

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 24 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289346

研究課題名(和文) 浅所地殻応力の定点測定に基づく地震誘起現象の定量評価

研究課題名(英文) Quantitative evaluation of earthquake induced phenomena based on fixed point measurement of shallow crustal stress

研究代表者

坂口 清敏 (Sakaguchi, Kiyotoshi)

東北大学・環境科学研究科・准教授

研究者番号：50261590

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,300,000円

研究成果の概要(和文)：東北地方太平洋沖地震(以下東北地震)前後の応力場の経年履歴を明らかにするために、岩手県釜石鉱山において地圧測定を行った。その結果、東北地震前に比較して、1年後は主応力値が2倍～4倍、鉛直応力は被り圧の約2.5倍と大きくなっていたのに対し、2年後のそれは、東北地震前に比べると依然として大きいものの、1年後との比較では小さくなっていった。また、鉛直応力は被り圧程度になっていた。さらに3年後の測定では、全ての主応力が東北地震前のレベルに戻り、鉛直応力も被り圧相当となっていた。5年後には再び増加していた。これらの現象は、東北地震後の釜石沖の地震の発生メカニズムと関係していることが示唆された。

研究成果の概要(英文)：To examine the change in in-situ stress between before and after the 2011 Tohoku-oki earthquake, we performed stress measurements after the earthquake in the Kamaishi mine, located near the northern termination of the mainshock rupture. The in-situ stress measurement period was from 1991 to 2017. The results showed that the magnitudes of the three-dimensional principal stresses and the vertical stress drastically increased during the mainshock and, at one year after the earthquake, were more than double those before the earthquake. The principal stress magnitudes then decreased with time, and returned almost to the pre-earthquake levels at about five years after the earthquake. The increasing and decreasing trends in stress in the Kamaishi mine can be interpreted in terms of the effects of coseismic rupture behavior of the Tohoku-oki earthquake mainshock and the occurrence of aftershocks in the Sanriku-oki low-seismicity region (SLSR), where the Kamaishi mine is located.

研究分野：ジオメカニクス

キーワード：地圧測定 地震 東北太平洋沖地震 絶対地圧

1. 研究開始当初の背景

2011年3月11日に発生した Mw9.0 の東北地方太平洋沖地震以降、地震予知の難しさ、未熟さが改めて浮き彫りにされ、改めて減災、防災の意識が高まりを見せた。研究代表者は、地震前(20年前～5年前)と地震後(1年後と2年度)に実施した浅所地殻応力測定結果から、地震を誘起するエネルギー(地殻応力)、地震発生に伴う地殻応力場の擾乱および余行変動は、浅所地殻応力場に明確に影響を及ぼすことを明らかにした(K. Sakaguchi et.al, RS2013, 153-161, 2013)。浅所地殻応力場は、既にその利用が一般化しているトンネル(道路、鉄道)、鉱山、揚水発電所などの地下構造物の設計・施工・管理に直接影響を及ぼす。また、世界的関心事である、放射性廃棄物の地層処分場、二酸化炭素の地中貯留のための地下構造物の設計・施工・維持・管理においても重要な意味を持つ。

我が国では、東南海地震(あるいは、東海・東南海・南海連動型地震)の発生が予想されており、その発災に伴う被害予想等とともに、様々な防災・減災への取り組みが実施されている。一方、地殻応力は地震を引き起こす原動力であるにも関わらず、その直接測定に基づく予知は、その対象を深部(少なくとも5km以深であり、通常は10km以深)とする必要があると考えられていたため、地震予知を目的とした実際の測定は殆ど行われていない。実施できなかったというのが正しい表現かもしれない。なぜなら、人類がボーリングによって到達した最高深度は高々12,000m程度でしか無いことから明らかなように、測定対象岩盤にさえ到達できていないからである。したがって、地震予知研究は別の間接的事象・パラメータを用いた数値シミュレーションなどの手法に頼らざるを得なかった。すなわち、これまでの地震予知研究の失敗の原因は、地殻応力の直接測定の欠如にあると考える。しかし、これまでの研究代表者による研究成果から、数100m深度における浅所地殻応力場の原位置測定においても、定点における継続的測定によって、地震の誘起現象を定量的に評価できることが明らかになった。したがって、本手法を積極的に実施することによって、将来発生の予想されている東南海地震の中期的発生予知の高精度化が可能となり、当然に、地震の直接被害に対する防災・減災も高効率・高精度で実現できると考えた。

