

## 新開発ボアホール応力計の信頼性評価について

### — 固体地球潮汐との比較 —

佐野修・大久保慎人・徳永朋祥・愛知正温・本多亮・鶴岡弘・浅井康広

#### 1. はじめに

東濃地震科学研究所で開発されたボアホール設置型応力計はモルタルを介して岩盤と接触するセンサー端部に加えた圧力で較正されているので、センサー出力は応力に換算できる(例えば *Ishii and Asai, 2015*). しかしその出力(応力)は、ボアホールを含む岩盤、モルタルおよびステンレス管からなる力学的インクルージョンによる応力擾乱の影響を受ける。地球科学者や岩盤工学研究者が知りたい擾乱の影響が含まれていない応力変化を知るためには、計測された応力変化と遠方応力場の関係を知る必要がある。第一報では、センサー軸がボアホール軸に垂直な状態(以後、水平センサーと呼ぶ)をモデル化し、三次元有限要素法解析により外力変化とセンサー出力の関係を求めた。その結果、応力センサーの感度特性は岩盤の弾性率の影響を受けることを示し、さらに、異なる等価弾性率のセンサーを用いた並行観測を実施すれば岩盤の弾性率も決めることができるので、他の手法を介在することなく、自己完結的に新開発の応力計のみの観測結果から遠方の応力変化を決めることが可能であることを示した。第二報では、センサー軸がボアホール軸に平行な状態(以後、鉛直センサーと呼ぶ)を追加するとともに、モルタルの弾性率が所定の値と異なった場合についても検討を加えた。本報告は、理論潮汐との比較により、応力計で計測されたデータおよび本研究で提案された解析手法の信頼性を評価する。

#### 2. 基本原理

ボアホールを利用した地殻応力測定については多数の文献(例えば佐野[2005]; *Sano et al. [2005]*)による解説がある。具体的なモデルも含めた詳細な解析原理は第一報および第二報で解説されているが、概略を述べると以下のとおりである。一般に、ボアホールの擾乱を受けない状態の遠方応力場は東西・南北・鉛直方向を軸とした観測座標系の応力成分を未知数とすることが多いが、一般化して $\sigma_{ij}$ と表すこととする。ボアホール内に応力計を設置した場合、異なる複数の方向を向いた応力センサーが存在する。ここで、個々のセンサーの軸方向および垂直な方向を座標軸としたセンサー座標系の応力成分を $\sigma'_{ij}$ とすると、二階のテンソルの座標回転、すなわち

$$\sigma'_{ij} = a_{ik} a_{jl} \sigma_{kl} \quad (1)$$

により、 $\sigma'_{ij}$ は観測座標系の応力成分で表される。ただし $a_{ij}$ は新旧座標系に関する方向余弦である。一般に、応力センサーの設置方向は既知であり、式(1)の方向余弦は応力計設置時に定まっている。したがって応力センサーにおよぼす $\sigma'_{ij}$ の影響、すなわちセンサー座標系の応力成分に関する感度係数を知ることができれば、式(1)を用いて遠方応力 $\sigma_{ij}$ に関する応力センサーの感度係数が求められる。ここで複数のセンサーのうち、例えば $p$ 番目のセン

サ-の  $\sigma_{ij}$  に対する応答，すなわち感度係数を  $c_{pij}$  とすると，観測量すなわちセンサー出力  $S_p$  と  $\sigma_{ij}$  の関係は

$$S_p = c_{pij} \sigma_{ij} \quad (2)$$

と表すことができるので，三次元の場合，未知数の数，すなわち6つ以上，二次元の場合で3つ以上の観測量があれば，連立一次方程式あるいは最小自乗法により， $\sigma_{ij}$  を求めることができる。

