011, 不均質地球の自由振動: 緯度に依存する擬固有周波数の定式化の試み, 東濃地震科学研究所報告, 27, 147-158.
16. 川崎一朗, 2011, 自由振動と表面波の固有関数と固有値を求めるフォートランプログラム D I S P, 東濃地震科学研究所報告, 27, 167-170.
17. 楯田泰子・武市淳・中嶋唯貴・太田裕, 2011, 東濃瑞浪地区における地震後生活維持に関する実態調査

- 分析, 東濃地震科学研究所報告, 28, 169-180.
18. 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, 27, 9-14.
 19. 鈴木貞臣・大久保慎人・宮島力男, 2010, 深部低周波地震(LFE)研究のための豊田市下山・中アレー観測, 東濃地震科学研究所報告, 27, 95-104.
 20. 田中俊行・青木治三・田力正好・下山みよ・野崎京三・山本明彦, 2010, 手賀野断層周辺の基盤構造, 地震 2, 63, 11-20, doi.org/10.4294/zisin.63.11.
 21. 田中俊行, 2011, 2007年8月21日のALOS PALSAR データに現れた岐阜県土岐市周辺の変動パターンについて, 東濃地震科学研究所報告, 27, 57-66.
 22. 田中寅夫・大久保慎人・青木治三, 2011, 雑微動と SITE EFFECT, 東濃地震科学研究所報告, 27, 91-94.
 23. 津村建四朗, 2011, 気象庁一元化震源でみた日本の低周波地震活動, 東濃地震科学研究所報告, 27, 105-112.
 24. 中嶋唯貴・岡田成幸, 2010, 人口を用いた地震動選択簡易手法の提案 - 死者低減を目的とした行政レベルの震災対策意思決定のための多種想定地震の戦略的選択法 その2 -, 日本建築学会技術報告集, Vol. 16, No. 34, 997-1002.
 25. 中嶋唯貴, 2010, 本邦における木造家屋居住者の時間経過に伴う地震時死者発生リスクの変容, 第13回地震工学シンポジウム, 2558-2563.
 26. 中嶋唯貴, 2011, 近年の住環境の変化とその影響による木造家屋居住者の地震時死者発生リスクの変容, 東濃地震科学研究所報告書, 28, 143-150.
 27. 岡田成幸・中嶋唯貴・小山真紀・松下考星, 2010, コンピュータービジョンによるリアルタイム音声誘導システムの開発~地震時室内負傷低減のための多重対策の一環として, 地域安全学会論文集, No13, 213-221.
 28. 武市淳・鍛田泰子・中嶋唯貴・太田裕, 2010, 中山間地域の地震後生活維持に関する実態調査-東濃瑞浪地区の事例-, 第13回日本地震工学シンポジウム, 698-705.

論文(平成23年度)

1. 青木治三, 2012, b 値が一定である地震発生場のモデル, 東濃地震科学研究所報告, 29, 107-115.
2. 浅井康広・石井 紘, 2012, 陶史の森/日吉地殻活動総合観測点の整備について, 東濃地震科学研究所報告, 29, 9-18.
3. 石井 紘・浅井康広, 2012, 開発された応力計の観測能力と精度に関する一つの検証, 東濃地震科学研究所報告, 29, 3-4.
4. 石井 紘・浅井康広・川崎一朗, 2012, 弾性体力学の不変量による深部ボアホール観測(歪・応力)の観測精度確認, 東濃地震科学研究所報告, 29, 5-8.
5. 大久保 慎人・雑賀 敦, 2012, シモレックス株式会社製 地震観測用高速データ収録装置 SC-ADH10K の評価, 東濃地震科学研究所報告, 29, 85-94.
6. 川崎一朗, 2012, 内陸型地震による地殻変動災害の可能性, 東濃地震科学研究所報告, 29, 47-52.
7. 雑賀 敦・大久保 慎人, 2012, 岐阜県美濃東部の地震, 東濃地震科学研究所報告, 29, 81-84.
8. 雑賀 敦・大久保 慎人, 2012, 東濃地震科学研究所 (TRIES) 地震観測網の波形データ公開に向けて, 東濃地震科学研究所報告, 29, 117-123.
9. 磯崎 行雄, 丸山 茂徳, 柳井 修一, 笠原 順三, 下司 信夫, 佐野 修, 特集号「日本列島形成史と次世代パラダイム (Part III)」表層地質からマントル対流起動論へ, 地学雑誌, Vol. 120, No. 1, pp. 1-3, 2011.
10. 佐野 修, この時期, 地震について, 鍛造協会誌, 2011.
11. 鈴木貞臣・大久保慎人・今西和俊・北川有一・武田直人, 2012, 立体アレーによる深部低周波地震(LFE)の semblance 解析, 東濃地震科学研究所報告, 29, 69-79.
12. 田中俊行, 2012, ALOS PALSAR データの CMTSAR による InSAR 時系列解析 - 絶対重力値との比較の試み -, 東濃地震科学研究所報告, 29, 25-29.
13. 田中寅夫・大久保慎人・青木治三, 2012, 雑微動のスペクトル振幅と地震動最大振幅の関係について-雑微動の観測に基づく地震動最大振幅の予測を目指して-, 東濃地震科学研究所報告, 29, 125-130.
14. 津村建四朗, 2012, 大きい余震の活動の急速な減衰, 東濃地震科学研究所報告, 29, 95-105.
15. 大久保慎人, 2012, ベトナム VAST, IGP およびホアビンひずみ観測点を訪問して, 日本地震学会ニュースレター, 23, 43-45
16. Saiga A., A. Kato, S. Sakai, T. Iwasaki, and N. Hirata, 2011, Crustal anisotropy structure related to lateral and down-dip variations in interplate coupling beneath the Kii Peninsula, SW Japan, Geophysical Research Letters, 38, L09307, doi:10.1029/2011GL047405.
17. 中嶋唯貴: 近年の住環境の変化とその影響による木造家屋居住者の地震時死者発生リスクの変容, 2011, 地域安

全学会論文集, 15, 241-247.

18. 太田 裕：2011年東日本大震災に伴う死者発生量の激甚性-共通評価尺度の導入と内陸・海洋地震群との対比を介して-, 2012, 地震防災分野研究委員会報告書, 30, 79-113.
19. 太田 裕：地震に伴う人間被害の発生危険とその低減に関する基礎的研究、第8報-岐阜県瑞浪市を事例とする救急活動対応力改善への諸考察, 2012, 地震防災分野研究委員会報告書, 30, 115-125.

<賞罰>

・中嶋唯貴：平成22年度地域安全学会論文賞：コンピュータビジョンによるリアルタイム音声誘導システムの開発～地震時室内負傷低減のための多重対策の一環として～ 2011年5月27日

論文（平成24年度）

1. 太田 裕, 所感：2011年度「日本集団災害医学会年次大会」に参加して, 2012, 日本集団災害医学会誌, 17, 377-385.
2. 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-, 地震2, 65, 21-30, doi.org/10.4294/zisin.65.21.
3. 高岡宏之・津村紀子・高橋福助・野崎謙二・加藤愛太郎・飯高隆・岩崎貴哉・酒井慎一・平田直・生田領野・國友孝洋・吉田康弘・勝保啓・山岡耕春・渡辺俊樹・山崎文人・大久保慎人・鈴木貞臣, 2012, 東海地域下の三次元地震波減衰構造-微小地震スペクトルを用いた推定-, 地震2, 65, 175-188, doi.org/10.4294/zisin.65.175.
4. Kato, A., T. Igarashi, K. Obara, S. Sakai, T. Takeda, A. Saiga, T. Iidaka, T. Iwasaki, N. Hirata, K. Goto, H. Miyamachi, T. Matsushima, A. Kubo, H. Katao, Y. Yamanaka, T. Terakawa, H. Nakamichi, T. Okuda, S. Horikawa, N. Tsumura, N. Umino, T. Okada, M. Kosuga, H. Takahashi and T. Yamada, 2013, Imaging the source regions of normal faulting sequences induced by the 2011 M9.0 Tohoku-Oki earthquake, Geophysical Research Letters, 40, 1-6, doi: 10.1002/GRL.50104.
5. T. Ito, E. Gunawan, F. Kimata, T. Tabei, et al., Isolating along-strike variations in the depth extent of shallow creep and fault locking on the northern Great Sumatran Fault, J. Geophys. Res., doi:10.1029/2011JB008940, 2012.
6. Agustan, F. Kimata, Y.E. Pamitro, H.A. Abidin, 2012, Understanding the 2007-2008 eruption of Anak Krakatau Volcano by combining remote sensing technique and seismic data, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 14, 73-82, doi.org/10.1016/j.jag.2011.08.011.
7. 雑賀 敦, 大久保慎人, 2012, 東濃地震科学研究所 (TRIES) 地震観測網の波形データ公開に向けて, 東濃地震科学研究所報告, 29, 117-124.
8. 雑賀敦, 大久保慎人, 2012, 岐阜県美濃東部の地震, 東濃地震科学研究所報告, 29, 81-84.
9. T. Tokunaga, O. Sano, K. Hoshi, H. Honda, T. Inazaki, M. Sorai, T. Matsuoka, M. Yasuhara and H. Koide, 2013, An overview: special issues on "the slow subsurface fluid flow process part II", Journal of Geography (Chigaku Zasshi), 122, 1-7, doi.org/10.5026/jgeography.122.1.
10. 徳永朋祥, 佐野修, 星一良, 本田博巳, 稲崎富士, 徂徠正夫, 松岡俊文, 安原正也, 小出仁, 2013, 地下の遅い流体挙動 (Part II) -フィールド実験から見る- イントロダクション, 地学雑誌, 122, No. 1, pp. 8-15, doi.org/10.5026/jgeography.122.8.
11. 西山哲, 佐野修, 伊藤久男, 高橋学, 間隙流体の挙動と縦波-弾性波の分散特性の関係に関する研究, 2013, 地学雑誌, 122, No. 1, 170-191.
12. Ikehara M., H. Miura, M. Nakai, T. Nakazawa, S. Sano and H. Koide, Overview: special issue on "paleoenvironmental changes in the Antarctic cryosphere: global climate change investigated in the southern ocean", 2012, Journal of Geography (Chigaku Zasshi), 122, 1-7, doi.org/10.5026/jgeography.122.1.
13. T. Tokunaga, H. Honda, O. Sano, M. Sorai, T. Matsuoka, K. Hoshi, M. Yasuhara, T. Inazaki, H. Mikada and H. Koide, An overview: special issues on "the slow subsurface fluid flow processes (part I): theory, model, and physical properties estimation", 2012, Journal of Geography (Chigaku Zasshi), 121, No. 1, 1-6, doi.org/10.5026/jgeography.121.1.
14. 徳永朋祥, 本田博巳, 佐野修, 徂徠正夫, 松岡俊文, 星一良, 安原正也, 稲崎富士, 小出仁, 2012, 地下の遅い流体挙動 (Part I) -理論・モデル・物性評価- イントロダクション, 2012, 地学雑誌, 121, 7-12, doi.org/10.5026/jgeography.121.7.
15. Tanaka, T., R. Miyajima, H. Asai, Y. Horiuchi, K. Kumada, Y. Asai, and H. Ishii, 2013, Hydrological gravity response detection using a gPhone below- and aboveground, Earth, Planets and Space, 65, 59-65, doi:10.50477/eps.2012.06.012.
16. 田中俊行・本多亮, 重力計アレイ観測-序報-, 2013, 東濃地震科学研究所報告, 31, 3-11.
17. 清水宏信・平松良浩・川崎一朗, 「D層の低次ゾーナル不均質から予想される自由振動の固有周波数の緯度依存性に対する否定的証拠」、2012, 月刊地球, 34, 8, 453-458. 385.

19. 田中寅夫・大久保慎人・青木治三, 2012, 雑微動のスペクトル振幅と地震動最大振幅の関係について—雑微動の観測に基づく地震動最大振幅の予測を目指して—, 東濃地震科学研究所報告, 29, 125–130.
20. 本多亮・澤田明宏・古瀬慶博・工藤健・田中俊行・平松良浩, 金沢大学重力データベースの公表, 2013, 測地学会誌, 58, 153–160, doi.org/10.11366/sokuchi.58.153.

<書籍>

木股文昭, 2012, 現代インドネシアを知るための60章 (分担執筆、村井 吉敬・佐伯奈津子・間瀬朋子編集)、明石書店

論文 (平成 25 年度)

1. Iryu Y., T. Hirono, O. Sano, H. Koide, An Overview: Special Issue on “Current Status of On-land Scientific Drilling in Japan and Its Prospects”, 2013, *J. Geography*, 122, 227-229, doi.org/10.5026/jgeography.122.127.
2. 井龍 康文, 廣野 哲朗, 佐野 修, 小出 仁, 2013, 特集号「日本における陸上科学掘削の現状と展望」—巻頭言—, 2013, 地学雑誌, Vol. 122, pp. 230–232. doi.org/10.5026/jgeography.122.230.
3. 川崎一朗, 2013, 巻頭言 1000年の時間スケールの災害リスクの研究から未来の災害について学ぶ, 自然災害科学, 32巻, 231–232.
4. 木股文昭・本多 亮・宮島力雄・田中俊行・浅井康広・石井 紘, 2013, 精密水準測量による瑞浪市明世町における500m立坑掘削に伴う上下変動(2004–2012年), 東濃地震科学研究所報告, 32, 1–5.
5. 木股文昭・宮島力雄, 2013, 精密水準測量による瑞浪市明世町における500m立坑掘削に伴う上下変動 (2012–2013年), 東濃地震科学研究所報告, 32, 7–9.
6. 菊地 俊夫, 丸山 茂徳, 稲崎 富士, 熊木 洋太, 呉羽 正昭, 佐野 修, 須貝 俊彦, 丸井 敦尚, 2013, 特集号「東京—過去・現在・未来— (Part I)」序説, 地学雑誌, 122, 916–920. doi.org/10.5026/jgeography.122.916.
7. Kikuchi T., S. Maruyama, T. Inazaki, Y. Kumaki, M. Kureha, O. Sano, T. Sugai, A. Marui, 2013, Introduction to the Special Issue on “Tokyo: Past, Present, and Future (Part I)”, *J. Geography*, 122, 913–915. doi.org/10.5026/jgeography.122.913.
8. Mulwa J.K., F. Kimata, Nguyen A. Duong, 2013, Seismic Hazard. Kenya: A Natural Outlook (Geo-Environmental Resources and Hazards) (Editors; Paolo Paron, Daniel Olago and Christian Thine Omuto), Vol. 16, Elsevier, pp. 267–292, 2013, ISBN: 978-0-444-59559-1.
9. Mulwa J.K., F. Kimata, S. Suzuki, Z.N. Kuria, 2013, The seismicity in Kenya (East Africa) for the period 1906–2010: A review, *Journal of African Earth Sciences*, 89, 72–78.
10. Nguyen A. Duong, T. Sagiya, F. Kimata, Tran D. To, Vy Q. Hai, Duong C. Cong, Nguyen X. Binh, Nguyen D. Xuyen, 2013, Contemporary horizontal crustal movement estimation for northwestern Vietnam inferred from repeated GPS measurements, *Earth, Planets and Space*, 65 (No. 12), pp. 1399–1410, doi:10.5047/eps.2013.09.010.
11. Queitsch M, G. Jentzsch, A. Weise, H. Ishii, Y. Asai, 2011, Pumping Induced Pore Pressure Changes in Tilt Measurements Near a Fault Zone in Mizunami, Japan, Proceedings of the IAG General Assembly, Melbourne Australia < June 28 – July 2, 2011, Earth on the Edge: Science for a Sustainable Planet.
12. Adeghe H., M. F. Manoochehri, S. K. Hosseini, T. Nakamura, S. Suzuki, 2013, S-wave anisotropy in the aftershock region of the 2003 Bam, Iran, earthquake (Mw 6.5), *Tectonophysics*, 594, 128–136.
13. Saiga A., A. Kato, E. Kurashimo, T. Iidaka, M. Okubo, N. Tsumura, T. Iwasaki, S. Sakai, N. Hirata, 2013, Anisotropic structures of oceanic slab and mantle wedge in a deep low-frequency tremor zone beneath the Kii peninsula, SW Japan, *Journal of Geophysical Research*, 118, 1091–1097, doi:10.1002/jgrb.50069, 2013.
14. 雑賀敦, 大久保慎人, 2013, フィリピン海プレート内で発生した岐阜県美濃東部の地震 (M5.6) の発生メカニズム, 地震2, 66, 1–10, doi:10.4294/zisin.66.1.
15. Takano K., F. Kimata, Reexamination of the fault slip model of the 1891 M8.0 Nobi earthquake: 2013, The first earthquake detected by a geodetic survey in Japan, *Earth Planets Space*, doi:10.5047/eps.2013.04.002.
16. 田中俊行, 瑞浪超深地層研究所周辺域のPS-InSAR解析, 2014, 東濃地震科学研究所報告, 32, 7–9.

<編著>

高橋 誠・田中重好・木股文昭 編著, スマトラ地震による津波災害と復興, 古今書院, 402pp 2014.2 .

<分担執筆>

Ohta Y., 2011, Major factors controlling Earthquake Casualties As Revealed via Diversified Questionnaire Survey in Ojiya city, “Human Casualties in Earthquakes” Springer, pp 199–220.

<翻訳>

川崎一朗, 除会忠・黄仏・黄建平・層振恒・等訳, 地震出版社, 北京, 中国, pp132, 2013.
スロー地震とは何か(NHK ブックス, 2006)からの中国語訳.

論文 (平成26年度)

1. Ishii H. and Y. Asai, 2015, Development of a borehole stress meter for studying earthquake predictions and rock mechanics, and stress seismograms of the 2011 Tohoku earthquake(M9.0), *Earth, Planets and Space*, 67:26, doi:10.1186/s40623-015-0197-z
2. 石井 紘, 2014, 大地の応力を測る: 将来の地震予知研究へ, *地震ジャーナル* 58, 38-44.
3. Yokoyama, T., O. Sano, A. Hirata, K. Ogawa, Y. Nakayama, T. Ishida, Y. Mizuta, 2014, Development of borehole-jack fracturing technique for in situ stress measurement, 2014, *Int. J. Rock Mech. and Min. Sci.*, Vol. 67, pp. 9-19, doi:10.1016/j.ijrmmms.2013.12.008.
4. Tsuchiya, N., Y. Ogawa, T. Watanabe, O. Sano, 2014, Preface to the special issue on "Geochemistry and Environmental Science of Tsunami Deposits"-I, *Journal of Geography(ChigakuZasshi)*, Vol. 123, No. 6, pp. 789-790, doi:10.5026/jgeography.123.791.
5. 土屋範芳・小川泰正・渡邊隆広・佐野 修, 2014, 特集号「津波堆積物の地球化学と環境科学」, *地学 雑誌*, Vol. 123, No. 6, pp. 793-796, doi:10.5026/jgeography.123.793.
6. Shimizu, H., Y. Hiramatsu and I. Kawasaki, 2014, Search for latitudinal variation of spectral peak frequencies of low-frequency eigenmodes excited by great earthquakes, *Polar Science*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.polar.2014.07.002>.
7. 川崎一朗・石井紘・浅井康広・西村卓也, 2011年Mw9.1東北地震に伴ったMw8.4スーパーサブイベント, 2014, *地震2*, 87-98, doi.org/10.4294/zisin.67.87.
8. 川崎一朗, 被翻訳体験 文と理の境界を超えるテーマの日本語原稿を英訳してもらう, 2014, *UP*, 6, 10-19.
9. 川崎一朗, 地球科学と「ふるさと」意識, 2014, *京大広報*, 705 号, 4301.
10. 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地殻のP波およびS波速度構造の推定, *地震2*, 67, No. 1 1-24, 10.4294/zisin.67.1
11. H. Ogasawara, T. Katsura, G. Hofmann, Y. Yabe, M. Nakatani, M. Naoi, H. Ishii, D. Roberts, S. Nakao, M. Okubo, J. Wienand, P. Lenegan, A.K. Ward. and H. Kawakata, 2014, In situ monitoring of rock mass response to mining in South African gold mines using the Ishii strainmeters, *Proc. 6th South African Rock Engineering Symposium SARES 2014*, 1,21-34.
12. 鈴木貞臣・大久保慎人・浅井康広・石井 紘, 2014, 東濃地震科学研究所十字アレイ深部ボアホール観測網を用いた深部低周波地震の観測 -東海地域2014年8-9の活動-, *東濃地震科学研究所報告*, 34, 21-28.
13. 大久保慎人, 2014, 「よこすか」に乗船して, *東濃地震科学研究所報告*, 34, 97-111.
14. 田中俊行・本多亮, 2014, 気象庁大気モデルによる大気密度計算, *東濃地震科学研究所報告*, 34, 9-20.
15. Murase M., C. H. Lin, F. Kimata, H. Mori, H. C. Pu, 2014, Volcano-hydrothermal activity detected by precise levelling surveys at the Tatun volcano group in Northern Taiwan during 2006-2013, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 286, 30-40, doi.org/10.1016/j.volgeores.2014.09.001.
16. Rahma R., H., T. Sagiya, F. Kimata, J. Efendi, H. Z. Abidin, I. Meilano, Interplate coupling model off the southwestern coast of Java, Indonesia, based on continuous GPS data in 2008-2010, 2014, *Earth and Planetary Science Letters*, 401, 159-171, doi.org/10.1016/j.volgeores.2014.09.001.
17. Gunawan E, T. Sagiya, T. Ito, F. Kimata, T. Tabei, Y. Ohta, I. Meilano, H. Z. Abidine, Agustan, N., Irwand, D. Sugiyanto, 2014, A comprehensive model of postseismic deformation of the 2004 Sumatra-Andaman earthquake deduced from GPS observations in northern Sumatra, *Journal of Asian Earth Sciences*, 88-1, 218-229, doi.org/10.1016/j.jseae.2014.03.016.
18. 木股文昭, 2014, 御嶽山: 有史初の噴火から35年で再噴火 活火山と向かい合う研究者と地元, *科学*, 84-12, 1229-1235, 2014. 11
19. 太田 裕・小山真紀, 2015, 2011年東日本大震災に伴う人間被害の激甚性-既往地震群との対比でみる死者発生の年令等依存性, *日本地震工学学会論文集* 15, 2015, 11-24, doi.org/10.5610/jaee.15.2_11.
20. 三上卓, 2014, 東日本大震災の津波犠牲者に関する調査分析-山田町・石巻市-, *土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)*, 70, No. 4, (地震工学論文集, Vol. 33), 1_908-1_915, doi.org/10.2208/jsce.jsee.70.1_908.
21. 佐野 修・大久保慎人・浅井康広・石井 紘, 2014, 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 -遠方応力評価に向けて-, *東濃地震科学研究所報告*, 34, 1-8.
22. 川崎一郎, 2015, 2011東北地震の時に房総半島南部から三浦半島で生じた巨大レゾナンス. *東濃地震科学研究所報告*, 34, 31-37.
23. 本多 亮・田中俊行・宮島力雄, 2015, 御嶽山における繰り返し重力観測測線の構築, 2014, *東濃地震科学研究所報告*, 34, 113-126.

<著作>

座小田豊・田中克・川崎一朗, 『防災と復興の知 3・11以後を生きる』, 東京大学出版会, 東京, 2014.

論文 (平成27年度)

1. Shimizu, H., Y. Hiramatsu and I. Kawasaki, 2015, Search for latitudinal variation of spectral peak frequencies of low-frequency eigenmodes excited by great earthquakes, *Polar Science*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.polar.2014.07.002>.
2. 古谷元・畠俊郎・渡部直喜・後藤聡・土井一生・川崎一朗, 2014年11月22日長野県北部を震源とする地震で発生した斜面災害の概要, 日本地すべり学会誌, 52, 1, 2015.
3. 土井一生・川崎一朗・釜井俊孝, 2015, 長野県神城断層地震による堀之内地区の斜面変状, *日本自然災害科学*, 34-1, 7-14.
4. Kimata, Y. Asai, R. Honda, T. Tanaka, H. Ishii, R. Miyajima, 2015, Ground Subsidence Following Groundwater Drawdown by Excavating of 500 m Deep Investigation Shafts in Granite Body in Mizunami, Central Japan in 2004-2012, *Engineering*, 7, 424-433
5. Ohkura T., T. Tabei, F. Kimata, T. C. Bacolcol, Y. Nakamura, A. C. Luis, Jr., A. Pelicano, R. Jorgio, M. Tabigue, M. Abrahan, E. Jorgio, E. Gunawan, 2015, Plate Convergence and Block Motions in Mindanao Island, Philippine as Derived from Campaign GPS Observations, *Journal of Disaster Research* Vol.10 No.1, 59-66.
6. Murase M., F. Kimata, Y. Yamanaka, S. Horikawa, K. Matsuhira, T. Matsushima, H. Mori, T. Ohkura, S. Yoshikawa, R. Miyajima, H. Inoue, T. Mishima, T. Sonoda, K. Uchida, K. Yamamoto, H. Nakamichi, 2016, Preparatory process preceding the 2014 eruption of Mount Ontake volcano, Japan: insights from precise leveling measurements, *Earth, Planets and Space* 68:9, doi:10.1186/s40623-016-0386-4
7. 東濃地震科学研究所, 2016, 2014年御嶽山噴火前における割石温泉(岐阜県飛騨市)の間欠泉でのガス噴出回数の増加, 第134回噴火予知連絡会資料, 2016.2.17
8. 東濃地震科学研究所・防災科研・名古屋大学, 2015, 御嶽山麓での重力観測, 第132回噴火予知連絡会資料, 2015.6.15
9. 日本大学文学部・名古屋大学・京都大学・九州大学・北海道大学・東濃地震科学研究所・気象庁, 2015, 精密水準測量による御嶽山における上下変動(2014年10月-2015年4月)(速報), 第132回噴火予知連絡会資料, 2015.6.15
10. 木股文昭, 2015, 「インドネシアの地震津波災害と人々」, 雑誌歴史地理教育10月号特集・インドネシアを学ぶ18-23, 2015.10.1
11. Naoi M., M. Nakatani, T. Igarashi, K. Otsuki, Y. Yabe, T. Kgarurne, O. Murakami, T. Masakale, L. Ribeiro, A. Ward, H. Moriya, H. Kawakata, S. Nakao, R. Durrheirn, H. Ogasawara, 2015, Unexpectedly frequent occurrence of very small repeating earthquakes ($-5.1 \leq \leq -3.6$) in a South African gold mine: Implications for monitoring intraplate faults, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 120, doi:10.1002/2015JB012447
12. Moriya H., M. Naoi, M. Nakatani, G. van Aswegen, O. Murakami, T. Kgarume, A. K. Ward, R. J. Durrheim, J. Philipp, Y. Yabe, H. Kawakata, H. Ogasawara, 2015, Delineation of large localized damage structures forming ahead of an active mining front by using advanced acoustic emission mapping techniques, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 79, 157-165, doi:10.1016/j.ijrmm.2015.08.018
13. Okubo M., H. Ogasawara, S. Nakao, O. Murakami, H. Ishii, A. K. Ward, 2015, Dynamic Strain in a South African Gold Mine Produced by the 2011 Tohoku Earthquake, *International Association of Geodesy Symposia*, doi: 10.1007/1345_2015_207
14. Tanaka, T., R. Honda, and R. Miyajima, 2016, Current status and problems of gravity observations for monitoring the Ontake Volcano, *東濃地震科学研究所報告*, 36, 139-150.
15. 浅井康広、石井紘, 2016, 東濃地震科学研究所鉦山地下坑道閉鎖に伴う鉦山およびその周辺域での地下水/地殻歪変化, *東濃地震科学研究所報告*, 36, 45-51.
16. 太田裕、小山真紀、志垣智子: 2011年東日本大震災に伴う人間被害の激甚性(2)ー乳幼児・高齢者の死亡率を再考するー, *東濃地震科学研究所報告*, Seq. No. 35, 地震防災分野一実践的地震防災教育・活動一, pp. 81-91, 2015. 3
17. 太田裕、人命損失に注目した地震災害の一区分法について, *東濃地震科学研究所報告*, Seq. No. 37, 地震防災分野一実践的地震防災教育・活動一191 - 197, 2016. 3
18. 太田裕、小山真紀、志垣智子: 2011年東日本大震災に伴う人間被害の激甚性ー年令依存性に関する伝統の死亡率算定法を吟味するー, *東濃地震科学研究所報告*, Seq. No. 37, 地震防災分野一実践的地震防災教育・活動一, 91-101, 2016. 3
19. 太田裕・小山真紀: 2011年東日本大震災に伴う人間被害の激甚性(1)ー既往地震群との対比でみる死者発生の年令等依存性ー, *日本地震工学会論文集*, 11-24, 2015. 5
20. Kimata F., Y. Asai, R. Honda, T. Tanaka, H. Ishii, R. Miyajima: Ground Subsidence Following Groundwater Drawdown by Excavating of 500 m Deep Investigation Shafts in Granite Body in Mizunami, Central Japan in 2004-2012, *Engineering*, 2015, 7, 424-433
21. 谷口仁士、豊田祐輔、崖明姫: 震災遺構からのメッセージは生かされているのか? 三重県に遺された津波碑について, *東濃地震科学研究所報告*, Seq. No. 37, 地震防災分野一実践的地震防災教育活動一, 171-

189、2016.3

22. 石井紘、2016,地震予知計画発足(1965年)以来の地殻変動連続観測の流れ、東濃地震科学研究所報告、36,1-44、

<著作>

1. Mingji Cui, Hitoshi Taniguchi, Yusuke Toyoda and Hidehiko Kanegae: A Simulation of Economic Loss Impact and Recovery: A Case Study of Shima City Assuming Nankai Trough Earthquake, Kaneda Toshiyuki, Kanegae Hidehiko, Toyoda Yusuke and Rizzi Paola (Edi.), Simulation and Gaming in the Network Society, Springer Science Business Media, Mar.2016.
2. 木股文昭・松多信尚、東濃地方の地震とその災害、自費出版、102pp、2016.3(土岐市郷土出版助成)

論文(平成28年度)

1. 石井 紘、浅井康広、2017,ボアホール歪、応力観測計器により観測された 弾性体力学の不変量と計器の信頼性、地震第2 輯、69、49-58、 doi.10.4294/zisin.69.49.
2. OHTA, Y. & M. KOYAMA, 2016, Severity of Mortality in the Great East Japan Earthquake; Age Dependency in Comparison with Past Major Earthquakes, Journ. Japan Assoc. Earthq. Engr., Vol.16, No.7, Page 35-51.
3. 太田裕、小山真紀、志垣智子 2016、2011 年東日本大震災に伴う人間被害の激甚性 一年令依存性に関する 伝統の死亡率算定法を吟味する 一、東濃地震科学研究所報告 39、91-101.
4. Yamaya, Y., T. Mogi, R. Honda, H. Hase, T. Hashimoto, and M. Uyeshima, 2016, Three- dimensional resistivity structure in Ishikari Lowland, Hokkaido, northeastern Japan - Implications to strain concentration mechanism, Geochem. Geophys. Geosyst., 18, 735-754. doi.org/10.1002/2016GC006771.
5. Wada, S., Sawada, A., Hiramatsu, Y., Matsumoto, N., Okada, S., Tanaka, T., and Honda, R., 2017, Continuity of subsurface fault structure revealed by gravity anomaly: the eastern boundary fault zone of the Niigata plain, central Japan, Earth Planets Space, 69: 15. doi:10.1186/s40623-017-0602-x
6. Tabei T., F. Kimata, T. Ito, E. Gunawan, H. Tsutsumi, Y. Ohta, T. Yamashina, Y. Soeda, N. Ismail and 3 more, 2015, Geodetic and Geomorphic Evaluations of Earthquake Generation Potential of the Northern Sumatran Fault, Indonesia, Part of the series International Association of Geodesy Symposia pp 1-8, doi 10.1007/1345_2015_200.
7. Ito T., E. Gunawan, F. Kimata T. Tabei, I. Agustan., Y. Ohta, N. Ismail, I. Nurdin, and D. Sugiyanto, 2016, Co-seismic offsets due to two earthquakes (Mw6.1) along the Sumatran fault system derived from GNSS measurements. Earth, Planets and Space, 68:57 DOI: 10.1186/s40623-016-0427-z.
8. 木股文昭、生き残るすべを考える私たちの日常の災害対策、東海自治体問題研究所所報 636 号、2-19、2016.4. <http://tokaijichiken.web.fc2.com/syohou/2016.3.10/2016.3.10.2-14p.pdf>
9. 日大、名大、京大、九大、北大、東濃研、精密水準測量による御嶽山における上下変動(2006年4月-2014年10月)、87-89. 火山噴火予知連絡会会報(第119号)、2016
10. 川崎一朗、加藤照之、2016、科学史、科学哲学の枠組みを借りた地震予知研究についての論点整理の試み、地震第2 輯、第69 卷、11-22、 doi.org/10.4294/zisin.69.11.
11. 石黒聡士、熊原康博、後藤秀昭、中田高、松多信尚、杉戸信彦、廣内大助、渡辺満久、澤 祥、鈴木康弘、2016、UAV による空撮と SfM-MVS 解析による地表地震断層の地形モデル作成とその精度: 2014 年11 月長野県北部の地震を例に(UAV 小特集: 最新法規から応用 技術まで) 日本リモートセンシング学会誌、Vol. 36、 pp. 107-116、doi.org/10.11440/rssj.36.107.
12. 石黒聡士、松多信尚、井上公、中田高、田中圭、石山達也、箕田友和、竹竝大士、森木ひかる、廣内大助、2016、UAV を用いた平成 28 年熊本地震の地表地震断層の撮影と地形モデル作成(緊急特集平成28年熊本地震とリモートセンシング)、日本リモートセンシング学会誌、Vol. 36、214-217、doi.org/10.11440/rssj.36.214.
13. Hayakawa, Y., S. Kusumoto, and N. Matta, 2016, Application of terrestrial laser scanning for detection of ground surface deformation in small mud volcano (Murono, Japan). Earth., Planets and Space, 68.1, 1-10, doi.10.1186/s40623-016-0495-0.
14. Sugito, N., H. Goto, Y. Kumahara, H. Tsutsumi, T. Nakata, K. Kagohara, N. Matsuta and H. Yoshida, 2016, Surface fault ruptures associated with the 14 April foreshock (Mj 6.5) of the 2016 Kumamoto earthquake sequence, southwest Japan, Earth, Planet and Space 68, 1: 170. doi: 10.1186/s40623-016-0547-5
15. 松多信尚、2016、話題提供 日本の中でみた瀬戸内地方の土砂災害の特徴(2015 年度 地域地理5 学会 大会記録) (シンポジウム「瀬戸内」の災害を考える: 広域災害に向けて) 地域地理研究 22.1、67-69.
16. Ishii, H. and Y. Asai, 2016, Characteristics of the stress and barometric seismograms produced by the 2011 Tohoku Earthquake (M9.0) and vertical movements derived from barometric seismograms, Earth, Planets and Space, 68:61 doi

＜著作＞

1. 木股文昭、松多伸尚、東濃地方の地震とその災害、東濃地震科学研究所、94pp、2016.6.
2. 山田辰義、木股文昭、庄内川に生まれ泣かされても七転び八起き：2000年東海豪雨が襲った清須市西枇杷島町、自費出版、64pp、2016.9
3. 木股文昭、御嶽山：二度と犠牲をださない、自費出版、96pp、2017.2

論文（平成 29 年度）

1. 深沢晋治、木股文昭、1586年天正地震における「阿波の地割れ」の史的検討、東濃地震科学研究所 地殻活動研究委員会 2017年度報告, 40, 163-170, 2018.
2. 古本宗充、田中俊行、気圧変動および潮汐に伴う地下水の質量移動、東濃地震科学研究所 地殻活動研究委員会 2017年度報告, 40, 37-42, 2018.
1. 石井 紘、浅井康広、古本宗充、連続観測応力計の観測レンジは如何に広いのか？、東濃地震科学研究所 地殻活動研究委員会 2017年度報告, 40, 9-12, 2018.
2. 笠原 稔、石井式歪計・応力計で記録される地震動と地震規模の関係、東濃地震科学研究所 地殻活動研究委員会 2017年度報告, 40, 13-20, 2018.
3. 川崎一朗・飛田哲男、はじめに、琵琶湖疏水の耐震性を考える-琵琶湖西岸断層帯が活動した場合の地殻変動と強震動の影響-, 自然災害科学 J. JSNDS, 36-1, 5-7, 2017.
4. 川崎一朗、日本海沿岸部で観測された短周期前駆津波：序報、東濃地震科学研究所 地殻活動研究委員会 2017年度報告, 40, 143-146, 2018.
5. 川崎一朗、富山平野に潜在する深刻な地殻変動災害ポテンシャル、東濃地震科学研究所 防災研究委員会 2016年度報告, 1-10, 2017.
6. 木股文昭、2014年御嶽山噴火の犠牲者遺族訴訟が意味するもの、巨大地震災害の国際比較研究報告書, 46-57, 2017.
7. 木股文昭、御嶽山火山防災にネットワークの一層の活用を、東濃地震科学研究所 防災研究委員会 2017年度報告, 41, 99-106, 2018.
8. 木股文昭、美濃焼：濃尾震災にめげず日本一の産地へ、地震ジャーナル, 64(2017.4), 42-43.
9. 木股文昭、松多伸尚、東濃地方の地震とその災害(二刷)、東濃地震科学研究所、94pp、2018.3
10. 國友孝洋、石井 紘、浅井康広、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 地殻活動研究委員会 2017年度報告, 40, 71-80, 2018.
11. Pratama C., T. Ito, R. Sasajimab, T. Tabei, F. Kimata, E. Gunawan, Y. Ohta, T. Yamashina, N. Ismail, I. Nurdin, D. Sugiyanto, U. Muksin, I. Meilano, Transient rheology of the oceanic asthenosphere following the 2012 Indian Ocean Earthquake inferred from geodetic data, {Yit Journal of Asian Earth Sciences}, doi:10.1016/j.jseaes.2017.07.049, 2017.
12. 佐野 修、新開発ボアホール応力計の信頼性評価について -理論地震波形との比較-, 東濃地震科学研究所 地殻活動研究委員会 2017年度報告, 40, 27-36, 2018.
13. 志垣智子、太田裕、宮城道雄、地震に起因する人間被害の把握と減災戦略(短報)、東濃地震科学研究所 防災研究委員会 2017年度報告, 41, 85-91, 2018.
14. 鈴木貞臣、大久保慎人、今西和俊、武田直人、立体アレイと Hi-net を利用した深部低周波地震(LFE)の詳細な震源決定、東濃地震科学研究所報告 38, 133-139, 2017.
15. 鈴木貞臣、東海地域の深部低周波地震と海洋プレート内地震の発生場所から推定される沈み込む海洋地殻の特性(レビュー)、東濃地震科学研究所 地殻活動研究委員会 2017年度報告, 40, 147-154, 2018.
16. Tanaka, T. and Honda, R., Vertical gravimeter array observations and their performance in groundwater level monitoring, Earth and Space Science, doi:10.1002/2017EA000311, March, 2018.
17. 田阪茂樹、2204年から2017年の割石温泉の湯量観測、東濃地震科学研究所 地殻活動研究委員会 2017年度報告, 40, 43-50, 2018.

論文（平成 30 年度）

1. 本多 亮・柳澤孝一・田中俊行・浅井康広、2019、重力変化で捉える既知の水理地質構造中の地下水流動 - 岐阜県東濃地域における長期水圧低下を例として -、物理探査, 72, 34-48(印刷中).
2. 古本尚樹、札幌市北区役所保健福祉部職員に聞く冬期間の活動における現状と課題、地域保健, 9月号, 57-61, 2018.

3. Gunawan, S. Widiyantoro, S. Rosalia, M. Rahmawan Daryono, I. Meilano, P. Supendi, T. Ito, T. Tabei, F. Kimata, Y. Ohta, N. Ismail, Coseismic slip distribution of the July 2, 2013 Mw 6.1 Aceh, Indonesia, earthquake and its tectonic implications from GPS, geological offsets and aftershock data, *Bulletin of the Seismological Society of America*, doi:10.17850120180035, 2018.
4. 石井 紘・浅井康広・古本宗充, 2019, 連続観測用ボアホール応力計で観測される応力・歪の観測レンジは如何に広いのか? —長周期地震計の波形および GNSS データとの比較から得られた観測データの特徴, *地震* 71.139. DOI: 10.4294.
5. Pratama, T. Ito, T. Tabei, F. Kimata, E. Gunawan, Y. Ohta, T. Yamashina, I. Nurdin, D. Sugiyo, U. Muksin, N. Ismail, I. Meilano, Evaluation of the 2012 Indian Ocean co-seismic fault model in 3-D heterogeneous structure based on vertical and horizontal GNSS observation, *AIP Conference Proceedings*, 1987, 020011, doi:10.1063/1.5047296, 2018.
6. Suzuki, S., Okubo, M., Imanishi, K., Takeda, N., Detection method for pairs of P and S waves of deep low-frequency earthquakes using a 3-D array in the Tokai area of the Nankai subduction and its application to hypocenter determination. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 19, <https://doi.org/10.1029/2018GC007479>, 2018.
7. Yamaguchi Junya, Makoto Naoi, Masao Nakatani, Hirokazu Moriya, Toshihiro Igarashi, Osamu Murakami, Yasuo Yabe, Raymond Durrheim, Hiroshi Ogasawara, Emergence and disappearance of very small repeating earthquakes on a geological fault in a gold mine in South Africa, *Tectonophysics*, 2018, 747 – 748, pp. 318 – 326, DOI: 10.1016/j.tecto.2018.10.014
8. 松多信尚・木股文昭, 災害の特徴から自然現象を読み解く:濃尾地震の被害から検証する岐阜・一宮線, *International Comparative Study, on Mega-Earthquake Disasters*:, *Collection of Papers Vol.3, 巨大地震災害の国際比較研究報告書 3*, Edited by M. Takahashi, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 40-48.

論文 (平成 31 年度)

1. 古本尚樹, 大規模地震後における高齢者の健康に関して-要介護度の変化と環境や行動等の関係について, *地域保健(東京法規出版)*3月号, 74-77, 2019.
2. 古本尚樹, 熊本地震被災住民における健康と生活について~被災地での調査から~, *地震ジャーナル 67 (地震予知総合研究振興会)*, 30-37, 2019.
3. 古本尚樹, 2013 年福知山花火大会火災に関する福知山市消防署への聞き取り 調査から, マスギャザリングへの対応を考える, *東濃地震科学研究所研究速報 No. 1*, 1-7, 2019.
4. 古本尚樹, 熊本地震における自治体の対応について ~西原村における職員の聞き取り調査から~, *東濃地震科学研究所研究速報 No. 2*, 1-8, 2019.
5. 石井 紘・浅井康広, 2019, 連続観測用ボアホール応力計の特徴に関するまとめと考察——応力と歪を観測・応力は岩盤の弾性定数に無関係・二次元不変量と鉛直成分の相似・分解能とダイナミックレンジ——*地震* 2, 72. 43-51. doi:10.4294/zisin.2018-9.
6. 木股文昭・松多信尚, 2019, 1891 年濃尾地震における東濃の陶器産業の迅速な復興過程, *International Comparative Study, on Mega-Earthquake Disasters*:, *Collection of Papers Vol.3, 巨大地震 災害の国際比較研究報告書 3*, Edited by M. Takahashi, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 73-79.
7. 松多信尚・木股文昭, 2019, 災害の特徴から自然現象を読み解く:濃尾地震の被害から検証する岐阜・一宮線, *International Comparative Study, on Mega-Earthquake Disasters*:, *Collection of Papers Vol.3, 巨大地震災害の国際比較研究報告書 3*, Edited by M. Takahashi, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 40-48.
8. 鈴木貞臣, 東海地域で発生するスラブ内地震の線状配列, *東濃地震科学研究所報告*, 42, 79-84, 2019.
9. 角田叡亮・岡田成幸・中嶋唯貴: 少子高齢化現象が地震津波複合災害の人的被害に与える影響評価 ~自助・共助・公助による減災対策効果の限界~, *日本地震工学会論文集*, Vol. 19, No. 5, pp. 423-439, 2019.
10. 篠田茜・岡田成幸・中嶋唯貴: 繰り返し荷重を受ける木造建物の損傷度重量問題の取り組み: 耐震法典劣化の確率評価を用いた後続地震による 2 次被害シミュレーション, *日本地震工学会論文集*, Vol. 19, pp. 19, 2020.

論文 (令和 2 年度)

なし

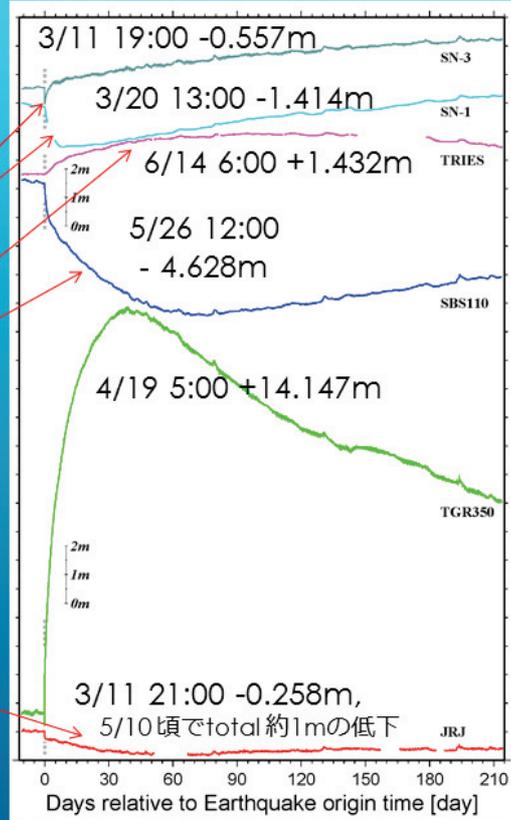
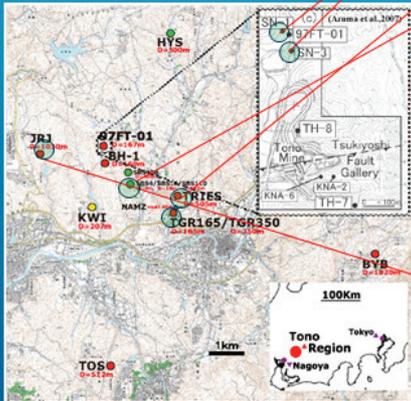
論文（令和3年度）

1. Tanaka, T., Hiramatsu, Y., Honda, R., Sawada, A., and Okada, S., 2021, 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.
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.

研究成果の抜粋

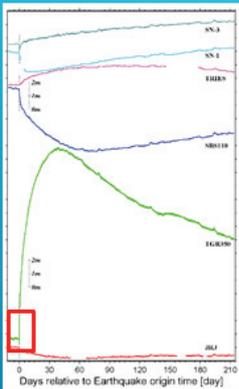
東濃地域で観測された東北地方太平洋沖地震に伴う水位変化

東北地方太平洋沖地震の地震動に伴う各観測点の地下水位変化が観測された。
(地下水位地震応答)

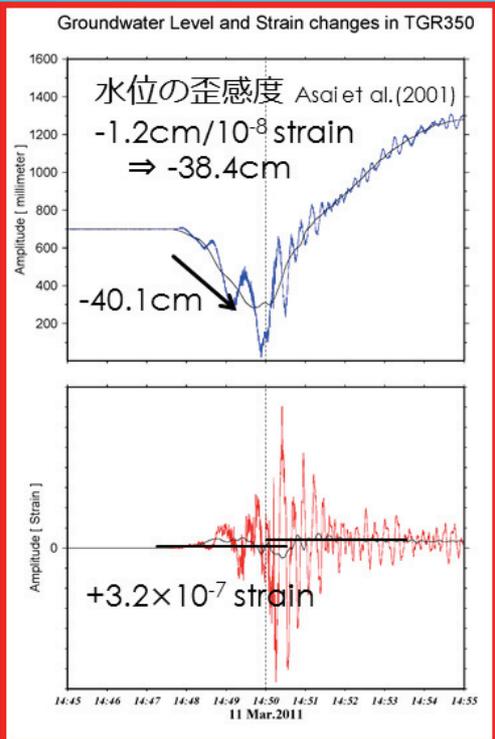
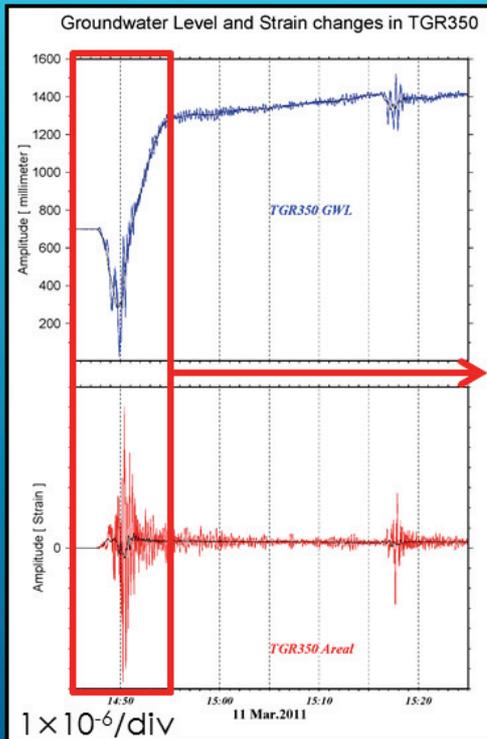


東濃地域で観測された東北地方太平洋沖地震に伴う水位変化 - 1

TGR350の水位 (上図) と面積歪 (下図) 20Hz原記録と移動平均 (カットオフ周波数120秒) 時系列。



・断層モデル (国土地理院) による TGR350での面積歪および体積歪変化 2.892×10^{-7} , 1.928×10^{-7}



デジタル式総合観測システムの改良

従来	平成22年度
石井式ボアホール水平歪計4成分の実装	平成20年度に開発した ボアホール水平応力計 4成分の実装
微弱電波を使用した同軸ケーブル使用のデータ伝送方式(送信最大115.2kbps)	光通信を用いた伝送方式 。送信速度は、最低115.2kbps
変位検出部に経年変化ドリフトが大きいマグネセンサーを使用	経年変化ドリフトを低減した マグネセンサーを使用
A/D変換部 16bitSAR方式	$\Delta\Sigma$ 24bit方式
8chのA/D変換部2個による16センサー・アナログデータのA/D変換	1センサーに1個のA/D変換部を割り当て(ユニット化)
コマンド発行・データ送受信装置(データアーカイブ機能無し)	地上制御部データ送受信装置(アーカイブ機能あり)
水晶温度計(分解能1万分の1度;相対温度測定)	白金抵抗式温度計(分解能1万分の1度;温度校正済み)と温度計の試用(リファレンスは白金抵抗温度計)
磁気方位計による埋設設置方位の測定	磁気方位計に加えMEMS式方位計を実装し、磁気方位計による方位決定の検証と観測計器のピッチングとローリングの検出

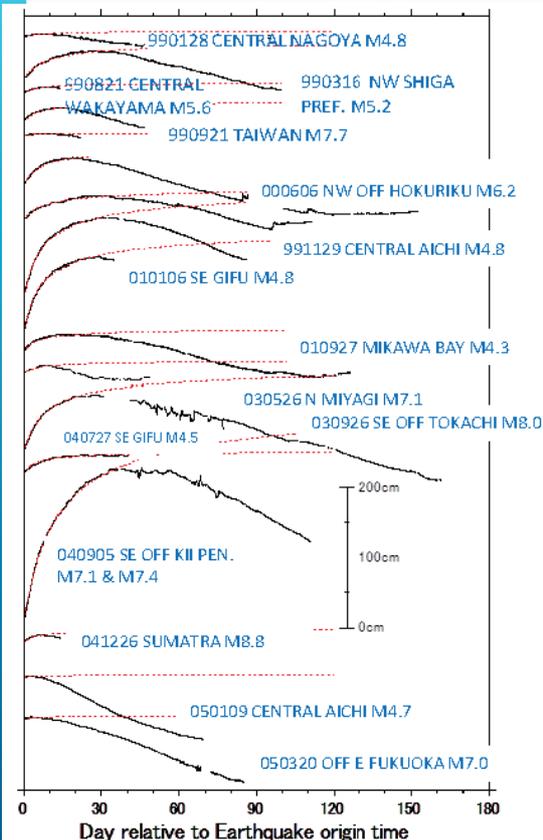
陶史の森観測点512m孔に埋設・設置した「デジタル式地殻活動総合観測装置(光伝送・連続観測型応力型)」の観測システムの改良を行った



2010年3月15日



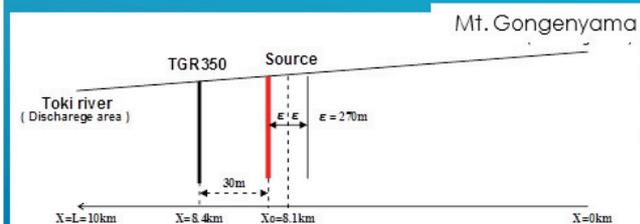
東濃地域で観測された全国の地震に伴う地下水上昇変化



浅井 博士論文 (2006)

瑞浪超深地層研究所立坑掘削開始以前の記録

1998年8月~2005年6月までにTGR350で観測された地下水位地震応答記録(左図;全17例、潮汐・気圧応答除去済)と1次元間隙水圧拡散モデル(Roeloffs, 1998; JGR;下図)による計算値(赤破線)

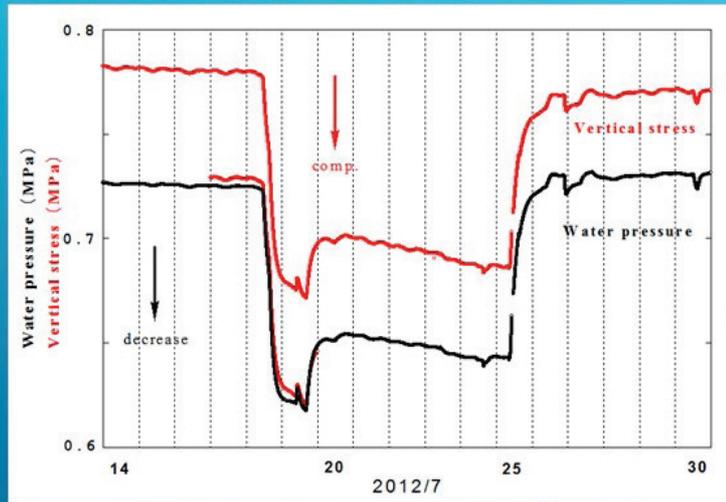


MIU立坑内観測点で観測された水圧変動に伴う応力変化



深度300mボーリング横坑（換気立坑側）における調査孔（水平孔）の掘削。その際、約200L/minの湧水発生・水止め作業が行われる。

それに伴い深度200mボーリング横坑（換気立坑側）にあるSTG200観測点において約±0.7MPaの水圧変化が見られた（黒線）。その際、同孔に埋設設置したボアホール応力計垂直成分にはほぼ同じ応力変化が生じた。



水圧変化 ⇔ 応力変化

1 : 1

◎ 水圧変化の後に応力変化が生じる

応力計の観測能力と精度に関する一つの検証（応力の不変量）

2014/4/2 チリ地震M8.2

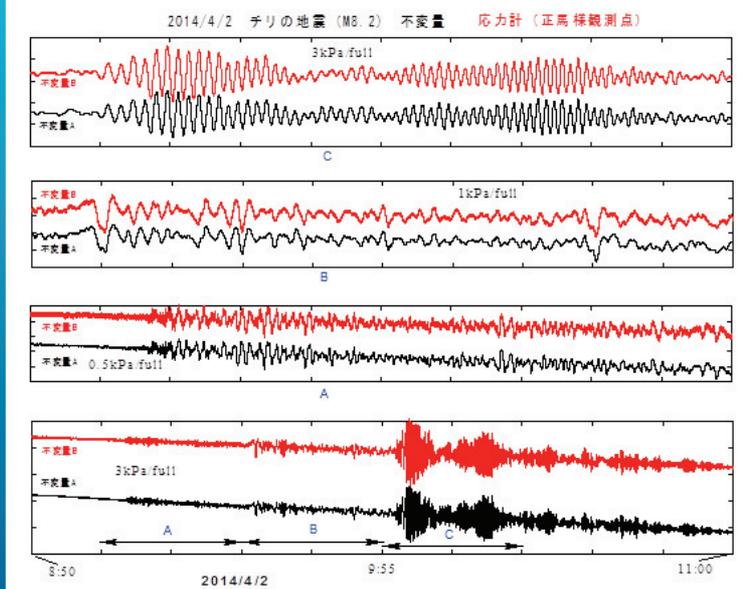
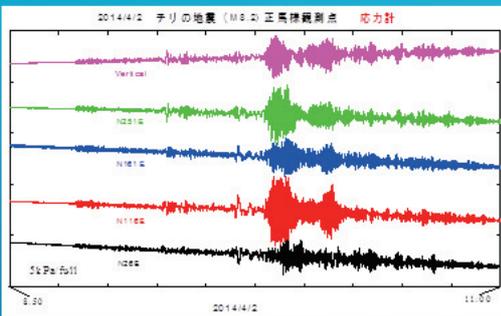
応力地震波形の不変量 (@正馬様)

N251E+N161E と N116E+N26E

⇒ 陶史の森と同様異なる直行2成分から得た不変量の時系列は非常によい一致。

⇒ 観測精度10Pa程度

石井・浅井（2017；地震）

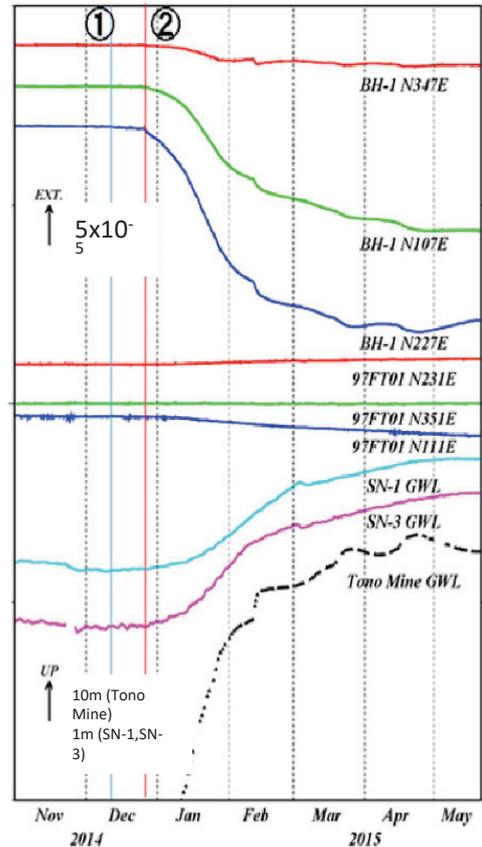


東濃鉱山再冠水に伴う地下水・歪変動

東濃鉱山では、2012年3月に地下坑道の充填作業（埋め戻し）を開始、2014年12月に坑道内に設置されていた排水ポンプが停止（右図①）、坑道内の冠水が始まった。排水ポンプ停止時点ではBH-1の歪計各成分に大きな変化は見られなかった。

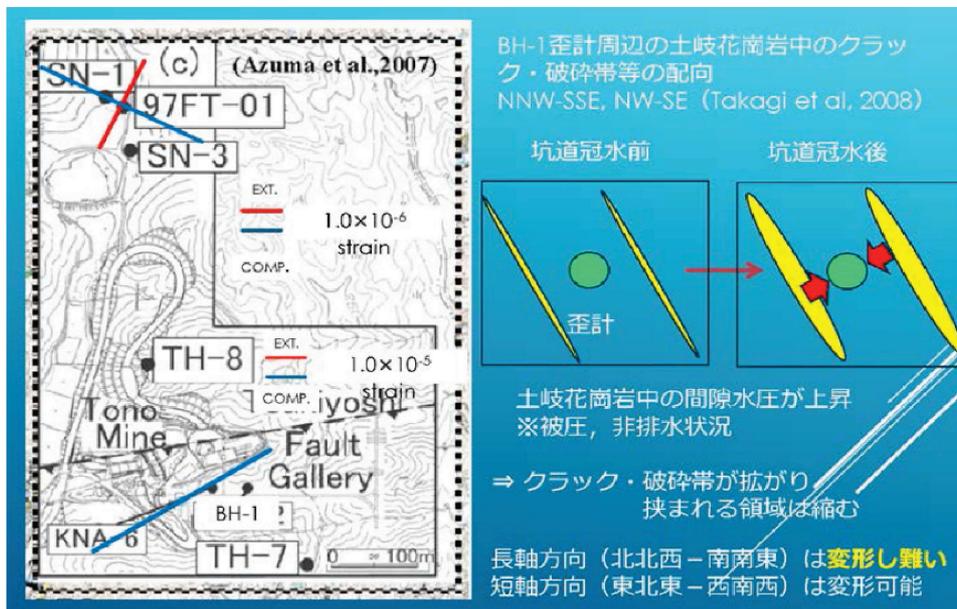
観測結果：12月27日19時頃からBH-1歪計各成分に急激な歪の縮みが始まり、変化が終息の傾向になった2015年4月末までに、BH-1では最大主歪 -1.075×10^{-6} strain、最小主歪 -5.448×10^{-5} strain、面積歪 -5.556×10^{-5} strainが観測された（右図②）。特に東北東－西南西方向に縮みが卓越する。

坑道の充填作業は2015年3月に坑道の閉鎖が完了している。



東濃鉱山再冠水に伴う地下水・歪変動－1

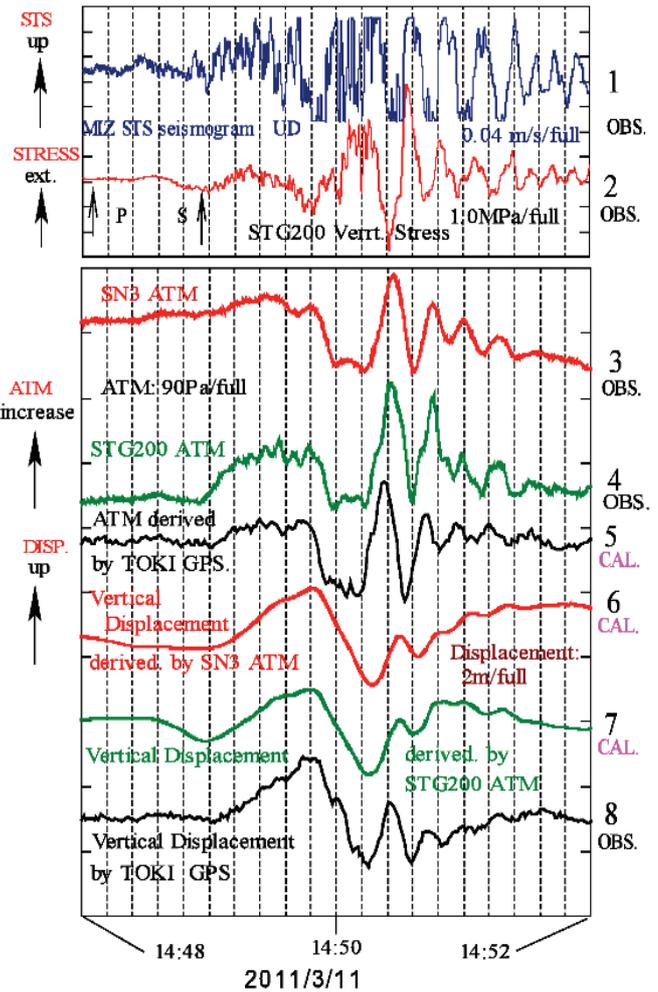
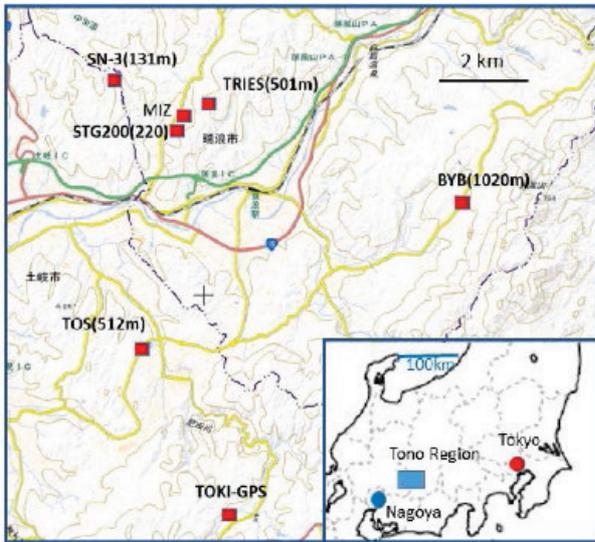
考察：BH-1において東北東－西南西方向に縮みが卓越する歪場を説明するメカニズムを下図に示す。図に示す様な破砕帯（NW-SE走向）に挟まれた位置に歪計があり、間隙水圧の上昇によってクラック・破砕帯が拡がり、相対的に歪計の位置では縮みの場となることが説明可能。



