

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－

地震予知総合研究振興会 東濃地震科学研究所 石井 紘・浅井康広

§ 1. はじめに

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（以後：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）を開発している[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故ボアホール計器の開発を実施している．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．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著者らは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)](以後：論文1)．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による搭載も可能になった

石井・他(2019)（以後：論文2）においては開発された応力計や従来タイプの歪計が2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震（ M_w 9.0）（以後，東北地震）の地震波形を最大振幅も含めて完全に記録することができ津波の波高予測にも役に立つことを述べている．また，連続観測用のボアホール応力計が東北地震に最も近い牡鹿（震央距離約80km）に設置してあったとしてもスケールアウトせずに応力地震波形や生じた永久応力を記録できることを述べている．直流成分にも応答することや震源に関して地震計と異なる物理情報を得ることができることなども述べている．連続観測用ボアホール応力計はその他にもいろいろ特

徴があり新しいこともわかってきた. それらについて考察することは観測されたデータの解釈・理解にも役立つと考えられる. 本稿においては開発したボアホール連続観測応力計に関する新しい結果を含めた特徴のまとめと考察した結果を述べる.

§ 2~§ 6 の詳細は雑誌「地震」に投稿した寄書を参照されたい。

§ 2. 応力計は応力と歪の両方を観測できる

§ 3. 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

§ 4. なぜ応力計で観測された二次元不変量成分と鉛直成分は相似波形になるのか

§ 5. 応力計で観測する歪は如何に分解能がよいか

§ 6. 応力計・歪計の dynamic range は如何に広いか

§ 7. 応力測定に関する議論とデータの活用

応力計で連続観測している応力値は相対変化として扱っている. しかしながら論文 1 において述べている応力検定は水で満たされた円筒容器内に応力計を設置して水圧を加えて出力電圧との関係を求めている. 従ってこの検定においては検定時の温度条件における応力の絶対検定をしている. すなわち加えられた応力値に対する出力電圧を求めている. 応力計は実際の観測に用いられる場合は岩盤中にボアホールを掘削し膨張性のグラウトにより岩盤と固められる. 従って検定をした時と温度条件が異なる. 感度検定作業のデータによると温度が変わると拡大装置の出力電圧のレベルは変化する. しかし異なる温度レベルにおいて変位変化による出力変化の割合はほとんど変わらない. 変動は拡大装置の変形で検知する. ある温度での長さが l で温度が異なる条件での長さが $l + \delta l_t$ とすると長さが微小変化した時の長さはそれぞれ $l + \delta l$ と $l + \delta l + \delta^2 l_t$ となり最後の項は非常に小さい. したがって相対変化への影響は小さくなる. 一方でボアホール内の温度はあらかじめわかっているのでそれに近い温度で圧力検定をしている. また, 応力計内には高感度温度計を内蔵しているので異常な温度変化があればわかる. 実際には深いボアホールにおける温度変化は小さく年変化は十分の一度程度, 日変化は千分の一度程度である. 今後, 決められた加圧条件において温度変化と出力電圧との関連などを調べて絶対応力をどこまで求めることが出来るか調べる予定である.

論文2でも述べているがボアホール計器で得られる当研究所のデータは手続することにより、だれでも利用できる。また、当研究所の応力計・歪計で観測された地震波形のデータベースも構築中で近々多くの研究者の利用が可能となるであろう[笠原(2017)]。ボアホール計器によるデータは大きな地震波でも震源の近傍においてもスケールアウトすることなく観測できることから津波の波高予測研究に利用できる。また、地震計とは異なる物理量を観測し異なる情報を得ることが出来ることから地震のメカニズム研究においても貢献できると考える。例えば応力計はDC成分まで応答することから長周期地震計ではわからない断層の動きを初めから最終停止までの変動が記録でき、長周期地震計では得られない新しい情報が得られる[例えば論文2]。また、長周期強震計は現在、存在しないが応力計は震源近傍においてもスケールアウトしない[論文2]ことから直接 near field の情報が得られる。震源近傍では変動は単純な長周期的な変動が卓越していると考えられる。応力計・歪計のデータが上述のような研究やその他の研究に多くの人によって利用されることを期待する。

§8. まとめ

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論文1において述べられている。そこでは東北地震の地震波形を最大振幅も含めて完全に記録することができ津波の波高予測にも役に立つことを述べている。また、論文2においては開発された応力計の観測可能範囲が広いこと、直流成分にも応答することや震源に関して地震計と異なる物理情報を得ることができることなどを述べている。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。そこで本稿においてはボアホール連続観測用応力計に関する新しく得られた結果を含めた特徴をまとめるとともに考察した結果をのべた。

考察した内容は以下の様である。「応力計は応力と歪の両方を観測できる」においては応力計が応力と歪の両方を観測できることの説明のほかに応力計の歪観測システムは従来の円筒の変形を測定する歪観測より測定システムが理解しやすい上に装置のYoung率も求めることができることを述べている。「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」においては応力計により観測・測定する応力は埋設設置してある岩盤媒質の弾性定数に関係なしに求まることを述べている。歪は応力計の拡大機構

の歪を測定しているので岩盤の歪は直接求まらないが拡大機構の Young 率が求められるので岩盤媒質の Young 率がわかれば岩盤の歪も求められることを述べている。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。この理由を考察したのが「なぜ 応力計で観測された二次元不変量成分と鉛直成分は相似波形になるのか」である。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。このことを関東地震、東北地震や伊豆の群発地震の観測データを用いて述べたのが「応力計で観測される応力・歪は如何に分解能がよいか」である。「応力計・歪計の dynamic range は如何に広いか」においては論文 1 において述べた結果に加えてさらなる考察も加えた。また、絶対応力測定に関する今後についても述べた。

ボアホール応力計により観測されたデータは現在の地震計や GNSS などによる観測データでは得られない物理量を観測するほかに DC 成分の観測などいろいろな特徴を有している。今後データが有効に活用され地震学の進展に貢献することを期待している。

文献

- Ishii H. and Kato T., 1989, Detectabilities of earthquake precursors using GPS, EDM and strain meters, with special reference to the 1923 Kanto earthquake, 1989, J. Geod. Soc. Japan, **35**,75-83, DOI <https://doi.org/10.11366/sokuchi1954.35.75>.
- 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.
- 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・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. DOI: 10.4294.

- 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.
- 笠原 稔, 2017, 東濃地震科学研究所の歪計・応力計十字アレイで観測された地震動記録の収録 —その 1 東濃地震科学研究所 歪応力地震動記録 DB の構造—, 東濃地震科学研究所報告, **38**, 5-22.
- 気象庁, 2013, 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震調査報告 1.3 マグニチュード, 気象庁技術報告, 133, 22.
- 中根勝見, 1923 年関東地震に伴う二等三角点の変位の再計算, 1978, 測地学会誌, **24**, 214-225, DOI <https://doi.org/10.11366/sokuchi1954.24.214>.
- 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, 210-220.
- 佐藤良輔・岡田義光・鈴木保典・阿部勝征・島崎邦彦, 1989, 日本の地震断層パラメータ・ハンドブック, 鹿島出版会, 300pp.