2. 研究の目的

東南海沖地震の発生に伴う災害の減災および防災を目的として、その発生の予兆現象の定量が本研究の究極の目的である。また、本研究は、放射性廃棄物地層処分や二酸化炭素地中貯留のための地下構造物の超長期維持・管理手法の信頼性向上にも寄与する。本研究の目的は、地下数100mの浅所地殻応力場の定点における継続測定を実施して、地震を誘起するエネルギーに起因する地殻応力

場の経年変動を定量化することで達成できる。本手法は、これまでの地震研究に無い手法であるが、東北地方太平洋沖地震前後に実施した地殻応力の定点測定によって、その有用性、有効性が明らかになりつつあり、上述の目的の達成は十分可能である。また、昨今必要とされている地震研究に関する工学分野と理学分野の知見の融合を推し進めることも大きな目的である。

3. 研究の方法

研究期間を通じて、定点における浅所地殻応力測定を継続的に実施する。具体的には、(1)釜石鉱山における東北地方太平洋沖地震後の定点地圧測定を実施し、地震後の地殻応力場の経年変化を定量化するとともに、地殻応力の経年変化と地震(余震)の関係を明らかにする。(2)東南海沖地震の予兆変動を浅所地殻応力場の直接測定によって定量するための測定基地となる地点を紀伊半島あるいは四国地方の鉱山(坑内)、地下発電所(調査・連絡坑道)あるいは道路・鉄道トンネル(新設、廃線等)を対象として選定する。準備が整えばその定点において継続的に測定を行う。測定方法は「円錐孔底ひずみ法」をメイン手法とする。

4. 研究成果

(1)釜石鉱山における東北地方太平洋沖地震前後の地殻応力の経年変化

①はじめに

2011年3月11日に発生した Mw 9.0 の東北地方太平洋沖地震(以下東北地震)によって、東北地方は水平方向と上下方向(沈下方向)に数メートルの地殻変動を履歴した。このような大きな地殻変動は、浅所(地表下数百m)地殻応力場にも大きな影響を及ぼしていると考えられる。

本研究では、東北地震前後の浅所地殻応力場の経年履歴を明らかにするために、岩手県釜石鉱山において地圧測定を繰り返し実施してきた。本報では、東北地震発生の20年前から発生後6年目までの地圧の経年履歴について報告する。なお、本研究課題研究期間において実施した測定は、地震発生後5年目(2016年3月)と6年目(2017年3月)であるが、成果の理解を助ける意味で、本研究課題以前の結果(2012年2月～2014年3月:科研費23360399で実施、代表:坂口清敏)の結果を統合して報告する。以降、これらの研究をまとめて「本研究」と呼ぶ。

②測定場所および測定方法

測定場所の釜石鉱山は、東北地震の震央から北西に約170kmに位置しており、東北地震によるこの地域の地殻変動は、東北東へ3.32mの水平移動、0.5mの沈降と記録されている。今回の測定に選んだ場所は、図1に示す550mL主要坑道の奥部(坑口から約5km)にあり、坑道等の影響を受けない場所である。測定地点一帯は栗橋花崗閃緑岩で構成され

ており、均質等方弾性体と見做せる岩体である。

測定方法は応力解放法に分類される円錐孔底ひずみ法である。本方法は地盤工学会の基準 (JGS3751-2012) であり、ISRM (International Society for Rock Mechanics) の Suggested Method でもある。釜石鉱山では、1991 年から円錐孔底ひずみ法により今回の測定地点近傍の 5 地点において地圧測定が実施されており (図 1)、東北地震前からの地圧データの履歴と東北地震後の地圧の履歴を同一精度で検討することが可能である。