東北地方太平洋沖地震 (2011/3/11 M_w9.0) による気圧地震動とそれから求められた上下変動

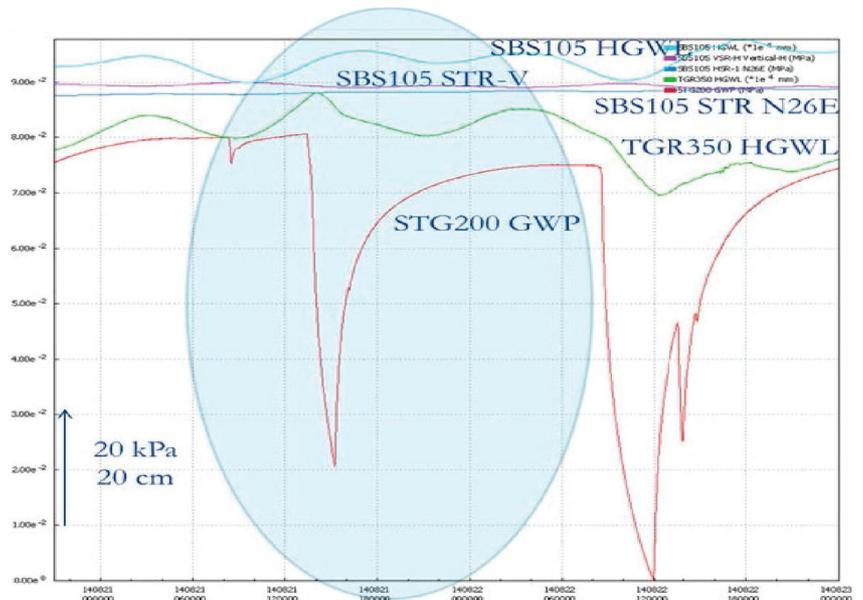
観測点は数に示されている。右図は観測された気圧変動 (3と4) と地理院により観測された上下変動 (8、GPS)である。上下変動 (8) を微分すると5になり、観測された気圧変動 (3と4) に一致する。気圧変動 (3と4) を積分すると6と7になり観測された上下変動8と一致する。観測されたSTS1地震計の波形 (19と応力計の波形 (2) も参考のために示してある。

Ishii and Asai (2016; EPS)



間隙水圧変動の影響範囲

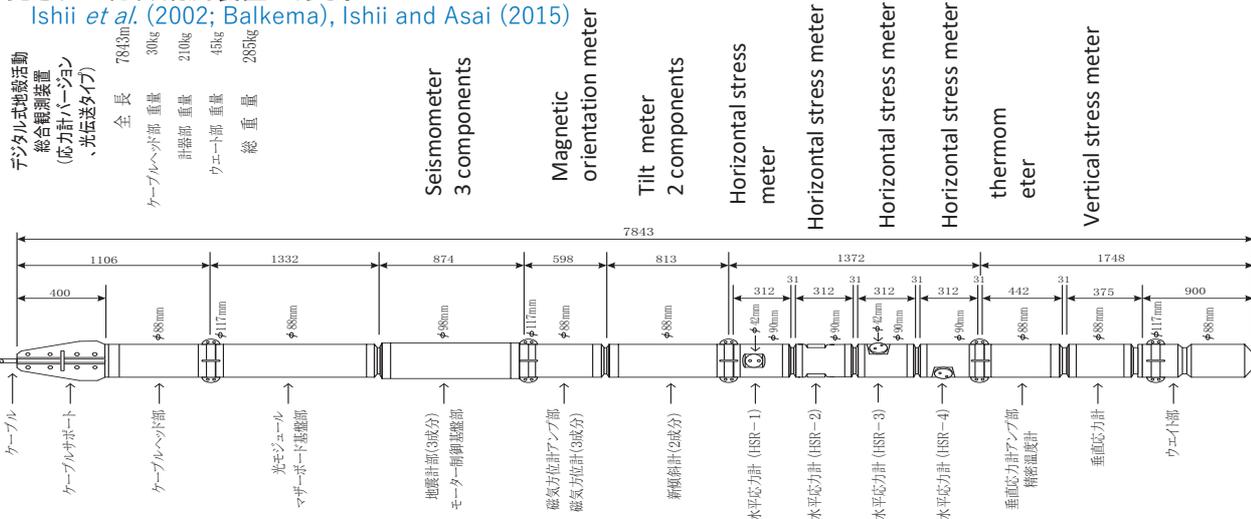
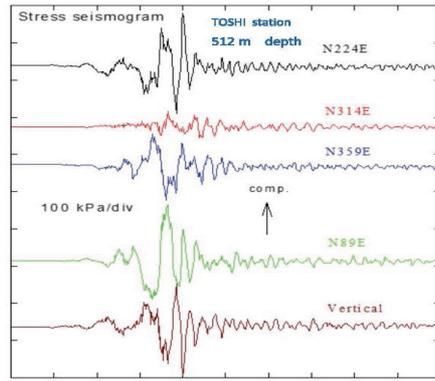
瑞浪超深地層研究所 (MIU) では立坑掘削や試錐孔における水理試験、観測装置の出し入れによって坑道内に毎分数十リットル～数百リットルといった大量湧水が生じている。この大量湧水は土岐花崗岩中の間隙水圧の擾乱を生じさせ、立坑およびその周辺域の間隙水圧状態を変化させている。2014年8月21日22日に、深度300mボーリング横坑 (換気立坑側) 既存水圧観測孔でのモニタリング装置の撤去作業があり、土岐花崗岩中の間隙水圧に擾乱が生じた。観測結果：STG200水圧記録、TGR350の水位記録・歪計記録に影響が出ている (右図)。SBS105の水圧記録と応力計記録には水圧変動の影響が出ていない。MIUで生じた土岐花崗岩中の間隙水圧擾乱 (振幅100kPa =水頭換算1m以下) は距離約500mに位置するTGR350では影響が見られるが、距離約1kmの正馬様SBS105には影響が及んでいないことが明らかとなった。



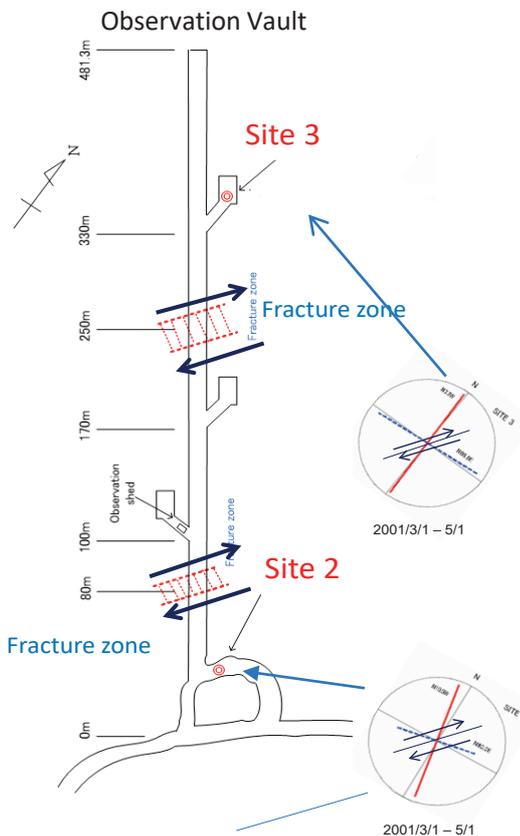
応力計・深部ボアホール計器の開発

地震の切迫度を判断するには応力の常時観測が必要である。この目的のために連続観測用の応力計を開発した。応力は歪と異なり弾性定数に無関係に求まるので、設置場所の弾性定数を知ることなしに地震発生時の切迫時間を推定する応力蓄積を調べることができる。弾性定数が未知でも岩盤の応力値が得られるということは研究観測において非常に有利な特徴である。

右の図は陶史の森ボアホール観測点(TOS;深度512m)に設置された総合観測装置に搭載された応力計により記録された東北地方太平洋沖地震(M_w 9.0)である。下図は開発された総合観測装置である。

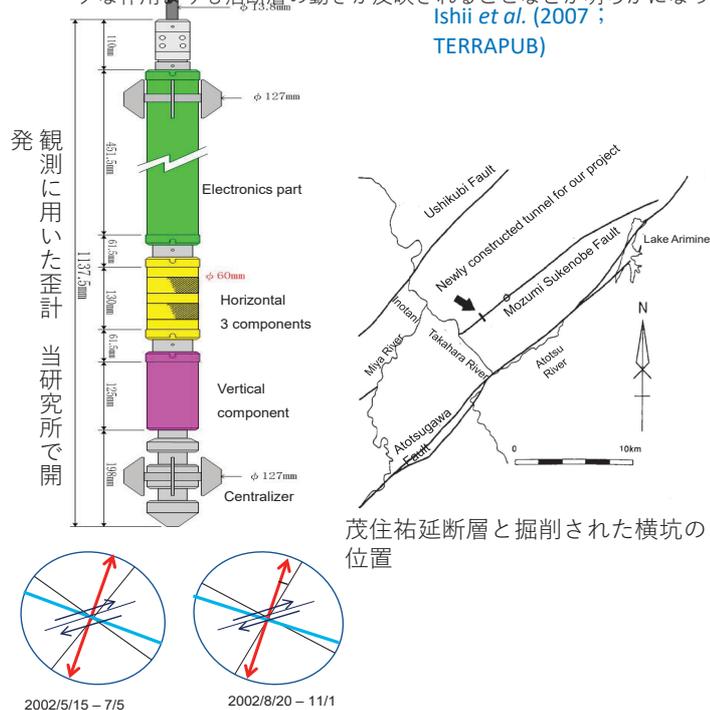


活断層近傍における応力・歪の観測



活断層のふるまいを調べるために活断層近辺において応力測定と歪の連続観測を実施した。観測を実施した活断層は跡津川断層系の茂住祐延断層である。兵庫県南部地震後に企画されたフロンティア計画に基づいて神岡鉱山の茂住坑道から断層を横切るように全長480mのトンネルが掘削された。このトンネル内において応力測定と2カ所において歪の連続観測を実施した。これにより活断層近傍においてはテクトニックな作用により活断層の動きが反映されることなどが明らかになった。

Ishii et al. (2007); TERRAPUB



茂住祐延断層と掘削された横坑の位置

水位変動と断層運動との関連

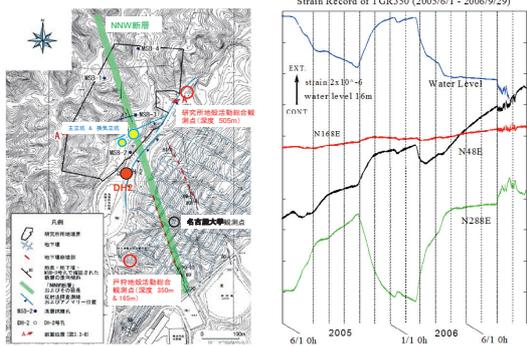


図1 研究現場の位置関係と観測点の分布。図2 2005年6月1日から2006年9月29日までのTGR350の歪み記録。

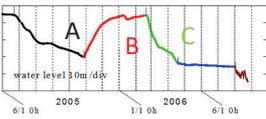


図3 TGR 350の水位変動記録。

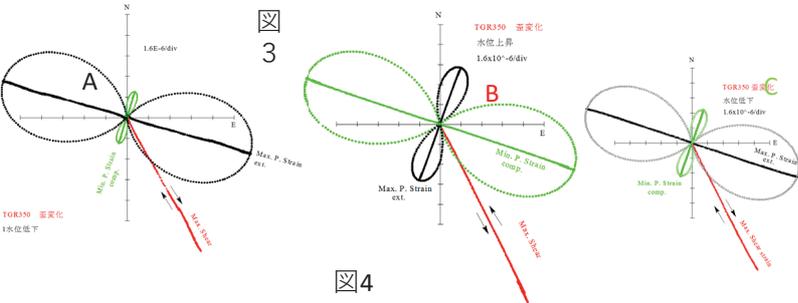


図4 TGR350の歪み変化の様子。

原子力開発研究機構の立坑近くには東濃地震科学研究所のTGR350(深度350m)とTGR160(深度160m)の2カ所のボアホールがあり地殻活動総合観測装置が埋設・設置されている(図1)。緑の太い線は右横ずれのNNW断層である。2005年から2006年にかけて立坑内には湧水と排水により大きな水位変動が生じ、ボアホール内に設置されている歪計には大きな変動が観測された(図2)。図3に示された水位変動に対応する期間の主歪が図4に示されている。黒が最大主歪で緑が最小主歪である。最大せん断歪が赤で示され、ずれの矢印も示されている。この最大せん断歪の方向はNNW断層の走向とほぼ一致している。水位変動と比較すると図5に示されているように水位が下降の時は右横ずれの変動を示し、水位が上昇の時は左横ずれの変動を示すことが明らかになった。

Relationship between maximum shear strain (fault movement) and water level of BH-1 borehole

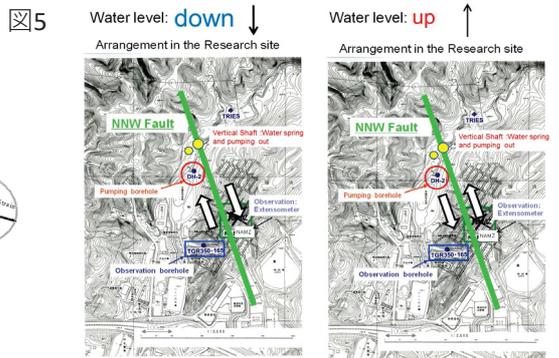
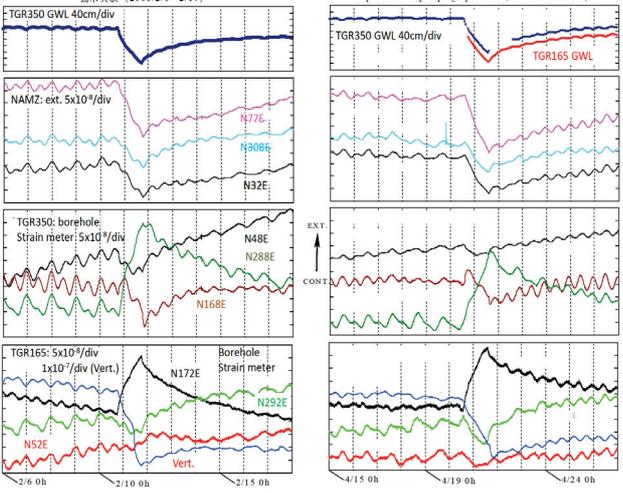


図5 水位変動と断層運動の関係。

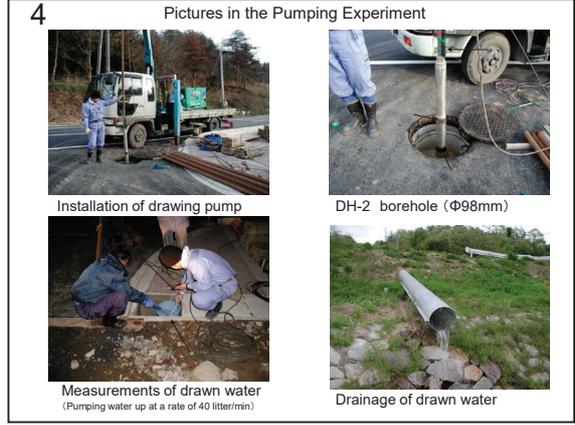
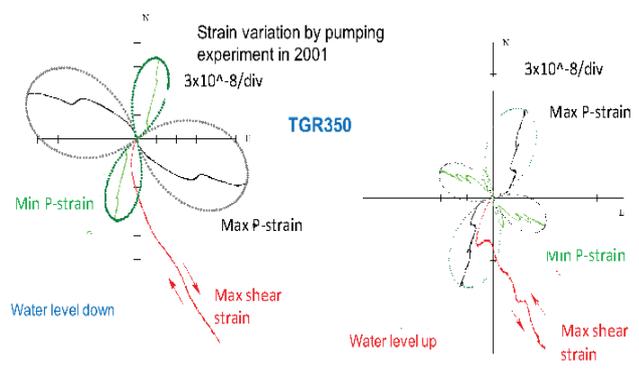
2001年と2002年の揚水実験で得られたデータ



水位変動と断層運動との関連 —揚水実験による結果—

立坑の水位変動と歪変動の関連に関しては前に述べた。立坑から約150m離れた位置にボアホールDH2が掘削されており、深度は500mである(前述の地図参照)。このボアホールにおいて揚水実験を行い、変化をしらべた。下記には実験の写真が示されている。実験は2001年2月と2002年4月の2回行った。左図は上から水位変化、横坑(名古屋大学観測点)における伸縮計の記録、TGR165(深度165m)の歪計記録、TGR350(深度350m)の歪計記録立坑から約500m)を示している。横坑、TGR165、TGR350は立坑から約500m離れている。揚水に伴う水位データに対応して各計器に変動がみられる。2001年と2002年の変化は類似した変化を示している。そこで2001年のTGR350の記録に注目して歪解析を行った結果が左下の図である。この図によると揚水により水位が下降したときには最大せん断歪は右横ずれの変動を示し、水位上昇の時には左横ずれの変動を示している。これは前述の「立坑の水位変化」において得られた結果と一致している。

従って水位が下降の時は右横ずれの変動を示し、水位が上昇の時は左横ずれの変動を示すことが明らかになった。水位変動と断層の歪変化には関連があることが明らかになった。



地下水流動と媒質の変動（多くの観測による結果）

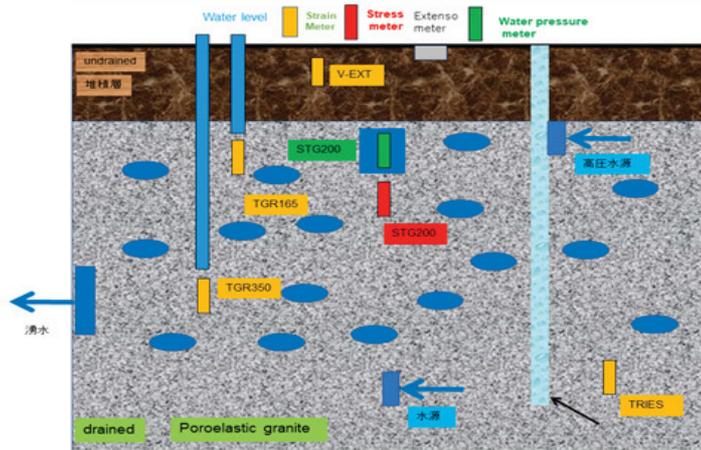


図1：立坑付近の構造モデルと観測計器

東濃地震科学研究所はJAEAの立坑周辺に各種計器を設置し地下水流動と地球物理学的観測量との関連を調べている。図1は立坑付近の構造モデルと計器を示している。計器はボアホール応力計、ボアホール歪計、伸縮計、温度計、水圧計、水位計などである。地震が遠方で発生したときには水位は上昇する。立坑内で湧水が生じたときは水位が低下する。他の計器はその時の岩盤の変動を記録している。これらの観測結果から変動が明らかになった。

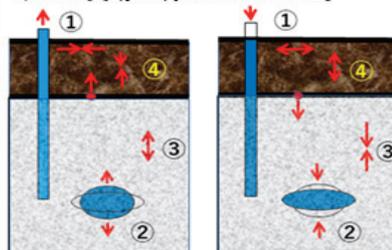


図3：水位上昇(左)と水位下降(右)の場合の変動

図2は各種センサーにより記録された地震前後の変動(左)と湧水による変動(右)である。これらのデータから水位の上昇・下降に対応した各種センサーの変動が明らかになる。その変動を模式的に示したのが図3である。例えば堆積層と花崗岩層において変動が異なる。例えば水位上昇の時、堆積層では上下方向に縮みであるが花崗岩層では伸びになる。また、水位上昇時には間隙水圧は上昇し、下降時には低下する。

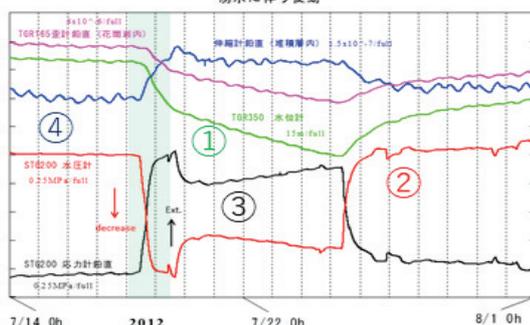
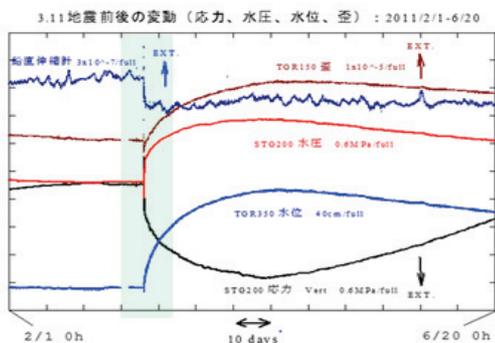


図2：地震前後の変動(左)と湧水による変動(右)

ボアホール地殻活動総合観測装置の感度検定システムの開発

ボアホール地殻活動総合観測装置(装置)の組みあがった状態で内蔵している応力計の感度検定を行うシステムを開発した。装置は重量約300kgで全長が約8mであり室内では温度変化の影響を受けるため検定を行うことは困難である。そこで温度が一定である横坑内に約10メートルの長さのボアホールを傾斜5度で掘削しケーシングを取り出るとともに坑口から装置のケーブルを取り出す構造にした。坑口はそのほかに水圧を加えられる密閉構造の取り出し口も製作した(図1)。装置は約300kgもあり、重いので製作した吊り下げ架台により容易にボーリング孔内に挿入することを可能にした(図2)。このシステム開発により、新しく開発したボアホール応力計の検定も可能になった。加圧検定の範囲は装置の設置深度により異なるが約20MPa程度の加圧検定は容易である。

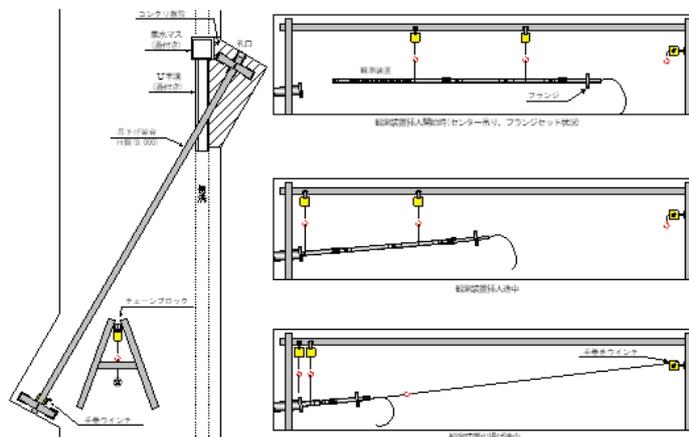


図2：観測装置吊り下げ架台によるボーリング孔への総合観測装置の設置概念図

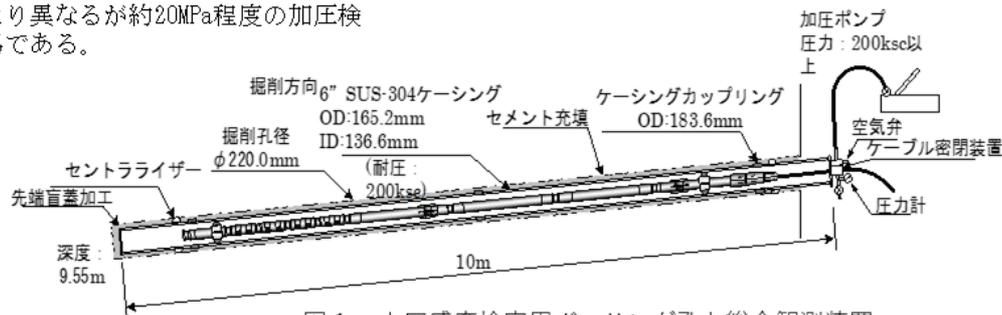


図1：水圧感度検定用ボーリング孔と総合観測装置

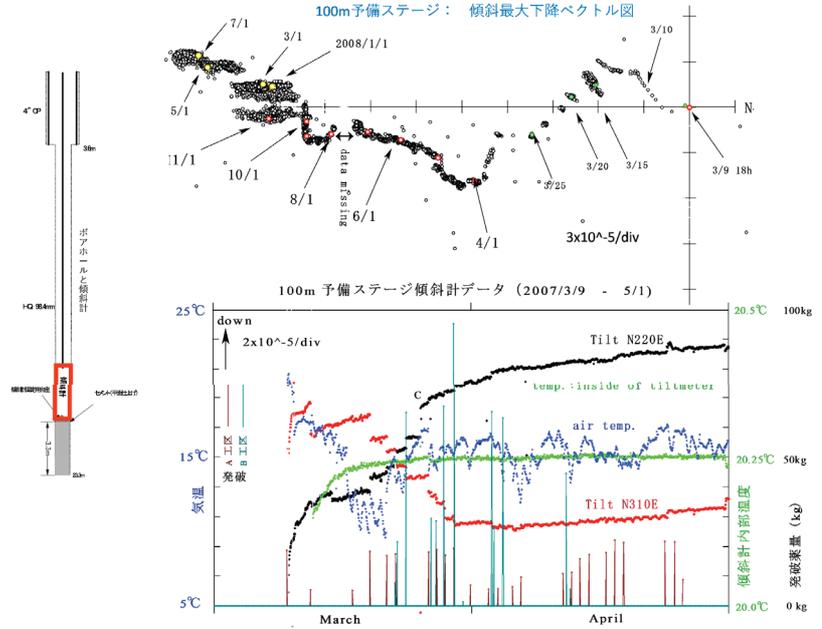
200mステージ掘削に伴う100mステージの傾斜変動

東濃地震科学研究所では100m予備ステージにおいて傾斜計による傾斜変動の連続観測を実施している。100m予備ステージにおいて安定した観測を行うために深度23.3mのボアホールを掘削し孔底に当研究所において開発した傾斜計を設置した。200mステージの掘削が実施され発破作業に伴う傾斜変動が観測された。ここでは2007年3月9日から2008年8月31日までのデータの解析結果を示す。得られた主な結果は以下のようである。

1. 全体的な傾斜変動は 2007年4月頃から南側下降から南南西下降に傾向が変化している。
2. 2007年3月9日から4月1日頃までは発破に対応した傾斜ステップが観測され、南方向への下降傾斜が観測された。
3. 2007年4月1日以降は発破に対応した顕著な傾斜変動は観測されなくなった。



傾斜計設置に関連した写真



I. 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

制御震源の実用化と有用性の検証

熊本地震によるP波速度変化と間隙水圧変化との対応

平成27年度～平成28年度に新たに開発した超磁歪震源システムを用いた高周波の弾性波による地下の常時モニタリング試験を2016年4月から開始した(図1)。送信周波数は100.5-200.5Hzである。このシステムでは、700m離れた観測点 (TRIES) でも観測データを1日間スタッキングすれば、直接P波の走時変化を約25 μ sの精度で走時変化を追跡できることが検証された(図2、図3)。また、モニタリング試験開始後に発生した熊本地震(2016年4月16日、M7.3)により、TRIESでは60 μ sのステップ状の走時遅延が観測され、その後の変化が200m深度(STG200N)の間隙水圧変化と似たパターンを示していることが判明した(図3)。これは、間隙水圧の変化によるクラック開口率の変化をP波速度変化として観測していると考えられる。

図1. 超磁歪震源と観測点の配置



図2

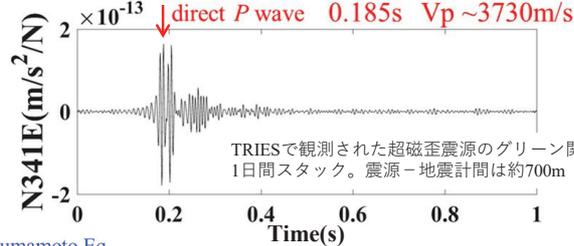
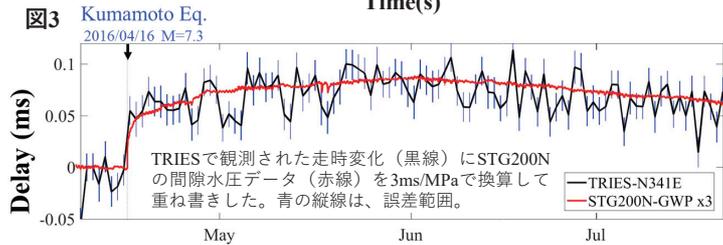


図3



制御震源の実用化と有用性の検証 超磁歪震源によるモニタリングの空間解像度の検証

2016年9月に瑞浪観測壕内に小規模な地震計アレイを設置し、超磁歪震源による地下モニタリングの空間解像度を調べた(図1)。約1年間の観測で距離103mの観測点Aで大きく変化するフェーズaを確認した(図2)。フェーズaは、走時曲線との対比から瑞浪層群内の反射波であると考えられる。送信周波数(100.5-200.5Hz)と瑞浪層群の地震波速度からS波の波長は5-10mである。地震計の間隔は5.4mであり、前後のフェーズや隣の観測点がほとんど変化していないことから、フェーズaに対応する変化領域の大きさは数m程度と考えられる。

図1. 実験配置図

★ 超磁歪震源(GMSS) ● 地震計アレイ

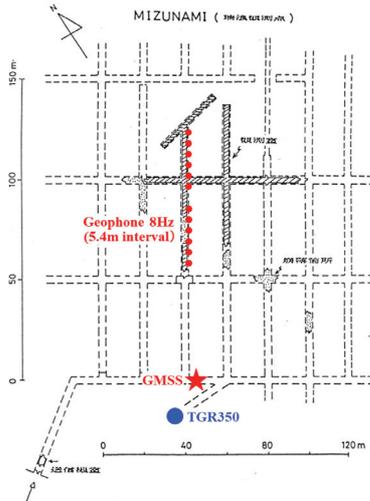
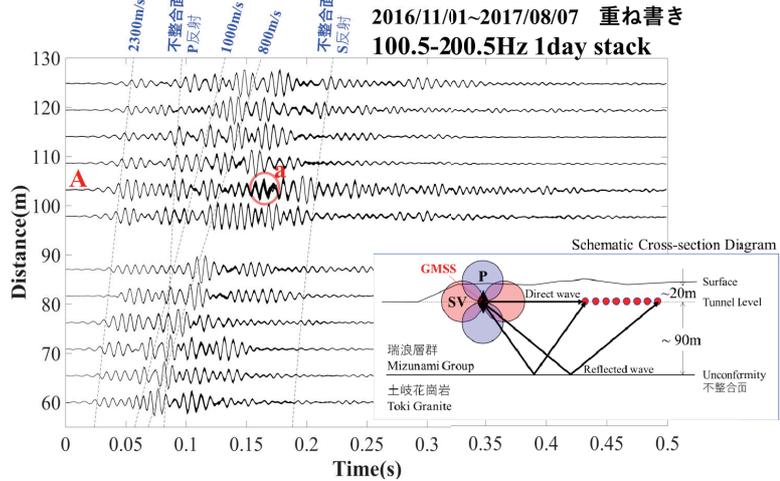


図2. 地震計アレイによる観測結果

破線は走時曲線。2300m/s : P波速度、1000m/s : SV波速度、800m/s : S波速度 (瑞浪壕の掘削ダメージゾーンと推定される)



東濃鉱山の坑道閉鎖後の再冠水による地震波速度変化

東濃鉱山(原子力機構 東濃地科学センター、岐阜県土岐市)では、平成22年度から閉山措置が進められ、平成26年度に地下坑道の充填が完了した。その間、2014年12月にはメインの排水ポンプが停止され充填坑道内の再冠水が始まった。その後、S波の走時が顕著に遅延(S波速度が低下)していることが、弾性波アクロス土岐送信所(東濃鉱山)のほぼ直下にある地震計(98SE-01号孔、土岐花崗岩内、GL-203m)での観測によって検出された(図1a)。S波速度の変化は、地下坑道内の地下水位の上昇や土岐花崗岩内の歪変化と調和的である(図1b)。また、遠方の東濃地震科学研究所のポアホール地震計では、排水ポンプ停止前に発生した下盤坑道の浸水に対応するとみられるP波速度の上昇も観測されている(図2)。

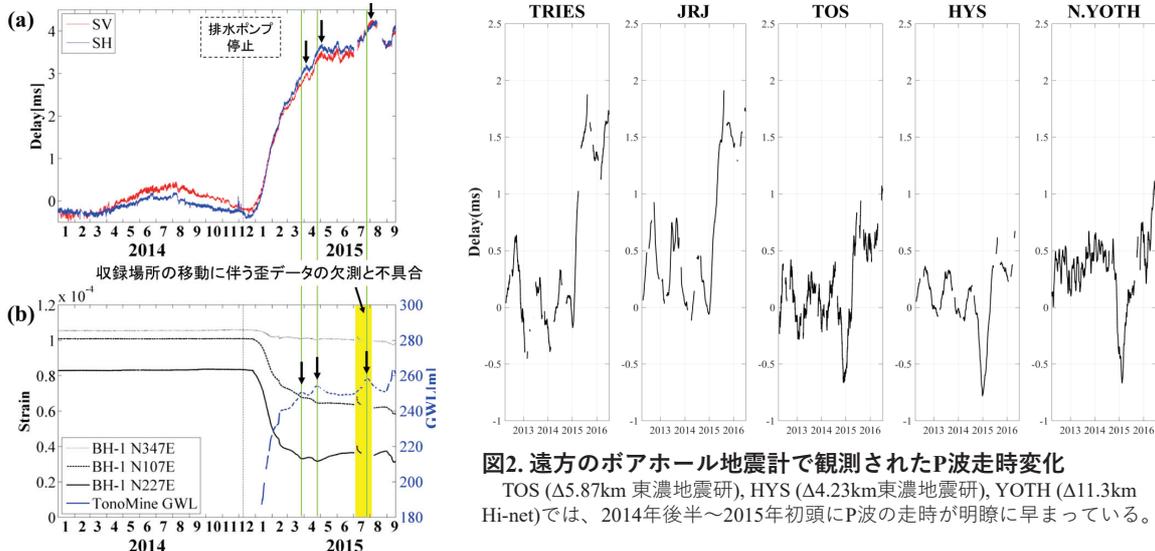
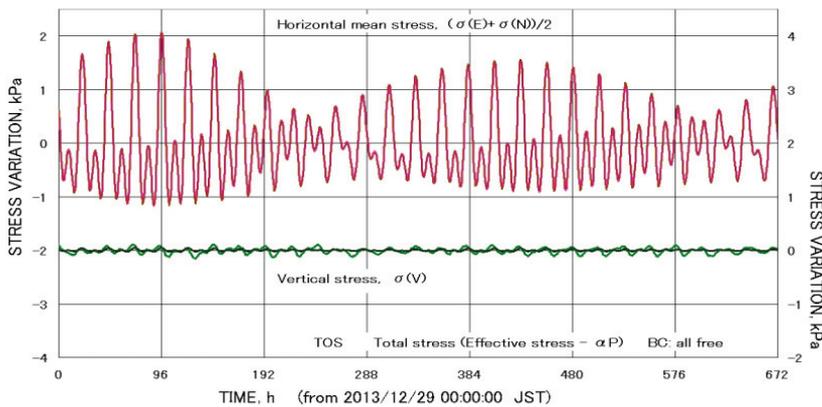
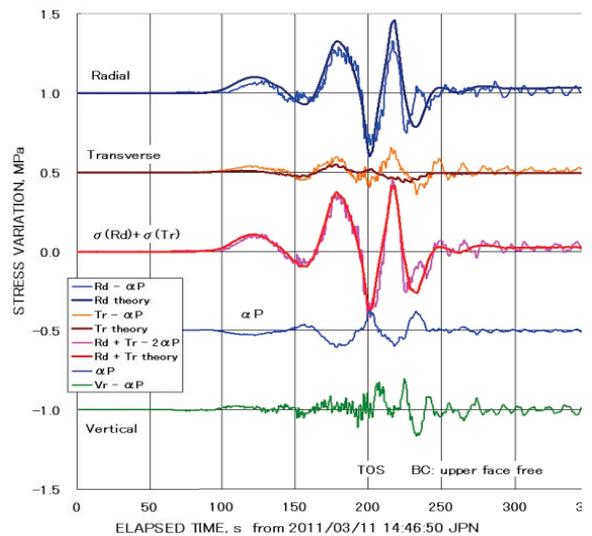


図1. (a) 98SE-01号孔で観測された走時変化 (b) 坑道内の地下水位 (TonoMine GWL) と直下の花崗岩内の歪変化 (BH-1)

新開発応力計の校正と2011年3月11日の地震応力波



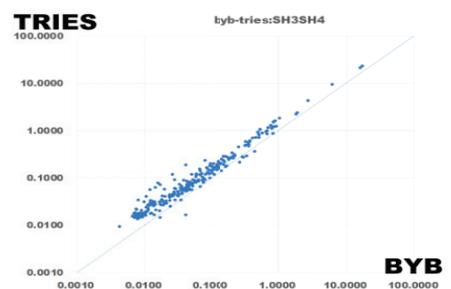
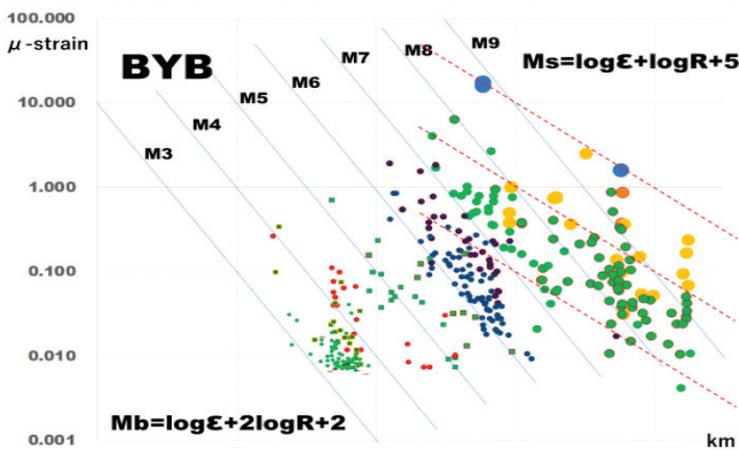
新たに開発された応力計はセンサ部がステンレス製の筐体と分離されており、その信頼性は飛躍的に高まっているだけでなく、「応力」で校正されているので直接、応力値がえられる。ただし、ボアホールから十分離れた遠方の、いわゆる「地殻応力」変化を知るためには観測方程式を解く必要がある。上図は陶史の森の土岐花崗岩内、深さ約500mに設置された応力計記録をもとに、観測方程式を解いた結果から水圧の寄与分(αP)を差し引いてもとめた全応力変化と理論潮汐変化を比較した結果である。図中、上段に示された水平面内平均応力は理論潮汐とほぼ完全に一致している。また、下段に示された鉛直応力は理論潮汐のほうが小さめではあるが、ほぼ一致している。これは開発された応力計が正確に周辺岩盤の応力変化をとらえている証拠の一つである。



2011年M9東北地震は500～1000年に一度の超巨大地震であった。陶史の森の土岐花崗岩内、深さ約500mに設置された応力計は、その地震にともなう応力波をとらえている。上図は記録された地震波をもとに、観測方程式を解いた結果から水圧の寄与分(αP)を差し引き、全応力に変換した結果と理論地震波形[川崎・他, 2014]を比較した結果で、両者が良く一致していることがわかる。

石井式歪計で記録される地震動と地震規模の関係[H29]

東濃地震科学研究所では、2003年に屏風山観測点で4成分歪計の観測を開始し、順次観測点を増やしてきた。2016年末現在、2点の歪計観測点と4点の応力観測点が稼働している。近地の小地震(M～3)から大地震(～M9、遠地地震を含む)まで良好な地震動を記録している。屏風山観測点(BYB)と東濃研究所観測点(TRIES)4成分歪計により記録された歪地震動を、弾性論の不変量のひとつである直交2成分の和、すなわち面積歪の最大振幅に注目して、2016年末までに記録された全地震について、面積歪の最大振幅と震源距離と地震の規模(ここでは、 M_{JMA})の関係を整理した。その結果、震源距離1,000km以内では、観測される面積歪地震動の最大振幅の対数は、地震規模に比例し、距離の2乗で減衰し、それ以上では距離の1乗で減衰する関係式が得られた。



BYB観測点で観測された362個の面積最大振幅 (ϵ ; 10^{-6} strain)と震源距離(R, km)の関係、M別に色と大きさを代えてプロット。

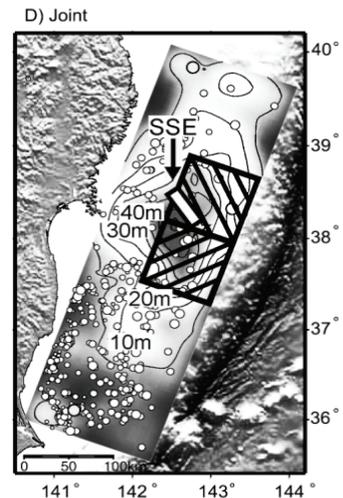
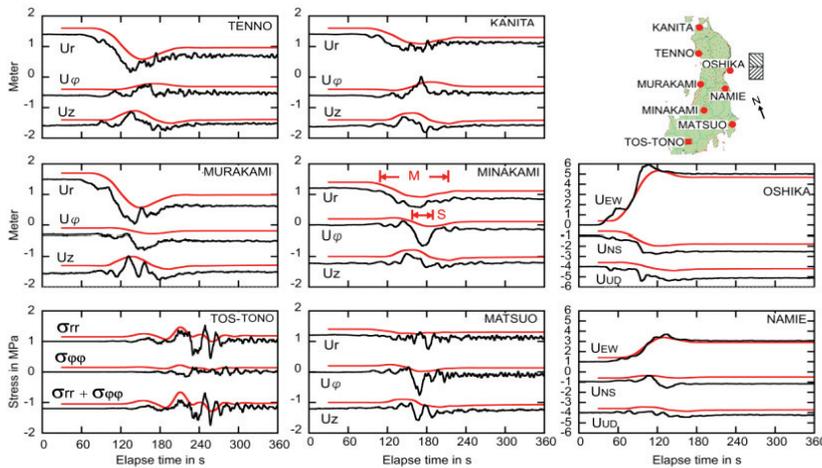
震源距離1000km以内(実体波)では、 $M = \log(\epsilon) + 2 * \log(R) + 2$
震源距離1000km以上(表面波)では、 $M = \log(\epsilon) + \log(R) + 5$

TRIES観測点で観測された面積歪最大振幅と震源距離とMの関係もBYB観測点と同様の関係が得られた。同一地震でTRIESとBYBで観測された最大振幅の比は、上図のように、1.5倍あり、この分を定数項に補正を入れて、次のような関係式となる。

$M = \log(\epsilon) + 2 * \log(R) + 1.8$
 $M = \log(\epsilon) + \log(R) + 4.8$

2011年M9東北地震に伴ったM8.4スーパーサブ地震

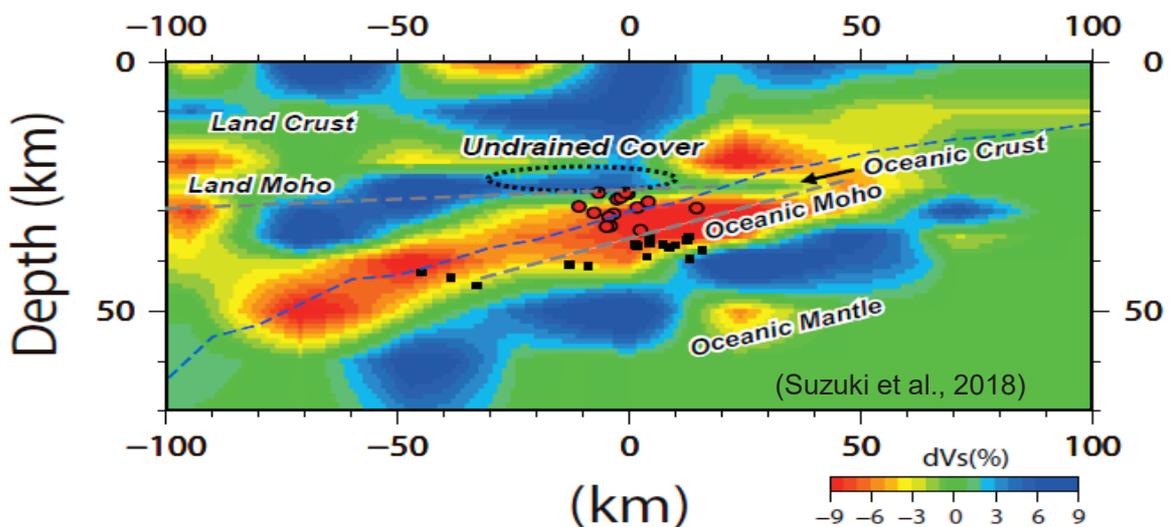
2011年M9東北地震は1000年に一度の超巨大地震であった。従って、150年ほどの地震学が経験しなかったと言う意味で例外的な地震現象が多く発生してもおかしくないし、それらを明らかにすることは、地震現象理解の新たなヒントをもたらす可能性があるはずである。筆者達は、GPS1秒サンプリング変位記録と東濃地震科学研究所の陶史の森の応力記録によって、プレート境界面以外の例外的な地震現象を明らかにする努力を行ってきた。その成果の一つが、M9の超巨大地震の破壊プロセスが進行中に、その直下のプレート内で発生したM8.4のほぼ垂直の横ずれ型(北西-南東走向)スーパーサブ地震(川崎・他, 2014)である。



右上地図のGEONET観測点、蟹田(青森県)、天王(秋田県)、村上(新潟県)、牡鹿(宮城県)、浪江(福島県)、松尾(千葉県)のGPS変位記録と陶史の森(岐阜県土岐市)の応力記録(黒線)と、理論合成波形(赤線)の比較GPS変位記録の場合、主としてUR成分上に幅100秒ほどのパルスがあらわれ、そのパルスと並行して主としてUφ成分上に幅30秒から40秒のSH波のパルスがあらわれた。このSH波のパルスが、スーパーサブ地震による波形である。

基図は Koketsu et al. (2011) の Fig.4D の東北地震のすべり分布。中央の北西-南東走向の小長方形は、スーパーサブ地震(SSE)の断層面の地表への投影。

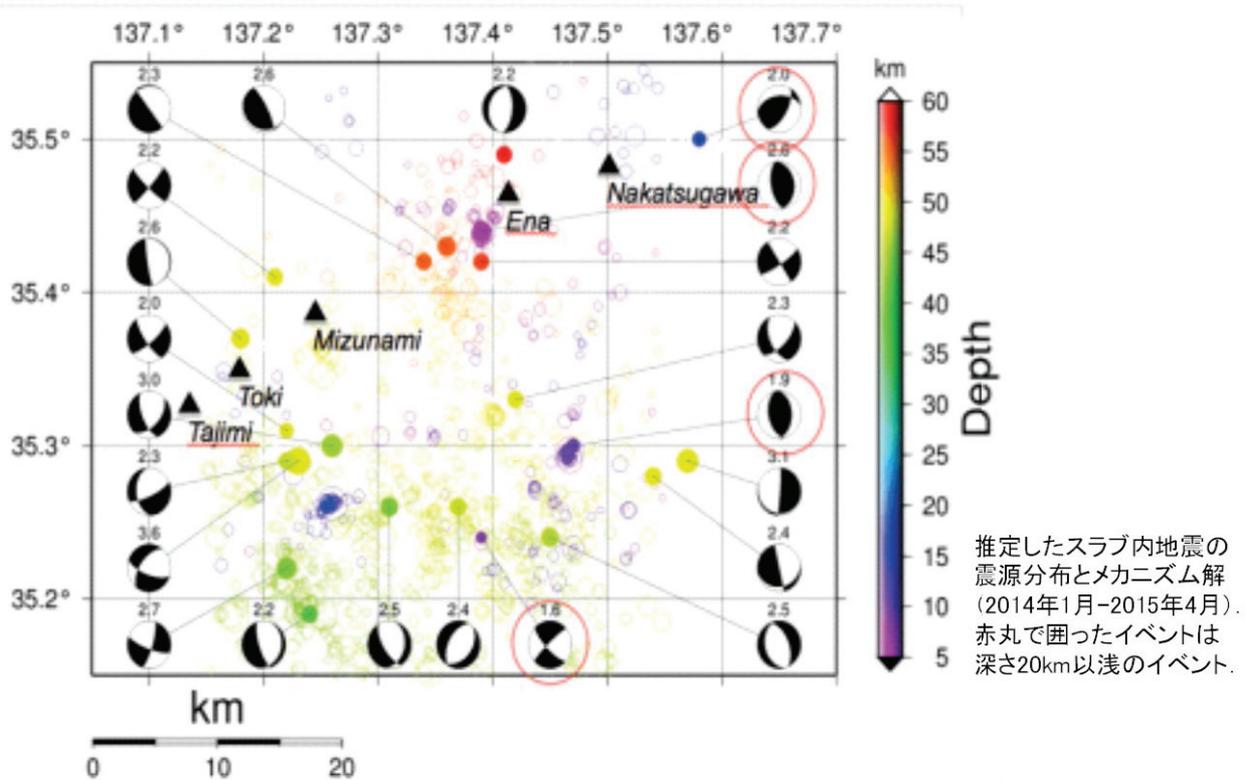
3次元アレイ観測によるプレート境界に発生する深部低周波地震の研究



東海地域で発生する深部低周波地震(LFE)を3次元アレイによって観測し、それらの対となる微小なP波とS波の検出方法を開発した(Suzuki et al., 2018) . 上図はプレートが沈み込む方向に平行なS波速度トモグラフィー断面(Nakajima and Hasegawa, 2016)に投影したLFE (赤丸印)とプレート内の普通地震(黒四角印)の震源分布である。

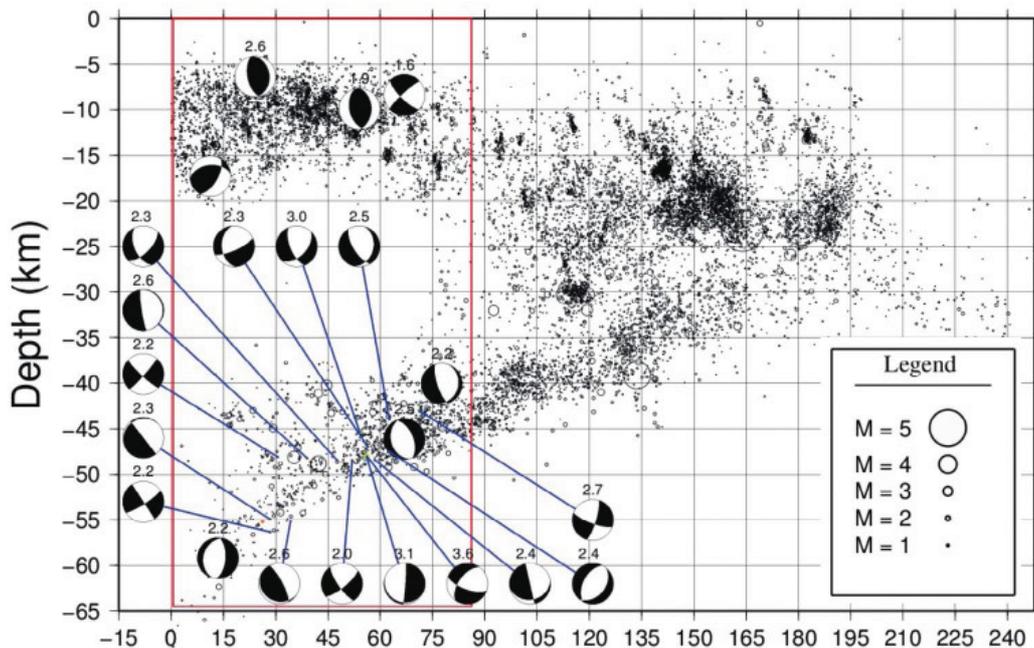
東濃地域を震源とする地震の解析

ベトナム地球物理学研究所との学術交流協定を平成26年に締結した。以降、年に数か月間、ベトナムの研究員を招聘し、TRIES観測網などによる地震波形解析を共同で行っている。



東濃地域を震源とする地震の震源再決定

ベトナムの研究員との共同研究では、東濃地域を震源とする地震の震源再決定を行っている。これは、2011年12月に瑞浪市直下を震源とするM5.6の地震が発生したことをうけ、東濃地域での地震防災の観点では、沈み込むフィリピン海プレートのスラブ内地震への対応の重要性が再認識されたためである。

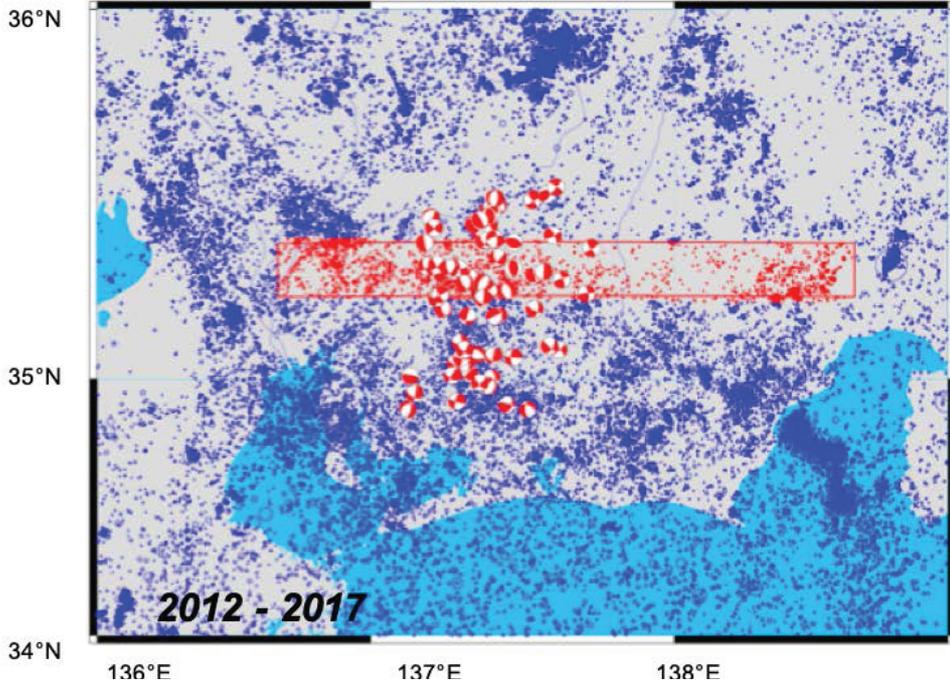


推定したスラブ内地震の震源分布とメカニズム解の南東-北西方向の鉛直断面 (2015年11月-2016年4月). 点はJMA一元化震源.