### 3. 三次元有限要素法解析

第一報と同様に，岩盤から一辺約 4 m の立方体を切り出したモデルを作成した。第一報と異なり，第二報以降では対称問題とせず，中心部にセンサーが存在するフルモデルを採用した。モデルの全体図およびセンサー部拡大を図1および図2に示す。応力変化率が高い領域を細かく分割しただけでなく，解析に用いた三次元有限要素法解析プログラム(3D- $\sigma$ ：地層科学研究所)の最適化機能を利用し再分割した。実際のセンサー部は拡大装置等，複雑な構造であるが，応力センサーで計測される応力はボアホール壁面間で力学的に抵抗することによってのみ生じるので，センサー較正時に加えた圧力と変形の関係にもとづき，センサーモデル端面に較正時と同じ圧力を加えた場合に同じ変形が生じるようなステイフネスをもつ単純構造モデルに置き換えた。

解析は応力センサー軸に平行な方向の応力，垂直な方向の応力，およびせん断応力について，それぞれ端面に 1MPa 作用した場合について個別に実施した。境界条件として，力を加えた面以外のすべての面について，端面に垂直な変位を拘束した場合(変位拘束)および変位を許した場合(変位自由)，さらに，地表面方向がその他の方向と異なる可能性

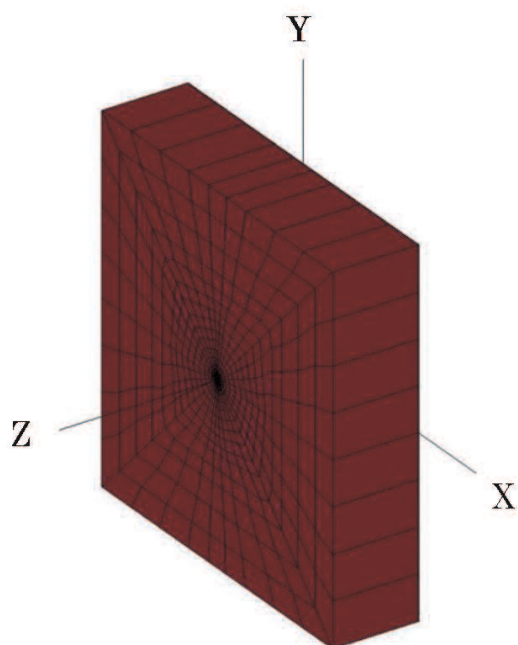


図1. 三次元有限要素法数値解析モデル。中央部，Z軸方向にボアホールがある。

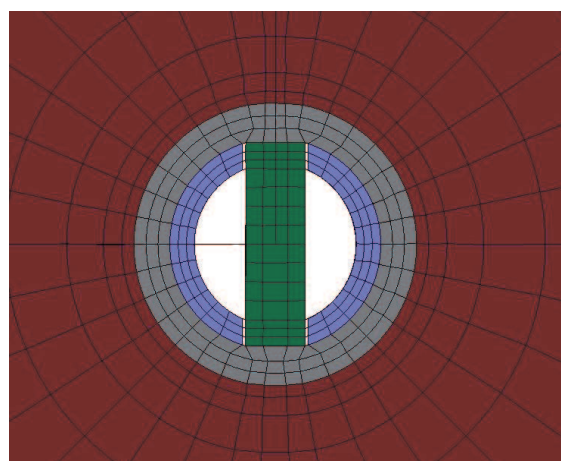


図2. 対称面断面図。応力センサー(緑色)はモルタル(灰色)と結合しているが，ステンレス管(青色)とは空気層で切断されている。

があるので、変位拘束条件でモデル上面のみ変位自由とした場合、以上、三とおりについて解析を実施した。

固体地球潮汐は物体力である。また、鉛直方向の応力など、重力起源の応力も物体力である。さらに運動方程式で表現される応力波(地震波)には慣性項が含まれる。三次元有限要素法解析では、これら物体力起源の応力もすべてモデル境界の表面力に置き換えた。このような置き換えは弾性解析ではよく行われる(例えば, Aki and Richards, 1980)。ただし、相対する面に大きさが等しく逆向きの力が作用している場合が計算されているので、物体力起源の応力場がモデル内部で一様であることが仮定されている。この仮定は数mのモデルサイズ内の変化を問題としない範囲で有効である。