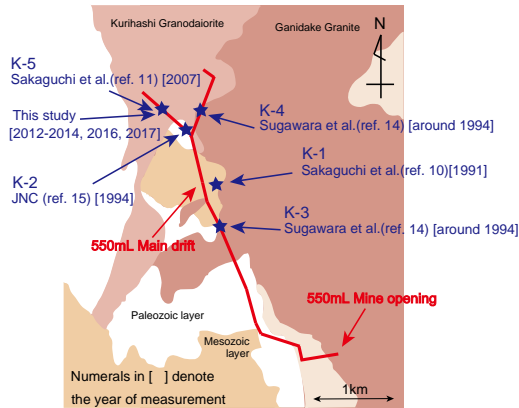


図 1 釜石鉱山 550mL 坑道と測定地点

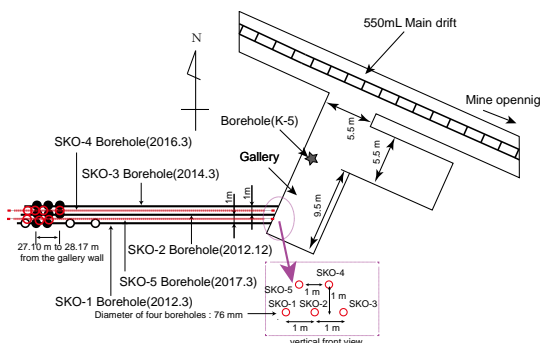


図 2 測定ボアホールと測定点位置関係

③測定地点

本研究の測定地点近傍の平面図を図 2 に示す。測定地点は、幅 5.5 m、高さ約 7 m の 2 つの拡幅坑道が隣接する場所に位置しており、測定は図中に太実線で示した 5 本のボーリングで行った。SKO-1 孔では、①20.06 m ~ ⑤28.56 m の 5 か所 (以下それぞれ SKO-1-0C1~SKO-1-0C5, 2012 年 2 月 27 日~3 月 1 日)、SKO-2 孔では、①27.10 m、②27.60 m および③28.03 m の 3 か所 (以下それぞれ SKO-2-0C1~SKO-2-0C3, 2012 年 12 月 17 日~19 日)、SKO-3 孔では、①27.10 m、②27.82 m および③28.17 m の 3 か所 (以下それぞれ SKO-3-0C1~SKO-3-0C3, 2014 年 3 月 10 日~12 日) SKO-4 孔では、①27.95m、②28.52m、③28.98 の 3 か所 (以下それぞれ SKO-4-0C2~SKO-4-0C4, 2016 年 3 月 15 日~17 日)、SKO-5

孔では①28.04m、②28.55m、③29.02m の 3 か所 (以下それぞれ SKO-5-0C1~SKO-5-0C3, 2017 年 3 月 14 日~16 日) で行った。測定地点の被りは約 290 m である。

④結果と考察

図 3 に主応力値の経年変化を示し、図 4 に鉛直応力 σ_v の被り圧 p_v に対する比の経年変化を示す。東北地震前後の主応力値には大きな違いがみられる。東北地震後 1 年目の主応力値は、地震前に比べて 2 倍~4 倍になっており、鉛直応力は被り圧の約 2.4 倍になっている。しかしながら、地震後 2 年目になると、最大主応力は、東北地震前よりも依然として大きい値ではあるものの減少しており、中間主応力、最小主応力および鉛直応力は東北地震前とほぼ同じ値にまで戻っている。東北地震後 3 年目の主応力値および鉛直応力は、地震前より小さくなっている。しかし、5 年後になるとほぼ同じレベルに戻っている。また、6 年目には地震前と比較して大きくなっている。

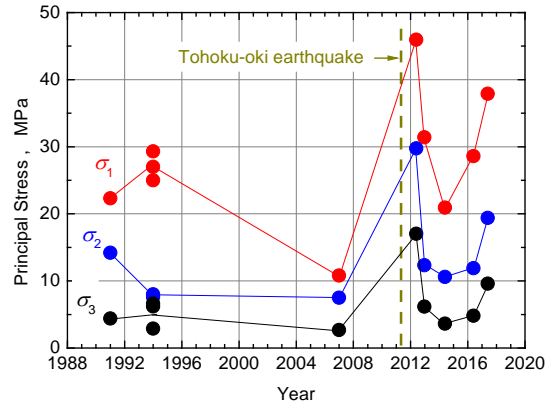


図 3 主応力の経年変化

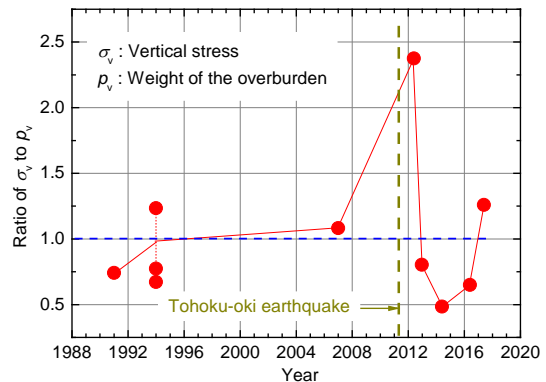


図 4 鉛直応力の経年変化

図 5 は Yagi and Fukuhata (2011) による東北地震における 5 m 以上のすべりの分布のコンター図に Ye et al. (2012) に倣って三陸沖低地震滑活動域 (Sanriku-oki low-seismicity region (SLSR)) を重ねたものである。東北地震による滑りが小さな領域 (5 m 未満の滑り) は釜石沖にコの字型に分布している。また、この領域は SLSR に含まれている。釜石地域は東北地震の滑り域の西