II 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) 東海地域に沈み込むフィリピン海プレートスラブ内の地震活動

東濃地方直下の沈み込むPhPプレートスラブで発生する地震の発生メカニズム

東濃地方で年1-2回発生する有感地震は直下で沈み込むフィリピン海プレートのスラブ内で発生する。本研究所は同域に地震観測網を設け観測を継続する。これに気象庁などのデータを加え、震源とメカニズムを解析した。多くの地震は東西伸張の正断層モデルを示す(下図)。より詳細に震源分布と発生メカニズムを招へいしたベトナムの研究者と協力して検討してみた。

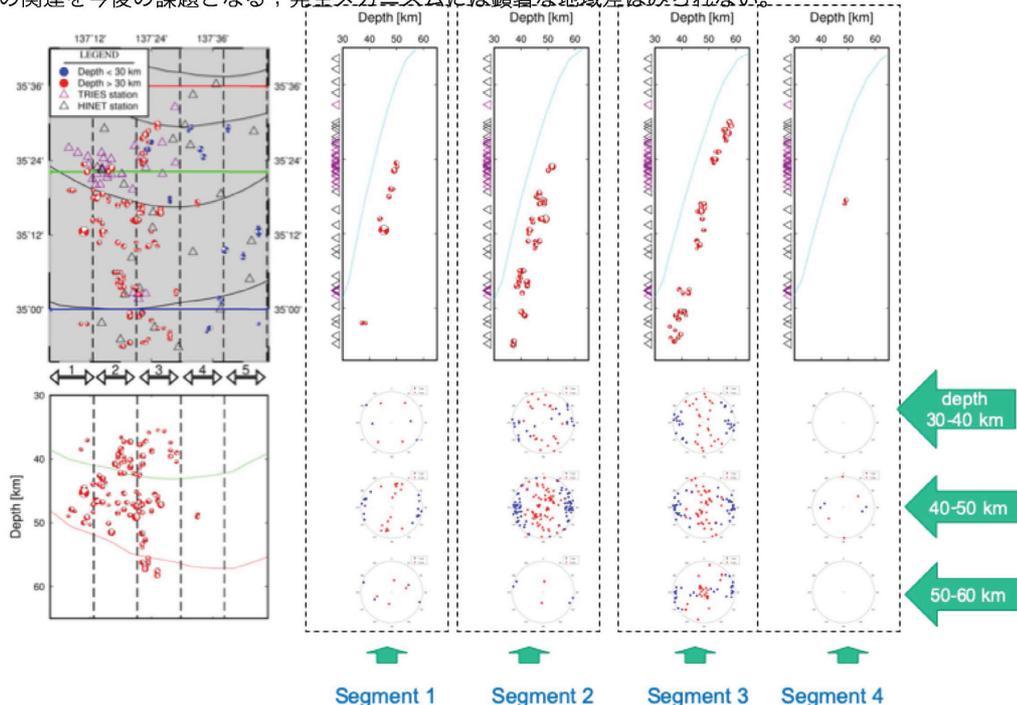


4

II 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) 東海地域に沈み込むフィリピン海プレートスラブ内の地震活動

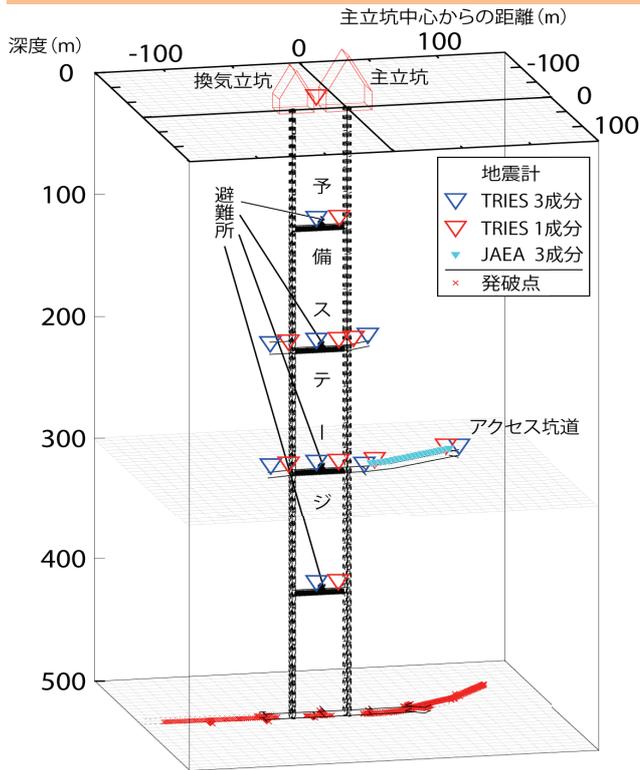
東濃地方直下の沈み込むPhPプレートスラブで発生する地震の発生メカニズム

35°20'Nを中心に、137°0'~42'Eを5区間に分け、震源と発生メカニズムを東西断面に示す。震源はスラブ内に位置し、緩やかな角度で北に傾斜し、深さ50kmあたりでスラブ上部に接近し、その後沈み込み角度が大きくなる。同域で発生する深部低周波地震などとの関連を今後の課題となる；発生メカニズムには顕著な地域差はみられない。



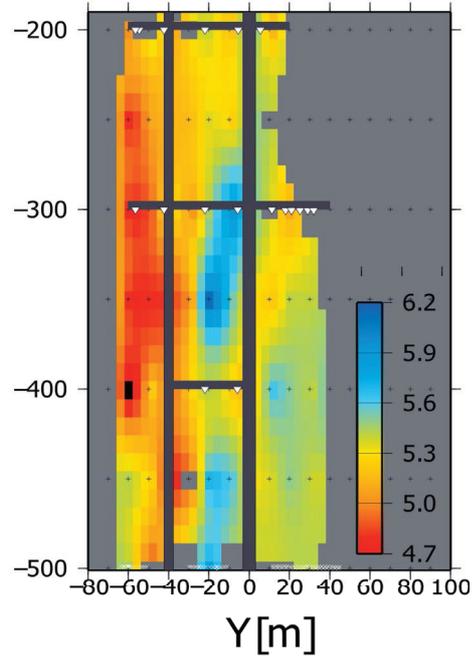
5

発破震源を活用した地震波速度構造の推定



瑞浪超深地層研究所における地震観測点の分布。深度500mの赤のXは発破震源を示す。

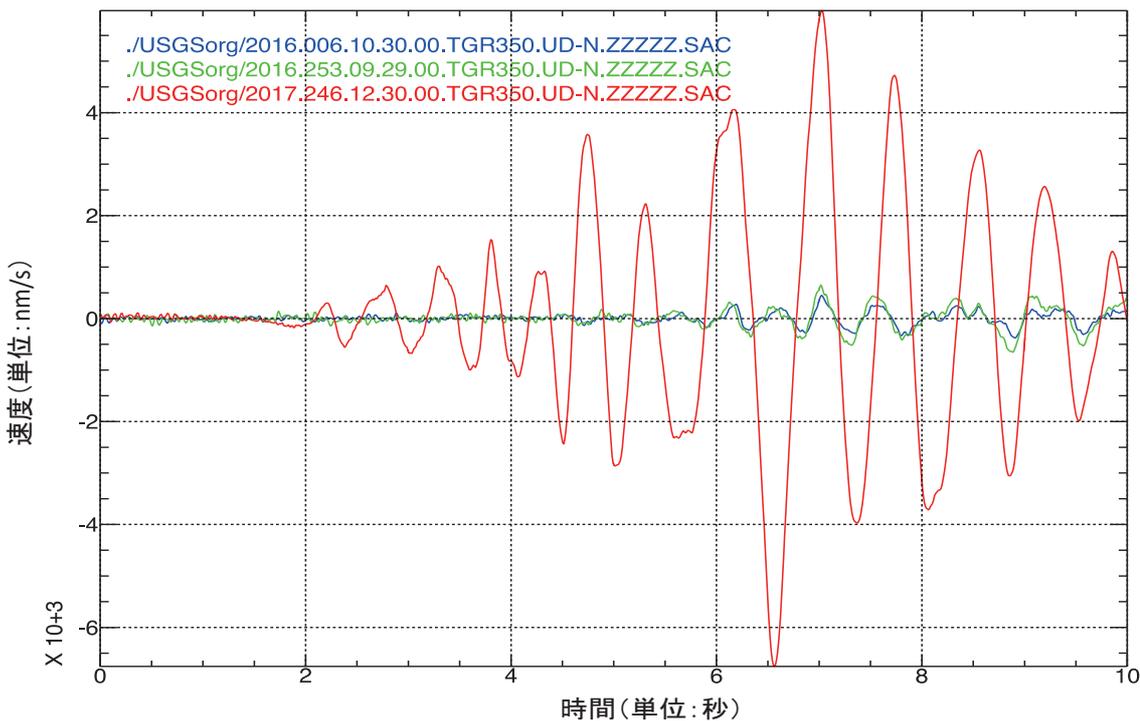
瑞浪超深地層研究所の500mステージ建設の際の発破震源を活用し、瑞浪超深地層研究所の坑道近傍の地震波速度分布を地震波トモグラフィ法により推定した。



地震波トモグラフィ法から得られた地震波速度(P波)構造。色でP波速度(km/s)を示した。

北朝鮮の核実験に伴う地震波の観測

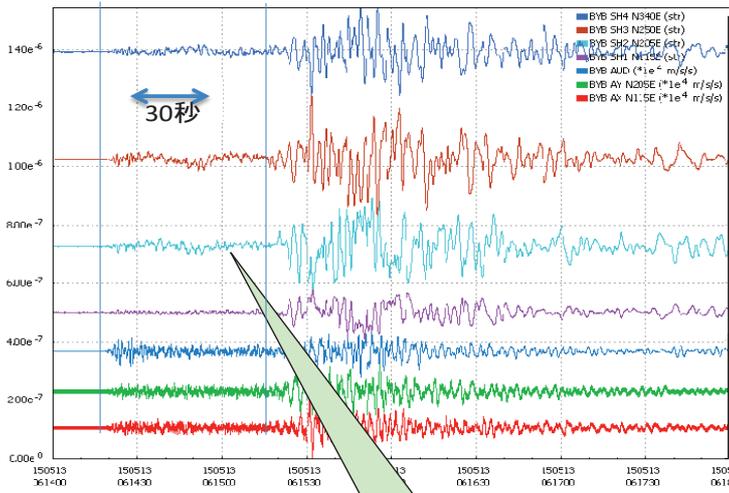
2016年1月、9月に北朝鮮の核実験に伴う地震波をTRIESの各観測点で観測した。これら2回の核実験による地震波は、地震波の位相(波の山と谷)が極めてよく一致することから、ほぼ同じ場所で核実験が行われたことが推定される。2017年9月にも核実験が行われ、位相は以前のものと調和的であるものの、振幅が約10倍大きく、過去最大規模の核実験であったことが示唆される。



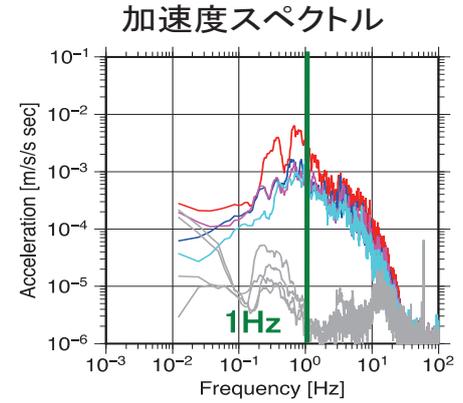
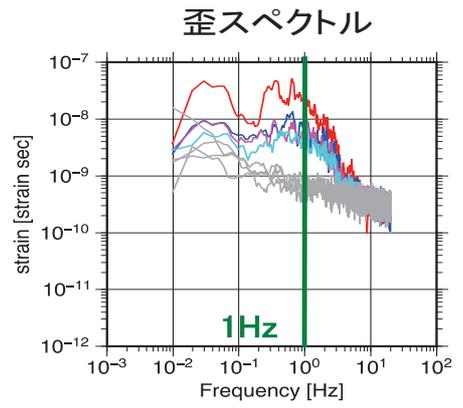
2016年1月: M5.0
2016年9月: M5.3
2017年9月: M6.1

TGR350(深さ350mのボアホール観測点)で観測された北朝鮮の核実験による観測地震波(速度波形;上下動)の比較

石井式歪計によるPL波の観測



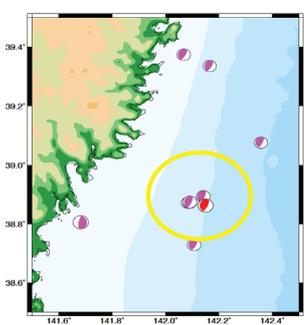
歪波形
加速度
波形



S波到達前で
周期30秒程度
の成分が卓越

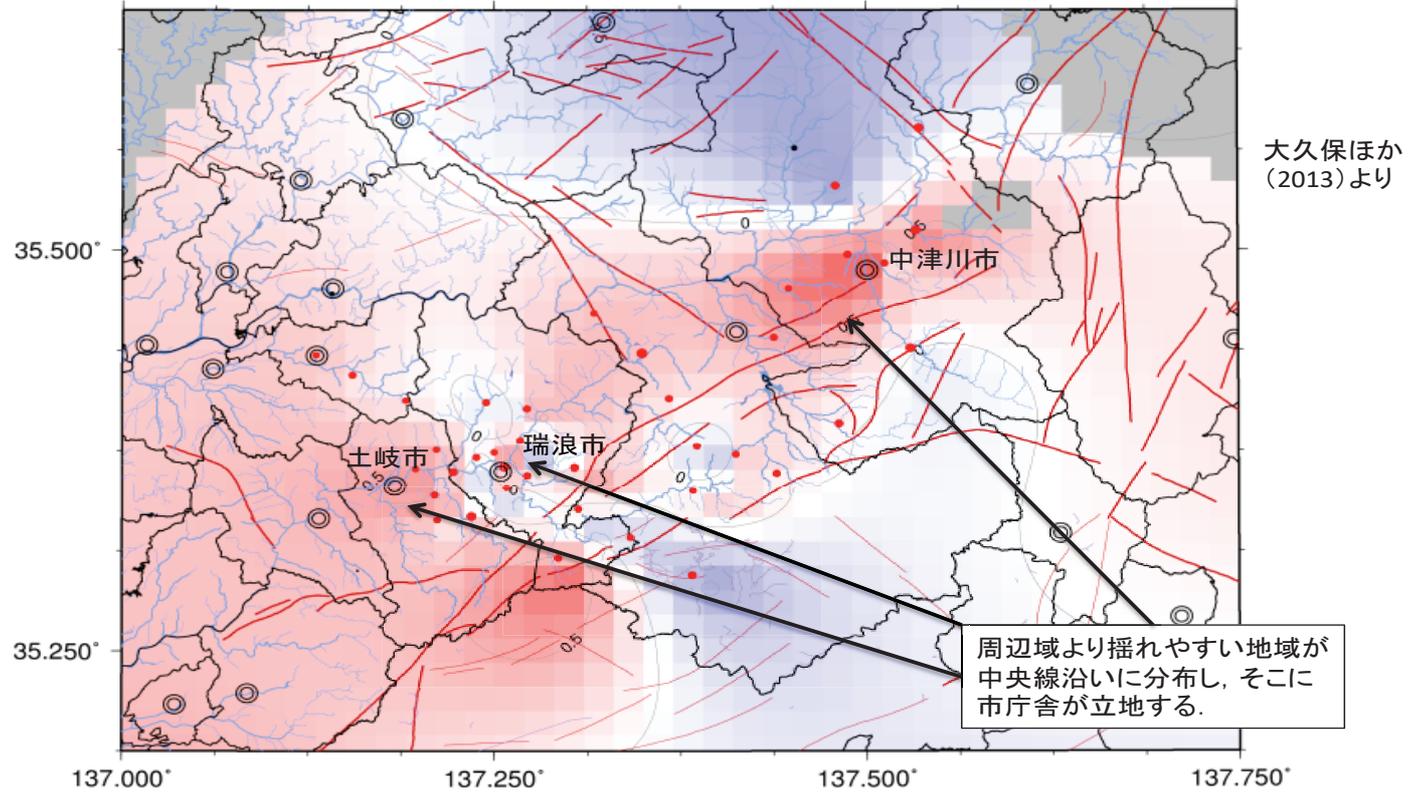
- 2011/03/31,16:15 Mw6.0
- 2011/07/23,13:34 Mw6.3
- 2012/06/18,05:32 Mw6.3
- 2015/05/13,06:12 Mw6.8

観測点TRIESにおける4つのイベントの歪スペクトルと加速度スペクトル。歪スペクトルの低周波側のピークは、イベントの規模によらず、いずれも0.029Hzだった。



計測震度による揺れやすさの研究

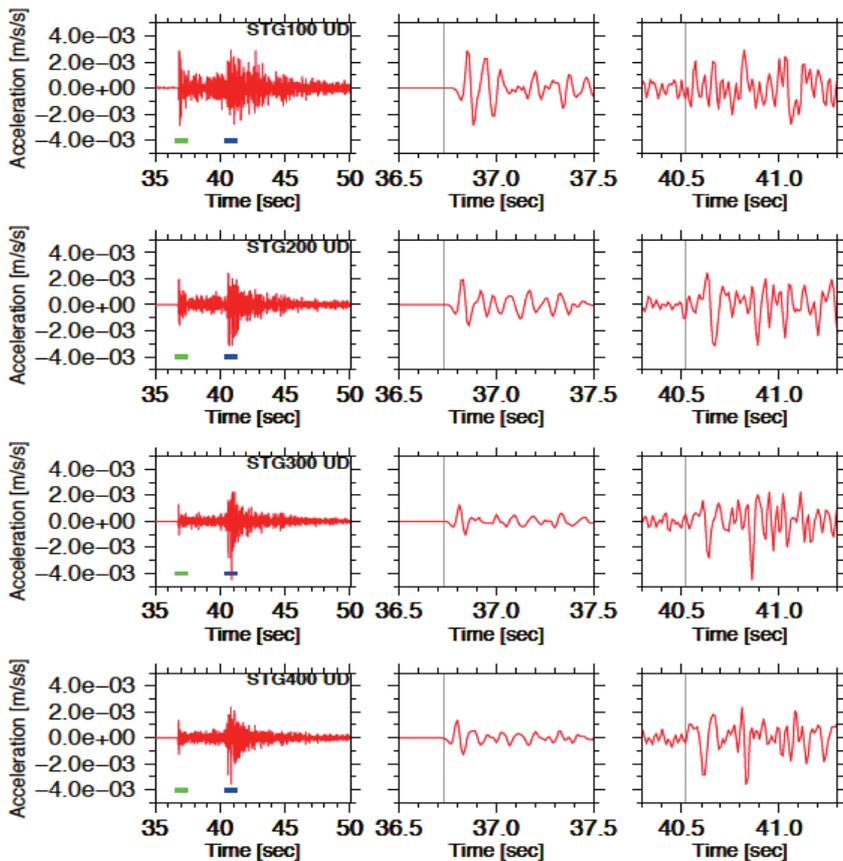
2009年から2011年までの183個の地震による震度分布情報をもとに10kmの空間分解能で、局所的な表層地盤の影響を考慮した震度の増減幅を推定した。



大久保ほか (2013)より

周辺域より揺れやすい地域が中央線沿いに分布し、そこに市庁舎が立地する。

サイト特性の深さ依存性

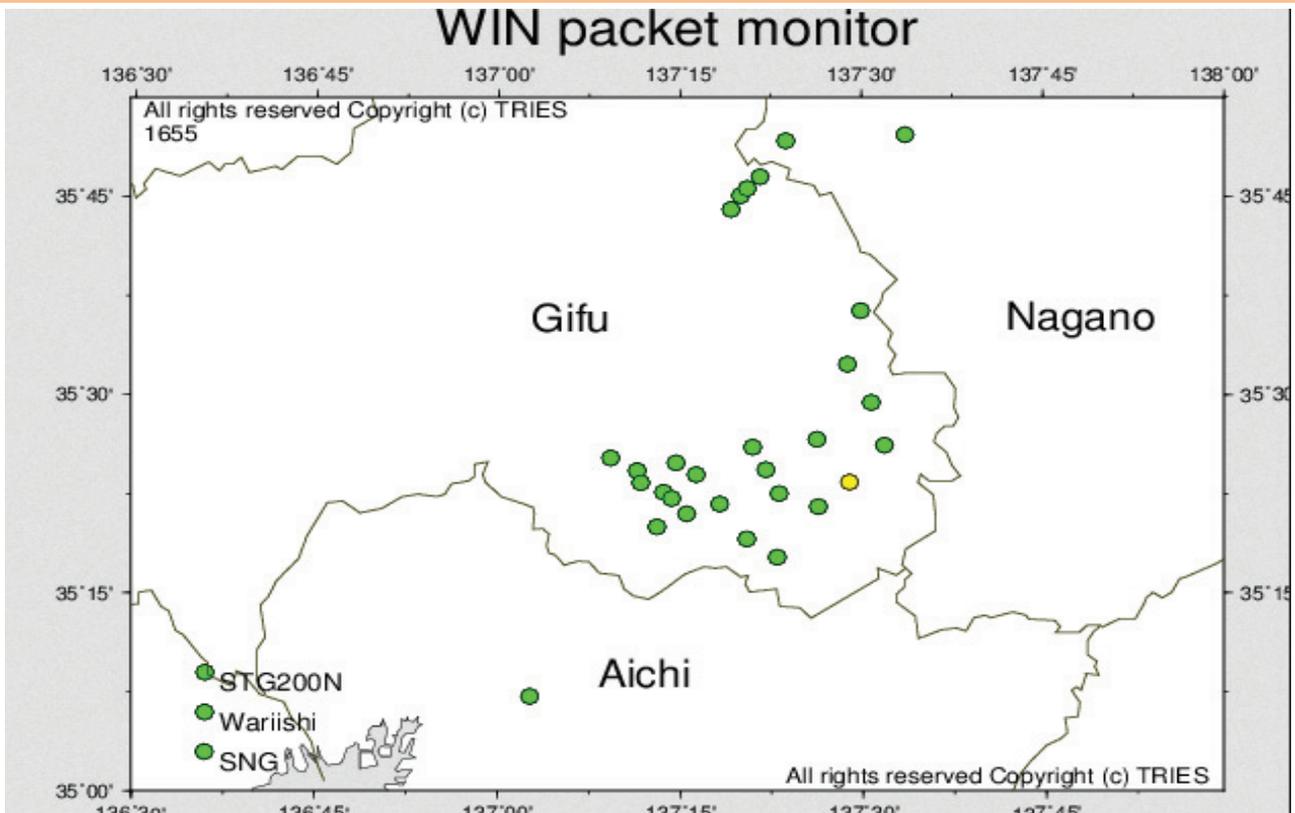


サイト特性の深さ依存性を調べるべく、瑞浪超深地層研究所立坑における地震観測をH28年度に再開し、観測事例の蓄積を始めた。

H28(2016)年9月19日21:10頃に発生した美濃東部を震源とする、深さ10kmの地震(Mj3.2)の観測波形。

(左列) 4つのステージにおける観測波形
(中列) 左列の波形のP波部分
(右列) 左列の波形のS波部分

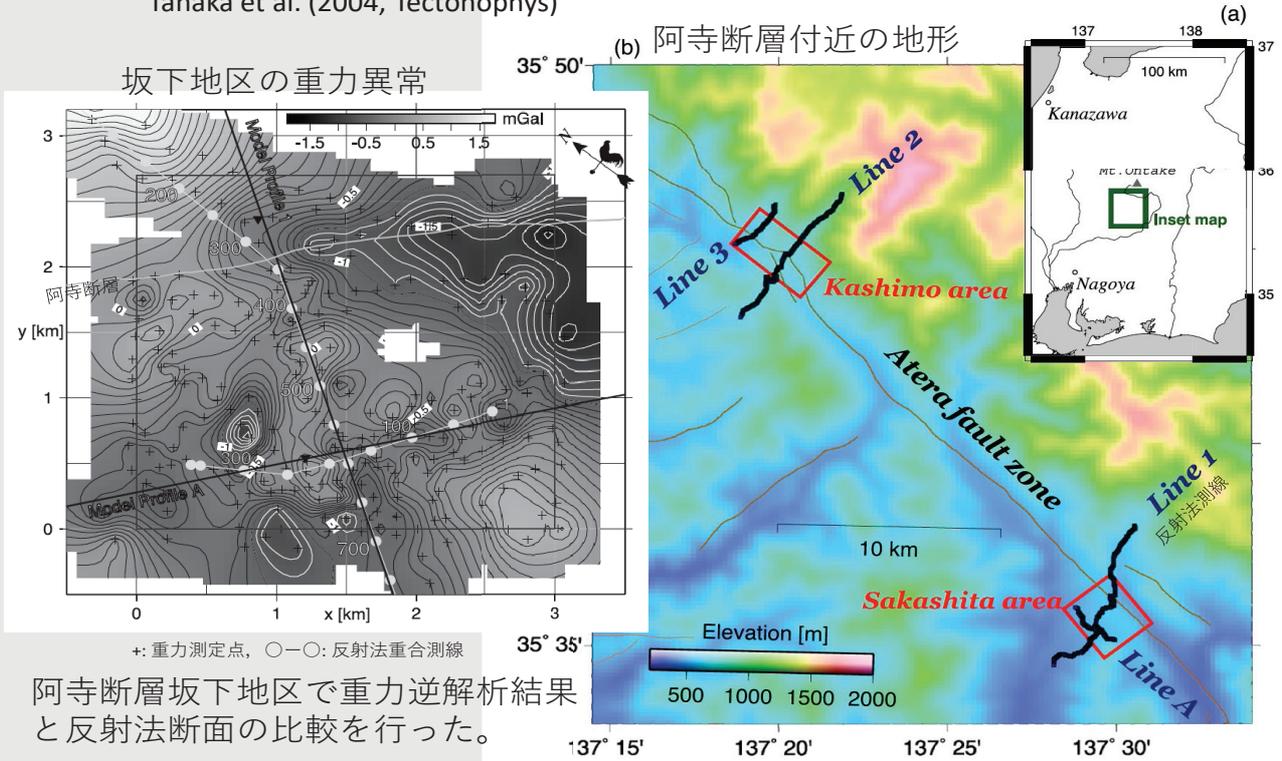
TRIESによる東濃地域における地震観測網



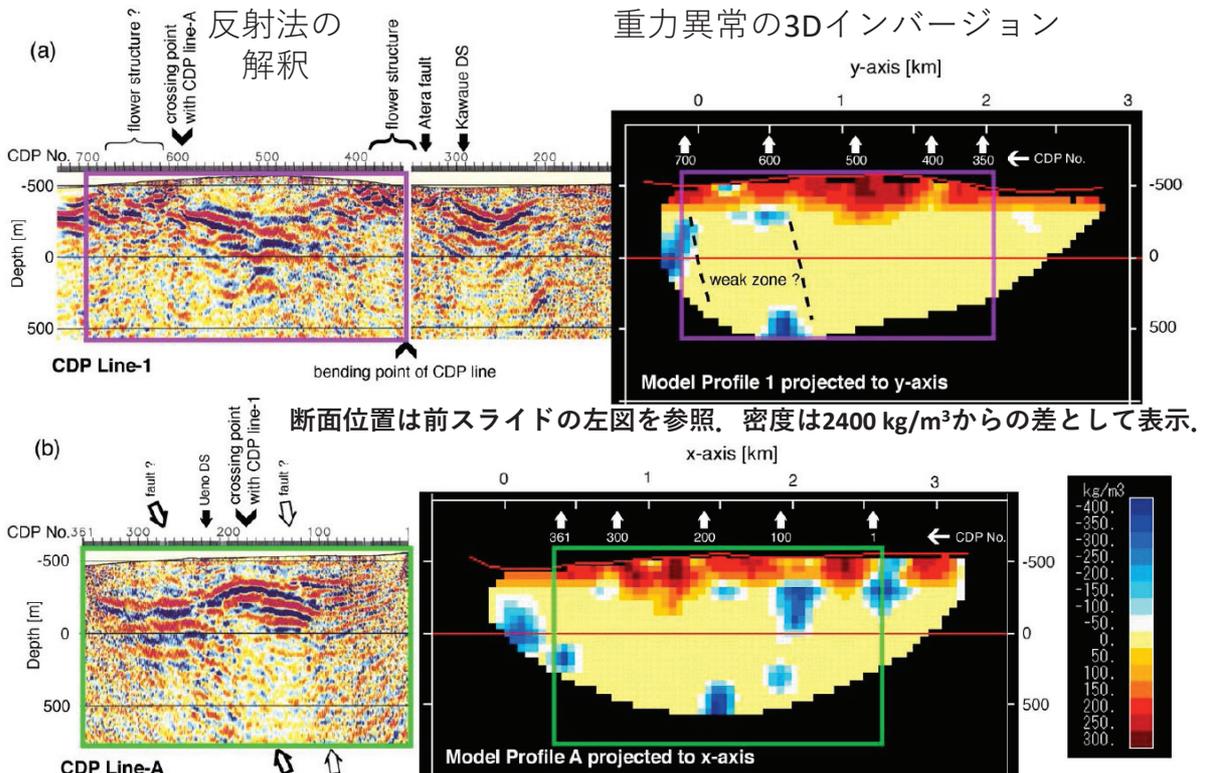
H26年度より東濃地域における地震観測点の統廃合を行った あわせて 老朽化したロガーを順次 リプレイスしている

活断層周辺の地下構造調査 (1/2)

Tanaka et al. (2004, Tectonophysics)

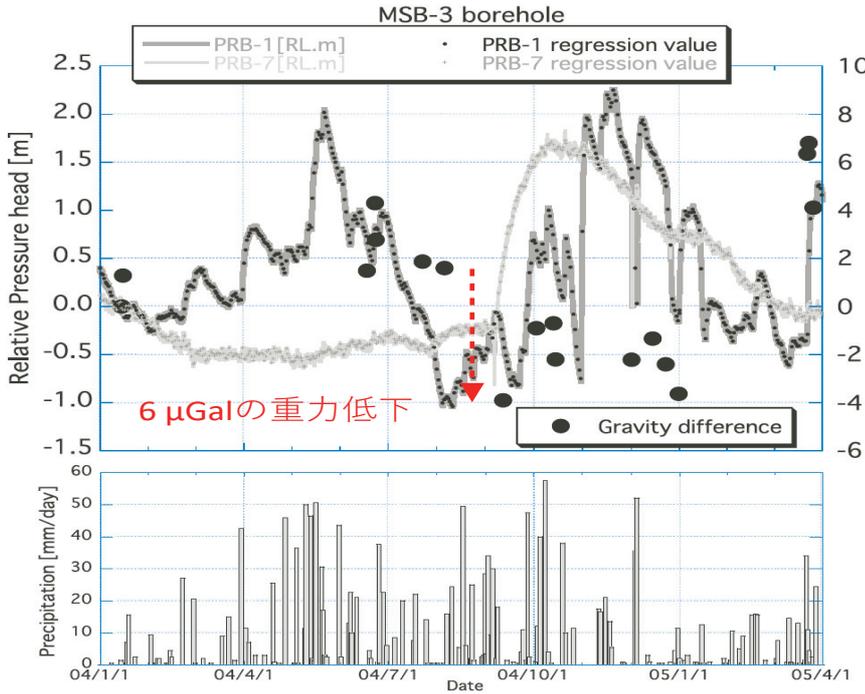


活断層周辺の地下構造調査 (2/2)



表層付近が高密度（玄武岩体）の特異な環境であるが、両者の対応は良い。

地震地下水応答を絶対重力測定で検出



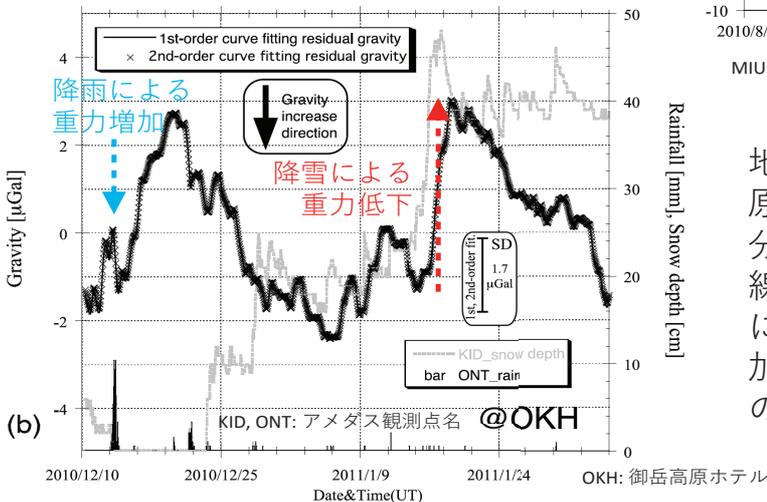
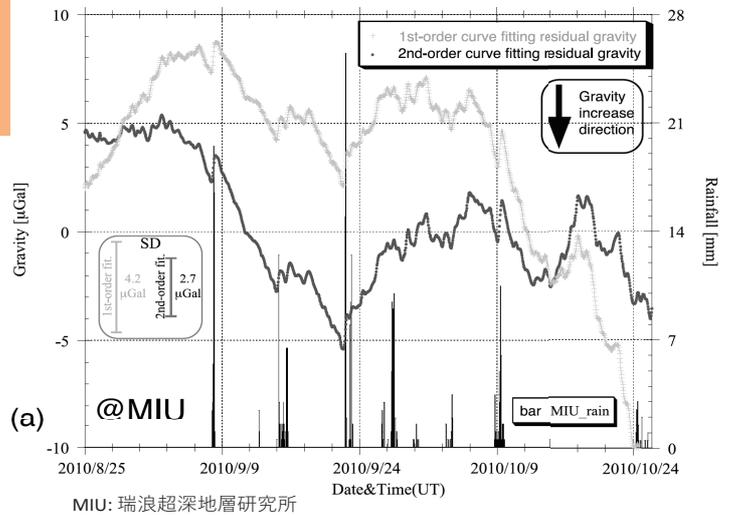
Tanaka et al. (2006, G³)

間隙水圧計の圧力水頭と絶対重力計による重力差日値の比較（上図）から、重力変動は堆積層中の水頭変化 (PRB-1) と、花崗岩中の水頭変化 (PRB-7) で説明できる。降水はPRB-1の変動の主要因であるが、PRB-7には寄与しないので、PRB-7に見られる地震応答（2004年紀伊半島沖地震）が6 μGalの重力低下の要因である。

降水応答を相対重力計で検出

Tanaka et al. (2013, EPS)

MIU掘削工事に伴う発破等で地動ノイズの大きい環境では、バネ式相対重力計の非線形ドリフトが大きいが、降雨に伴う1 μGal超の重力増加が見られた（図a）。

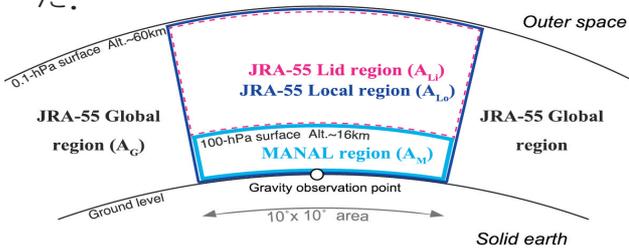


地動ノイズが小さい環境（旧御岳高原ホテル）では非線形ドリフトは充分小さく、1次式と2次式による回帰線の差が見られない。そして、降雨による下方質量増加が原因の重力増加、降雪による上方質量増加が原因の重力減少が検出された（図b）。

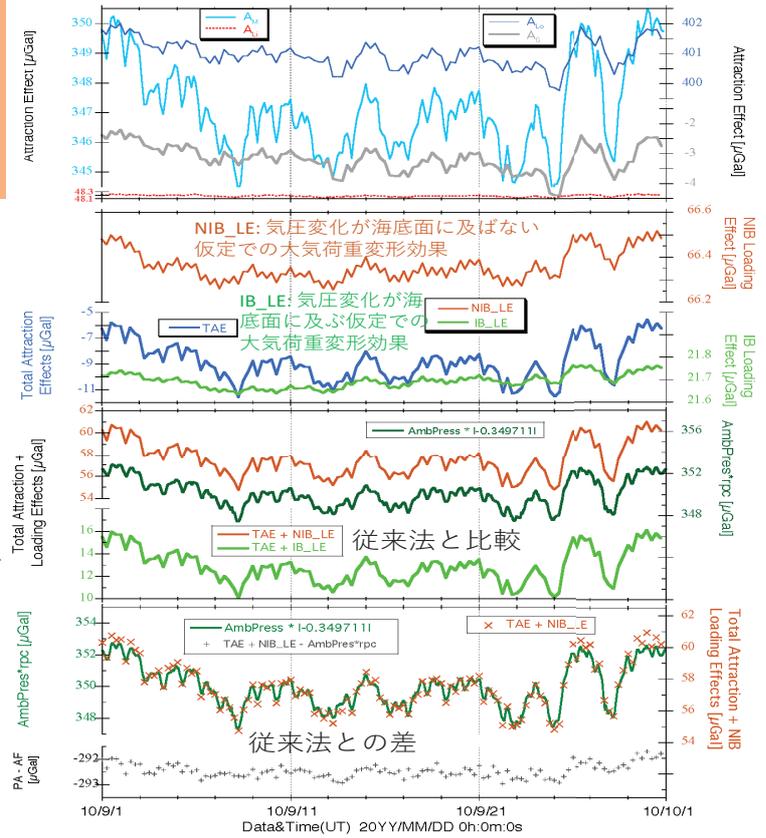
大気補正の高度化 - sub- μ Galの議論のために -

Tanaka and Honda (2018, ESS Supporting Information)

気圧値に回帰値を乗じて重力観測値から減算する補正法（従来法）に対して、最新の数値大気モデルを用いて、物理的補正を行う手順を構築した。



Total Attraction Effect :
 $TAE = A_M + A_{Li} + A_G - A_{Lo}$

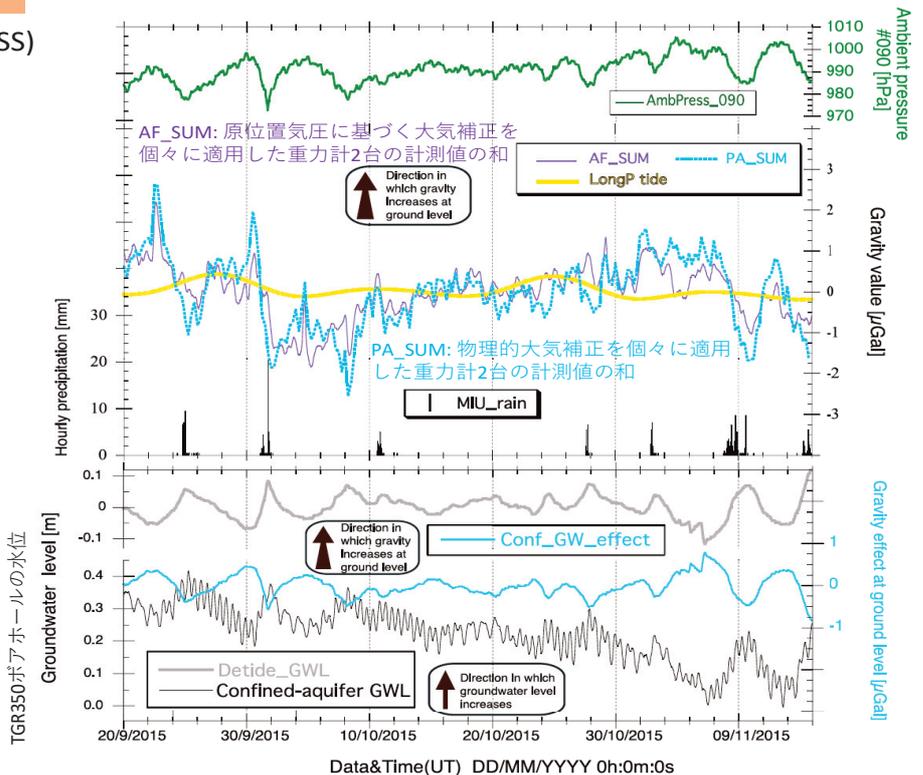


鉛直重力計アレイ観測を地下水位データで評価 -地下深部の質量変動検出を目指して-

Tanaka and Honda (2018, ESS)

地上と地下の重力値の和 (AF_SUM & PA_SUM) は主に地下深部の質量変動を反映している。気圧応答法によるAF_SUMは気圧と相関のある地下水変動による引力効果も低減してしまうが、PA_SUMは大気質量と大気荷重変形を補正しているので、地下深部の地下水量変動 (Conf_GW_effect) を反映していると考えられる (相関係数0.63)。

Confined-aquifer GWL: TGR350号孔水位
 ↓ [潮汐成分除去]
 Detide_GWL
 ↓ [Tanaka et al. 2006による重力値換算]
 Conf_GW_effect



割石温泉における湯量観測 1

観測点・地質断面図・柱状図

温泉は北緯36度21分49秒,東経137度17分4秒の岐阜県飛騨市神岡町大字割石219番地,高原川左岸の河岸段丘上にあり,跡津川断層から南へ約3kmに位置する(図1)。この断層周辺で発生した5個の地震の震源も示す。孔井は進長1300m(標高413m,孔底標高マイナス809m,孔底温度65℃)で,傾斜度マイナス70度,掘削は西側方向255度である。上部の深度30mまでは多重管φ150m/mが挿入され,その内側に3本のケーシング管125m/mφ, 97m/mφ, 83m/mφが挿入されている。掘削当初,深度852mで湧水量800L/min,温度45℃の温泉が湧出し,泉質は単純イオウ泉でラドン濃度は4.9Bq/Lであった。1998年のラドン濃度は2.6Bq/Lであり,2016年2月現在も自噴しており,湯量は約25L/min,泉温は約41℃である。地質断面図(図2),柱状図(図3)によると,深度875mまでは飛騨片麻岩を主体として石灰岩の薄層を挟在(厚さ5m以下),875m~1300mまでは石灰岩を主として片麻岩を挟在している。深度870~880mの黒雲母片麻岩帯と石灰岩帯の境界部には,石灰岩の炭酸塩岩中に花崗岩などのマグマが貫入してきた際に生成された透輝石スカルンなどが約5mの厚さで存在しており,この滞水層から温泉が湧出している。

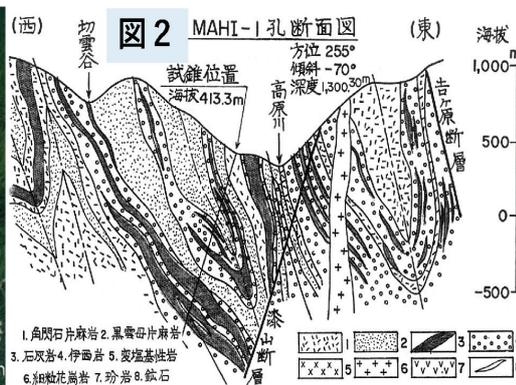
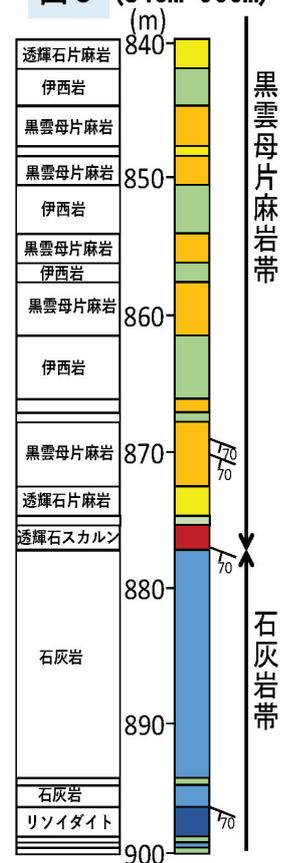


図3 (840m-900m)



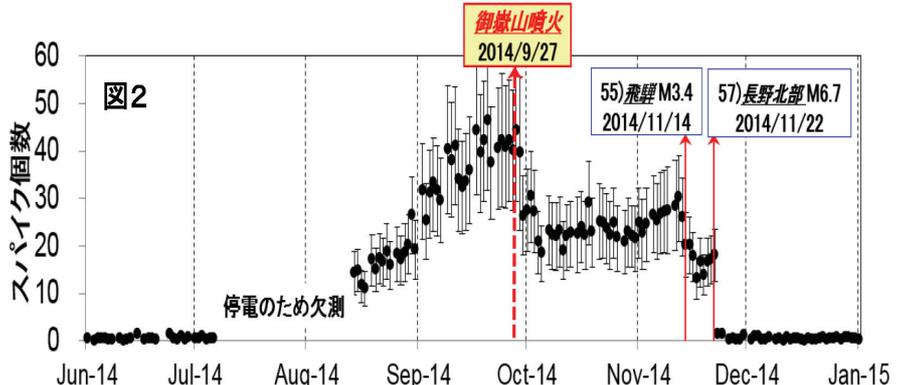
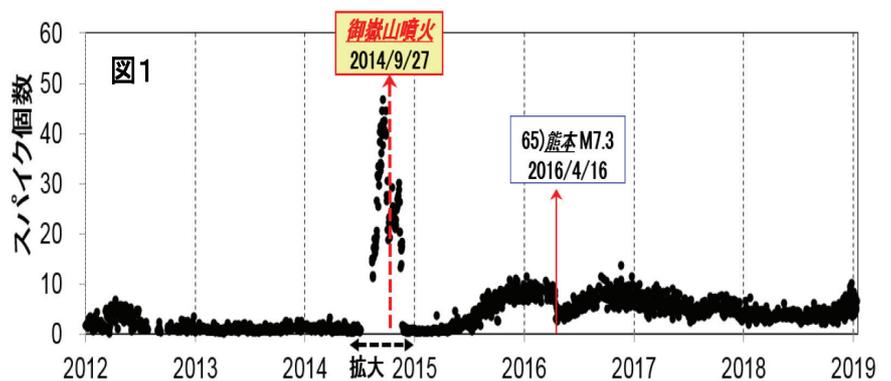
割石温泉における湯量観測 6

温泉の溶存ガス量の変動解析

割石温泉から直線距離で約58km離れた御嶽山が2014年9月27日11:53に噴火した。湯量と間欠泉周期の観測結果では,噴火にともなう湯量の変動は観測されなかった。そこで温泉に含まれる溶存ガス量を目安として,間欠泉と間欠泉の間のガス噴出にともなうスパイク状の湯量変動に着目した。1 Hzの湯量値のとなりあう1組の観測値を F_n と F_{n+1} として,湯量変化量 $\Delta F = |F_{n+1} - F_n|$ が $\Delta F > 0.2(L/min)$ の条件を満たす湯量変化の個数を数えて,この値を間欠泉のガス噴出量を目安とするスパイク個数と定義した。

図1は2012年1月~2019年1月までのスパイク個数を示す。図2の2014年6月1日~7月7日までの月曜日の休館日を除く30日間の間欠泉あたりのスパイク個数の平均値は 0.56 ± 0.36 個であったが,2014年8月中旬からスパイク個数が増加して噴火直前の9月23日~9月26日には 41.4 ± 0.9 個まで増加した。噴火直後からスパイク個数は減少して,55)飛騨地震M3.4と57)長野県北部地震M6.7の地震発生によってもとの個数に戻った。

以上の観測結果から,割石温泉に含まれる溶存ガス量の変動は,御嶽山噴火の約1カ月前から増加しており,噴火の前兆現象の可能性が考えられる。

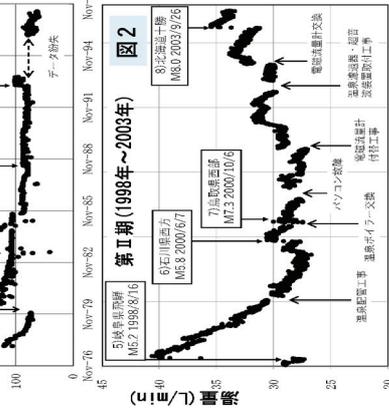


割石温泉における湯量観測 2 1976年～2003年の湯量の観測

湯量観測方法は、第1期(1976年～1997年)は、温泉管理人が毎週月曜日に約120m離れた源泉まで行って、温泉のバルブを開き、容量15Lのバケツに温泉が満杯になるまでの時間をストップウォッチで計測した。再現実験の結果、湯量の測定精度は±10%と推定される。第2期(1998年～2003年)の期間では、1998年7月に岐阜大学が岐阜県・神岡町と共同でYOKOGAWA容量式電磁流量計を源泉に設置して10分間隔で湯量観測を開始した。流量計の測定範囲は毎分0L～70L、測定精度は±0.35Lである。

図1は第1期の湯量の観測記録で、湯量変動が記録されていた4個の地震(1)日本海中部2)屋野西部3)屋野東大町付近4)能登半島沖を矢印で示す。1993年8月～1995年12月までの2年5ヶ月の温泉記録簿は紛失しており、1995年淡路神戸地震に関わる湯量の記録は残っていない。1)日本海中部地震M7.7では、1982年12月～1983年4月までの5ヶ月間、湯量は毎分106.1±2.7Lと変化が少ないが地震発生日の17日前の5月9日には毎分98L、5月16日と5月21日も毎分70Lと減少している。

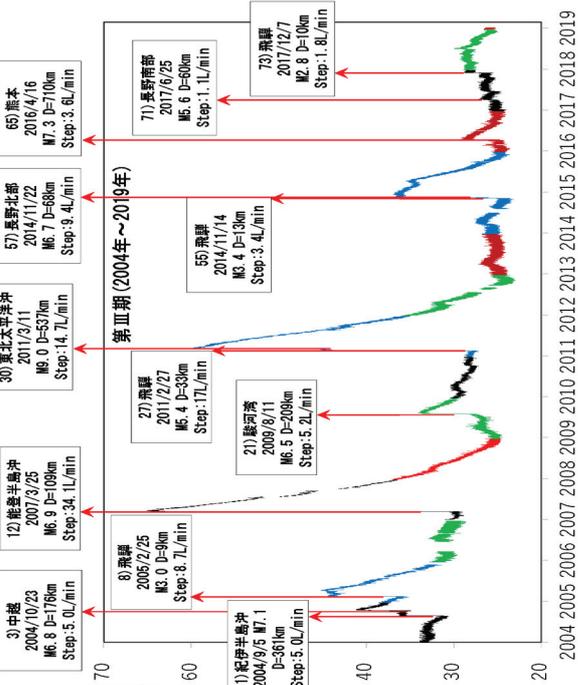
図2は第2期の湯量の観測記録で、湯量変動が記録されていた4個の地震(5)岐阜飛騨6)石川県西方7)鳥取県西部8)北海道十勝を矢印で示す。5)岐阜飛騨地震M5.2では、群発地震活動が高地付近で始まったが、1998年8月12日頃から穂高付近に活動域が拡大した。8月16日に槍ヶ岳付近で地震が発生した。この地震によって湯量が毎分28Lから40Lまで増大した。



割石温泉における湯量観測 3 2004年～2019年の湯量の観測

第III期(2004年～2019年)では、岐阜大学が岐阜県神岡町、東濃地震科学研究所との共同で電磁流量計を用いて1秒間隔で湯量観測を行った。気象庁国内地震震度データの飛騨地方の震度以上・周辺地域の震度3以上・国内の震度5弱以上で881個中46個で湯量増加・振動を検出した。図はその内での大きな湯量増加が記録された12個の地震について矢印で示す。

2007/3/25 M6.9では、検出データ中で最大の湯量増加量34.1L/minを記録した。
30) 東北太平洋沖地震
2011/3/11 M9.0では、14.7L/minの湯量増加・振動があり、この地震では地球を3周した表面波による湯量振動が検出された。



割石温泉における湯量観測 4 2004年～2019年の湯量の潮汐歪心感度

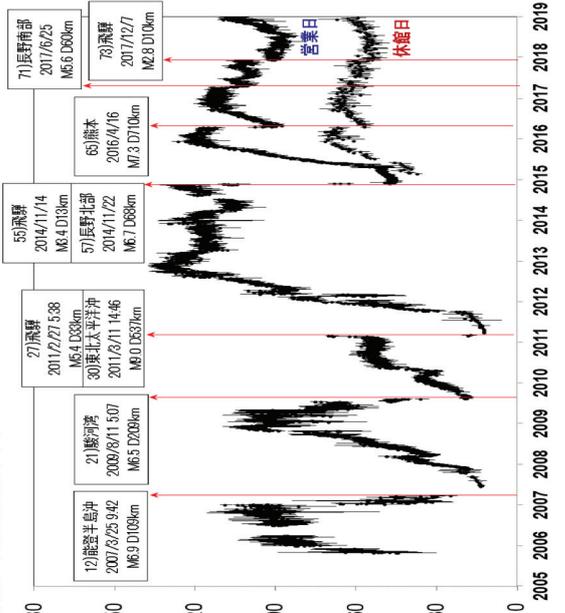
第III期(2004年～2019年)の間では、岐阜大学が岐阜県神岡町、東濃地震科学研究所との共同で電磁流量計を用いて1秒間隔で湯量観測を行った。

これらの湯量観測データから潮汐解析プログラムBAYTAP-Gを用いて湯量の潮汐歪心感度の振幅と位相を求めた。図は分潮M2(12.4h)とO1(25.8h)の潮汐歪心感度振幅の解析結果である。M2振幅は0.156±0.017で、O1振幅は0.144±0.021(L/min)/strain(E-08)となった。位相は地震発生の前後で変化が観測されなかった。顕著な湯量増加が観測された、30) 東北太平洋沖地震の発生前後のM2振幅は0.150±0.0005から0.187±0.008 (L/min)まで25%増加した。その後ゆっくりと3年以上かかってものレベルまで回復したことが分かった。

割石温泉における湯量観測 5 2005年～2018年の間欠泉の周期変動解析

割石温泉は間欠泉であり、その周期は地震発生にもよって湯量が増加して間欠泉の周期も短くなる。図は2005年～2018年までの約13年間の間欠泉の周期変動を示す。

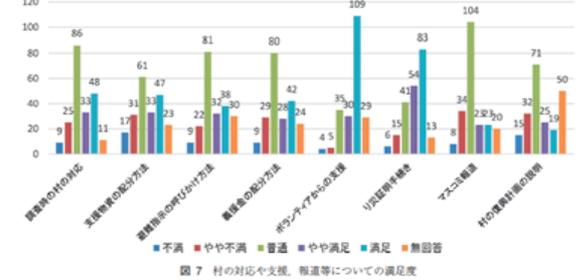
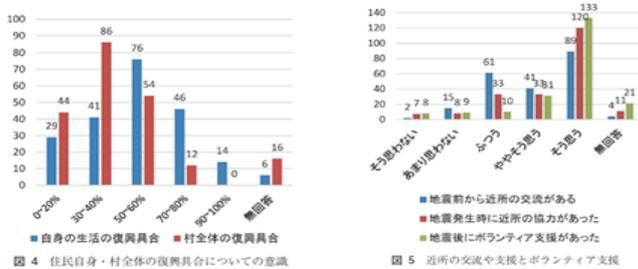
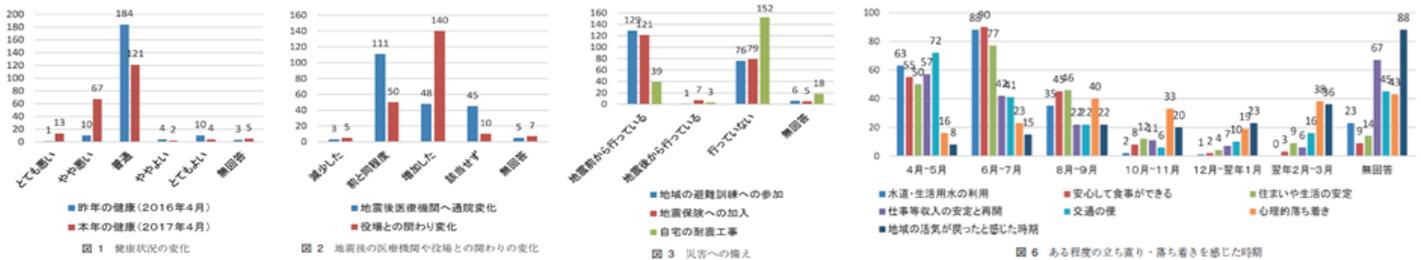
図の2015年～2018年においては、温泉の休館日では営業日と比較して、その周期は約30分短くなる。この原因は温泉の休館日では浴槽面より1m下のドリルから温泉を放水するので水頭が下がり滞水層にかかる圧力が1(kPa)低下して周期が短くなったと考えられる。この結果から間欠泉の周期変動を観測することによって滞水層にかかる圧力変化を知る事ができる。
12) 能登半島沖地震では約70日前から間欠泉の周期が約50分減少している。この値は滞水層にかかる圧力変化ΔP=10 (kPa)に相当する。地震前もとの周期に回復するまで1年半かかっている。2) 駿河湾地震では約25日前から約65分減少している。滞水層の圧力変化ΔP=13(kPa)に相当する。これらの観測結果から、上記の2つの地震では地震発生前に間欠泉の周期が減少しており、地震発生の前兆現象の可能性がある。



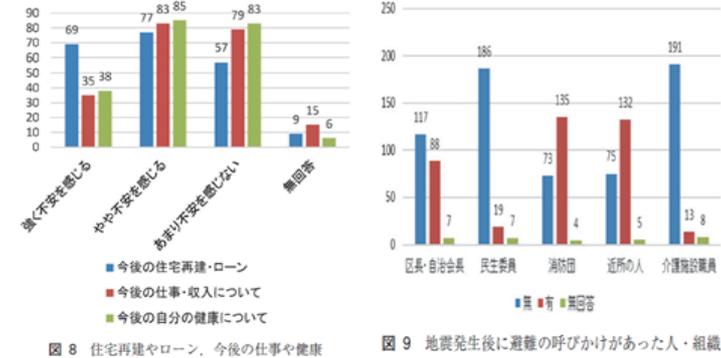
熊本地震被災住民における健康と生活について —被災地での調査から—

熊本地震においては復興の過渡期にあり、こうした中で、災害後1年を経て「熊本地震後の健康と生活に関する調査」を被災自治体との協力で行った。被災者が実際にどのような環境の中で、どのような意向を有しているのか、また健康への意識、コミュニティとの関係等ソーシャル・キャピタルに関する内容で調査することにより、今後の大規模災害後の災害医療における中長期的視野での被災者の健康・ケア問題を考える一助としたい。

調査日時：2017年4月、場所：熊本県西原村対象者：西原村村民(村外への避難者を含む)、調査方法：面接式質問票による調査、調査時点における被災者の健康状況と各項目との関連性を把握するため、 χ^2 二乗検定に基づく分析を行った(有意水準5%)。有効回答者数：212人。調査題目：熊本地震後の健康と生活に関する調査。本研究は、大和証券ヘルス財団平成28年度(第43回)調査研究助成を受けて、調査・研究を行った。



(熊本地震被災住民における健康と生活について
—被災地での調査から— 続き)



結果と考察: 有意差が認められたものとして、通院回数との関連、避難生活中の症状との関連、医療機関への通院、市販薬等投薬の利用の有無との関連、避難訓練の参加、地震保険の加入状況との関連、自身の生活復興具合、また村全体の復興具合との関連【自身の復興とともに、村全体の復興も被災者の健康に関連があるとされる。自分の生活再建が早く進むことは被災者の健康に貢献できるだろう。村の復興はインフラストラクチャの回復による医療等へのアクセス確保、地域医療の復興、日常生活での買い物などに不自由がなくなるなどの効果が健康に影響するものと思われる。また、将来地域社会への展望を見出せることも安心度につながるとと思われる。】、

地震前からの近所との交流状態における関連【本調査では地震発災前の普段からの近隣関係と健康についても関連があるとの分析結果が出た。この背景には、災害以前に普段からのコミュニティ内で関係が良好であることによる連帯感と相互による助け合い意識、また安心して生活できることによる健康への効果等が考えられる。災害が発生したとしても、その効果が持続する、もしくはその経験が避難生活における新規のコミュニティ内での付き合いを円滑にできることによる健康への効果が期待できよう。】、

地震発生時、近所と協力の関連、食事が安定してできる時期との関連、交通の便が回復したと感じた時期との関連、心の落ち着きを感じられた時期との関連、2017年4月時点での村の対応との関連、ボランティアからの支援に対する満足度との関連、被災証明手続きの満足度との関連、村の復興計画の説明に対する満足度との関連、今後の住宅再建・ローン等への不安度との関連、今後の仕事・収入に関しての不安度との関連、今後の自身の健康についての不安度との関連、地震発生後、区長や消防団等からの呼びかけの有無との関連【質問紙では「区長・自治会長」「民生委員」「消防団」「近所の人」「介護施設職員」であり、呼びかけがあったとされる人で特に多かったのが「消防団」「近所の人」であった。少数だった「民生委員」「介護施設職員」も含め、地震発生時に地域社会のだれもが避難の呼びかけをできるかは、被災者の健康(生命の安全を含め)に関わっていることが提示された。そのため、地域社会の連携とともに、どのような立場であっても避難の声掛けは障がい者や高齢者等の生命を救うことにもつながっているといえよう。】

大規模地震後における高齢者の健康に関して

～要介護度の変化と環境や行動等の関係について～

被災者のうち要配慮者である高齢者に焦点を当て、被災者の災害後の移動経緯やその間の行政や家族、近隣住民との関係、生活面での課題や医療・保健・福祉における役場との関係、更には介護等におけるアクセス状況の観点から、要介護度の有無を区別して、調査当時の健康意識への影響を把握することを試みた。

調査日時：2015(平成27)年9月に面接式質問票による調査を岩手県大槌町内で行った。回収数は108(調査当時要介護認定者62,それ以外46)。統計解析：本研究における検定は χ^2 二乗検定と重回帰分析を主に利用した(有意水準5%)。

結果：調査時に要介護認定がない階層(健康な階層と考える、以下「要介護度無」と記す)では、調査時の健康意識と移動の回数に関して χ^2 二乗検定では、有意差が認められた。

要介護度有の階層において、近所付き合い、役場との関係、介護施設との関係と調査対象者の健康意識について分析したところ、調査時の健康意識と近所付き合いとの関係に関して χ^2 二乗検定では、有意差が認められた。また、将来の健康を予測するため、調査時の健康意識、移動月数、移動回数の三要素で重回帰分析を行った(右表)。

要介護度無の階層で、地震発生から100か月後すなわち8年を超えたころの推測値では(y値が小さいほど健康と感じられ)、今後の100か月で移動回数が3回とした場合は y (健康) = 2.144755となった。100か月で移動回数4回とした場合は y = 1.752255となった。

一方、要介護度有の階層においては、同様に100か月の移動回数が3回として y = 2.945182, 100か月の移動回数が4回として y = 2.678462となった。

両階層(要介護度有無)における3回の移動と4回の移動における y の差は大きくなる。要介護度有より要介護度無(つまり、調査時健康層)のほうが今後、「健康」と実感する可能性が高い。

また、移動回数が4回として、被災後150か月経ったことを想定すると、要介護度無の階層では y = 1.531755, 要介護度有の階層で y = 2.651962であり、要介護度無の階層のほうがより早く健康の良化を意識することが予想された。

結論：災害後に要介護度の違いで高齢者を分け、災害後の移動や環境、それにとまなうコミュニティ等すなわちソーシャル・キャピタルに関する健康への影響を分析した。健康な階層では、移動に伴う回数との関係が健康に影響していることが示唆された。要介護認定有の階層においては近所との関係が健康に影響することが示唆された。将来的な健康への影響では両階層間で乖離が予想された。

表 調査時の健康への意識、移動月数、移動回数の三要素で重回帰分析

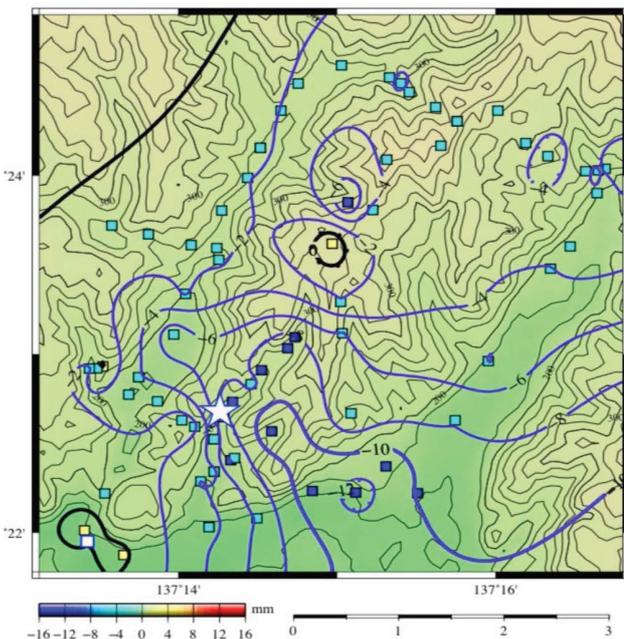
y : 健康
 x_1 : 現在の居住地までの移動月数
 x_2 : 移動回数, $y = ax_1 + bx_2 + c$

調査当時要介護度無階層	x_2 の係数	x_1 係数	定数項
係数	-0.3925	-0.00441	3.763255
調査当時要介護度有階層	x_2 の係数	x_1 係数	定数項
係数	-0.26672	-0.00053	3.798342

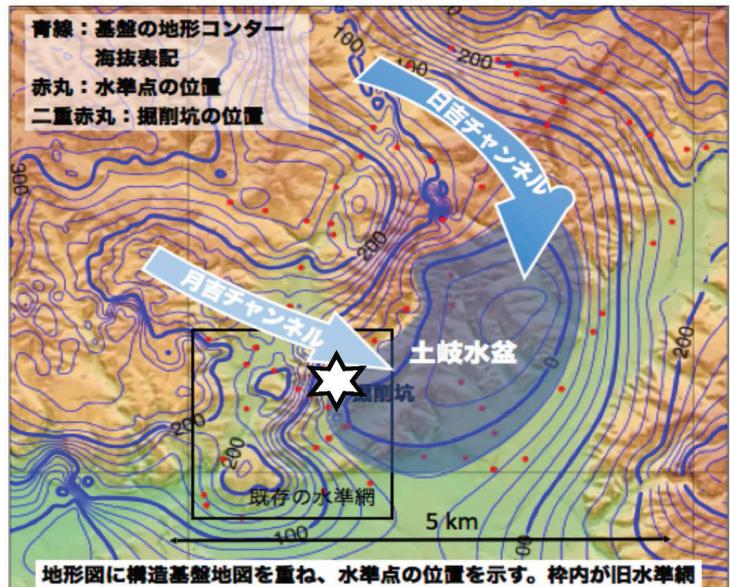
I. 深地層・地下空間における地下水流動研究 水準測量による上下変動の検出と地下水系の推定

12-18年の上下変動と基盤地形分布

2012-18年の6年間で、網南西端の仮不動点に対し、全般に沈降が、最大10mmが検出された。右図の構造基盤地形図と対比すると、4mm以上の沈降は地下水系月吉チャンネル沿いに集中し、下流域ほど大きくなり10mm(年間2mm弱)である。



左図 2012-2018の6年間に求まった上下変動を2mmコンターで示す。☆が掘削坑、右下の□が仮不動点の位置。



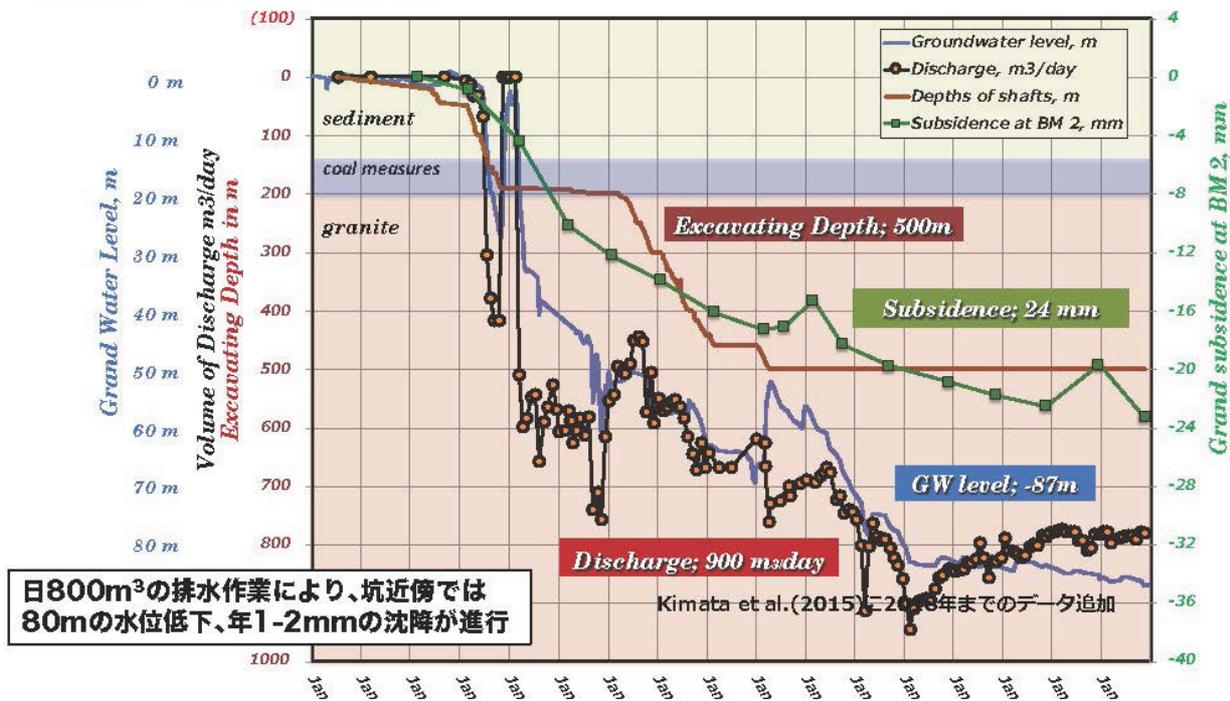
地形図に構造基盤地図を重ね、水準点の位置を示す。枠内が旧水準網

左図 JAEAによる周辺域の基盤上部の地形分布を地形図に重ねる。☆が掘削坑、●が水準点の位置。

I. 深地層・地下空間における地下水流動研究 水準測量による上下変動の検出と地下水系の推定

掘削坑近傍の上下変動と地下水位、排水量、掘削深度

掘削が深くなるに従い、排水量は増加し、一時的に900m³/dayを超えたが、2014年以降に緩やかに増加。坑道の南250mで観測する地下水位は、地下水位(は80m超低下し、現在も上昇には転じていない。坑道の南150mに設置した水準点では2002-2018年に24mmの沈降が観測された。