側外縁に位置しているが、釜石沖のコの字型の領域で滑りが止まったと推察される。図 6 は、釜石沖で発生した地震の規模の経年変化を示している。同図より、東北地震前は、約 5.5 年おきに釜石沖で地震が発生しており、その規模は $M = 4.7 \sim 5.1$ であった。しかしながら、東北地震の後数か月間はこれらの地震の発生間隔は短くなり（地震数の増加）、その規模は大きくなっている。さらに時間が経過すると、地震の発生間隔は次第に長くなり（地震数の減少）、その規模も東北地震前とほぼ同規模に戻っている。

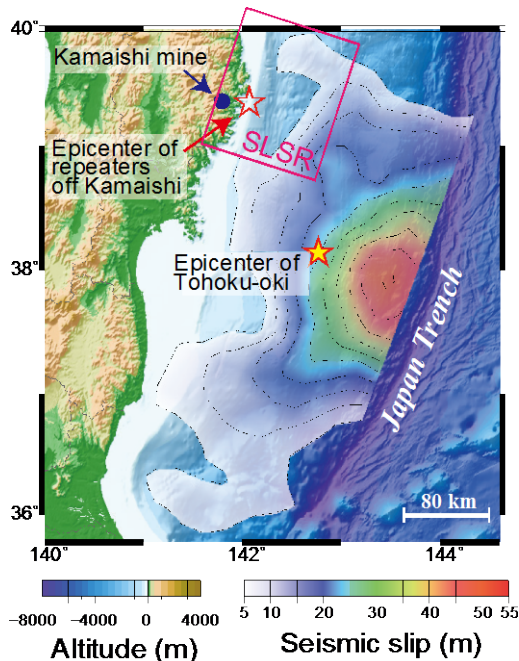


図 5 東北地震によるすべり域と SLSR

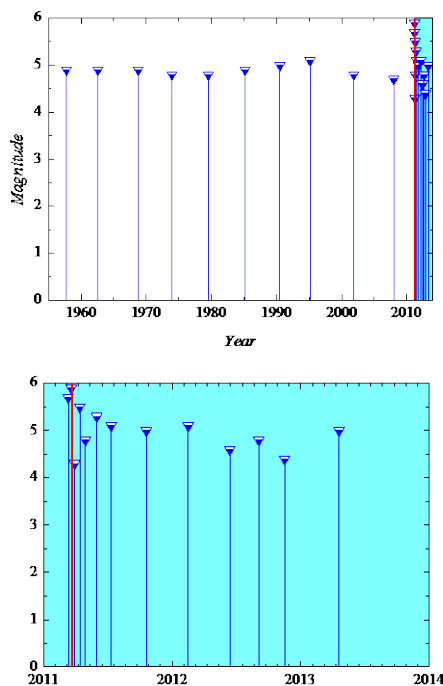


図 6 釜石沖地震の発生頻度とその規模
上：1995 年～2014 年，下：2011 年～2014 年

これらの事実から以下のようなことが推察されよう。「東北地震後 1 年目の応力値の増大の原因は、釜石沖の滑り挙動（滑りが止まった）に依るものである。こうして地殻応力が増加した結果、釜石沖での地震が増加した。頻発して発生した地震により地殻応力が解放され、釜石鉦山における東北地震後 1 年目以降の応力値は減少した。結果として、地震の数が減少した。」この推察は、釜石鉦山における地圧の経年変化の理由を完全に説明している訳ではないが、巨大地震と浅所地殻応力の関係を説明できる可能性を示唆している。また、6 年目の地圧が地震前に比べて大きくなっていることから、あるいは、次の地震への準備が進んでいることを示唆しているのかもしれない。