日800m³の排水作業により、坑近傍では80mの水位低下、年1-2mmの沈降が進行

Kimata et al.(2015)に2018年までのデータ追加

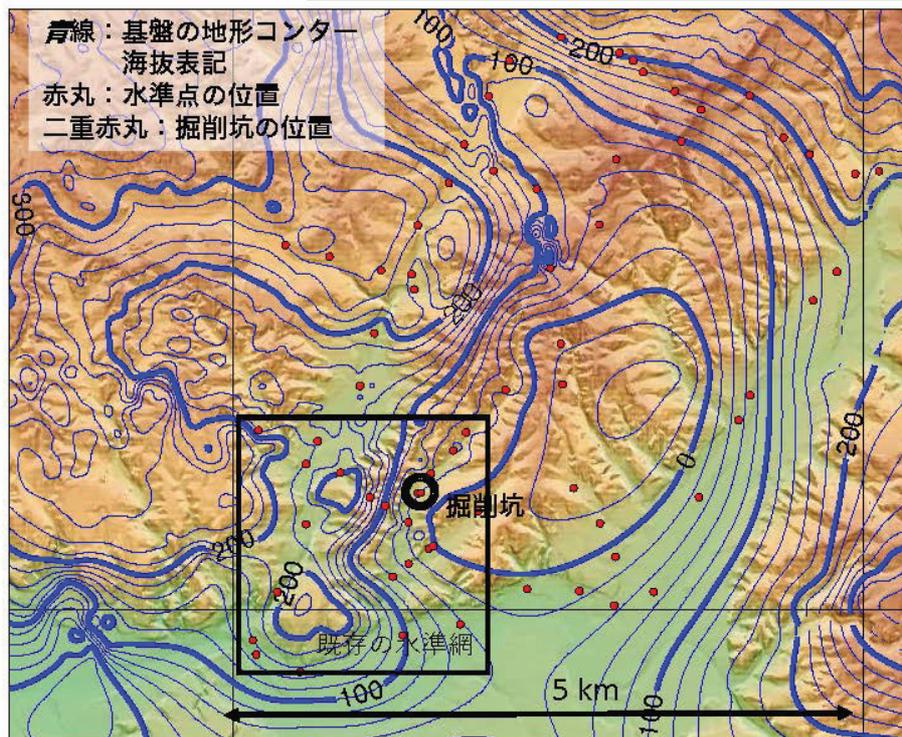
I. 深地層・地下空間における地下水流動研究 水準測量による上下変動の検出と地下水系の推定

2004年に水準測量を開始したが、図に矩形で示すように掘削坑近傍2km×2kmに限られた。JAEAなどが周辺域での基盤岩構造(花崗岩上部の震度分布)を詳細に調査し、当該域の地下水系は、右図で北から南西に流れる日吉チャンネルに、西方から掘削坑下を南東に流れる月吉チャンネルが合流し、合流部に相対深度60mの水盆が形成されている。地下水盆周辺域では地下水位観測はなされていない。

水準網の拡張と周辺の基盤地形分布

周辺域での上下変動を明らかにするため、2012年に水準網を周辺域5km×5kmに拡張した。水準網は環をなし、閉合誤差は2-3mm以内に収まる。

水準網はこの領域の地下水系、日吉チャンネルと月吉チャンネルの領域をカバーし、両地下水系の地下水位変動を反映した上下変動の検出が期待できる。

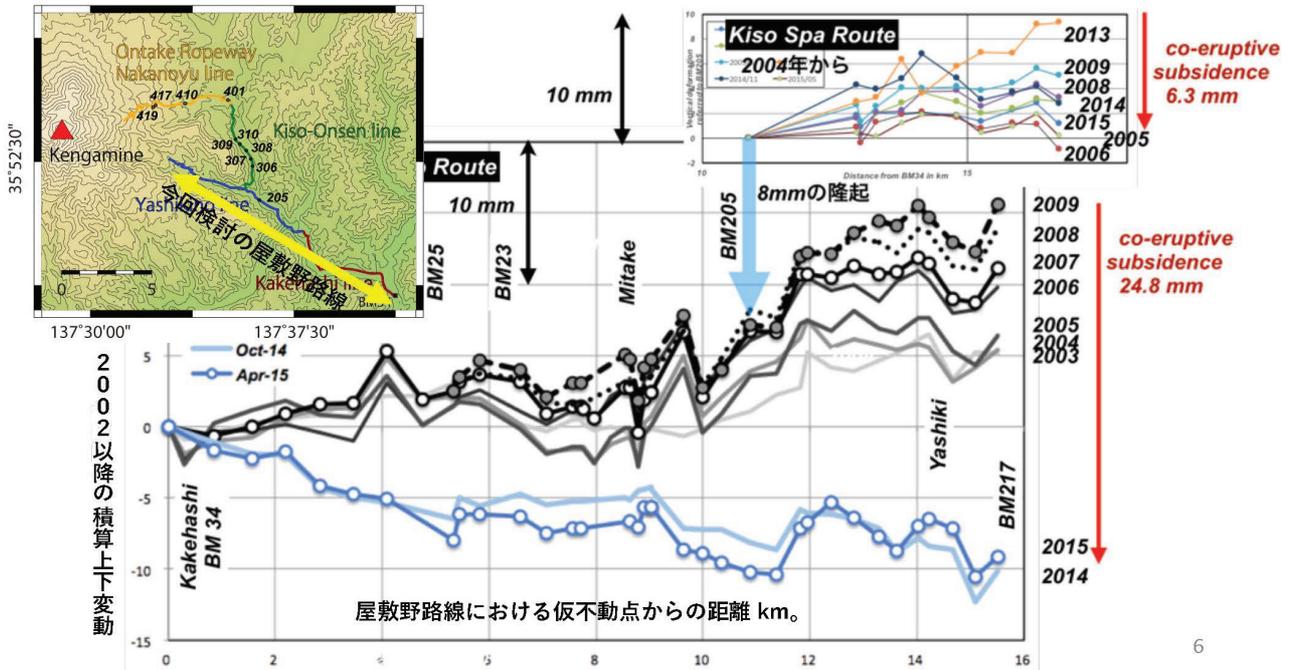


地形図にJAEAによる構造基盤地形を重ね、水準点の位置を●、掘削坑の位置を○、旧水準網の範囲を矩形で示す。

Ⅱ. 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
3 御嶽山の活動に関する研究

2002年から噴火前の11年間に山頂側が20mm弱隆起

御嶽山東山麓では2002年から上下変動の解明のために水準測量を実施してきた。2002年以降、2014年噴火前まで山頂膨張を示す15mmの隆起が観測されていた。山頂から10km離れる点でも隆起が検出され、圧力源は山頂直下ならば深さ10kmほどと推定する。

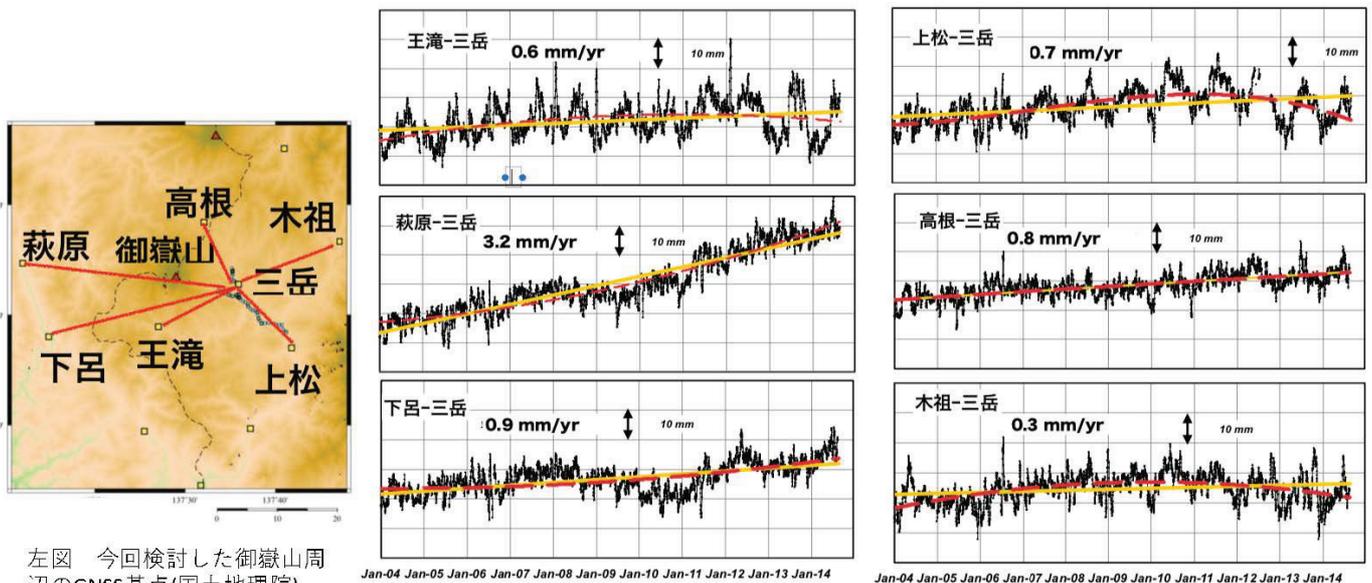


6

Ⅱ. 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
3 御嶽山の活動に関する研究

GNSS観測でも2004年以降、三岳基点が周辺基点に対し年間1mmほど隆起

国土地理院が実施するGNSS観測でも、年間に±5-10mmの揺らぎを有するが、三岳基点が周辺の基点に対し、2004-14年に0.3-3.2mm/yrの隆起を示す。山頂側の1mm/yrの隆起となる水準測量の結果を補完する。

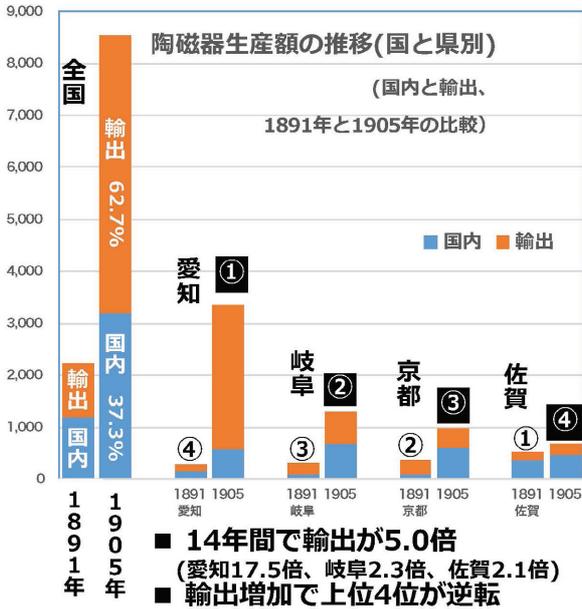


左図 今回検討した御嶽山周辺のGNSS基点(国土地理院)

右図 王滝・上松・萩原・高根・下呂・木祖の各基点から求めた三岳基点の上下変動。地理院F3解の11日間移動平均値。この間の変位速度を直線近似で求め、図示。

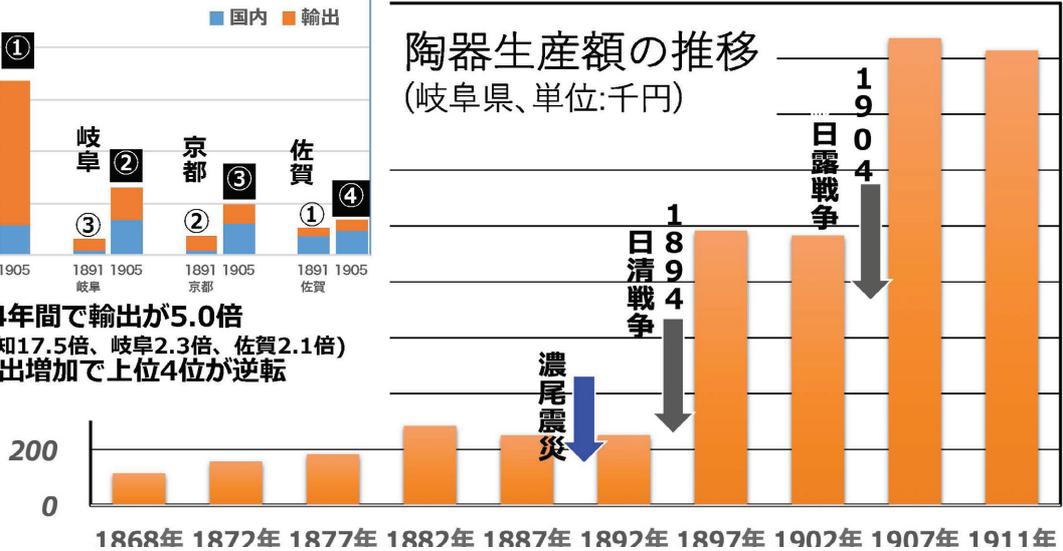
IV. 地域の地震防災に貢献する調査研究 2. 過去の被害地震資料の再検討 -1891年濃尾地震震災の再検討

濃尾震災からの迅速な復旧と復興：輸出製品生産に転じた東濃地方の陶器産業



濃尾震災では現の土岐や多治見、瑞浪市の東濃南部では、地場産郷の陶器窯200基が5基のみ残ると壊滅状況に陥った。ところが、陶器産業は翌年に生産額を震災前に回復させ、日清と日露の大戦を通して20年間で8倍に飛躍的に増大させた(下図)。国内と輸出製品の生産額を上位4県で1891年と1905年で比較すると、愛知と岐阜は輸出製品の増産で陶器産地の上位に躍り出たの明らか。零細業者の奮闘のみならず、主導部は政府の外貨獲得施策を見据え、零細業ゆえ製品の切り替えも長じていたと推測する

陶器生産額の推移 (岐阜県、単位:千円)



IV. 地域の地震防災に貢献する調査研究

講演会・冊子発行による地域防災研究の普及活動

講演会 平成28年度 市民学術講演会

瑞浪を襲った地震、襲う地震

日時 11月16日(水) 19時~21時
会場 陶公民館 多目的ホール

講師 木股文昭先生 (元名古屋大学教授)



出版

東濃地方の地震とその災害

公益財団法人 地震予知総合研究振興会
東濃地震科学研究所
木股 文昭・松多 信尚

2500冊

御嶽山 二度と犠牲をださない

東濃地震科学研究所 所長 木股文昭

1600冊 2017年2月

兵庫県南部地震に関して：地震に伴う死傷者発生予測モデルの構築

4. 神戸の地震に伴う死傷者調査と死傷者発生予測モデルの構築

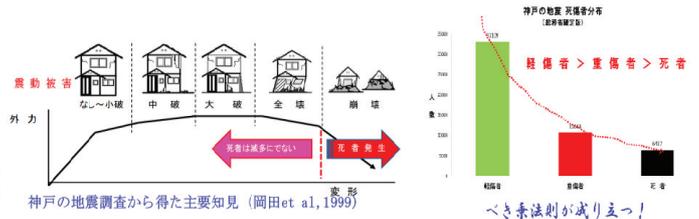
(1) 住家の被害と死者の発生

この地震による死者は5,000人を大きく越えたが、「住家被害」調査を通じて破壊が「住家内生活不能」に至るまで進行したとしても死者は滅多に出ないことが明確になり、住家が崩壊状態に陥ることで初めて死者多発となるという、「以降の研究の基本」となる知見が得られた(第1図)。

(2) 死傷者の重症度別分布

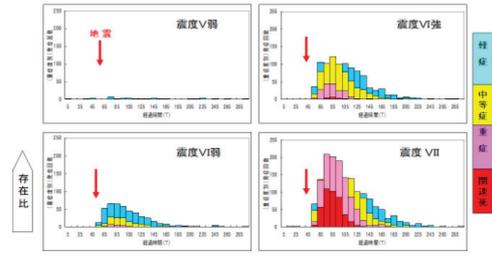
以下に死傷の重症度別度数分布実測値(第2図(a)&予測値

(b))を掲げておく。これらの成果は爾後研究の規範となる。以下は急性期から慢性期に至る間の地震関連疾患に関する実測・推算値の対比図である(3図)。両者の整合性は高い。この図から、家族・近隣住人による救出活動が特段の効果をなしたことが読み取れる。消防が次位でやや有効、自衛隊は現地到着に時間がかかり、救出への貢献は殆ど期待出来ないことを示唆している。



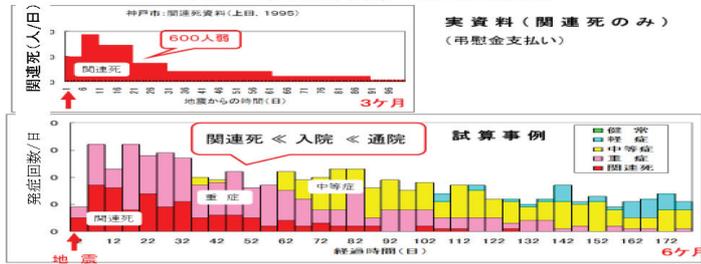
第1図：木造被害と死傷の対比

第2a図：死傷分布の事例

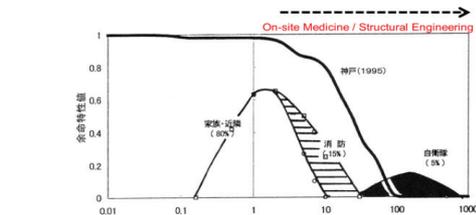


第2b図：発症の震度依存性モデル化

関連疾患の事例 一神戸(主要部)との対比



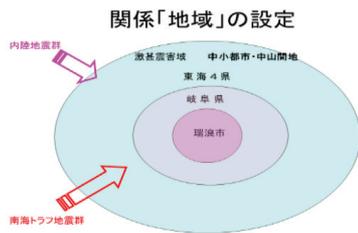
第3図：重症度分布(実測値との対比)



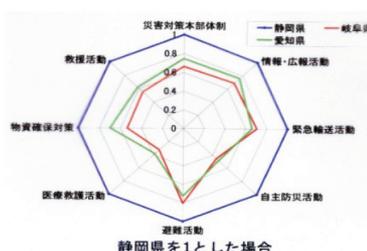
第4図：木造住家倒壊に伴う生き埋め者の余命と救出活動の有効性を対比

地域貢献関連の研究：瑞浪市の防災力

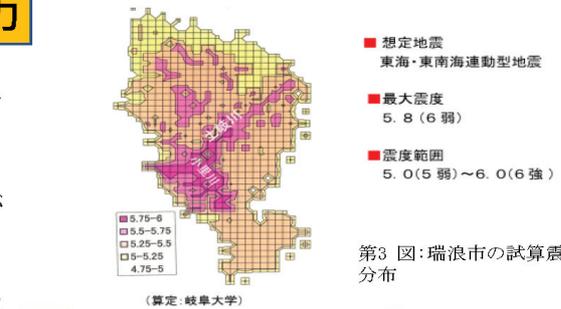
- 1) 関連基礎研究の事例：瑞浪市を第1図のように位置付けて、市がもつ「地震防災力」の見当付けを実施している。特に、防災先進地域との対比が説得性をもつ。その際、防災先進域である「静岡県(市)」を基準とするのが判りやすい。岐阜・愛知両県の現況対比を実施した(第2図)。岐阜県・愛知県共に静岡県に及ばない。
- 2) 瑞浪市(人口≒4万人)の震度Map：瑞浪市の防災問題考究に際しては市が被る地震動強度(震度)のエリア内分布を策定することが先決である。岐阜大学の協力による算定事例を以下に示す(第3図、4図)。
- 3) 瑞浪市(救急車3台)がもつ活動実態を静岡市と対比で考究119番Callに始まり、出勤・患者収容・病院受け渡し・帰省)に至る一連プロセスからなることから、これに要する時間が地域防災力の一指標となる。そこで、瑞浪市の活動を静岡市(人口≒70万人強、救急車23台)と対比した。結果は、第5図のように細部を除いて両者が酷似していることから、瑞浪市の救急対応力が静岡市に匹敵する実力をもつことが判る。
- 4) 関連広報・普及活動等：その他の活動としては瑞浪市広報への地震防災に関する知見・情報提供に加え、種々の地域交流を実践してきている。特に筆者以降の防災研究主担当(三上、谷口等)は「実践的地震防災」と称して地域への“出前防災”に力点を置いた活動を推進した瑞浪市の救急者は一国の人口別規定では2台で可だが一市が南北に長く伸びたエリアを持つことから3台保持していることの(+)効果であろう。



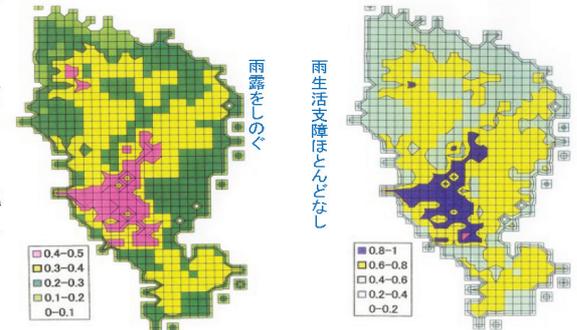
第1図：瑞浪市と想定地震



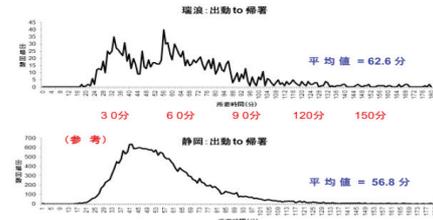
第2図：静岡県との対比



第3図：瑞浪市の試算震度分布



第4図：関連の生活支障



第5図：救急車活動実態の比較

医学からみた人間被害

1) 関連文献DBの検索と活用

地震(津波)に起因する人間被害を急性期の外科的な問題としての扱いから1歩でも発展させようとすると医学関連分野の知見が不可欠となり、医学関係のDatabaseを紐解くことで理解を深めておく必要がある。こういった観点から、世界第1級の医学文献DatabaseであるPubMed (USA)とか、わが国医学分野の代表文献集であり、PubMedがもつ表示法を継承した医中誌DB(医学中央雑誌会)等を参照することが望まれる。前者は2007年時点で2,000万件を超える文献を収録しており、後者は600万件程度を収録している。これらの膨大なDataから地震に起因する文献群の抽出は容易ではないが、この時期筆者が私立大学の図書館情報学コースを兼担しており、文献情報処理専門家の協力を得ることで検索と分析の作業を進めることが出来た。結果の1,2を例示しておく。

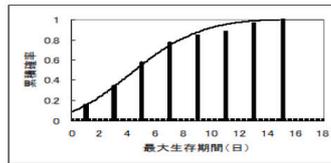
以下、検索とレベル2,3の分析事例のいくつかを例示しておく。この図は、先進国と開発途上国間の学術進展の差異を明瞭に示している。上図に見るように多くの地震が多様な医学系疾患をもたらし、関連分野も伝統地震(工)学分野を遥かにこえていることが伺われる。

2) 閉じ込め人間の生存時間の数理

この時期に地震で閉じ込めとなった人間の生存限界について、世界の“生き埋め”生存者実態資料に基づき、かつGumbelの極値分析法を用いて評価した。結果を第12図に示す。この結果、生き埋めとなった場合、空気の還流とか飲食物の適度の補給があった場合でも生存限界が精々2週間であることがはっきりした。

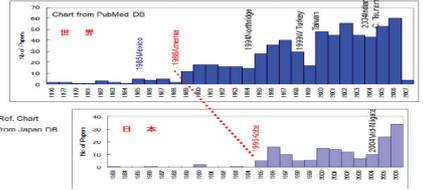
処理のレベル	処理の概要	技術的要素
レベル 1	検索	情報検索
レベル 2	主題DB作成 分類 整理	基礎統計 系列分析
レベル 3	分析 自然言語処理 (新知見得) 視覚化表現	

第1図: レベルTextmining手法、レベル3まで実行



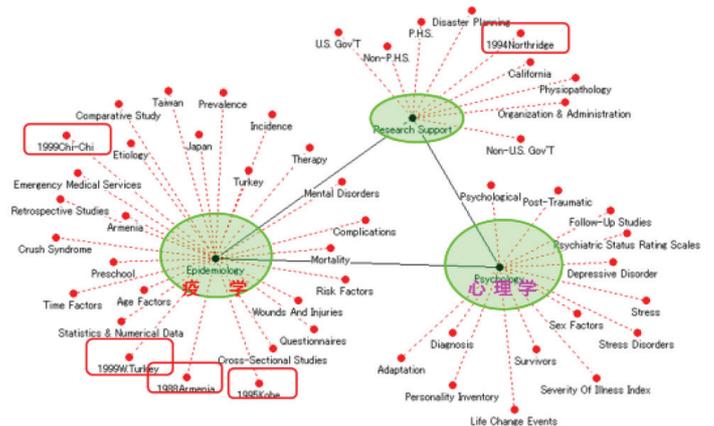
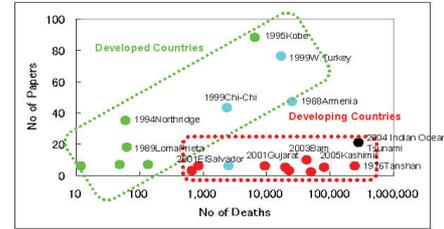
第5図: 生き埋め者の生存確率評価

Chronological View of Research Activities - Comparison with Japan



第2図
「レベル2」の事例
論文発行部数にミル
世界...日本2007年
まで

第3図
対比
死者数と論文数の



第4図: 「レベル3」の事例、算定されたKeyGraph

2011年東日本大震災(M_w9.0):死傷者多発に関する考察

この地震に対して早期の被災現地調査は至難であったが、爾後多種多様な調査研究が実施されており、得られたDataを活用することで種々の分析が出来る。筆者は従前研究の発展版としてやはり死傷者多発問題に力点をおいた整理を進めた。多くの研究から1) 死者の大半が津波による溺死であること、関連して傷者は意外に少なく(神戸の地震を経て結成された急性期の人命救急医療班)DMAT (Disaster Medical Assistance Team)の活躍場が意外に少なかったこと、また死者の殆どが津波高さ(地盤上)3m以上で発生していること等が知られている。さらに、津波による死者は殆どが住家等の流失域でのみ発生していること(小山他の実証)等を踏まえ急性期の死傷者について内陸・海洋性地震に共通する予測式の模索を試みた。第1図に神戸の地震に加え、三陸リアス海岸を襲った既往津波地震群による「急性期の死傷者数」を対比しておく。内陸地震では死者<<負傷者、海洋地震では死者>>負傷者の不等関係が成り立つように見える。

しかし、この不等関係が一般性を持つかどうかは決して自明ではない。このことを検証することを含めて、死傷比率δ、Rの2変量を新たに導入することで既往主要地震群の死傷・住家等の被害との関係を探るべく創意した。ここに、(δ、R)は次式で定義される量であり、震動起源とか津波起源とかを問わず住家の全壊数・崩壊数で決まる関係式である。

$$R = \text{死者数}$$

$$\delta = (\text{流失} + \text{崩壊} - \text{全壊}) / (\text{流失} + \text{崩壊} + \text{全壊})$$

未だ暫定版ながら、結果を第2図に示す。ここでは神戸の地震他、外国の主要地震との対比も行っている。この図から、「内陸地震: 死者<<負傷者、海洋地震: 死者>>負傷者の不等関係」は一般性ありとはいえないことがわかる。また、死者の年齢依存性等も考究している。なお、2011年東日本大震災については今も詳細Data取得が至難な面があり、継続研究中である。

人間被害の対比

内陸地震

■兵庫東南部地震
死者(+不明)=6,437人
負傷者=43,792人

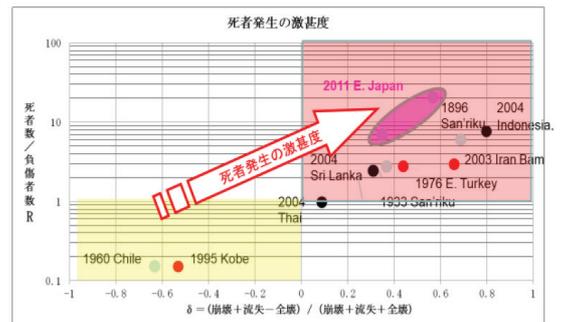
津波地震

■明治三陸津波地震(1896)M7.6
死者=26,360人 負傷者4,398人
■昭和三陸津波地震(1933)
死者2,995人 負傷者1,096人
■今回の津波地震(4月14日現在)
死者(+不明)=28,232人
負傷者=4,916人

∴ 死者<<負傷者

∴ 死者>>負傷者

第1図: 内陸地震では死者<<負傷者、海洋地震では死者>>負傷者の不等関係が成り立つように見える。

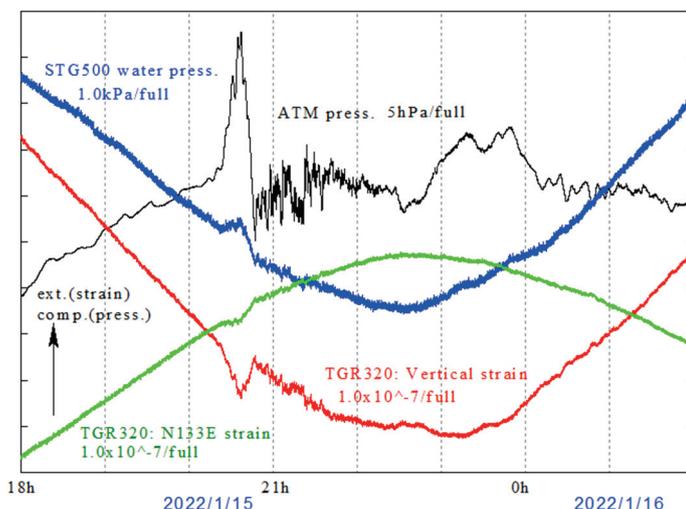


第2図: 地震(津波)に伴う死傷者分布の2次元表示。

トンガの海底火山噴火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。それに伴って8000km離れた当研究所の気圧計、水圧計、歪計などに変動が観測された。当研究所において記録した変動の一部を図に示した。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。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。

Tonga explosion record (2022/1/15 18h - 1/16 2h)



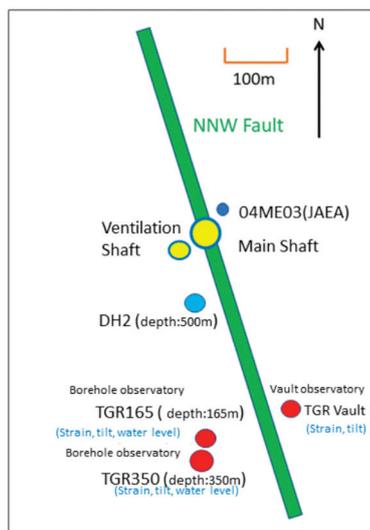
STG500ボアホール観測点(深度500m)の水圧計にも対応した水圧変動が観測された。噴火地点から観測点までの距離は約8000kmであり、到達時刻を考慮すると変動は約320m/secで伝搬してきたことになる。

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

東濃地震科学研究所 (TRIES) 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、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。観測された歪・傾斜変動を解析し主歪や最大傾斜変動などを求めた。その結果のまとめが下図左に示されている。その結果、1. TGR350(深度:350m)においては水位の上下に対応してNNW断層と同様な左横ずれ・右横ずれの最大せん断歪が得られた。TGR165観測点の傾斜は断層に直角な傾斜が観測された。

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)				



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																								tgr350
sng						9/7			9/14															SNG
97FT-01									6/23														10/12	97FT-01

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 — 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 —

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1 km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。

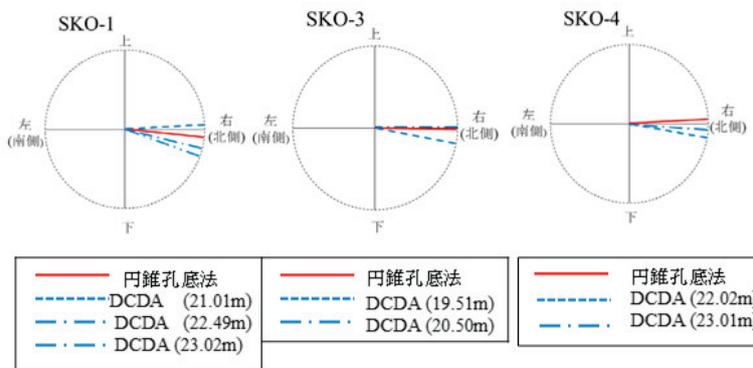
表1. キー座標系に関する遠方応力テンソル成分. ただしキー方向をX, 単位はMPa.

	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。

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

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な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, 釜石鉾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鉾山のコアに対する結果を報告する。



左図はコア変形法(DCDA)と円錐孔底ひずみ法の結果の比較を示している。

歪変化の空間分布による短期的スローイベント発生源モデルの再考

沈み込み帯で検出される各種スロー地震は、通常の地震と同様に断層運動としてモデル化されるが、これらがスローかつ非定常な現象となるメカニズムは不明である。深部スロー地震の一つである短期的スローリップイベント(S-SSE)について、発生域における変形様式を考慮して、発生源モデルの再推定を行った。本研究では、S-SSE発生源で断層すべりならびに断層面に対して法線方向への変形が生じると仮定し、それらの変形量を歪計・傾斜計のデータから推定した。

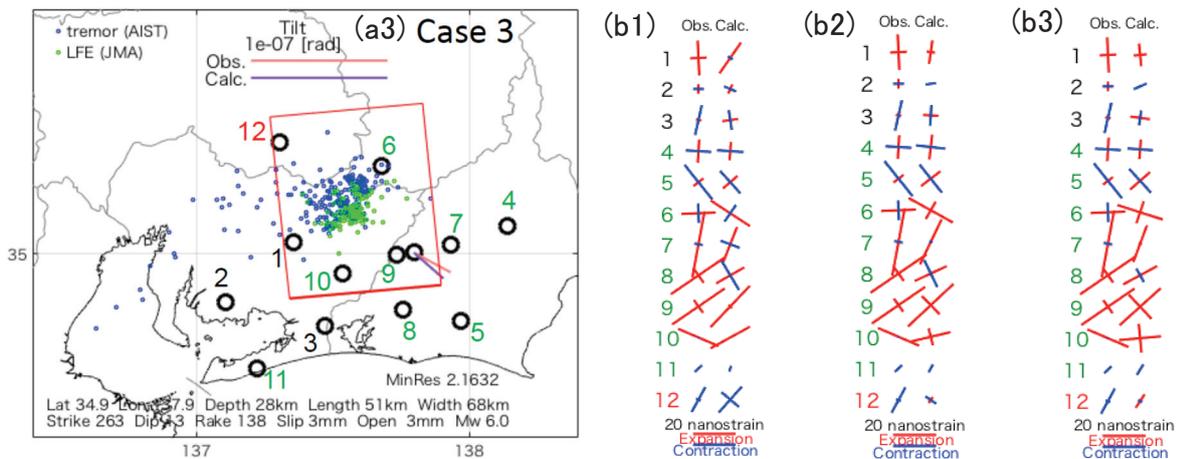


図. Case3の場合の 2017年2月13日午後-17日に発生したS-SSEの発生源モデル(第2段階)。断層面付近をグリッドサーチで推定した断層面(赤色矩形)と断層パラメタ。(b1)-(b3) Case1-3における主歪の観測値と(a)に示した断層モデルから求めた計算値との比較。図中の番号12がBYB観測点。

§ 15. トピックス

東濃地震科学研究所の目的は、(国立研究開発法人)日本原子力研究開発機構の深地層研究施設を活用しながら、内陸地震やプレート境界地震の発生機構に関する研究およびそれに伴う観測、機器開発などを推進し、地元の要望である地域の地震防災に貢献することである。ここでは行われた研究の中から3個のテーマに関して述べる。

15.1 立坑の掘削と埋立てにおける変動

15.1.1 深さ 500m の立坑掘削に伴い観測した地盤上下変動と地下水位変動 (2002-2021)

15.1.1.1 はじめに

日本原子力研究開発機構(JAEA)は岐阜県瑞浪市で深さ 500m の立坑掘削実験を 2002-2022 年に実施した。掘削に伴い地下水の排水が必要となる。いわき市の常磐炭鉱では採鉱に伴う多量の地下水排水により、周辺域で局所ながらも 1m の地盤沈下が生じ、廃坑により 30cm の隆起が報告される(西村, 2012)。もちろん、常磐炭鉱では数多くの坑道が掘削され規模が全く異なる。しかし、掘削に伴う排水で周辺で地下水位低下と地盤沈下が小規模ながらも発生すると考え、東濃地震科学研究所(TRIES)では地下水位と上下変動の観測を実施した。

地下水の多量の汲み上げに伴う周辺域での地盤沈下は、我が国に限らず、発展国では産業用水、発展途上国では農業用水に地下水が利用されることから、自然災害のように多数の犠牲者は生じないが、国際的な社会問題になる。そして、地下水の汲み上げ規制により地盤沈下が停滞するという成果も上がる。だが、汲み上げる地下水の全容を把握するのが極めて困難である。その点、今回の JAEA の立坑掘削は周辺域での地下水流動の調査も含め、立坑での湧水が深度毎に詳細に観測されたことから、周辺域での地下水位低下と地盤上下変動と地下水汲み上げの関連を解明する絶好の機会と考えた。しかも、立坑からの地下水の湧水と排水(汲み上げ)は JAEA が実施することから、TRIES は周辺域での地下水流動と地殻変動の観測に専念することにした。

15.1.1.2 JAEA による立坑掘削と TRIES の取り組み

a) JAEA による深さ 500m の立坑掘削

JAEA は核燃料廃棄物の地層処理方法を研究、技術開発する目的で岐阜県瑞浪市において深さ 500m の立坑掘削を行った。掘削は 2002-2022 年に実施され、2002 年に始まり、2014 年に完了し、その後、埋立てが 2020 年に始まり、2021 年に地表に達した。

掘削した立坑の構造と地質分布を図 1a に示す。主立坑と換気立坑は 40m 離れて掘削され、深さ 100m ごとに連絡横坑、主立坑の深さ 300m と 500m、換気立坑の深さ 300m に長さ 100m ほどの調査横坑が掘削された。立坑は地表から堆積層、深さ 165m に不整合面、その下部に基盤となる花崗岩が分布する。不整合面付近には堆積層下部礫層や夾炭層、風化した花崗岩があり、地下水を多く含む。また、下部の花崗岩も割れ目が発達し、地下水を豊富に含む。JAEA は立坑ごとに排水と、20m から 100m の深さごとの湧水を連続観測し、データを公開している。JAEA は地下水位観測を周辺の地下水位観測井で行うが、2021 年 12 月現在、全期間のデータがまだ公開されず、本論ではこれらの地下水位観測結果が検討できなかった。ただ、観測井の多くが立坑掘削地よりも想定される地下水系の上流部に設置され、地下水流動を検討するに不十分な配置だった。JAEA は立坑近傍で傾斜計による傾斜観測を試みるが、地表に設置する傾斜計では観測精度が低く、しかも短期間の観測で掘削に伴う地殻変動の調査研究といえる内容でない。

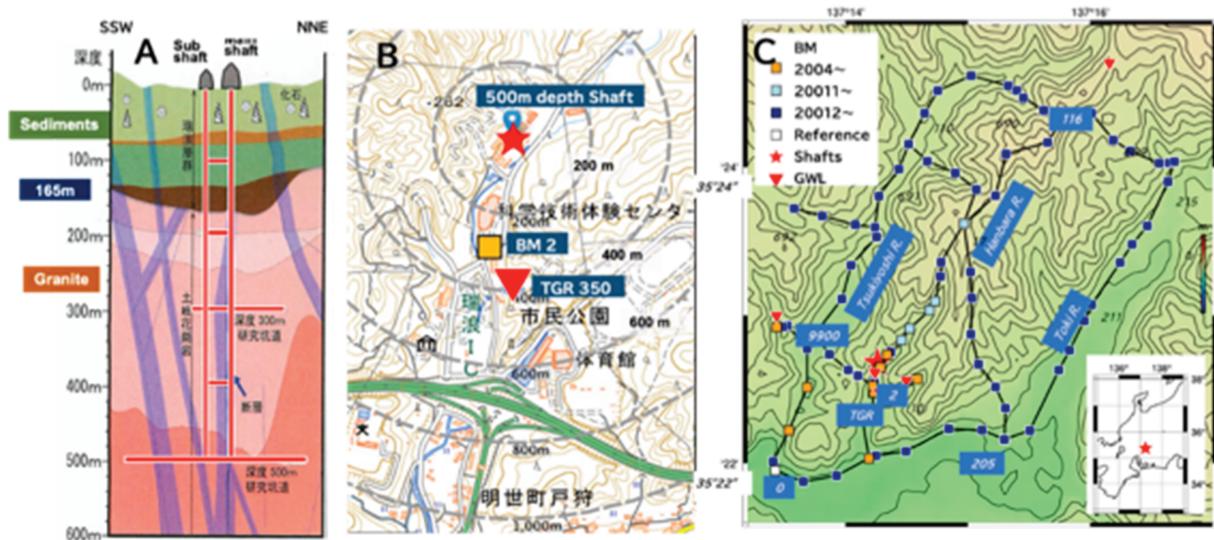


図1 a;立坑の概念図と地質断面図(JAEA)、b;地下水位観測井 TGR350 と水準点 BM2 の位置の地図、c;周辺域の水準網の地図。共に立坑を赤の★、地下水観測井を赤の▼、水準点を設置年代で色別する■、上下変動を求める時に不動と仮定した水準点を□で示す。

b) 東濃地震科学研究所による掘削に伴う地下水流動と地殻変動の調査研究

東濃地震科学研究所 (TRIES) は立坑周辺において、掘削による地下水の湧水・排水に伴う地下水流動の変化や地殻変動を調査研究するために、立坑近傍の観測井に設置してある水位計や傾斜計、歪計により水位変化や傾斜・歪変化などの観測、水準測量や宇宙測地技術の GPS や SAR による上下変動の検出、絶対重力計と相対重力計などによる重力変化の観測などに取り組んできた。2004～2012 年の 8 年間の観測結果を検討し、立坑近傍で検出した水位変化と上下変動が立坑の湧水の時系列変化との高い相関を指摘した (Kimata et al., 2015)。近傍に設置した TGR350 と水準点 BM2 (図 1b, 1c)、及び周辺の地下水位観測井と水準点の地図を図 1b、1c に示す。

立坑の掘削深度と排水量、および立坑近傍の地下水位観測井 TGR350 と水準点 BM2 で観測した地下水位と上下変動の 2002-2021 年の時系列変化を図 2 に示す。なお、上下変動は立坑から 1.8km 離れた花崗岩の露頭に設置した BM0 (図 1c に示す□) を不動点と仮定し算出した。本論で水準測量による上下変動は BM0 を不動点と仮定した。図には掘削が堆積層から花崗岩への移行と掘削完了、埋立て開始の 3 時期を矢印で示す。2006 年に整備調整のために、掘削と排水の作業の一時中断で地下水位も一時的に上昇するが、掘削作業の再開で地下水位は排水中断前の状況に戻った。

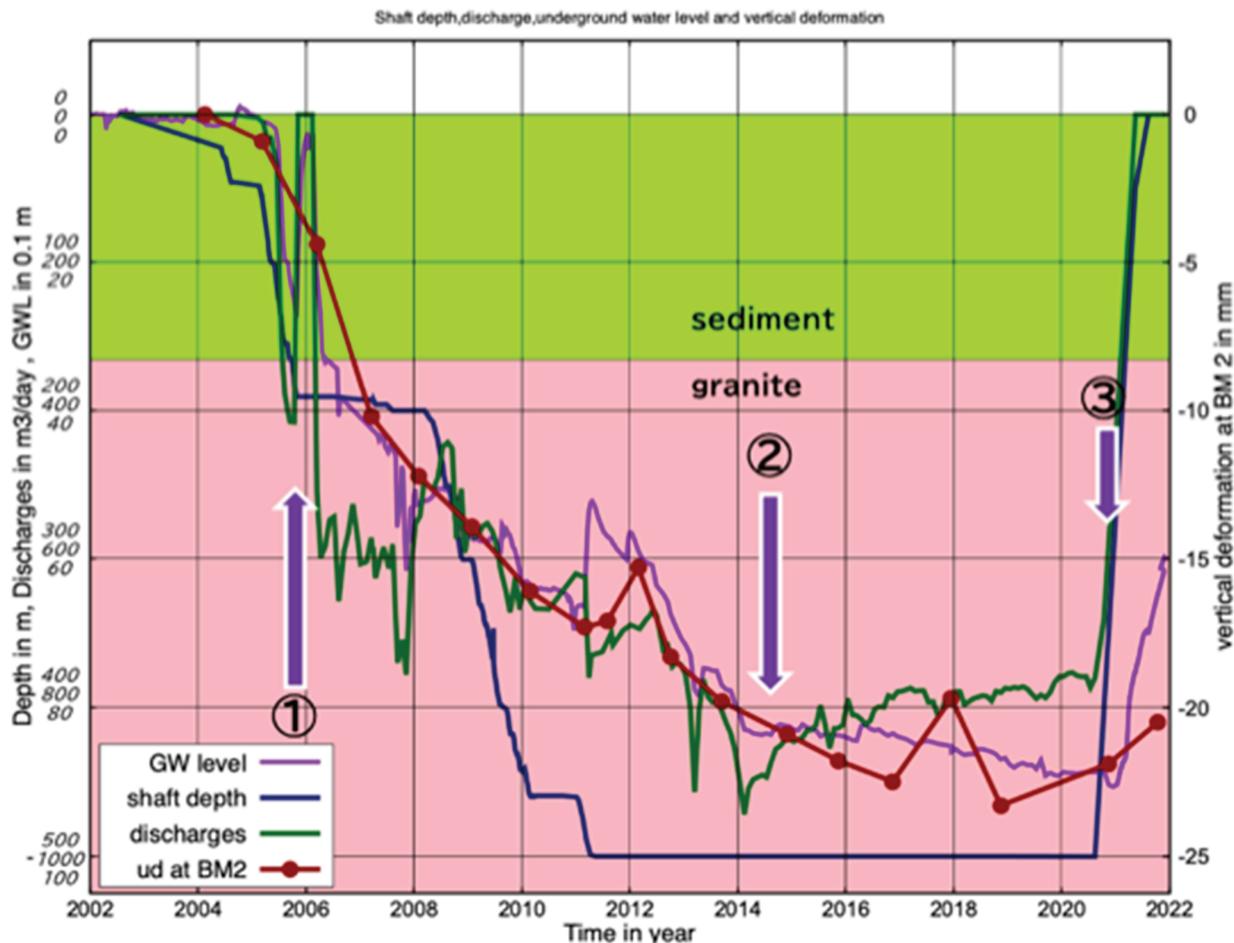


図 2. 主立坑と換気立坑の掘削深度と立坑からの排水量、および TGR350 での地下水位変化と水準測量で検出した BM2 での上下変動の時系列変化(2002-2021)。堆積層と花崗岩の分布深度をライトグリーンとピンクで表現する。矢印は掘削作業で特徴的となった 3 時期、①2008 年前後の不整合面付近の掘削、および②掘削作業が完了した 2014 年、③立坑埋立てが開始された 2020 年を示す。

立坑で掘削が始まり、掘削が深部に進むほど、立坑からの湧水は増加し、近傍の地下水位は低下し、水準点で沈降が進んだ。掘削が完了した 2014 年に湧水は減少に転じたが、地下水位低下と沈降は緩やかに続き、水位低下は 90m、沈降は 23mm に達した。その後、2020 年に立坑の埋立てが始まると、低下から上昇に、沈降から隆起に転じ、2021 年 12 月に地下水位は 30m(低下の 33%)となり湧水は急速に減少し、2021 年春季に地表まで 50m に達して消滅した。地下水位低下と沈降も埋立てで上昇し、上下変動は 3mm(沈降の 13%)の隆起までそれぞれ回復する。基本的に地下水位と上下変動は立坑からの湧水と相関する時系列変化を示した。

2012 年の掘削期間中のデータで沈降が立坑湧水に関連するとの指摘 (Kimata et al., 2015) に対し、検出した水準点近傍での人工的な擾乱であって実際の地殻変動でないと言頭で反論がなされた。Kimata et al. (2015) は、立坑周辺での土木工事—小さな谷の埋立や山斜面の掘削、立坑掘削—による荷重変化として弾性体変形を仮定し、その上下変動が BM2 の周辺で 1-2mm に過ぎないことも示

した。その後も反論は繰り返されるが、立坑埋立で上下変動が沈降から隆起に転じたことで、決して水準点近傍の局所擾乱でないことが明らかになった。

水準点は2012年まで数が少ないが、検出した上下変動は、立坑近傍の水準点BM2で18mmの沈降、850mと最も離れる水準点BM9900で10mm超の沈降を示し、立坑近傍で大きく、立坑から1km離れると半減する傾向が観測された(Kimata et al., 2015)。

地盤沈下の解明には、単独の水準点での上下変動よりも地盤沈下を分布として検出することが沈下のメカニズムの検討にも重要である。2012年に水準網を図1cに示す周辺に拡張した。検出した上下変動が最大でも2mm/yrと小さいゆえ、水準網は31kmの総路線長に100点超の水準点を設置し、点間が平均300mという密な水準網とした。変動量と測量誤差を考え、測量の頻度より継続を考慮した。

まず、立坑湧水を時系列変化を簡単に検討する。図2で明かのように、湧水は深さ165mの不整合面付近で急増し600m³/dayを超えた。地下水を豊富に含む堆積層下部礫岩層や夾炭層、風化した花崗岩層の掘削により急増した。掘削が不整合面から花崗岩に入っても、湧水は増加が続き、特に深さ300mと500mの横坑掘削で増加し、一時は900m³/dayに達した。立坑湧水は2014年の掘削完了で減少に転じ800m³/day以下となり、2020年に埋立の開始で急速に減少し、埋立てが地表から50mに達すると完全に消滅した。なお、2011年の東北太平洋地方沖地震の発生に伴い、湧水は100m³/dayほど増加し(Asai et al., 2011)この影響は2年ほど継続した。地震時の地下水位変化は周辺域でも観測され(Niwa et al., 2012, 竹内・他, 2015)、岐阜県北部の割石温泉でも温泉で湧泉量の増加が報告された(田坂, 2018)。

次に、地下水位変化と水準点の上下変動の時系列変化を検討する。地下水位低下は2006年の湧水と掘削作業の一時的な休止期間を除いて続き2020年に90mに達し。2020年に埋立てが始まると低下から上昇に転じた。2021年12月現在、地下水位は30m上昇して低下の33%が回復した。水準点BM2で観測した上下変動も地下水位と同様に掘削で沈降が急速に始まり、掘削が花崗岩に入ると減速するが、2019年に23mmに至り、2020年の埋立て作業の開始で隆起に転じる。2021年12月現在、隆起は3mmと沈降の13%まで回復した。水準点での上下変動に2011年東日本太平洋沖地震の発生後に2mm超の隆起が観測される。なお、2018年に3mmほどの隆起を観測するが、地殻変動か測量誤差かが解明できない。

15.1.1.3 掘削による立坑での湧水の時系列変化

JAEAは掘削で周辺域における地下水流動の影響の解明を一つの課題とし、排水を立坑ごとに、湧水を2本の立坑で深さ20-100m毎に連続観測を実施し、データを公開した(佐藤・他, 2014, 上野・他, 2014, 上野・他, 2017, 尾上, 竹内, 2019)。2014年まで増加し、その後に減少に転じた立坑の排水がどの深度、堆積層か花崗岩での湧水によるかを検討する。

JAEAが観測する深さ100mごとの湧水を時系列変化として図3に示す。なお、深度ごとの湧水観測は2019年3月に終了した。図でまず明らかなことは、湧水は堆積層のみならず、花崗岩からも700m³/dayが生じ、湧水は観測が終了する2019年に堆積層で約100m³/day、花崗岩で約700m³/day、計800m³/dayと花崗岩での湧水が87%を占める。

詳細に検討すると、湧水が多く生じたのは主に堆積層となる深さ200m、花崗岩で深さ300mと500mの3箇所である。花崗岩の2箇所に長さ100mほどの横坑を掘削した。湧水はそれぞれで400-

600m³/day に達した。湧水は堆積層で 600m³/day と最も多く、次が主立坑と換気立坑で横坑を掘削した 500m で 400m³/day 超、横坑が主立坑のみで横坑を掘削した 300m で 300m³/day 超である。花崗岩でもかなりの湧水が生じたことで、2014 年の掘削完了まで立坑での排水が増加する。

次の特徴として、各深度での湧水は掘削がより深部に移行した段階で直ちに減少に転じた。200m 深では掘削が堆積層から花崗岩に移行した 2008 年、300m 深では深さ 500m で横坑掘削が始まる 2011 年、500m 深では掘削終了の 2014 年に減少に転じ、立坑の湧水が初めて増加から減少に転じた。このような 200m 深と 300m 深、500m 深での湧水は、各深度で掘削中に増加し、掘削終了で減少に転じる単純な過程で進行した。立坑からの排水は、堆積層、300m 深、500m 深と湧水が複合する結果、2014 年に掘削の完了で初めて減少に転じた。

堆積層における湧水の時系列変化を検討すると、湧水は不整合面前後の掘削で 600m³/day まで一気に増加するが、2008 年に掘削が花崗岩に入ると減少に転じ、それ以降、データは 2019 年で終了するが、2020 年の埋立てまで緩やかに減少した。堆積層での湧水は掘削が花崗岩に入る 2008 年まで急速に増加し、以降は緩やかに減少という極めて単純な時系列変化である。立坑での湧水量よりも、深さ 200mm までの主に堆積層での湧水が地下水位や水準点での上下変動の時系列変化、2008 年までに急速な低下と沈降、その後は減速して緩やかに低下と沈降を続けるという時系列変化に高い相関を示した。

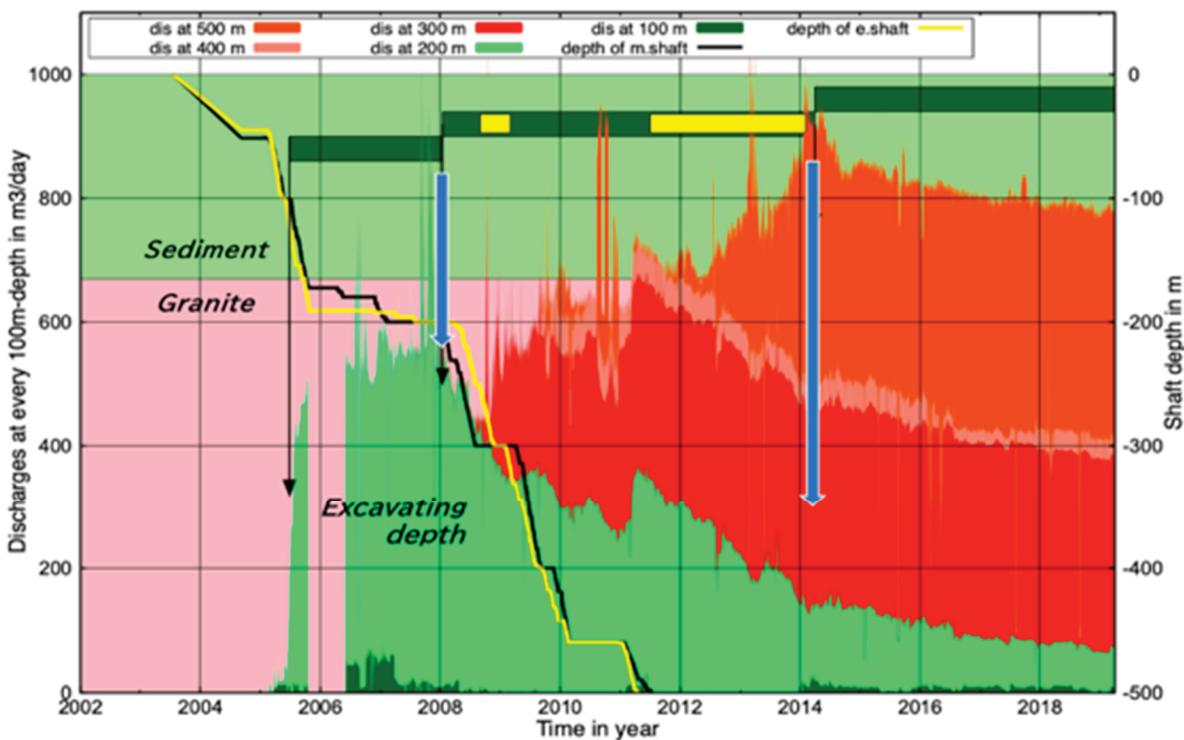


図 3. 立坑の掘削深度、および深さ 100m ごとの湧水の時系列変化(2003-2019)。背景は堆積層と花崗岩の分布深度、堆積層での湧水を緑、花崗岩での湧水を赤と桃で示す。緑と黄の帯は、掘削が堆積層と花崗岩、そして完了の期間を、黄は 300m 深と 500m 深での横坑掘削期間を示す。青矢印は掘削が花崗岩に入る時期と完了の時期を表す。

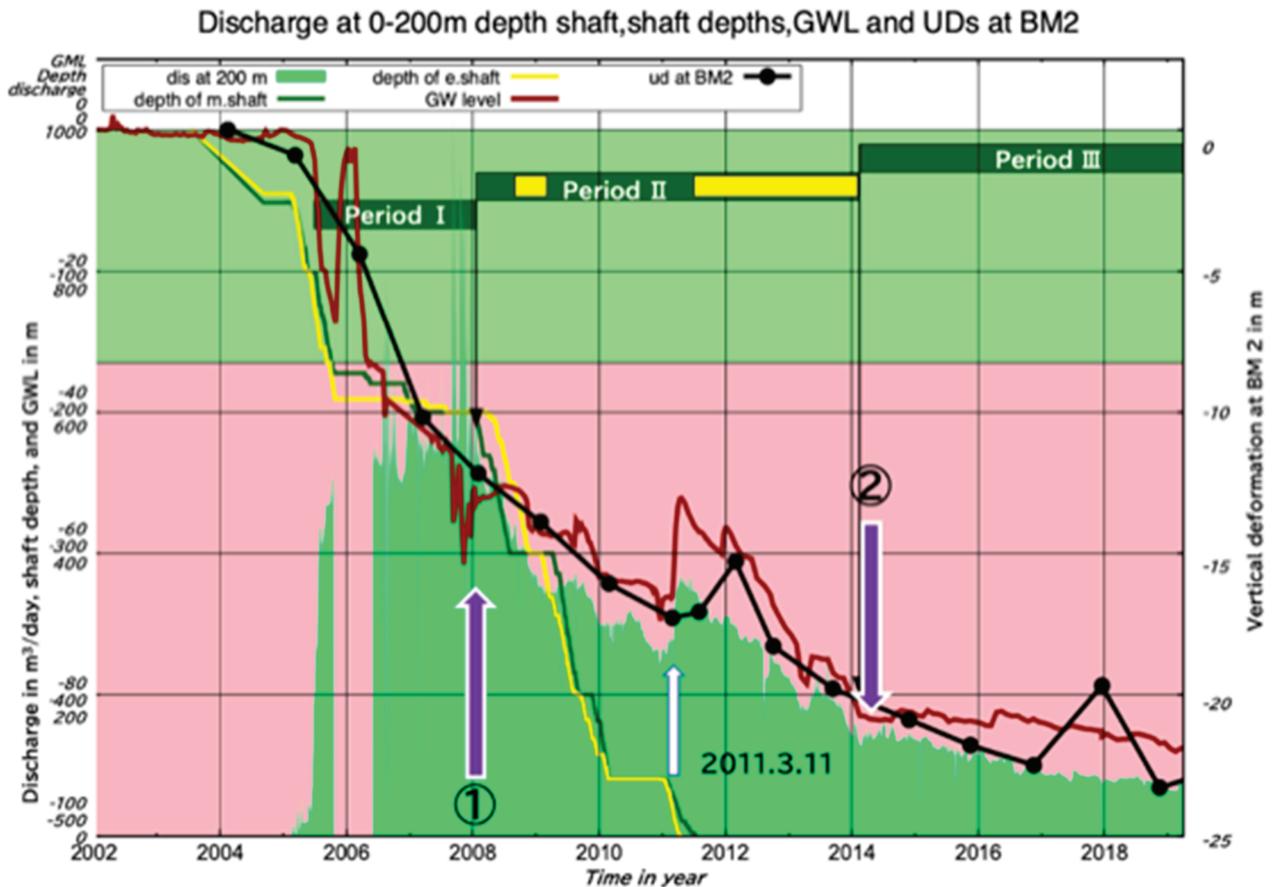


図 4. 立坑の掘削深度、および深さ 200m の湧水と TGR350 の地下水位変動と BM2 の上下変動の時系列変化 (2002-2019)。掘削作業の特徴を 3 本の緑の帯 (I ; 堆積層の掘削、II ; 花崗岩の掘削、III ; 掘削作業完了)、300m 深と 500m 深での横坑掘削期間を 2 本の黄の帯で示す。矢印は掘削が花崗岩に入った 2008 年と掘削完了の 2014 年の時期を意味する。なお、深度ごとの湧水の観測は 2019 年 3 月に終了した。

15. 1. 1. 4 深さ 200m での湧水と地下水位低下および水準点での沈降の時系列変化

以上の検討に基づき、図 4 に深さ 200m の湧水と、地下水位低下および水準点での沈降の時系列変化を示す。前述のように深さ 200m の湧水は非常に簡潔で、掘削が不整合面前後で湧水は急速に増加して 600m³/day に、2008 年に掘削が花崗岩に入ると減少に転じ、図でいえば 2019 年まで減少が続いた。この減少は 2020 年の立坑埋め戻しまで緩やかに続き、埋め戻しで急速に減少して最後は消滅した。

地下水位低下と地盤沈下は、掘削が花崗岩に入る 2008 年までに 50m (全低下量の 55%) の急速な低下と 13mm (全沈降量の 64%) の急激な沈降が観測された。その後地下水位低下と地盤沈下は減速して継続し、2020 年の立坑埋立てで地下水位は上昇に、地盤沈下は隆起に転じた。立坑近傍で観測された地下水位低下と水準点での地盤沈下は、立坑の深さ 200m での湧水が立坑での全湧水 (排水) よりも主な要因と考える。

15.1.1.5 周辺の水準点で検出された上下変動の時系列変化と沈降の分布域

a) 2011年以前に設置の水準点の上下変動(2004-2021)

測量を開始した2004年に設置した水準点は立坑から1kmに限られ、少ない数だが、2004-2021年の上下変動が観測された。これらの水準点における17年間の時系列変化を検討する。

まず、水準点を立坑からの直線距離で3グループに分け、各グループの上下変動を時系列変化を図5に示す。立坑近傍(ほぼ400m以内)、500m前後、1km前後の水準点の結果を、それぞれ図5aと図5b、図5cに示す。17年間の上下変動は近傍の水準点で15-20mm、500m前後で10-15mm、1km前後で0-10mmの沈降になり、沈降は立坑の近傍で大きく、立坑から離れると減少する。

図5からもう一つの特徴を指摘する。図2で示した水準点BM2での時系列変化で、地積層の掘削となる2004-2008年に全期間を通した変化の50%以上の大きな沈降を占める。この傾向は立坑近傍の水準点だけでなく、500mや1km離れた水準点でも共通して観測された。

地下水の湧水に伴う沈降と隆起は福島県いわき市周辺の常磐炭鉱での石炭採掘に伴う多量の地下水排水でも観測された^[11]。常磐炭鉱では採掘が進む18世紀後半から19世紀後半の約100年間で100cmの地盤沈下、その後の廃坑により20年間で30cm(沈降の30%相当)の隆起が観測され、現在は隆起も停滞している。採掘では坑道周辺には地下水が多量に滞留し、大規模な排水が必要だった。瑞浪におけるJAEAの深さ500mの立坑掘削でも、

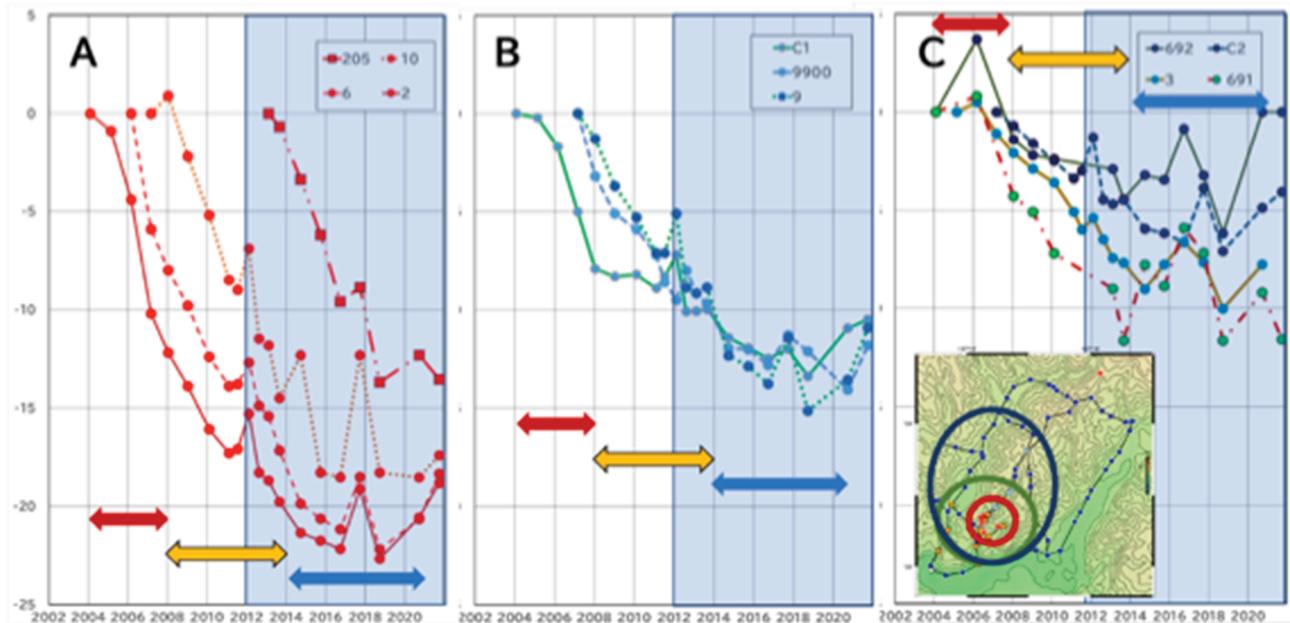


図 5. 2011年以前に設置した水準点の上下変動(2004-2021)。立坑からの直線距離で3グループを示す。a; 立坑近傍、b; 立坑から500m前後、c; 立坑から1km前後。赤と黄、青の矢印は掘削が堆積層と花崗岩、そして完了の期間、図1cの地図で赤と緑、青はa, b, cの範囲を示す。水準網を拡張した2012年以降の期間を共に淡碧で示す。

掘削や生じた地下水排水や地盤沈下の規模が遙かに小規模だが、高精度の観測を実施して同様な現象を詳細に検出した。

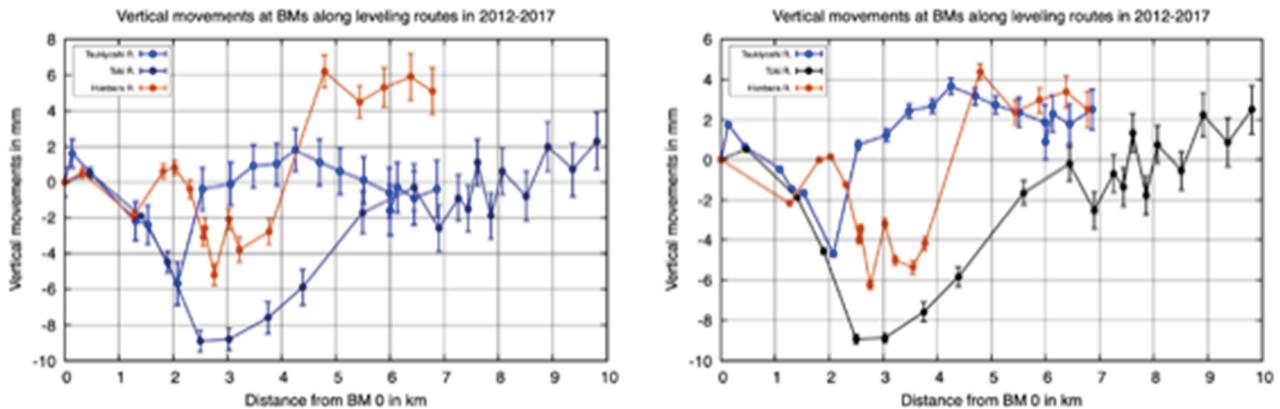


図 6. 2012-2017 年間に検出した水準点 0 から 116 への 3 路線における上下変動。 a; 観測結果、b; 網調整後。

b) 拡張の水準網で観測した沈降分布 (2012-2021)

2012 年に水準網を周辺へ拡張した (木股文昭・他, 2021)。水準路線は長さ 30km を超え、いくつかの環が形成された。最初に 2012 年以降に検出した上下変動の検出誤差を検討する。

2012-2017 年に BM0 から BM116 への路線 3 本で観測した上下変動を図 6 に示す。BM0 を観測期間中に不動と仮定して求めた上下変動を図 6a、網調整して求めた上下変動を図 6b に示す。観測値の上下変動では誤差が生じるが、網調整でこの誤差を消去した。この結果から 2012 年以降に拡張した水準網で検出した上下変動は $\pm 2\text{mm}$ の測量誤差を含むと考える。2012-2017 年に検出した上下変動は最大で $9\text{mm}/5\text{yr}$ ($1.8\text{mm}/\text{yr}$) の沈降であり、上下変動の時系列解析は検討期間が年毎で困難だが、数年間ならば有意と考える。

c) 沈降 (2012-2020 年) と堆積層の分布

2012-2020 年に観測した上下変動をコンターマップとして図 7a に示す。なお、2021 年は水準測量を実施したが、全路線でなく、上下変動の分布は 2020 年までの期間で議論する。沈降は立坑の近傍だけでなく、南東方向へ 1km ほどの地下水系下流にも分布する。同域は JAEA により航空磁気探査や地震波探査により、堆積層の下部に分布する花崗岩上面の深度を詳細に検討した花崗岩上面の地形分布を図 7b に示す。相対深度 60m となる地下水盆が立坑の南東方向に推定される。上下変動のコンターマップと花崗岩上面の地形分布図を比較すると、2012 年以降で 11mm の沈降が地下水盆上の水準点で検出された。沈降の分布から堆積層が厚くなる地点で大きな沈降を示し、沈降が堆積層の分布と密接に関連することが明らかである。

d) 2018 年以降の沈降の停滞

立坑の堆積層での湧水の減少に伴い、沈降が立坑近傍で減速することが明らかになる。同様な傾向が水準網の路線沿いのより広範囲の水準測量でも指摘できる。図 8 に水準点 BM0 から BM116 に至る 3 路線における上下変動を 2012-2015 年と 2018-2020 年の 2 期間について示す。

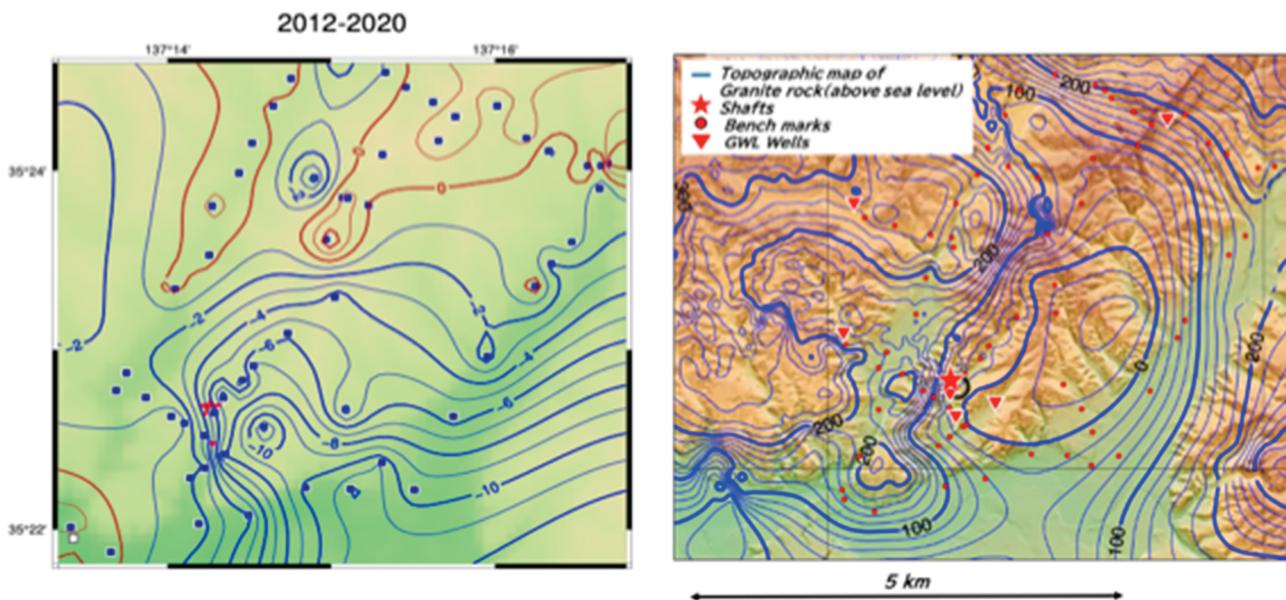


図 7a; 検出した上下変動のコンターマップ (2012-2020)。b; JAEA が航空磁気探査などから推定した同域における花崗岩上面の地形分布図。上下変動は 1mm 間隔で隆起を橙線、沈降を青線で、立坑と地下水位観測井 TGR350、水準点の位置をそれぞれ赤の★と▼、青と赤の●、地形図は 20m コンターである。

図から上下変動が、2012-2015 年に対し 2018-2020 年は明かに減少する。立坑の近傍だけでなく、周辺でも 2018 年以降に沈降が減速し、ほぼ停滞した。同様な傾向が水準網の路線沿いのより広範囲の水準測量でも指摘できる。図 8 に水準点 BM0 から BM116 に至る 3 路線における上下変動を 2012-2015 年と 2018-2020 年の 2 期間について示す。図から上下変動が、2012-2015 年に対し 2018-2020 年は明かに減少している。立坑の近傍だけでなく、周辺でも 2018 年以降に沈降が減速し、ほぼ停滞することが明らかである。

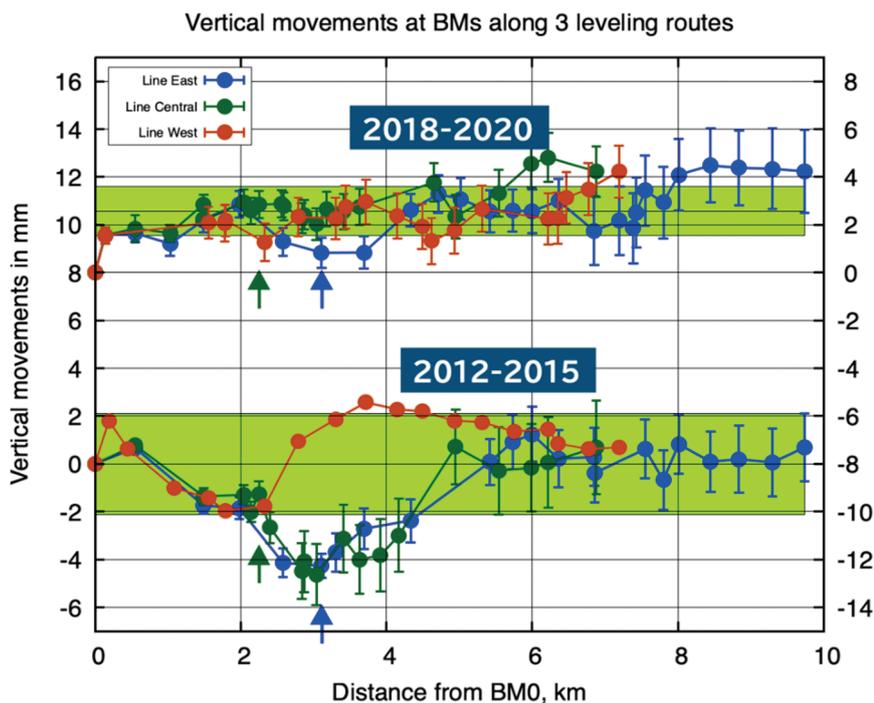


図 8. 水準点 BM0 から BM116 への 3 路線における上下変動(2012-2017 と 2018-2020 の 2 期間)。BM0(0km)を不動と仮定する。

1.1.1.6 結論

JAEA が岐阜県瑞浪市で 2002 年から 20 年計画で実施した深さ 500m の立坑掘削実験に伴う地下水流動と地殻変動を調査研究するために、東濃地震科学研究所は立坑近傍で地下水位観測と周辺域における水準測量による上下変動観測を行った。立坑の湧水は掘削の進捗に伴い 900m³/day まで増加し、掘削完了で減少に転じ、埋め立てで完全に消滅する。その結果、立坑近傍で最大 90m の地下水位低下と 23mm の地盤沈下が観測された。水位低下と地盤沈下は立坑の主に堆積層で生じる湧水の時系列変化と高い相関を示した。周辺域での上下変動は立坑の南東 2km に推定される最も堆積層が厚い地下水盆上で最大の沈降を検出した。沈降の分布も堆積層で多くの地下水の湧水により地下水位低下が生じ、地盤沈下を誘因することを示す。沈降域は 3km 四方と狭いが、厚さ 200m に満たない堆積層でも地下水湧水を伴う地下水位低下と地盤沈下が観測され、掘削には細心の観測と監視が求められることを本研究は具体的に明確にした。

本研究は東濃地震科学研究所の研究事業として日本大学文理学部准教授の村瀬雅之氏、同客員講師の森濟氏との共同研究として、瑞浪市シルバー人材センターの高齢者職員の協力の下に直営事業で水準測量を 2012 年以降に実施した。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から立坑での湧水に関する重要な助言を頂いた。これらの各氏に深く感謝し、謝意を表す。

参考文献

1. 西村卓也, 2012, 測地観測データに基づく東北日本の最近 120 年間の地殻変動, 地質学雑誌, 第 119, 5, 278-293
2. Kimata F., Y. Asai, R. Honda, T. Tanaka, H. Ishii, R. Miyajima, 2015, Ground Subsidence Following Groundwater Drawdown by Excavating of 500 m Deep Investigation Shafts in Granite Body in Mizunami, Central Japan in 2004–2012, <http://dx.doi.org/10.4236/eng.2015.77038>
3. Asai, Y., H. Ishii, T. Tanaka, 2011, Co-seismic groundwater level changes associated with the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, paper MIS036-P81 presented at Japan Geoscience Union Meeting, Chiba, Japan.
4. Niwa, M., Takeuchi R. Onoe H., Tsuyuguchi K., Asamori K., Umeda K. Sugihara K., 2012, Groundwater pressure changes in Central Japan induced by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, ### Geochemistry, Geophysics, Geosystems Volume 13, Issue 5.
5. 竹内竜史, 露口耕治, 尾上博則, 三枝博光, 別府伸治, 2015, 地震に伴う地下水圧の変化が地下水流動特性に与える影響, 原子力バックエンド研究, 2015, 22 巻, 2 号, p.37-52.
6. 田阪茂樹, 2018, 2004 年から 2017 年の割石温泉の湯量観測東濃地震科学研究所, Seq. No.40, 43-50, 2018.
7. 佐藤成二, 尾方伸久, 竹内竜史, 武田匡樹, 2014, 超深地層研究所計画における研究坑道での湧水量計測(2004~2011 年度)データ集, JAEA-Data/Code 2013-020, 38p.
8. 上野哲朗, 佐藤成二, 竹内竜史, 2014, 超深地層研究所計画における研究坑道での湧水量計測(2012~2013 年度)データ集, JAEA-Data/Code 2014-018, 2014, 37p.

9. 上野哲朗,竹内竜史,2017,超深地層研究所計画における研究坑道での湧水量計測データ集－ 2014～2015 年度－,JAEA-Data/Code 2017-003, 2017, 46p.
10. 尾上博則, 竹内竜史,2019,超深地層研究所計画における研究坑道での湧水量計測データ集－ 2016～2018 年度－, JAEA-Data/Code 2019-009,1-22.
11. 木股文昭, 村瀬雅之, 森 濟, 宮島力雄, 田中俊行, 2021, JAEA500m 深坑道周辺域での水準測量結果(2004-2020 年),東濃地震科学研究所報 46,5-14.

15.1.2 立坑の埋め戻しによる深部ボアホールで観測された応力・歪・水位・水圧変動

東濃地震科学研究所 石井 紘、浅井康広

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月から埋め戻しを開始された。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・水圧計を設置している。埋戻されてもデータが研究所において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応力計(STG500)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。STG500の応力計には水平3成分と鉛直成分が搭載されているが特徴的な変動をしている鉛直成分のみプロットしている。200mレベルの応力計成分もプロットしていない。TGR320観測点は計器を更新したため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。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）。2021年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。応力計鉛直成分と水圧計は埋め戻しの深度に対応して同じように変化している。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停止しているが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。これらの直線的な増加の変動は2022年2月1日現在も継続している。

また、応力計鉛直成分と水圧計の変動のスケールを見ると水圧変動の方が一桁大きい。現時点では観測データのみでの報告であるが、埋め戻しの荷重よりも埋め戻しにより地下水の分布が変化し間隙圧の変化により応力計が変動したことによると考えている。

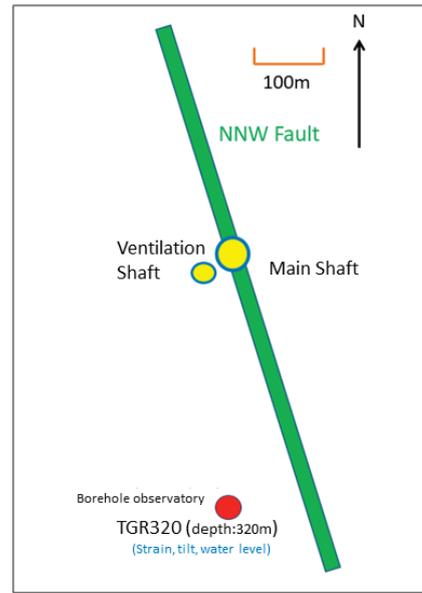
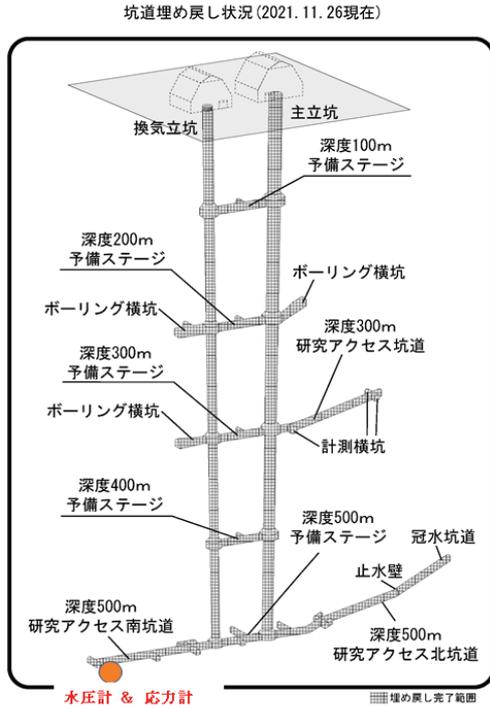


図 2 : 立坑と TGR320 ボアホールの位置

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

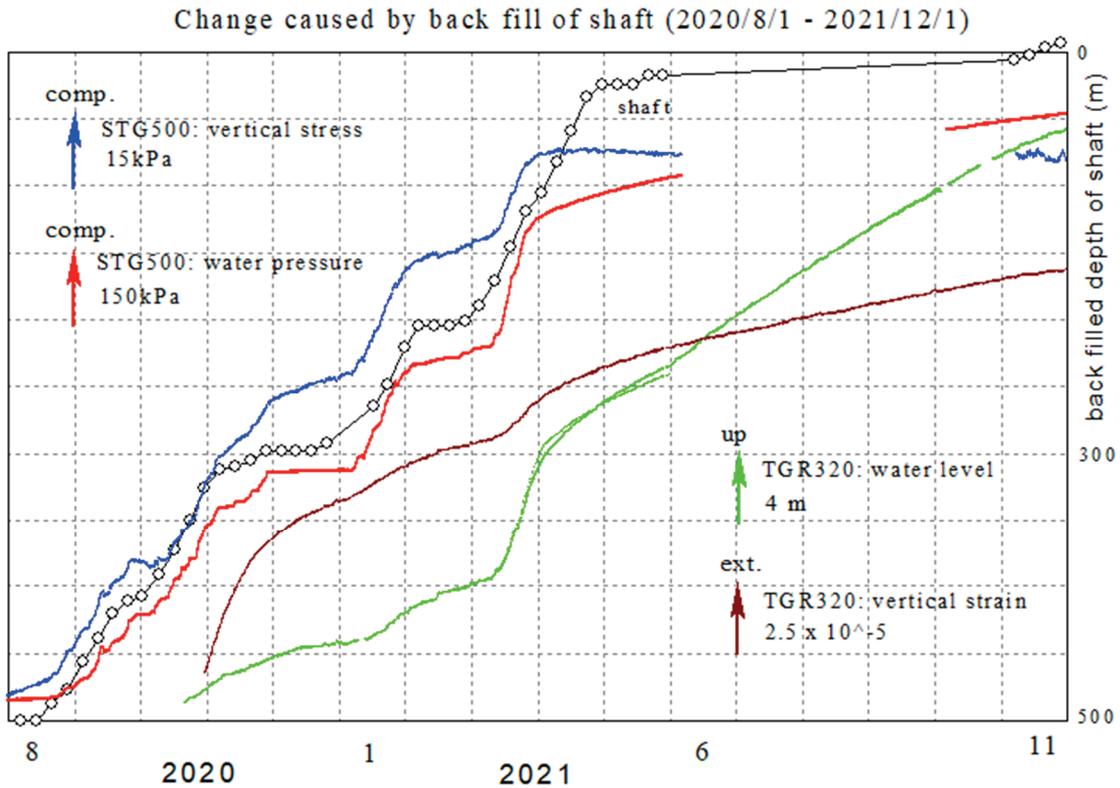


図 3 : 立坑の埋め戻し経過と 500m レベルの応力計・水圧計の記録と TGR320 の水位計および歪計鉛直成分の記録

15.2 地震予知計画開始（1965）以来の深部ボアホール観測を含む地殻変動連続観測の流れおよび当研究所が関連した研究・成果の概要（総合報告：測地学会誌掲載）
測地学会誌 67 巻に掲載された総合報告をそのまま掲載した。

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

石 井 紘

地震予知総合研究振興会 東濃地震科学研究所

(2020 年 7 月 7 日受付, 2021 年 7 月 13 日改訂, 2021 年 11 月 17 日受理)

Progress of Continuous Observation of Crustal Deformation Since Start of National Research Program for Earthquake Prediction (1965) and Summary of Results Obtained by the Author and Coworkers

Hiroshi Ishii

Tono Research Institute of Earthquake Science (TRIES), Association for the Development of Earthquake
Prediction (ADEP)

1-63 Yamanouchi, Akiyo-cho, Mizunami City, Gifu Prefecture, Japan 509-6132

E-mail: hirohiroishii@gmail.com

(Received July 7, 2020, Revised July 13, 2021, Accepted November 17, 2021)

Abstract

Japanese national research program for earthquake prediction started in 1965. Continuous observation of crustal deformation was included as a priority task in earthquake prediction research. At that time, such observation was carried out at only a small number of observation points, using water tube tiltmeters, extensometers, and horizontal pendulum tiltmeters. Borehole instruments developed by the author include borehole multi-component stressmeters and strainmeters, borehole tiltmeters, recoverable intelligent type strainmeters, and borehole comprehensive crustal activity observation devices. The history of continuous observation of crustal deformation, ever since the start of earthquake prediction projects in 1965, is discussed in this paper, together with discoveries in which the author was involved. The followings are some of the achievements in the continuous observation and research of crustal deformation. It was revealed that the strainmeters developed by the author could observe short-term slow slip, and research on this topic advanced, using a deep borehole strainmeter. Being able to observe phenomena occurring at a depth of around 30 km suggested the possibility of detecting the precursor slippage of a large earthquake if it occurs. A single borehole comprehensive observation device observed precursory changes in tilt and strain on several occasions before earthquake swarms that occurred on the Izu Peninsula. A deep borehole observation near the area of seismic activity enabled observation of the precursory changes in various physical quantities with an only a single instrument. Some patterns were found in precursory strain changes before the occurrence of small earthquakes about 3 km below the ground surface in a South African gold mine, using the strain observation data very close (several hundred meters) to the hypocenter. The relationships between faults and groundwater changes were studied. From borehole strainmeter data and changes in ground water levels in the vicinity of the Tono Research Institute of Earthquake Science (TRIES), a connection was found between the behavior of water, changes in strain, and the movement of nearby geological faults. The author developed for the first

time a borehole stressmeter that can continuously observe underground stress, which is an important physical quantity for studying the occurrence of earthquakes. This stressmeter demonstrated many advantages over conventional observations. Migrating crustal deformation was observed from tilt observations by the Earthquake Research Institute of the University of Tokyo, and in the Tohoku region was also found from strain observations by extensometers. Barometers for meteorological observations observed atmospheric pressure waves caused by the 2011 Tohoku earthquake. It was clarified that the vertical movements of the ground were obtained by integration of atmospheric pressure waves, while the differential of the vertical movements was the change in pressure. A new method to obtain the initial stress was established through the development of a recoverable intelligent type strainmeter. Based on surveys of the future outlook of technology, arranged by MEXT, the author discussed the role of continuous observation of crustal deformation in the research program for earthquake prediction. The author finally provides a personal idea about future earthquake prediction research.

1. はじめに

1962年に地震予知計画のブループリントが作成され(坪井ほか, 1962; 地震予知連絡会, 2000), その中に地殻変動の連続観測も地震予知研究にとって重要推進項目として記されている。その後, 1965年に地震予知計画が開始された。この小論は最初, 地震予知計画が開始されてからの地殻変動連続観測の流れを述べている。すなわち地殻変動連続観測計器の進展および生じた問題点およびその解決を含めての現在までの経過を述べている。次に, 地殻変動連続観測の流れの中で著者が関連した研究・成果を述べている。報告はされているが論文として印刷されていない著者による成果が多くあり, 著者等の未発表のオリジナルな内容も多く加えてある。未発表の内容も概要を記述し, 重要で主要な図なども掲載した。特に, 開発した計器などについては種々あるため各計器の項目の中において述べ, 流れをわかりやすくした。

1965年に地震予知計画が開始されるまでは地殻変動連続観測は東京大学地震研究所や京都大学理学部が水管傾斜計, 伸縮計や水平振子傾斜計により, 数少ない観測点で行っているのみであった。地震予知計画の開始により, 横坑における地殻変動連続観測が推奨され, それ等の計器による地殻変動連続観測点が徐々に多くなっていった。2007年の測地学会誌には「測地・地殻変動に関する研究集会」を基にして地震予知計画が開始されて以来の各大学・気象庁の地殻変動連続観測に関する総合報告が掲載されている(三品, 2007; 笠原ほか, 2007; Yamamoto, 2007; 竹本, 2007; 山内, 2007; Hashimoto, 2007; 石井・山内, 2007; Agnew, 2007; 川崎, 2007)。また, 著者が東北大学・東京大学地震研究所・東濃地震科学研究所において行った予知計画開始からの地殻変動研究の時間的流れと概略については石井(2016)に報告されている。

第3章において1965年に地震予知計画が始まってから, 現在までの地殻変動連続観測の流れの観測計器の進展と変遷を述べた。観測により生じた問題点解決のために, 新たな観測計器が開発された経緯などについても述べている。

第4章においては地殻変動連続観測の流れの中で著者等が関連した研究・成果を述べている。

第5章においては第3章および第4章において得られた成果を研究項目に分類してまとめた。すなわち

「ボアホール計器の開発により進展したこと」: 「地震の発生と前兆現象に関連したこと」: 「近傍断層と地下水流動との関連性に関したこと」: 「新しくボアホール応力計を開発し従来の計器より有利な種々の性能を明らかにしたこと」: 「断層の変動に関連したこと」: 「地殻変動連続観測に関連したこと」: 「初期応力測定に関すること」: 「文科省の予測調査に関すること」: 「地震予知計画に関して」などのようにまとめた。

第6章においては将来の地震予知研究についての著者の私見を述べた。

2. 地震予知計画開始時の地殻変動連続観測と予知計画

1962年に地震予知計画のブループリント（坪井ほか，1962；地震予知連絡会，2000）が作成されたが，その時点での地殻変動連続観測の観測点分布も記載されている．東京大学地震研究所や京都大学理学部による水管傾斜計，水平振子傾斜計や伸縮計による観測点が数えるほどしか存在しなかった．それらの計器は開発が主眼で，観測データを蓄積している状態であった．水平振子傾斜計はIshimoto（1927）によって開発された．振子を水平に保つ上下二本のZöllner吊りの方式を採用し，温度変化の影響を少なくするためにすべてシリカで製作されている．水管傾斜計と伸縮計はHagiwara *et al.*（1949a, b）により開発された．水管傾斜計は読み取り式であり，伸縮計は基準尺としての石英ガラス管をコロで支える方式であり，記録は光学的に拡大フィルムに記録する方式である．

ブループリントに書かれている内容を取り出すと1. 沿革と必要性には「測地的方法により，ある地域全体にわたる地殻変動を捕え，地殻変動観測所はその地域の一点において，その変動の時間的推移を連続的にとらえるのである」と記してある．2. 計画には「(1)観測所を密にすること：100km平方に1観測所すなわち全国で70の観測所を設ける．この他に特定の地域には50km平方に1観測所の割合で設けることとし，これに30の観測所を予定する．従って全国に合計100の観測所を設けることになる．(2)と(3)：略．(4)観測所の構造：傾斜計，伸縮計などは地下の坑内に設置する．従来は，鉱山の廃坑，防空ごうの跡，廃止されたトンネルなどを利用したものが多いが，ぜひとも最も適した土地に基準の横坑を新たに掘ることが大切である．略」などと記してある．また，3. 期待される成果においては「前略，ここに計画した地殻変動の連続観測は測地学的方法と並行して刻々の地殻の情報を得ることによって地殻歪の蓄積と地震発生との関係を究明し，地震というものがどのような過程において発生するかを知ろうとするのが主眼であって，地震直前の前兆をとらえることのみにこだわるものではない．後略」と書いてある．前兆現象の観測にとらわれずに地震の発生過程を調べることを重要と考えていることがわかる．

3. 地震予知計画開始後の地殻変動連続観測

地震予知計画が開始されてからは三角形の横坑内に水管傾斜計2成分と伸縮計3成分を設置するのが基本的な地殻変動連続観測点とされた（坪井ほか，1962；地震予知連絡会，2000）．この方針に基づいて特に大学においては基本的な地殻変動連続観測点が建設され，観測点が徐々に増加した．この章においては地殻変動連続観測の観測方式の変遷について述べる．

3.1. 傾斜観測

3.1.1. 水管傾斜計

Hagiwara *et al.*（1949a）により開発された読み取り式の水管傾斜計での観測が行われていたが，自動観測が可能な水管傾斜計の開発が多く研究者によって進められた．江頭（1965），嶺ほか（1972），東京大学地震研究所技術部（1973），加藤・津嶋（1973），山内・山田（1974），志知ほか（1980）などである．この中で東京大学地震研究所技術部（1973）による水管傾斜計が，その後の基本的な自動水管傾斜計として重要な役割を果たした．板バネで支えたフロートの変位を電氣的に電圧の出力に変換するタイプである．基本的にはこの方式を基にした自動水管傾斜計が各大学の地殻変動観測所に設置された一方で自動水管傾斜計に関して理論的な研究も行われた（石井ほか，1977a；1977b）．その後，板バネを用いない機械的な拘束のない水管傾斜計も開発された（石井ほか，1992；山内・山田，1992）．特に，石井ほか（1992）は多くの新しい特徴を有している．例えば，1. 構造がシンプルで調整が容易，2. フロートのメカニカルな拘束がない，3. フロートの変位は円弧でなく直線変位，4. ポットを固定する支柱がないため初期ドリフトが小さい，5. ダイナミックレンジが広い，などである．その後，検定方式も開発した．従来の水管傾斜計では感度検定のシステムが確立しておらず，ポットに一定容量の物体を入れることで水位変化を起こす程度であった．また，ポットの近くで作業していたため人間の存在によるノイズの影響があったがそれも改良した．Figure 1はそれを示している．水管傾斜計のポットの中間には小ポットが設置されており，アクチュエーターにより小ポットを上下に指定した変位移動させることで感度検定を可能にしている．このアクチュエーターは遠方から操作で

きるため、水管傾斜計のそばで検定作業を行う必要がなく、人間によるノイズの影響を受けないため高精度の感度検定が実施できるようになった。また、従来と異なり連続的な水位変化に対する応答を得る検定が可能になった。したがって検定システムおよび検定精度は今までより飛躍的に向上したと考えられる。上述の水管傾斜計や新しい感度検定システムは東京大学地震研究所の鋸山地殻変動観測所において作動している。

読み取り式の水管理傾斜計に関しても新方式を開発した。これは水面合わせの針も従来のポット底板から水面に向かう方式 (Hagiwara *et al.*, 1949a; 山田, 1973) ではなく上盤からの U 字型にした。これによりポット底板の水漏れ防止用の水銀も不要になった。読み取りもデジマチックインジケーターを採用した。またこの計器は台石にボルトで取り付ける方式でなく台石に置くだけにした (Figure 2)。従来の水管傾斜計は金属の底盤を台石にねじ止めし、底板に載せたポットの上部にセンサー等を載せる上盤と底盤をねじ付きの 4 本の金属棒によりねじ止めし固定している (例えば、東京大学地震研究所技術部, 1973)。その上盤にセンサーや読み取り装置を固定している。しかしながらこの方式ではデータのドリフトが安定するまで数週間から数カ月を要した。原因はねじ止めしたため落ち着くまで時間がかかったことが原因であると考えた。そこで著者等は底盤と台石は固定せず Figure 1 のように底盤を重くして固定せずに自重で安定させた。上盤も同様である。この方式は前述の機械的な拘束のない自動水管傾斜計 (石井ほか, 1992) にも適用した。この新しい方式の採用によりデータは設置した次の日からドリフトもなく安定した記録が得られるようになった。Figure 1 および Figure 2 に示した水管傾斜計および新しい感度検定システムは東京大学地震研究所の鋸山地殻変動観測所において作動している。

3.1.2. ボアホール傾斜計

佐藤ほか (1980) は明石・福尾 (1977) による力平衡型振子式傾斜計をもとに地震予知のための観測研究を目的に標準的な孔井用傾斜計を開発した。この計器は地震計とともに容器に搭載され、防災科学技術研究所の観測網に配置された。その後、この観測から短期的スロースリップに起因した変動など重要な成果が得られるようになった。

石井ほか (2001) および Ishii *et al.* (2002) はボアホール地殻活動総合観測装置を開発した。この観測装置に組み込むために、新しくボアホール傾斜計も開発・製作した。この傾斜計は温度が変化しても弾性定数の変化が小さい恒弾性材質であるハイテリンバーの板バネを 2 枚使用している鉛直振子型である。ダンパーとしてはシリコンオイルなどを使用せず、電気的にフィルターする方式であるため非常に単純な構造になっており、大きな地震が起こっても振子はオイルによる振子の拘束がないため、観測が停止することがなく地震に伴った傾斜ステップも記録できるという特色がある (Ishii *et al.*, 2002)。後述の 4.7 章に述べているようにこの傾斜計はボアホール地殻活動総合観測装置に組み込まれ 1996, 1997 と 1998 年に発生した群発地震において歪と傾斜の両方に明瞭な前兆的变化を記録することができた (東京大学地震研究所, 1998; 石井ほか, 1998)。また、シリコンオイルを使用していないため有感地震においても傾斜ステップを記録できている。

3.1.3. その他の傾斜計

ブイ傾斜計はボアホールを掘削しボアホール底から地表まで伸びたケーブルの先端のフロートの変動を検知する倒立振子タイプである (地震研究所ほか, 1973)。しかしながらボアホールが浅いため気象の影響を受けやすいことと、地表にセンサーがあるため温度変化の影響などを受け成果を上げることができなかった。水平振子型傾斜計は小型であるが、傾斜の測定方向と異なる方向の傾斜変動により感度が変化するため使用されなくなった。

3.2. 歪 観 測

3.2.1. 伸 縮 計

Hagiwara *et al.*, (1949a, b) により伸縮計は開発され、長さ 1 m で直径 7 mm の石英ガラスの円筒をリン青銅で接続し 8 m の長さにし、コロで支え、変動は光学的に拡大してフィルムに記録するシステムであった。その後、技術の進歩とともに改良が加えられた。石英ガラスは直径 3 cm 程度の円筒が使用され、1.5 m 程度の長さから現場での熔接により、30 m 程度の一体ものに仕上げ、その支えもコロよりも摩擦の少ない針金やバネを利用した支えが使用されるようになった。センサーは光学式ではなく差動変圧器や磁気センサーが使用されるようになり、変動は電気

的に記録される方式が利用されるようになった。感度検定は自由端においてセンサーを移動させて出力を見る方式であったが、この方式はセンサーの検定であり、伸縮計の根本的な検定ではなかった。その後、著者は新しい検定システムを開発した。伸縮計の固定端にアクチュエーターを設置し、固定端を移動させ自由端において出力を記録することにより検定する方式を開発した。Figure 3にその方式を模式的に示している。伸縮計の固定端をアクチュエーターにより指定した変位量を移動させ、自由端において出力を記録するシステムである。この方式であれば実際に固定端と自由端の間の変位量を検定することができる。また、この検定は伸縮計のそばにいる必要はなく、離れたところから作動させることができるので、人間のノイズも影響することはなく、高精度の検定をすることができた。従来の検定はセンサーのみの検定で真の伸縮計の検定ではないが開発した方式は設置した伸縮計の真の検定である。その上、

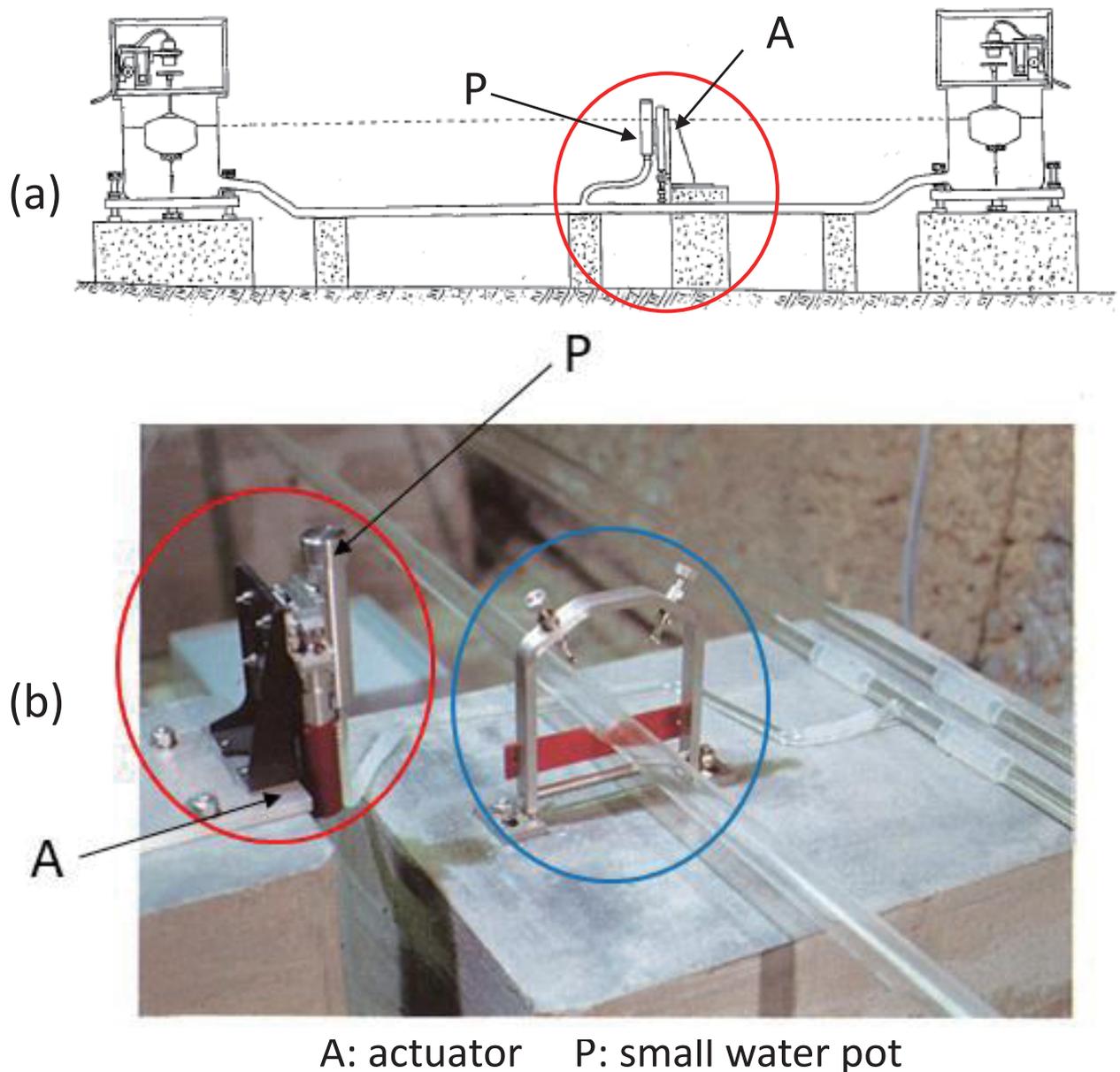


Figure 1: Developed examination system of sensitivity for ERI-90 water-tube tiltmeter.

- (a) Schematic view of ERI-90 type water-tube tiltmeter system. Red circle indicates calibration part.
- (b) Red circle indicates a picture of calibration part of ERI-90 type water-tube tiltmeter. Blue circle shows a part supporting quartz tube of quartz tube extensometer by using stainless wire.

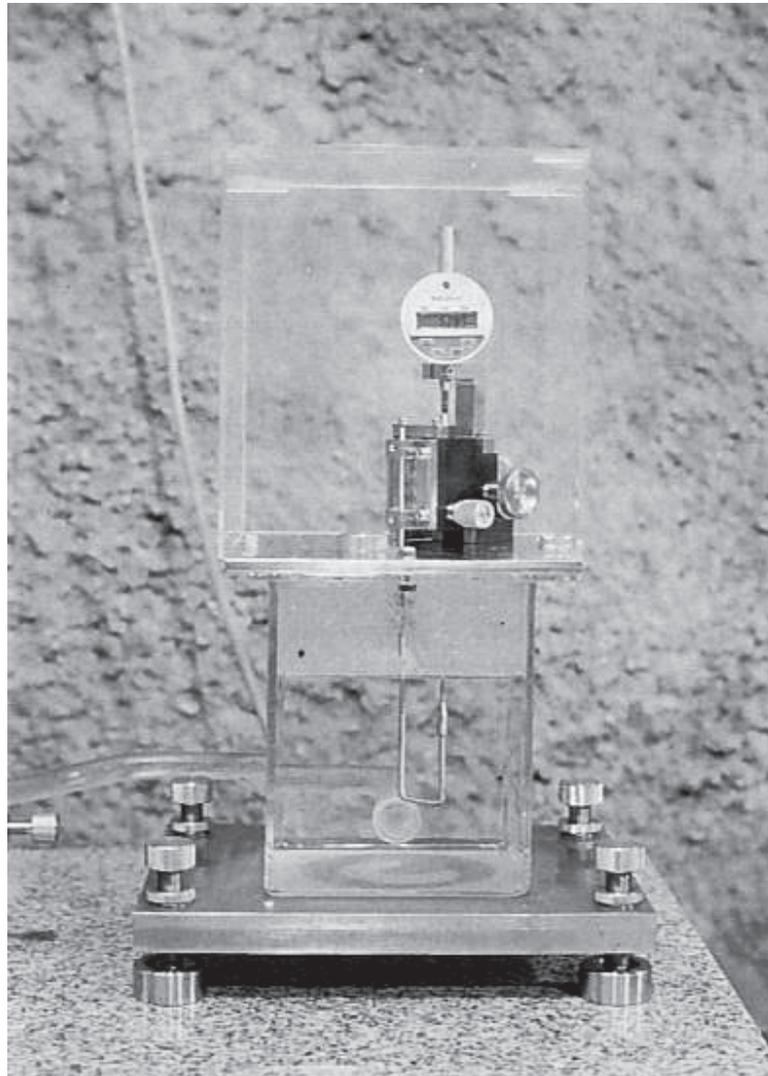


Figure 2: Developed reading type water-tube tiltmeter.

遠隔操作が可能であるため人間のノイズも関係ない。したがって検定システムおよび検定精度は今までより飛躍的に向上したと考えられる。Figure 3に示した伸縮計および新しい感度検定システムは東京大学地震研究所の鋸山地殻変動観測所において作動している。

一方でレーザーの干渉原理を用いた伸縮計も開発された (Araya *et al.*, 2007; Araya *et al.*, 2010)。精度的には十分であり、横坑での地球物理研究目的には有用な計器となっている。

3.2.2. 鉛直伸縮計・超高感度伸縮計・短スパン伸縮計の開発と観測

伸縮計や水管傾斜計は通常トンネル内に設置するが、トンネルの被りが厚くない場合は、降雨などの影響から発生するノイズにより、微小な変動が検知できない場合がある。この点に関しては深いボアホールによる観測が有利である。しかしながら伸縮計はその基準尺を長く出来るので感度を上げるのは容易である。そのために地球潮汐、地球自由振動や歪地震動の観測においては特に有利な場合がある。現在、伸縮計は水平成分の観測に主に使用されている。後述の通り重要であるにもかかわらず鉛直伸縮計は開発・利用されていない。そこで著者は鉛直伸縮計の開発も行った。基準尺には石英管（長さ 3 m、外径 60 mm、肉厚 6 mm）を採用した。設置した場所は東濃地震科学研究所の瑞浪観測壕内に、深さ 3 m のボアホールを掘削し設置した。予めステンレスの短い円筒容器に石英管の一方の端を

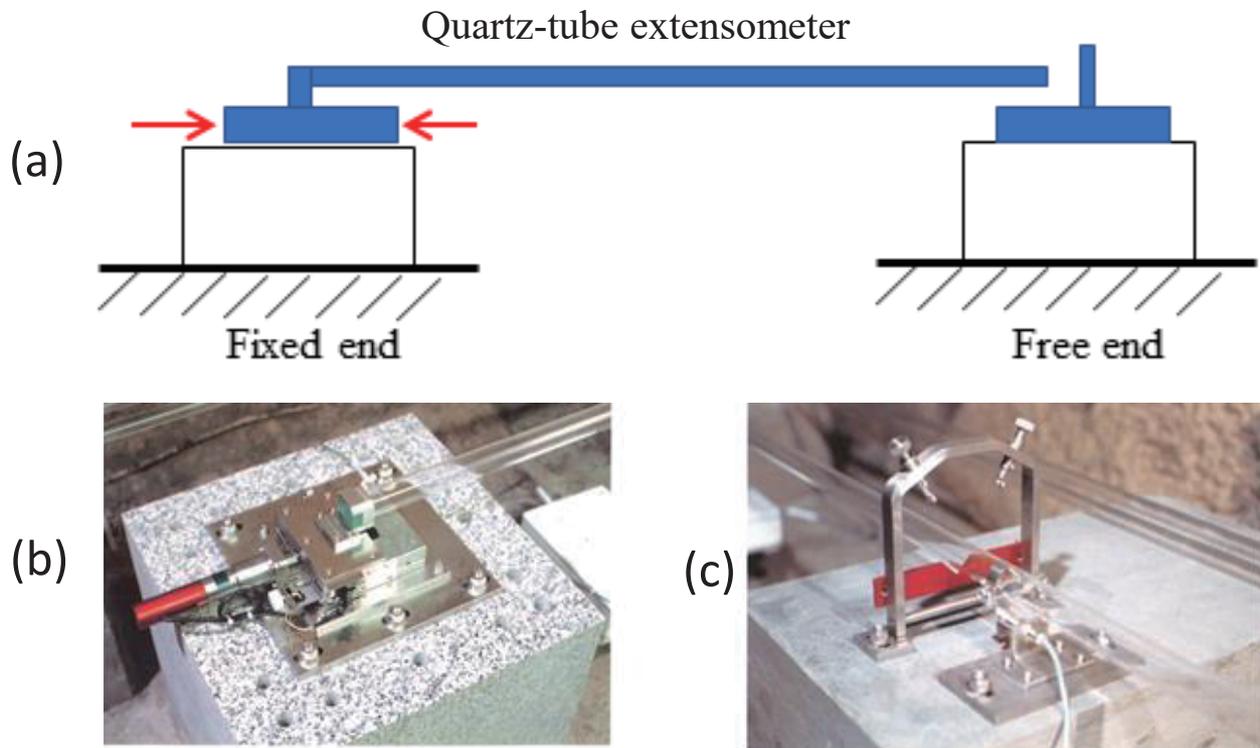


Figure 3: Developed examination system of sensitivity for a quartz-tube extensometer.
 (a) Schematic view of a quartz-tube extensometer.
 (b) Photo of fixed end of an extensometer and an actuator for calibration.
 (c) Photo of in-between part sensor and a suspension part of an extensometer.

接着剤で固定した。この石英ガラス管と接着されたステンレス部分をボアホール底にセメントで固定した。石英管のもう一方の端にはボアホール歪計に用いている拡大装置（Ishii *et al.*, 2002）を取り付け、拡大装置の一方を岩盤に取り付けた（Figure 4）。出力は拡大装置を通した変位と直接の変位を従来から採用している変位センサーで電圧に変換した（石井ほか, 2007b）。観測された歪地震波形の例をボアホール歪計の鉛直成分と並べて示した（Figure 5）。

弾性体の歪は6成分存在する。地震のメカニズムの推定や、種々の解析をするのに同じ面内（XY面内）の歪だけ（水平3成分）を用いるより、異なる軸方向（Z軸）の成分（鉛直成分）があれば拘束条件がプラスし、より確実に正確な結果を得ることが出来る。4.2に伊豆群発地震発生の前兆的傾斜・歪変化について述べている。この群発地震の発生はDykeの貫入とされているが歪計に鉛直成分があればDykeの上昇に関する更なる情報が得られたと考えられる。当研究所のボアホール歪計や応力計は斜め2成分も搭載し、歪・応力の6成分を観測している観測点もある。超高感度伸縮計の開発も実施した（石井ほか, 2004a）。これは伸縮計の自由端にボアホール歪計において使用している拡大装置を取り付けて観測するシステムである。約50倍の変位拡大装置を取り付けて記録を取るのであるが、長さ30mの伸縮計に取り付けるので1500mの長さの伸縮計に相当する。これによって観測値の分解能は50倍程度小さい変動までわかる。AD変換のビット数が小さいときはこの効果が顕著に認識される。

一方で短スパンの伸縮計の開発も行った。これはボアホール歪計用に開発した拡大装置の原理を用いて地上用の拡大装置を開発した。ボアホール用と異なり地上用の場合は寸法に制限がないので変位拡大倍率も形状も任意に決めることができる。この拡大装置を利用して観測壕内に長さ1mのステンレス円柱棒を基準尺にした伸縮計に地上用拡大装置を取り付けて観測を実施し30mの石英管伸縮計と比較した。観測した1m伸縮計の歪地震波形は30mの石英管伸縮計とほぼ同一の波形であり、拡大装置を取り付けることによって短スパンの伸縮計でも十分実用になること

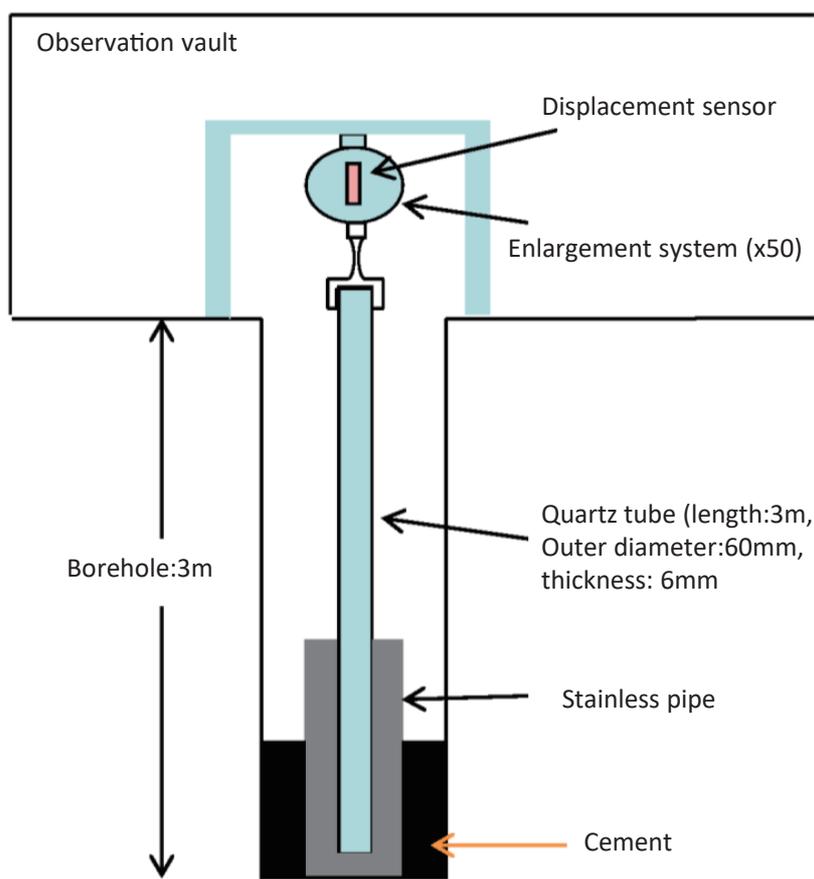


Figure 4: Schematic view of a vertical quartz tube extensometer.

が明らかになった（石井ほか，2020）。また，地上用の場合はボアホールの掘削も必要ないのでデータの取得も容易である。簡便にデータを取得でき，地震動の場合は長期永年変動を気にすることがないので，特に歪地震波形を観測する場合に有用である。

3.2.3. ボアホール多成分歪計

伸縮計は横坑の中に設置されるが被りが薄い場合には，気象の影響（特に降雨）を受けることが明らかになり，気象の影響を受けない深部ボアホールでの観測が期待された。ボアホール歪計は数種類存在する。Sacks *et al.* (1971) はボアホール歪計を最初に開発した。その歪計は円筒容器中に密閉されたオイルが容器の変形に伴って移動することを利用した計器で，体積歪のみを観測する計器である。気象庁はSacksタイプの歪計を東海地震に関連したデータを取得するために関東・東海地域31カ所に設置した。その後，Sakata and Sato (1986) はSacksタイプの歪計の原理を用いて3成分の歪を計測する歪計を開発した。Gladwin (1984) は円筒容器の変形を静電容量変化検知センサーにより電圧に変換し3成分の歪を観測する歪計を開発した。この計器はアメリカにおけるEarth Scope計画に採用され多くの観測点に設置された（石井，2004）。

石井ほか（2001）およびIshii *et al.* (2002) は円筒容器の変形をメカニカルに拡大する拡大装置を開発し，拡大された変位を変位センサーで電圧に変換するシステムを円筒容器に組み込む方式の多成分ボアホール歪計を開発した。この歪計は水平成分も任意方向に多成分組み込むことが可能であり，鉛直成分と斜め2成分の歪観測も可能にした。4.1節に簡略に記述しているように産総研や気象庁によりSSEに伴う歪変動も観測できることが明らかにされ，その後の産総研・気象庁の観測網拡大につながった。また，このボアホール歪計は地下深部（30 km程度）で発生するSSEに伴う変動も観測できることが明らかになり観測結果が予知連会報等に毎回報告されている（例えば，気

象庁, 2019; 産業技術総合研究所・防災科学技術研究所, 2019). この歪計は 4.14 節において述べるように南アフリカ金鉱山の地下（約 3 km）にも設置され掘削に伴い発生する地震を数百 m の至近距離における観測にも利用されている。

3.2.4. ボアホール型インテリジェント歪計（回収型歪計）

ボアホール歪計の開発とは別に著者らはボアホール型インテリジェント歪計（回収型歪計）を開発した（石井ほか, 2001; 山内ほか, 2004）。この計器は岩盤中の in-situ 応力観測のために開発されたものである。出力ケーブルはなく計器内部にメモリーやプログラムを内蔵しており、設置前にプログラムにより観測開始、観測終了時刻をセットしてボアホールに埋設・設置する。セメントが固化し、歪計が岩盤に固定された後、オーバーコアリングによりインテリジェント歪計を取り出す。オーバーコアリングにより応力解放されてその変化を歪計が記録する。その結果を解析することにより岩盤応力の方向や大きさが求められる。後述の 3.4.2 節で述べるボアホール地殻活動総合観測装置の埋設・設置の前にこの回収型歪計を埋設・設置し、その後オーバーコアにより計器を取り出し in-situ 応力を求め、その後、ボアホール地殻活動総合観測装置を埋設・設置しデータの連続記録を得ることを基本とした。これは連続観測を開始する時点での絶対応力から、その後の絶対応力の時間変化を記録することを意図したものである。

また、後述のボアホール応力計（3.3 節）の原理を用いて回収型応力計を製作すれば、オーバーコアリングによる応力解放を直接観測できるので、回収型歪計の場合より解析が容易になることが期待される。

3.3. 応力観測（ボアホール多成分応力計）

佐藤ほか（1989）によると地震の発生を考える場合には、媒質に応力が蓄積され断層（割れ目）の剪断すべりにより応力が解放される、という過程を考察するのが物理的な思考であり、応力が最終的に必要な観測量と述べている。そこで、その後著者らは更に新しく応力の連続観測が可能なボアホール計器を開発した（石井, 2010; Ishii and Asai, 2015）。応力計を開発し、岐阜県土岐市にある東濃地震科学研究所の TOS ボアホール観測点（深度 512 m）に設置して間もなく、東北地方太平洋沖地震（2011, M_w 9.0, 震央距離約 573 km, これ以後、東北地震と表記）が発生し最大振幅を含む完全な応力地震動記録を観測することが出来た。この応力計は応力と歪の両方を観測出来ている。この開発により、その後のボアホール地殻活動総合観測装置は 1 台に応力計 6 成分、歪計 6 成分、傾斜計 2 成分、地震計 3 成分、磁力計 3 成分、高感度温度計などを搭載できることになり、それらの任意の組み合わせによる搭載も可能になった。このボアホール応力計に関しては 4 章に述べているようにその後いろいろなことが調べられた。

3.4. ボアホール総合観測

3.4.1. ボアホール地殻活動総合観測装置

地震に関連した信号を観測するには、地表よりも地下深部で観測する方が、人工的なノイズや気象によるノイズの影響が小さく微小な信号を観測することができる。このような考えに基づいてボアホール歪計や傾斜計を開発した。しかしながらボアホールを掘削する経費は計器製作の経費よりはるかに高額である。そこで 1 本のボアホールに多項目・多成分の計器を設置することができれば、チャンネル当たりの経費は少なくて済むと考え、ボアホール地殻活動総合観測装置を開発した（石井ほか, 2001; Ishii *et al.*, 2002; 石井・山内, 2007a; Ishii and Asai, 2015）。前述のように著者はボアホール用の応力計・歪計・傾斜計を開発しており、これに加えて市販の地震計・磁力計・温度計などを 1 台の計器に搭載した。Figure 6 は TOS ボアホール観測点に設置したボアホール地殻活動総合観測装置とボアホールの構造である。応力計や歪計は水平 4 成分と鉛直 1 成分を基本とした。傾斜計は 2 成分、地震計や磁力計は 3 成分とした。したがって 1 台の総合観測装置により、応力 5 成分、歪 5 成分、傾斜 2 成分、地震動 3 成分、磁力 3 成分と高感度温度の 19 成分の観測が可能であり、これらの任意の組み合わせも可能である。観測装置は応力計などを搭載している場合は膨張セメントで岩盤と固める。磁力計は観測装置の方位を決定するのにも利用している。磁性の強い岩盤に設置する場合にはジャイロを搭載した。

深部ボアホールに設置する計器を開発するには、計器のセンサー部分の開発のほかに、地上まで多項目・多成分のデータを細いケーブルで伝送する技術の開発も必要である。著者が開発した総合観測装置の場合は初期の段階ではア

ナログ出力をそのまま地上に伝送したが、チャンネル数が多いため太いケーブルを使用していた。その後、無線伝送方式を開発したが、最終的には光ケーブルを利用することにより、細いケーブルで多量のデータを地上まで伝送することが可能になった。著者が設置した総合観測装置の深度で最も深いのは 1,030 m で次は 1,020 m である。

3.4.2. ボアホール地殻活動総合観測装置の埋設・設置

ボアホール地殻活動総合観測装置などを設置し良好なデータを得るには、一様な岩盤に計器を膨張性のセメントで固めることが必要不可欠である。傾斜計と異なり、応力計・歪計の場合は埋設・設置がよくなければ計器の性能がいくら良くてもよいデータは得られない。ボアホール総合観測装置などを設置するためにボアホールを掘削し、設置深度地点付近のコアサンプルをコアリングにより取り出して観察すると、完全に一様な岩盤サンプルは少なく、割れ目や水みちが含まれている場合がしばしばある。特に応力計や歪計は岩盤と膨張性のセメントで固めるため、割れ目や水みちの位置に感受部分が設置されるとよいデータは得られない。このため著者等はセンサーを割れ目や水みちのない一様な岩盤のところに設置する方法を開発した(石井ほか, 2013)。計器のセンサーがそのような部分に位置しないように設置するには、計器を地上から降ろして設置するとき、正確に位置深度を認識しながら降下させるが、あらかじめコアリングにより取り出した正確な深度の確認できている岩のサンプルで、割れ目や水みちがない位置に計器を降下させ、セメントで岩盤に一体化させ固める。これにより岩盤中の割れ目や水みちのない一様な岩盤位置に、応力計や歪計のセンサーを設置することが可能になり、信頼できるデータを得ることが可能になった。

3.5. 地殻変動連続観測計器に関するまとめと考察

地震予知計画が開始された時点からの地殻変動連続観測の観測計器の進展と経過について最初に述べた。当初は水管傾斜計、伸縮計と水平振子傾斜計が標準の地殻変動連続観測計器であった。地震発生と地殻変動との関連に関してそれまで実績はなかったが、地球潮汐が観測されるほど高感度であるということで、地震発生との関連が期待され地震予知計画に組み込まれたと考えられる。地震予知計画の地殻変動連続観測は三角形の横坑に伸縮計 3 成分と水管傾斜計 2 成分を設置するのが標準とされた。時間の経過とともに観測計器は進歩し変動を電圧出力に変換し、テレメータなどにより研究室においてデータを見るのが可能になり、データベースも構築された。観測点の分布などは、東京大学地震研究所(1988)、国土地理院・地震予知総合研究振興会(1993)、地震調査研究推進本部(2020)などに記載されている。

また感度検定も従来されていたようなセンサーのみの感度検定を計器の近傍で行うのではなく、遠方から本来の計器の検定を自動的に行えるタイプに進歩した。横坑の観測計器の方は進歩したが観測点の近くに、ある程度大きな地震が起こらなかった。したがって横坑の観測点では計器の感度は十分あるが、地震の前兆の変動が観測できたかどうかを確認することができなかった。

しかしながら横坑の観測においては、データにしばしばノイズが重なって観測される。最も影響のあるのは降雨によるノイズである。トンネルの被りが厚くない場合には降雨に伴った変動が重なって観測され、微小な信号が隠れてしまう。このノイズを除去するための研究も多くなされた。タンクモデルを用いたシミュレーションや間隙弾性体理論を適用した方法などがなされた(石井ほか, 1973; 田中, 1979; 山内, 1981)。しかしながらこれらは降雨の終了した後までのデータを用いて行われたもので、降雨のパターンもいろいろあり満足する結果は得られていない。地震の前兆現象を観測するには重大な欠点となっていた。

これらのことを考慮して降雨や人工的ノイズの影響を受けない観測が必要とされ、ボアホールによる観測が考慮された。ボアホール体積ひずみ計の観測は行われていたが、地震予知研究を行うには shear の成分も観測できる歪計が必要とされ複数の開発がされた。更に地震発生研究に本質的に重要な応力の連続観測が可能なボアホール応力計も開発された。

深いボアホールに計器を設置するにはボアホールを掘削する必要があるが、経費が計器よりも高額である。したがって 1 本のボアホールで 1 種類の観測を行うより、複数の計器を搭載した総合観測計器を設置することができればチャンネル当たりの経費が低額になる。そこで総合観測が可能なボアホール地殻活動総合観測装置が開発され、1 台の計器で複数のセンサー・複数のチャンネルの観測が可能になった。

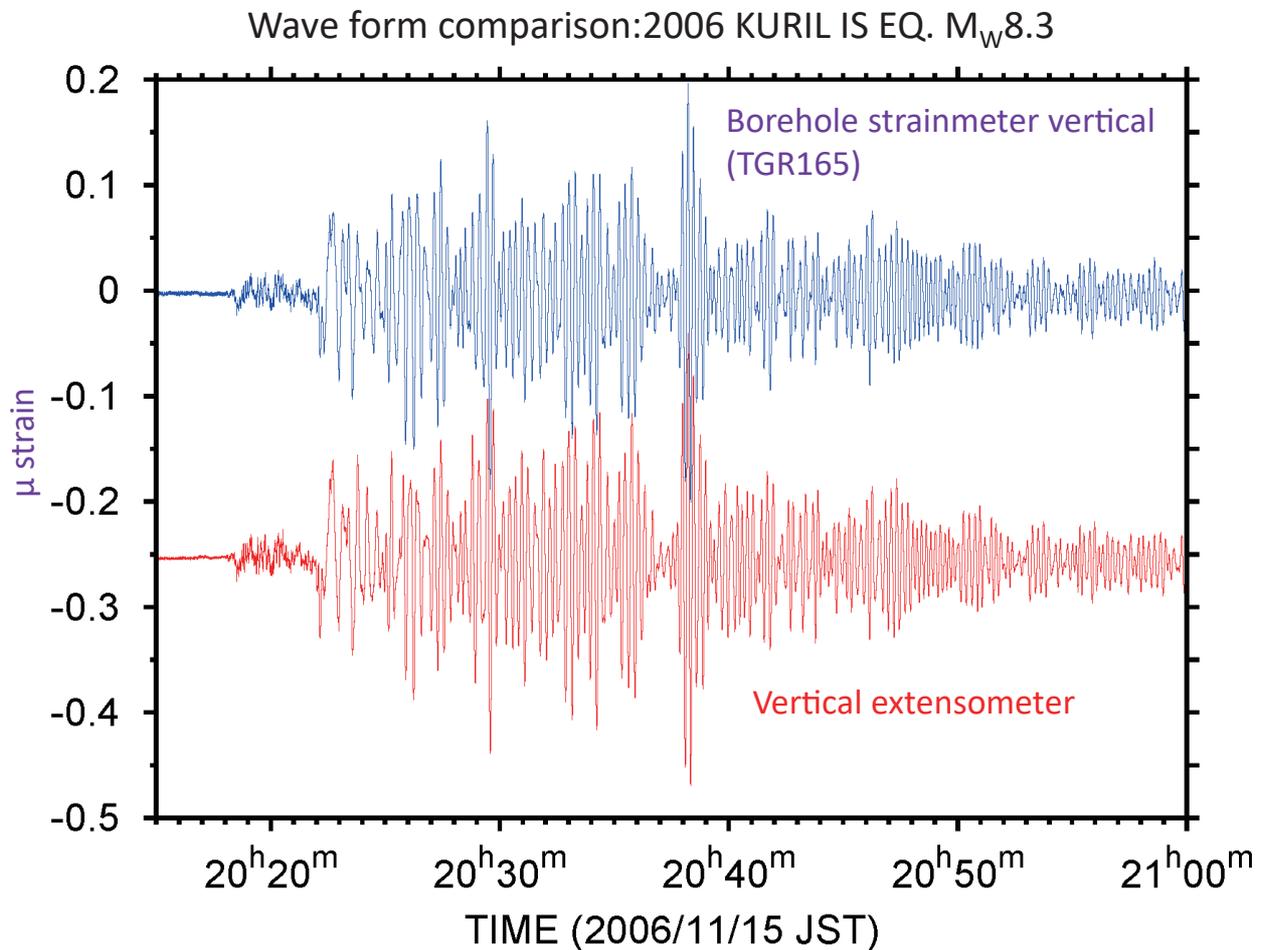


Figure 5: Strain seismograms of 2006 Kuril island earthquake (M_w 8.3) observed by a vertical quartz tube extensometer and a borehole strainmeter (TGR165: depth 165 m).