(2) 東南海沖地震の予兆変動を浅所地殻応力場の直接測定のための測定基地

紀伊半島あるいは四国地方の鉦山(坑内)、地下発電所(調査・連絡坑道)あるいは道路・鉄道トンネル(新設、廃線等)を対象として測定基地となり得る場所の選定を行った。その結果、幾つかの候補地を選定することができ、その場所を保有管理する企業側との交渉を行ってきたが、残念ながら研究期間内に実施の許可を得ることができなかった。しかしながら、平成 29 年 4 月になり、最有力候補地としていた紀伊半島にある発電所周辺における測定の許可が得られる可能性がでてきており、本報告執筆中も調整が続いている(具体的な企業名等の記載は許可を得ていないので省略)。今後、企業との共同研究等も視野にいたれた持続研究に進む道筋ができたことは、本研究課題の成果の一つと考えている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

① Stress buildup and drop in inland shallow crust by 2011 Tohoku-oki earthquake events, Kiyotoshi Sakaguchi, Tatsuya Yokoyama, Weiren Lin, Noriaki Watanabe, Scientific Reports, 2017, 査読有, (Submitted).

[学会発表] (計 9 件)

① 坂口清敏, 横山幸也, 東北地方太平洋沖地震前後の応力の繰り返し測定, 第 51 回地盤工学研究会, DS-10 セッション, 岡山大学, 岡山市, 2016 年 9 月 13 日.

② Kiyotoshi Sakaguchi, Motoki Egawa, Tatsuya Yokoyama, Periodic Measurement of In-Situ Rock Stress at Shallow Depth in the Vicinity of the Epicenter Before and After the 2011 Tohoku-oki Earthquake, 7th Int. Sympo. on In-Situ Rock Stress, Tampere,

Finland, 2016年5月11日

③T. Nayuki, T. Tanaka, K. Ando, K. Oka, N. Nishizaka, Y. Shimoguchi, H. Ogawa, K. Saito, K. Sakaguchi, M. Itamoto, 7th Int. Sympo. on In-Situ Rock Stress, Tampere, Finland, 2016年5月11日.

④K. Sakaguchi and T. Yokoyama, In-situ Stress Measurement at Shallow depth in the Vicinity of the Epicenter before and after the 2011 Tohoku-oki Earthquake, 13th Int. Cong. on Rock Mechanics, Montreal, Canada, 2015年5月12日.

⑤江川基樹, 坂口清敏, 東北地方太平洋沖地震後の地殻応力場の変動, 平成27年度資源・素材学会春季大会, 千葉工業大学, 習志野, 2015年3月27日.

⑥K. Sakaguchi, N. Watanabe, T. Yokoyama, W. Lin, Changes in the Crustal Stress Field in the Kamaishi Region Before and After the 2011 Tohoku-oki Earthquake, 12th Workshop on WATER DYNAMICS, 仙台国際センター, 仙台, 2015年3月10日.

⑦K. Sakaguchi, N. Watanabe, T. Yokoyama, Changes In-Situ Rock Stress in the Kamaishi Mine Bwfore and After the 2011 Tohoku-oki Earthquake, 8th Asian Rock Mechanics Symposium, ロイトン札幌, 札幌, 2014年10月14日.

⑧T. Mori, M. Nakajima, K. Sakaguchi, S. Aoki, T. Kaji, K. Nagai, and K. Sasaki, A Study on Evaluation of Initial Rock Stress in Anisotropic Rock Mass using Over-coring Method, 8th Asian Rock Mechanics Symposium, ロイトン札幌, 札幌, 2014年10月14日.

⑨坂口清敏, 横山幸也, 東北地方太平洋沖地震前後の応力の繰り返し測定, 第49回地盤工学研究会, 北九州国際会議場, 北九州, 2014年7月15日.

[図書] (計 2件)

①Xia-Ting Feng 編, 坂口清敏(第9章), Rock Mechanics and Engineering Volume 1: Principles. CRC Press, ISBN9781138027596, 2016, 267-296.

②小笠原宏, 加藤春實, Gerhard Hofmann, 矢部靖男, 坂口清敏, 月刊地球, Vol. 36, No. 3, 2014, 146-151.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

坂口 清敏 (SAKAGUCHI Kiyotoshi)

東北大学・大学院環境科学研究科・准教授
研究者番号: 50261590

(2) 研究分担者

渡邊 則昭 (WATANABE Noriaki)

東北大学・大学院環境科学研究科・准教授
研究者番号: 60466539

(3) 研究協力者

横山 幸也 (YOKOYAMA Tatsuya)
応用地質 (株)

林 為人 (Lin Weiren)
JAMSTEC (現: 京都大学)