歪計や応力計が搭載されている計器は岩盤と膨張性のセメントで固める必要がある。岩盤のコアを取り出してみると亀裂や水みちがしばしば存在している。筆者らは歪計や応力計を搭載した計器を一般的な岩盤の位置に設置する方法を開発し、良好なデータを得ることができるようになった。

筆者らが開発し観測に用いている歪計や応力計は、長期的にも安定した記録を得るためにセンサーのチェックも行っている。センサーを計器に組み込む前に必要な数より多くのセンサーを温度一定の横坑内に固定し長期データを記録する。ドリフトやノイズの少ない安定したセンサーを選抜して計器に組み込むことを行っている。これによりドリフトの少ない安定した記録を得ることができている。

ボアホール計器も設置深度によっては降雨の影響を受ける。関東東海に設置してある体積ひずみ計は深度 200 m 程度の点が多いが、かなりの点で降雨の影響がみられる。著者が所属する東濃地震科学研究所が関係している観測点では大部分が 500 m 程度以上の深度に設置しているが降雨の影響は見られない。このように多くの作業をすることによって良好なデータを得ることが出来るようになり、次章に述べるように成果はほとんどがボアホール観測から得られている。

4. 著者等が関連した研究・成果の概要

前章において地震予知計画の開始以来の地殻変動連続観測計器の進展について述べてきた。地殻変動連続観測は横

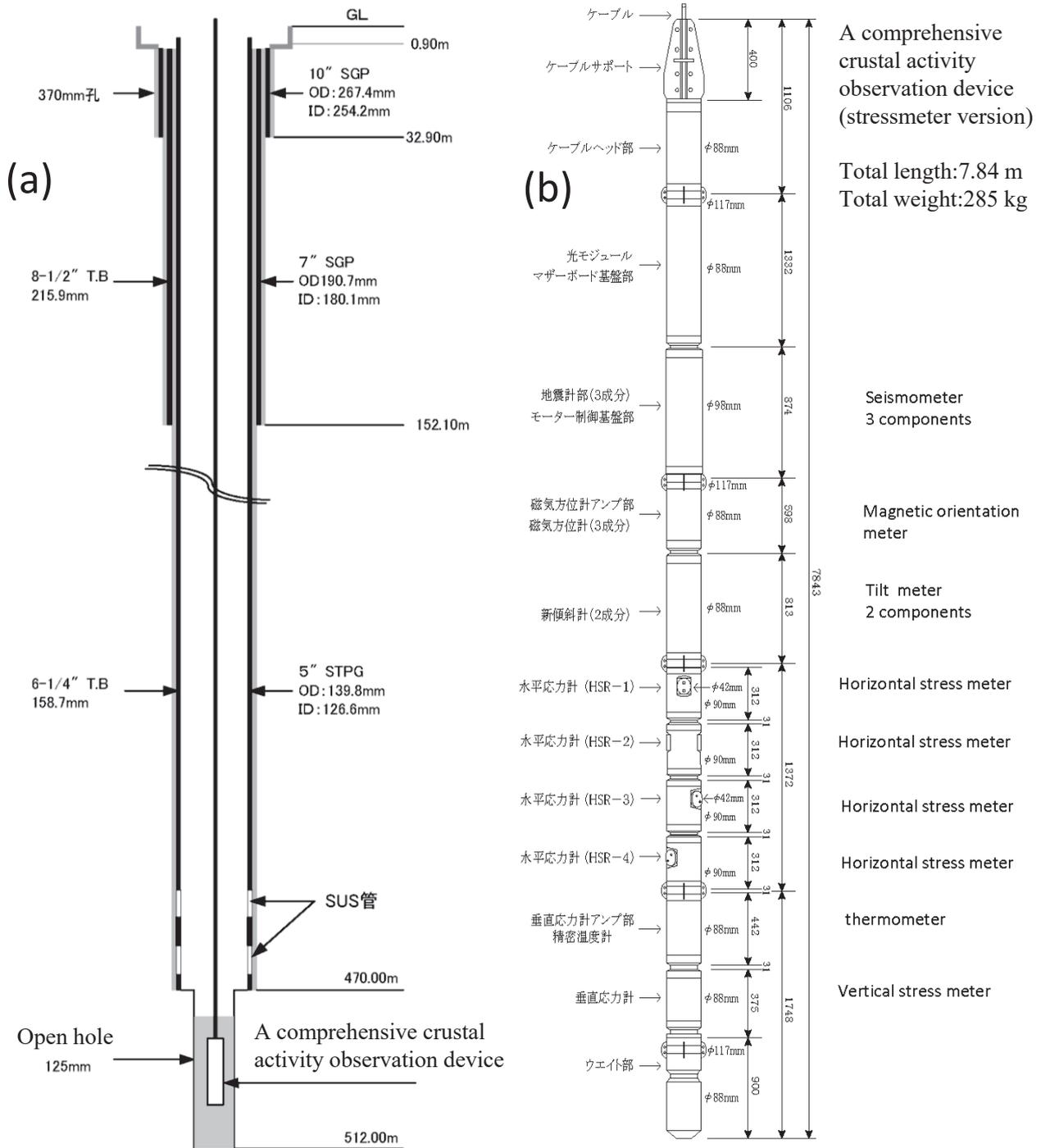


Figure 6: Observation system at TOS borehole observatory (depth:512 m).

(a) A structure of the borehole.

(b) A comprehensive crustal activity observation device installed at TOS station (depth:512 m).

坑内での伸縮計・水管傾斜計による観測から出発したが、ボアホール歪計・ボアホール応力計の開発やそれらを搭載したボアホール地殻活動総合観測装置の開発により、以下に述べるように多くの成果が得られてきた。この章は地殻変動連続観測に関連して著者および共同研究者が行った研究の主な内容と結果の概要を述べている。多くの結果を示すために未発表の図なども掲載している。

4.1. 短期的スロースリップに起因した活動がボアホール歪計・傾斜計により観測されるようになった

スロースリップに起因した低周波地震に関連した傾斜変動はボアホール傾斜観測のデータを基にして Obara (2002) によって発見され、その後多くの論文が報告されている（例えば、小原、2007）。

著者らが開発したボアホール地殻活動総合観測装置（石井ほか、2001; Ishii *et al.* 2002; Ishii and Asai, 2015）が気象庁や産総研の深部ボアホールに30カ所以上設置されている。東海・紀伊半島・四国南海トラフ周辺などに設置されているボアホール地殻活動総合観測装置に搭載されている歪計により、低周波地震（微動）に関連したスロースリップに起因した歪変動が観測され、研究が進められている。歪観測の場合は傾斜計とは異なる物理量の情報を得ることができ、3成分の観測データが得られるためスロースリップを発生させる断層モデルを推定することができる。地震予知連絡会報にはスロースリップに起因した低周波地震（微動）に関連した歪変動・傾斜変動が毎回報告されている（例えば、気象庁、2019; 産総研・防災科技研、2019など）。歪のデータからは対応する震源のパラメータを推定することが出来、その結果も記載されている。

小林ほか（2006）はボアホール地殻活動総合観測装置に搭載されている多成分歪計のデータを解析し、1999年から2005年までに20回の短期的SSEによるとみられる歪変化を検出し、スロースリップの歪データから対応する震源のパラメータを推定し、歪変化を発生させた短期的SSEと低周波地震活動との間に密接な関係があることを示した。

Itaba *et al.* (2010) は東南海および南海地震のために産総研が構築したボアホール観測網の歪データを用いて、2008年に紀伊半島に発生した複数のSSEによる歪変化を複数の観測点で観測し断層モデルを推定した。Itaba and Ando (2011) は遠地地震表面波による短期的SSEの誘発を初めて発見した。

Yamamoto (2007) は「プレート間の短期的スロースリップイベントによる歪変化が捕らえられたことは、観測網が前駆的滑りを検出する能力を有する可能性を示すものと考えられる」と述べている。著者も深度30km程度で発生した小規模な歪変化が観測されるならば、大地震発生前に前兆的変動が生ずるとすれば、検知できる可能性が高いと考えている。産総研では2012年から産総研の歪計・地下水位・傾斜データと防災科研の傾斜データおよび気象庁の歪計データを統合し、SSEの解析を開始した（板場ほか、2013）。松本（2017）はそれに基づいてSSEの検知能力の分布を求めた。

歪計はSSEの観測研究だけでなく、その他の研究にも利用されている。例えば北川ほか（2003）は産業技術総合研究所の安富観測点のボアホール歪計で観測された急激な短縮歪は非定常な地震性の断層滑り（creep）として解釈可能であることを示した。Itaba (2018) は巨大地震の地震規模を歪計のデータにより即時に決められることを示した。

それにしても開発した歪計により、いろいろ重要な結果が得られることがわかり、有用な高精度の計器が開発されればその波及効果が大きいことを改めて認識した。

4.2. 伊豆の群発地震発生の前兆的傾斜・歪変化が1台のボアホール地殻活動総合観測装置により複数回観測された

1995年から1998年まで伊豆半島において群発地震が4回発生した。伊豆半島において東京大学地震研究所はボアホール地殻活動総合観測装置を、防災科学技術研究所はボアホール傾斜計を、気象庁は体積歪計を設置していた。ボアホール地殻活動総合観測装置は1台に歪計と傾斜計を搭載しており、歪と傾斜の両方のデータを記録している。1996、1997と1998年に発生した群発地震においてボアホール地殻活動総合観測装置は歪と傾斜の両方に、明瞭な前兆的変化を記録していたことが明らかになった（東京大学地震研究所、1998; 石井ほか、1998）。これらの結果が得られたのは意図的に群発地震の震源域にボアホール観測点を建設したことにより、震源に十分近いところで観測できたこととボアホール観測のためノイズが小さいことによる。横坑などの場合は平地には建設できないなど多くの制限があり、自由に重要地点に設置することはできない。

一例として1997年の群発地震の例を示す（Figures 7, 8）。群発地震は3月3日11時頃から発生している。Figure 7は傾斜変化を示し、Figure 8は歪変化を示している。群発地震発生前後の生の観測記録の拡大図は予知連絡会報に示されている（東京大学地震研究所、1998）。生の観測記録では異常変動が観測されているということはわかるがいつから前兆が開始されたかなどは認識できない。著者がその後、最大下降傾斜ベクトルなどの表示にして示すこと

により、傾斜の前兆的異常変動の開始時期、傾動方向、傾動の大きさなどが明白になった。傾斜のベクトル図 (Figure 7b) では 2/22 0:00 – 3/3 0:00 の期間は全てを囲む丸の範囲内の変動であるが 3/3 0:00 頃からは直線の変化が出現し群発地震が発生している。これが群発地震の前兆的傾斜変化である。歪の場合は Figure 8a に長期変動の図があり群発地震発生の前後を拡大したのが Figure 8b と Figure 8c に示している。この図から歪に関して群発地震開始の前兆変化は明白でないが 12:00 頃から主歪の異常変動が発生し 23:09 に M5.5 の最大地震が発生している。すなわち傾斜観測では群発地震発生の前兆変動が観測され、歪観測では群発地震発生の前兆開始時期は明白でないが最大地震発生の前兆的变化が観測された。M5.9 と M5.0 の地震には顕著な前兆変動は見られない。Figure 7 の右図に見られるように 3 月 3 日の前兆的変動が加速した後の変動はプロットされていない。これは地震が多く発生しており地震動の為に傾斜計が振動を記録し加速後の経緯がプロットできないことによる。低感度の傾斜計があれば 3 月 3 日の傾斜の加速データ後も記録できたと考えられる。

伊豆の群発地震に関しては Dyke の貫入により発生したということで説明されている。Okada *et al.* (2000) は過去 7 回の群発地震の傾斜計のデータにより前兆変動の存在と Dyke の貫入を結論づけている。Morita *et al.* (2006) は GPS のデータを使用することにより Dyke 貫入の定量的アプローチを行っている。著者等は今まで使用されていない歪データも観測しているので今後の更なる研究を進めることが可能である。

4.3. 移動性地殻変動 (関東, 東北) の観測と特徴

東京大学地震研究所の油壺と鋸山地殻変動観測所の水管傾斜計の観測データを解析して得られた結果によると、鋸山で観測された傾斜変動が油壺の傾斜変動に先行しており約 20 km/year で伝搬しているような傾斜変動が観測された (山田, 1973; Kasahara, 1979)。一方、東北地方においては歪観測により移動性地殻変動と考えられる変動が観測された (Ishii *et al.* 1978; Ishii *et al.*, 1979)。東北の場合は地殻変動連続観測点が 3 カ所以上あるため伝搬方向もわかり、N50° W 方向に歪が約 38 km/year の速度で伝搬する変動が観測された (Figure 9)。この方向は沈み込む太平洋プレートの進行方向とほぼ一致している (瀬野, 2005)。この伝搬する波動は分散性があり群速度と位相速度も求められている。その後、振幅の特徴も調べられ、年周変化の振幅が大きい観測点ほど伝搬する歪の振幅の大きいことが明らかになった (Ishii *et al.*, 1980)。

4.4. 水の挙動と歪変化・断層運動の関連性が見いだされた (研究所近傍の地質断層の場合)

歪変動の解析から断層の動きと水位の変動との関連性が明らかになった例が見いだされた (石井, 2008)。東濃地震科学研究所の近傍には日本原子力研究開発機構の立坑があり、立坑近傍に地質断層である NNW 断層 (右横ずれ断層) が存在している。近くには東濃地震科学研究所のボアホール観測点 (TGR350: 深度 350 m) があり (Figure 10a) 地殻活動総合観測装置が埋設・設置され、水位も観測している。緑の太い線は右横ずれの NNW 断層である。2005 年から 2006 年にかけて立坑内には湧水が発生し、それを排水・排水停止したときに、TGR350 ボアホール観測点の歪計と水位計に大きな変動が観測された。水位変化のみ Figure 10b に示した。Figure 10c に水位変動に対応する期間の観測された歪変動から求められた主歪が示されている。黒色が最大主歪を示し緑色が最小主歪を示している。最大せん断歪を赤色で示し、ずれの矢印も示されている。この最大せん断歪の方向は NNW 断層の走向とほぼ一致している。水位変動と比較すると Figure 10a に示されているように水位が下降の時は右横ずれの歪変動を示し、水位が上昇の時は左横ずれの歪変動を示すことが明らかになった。この付近の媒質は間隙弾性体と推定されている (竹内, 2006; Queitsch *et al.*, 2014)。

4.5. 活断層の動きを検知 (茂住祐延断層)

1995 年に発生した兵庫県南部地震後に予算が認められ、フロンティア計画が発足し、茂住祐延断層近辺に新しく横坑が掘削された。横坑内には 2 カ所に右横ずれ破砕帯の存在が認められた。横坑内に深度 10 m のボアホールを 2 カ所掘削し、開発した回収型歪計を設置したのちのオーバーコアリングによる応力測定を実施した。その解析結果から初期応力の主応力方向と大きさが求められ、その方向は地質学的に求められている破砕帯の主応力方向と一致した変動を示した。その後、同じボアホールに多成分歪計を埋設設置し、連続観測によりデータを蓄積した。それらの解

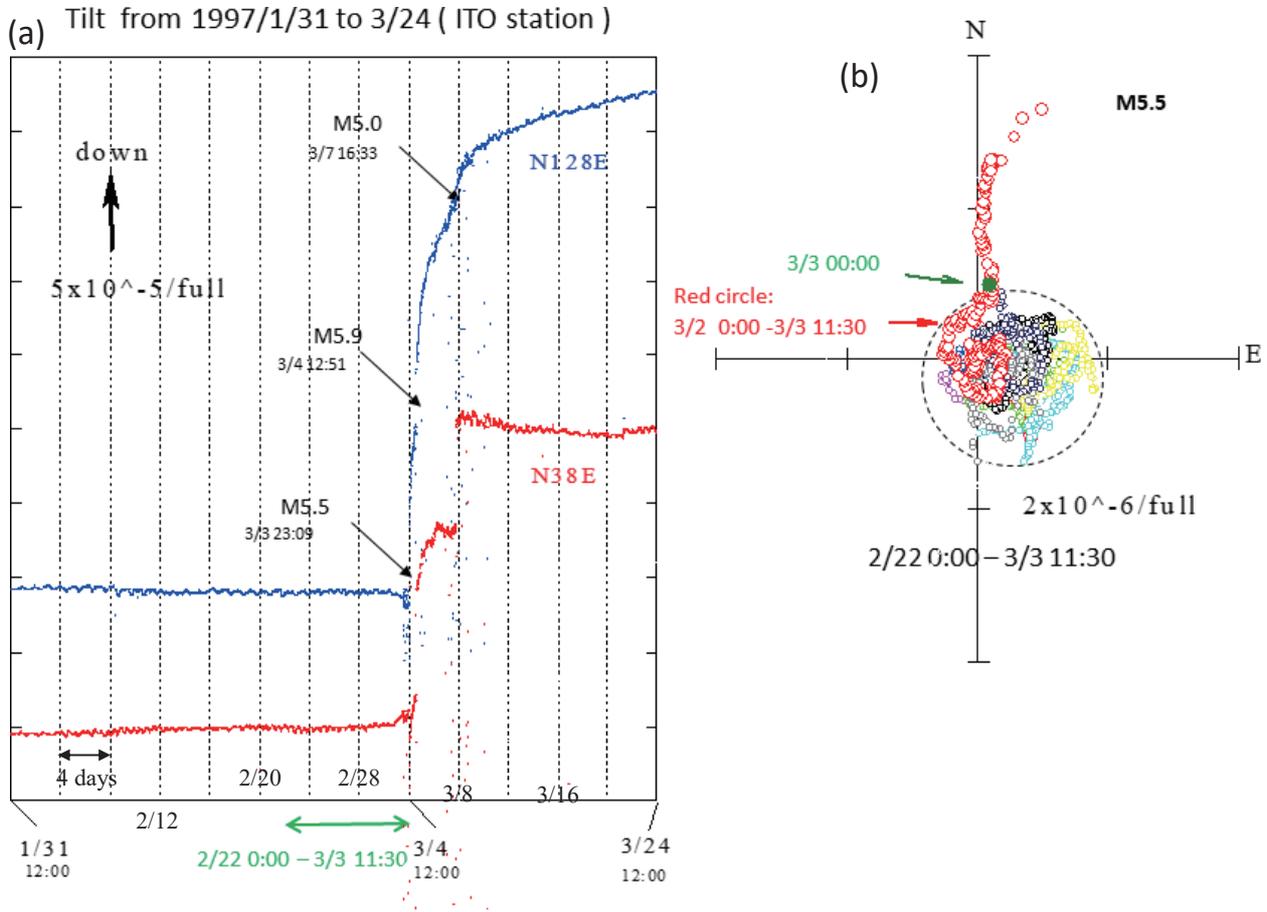


Figure 7: Precursory tilt change during the earthquake swarm on Izu Peninsula.

- (a) Tilt changes from 1997/1/31 12:00 to 3/24 12:00 observed by a tilt meter equipped with a comprehensive crustal activity observation device at ITO borehole station (depth:150 m).
 (b) Maximum descending vector from 2/22 00:00 to 3/3 11:30 1997 derived from tilt meter data.

析から破碎帯の変動は定常的に進行しているのではなくある時期に変動することが歪観測から明らかになった (Ishii *et al.*, 2007c).

4.6. 関東地震のデータ (GPS, 光波, 歪連続観測) の比較から地殻変動連続観測の検知能力の良いことが明らかになった

Ishii and Kato (1989) は関東地震 (1923) によって生じた水平変動の解析結果 (中根, 1978) を用いて地震の前兆現象に関する検知能力の比較検討をした。その結果、ボアホール歪連続観測が GPS や光波の観測より二桁程度、前兆現象の検知能力のよいことが明らかになった。この結果は地震発生直前の変動についての検討であるが、長期的な変化に関しては GPS や光波が安定しており、これらの観測を組み合わせ有効に活用することが重要である。

4.7. 連続観測の中では深部ボアホール観測がノイズも小さく分解能の良いことが確認された

地震発生時に多項目の地球物理学的観測が同時に行われていた例としては 1997 年の伊豆群発地震の例がある。この時にはボアホールによる歪・傾斜連続観測、GPS、光波、水位観測などが行われていた。その比較観測結果が岡田・石井 (2000) に示されている。若干手を加え、カラー表示にした図が石井・浅井 (2019b) に再掲されている。これによると GPS、光波などの観測結果では地球潮汐変化は記録において認識することは出来ないが歪・傾斜変化においては明瞭に見ることができる。異なる物理量の観測は現象の解明には重要である。特に東京大学地震研究所による

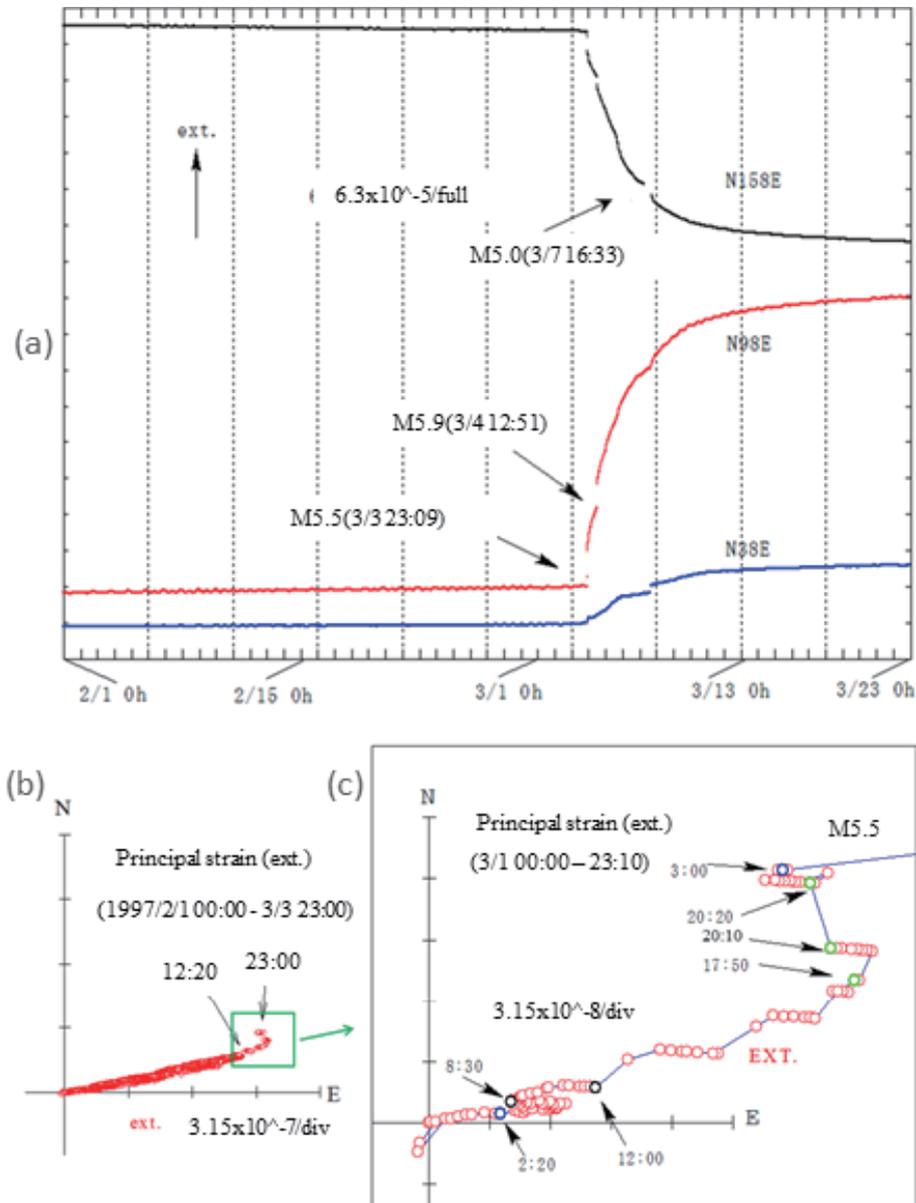


Figure 8: Precursory strain changes during the earthquake swarm on Izu Peninsula.

- (a) Strain changes from 1997/2/1 00:00 to 3/23 00:00 observed by the strainmeter equipped with a comprehensive crustal activity observation device at ITO borehole observatory (depth:150 m).
 (b) Principal strain changes from (2/1 0:00 to 3/3 23:00) derived from 3 components strains.
 (c) Principal strain changes in the green rectangle part in the Figure 8b.

歪 3 成分と傾斜 2 成分は 1 台のボアホール地殻活動総合観測装置により観測された結果である。この装置は地震、地磁気、温度のデータも同時に記録している。総合観測装置の有利さが明瞭である。この伊豆の例では変動が小さいと考えられる前兆的变化が発生した場合には、分解能の良いボアホール連続観測が特に威力を発揮すると考えられる。この図のデータから 4.2 節に示したように地殻変動連続観測により前兆的歪・傾斜変動が観測されている。防災科学技術研究所の傾斜計にも前兆的变化が観測されている(岡田・石井, 2000)がボアホール以外の他の連続観測データでは前兆变化は観測記録からは見いだされていない。

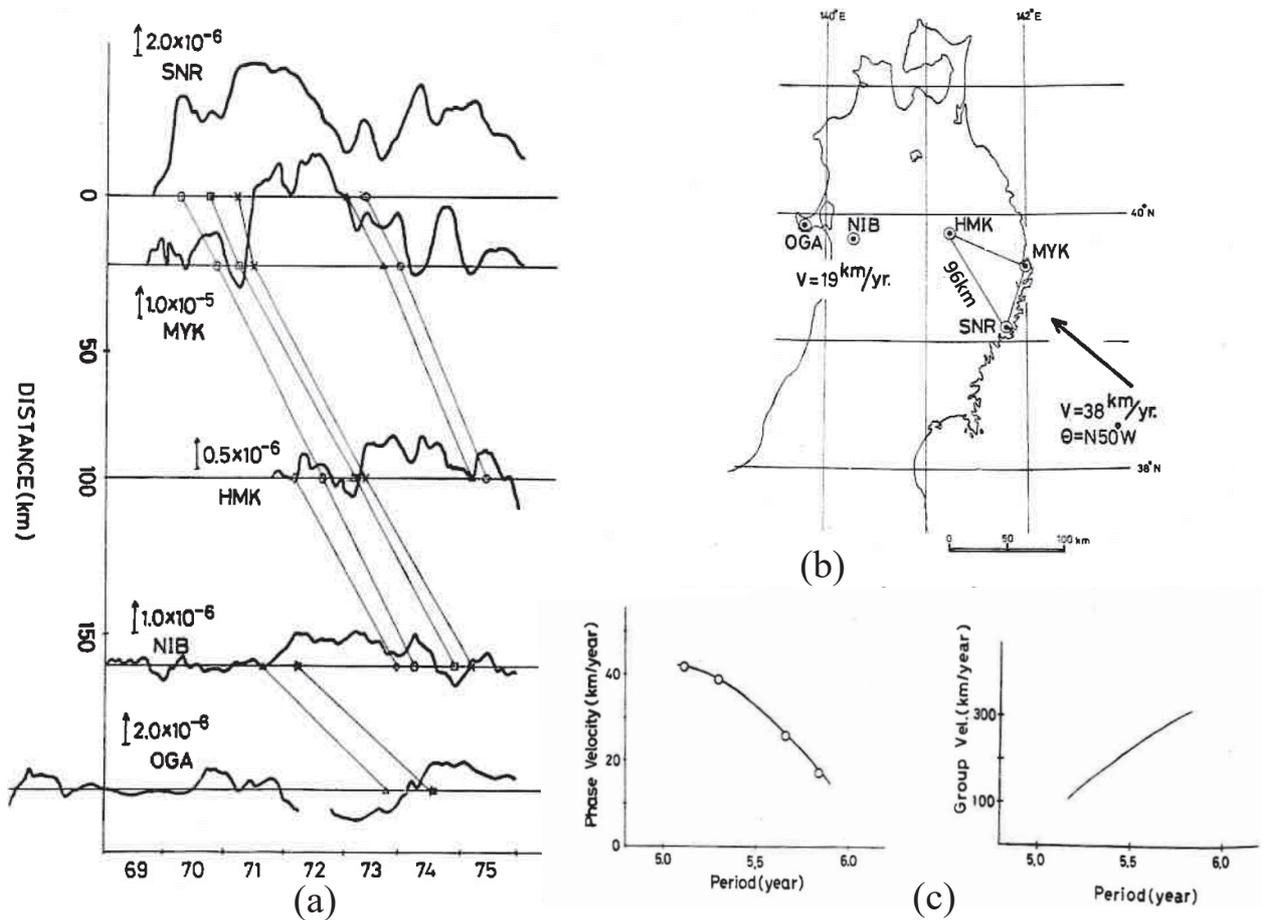


Figure 9: Strain migration observed in the Tohoku region (Ishii *et al.*, 1978; Ishii *et al.*, 1979; Ishii *et al.*, 1980).

- (a) Time - distance relation of maximum shear strain for five crustal movement stations SNR, MYK, HMK, NIB, and OGA belonging to Tohoku university.
- (b) Direction and velocity for migration of maximum shear strain derived from Figure 9a.
- (c) Phase velocity and group velocity of maximum shear strain.

4.8. 東北地震を記録することにより開発した応力計が正常に作動していることが明白になった

開発したボアホール応力計 (Ishii and Asai, 2015) は当研究所の STG200 ボアホール観測点 (深度: 220 m) や陶史の森ボアホール観測点 (深度: 512 m) に設置され、応力潮汐や地震波形を記録していた。東北地震が発生したことにより応力計が正常に作動していることやダイナミックレンジなどを確認することができた (石井・浅井, 2017; 石井ほか, 2019; 石井・浅井, 2019)。

Figure 11 は STG200 観測点で記録した東北地震の応力地震動波形の鉛直成分と間隙水圧変化である。水圧は市販の水圧計による記録である。異なるセンサーであるが両者の波形はほとんど一致している。相互相関により時刻のずれを見ると水圧の方が 0.5 秒程度遅れて立ち上がっている。伝搬してきた岩盤の応力変化により間隙水圧が変化して水圧変化を記録したと考えられる。このような記録から間隙弾性体の振る舞いに関する研究も進めている。計器の信頼性やダイナミックレンジに関する考察は以下の章にも述べられており、ボアホール応力計が正常に作動していることが明らかになった。

4.9. ボアホール応力計・歪計の信頼性が弾性体力学の不変量を適用して確認された

著者等はボアホール地殻活動総合観測装置に搭載する応力計や歪計を開発し、多くの深部ボアホールに設置し連続

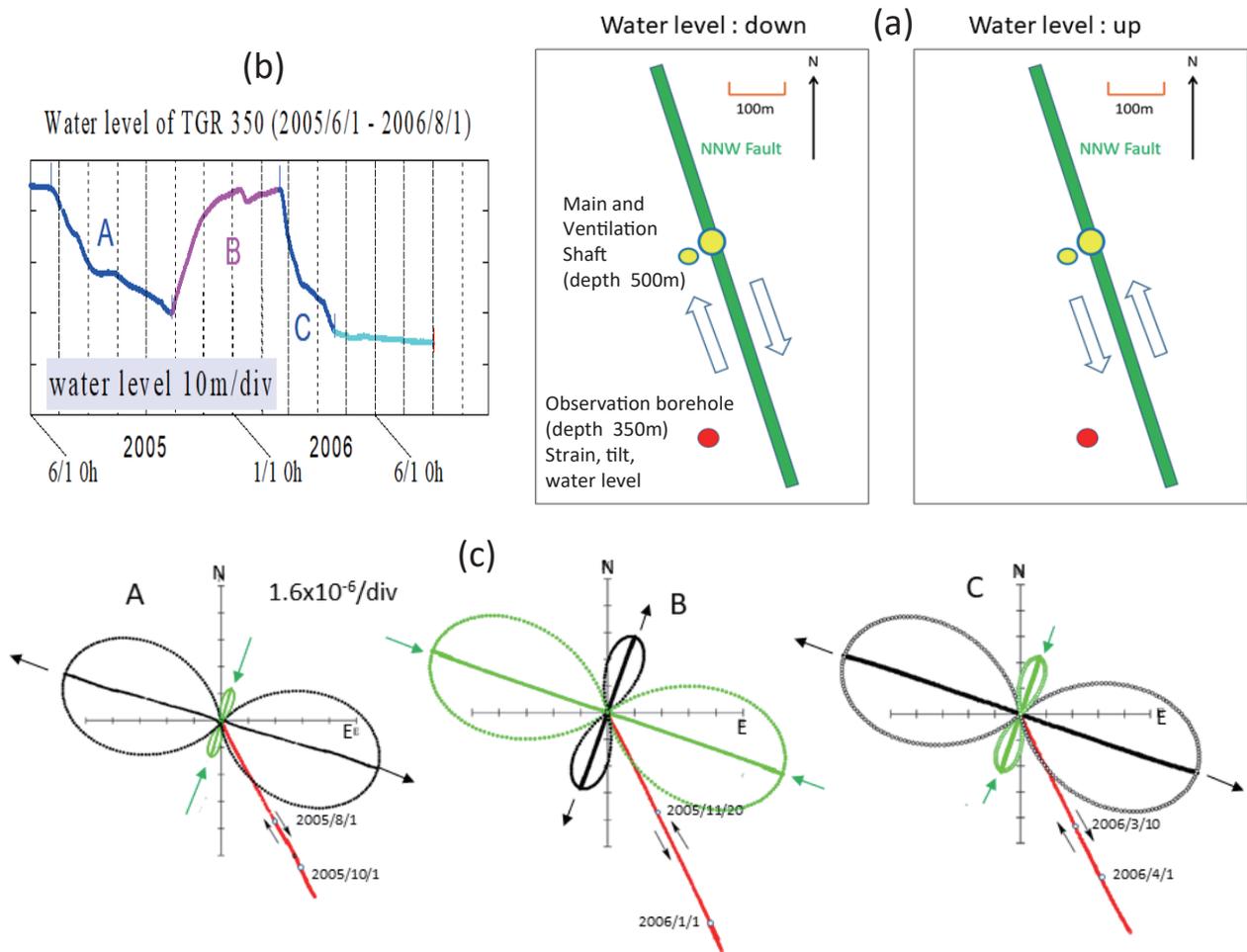


Figure 10: This figure was reproduced from the figures of the pamphlet (東濃地震科学研究所, 2015).

- (a) Arrangement of NNW fault, main shaft, ventilation shaft and TGR350 borehole station. Movement acting to the fault corresponding to water level variation. (left) Movement acting to the fault during descending of water level. (right) Movement acting to the fault during ascending of water level.
 (b) Water level variation observed at TGR350 borehole station when ground water flow occurred in the shaft.
 (c) Principal strain derived from strain variation observed corresponding to water level variation.

データを取得しているが、それによりこれらの観測計器の信頼性を検定することが出来た。計器の水平方向は4成分の観測をしている。応力計や歪計は水平面内に4成分配置されており、その中のそれぞれ2成分は直角成分としている。観測された記録の2組のそれぞれから弾性体力学の不変量の記録を求めることが出来る。求められた2種類の記録はほとんど同じ振幅、同じ時間変化を記録している。これは観測された地震動波形や潮汐記録についても複数の観測点の記録についても同様の結果が得られた(石井・浅井, 2017; 佐野, 2018)。不変量が一致することは良好な観測の必要条件である。その上、理論潮汐や理論地震波形との比較も行い、良好な結果が得られていることから、応力計・歪計は感度検定が正しくされており、岩盤への埋設・設置も一様な岩盤にされており、信頼できる観測をしていると結論付けることができた。また、観測された面積応力・面積歪は観測された鉛直応力・鉛直歪と相似の波形をしていることも明らかになり、理論的に解釈できている(石井・浅井, 2019)。

4.10. ボアホール応力計は応力と歪の両方のデータを記録しており、応力は媒質の弾性定数を知ることなしに値が求められることが明らかになった

著者等が開発したボアホール応力計は東北地震による応力地震波形を記録したが、これは世界的にも初めてである。

Records of stress meter and water pressure meter installed at 200STG borehole

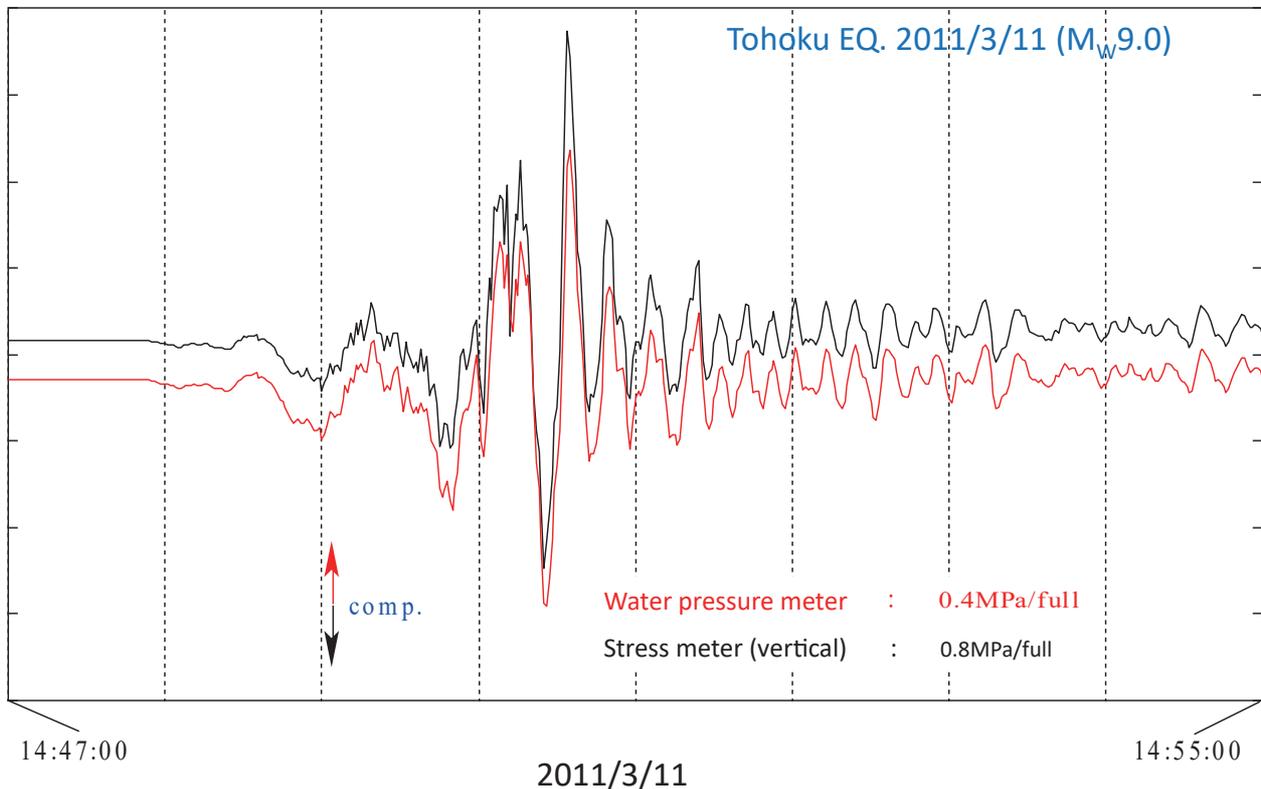


Figure 11: Stress seismogram and water pressure seismogram caused by Tohoku earthquake (2011/3/11 M_w 9.0) observed at STG200 borehole station

ボアホール応力計は応力と歪の両方を観測することができる計器 (Ishii and Asai, 2015) であることが示されている。その後の研究 (石井・浅井, 2019) によると、応力計では受圧面に作用する応力を直接測定するので、観測時点の応力値は媒質の弾性定数が未知でも求められる。歪は2個の相対する受圧面間の変位から求めるが接続部分の歪変化である。媒質の弾性定数がわかれば周囲の岩盤の歪変動は求められるが観測開始からの相対的歪量である。媒質の定数を知ることなしに応力値が求められるということは観測研究において有利なことである。応力計の項で述べたように佐藤ほか (1989) によると地震の発生を考える場合には応力が最終的に必要な観測量である。

4.11. ボアホール応力計や歪計のダイナミックレンジが広いこと、および東北地震より数倍大きな地震でもスケールアウトすることなく記録できることが示された

東北地震においては当研究所の複数の連続観測用のボアホール応力計や歪計はすべて最大振幅まで記録できた。しかしながら日本中のほとんどの長周期速度型地震計はスケールアウトして大振幅は記録できなかった。そこで連続観測用ボアホール応力計や歪計の観測可能レンジを調べた。その結果、当研究所のボアホール応力計が東北地震の震源に近い海岸に設置してあった場合や、東北地震より数倍大きな地震の場合でも、高感度成分でもスケールアウトすることなく記録できることが明らかになった (石井ほか, 2019a)。大地震でもスケールアウトしないことは震源のメカニズム解析や津波の予測などにとり必要なことである。また、長周期地震計の水平動は水平振子方式を使用している。通常の観測では問題ないが、観測点の傾斜が大きく変化すれば感度は変化する。しかし応力計や歪計の水平動は水平振子を使用していないため感度は変化しない。

4.12. 通常の気圧計で東北地震による気圧変動を観測し、上下変動との関係が明らかになった（気圧変動の積分が上下変動）

Watada *et al.* (2006) は Lighthill (1978) の関係を用いて 2003 年に発生した十勝沖地震に伴い観測された微気圧計の記録と速度地震計の記録から地震動と気圧変動の関係を求めた。2011 年の東北地震が発生したときに東濃地震科学研究所の岐阜県土岐市にある TOS ボアホール観測点（深度 512 m, 震央距離約 573 km）に設置してある応力計や、微気圧計でなく通常の気象観測用気圧計に応力地震波や地震動による気圧変動を記録することができた。また、気圧計により観測された気圧変動と GPS によって観測された上下変動を比較し、気圧変動を積分することにより GPS で観測された上下変動の時間変化が求められること（Figure 12）や GPS で観測された上下変動を微分することにより気圧計で観測された気圧変動が求められることなどを明らかにした（Ishii and Asai, 2016）。

4.13. 東濃地震科学研究所の瑞浪観測点においては震央距離に関係なく、ある程度大きな地震発生時には常に水位が上昇する、水位応答変化と歪変化の関連およびメカニズムを解明した

東濃地震科学研究所では深部ボアホールに設置したボアホール地殻活動総合観測装置により、歪・傾斜・地震などの総合連続観測を実施している。また、地下水の水位や水圧の観測も実施している。これらの観測計器は日本や外国で発生したある程度大きな地震による変動を記録している。Figure 13 は地震発生時の TGR350 ボアホール観測点（深度 350 m）で観測された水位データの記録で常に水位上昇を示している。この現象のメカニズムを近傍に存在する断層との関連で解明し、水位上昇する歪変化・傾斜変化の閾値も求めた（Asai, 2006; 北海道大学学位論文目録データベース, 2021）。

4.14. 南アフリカ金鉱山の地下（約 3 km）において発生する地震の至近距離における歪変動観測

南アフリカでは金鉱山において地下 3 km を掘削しているがしばしば地震が発生し人的被害も発生する。掘削している近傍において地震が発生するので地震研究に有益なデータが得られると期待できる。立命館大学の小笠原教授を中心として発生する地震の研究を行い、人的被害の軽減にも役立つためのプロジェクトが立ち上げられている。種々の観測の中で筆者らは開発したボアホール歪計による研究に参加している。20 台以上の歪計を地下 3 km 以深の地震発生地点の近傍に埋設・設置して地震に関連したデータの観測を行っている。1 日で 1500 個以上の微小地震や極微小地震が発生し、多くの歪データが蓄積されている。Naoi *et al.* (2006) は地震に関連した歪のステップや前兆に関して詳細に研究した。地震の前兆的歪変化はすべての地震で観測されるわけではないが、地震に関連した変動は以下のような 4 種類の変動 a) with dynamic strain change, b) with static strain change only, c) slow step with forerunner, d) slow step があることを示した。また、例えば観測点から数十メートル離れた位置で発生したマグニチュード 1.6 の地震において前兆的歪変化（加速せず直線的变化）が観測された例もあり、断層の物理を理解する上で重要な観測事実も得られている（小笠原ほか, 2009）。

4.15. 初期応力測定に関すること

第 3 章においてボアホール型インテリジェント歪計（回収型歪計）の開発について述べた。ボアホール地殻活動総合観測装置の埋設・設置の前にこの回収型歪計を埋設・設置し、その後オーバーコアリングにより計器を取り出し in-situ 応力を求め、その後、ボアホール地殻活動総合観測装置を埋設・設置しデータの連続記録を得ることを基本とした。

EPS の論文（Mukai *et al.*, 2007）ではまとめ的にボアホールインテリジェント歪計の原理、オーバーコアリングにより初期応力を求める理論的考察、実際のデータによる解析過程を述べ応力値を求めている。実際に実施した例では異なる場所においてこの論文の説明のように初期応力の大きさと方向の値を求めている。

Ishii *et al.* (2007) は茂住祐延断層近傍において、インテリジェント歪計により in-situ 応力をもとめた。地質学的に破碎部分の応力方向と得られた主応力方向が一致する結果が得られた。屏風山ボアホール観測点（深度：1,020 m）の建設においては、深度 300 m と 700 m においてインテリジェント歪計を用いて in-situ 応力を求めた（石井ほか, 2004b）。山内ほか（2005）はインテリジェント歪計の解説と測定手順を述べ、和歌山県の新宮ボアホール観測点（深

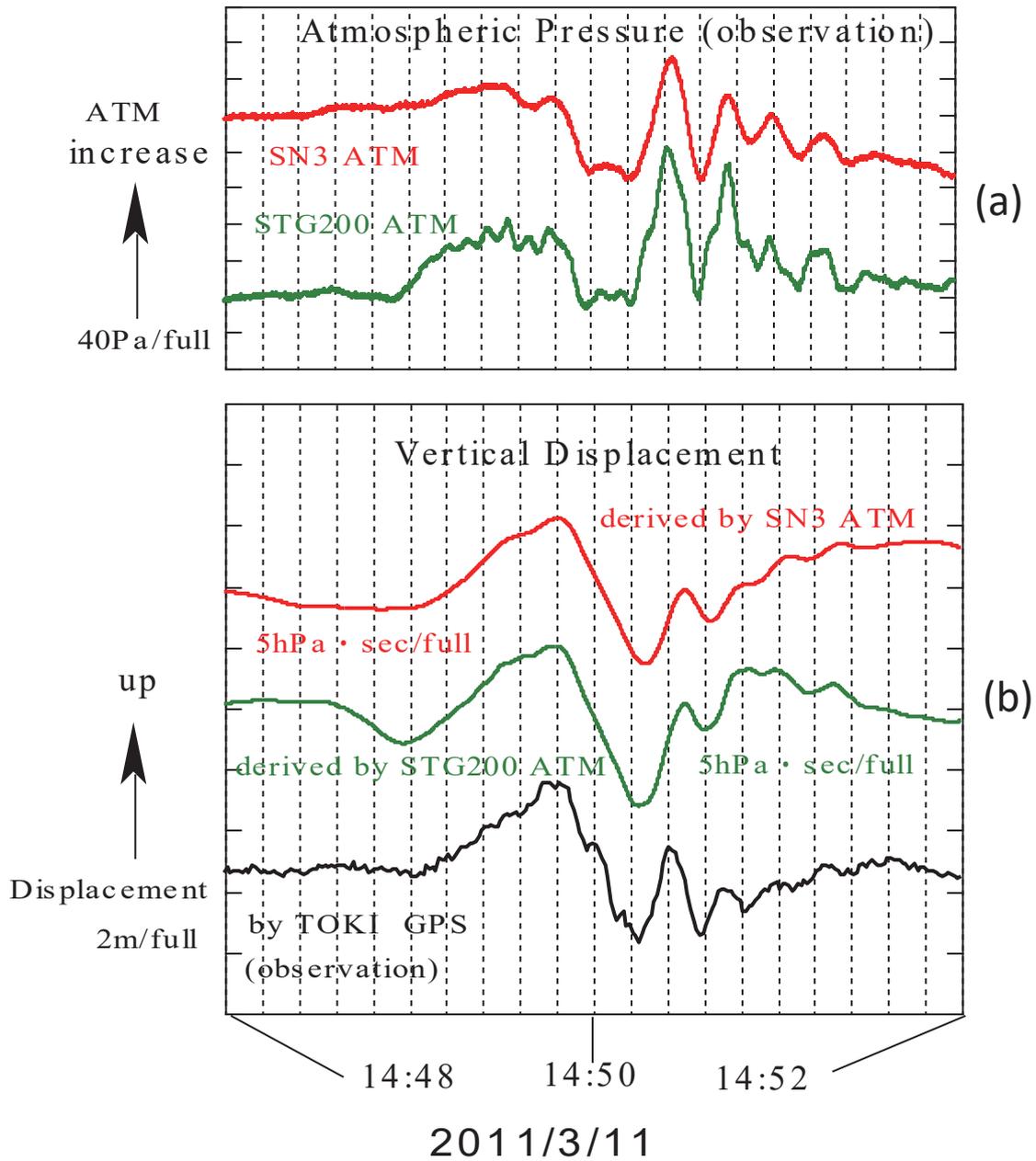


Figure 12: Atmospheric pressure variation due to 2011 Tohoku earthquake. This is the same as Fig.5 in the paper Ishii and Asai (2016).

- (a) Atmospheric pressure variation observed by ordinary barometers in the case of Tohoku earthquake (2011/3/11 M_w 9.0).
- (b) Comparison among curves derived by integration of atmospheric pressures observed and vertical variation of ground observed by GPS observation operated by GSI.

度 520 m) で実施した応力測定結果と同じところで行った水圧破碎による結果と比較し良好な結果を得ている。その他数点において初期応力測定を実施した。

4.16. 地殻変動連続観測による研究・成果に関する考察と議論

前述のように地殻変動連続観測から得られた成果は、横坑による観測よりボアホール観測からが多い。計器の開発

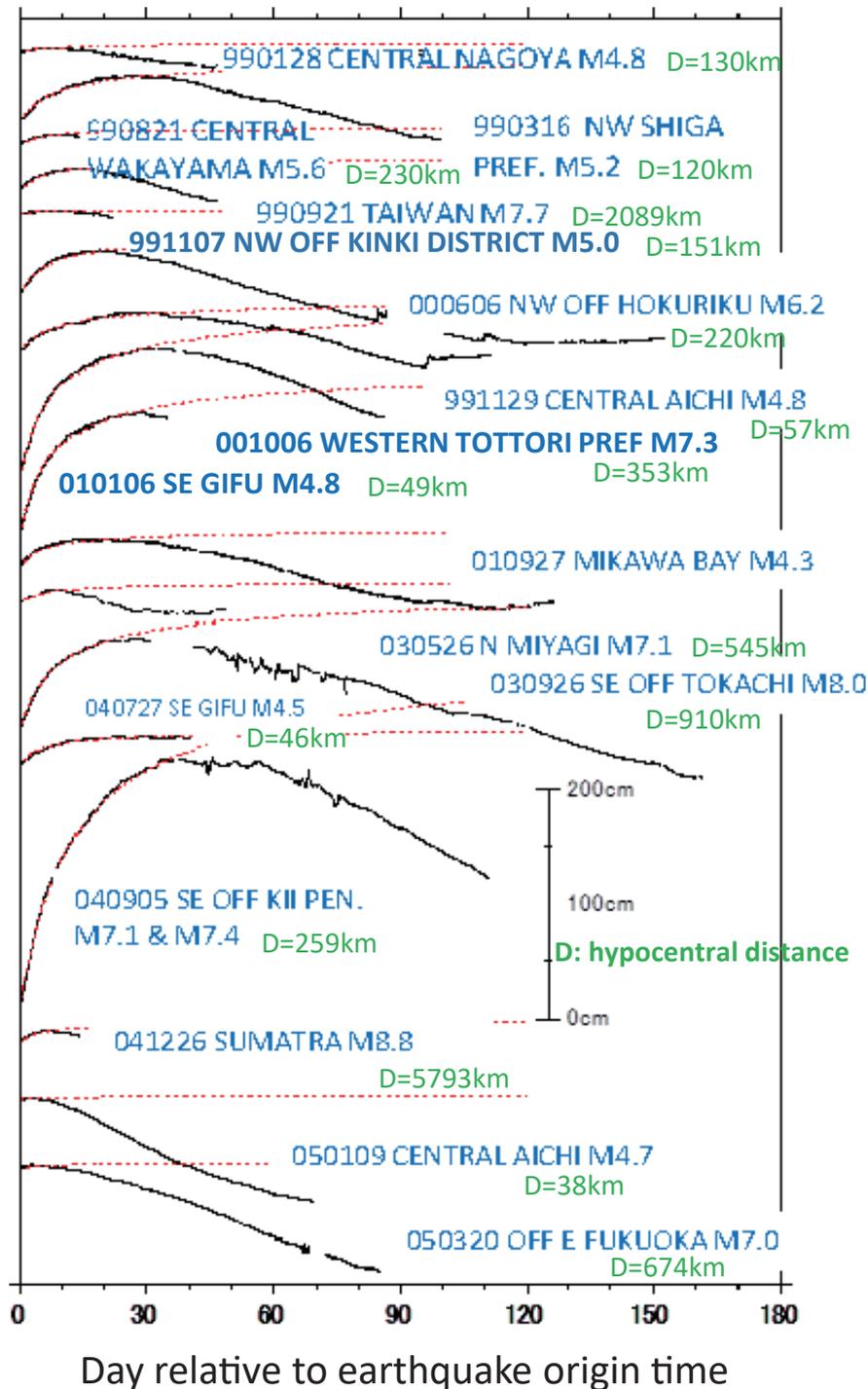


Figure 13: Water level changes observed at TGR350 station when earthquakes occurred in Japan and foreign countries. This figure was reproduced from the paper, Asai (2006).

のみでなくボアホール観測の場合には、埋設・設置方法の検討や開発により良好なデータが得られるようになったことも貢献している。横坑の場合は降雨などによるノイズ、観測点を平地には建設できないため建設場所が制限されていること、及び建設経費が問題となっている。しかしながら寸法の大きな計器を設置できることによる高精度・高分解能の観測や新しい計器の開発場所としての役割等に立つことも多い。著者等により開発されたボアホール計器は

東海・東南海・南海地震のために気象庁や産総研などにより多くの観測点に設置されている。それ等のデータから短期的スロースリップの断層モデルが推定されておりその結果が毎回予知連会報に報告されている。Yamamoto (2007) が指摘しているようにプレート間の短期的スロースリップイベントによる歪変化が捕らえられたことは、観測網が前駆的滑りを検出する能力を有する可能性を示すものと考えられる。静的な歪変動は変位と異なり、距離の3乗で減衰するにもかかわらず、短期的スロースリップイベントによる歪変化が観測できるということは、歪計の感度の良いことを示しているとともに前兆的变化の観測が期待される。著者等により開発されたボアホール地殻活動総合観測装置は東海地方、紀伊半島、四国などに30カ所以上設置されている。観測データは、気象庁における南海トラフ地域のプレート間固着状態の変化を検出するための24時間監視対象データとして活用されている。伊豆群発地震において前兆的变化を見つけたように、できるだけ震源に近いところで深部ボアホールによる信頼性のある観測をすることが重要である。このためには将来の南海地震のための観測点数はまだ不十分である。

地震の前兆現象との関連に関しては伊豆群発地震に関する結果が述べられている。伊豆の場合は「前兆があるのかどうか」「あるとすれば前兆とはどのような変動をするのか」など全然わからなかった。しかし著者らが積極的・意図的に群発地震の震源域にボアホール地殻活動総合観測装置を設置したことにより、歪と傾斜の両方に信頼性のある異常変動が複数回観測され、前兆現象と認識された。前述のようにYamamoto (2007) は「プレート間の短期的スロースリップイベントによる歪変化が捕らえられたことは、観測網が前駆的滑りを検出する能力を有する可能性を示すものと考えられる」と述べている。十分な数の深部ボアホール観測点を建設すれば南海地震に関しても「前兆変動があるのかどうか」「あるとすれば前兆とはどのような変動をするのか」などに対する回答が得られる可能性がある。前兆的歪・傾斜変動が観測される可能性があると考えられる。

また、東北地震の発生によりいろいろな研究が進展した。微気圧計でなく通常の気圧計に地震波による気圧変動が観測され、その変動は上下変動の微分と一致すること、及び気圧変動の積分が上下変動と一致することなどが初めて明らかになった。東北地震のような大地震でも応力計や歪計は高感度成分でスケールアウトすることなく地震波動を記録できることも明らかになった。さらに数倍大きな地震でもスケールアウトすることなく地震動も静的な変動も記録できることが、東北地震による観測データ解析から示された。このことは震源メカニズム解析や津波の予報に関しても重要である。南アフリカの金鉱山に発生する地震を至近距離から歪計で観測することにより、いろいろな前兆変動に関するデータも得られている。また、地下水の変動と地質断層の変動が密接に関係していることが、断層近傍の歪計の観測により示されている。活断層の変動も断層近傍に設置した歪計の観測により検知できることも観測により示された。

このように地殻変動連続観測は地震研究・地震予知研究にもいろいろ貢献していることが明らかになっている。2035年の科学技術の予測が文部科学省から出版されている（文部科学省科学技術政策研究所・未来工学研究所、2005）。それによると防災関連の重要度指数上位20課題に地震関連の3課題が記載されている。それによると、「No. 3: プレート境界地震と内陸地震のそれぞれについて、被害の発生が予想されるマグニチュード7以上の地震発生の切迫度（場所と時期）を人的災害の軽減につながるような高精度で予測する技術：技術的実現時期：2021，社会的適用時期：2030」，「No. 4: 地震予知に利用される地震・地殻変動総合観測装置を大都市，山間部，大陸棚等に均質に密に配置するための技術：技術的実現時期：2010，社会的適用時期：2016」，「No. 7: 地震発生域規模での地殻内の広域応力場の測定を可能にする技術：技術的実現時期：2015，社会的適用時期：2026」と記載されており，地震・地震予知関連は防災関連の重要度の上からNo. 3, No. 4とNo. 7に列挙されている。著者等が行ってきた研究は結果的にこれらの方向に沿った研究となっている。特にNo. 4とNo. 7はまさに指摘されていた研究であるがかなり実現していると考えている。

5. ま と め

地震予知計画開始（1965）後の地殻変動連続観測の観測計器の進展に関しては第3章に述べ、そのまとめと考察は3.5節に述べた。観測計器は時間の経過とともに進展し高精度の記録を得ることができるようになった。しかしながら横坑における観測では降雨などによるノイズの問題や、横坑の建設が平地ではできないなどの問題があった。ま

た、地震発生地域あるいは地殻活動地域の近傍に建設できなかったことなどにより、地震発生に関連した十分な観測成果が得られなかった。このことを考慮して開発・設置されたボアホール計器は平地での設置も可能であり、地震の活動地域や観測必要地域での設置も可能で、地下深部設置のためノイズの問題もないため、多くの成果がえられた。得られた結果を以下にまとめる。

5.1. ボアホール計器の開発により進展したこと

○ボアホール傾斜計・ボアホール歪計・ボアホール応力計などが開発され興味ある結果が得られた。また、複数のセンサーや複数の成分を1台に搭載したボアホール地殻活動総合観測装置の開発により、多くの成果が得られてきた。ボアホールへの計器の設置の場合、均質な岩盤に設置することが良いデータを得るための条件となる。このことを考慮してボアホール計器を均質な岩盤に設置する方法の開発、活断層や地震の震源に近いところへの設置などが成果を得ることにつながった。

5.2. 地震の発生と前兆現象に関連したこと

- ボアホール傾斜計による観測で発見された短期的スロースリップに起因した活動が、著者等により開発された深部ボアホール歪計でも多くの観測点で観測されることが明らかになり、予知連会報にも毎回報告されている。歪観測は発生源の情報を得るのに有力であり、短期的スロースリップに対応した断層モデルも予知連会報には報告されている。地下深部（約 30 km）において発生している短期的スロースリップイベントが観測されていることは、大地震の前駆的滑りが存在すれば検出できる可能性のあることを示すと考えられる。
- 地震発生後に明らかになったことであるが、伊豆の群発地震発生の前兆的傾斜・歪変化が1台のボアホール総合観測装置により複数回観測された。地震の発生域に近いところに深部ボアホール観測点を設置すれば前兆的変動を観測できることを示している。また、1台の計器で複数のセンサーの観測結果を得ることの有効性を示している。
- 南アフリカ金鉱山の地下（約 3 km）において、発生する地震の至近距離（数百 m）における歪変動観測から地震に関連したステップや前兆に関して複数のパターンの存在が示された。断層の物理を理解する上で重要な観測事実が得られた。

5.3. 近傍断層と地下水変動との関連性に関すること

- ボアホール歪計と水位の変動観測から、水の挙動・歪変化と断層運動に関連性のあることが見いだされた。東濃地震科学研究所の近傍に地質断層である NNW 断層が存在している。断層近傍における地下水の水位の上下変動に伴ったボアホール歪計の変動が断層と同じ方向の横ずれ歪変動であることを示した。
- 東濃地震科学研究所において観測している水位変化は、ある程度大きな地震発生時には震央距離に関係なく常に水位が上昇する。そのメカニズムをボアホール歪計・傾斜計のデータを用いて近傍の地質断層との関連から解明した。

5.4. 新しくボアホール応力計を開発し、従来の計器より有利な種々の性能を明らかにしたこと

- 東北地震を記録することにより開発したボアホール応力計が正常に作動していることが明白になった。
- ボアホール応力計・歪計により観測された弾性体力学の不変量に基づき計器の信頼性の確認ができた。
- ボアホール応力計からは応力と歪の両方の情報を得ることができる。応力値は媒質の弾性定数を知ることなしに求められ、応力計による観測は研究に有利であることが明らかになった。
- ボアホール応力計や歪計のダイナミックレンジが広いこと、および東北地震より数倍大きな地震でも高感度成分でスケールアウトすることなく記録できることを明らかにした。

5.5. 断層の変動に関連したこと

- 活断層（茂住祐延断層）の動きを検知できた。破碎帯の活動地域に設置したボアホール歪計が地質学的に指摘されている破碎帯の変動を検知できることが明らかになった。

5.6. 地殻変動連続観測に関連したこと

- 移動性地殻変動（関東，東北）が異なるセンサーにより異なる地域で観測された，横坑の観測から得られた結果である．再現性が望まれるが安定した長期の観測が必要である．
- 地震に関連した変動の観測はほかの地球物理センサーよりボアホールによる地殻変動連続観測の分解能の良いことが明らかになった．複数の異なるセンサーにより伊豆の群発地震に伴う変動が同時期に記録されており容易に比較できた．
- 東北地震発生により地震動とともに気圧計にも変動が観測された．気圧変動を積分すると上下変動が求められることが明らかになった．

5.7. 初期応力測定に関すること

- 開発したボアホール型インテリジェント歪計（回収型歪計）による新しい初期応力の測定方法を開発し，数カ所において初期応力を求めた．応力測定をした後にボアホール地殻活動総合観測装置を埋設・設置し，歪の連続観測から応力の連続観測を実施する方式を提案した．

5.8. 文科省の予測調査に関すること

- 2005年に文科省により発行された「2035年の科学技術予測」に記載されている重要事項に地震関連は3課題が記載されている．地殻変動連続観測に関連した研究は重要課題と指摘されており，予測されている内容に対応して研究が進展していると考えられる．

5.9. 地震予知計画に関して

- 地震予知計画が1965年に開始されてから2020年で55年経過した．計画開始から地殻変動連続観測は観測方式や地震研究との関連に関して研究を進め，地震予知研究が進展してきた．地下深部（約30 km）において発生している短期的スロースリップイベントが地殻変動連続観測により観測されていることは，大地震の前駆的滑りが存在すれば検出できる可能性のあることを示すと考えられる．このような観測を可能にしたのは深部ボアホール観測によるノイズの少ない場所で高感度の観測をしていることによる．このような観測点をさらに広げ地震に関連した多種・多様な微小信号を検知することが地震予知研究を推進すると考える．

6. 将来の地震予知研究についての私見

佐藤ほか（1989）によると応力が地震発生を考えるための最終的に必要な観測量と述べている．したがって地震予知研究に正面から取り組むには，深部ボアホール応力観測により地震発生のポテンシャルの高いところの応力分布を面的に知るとともに，その時間変動をモニターするのが最善の方法と考える．幸いにも連続観測が可能なボアホール応力計を開発できたことにより，地震予知に関する将来像を展望することができるようになった．地震発生ポテンシャルの高いところに応力計を面的に設置し，応力値の大きさとその時間変化を観測する．これから得られることは応力分布の面的コンターとその時間変化である．これは気象予報をするときに気圧分布のコンターとその時間変化から天気予報に関する重要な情報を得ることに相当する．応力成分は6成分存在することは気圧と異なる．すなわちコンターが6種類描けることになる．これにより各成分のコンターの分布の違いから，今後発生する地震の様式を推定する可能性も出てくるということになる．また，応力集中の場所と大きさから，発生する場所と地震の大きさを推定出来る可能性がある．観測点による時間変化の差から発生時に関する情報を得ることができる可能性がある．歪の場合は媒質の弾性定数の違いにより値が異なるのでこのようなことはできないが応力値は媒質の弾性定数を知ることなく求められるからである．

従って安定した応力観測をすることが重要となる．応力計は水圧検定をしており，受圧面に作用する圧力の絶対値を検定している．高感度センサーは0.01 kPa程度以上の分解能がある．今後は二桁程度感度の小さい応力センサーも高感度センサーとともに内蔵する．分解能が1 kPa程度の応力センサーであれば，温度変化もセンサーのドリフ

トも影響するほど大きくない。もちろん実際に観測に使用する場合には低感度センサーといえども検定をする。センサーが埋設・設置されているボアホール地点においては、センサー周辺の温度変化は0.01度以下である。また、ボアホール底に計器を設置するときも、地表から応力計を降下するときセンサーのゼロ調をする必要はない。従って低感度の応力センサーが最終的に設置された状態では受圧面に作用している絶対応力が測定されることになり、1 kPa程度の分解能であれば現状で応力の絶対値を観測できることになる。高感度センサーの絶対値の出発値も明らかになる。受圧面に作用している絶対応力がわかれば、ボアホールの形状やセメントの影響補正を可能にする出発点となる上に、絶対応力変化を利用した活用法が期待される。なお、地震に関連した変動を正確に検知するには、ボアホール応力計の設置は気象の影響に加えて、自由表面や地下水の影響を受けないように、ある程度以上の深度（例えば500 m）に設置することが重要と考える。以上のことを実行する上で最大の問題点は深部ボアホールを掘削する経費がボアホール計器の製作費より数倍もかかるということである。

以上は地震予知研究を進めるための著者の個人的考えの一例である。

謝 辞

産業技術総合研究所の板場智史博士および匿名の査読者からは多くの有益なコメントや御指摘をいただき論文の質の向上に役立ちました。記して感謝いたします。

このような小論を書くことができたのは著者が東北大学、東京大学地震研究所、東濃地震科学研究所に在職中、地殻変動研究グループの有能な仲間恵まれ、研究を進めることができたことによっています。心より感謝いたします。特に東北大学では故高木章雄教授の御指導、佐藤俊也技官、東京大学地震研究所では故松本滋夫技官、東濃地震科学研究所では浅井康広博士との共同研究・共同作業により、多くの有益な結果を得ることが出来ました。山内常生博士にも計器の開発や研究を進める上でいろいろお世話になりました。

新しい計器の設計・開発には(有)テクノ菅谷の菅谷日出夫氏に相談に乗っていただきました。計器の磁気センサー、電子回路やシステム構成に関しては(株)マコメ研究所の大西正臣氏、(有)システム技電の舛田敏治氏との議論により改良することができました。ボアホール計器およびその設置に関しては(株)明豊エンジニアリングの故佐藤孝雄氏にもいろいろ相談に乗っていただきました。ボアホール計器の設置方法の改良などに関しては住鉱資源開発株式会社からいろいろ助言をいただきました。記して感謝いたします。

ボアホール計器の開発は著者が1985年1月に東京大学地震研究所に転勤してから始めました。その後、東濃地震科学研究所に勤務してからは、改良と新しくボアホール応力計の開発を進めるとともに、ボアホール計器の埋設・設置に関するノウハウを完成することが出来ました。

著者が開発したボアホール計器は製作改良に融通の利く町工場が開発・製作してきましたが、今後の後継者など継続・開発に関して問題があります。

東濃地震科学研究所の運営は文部科学省・経済産業省の補助金で行われました。また、東濃地科学センター深地層研究所の立坑を利用させていただき、ボアホール計器の設置・改良・開発実験などボアホール計器の開発・進展に大いに役立ちました。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 明石和彦・福尾信平(1977): ボアホール型地震計及びひずみ計, 精密機械, **43**, 111-117.
- Agnew D. (2007): Before PBO: An Overview of Continuous Strain and Tilt Measurements in the United States, *J. Geod. Soc. Japan*, **53**, 157-182.
- Araya, A., W. Morii, H. Hayakawa, A. Takamori, T. Uchiyama, M. Ohashi, I. Yamada, S. Terada, and S. Takemoto (2007): Broadband observation with laser strainmeters and a strategy for high resolution long-term strain observation based on quantum standard, *J. Geod. Soc. Japan*, **53**, 2, 81-97.
- Araya, A., A. Takamori, W. Morii, H. Hayakawa, T. Uchiyama, M. Ohashi, S. Telada and S. Takemoto (2010): Analyses of far-field coseismic crustal deformation observed by a new laser distance measurement system, *Geophys. J. Int.*, **181**, 127-140.
- Asai Y. (2006): Study on the Mechanism of Co-seismic Groundwater Level Changes. Doctorial Theses of Hokkaido Univ.
- 江頭庸夫(1965): 日記水管傾斜計, 京都大学防災研究所年報, **8**, 59-69.
- Gladwin, M. T. (1984): High-precision multi component borehole deformation monitoring, *Rev. Sci. Instrum.* **55**, 2011-

2016.

- Hagiwara T., T. Rikitake and J. Yamada (1949a): Observations of the deformation of the earth's surface at Aburatsubo, Miura Peninsula. Part I, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **26**, 23–26.
- Hagiwara T., T. Rikitake, K. Kasahara and J. Yamada (1949b): Observations of the deformation of the earth's surface at Aburatsubo, Miura Peninsula. Part II, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **27**, 35–38.
- Hashimoto M. (2007): Intrinsic Difficulties in the Strategy of Crustal Deformation Research Based on Continuous Observation in Vaults for Earthquake Prediction, *J. Geod. Soc. Japan*, **53**, 183–195.
- 北海道大学学位論文目録データベース (2021): https://www2.lib.hokudai.ac.jp/gakui/2005/6411_asai.pdf (参照 July 1, 2020).
- 石井 紘・佐藤俊也・立花憲司 (1973): 秋田地殻変動観測所における地殻変動観測, *測地学会誌*, **19**, 135–144.
- 石井 紘・佐藤俊也・立花憲司 (1977a): 水管傾斜計の特性について (1) – 静特性 –, *測地学会誌*, **23**, 88–98.
- 石井 紘・佐藤俊也・立花憲司 (1977b): 水管傾斜計の特性について (2) – 動特性 –, *測地学会誌*, **23**, 99–109.
- Ishii, H., T. Sato and A. Takagi (1978): Characteristics of Strain Migration in the Northeastern Japanese Arc (1) – Propagation Characteristics –, *Sci. Rep. Tohoku Univ., Fifth Ser., Geophysics*, **25**, 83–90.
- Ishii, H., A. Takagi and Z. Suzuki (1979): Characteristic movement of crustal deformation in northeast Honshu, *Gerlands Beitr. Geophys.*, **88**, 163–169.
- Ishii, H., T. Sato and A. Takagi (1980): Characteristics of Strain Migration in the Northeastern Japanese Arc (11) – Amplitude Characteristics –, *J. Geod. Soc. Japan*, **26**, 17–25. [Doi.org/10.11366/sokuchi1954.26.17](https://doi.org/10.11366/sokuchi1954.26.17).
- Ishii H. and T. Kato (1989): Detectabilities of Earthquake Precursors using GPS, EDM and Strain Meters, with Special Reference to the 1923 Kanto Earthquake, *J. Geod. Soc. Japan*, **35**, 75–83.
- 石井 紘・松本滋夫・鈴木喜吉・平田安廣・高橋辰利・若杉忠雄・渡辺 茂・加藤照之 (1992): 震研 90 型水管傾斜計の開発と観測—メカニカルな拘束のないフロート型—, *地震研究所彙報*, **67**, 79–87.
- 石井 紘・中尾 茂・松本滋夫・平田安廣 (1998): ボアホール地殻活動総合観測装置で観測された伊豆半島東方沖群発地震の前兆的地殻変動, *東京大学地震研究所特定共同研究「地下深部における地殻変動連続観測に向けて」研究会集録*, 47–51.
- 石井 紘・山内常生・松本滋夫 (2001): 最新の地震・地殻変動計測システムによる地震前兆現象の検出, *月刊地球 / 号外 No. 33*, 188–196.
- Ishii, H., T. Yamauchi, S. Matsumoto, Y. Hirata, and S. Nakao (2002): Development of multi-component borehole instrument for earthquake prediction study: some observed example of precursory and co-seismic phenomena relating to earthquake swarms and application of the instrument for rock mechanics, *Seismogenic Process Monitoring, Balkema, The Netherlands*, 365–377.
- 石井 紘 (2004): アメリカの Earth Scope 計画と地殻変動観測について, *東濃地震科学研究所報告*, **14**, 53–64.
- 石井 紘・浅井康広・大久保慎人・山内常生・柳谷 俊・加納靖之 (2004a): 計器長 1.2 km 相当の伸縮計・歪地震計の開発とその威力について, 2004/10 秋季地震学会.
- 石井 紘・山内常生・松本滋夫・浅井康広 (2004b): 深部ボアホールを用いた応力解放による応力測定法と結果の解析について, 一屏風山断層近傍 1000m ボアホールでの測定を例にして一, *月刊地球*, **26**, 2, 66–73.
- 石井 紘・山内常生 (2007): 地殻活動総合観測システムの開発と観測された成果および今後の連続観測について, *測地学会誌*, **53**, 99–111.
- 石井 紘・浅井康広・大久保慎人・尾上謙介・青木治三 (2007): 鉛直伸縮計の開発と観測, *Japan Geoscience Union Meeting, D107-P004*.
- Ishii, H., T. Yamauchi, Y. Asai, S. Matsumoto and A. Mukai (2007): Interesting phenomena detected by the continuous observation of strain and in-situ stress measurements in the vicinity of the active Mozumi-Sukenobe Fault, *Geodynamics of Atotsugawa Fault System*, edited by M. Ando, TERRAPUB, 157–162.
- 石井 紘 (2008): 断層は通常どのようにふるまっているか, *東濃地震科学研究所報告*, **23**, 151–158, <www.tries.jp/research/doc/2020032710031153_47.pdf> (参照 June 18, 2020).
- 石井 紘 (2010): 応力連続観測と今後の地震予知研究, *地震ジャーナル*, **50**, 73–77.
- 石井 紘・浅井康広・板場智史・村瀬昭彦・新井栄作 (2013): 深度測定システム及び深度測定方法, 特許第 5283144 号.
- Ishii, H. and Y. Asai (2015): Development of a borehole stress meter for studying earthquake predictions and rock mechanics, and stress seismograms of the 2011 Tohoku earthquake (M9.0), *Earth, Planets and Space*, **67**:26. doi:10.1186/s40623-015-0197-z.
- 石井 紘 (2016): 地震予知計画発足 (1965) 以来の地殻変動連続観測の流れ, *東濃地震科学研究所報告*, **36**, 1–44. <www.tries.jp/etc/doc/2016061013035347_10.pdf> (参照 June 18, 2020).
- Ishii, H. and Y. Asai (2016): Characteristics of the stress and barometric seismograms produced by the 2011 Tohoku Earthquake (M9.0) and vertical movements derived from barometric seismograms, *Earth Planets and Space* **68**: 61, doi:10.1186/s40623-016-0434-0.
- 石井 紘・浅井康広 (2017): ボアホール歪・応力観測計器により観測された弾性体力学の不変量と計器の信頼性, *地震*, **69**, 49–58. doi:10.4294/zisin.69.49.
- 石井 紘・浅井康広・古本宗充 (2019): 連続観測用ボアホール応力計で観測される応力・歪の観測レンジは如何に広い? — 長周期地震計の波形および GNSS データとの比較から得られた観測データの特徴, *地震*, **71**, 139–149. doi:10.4294/zisin.2018-3.
- 石井 紘・浅井康広 (2019): 連続観測用ボアホール応力計の特徴に関するまとめと考察 — 応力と歪を観測・応力は岩盤の弾性定数に無関係・二次元不変量と鉛直成分の相似・分解能とダイナミックレンジ —, *地震*, **72**, 43–51. doi:10.4294/

- zisin.2018-9.
- 石井 紘・浅井康広・笠原 稔 (2020): 変位拡大システムの開発と適用例－小型歪地震計の開発, 東濃地震科学研究所報告, **44**, 63–67.
- Ishimoto M. (1927): Observations sur les variations de l'inclinaison de la surface Terrestre, (premier rapport) (地表の傾斜の変化について), Bull. Earthq. Res. Inst., **2**, 1–12.
- Itaba S., N.Koizumi, N.Matsumoto and R. Ohtani (2010): Continuous Observation of Groundwater and Crustal Deformation for Forecasting Tonankai and Nankai Earthquakes in Japan, Pure and Applied Geophysics, **167**, 1105–1114, doi 10.1007/s00024-010-0095-z.
- Itaba S. and R. Ando (2011): A slow slip event triggered by teleseismic surface waves, Geophys. Res. Lett., **38**, L21306, doi:10.1029/2011GL049593.
- 板場哲史・北川有一・小泉尚嗣・高橋 誠・松本則夫・武田直人・木村尚紀・木村武志・松沢孝紀・汐見勝彦 (2013): 東海・紀伊半島・四国における短期的スロースリップイベント (2012年5月～10月), 地震予知連絡会報, **89**, 226–238.
- Itaba S. (2018): Rapid estimation of the moment magnitude of the 2011 Tohoku-Oki earthquake (Mw 9.0) from static strain changes: Earth Planets Space, **70**, 124, doi.org/10.1186/s40623-018-0894-5.
- 地震調査研究推進本部 (2020), データベース, <<https://www.jishin.go.jp/database/>>, (参照 June 18, 2020).
- 地震研究所・笠原慶一・山田重平・高橋辰利 (1973): 小田原観測坑井とブイ傾斜計, 地震予知連絡会報, **10**, 51–56.
- 地震予知連絡会 (2000): 地震予知_現状とその推進計画, 地震予知連絡会 30年のあゆみ, 国土地理院, 505–540.
- Kasahara, K. (1979): Migration of crustal deformation, Tectonophysics, **52**, 329–341.
- 笠原 稔・岡山宗夫・一柳昌義・高田真秀・山口照寛 (2007): 北海道大学における地殻変動連続観測, 測地学会誌, **53**, 349–357.
- 加藤正明・津嶋吉男 (1973): 差動トランス型水管傾斜計の試作, 京都大学防災研究所年報, **16B**, 55–63.
- 北川有一・小泉尚嗣・大谷 竜・渡辺邦彦・板場哲史 (2003): 山崎断層沿いの産業技術総合研究所安富観測点で観測された顕著な地殻歪変化, 地震, **56**, 245–254. doi.org/10.4294/zisin1948.56.3_245.
- 小林昭夫・山本剛靖・中村浩二・木村一洋 (2006): 歪計により観測された東海地域の短期的スロースリップ (1984～2005年), 地震, **59**, 19–27.
- 川崎一朗 (2007): 地球物理サイドから見た地殻変動連続観測の存在意義, 測地学会誌, **53**, 369–377.
- 気象庁 (2019): 南海トラフ周辺の地殻活動 (2018年11月～2019年4月), 地震予知連絡会会報, **102**, 230–263.
- 国土地理院・地震予知総合研究振興会 (1993): 地殻変動観測施設要覧, 491p.
- Lighthill, J. (1978): Waves in Fluids, Cambridge Univ. Press, New York.
- 松本則夫 (2017): 陸上ボアホール地殻変動観測による震源のモニタリング, 地震予知連絡会報, **97**, 534–538.
- 嶺永 治・田中和夫・村上栄寿 (1972): フロートを用いた水管傾斜計について, 東北地域災害科学研究 (昭和46年度), 97–103.
- 三品正明 (2007): 東北大学における地殻変動連続観測, 測地学会誌, **53**, 359–368.
- 文部科学省科学技術政策研究所・未来工学研究所 (2005): 文部科学省デルファイ調査 2035年の科学技術, 文部科学省, 1158p.
- Morita Y., S. Nakao, Y. Hayashi (2006): A quantitative approach to the dike intrusion process inferred from a joint analysis of geodetic and seismological data for the 1998 earthquake swarm off the east coast of Izu Peninsula, central Japan, J. Geophys. Res., **111**, B06208, doi:10.1029/2005JB003860.
- Mukai, A., T. Yamauchi, H. Ishii, and S. Matsumoto (2007): In situ stress measurement by the stress relief technique using a multi-component borehole instrument, Earth Planets Space, **59**, 133–139.
- 中根勝見 (1978): 1923年関東地震に伴う二等三角点の変位の再計算, 測地学会誌, **24**, 214–225.
- Naoi, M., H. Ogasawara, J. Takeuchi, A. Yamamoto, N. Shimoda, K. Morishita, H. Ishii, S. Nakao, G. van Aswegen, A. Mendecki, P. Lenegan, R. Ebrahim-Trollope, and Y. Iio (2006): Small slow-strain steps and their forerunners observed in gold mine in South Africa, Geophys. Res. Lett., **33**, L12304, doi:10.1029/2006GL026507.
- Obara, K. (2002): Nonvolcanic deep tremor associated with subduction in southwest Japan, Science, **296**, 1679–1681, doi:10.1126/science.1070378.
- 小原一成 (2007): 深部低周波微動に同期する短期的スロースリップイベントの検出—防災科研 Hi-net 傾斜観測による成果—, 測地学会誌, **53**, 25–34.
- 岡田義光・石井 紘 (2000): 伊豆半島東部における地殻活動, 地震予知連絡会 30年のあゆみ, 国土地理院, 210–220.
- Okada, Y., E. Yamamoto and T. Ohkubo (2000): Coswarm and preswarm crustal deformation in the eastern Izu Peninsula, central Japan, J. Geophys. Res., **105**, 681–692.
- 小笠原 宏・川方裕則・石井 紘・中谷正生・矢部康男・飯尾能久・南アフリカ金鉱山における半制御地震発生実験国際共同研究グループ (2009): 南アフリカ金鉱山における半制御地震発生実験 —至近距離観測による地震発生過程の解明に向けて—, 地震, **62**, S563–S573.
- Queitsch M., G. Jentzsch, A. Weise, H. Ishii and Y. Asai (2014): Pumping Induced Pore Pressure Changes in Tilt Measurements Near a Fault Zone in Mizunami, Japan, C. Rizos and P. Willis (eds.), *Earth on the Edge: Science for a Sustainable Planet*, International Association of Geodesy Symposia 139, DOI 10.1007/978-3-642-37222-3_14, © Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Sacks, I. S., S. Suyehiro, D. W. Evertson and Y. Yamagishi (1971): Sacks-Evertson strainmeter, its installation in Japan and some preliminary results concerning strain steps, Pap. Meteorol. Geophys., **22**, 195–208.
- Sakata S. and H. Sato (1986): Borehole-type tiltmeter and three-component strainmeter, J. Phys. Earth, **34**, Suppl., S129–S140.
- 産業技術総合研究所・防災科学技術研究所 (2019): 東海・紀伊半島・四国における短期的スロースリップイベント (2018年11

- 月～2019年4月), 地震予知連絡会会報, **102**, 184 - 201.
- 佐野 修 (2018): 新開発ボアホール応力計の信頼性評価について - 理論地震波形との比較 -, 東濃地震科学研究所報告, **40**, 27-36.
- 佐藤春夫・高橋博・山本英二・福尾信平・上原正義・寺尾康夫 (1980): 孔井用傾斜計による地殻傾斜観測方式の開発, 地震, **33**, 343-368.
- 佐藤良輔 編著 (1989): 日本の地震断層パラメータ・ハンドブック, 鹿島出版, 300p.
- 瀬野徹三 (2005): 世界のプレート運動, 地学雑誌, **114** (3), 350-366.
- 竹内竜史 (2006): 地下水長期モニタリングによる地下水流動特性の評価に関する研究, 岡山大学博士論文, http://ousar.lib.okayama-u.ac.jp/files/public/5%2F54347/20160915170521858152/K0005364_fulltext.pdf
- 志知龍一・奥田 隆・吉岡茂雄 (1980): フロート変位型自記水管傾斜計の製作, 測地学会誌, **26**, 1-16.
- 竹本修三 (2007): 京大の地殻変動研究短評, 測地学会誌, **53**, 123-133.
- 田中寅夫 (1979): 傾斜計・伸縮計に現れる降雨の影響とそのシミュレーション, 測地学会誌, **25**, 91-100.
- 東京大学地震研究所技術部 (1973): フロート型自記水管傾斜計の試作, 東京大学地震研究所速報, **16**, 1-8.
- 東京大学地震研究所 (1988): 地震予知観測情報センターニュース No. **15**, 194p.
- 東京大学地震研究所 (1998): ボアホール地殻活動総合観測装置で観測された伊豆半島東方沖群発地震, 地震予知連絡会報, **60**, 256-261.
- 東濃地震科学研究所 (2015): 東濃地震科学研究所パンフレット, <www.tries.jp/activity/doc/2016052314301179_2.pdf>, (参照 July 1, 2020).
- 坪井忠二・和達清夫・萩原尊礼 (地震予知計画研究グループ 世話人) (1962): 地震予知 - 現状とその推進計画 -, 1-32.
- Watada Y, Kunugi T, Hirata K, Sugioka H, Nishida K, Sekiguti S, Oikawa J, Tsuji Y and Kanamori H (2006) : Atmospheric pressure change associated with the 2003 Tokachi-Oki earthquake, *Geophys Res Lett.*, **33**:L24306. doi:10.1029/2006GL02796.
- 山田重平 (1973): 水管傾斜計によって観測された地殻変動, 地震研究所研究速報, **10**, No. 1, 1-147.
- Yamamoto T. (2007) : Continuous Observation of Crustal Movement by the Japan Meteorological Agency, *J. Geod. Soc. Japan*, **53**, 147-156.
- 山内常生・山田 守 (1974): フロートを用いた自動水管傾斜計による傾斜変化の観測, 測地学会誌, **20**, 57-64.
- 山内常生 (1981) : 降雨に対する地殻歪レスポンスのシミュレーション, 測地学会誌, **27**, 40-49.
- 山内常生・山田 守 (1992) : 容量変化による水管傾斜計, 測地学会誌, **38**, 1-6.
- 山内常生・石井 紘・松本滋夫 (2004): 深いボアホール (深度 1 km 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**, No. 2, 74-79.
- 山内常生・石井 紘・浅井康広・大久保慎人・松本滋夫・吾妻瞬一 (2005): 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, **58**, 1-14.
- 山内常生 (2007): 坑道を利用する諸観測装置の開発と地震予知に関わる成果, 測地学会誌, **53**, 135-146.

15.3 今後の地震予知研究に関する私見 —地殻変動連続観測研究および東濃地震科学研究所に

おける計器開発研究の経緯から—

石井 紘

1962年に地震予知計画のブループリントが作成され（坪井ほか, 1962; 地震予知連絡会, 2000）, その中に地殻変動の連続観測も地震予知研究にとって重要推進項目として記されている。その後、1965年に地震予知計画が開始された。筆者は当初から地震予知計画の地殻変動連続観測に携わることになった。計画では横坑の中に伸縮計と水管傾斜計を設置することが基本とされた。当時地殻変動連続観測点は数えるほどしか存在しなかったがその後、観測点は増加し観測計器も進歩した。しかしながら地震発生前の変動は観測されなかった。その上、横坑の観測ではトンネルの被りが浅いため降雨や気象の影響を受ける観測点もあり、地震発生前の変動を観測する上で重大な問題点となっていた（石井, 2021）。

1985年に筆者は東北大学から東京大学地震研究所に転勤になった。それを機会にボアホール観測計器の開発を進めた。当時、ボアホール歪計やボアホール傾斜計なども若干、開発されていた。筆者が考慮したことは1台の計器で高精度・多種類・多成分の観測を可能にし、深いボアホールでの観測も可能で安価な計器であった。歪計に関しては容器の変形を拡大する機構を開発し高精度の歪観測を可能にした。傾斜計に関しては従来の減衰機構としてのシリコンオイルを使用しないタイプで取り扱い容易な計器を開発した。これらの計器のほかに市販の地震計、磁力計、高精度温度計も搭載しボアホール地殻活動総合観測装置として1台で総合観測が可能な計器を開発した（石井, 2021）。総合観測装置の設置もできるだけ地殻活動の活発な場所に設置することを考えた。そのために最初に伊豆半島の群発地震が発生する場所に設置した。伊豆半島では群発地震がしばしば発生し最大地震もM6弱程度の地震が発生していた。地震後に明らかになったことであるが3回の異なる群発地震において歪計と傾斜計に前兆的変動を観測することが出来た。傾斜計は群発地震の発生前の前兆的変化を、歪計は最大地震発生前の前兆的変化を観測していたことが明らかになった。

2001年から筆者は東京大学地震研究所から東濃地震科学研究所勤務になった。地震は岩盤の破壊である。物質が壊れる前には必ず前兆的変動が発生すると考えられる。我々の身の周りでも物が壊れる前には予兆がみられる。筆者等が開発した総合観測装置は気象庁や産総研等により、東海・東南海・南海地域に30カ所程度設置され気象庁にオンラインで伝送され予知連にも観測結果が報告されるようになった。それによると深度30km程度で発生する短期的SSEに伴う傾斜・歪変動も観測されている。この事実は南海地震などの巨大地震の発生前の前兆的変化を観測できる可能性を示唆している。このような事実を考慮して地震予知を可能にするかもしれない方策について個人的に検討した結果を述べる。

地震予知研究には多種類の観測データを得ることが重要である。その中でも特に応力観測の情報が重要である。歪データは媒質の弾性常数の違いにより値が異なるし、傾斜データだけでは地震の発生メカニズムの推定には情報不足である。地震予知研究に正面から取り組むには、地震発生のポテンシャルの高いところの応力分布を面的に知るとともに、その時間的変動をモニターするのが最善の方法と考える。気象予報においては特に気圧分布とその時間変化の情報が重要な役割を果たしている。気象予報の精度が格段に向上したのはそれらの観測精度が向上したことと理論的研究の進歩によっている。

幸いにも東濃地震科学研究所において連続観測が可能なボアホール応力計(Ishii & Asai, 2015)を開発できたことにより、地震予知に関する将来像を展望することができるようになった。地震発生ポテンシャルの高い地域に応力計を面的に設置し、応力値の大きさとその時間変化を観測する。これから得られることは応力分布の面的コンターとその時間変化が得られる。これは気象予報をするときに気圧分布のコンターとその時間変化から天気予報に関する重要な情報を得ることに相当する。気象の場合と異なり応力成分は6成分存在する。すなわちコンターが6種類描けることにな

る。これにより各成分のコンターの分布の違いから、今後発生する地震の様式を推定する可能性も出てくる。また、場所による応力集中の大きさの差から、発生する場所を推定出来る可能性がある。観測点による時間変化の差から発生時期に関する情報を得ることが出来る可能性がある。歪の場合は媒質の弾性定数の違いにより値が異なるのでこのようなことはできないが応力値は媒質の弾性定数を知ることなく求められるからである。

従って安定した応力観測をすることが重要となる。応力計は水圧検定をしており、受圧面に作用する圧力の絶対値を観測している。高感度センサーは 0.01kPa 程度以上の分解能がある。今後は二桁程度感度の小さい応力センサーも高感度センサーとともに内蔵する。分解能が 1 kPa 程度の応力センサーであれば、温度変化もセンサーのドリフトも影響するほど大きくない。もちろん実際に観測に使用する場合には低感度センサーといえども検定をする。センサーが埋設・設置されているボアホール地点においては、深部に埋設されたセンサー周辺の温度変化は 0.01 度以下である。また、ボアホール底に計器を設置するときも、地表から応力計を降下するとき低感度センサーのゼロ調をする必要はない。従って低感度の応力センサーが最終的に設置された状態では受圧面に作用している絶対応力が測定されることになり、1kPa 程度の分解能であれば現状で応力の絶対値を観測できることになる。また、高感度センサーの絶対値の出発値も明らかになる。受圧面に作用している絶対応力がわかれば、ボアホールの形状やセメントの影響補正を可能にする出発点となる上に、絶対応力変化を利用した活用法も期待される。なお、地震に関連した変動を正確に検知するには、ボアホール応力計の設置は気象の影響に加えて、自由表面や地下水の影響を受けないように、ある程度以上の深度（例えば 500 m）に設置することが重要と考える。以上のことを実行する上で最大の問題点は深部ボアホールを掘削する経費がボアホール計器の製作費より数倍もかかるということである。

以上は地震予知研究を進めるための著者の個人的考えの一例である。

坪井忠二・和達清夫・萩原尊礼（地震予知計画研究グループ 世話人）(1962): 地震予知—現状とその推進計画—, 1-32.

地震予知連絡会 (2000): 地震予知_現状とその推進計画, 地震予知連絡会 30 年のあゆみ, 国土地理院, 505-540.

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(2021)、測地学会誌、67、印刷中

Ishii, H. and Y. Asai (2015): Development of a borehole stress meter for studying earthquake predictions and rock mechanics, and stress seismograms of the 2011 Tohoku earthquake (*M*9.0), *Earth, Planets and Space*, 67:26. doi:10.1186/s40623-015-0197-z.

資料

- 16. 資料.
- 16.1 東濃地震科学研究所発足の頃 初代研究所長 青木治三
- 16.2 十字アレー地殻活動総合観測網 観測点リスト
- 16.3 定林寺ボアホール観測点：ボアホール構造と総合観測装置
- 16.4 陶史の森ボアホール観測点：ボアホール構造と総合観測装置
- 16.5 歴代運営委員会委員
- 16.6 歴代中間評価委員会委員
- 16.7 職員履歴
- 16.8 研究所パンフレット
- 16.9 東濃地震科学研究所のボアホール観測網

16.1 東濃地震科学研究所発足の頃

初代研究所長 青木治三

1995年1月17日早朝の兵庫県南部地震(マグニチュード7.3)の大地震は神戸や淡路島を中心に甚大な被害をもたらしたが、我が国の地震予知計画にも抜本的な反省を迫ることになった。それ以前にも、奥尻島に予想外の津波をもたらした1993年北海道南西沖地震(マグニチュード7.8)で第7次地震予知計画のあり方に警告を与えていた。元より内陸地震の予知は極めて難しく、観測体制も整っていない状況で、当面は予想されている東海地震に重点を置かざる得ない状況であった。しかし世論は、また多くの地震研究者の中にも、未だ起きてもない東海地震の予知も失敗した、という厳しいものであった。

これを機に地震防災計画が推進されるようになったのはご存知の通りである。観測面では、予知については諦めても体制は強化せよとのことである。全国に稠密な地震観測網を展開するなどという大規模な計画は大学のように個人ベースに近い機関には無理である。科学技術庁を中心に推進されることになった。

一方、地方自治体でも地震対策が重要視されるようになっていく。活断層の密集地域である岐阜県では猶更である。それで東濃に地震観測所をという動きが出てきたらしい。地震予知総合研究振興会を通じてその話が、当時名古屋大学を定年退官し、地震予知計画の後始末もほぼ終了していた私にも流れてきた。地震研究のように利益を生まない研究所が民間の組織で可能かどうかも判らない。

それとは別に、私には大学でやり残したことがあった。地震予知計画が始まって以来、地元の地震活動や地殻変動の観測に携わってきたのであるが、中津川や多治見を含む東濃地域には特別な興味をもっていった。有名な阿寺断層があったからである。この断層は超A級の活断層であるが地震がない。少ないのではなく、無いのである。マグニチュード8の濃尾地震の余震が今も続く根尾谷断層とは対照的であり、1586年天正地震の震源かも知れないという阿寺断層は重大関心事であった。そのため現地には時々移動観測班も出していたのであるが、地元からは「こんな地震の少ないところへなんで来るの?」と言われたこともある。また、1984年、御嶽山を襲った長野県西部地震(マグニチュード6.8)は御嶽山の東麓、阿寺断層は西山麓を通る。両者を結ぶ長さ10kmの白巣峠断層という活断層も報告されているので余震観測時には特に注意していたが、地震活動は皆無に近い。余震が一つ観測されただけであった。当時、同僚が阿寺断層で水準測量を繰り返していたが、何らの変化も認められない。これが気になっていたのである。

岐阜県との話し合いで、岐阜県も東濃に特に興味あることが判った。副知事の話によると東濃地域に首都機能の一部を移転する計画があるとのこと、1992年首都機能移転法という超党派の議員立法で準備が進んでいたのである。1999年には栃木・福島と岐阜・愛知にほぼ絞られていた。地震と首都機能と何の関係があるか知らないが、とにかく東濃は注目されていた。どちらが適地か選択の作業に入る直前だったのである。実際に現地調査がなされたのは東濃地震科学研究所が設置されたあとである。後になって、東京都知事選があり、石原慎太郎候補が絶対反対と一蹴、2002年には「候補地を絞り込めず」との結果で首都機能移転は事実上凍結宣言となったことがある。1998年、東濃地震科学研究所は屏風山断層でパイプロサイズによる地下構造調査中だったのであるが、地元では首都機能移転の調査と受け止められていたようである。岐阜県は首都機能、研究所は地下構造調査と同床異夢であったが話がまとまり、とにかく、現地調査をということになった。多治見市か土岐市と考えていたが、事実上場所は決まっていたようだ。車は土岐市を通り過ぎて瑞浪市内に向かっている。到着したのは瑞浪市民公園であるのにはビックリした。そこには名古屋大学の瑞浪地殻変動観測点がある。研究所の当面の予定地も同公園内の化石博物館の一角であった。実はその博物館を支援しているのは名大理学部の地史学教室である。これで場所は決まった。瑞浪市は非常に好意的で研究所の設置・運営には大変お世話になった。

地震研究所において地震の研究をどのように進めるかが問題であった。阪神大震災の頃の地震予知事業に少し触れておこう。地震予知計画は当初地震予知研究計画として開始されたのであるがいつのまにか研究の2字が消えていた。先ず開始したのは地震観測点の展開である。1964年新潟地震、1965年からの松代群発地震で微小地震観測や地殻変動観測点の設置は各地で加速されたが、1995年の阪神大震災の頃には地震前兆現象の少なさ、高感度地震観測の高密度化の必要性、地殻変動観測のノイズ等の問題がでていた。阪神大震災の直後、何かの席上で、

断層に極めて近い六甲の地殻変動観測に前兆の有無を尋ねたところ「全くありません（京大）」、神戸の地下構造については「全く判りません（地質調査所）」ということであった。

科技庁は高感度地震観測の全国展開を図ったのであるが、地殻変動観測については特に何もなかった。むしろ信用できないという悲観論である。これが岐阜県に地震研究所を設置する頃の事情である。当然のことながら岐阜県に設置する研究所の狙いは、狭い東濃の地域に高密度地震観測網の展開と東濃鉦山の坑道や既存の地質調査ボーリング孔を利用した地殻変動観測である。計画では大深度も含めて十数点に及ぶ地殻変動観測アレーである。これで地下水の流動や真の地殻変動を抽出しようとする計画である。阪神大震災の震度7のメカニズム解明もあった。なぜ地震動が局在するのかは1984年長野県西部地震で示唆された10Gを超えられると思われる強振動（京大理）以来気になっていた。その目で神戸の街をみると振動の局地性に気付く。震度7の線は北東部で断層から離れている。細かにみれば、あの建物が壊れているのにすぐ近くの古い木造に被害の跡はみられない。目の前には石の鳥居が倒れて割れている、というような不思議な光景が幾つかあった。このような認識は瑞浪に作る研究所の構想に含まれている。

1997年3月、科学技術庁に提出された東濃地震科学研究所の目的は、地震の予知及び防災に関する基礎研究を推進することであり、緊急調査、防災に関する資料の収集・提供、データベースの構築、大学等を含む関連他機関との協力等、盛り沢山であったが、重点は深部地下構造調査や観測技術の向上といった基礎研究と地元での啓蒙・知識普及活動等が主であった。当初は地震災害への関心や対応ということで、講演活動や消防署への協力が多かったが年と共に地元の関心は薄れいく。これが「災害は忘れた頃にやってくる」に繋がるかと思うと己の無力を嘆くばかりであった。

一方、研究活動は順調に進み、バイプロサイス水平トモグラフィーによる阿寺断層の壮大な破砕帯の発見、ボアホール計測機器の開発など、順調であったが、再利用しようとしたボアホールの孔曲がりや傾斜がひどく、殆どは自前となったのは見込み違いであった。観測点の確保も容易ではなかった。大学にいた頃と大違いである。また、ある場所では「大学の人は来てくれない」とぼやかされたが、その大学とは私がいた研究室のことで、大学には金がなかっただけの事である。いろいろ苦労もあったが瑞浪市の全面的な協力で何とか実施できた。

最後に悔いを残した観測に触れておこう。それは地震動の局在性、いいかえれば地盤のレンズ効果の実証である。中山間地域では特に重要な知見になるであろう。これは神戸の震度7、長野県西部地震の10Gの解明にも繋がるものである。少なからぬ反対意見を抑えて東濃に50点近くの高ダイナミックレンジ（当時としてはの話）加速度計網を展開、観測点周辺の地質調査や地震探査なども実施して近地・遠地地震の比較観測を始めた。近地地震では様々な振幅・波形が記録できた。しかし、記録できた遠地地震は2004年紀伊半島南東沖地震（マグニチュード7.4）だけであった。そのときは全観測点で同一波形が記録されたので、あとはその間をつなぐ観測と待ち構えていたが、2011年東北地方太平洋沖の大地震が起きた時にはすでに退職の身であった。今にして思えば、当時のトリガー方式の観測機器の記録容量は小さく、満足できる観測になったかどうか判らないが、山間地域の地震波形観測に悔いを残したのは残念である。

16.2 十字アレー地殻活動総合観測網 観測点リスト
ボアホール観測網のプロットは裏表紙

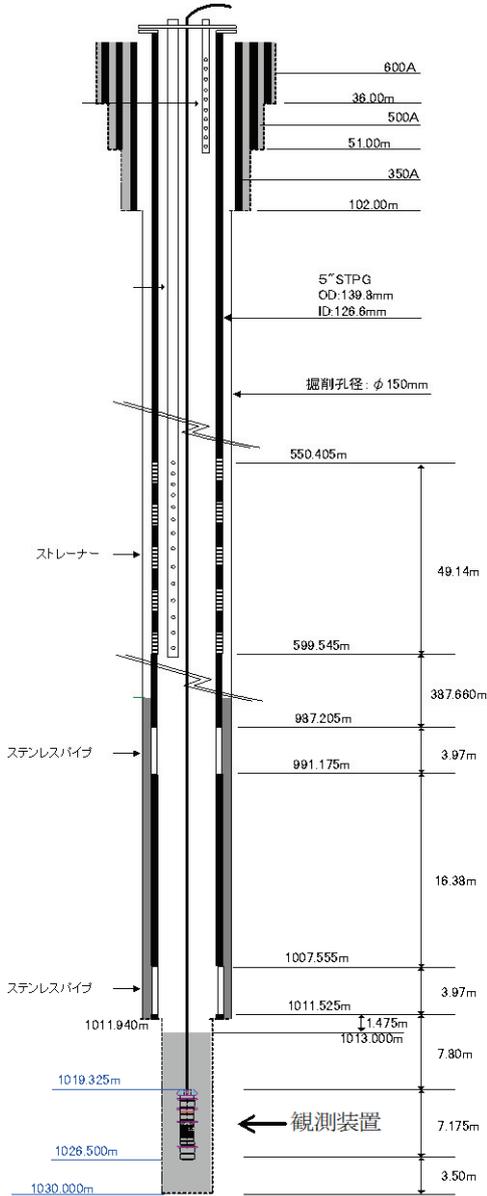
十字アレー地殻活動総合観測網 観測点リスト (2022年3月1日現在 ※0)

観測点名	略称	緯度 (deg.)	経度 (deg.)	(孔口)標高 (m)	孔底深度 (m)	埋設・設置年月日 ※1
戸狩地殻活動総合観測点	TGR320 ※8	N35.3745	E137.2378	190.3	320	2020年10月14日
	TGR350	N35.3745	E137.2378	190.3	350	1998年5月7日
	TGR165	N35.3745	E137.2378	190.3	165	2000年3月28日
	DH-2	N35.3769	E137.2375	193.3	500	※2
河合地殻活動総合観測点 ※3 屏風山地殻活動総合観測点	KWI	N35.3758	E137.2115	266.6	207	2000年12月12日
	BYB	N35.3643	E137.3039	333	1020	2003年3月30日
	SBS400	N35.3852	E137.2233	223.8	400	
	SBS110	N35.3819	E137.2240	214	110	
正馬様地殻活動総合観測点	SBS105	N35.3819	E137.2240	214	105	2014年2月20日
	SBS4	N35.3819	E137.2240	214	4	
	JRJ	N35.3907	E137.1949	316.2	1030	2005年4月24日
定林寺地殻活動観測点	97FT-01	N35.3915	E137.2153	275.3	167	1997年12月10日
	BH-1	N35.3874	E137.2164	160	47	1997年2月26日
	SN-1	N35.3918	E137.2152	277	91	
	SN-3	N35.3912	E137.2154	274.8	131	
研究所地殻活動総合観測点 ※4 陶史の森地殻活動総合観測点 ※4 日吉地殻活動総合観測点	TRIES	N35.3789	E137.2396	230	505	2007年5月16日
	TOS	N35.3351	E137.2182	210	512	2010年3月15日
	HYS	N35.4210	E137.2373	320	515	2011年9月18日
	STG100	N35.3772	E137.2371	115.3	20	2007年3月9日
瑞浪超深地層研究所 立坑内観測点 ※5	STG200	N35.3772	E137.2371	15.3	22	2009年3月19日
	STG200N	N35.3772	E137.2371	15.3	18	2015年8月19日
	STG300	N35.3772	E137.2371	-84.7	14	2012年11月13日
	STG500	N35.3772	E137.2371	-284.7	16	2018年10月23日
瑞浪観測点 ※6 瑞浪観測坑道内観測点 ※7 新宮観測点 ※6	NAMZ	N35.3755	E137.2388	195	40 (かぶり)	
	MZN17	N35.3747	E137.2373	195	16.7	2016年12月6日
	SNG	N33.6886	E135.9685	23	520	2003年7月4日

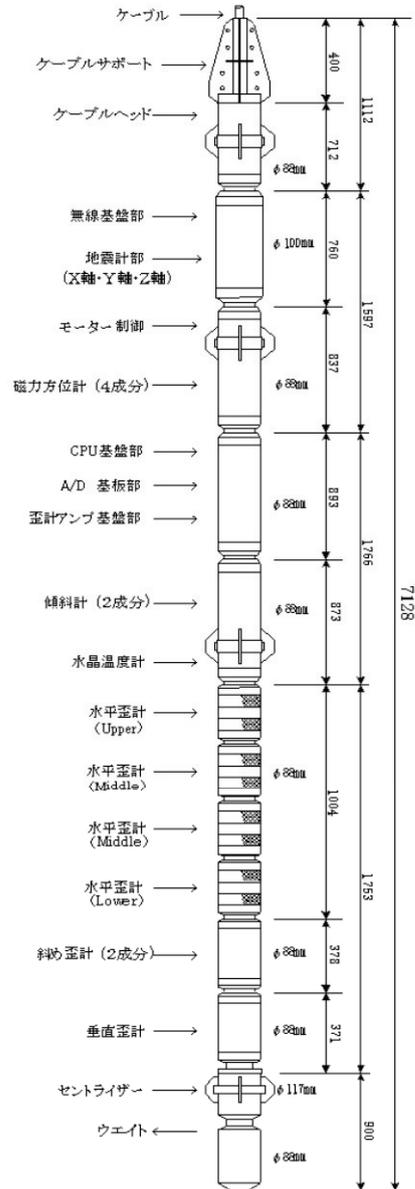
- ※0 1998年～2020年にかけて整備を行った観測点全リスト
 ※1 地殻活動総合観測装置の埋設・設置年月日
 ※2 観測期間は1998年5月11日～2002年7月3日
 ※3 落雷による故障 2005年6月以降観測中止
 ※4 (孔口)標高は国土地理院25000分の1地形図より読み取り。
 ※5 地上GPSアンテナの緯度・経度。GPSアンテナ標高は215.3m
 ※6 2017年4月、名古屋大学より譲渡
 ※7 地上GPSアンテナの緯度・経度・標高
 ※8 TGR350孔を改修

16.3 定林寺ボアホール観測点： ボアホール構造と総合観測装置

定林寺1030mボアホールの構造



埋設・設置した総合観測計器

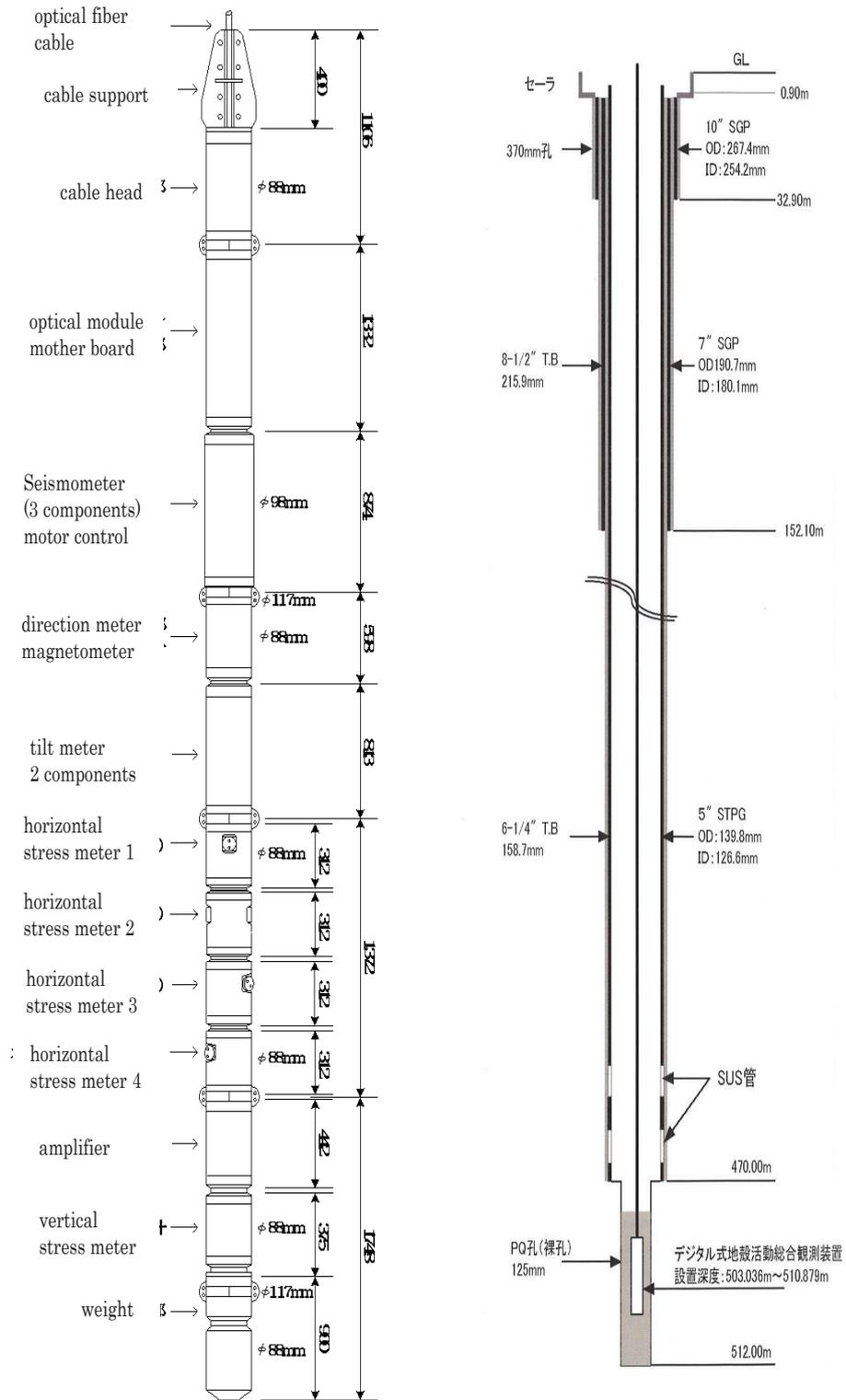


全長:7128m、ケーブルヘッド重量:30kg、
計器重量:190kg、ウェイト重量:15kg、
総重量:265kg

16.4 陶史の森ボアホール観測点：ボアホール構造と総合観測装置

陶史の森 512m ボアホールの構造

埋設・設置した総合観測装置



16.5 歴代運営委員会委員

東濃地震科学研究所運営委員会 歴代委員名簿 (平成9年～令和3年度)

平澤朋郎	東北大学 名誉教授	H9.4～H21.3
阿部勝征	東京大学地震研究所 教授	H9.4～H16.3
石井 紘	東京大学地震研究所 教授	H9.4～H13.3
脇田 宏	東京大学 名誉教授	H9.4～H25.3
小川克郎	名古屋産業大学 教授 (名古屋大学 名誉教授)	H9.4～H19.3
佐々木嘉三	岐阜大学 名誉教授	H9.4～R4.3
田中寅夫	名城大学 教授 (京都大学 名誉教授)	H9.4～H23.3
尾池和夫	京都大学総長 (京都大学 名誉教授)	H9.4～H15.12
岡田義光	防災科学技術研究所 前理事長	H9.4～H31.3
楠瀬勤一郎	産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門グループ長	H9.4～H23.3
澤田義博	名古屋大学大学院 教授 (名古屋大学 名誉教授)	H9.4～H19.3
藤井直之	名古屋大学 名誉教授	H9.4～H21.3
山川 稔	元地球科学技術総合推進機構 科学掘削推進部長	H9.4～R4.3
杉戸真太	岐阜大学 副学長	H11.4～H25.3
井野盛夫	富士常葉大学環境防災学部 教授	H11.4～H25.3
武田精悦	核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター 次長	H13.4～H17.3
梅田康弘	京都大学 名誉教授	H17.4～H21.3
坂巻昌工	原子力研究開発機構 東濃地科学研究所 副所長	H17.4～H21.3
佐野 修	東京大学地震研究所 教授	H17.4～H23.3
山岡耕春	名古屋大学大学院 地震火山・防災研究センター 教授	H19.4～R4.3
笠原 稔	北海道大学大学院 地震火山研究観測センター 教授	H19.4～H23.3
杉原弘造	日本原子力研究開発機構 東濃地科学センター 副所長	H19.4～H26.3
古本宗充	名古屋大学大学院 環境学研究科 教授	H21.4～H29.10
長谷川昭	東北大学 名誉教授	H21.4～R4.3
平原和朗	京都大学大学院 理学研究科 教授	H21.4～R4.3
平田 直	東京大学地震研究所 教授	H23.4～H31.3
村上 亮	北海道大学大学院 地震火山研究観測センター 教授	H23.4～R4.3
小泉尚嗣	滋賀県立大学環境科学部 教授	H23.4～R4.3
鶴川元雄	日本大学文理学部 地球システム科学科 教授	H25.4～R4.3
森田裕一	東京大学地震研究所 教授	H25.4～H31.3
里村幹夫	神奈川県温泉地学研究所 所長	H25.4～R4.3
能島暢呂	岐阜大学工学部 社会基盤工学科 教授	H25.4～R4.3
小出 馨	日本原子力研究開発機構 東濃地科学センター 副所長	H26.4～R4.3

16.6 歴代中間評価委員会委員

中間評価委員会 歴代委員名簿

- 【平成17年度】** (平成14年度～平成16年度事業分)
座長 藤井直之 名古屋大学大学院環境学研究科 教授
委員 池田隆司 北海道大学大学院理学研究科 教授
伊藤 潔 京都大学防災研究所 教授
金沢敏彦 東京大学地震研究所 教授
福和伸夫 名古屋大学大学院環境学研究科 教授
工藤輝夫 瑞浪市企画部長
- 【平成20年度】** (平成17年度～平成19年度事業分)
座長 佐々木嘉三 岐阜大学 名誉教授
委員 飯尾義久 京都大学防災研究所 教授
川崎一朗 京都大学防災研究所 地震予知研究センター長・教授
能島暢呂 岐阜大学工学部社会基盤工学科 教授
古本宗充 名古屋大学大学院環境学研究科 教授
勝 康弘 瑞浪市企画部長
- 【平成23年度】** (平成20年度～平成22年度事業分)
座長 笠原 稔 北海道大学 名誉教授
委員 梅田康弘 産業技術総合研究所活断層・地震科学センター客員研究員
木股文昭 名古屋大学大学院環境学研究科附属地震火山・防災研究センター
瀬尾和大 東京工業大学 名誉教授
森田裕一 東京大学地震研究所 教授
水野 正 瑞浪市総務部長
- 【平成26年度】** (平成23年度～平成25年度事業分)
座長 池田隆司 北海道大学 名誉教授
委員 杉戸真太 岐阜大学教授 理事・副学長
武村雅之 名古屋大学減災連携研究センター 教授
竹本修三 京都大学名誉教授 NPO法人あいんしゅたいん附置機関基礎科学研究所研究主幹
吉田明夫 静岡大学客員教授 前神奈川県温泉地学研究所長
水野 正 瑞浪市総務部長
- 【平成29年度】** (平成26年度～平成28年度事業分)
座長 池田隆司 北海道大学 名誉教授
委員 杉戸真太 岐阜大学教授 理事・副学長
加藤照之 東京大学地震研究所 教授
竹本修三 京都大学名誉教授 NPO法人あいんしゅたいん附置機関基礎科学研究所研究主幹
吉田明夫 静岡大学客員教授 前神奈川県温泉地学研究所長
正村和英 瑞浪市総務部長

16.7 職員履歴

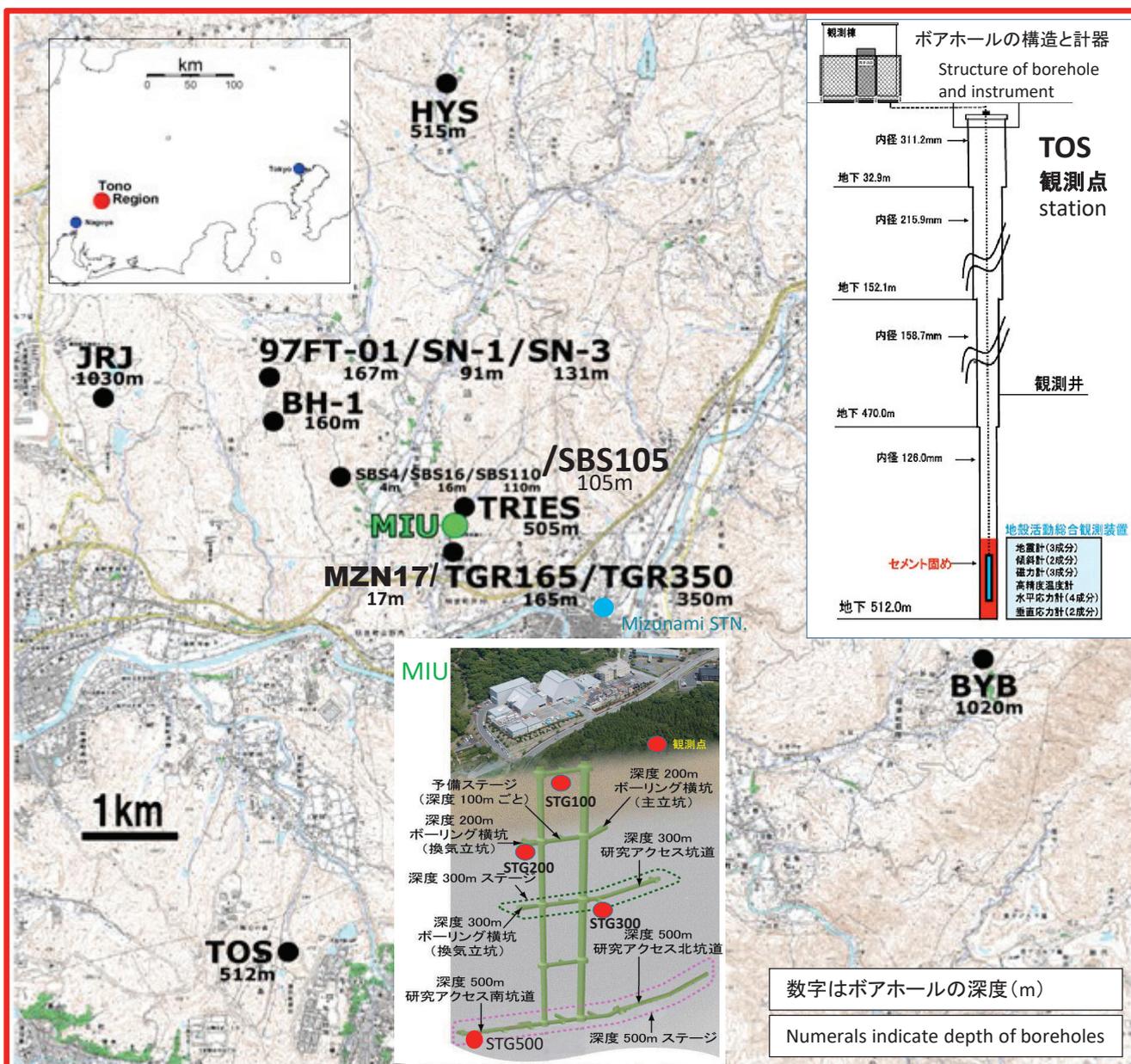
【研究部門】				R4.3.31
青木 治三	H9.4.1	H21.6.27	理事・所長	
	H21.9.1	H22.3.31	研究業務指導(週1日)	
	H22.4.1	H23.3.31	客員研究員(週1回)	
石井 紘	H23.4.1	H25.3.31	客員研究員(月2日)	
	H13.4.1	H18.3.31	嘱託職員 副首席主任研究員	
	H18.4.1	H21.6.27	副所長	
鈴木 貞臣	H21.6.28	R4.3.31	理事・所長	
	H17.4.1	H21.6.27	嘱託職員 副首席主任研究員	
	H21.6.28	H23.3.31	副所長	
	H23.4.1	H24.3.31	非常勤嘱託職員(週3日)	
	H24.4.1	H25.3.31	客員研究員(週1日)	
太田 裕	H25.4.1	R2.3.31	客員研究員(月2日)	
	H10.4.1	H18.3.31	非常勤嘱託職員(週2日) 副首席主任研究員	
	H18.4.1	H24.3.31	非常勤嘱託職員(週3日)	
	H24.4.1	H29.3.31	客員研究員(月2日)	
	H29.4.1	R2.3.31	客員研究員(月1日)	
木股 文昭	H24.4.1	R4.3.31	非常勤嘱託職員(週3日:月、火、水曜日) 副首席主任研究員	
谷口 仁士	H27.8.1	H28.8.7	非常勤嘱託職員(週3日:水、木、金曜日) 副首席主任研究員 (h28.8.7亡)	
古本 宗充	H29.11.1	R2.3.31	非常勤嘱託職員(週3日:水、木、金曜日) 副首席主任研究員	
浅井 康広	H10.4.1	H16.3.31	研究員	
	H16.4.1	H20.3.31	副主任研究員	
	H20.4.1	R4.3.31	主任研究員	
田中 俊行	H10.4.1	H16.3.31	研究員	
	H16.4.1	H20.3.31	副主任研究員	
	H20.4.1	R4.3.31	主任研究員	
大久保慎人	H10.4.1	H16.3.31	研究員	
	H16.4.1	H20.3.31	副主任研究員	
	H20.4.1	H27.3.31	主任研究員	
田原 真紀	H11.4.1	H21.3.31	契約職員 研究員	
中嶋 唯貴	H21.4.1	H24.3.31	契約職員 研究員	
雑賀 敦	H23.4.1	H25.3.31	契約職員 研究員	
	H25.4.1	H26.3.31	契約職員 副主任研究員	
本多 亮	H24.4.1	H29.3.31	契約職員 副主任研究員	
三上 卓	H25.4.1	H26.8.31	契約職員 副主任研究員	
村上 理	H27.11.16	R2.10.30	契約職員 副主任研究員	
宮島 力雄	H19.4.1	H25.3.31	非常勤嘱託職員(週3日) 参事	
	H25.4.1	R2.3.31	非常勤嘱託職員(週2日:月、火曜日) 参事	
高波 鐵夫	H26.12.1	H26.12.26	嘱託職員 副首席主任研究員	
古本 尚樹	H30.4.1	R2.3.31	契約職員 主任研究員 期間	
光井 能麻	H31.4.1	R2.9.30	契約職員 主任研究員 期間	
【支援部門】				
小栗 英雄	H9.4.1	H14.4.30	嘱託職員 参事 5年 (h24.6.亡)	
野村 正和	H14.5.1	H19.5.31	嘱託職員 参事 5年	
工藤 輝夫	H19.6.1	H22.5.31	嘱託職員 参事 3年	
増尾 健二	H22.6.1	H24.5.31	嘱託職員 参事 2年	
安藤 正剛	H24.6.1	H28.5.31	嘱託職員 参事 4年	
可知 勝宏	H28.6.1	R4.3.31	嘱託職員 参事 6年	
柴田 久子	H9.4.1	H12.3.31	事務補助員 3年	
大山 博子	H12.4.1	H25.7.31	事務補助員 13年4ヵ月	
小栗 成子	H25.7.5	H30.4.30	事務補助員 4年11ヵ月	
内山小百合	H30.4.1	R4.3.31	事務補助員 4年	
【客員研究員】				
川崎 一朗	H22.5.10	H23.3.31	客員研究員(月2回:1回につき2日)	
	H23.4.1	R4.3.31	客員研究員(月1回:1回につき2日)	
佐野 修	H22.5.10	R4.3.31	客員研究員(月2回:1回につき2日)	
	H23.4.1	R4.3.31	客員研究員(月1回:1回につき2日)	
国友 孝洋	H26.10.1	H29.3.31	客員研究員(週3回)	
	H29.4.1	R4.3.31	客員研究員(週1回:水曜日)	
松多 信尚	H27.4.1	R2.3.31	客員研究員(月1日)	
村瀬 雅之	H27.4.1	R2.3.31	客員研究員(月1日)	
田阪 茂樹	H27.5.1	R2.3.31	客員研究員(月1回:1回につき2日)	
笠原 稔	H28.4.1	R4.3.31	客員研究員(月1回:1回につき2日)	
石田 毅	H31.4.1	R4.3.31	客員研究員(月2回:1回につき2日)	
岡田 成幸	H31.4.1	R2.3.31	客員研究員(月1回:1回につき2日)	
古本 宗充	H28.6.1	R2.3.31	客員研究員(週1回 水曜日) 29年11月1日から非常勤嘱託職員	
光井 能麻	H30.11.1	R2.9.30	客員研究員(週3回) 31年4月1日から契約職員	
大井田 徹	H15.4.1	H17.3.31	嘱託職員 主任研究員	
藤井 巖	H17.4.1	H19.3.31	非常勤嘱託職員 主任研究員 (h25.4.29亡)	
河村 廣	H18.4.1	H19.6.30	非常勤嘱託職員 副首席主任研究員	
尾上 謙介	H21.9.1	H22.3.31	非常勤嘱託職員 主任研究員	
田中 寅夫	H21.4.1	H22.3.31	研究業務指導(週1回)	
	H22.4.1	H24.3.31	客員研究員(月2回) (R1.9亡)	
【ベトナム研究者招聘】				
Dinh Quoc VAN(ブアン)	H27.1.15	H27.3.31	70/4/19(43) ベトナム科学技術アカデミー地球物理学研究所所属	
nguyen Anh DUONG(ズウォオ)	H27.1.15	H27.3.31	78/2/19(35) ベトナム科学技術アカデミー地球物理学研究所所属	
Vi Van Vung(ブアン)	H27.9.1	H28.2.29	88/5/26(27)ベトナム科学技術アカデミー地球物理学研究所所属	
Vu Minh Tuan	H28.8.8	H28.11.5	76/11/20(40)ベトナム科学技術アカデミー地球物理学研究所所属	
Le Quang Khoi	H28.8.8	H28.11.5	78/7/1(38)ベトナム科学技術アカデミー地球物理学研究所所属	
Vu Minh Tuan	H30.1.10	H30.3.31	76/11/20(41)ベトナム科学技術アカデミー地球物理学研究所所属	
Vi Van Vung(ブアン)	H30.1.10	H30.3.31	88/5/26(29)ベトナム科学技術アカデミー地球物理学研究所所属	
Vi Van Vung(ブアン)	H31.1.27	H31.3.27	88/5/26(29)ベトナム科学技術アカデミー地球物理学研究所所属	
nguyen Anh DUONG(ズウォオ)	H31.3.14	H31.3.27	78/2/19(35) ベトナム科学技術アカデミー地球物理学研究所所属	

公益財団法人 地震予知総合研究振興会

Association for the Development of Earthquake Prediction (ADEP)

東濃地震科学研究所

Tono Research Institute of Earthquake Science (TRIES)



東濃地震科学研究所のボーホール観測網, MIU: 瑞浪超深地層研究所
MIUの図は、日本原子力研究開発機構(JAEA)のホームページから引用
Borehole observation net of Tono Research Institute of Earthquake Science (TRIES)
MIU: Mizunami Underground Research Laboratory

ごあいさつ

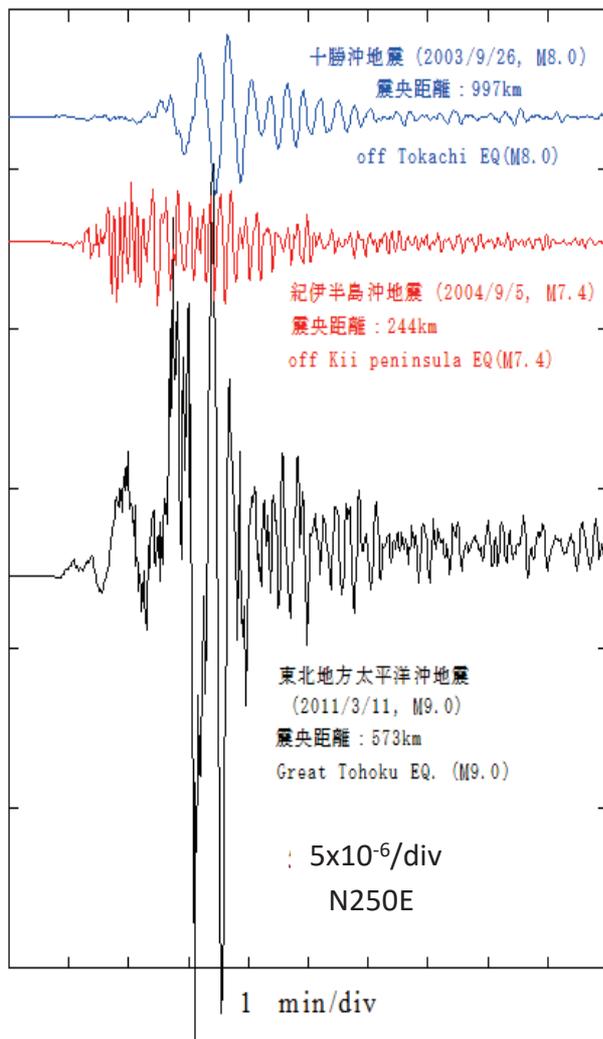
1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震(阪神淡路大震災)を契機として、内陸活断層による内陸直下型地震に関する研究や地震防災の意識が高まりました。岐阜県および関係地方自治体の要望もあり、科学技術庁(当時)に認められて東濃地震科学研究所は1997年4月、設立にいたりました。

このような経過もあり、当研究所は岐阜県、瑞浪市、土岐市をはじめ地元のご協力の下に地殻活動総合観測網の整備を図りながら活断層による内陸地震と地域地震防災の研究を進めています。当研究所で開発した深地層における観測計器および観測技術は東海・東南海・南海地震の観測研究などに広く利用されるようになり、社会の役に立っています。2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震(M9.0)による被害の大きさを見るにつけても地震研究推進の必要性を一層認識しているところです。今後とも皆様のご期待に沿えるよう努力して参りますので、よろしくご指導・ご協力を賜りますようお願い申し上げます。

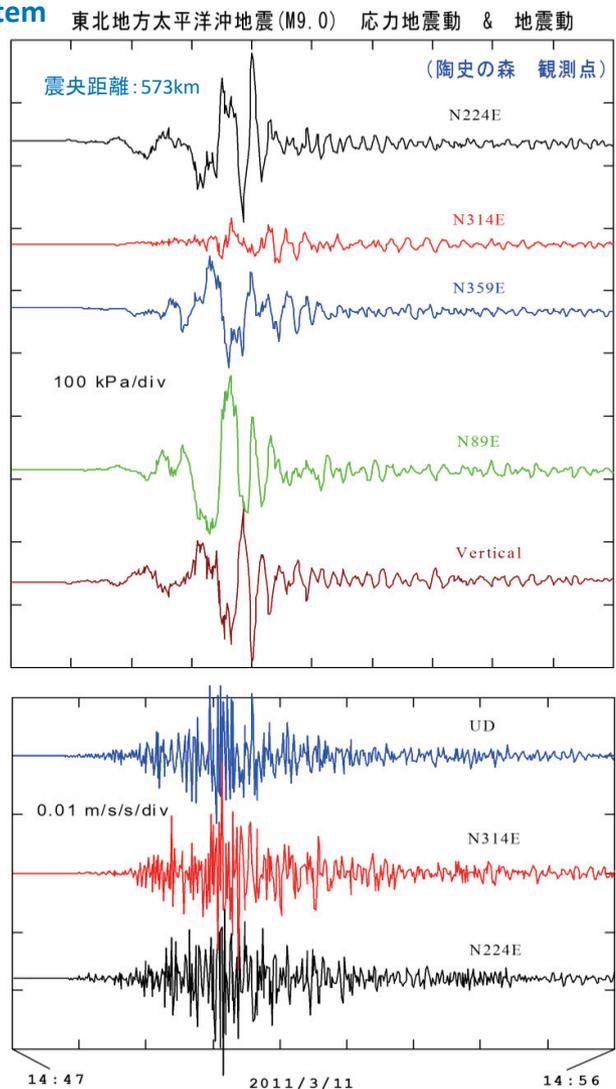
2012年5月

公益財団法人地震予知総合研究振興会
東濃地震科学研究所 所長 石井 紘

ボアホール観測網で観測された地震波形の例 Examples of seismic wave records by borehole system



屏風山ボアホール観測点(深度 1020m)で観測された異なる地震の歪地震波形
Comparison of strain seismograms observed in BYB borehole station (depth 1020m)



Stress seismogram and seismogram observed at TOS borehole station in the case of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (M9,0)

パンフレット

応力計・深部ボアホール総合観測計器の開発研究

Development of stress meter and deep borehole instrument and installation

地上で観測すると人工的なノイズにより微小な信号を観測することが出来ない可能性があります。深いボアホール(立坑)では高精度の観測が出来ます。このため深い深度で総合観測が可能な計器の開発をしています。

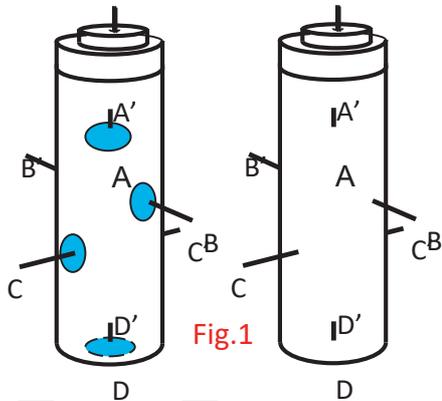


Fig.1

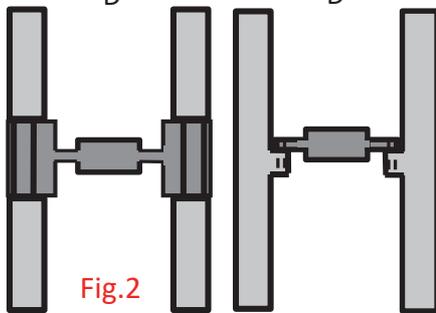


Fig.2



Fig.3

Fig.1: 開発した応力計(左)と従来の歪計(右)の外観

Fig.2: 応力計(左)と歪計(右)の内部の正面図

Fig.3: 水平1成分の応力計の写真、見やすくするために容器の半分を切り取ってある

Fig.4: ボアホール総合観測装置(TOS観測点)

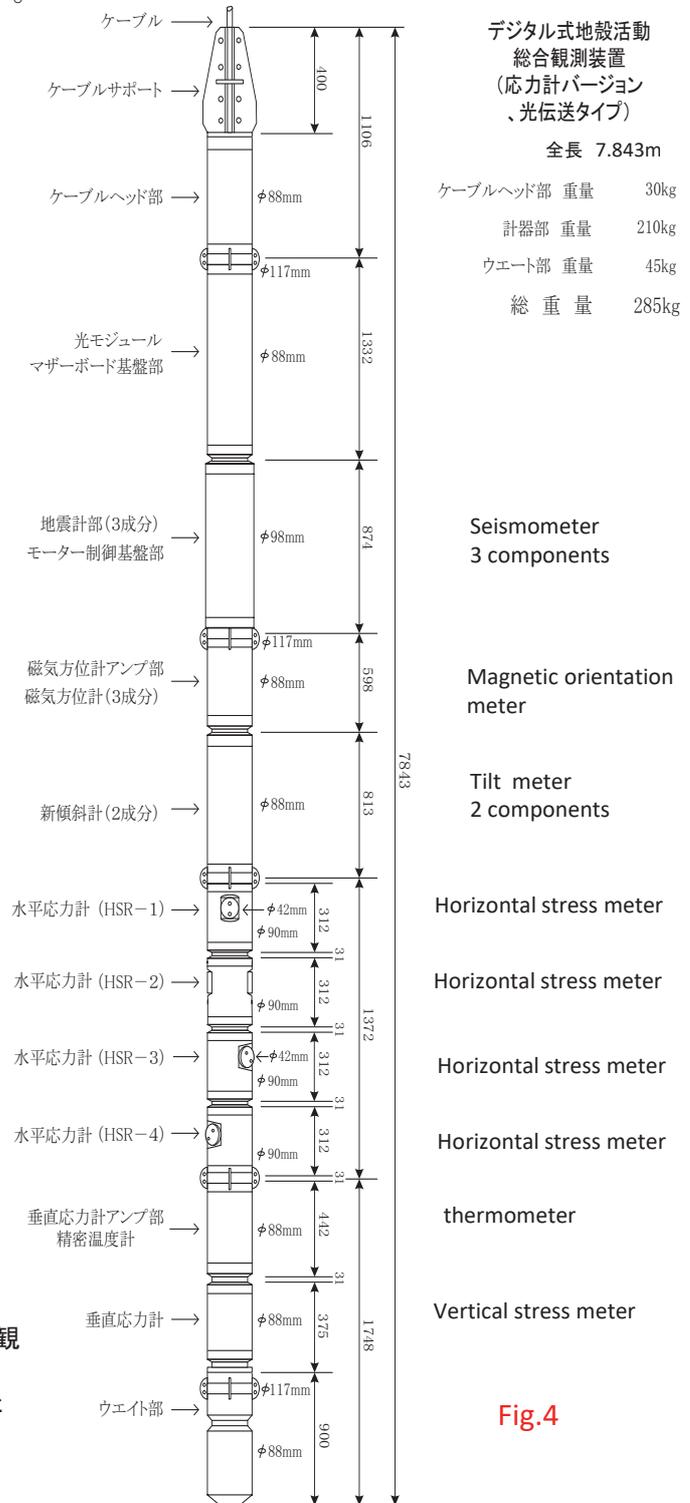
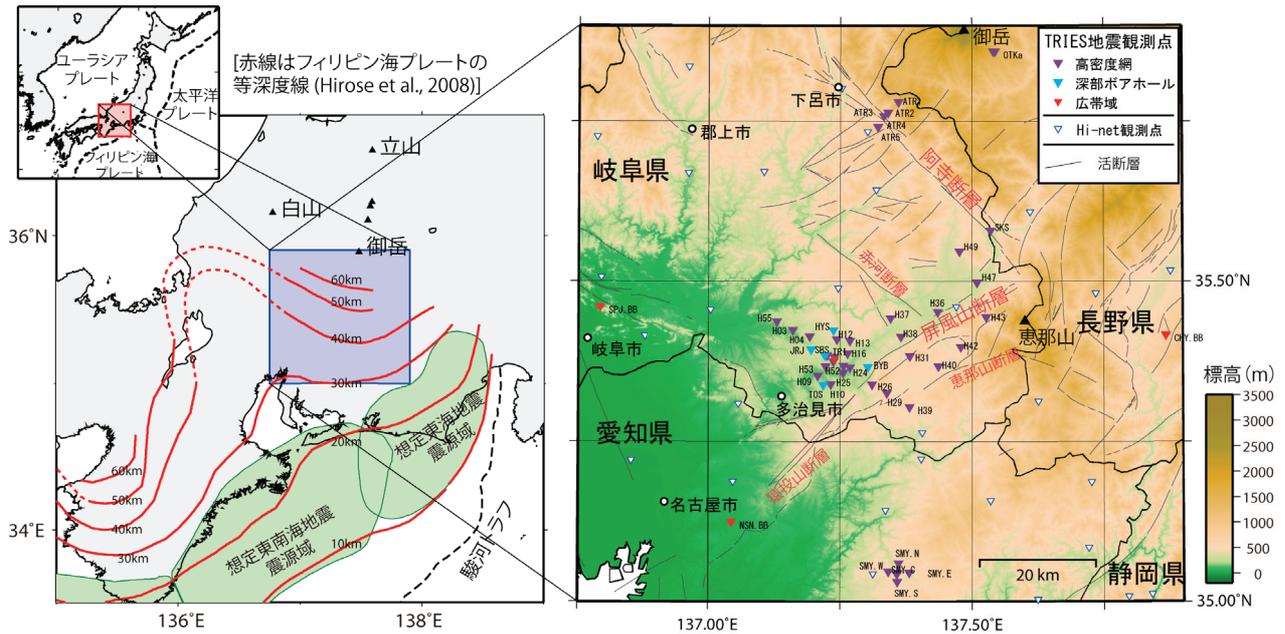


Fig.4

Fig.1: Outside of newly developed stress meter (Left) and conventional strain meter (right) Fig.2: Front view of internal parts of stress meter (left) and strain meter (right) Fig.3: A photograph of a detection unit for horizontal components incorporated in the vessel. Half of the vessel is cut out to show the interior Fig.4: Multi-component borehole instrument for TOS station:

地震活動調査研究 Research of seismic activities



東濃地域には、全長70kmにも及ぶ阿寺断層や、全長30kmを超える屏風山断層が存在しています。フィリピン海プレートの運動や断層活動の特徴を明らかにする研究をしています。

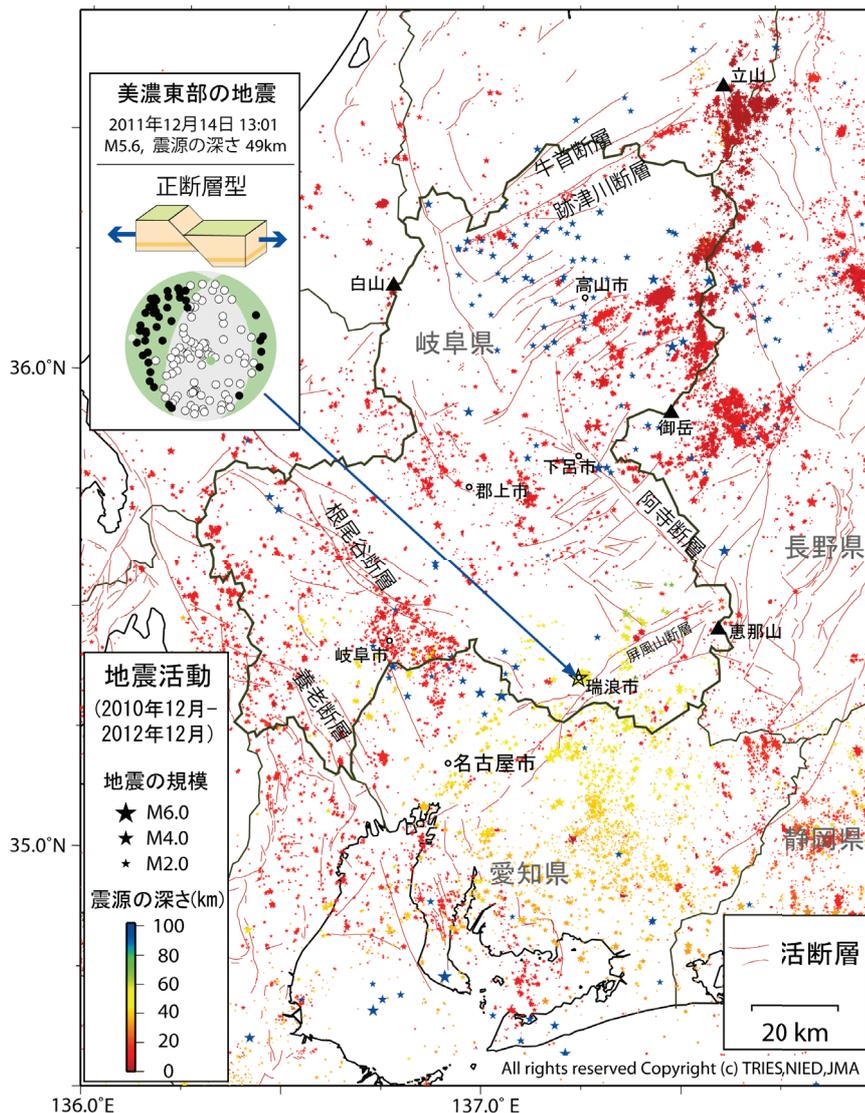
上図: 地震観測点の分布(49カ所)とフィリピン海プレートの等深度線。このプレート境界で発生する地震として東海地震が想定されており、東濃地域はその北西延長にあります。

Upper: Distribution of seismic stations operated by TRIES and isodepth line of Philippine sea plate.

左図: 過去2年間の岐阜県の地震活動。活断層に沿って起こる地震、フィリピン海プレートや太平洋プレートの沈み込みに伴って起こる地震、火山の活動に関連した地震が見られる。

2011年12月14日、瑞浪市直下49kmで発生した地震(M5.6)と当研究所で決定した地震のメカニズム

Left: Seismic activity during recent 2 years in Gifu prefecture. Mechanism of an earthquake happened beneath Mizunami city in 2011/12/14 is also shown.



応力・歪・水圧・水位変化の観測研究

Observation research of stress, strain, water pressure and water level

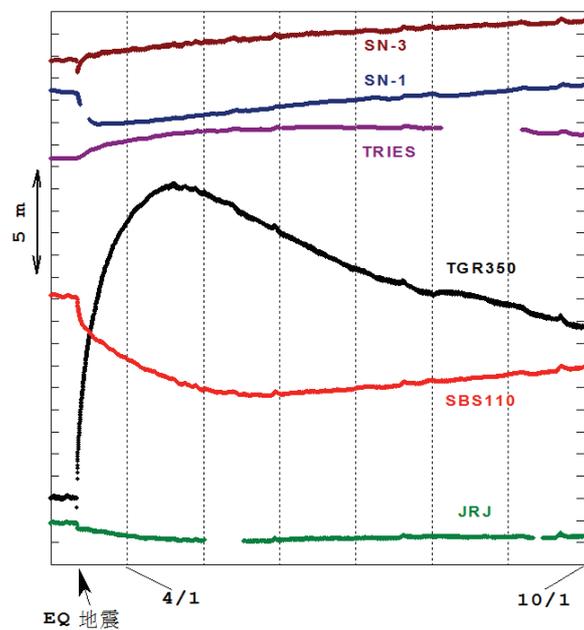
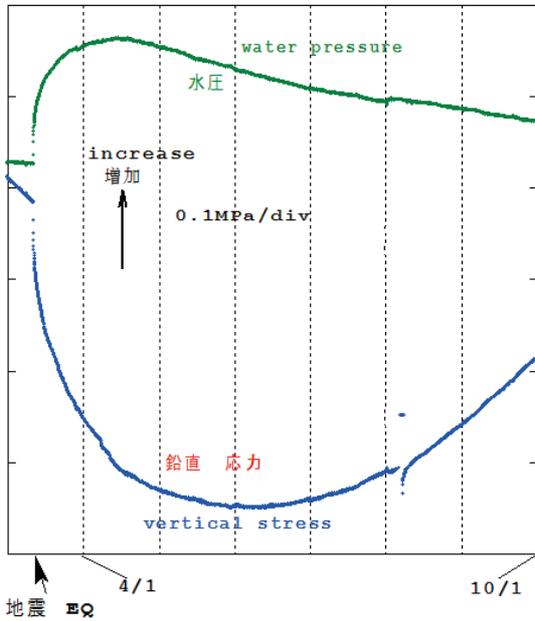
研究所付近の地下水流動と応力・歪・傾斜変動の関連を当研究所で開発した計器により観測されたデータの解析により研究しています。

Variation of water pressure and vertical stress by 3.11 EQ.

Variation of water level by 3.11EQ.(M9.0)

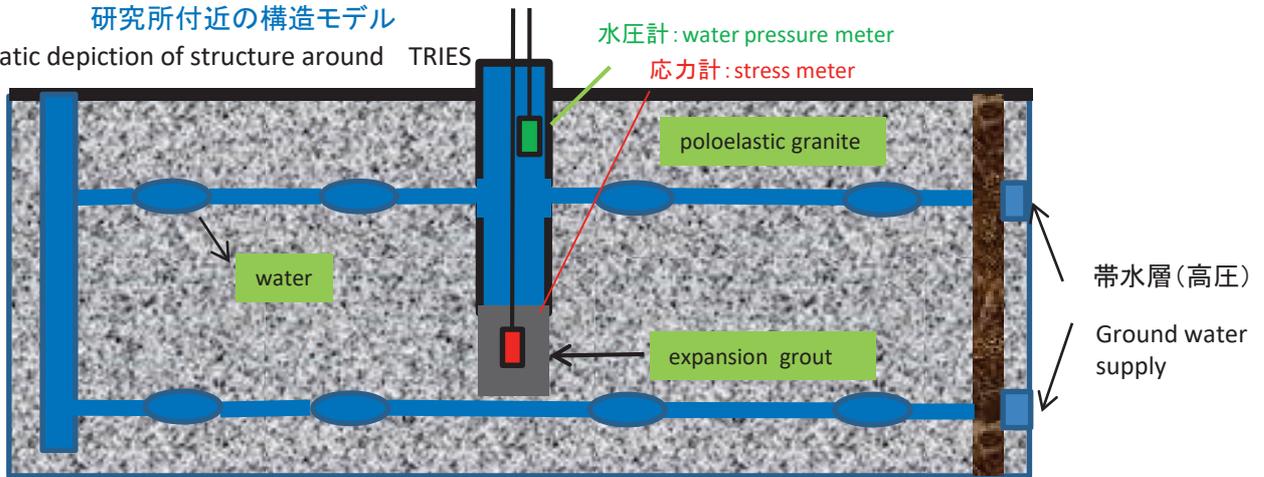
2011年3月11日東北地方太平洋沖地震 (M9.0) による水圧と応力変化

2011年3月11日東北地方太平洋沖地震 (M9.0) による水位変化

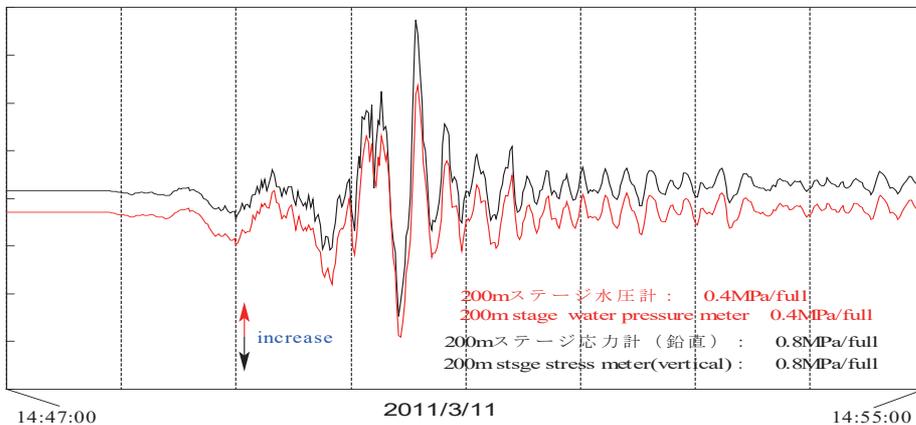


研究所付近の構造モデル

Schematic depiction of structure around TRIES



2011/3/11 (M9.0) 地震 : 200mステージ応力計 (鉛直) と水圧計の記録



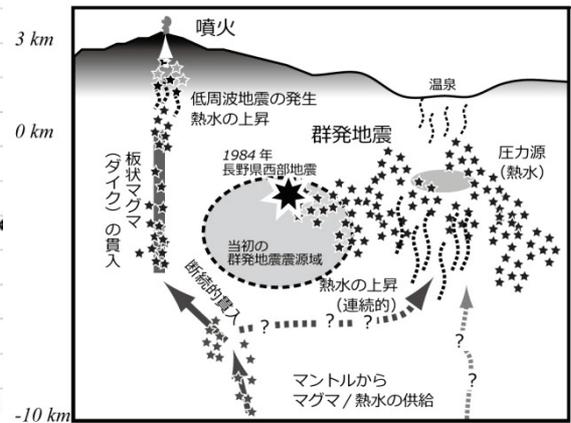
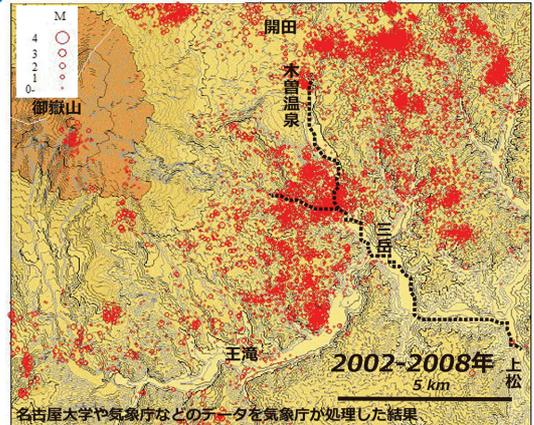
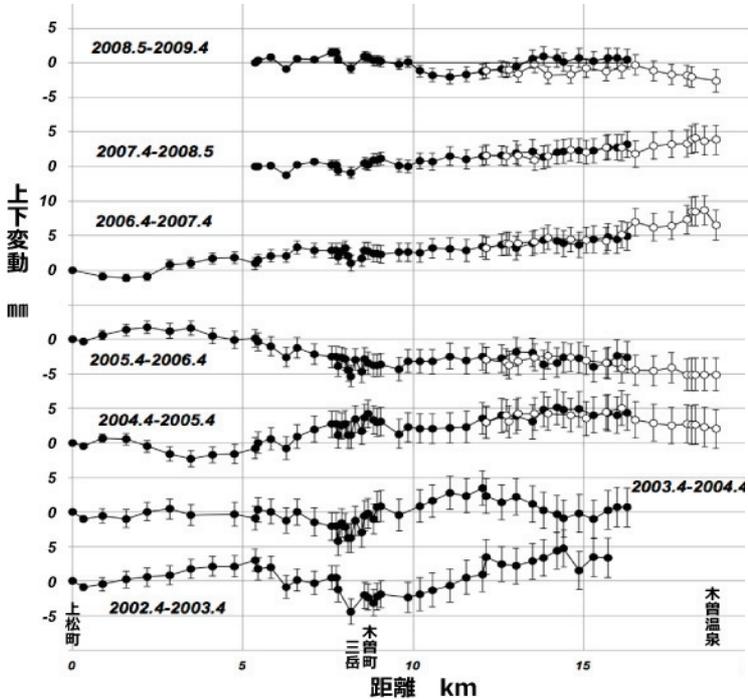
パンフレット

Records of the stress meter and the water pressure meter by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (M9.0)

水準測量と重力観測による地殻活動の研究

Research of crustal activity by using leveling survey and gravity observation

御嶽山は1970年代後半から活発な群発地震が始まり、1983年に有史初の噴火となりました。水準測量により群発地震が活発な時は群発地震震源域で、火山活動の時は山頂部で隆起が推定されました。



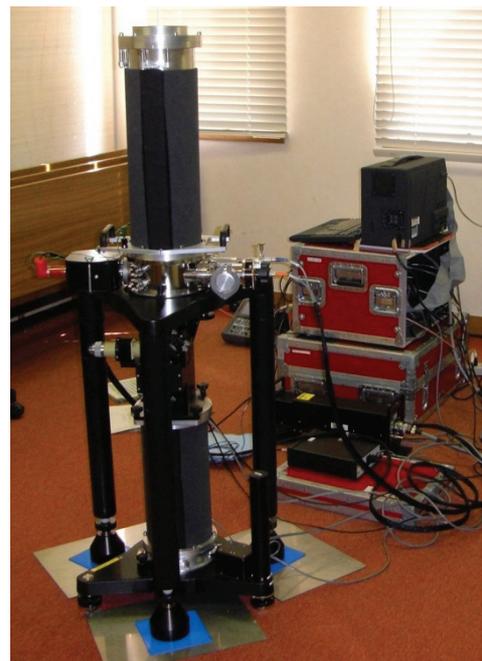
図右上 水準路線(赤線)の位置と群発地震の震央分布. 図左 水準路線で観測された上下変動(2002-2009)
図右下 御嶽山で推定されるマグマ熱水の供給モデル

Upper right: leveling rout(red line) and epicenter distribution of earthquake swarm, Left: Vertical movements observed by leveling survey. Lower right: Estimated model supplying hot liquid and magma

重力観測により内部物質の密度変化を調べます。

図右: 絶対重力計FG5 図下: 相対重力計 gPhone

Right: absolute gravimeter FG5
Lower: relative gravimeter gPhone

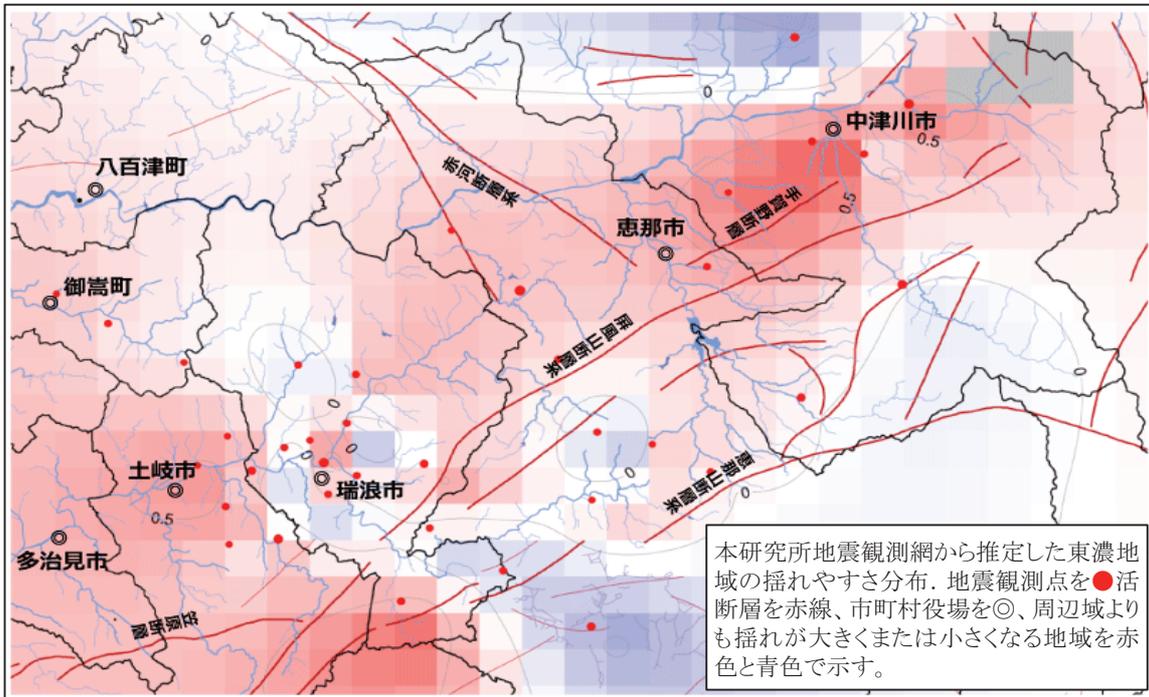


地域地震防災研究

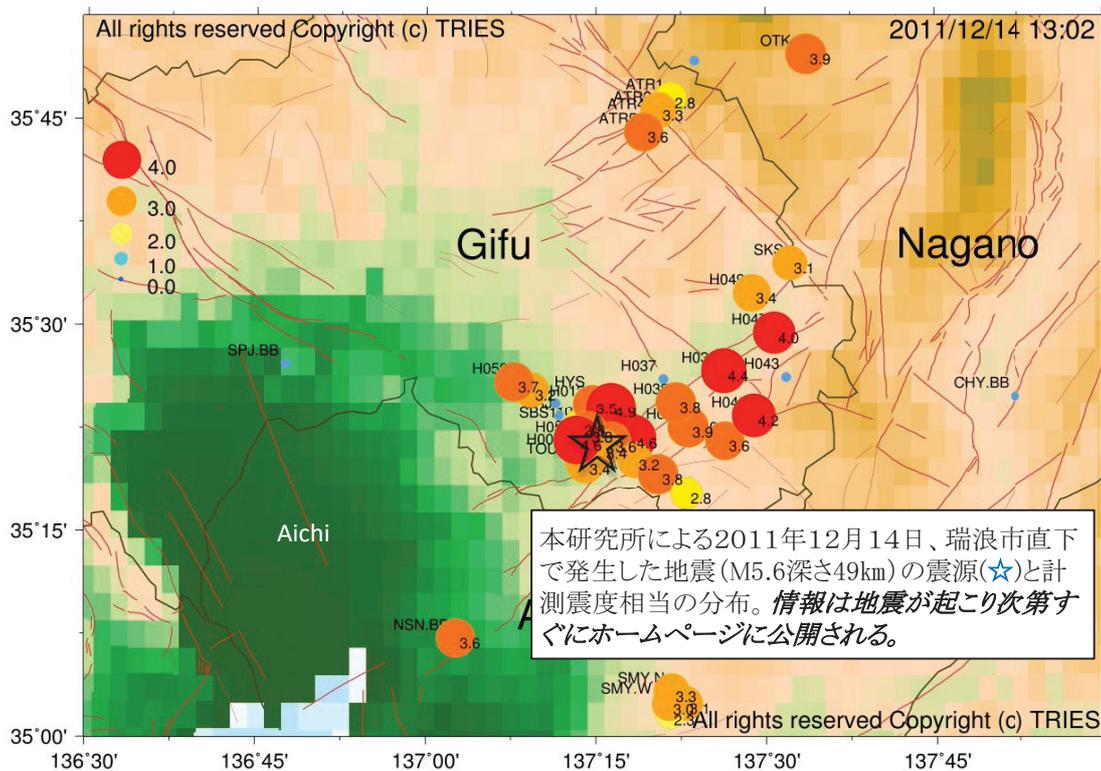
Research for earthquake disaster prevention

地域の地震防災に役に立つ研究を進めています。

揺れやすさの分布(東濃地域) Distribution of shaking degree for Tono area



Shaking degree of Tono area derived from seismic observation net. Red dots ● indicate observation points, red lines, active faults and double circles ⊙, public offices. Red color areas show larger shake areas by earthquakes and blue, smaller shake areas.



Instrumental seismic intensity automatically determined by TRIES for the earthquake (M5.6) occurring beneath Mizunami city at 49km depth in 2011/12/14 . Figure like this is presented on home page soon after earthquake occurrence.

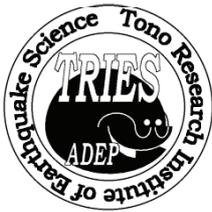
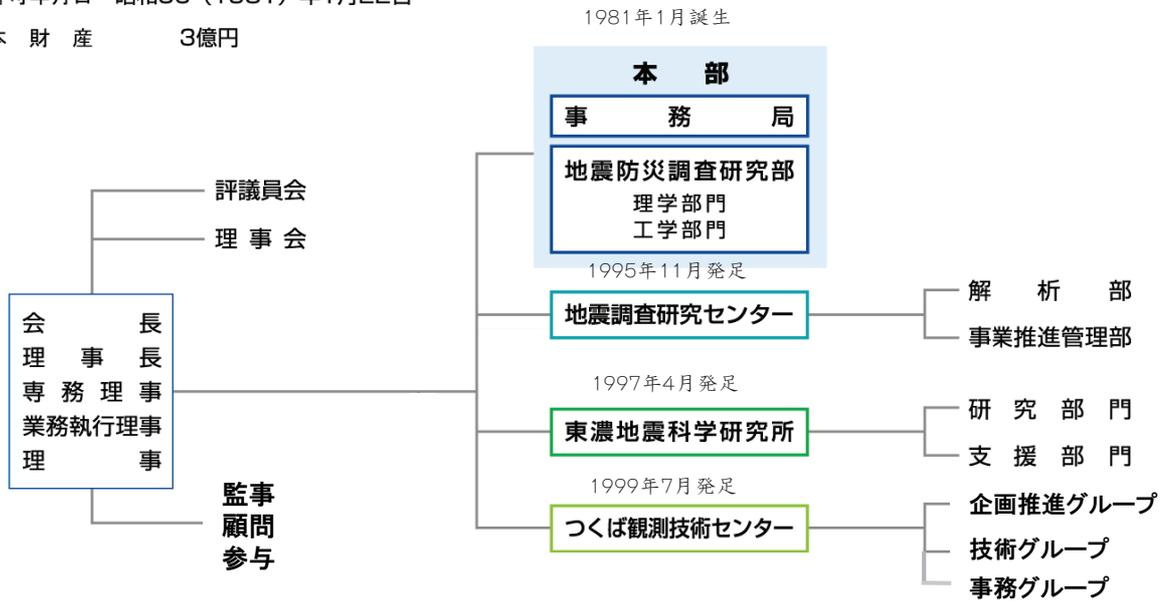
パンフレット

財団の組織

Organization Chart

設立許可年月日 昭和56（1981）年1月22日

基本財産 3億円



公益財団法人
地震予知総合研究振興会

東濃地震科学研究所

〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町
山野内1-63
Tel: 0572-67-3105
Fax: 0572-67-3108
URL: <http://www.tries.jp/>

Tono Research Institute of Earthquake Science (TRIES)
Association for the Development of Earthquake Prediction (ADEP)

1-63, Yamanouchi, Akiyo-cho,
Mizunami City, Gifu Pref,
509-6132 JAPAN



JR. 中央線瑞浪駅下車 車10分
中央自動車道瑞浪 IC 車5分



パンフレット
2015/6

科学技術の予測

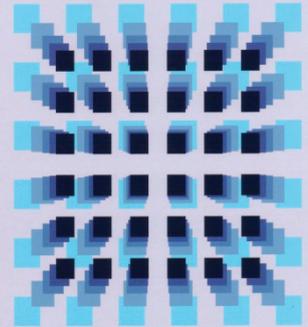
Prediction of future technology about Geophysics by MEXT

表6. 7-1 重要度指数上位20課題

	課題	重要度指数	技術的 実現時期	社会的 適用時期	領域
1	52 災害監視衛星、通信衛星、GPS、無人飛行機などを活用して、災害の監視、発生後の災害状況の把握および迅速な対応(必要などところに必要な情報を配信する)を可能にする危機管理システム	97.6	2009	2014	安全・安心社会の宇宙・海洋・地球技術
2	58 火山噴火に至る火山体内部のマグマの状態の推移をリアルタイムに観測・評価し、噴火の時期、規模を予測する技術	97.6	2014	2022	安全・安心社会の宇宙・海洋・地球技術
3	57 プレート境界地震と内陸地震それぞれについて、被害の発生が予想されるマグニチュード7以上の地震発生切迫度(場所と時期)を人的災害の軽減につながるような高精度で予測する技術	97.6	2021	2030	安全・安心社会の宇宙・海洋・地球技術
4	60 地震予知に利用される地震・地殻変動総合観測装置を大都市、山間部、大陸棚等に均質に密に配置するための技術	96.1	2010	2016	安全・安心社会の宇宙・海洋・地球技術
5	59 二酸化炭素等温室効果気体放出の国際規制についての、発展途上国における削減も含めた全地球的な合意形成	95.6	—	2014	安全・安心社会の宇宙・海洋・地球技術
6	61 降雨・積雪、集中豪雨等のメカニズムの解明	95.4	2013	2020	安全・安心社会の宇宙・海洋・地球技術
7	45 地震発生域規模での地殻内の広域応力場の測定を可能とする技術	95.0	2015	2026	地球深部観測技術
8	23 実用的な数年規模の気候変動予測技術	94.3	2014	2022	地球環境高精度観測・変動予測技術
9	55 高レベル放射性廃棄物の地層処分の安全性に関する評価技術	93.2	2013	2021	安全・安心社会の宇宙・海洋・地球技術
10	53 海洋を含む日本全土をカバーする一元的なデジタル国土管理・利用システム(地球観測衛星のデータとGPS、通信衛星、GIS等を活用して土地利用、海洋情報、地図等の情報をデジタル化する)	93.2	2009	2014	安全・安心社会の宇宙・海洋・地球技術
11	24 大気・海洋の組成や生態系そしてこれらにまたがる物質循環も同時に扱う地球システムモデルによる数十年規模の地球環境変動予測技術	90.3	2018	2027	地球環境高精度観測・変動予測技術
12	71 メタンハイドレート採掘利用技術	88.2	2015	2025	科学技術革命を先導する宇宙・海洋・地球技術

文部科学省 デルファイ調査

2035年の科学技術



文部科学省科学技術政策研究所 編
財団法人 未来工学研究所

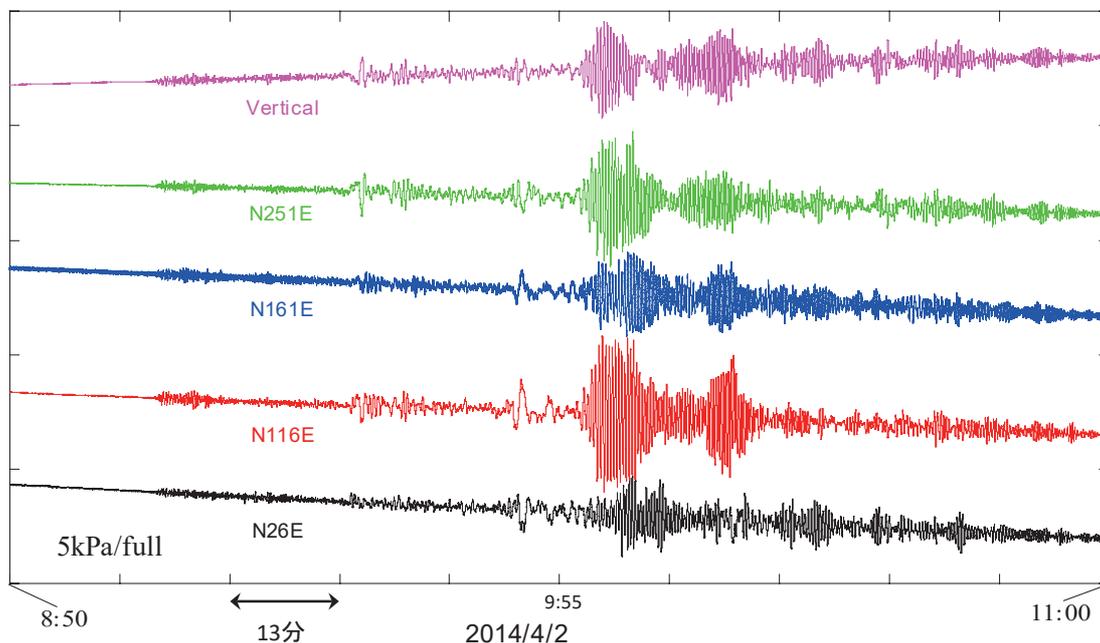
2005年発行

不変量と応力計の信頼性

Reliability of stress meter by use of elastic invariants

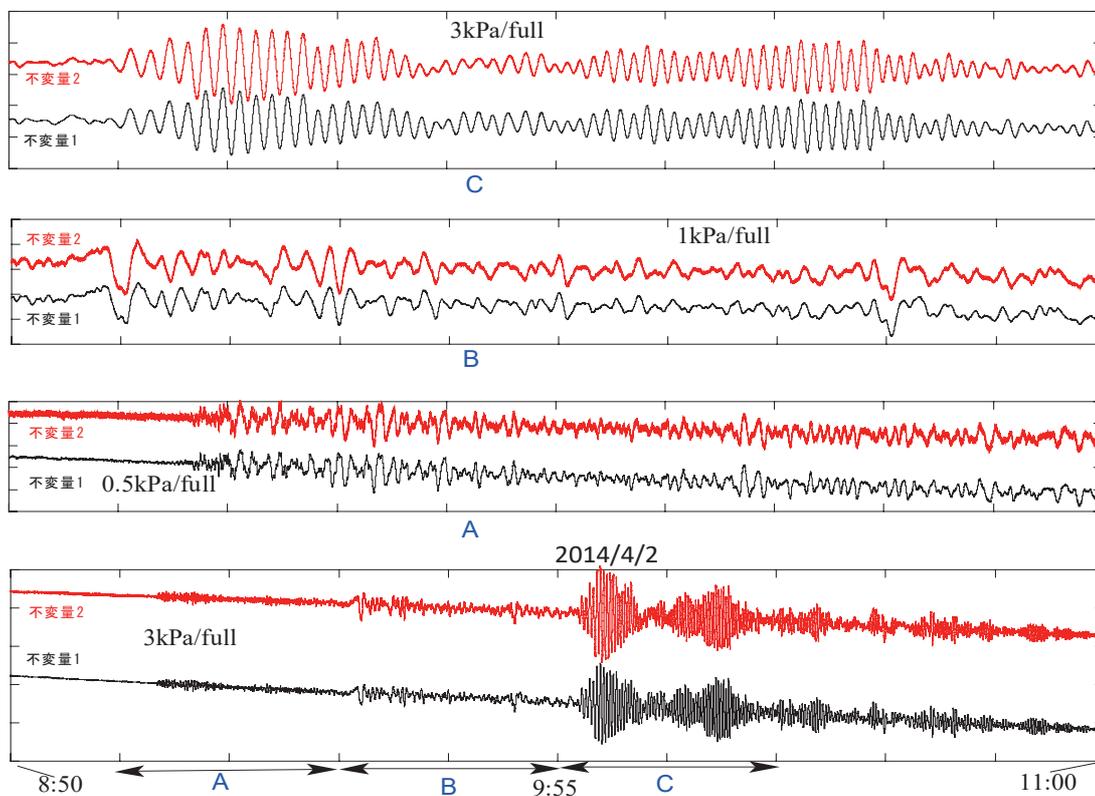
Record of Chile EQ. of 2014/4/2

2014/4/2 チリの地震 (M8.2) 正馬様観測点 応力計



弾性体力学の不変量 不変量1: N26E+N116E, 不変量2: N161E+N251E

2014/4/2 チリの地震 (M8.2) 不変量 応力計 (正馬様観測点)

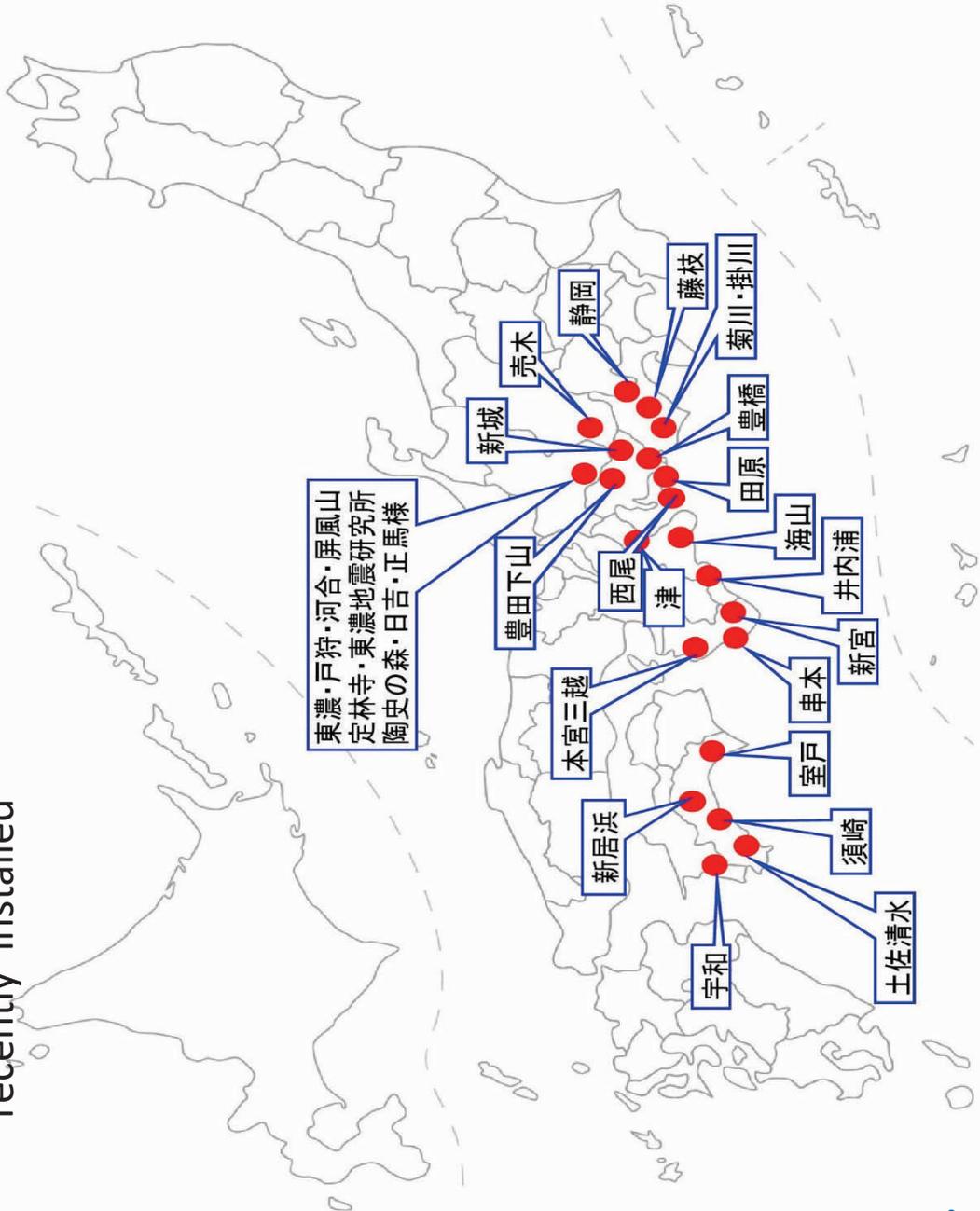


パンフレット

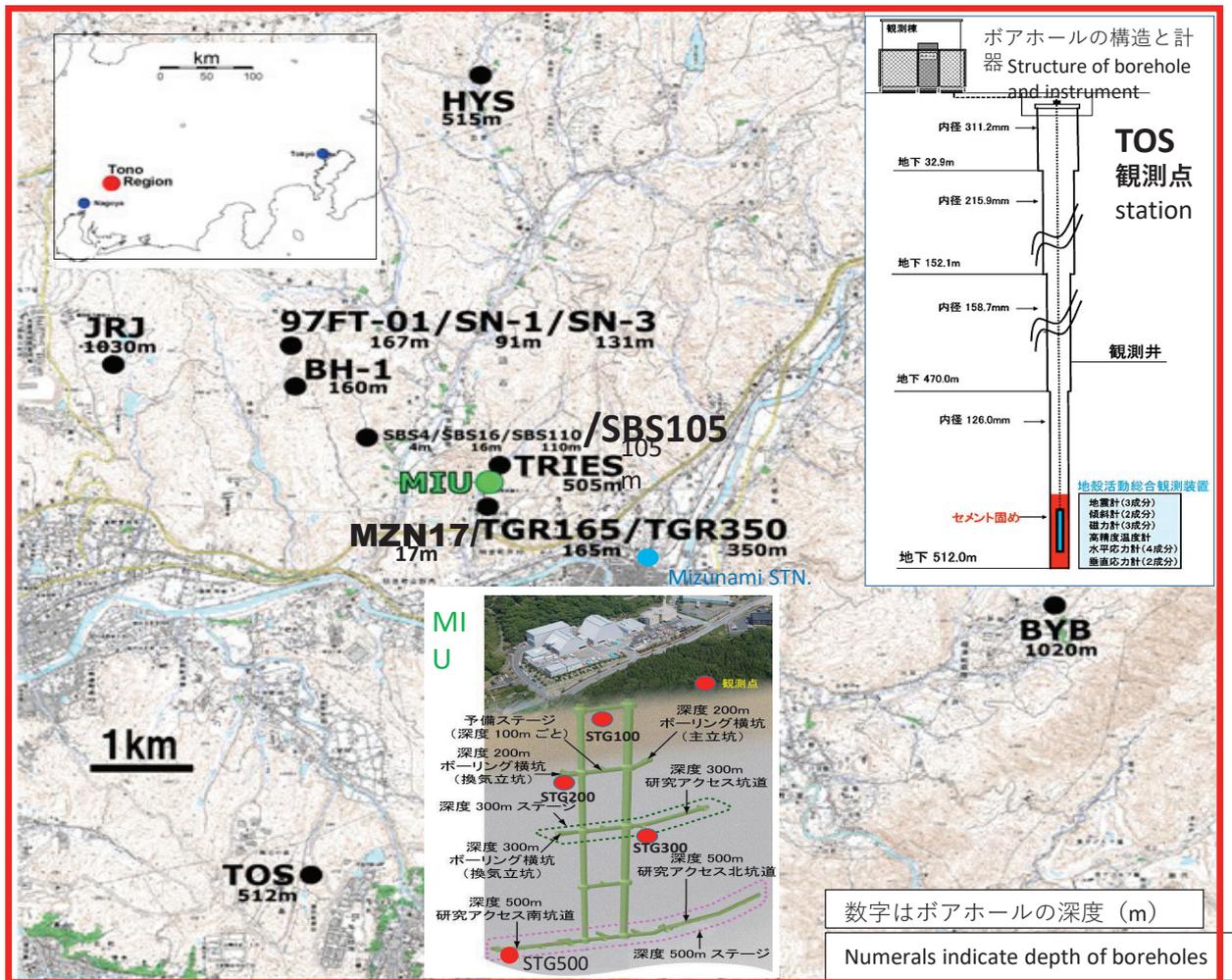
地点名	年度	発注者	観測深度 (m)
東濃9FT-01	H9	地震予知総合研究協議会	164.5
戸狩 TGR350	H10	地震予知総合研究協議会	350.0
河合 KW1	H12	地震予知総合研究協議会	207.0 (500.0)
戸狩 TGR165	H12	地震予知総合研究協議会	150.0
高山	H13	国土交通省中部地方整備局 高山国運工事事務所	107.2
屏風山 BYB	H14	地震予知総合研究協議会	1020.0
新宮 TRIES	H15	核燃料サイクル開発機構	520.0
豊橋	H16	水資源機構	230.5
定林寺	H17	地震予知総合研究協議会	1030.0
菊川	H17	静岡県森井土木事務所	502.0
井内浦	H17	産業技術総合研究所	600.1
本宮三越	H17	産業技術総合研究所	376.0
豊田下山	H18	産業技術総合研究所	600.0
油山	H18	産業技術総合研究所	600.5
串本	H18	産業技術総合研究所	601.5
土佐清水	H18	産業技術総合研究所	600.1
室戸	H18	産業技術総合研究所	601.15
宇和	H18	産業技術総合研究所	601.5
東濃地震科学研究所	H19	地震予知総合研究協議会	505.0
須崎	H20	産業技術総合研究所	600.0
津	H20	産業技術総合研究所	601.0
陶史の森	H21	地震予知総合研究協議会	512.0
掛川高天神	H22	気象庁	520.0
精岡落合	H22	気象庁	500.0
新城	H22	気象庁	500.0
売木	H22	気象庁	509.0
田原	H22	気象庁	508.0
藤枝	H22	気象庁	502.0
日吉	H23	地震予知総合研究協議会	515.0
新居浜	H24	産業技術総合研究所	485.0
西尾	H25	産業技術総合研究所	600.0
正馬様	H26	地震予知総合研究協議会	110.0

○東濃地震科学研究所タイプの計器が設置 されている観測点の分布 最近の例

Borehole Observation Sites where TRIES type Instruments were recently installed



16.9 東濃地震科学研究所のボアホール観測網



東濃地震科学研究所のボアホール観測網, MIU: 瑞浪超深地層研究所
 MIUの図は、日本原子力研究開発機構 (JAEA) のホームページから引用
 Borehole observation net of Tono Research Institute of Earthquake Science (TRIES)
 MIU: Mizunami Underground Research Laboratory

公益財団法人 地震予知総合研究振興会

〒101-0064 東京都千代田区神田猿樂町 1-5-18 千代田ビル 8階

TEL: 03-3295-1966

FAX: 03-3295-3136

Association for the Development of Earthquake Prediction (ADEP)

東濃地震科学研究所

〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内 1-63

TEL: 0572-67-3105

FAX: 0572-67-3108

Tono Research Institute of Earthquake Science (TRIES)

1-63 Yamanouchi, Akiyo-cho, Mizunami-city, Gifu Prefecture, 509-6132

東濃地震科学研究所 25年のあゆみ

発行年月 令和4年3月(2022/3)

発行 東濃地震科学研究所

編集 石井 紘

印刷・製本 株式会社 サン・ライン