ここでえられた結果を式(2)に代入し、観測量を含む連立方程式を解けばボアホールの変乱を逃れた遠方応力場の変化を求めることが可能となるが、そのためには岩盤の弾性率が既知でなければならない。第二報で述べたとおり、複数の異なる等価スティフネスの応力センサーがあれば周辺岩盤の弾性率も推定可能であるが、本報告ではボアホール検層データを用いて岩盤の弾性率を推定した。

#### 4. 固体地球潮汐との比較

陶史の森に設置された応力計でえられた応力値を式(2)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図示すると図3のとおりである。図中、オレンジ色で示された結

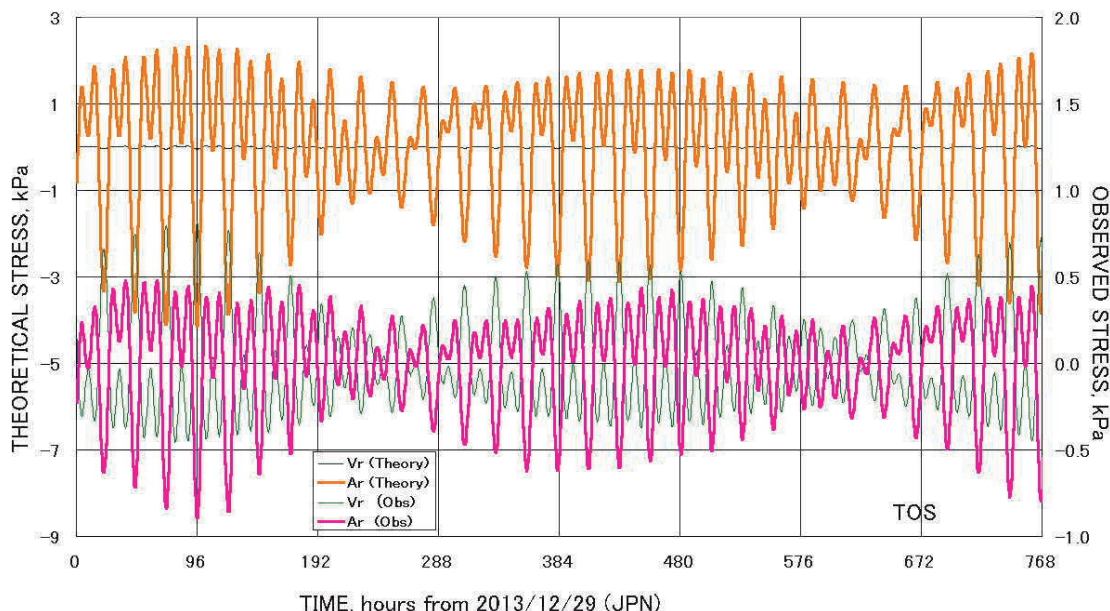


図3. 理論潮汐解析結果(左軸)および陶史の森に設置された応力計でえられた結果(右軸)。オレンジおよびマゼンタ色で表示された結果はそれぞれ理論解析および求められた遠方応力の水平面内主値( $\sigma_N + \sigma_E$ )。図の上部、左軸で0 kPaの位置に黒色で表示された非常に小さな変動、および下部の緑色で表示された結果は、それぞれ理論解析および応力計でえられた鉛直応力変化である。

果は理論固体潮汐，マゼンタ色で示された結果は解析で求められた遠方応力であり，いずれも水平面内主値 ( $\sigma_N + \sigma_E$ ) である．また黒色および緑色で示された結果はそれぞれ理論固体潮汐および遠方応力の鉛直方向成分である．なお，理論潮汐と遠方応力のスケールは4倍異なっており，それぞれ左軸および右軸に示されている．図中に示された固体地球潮汐と解析された遠方応力の水平面内主値の振幅がほぼ等しいが，スケールが4倍異なっていることに注意が必要である．

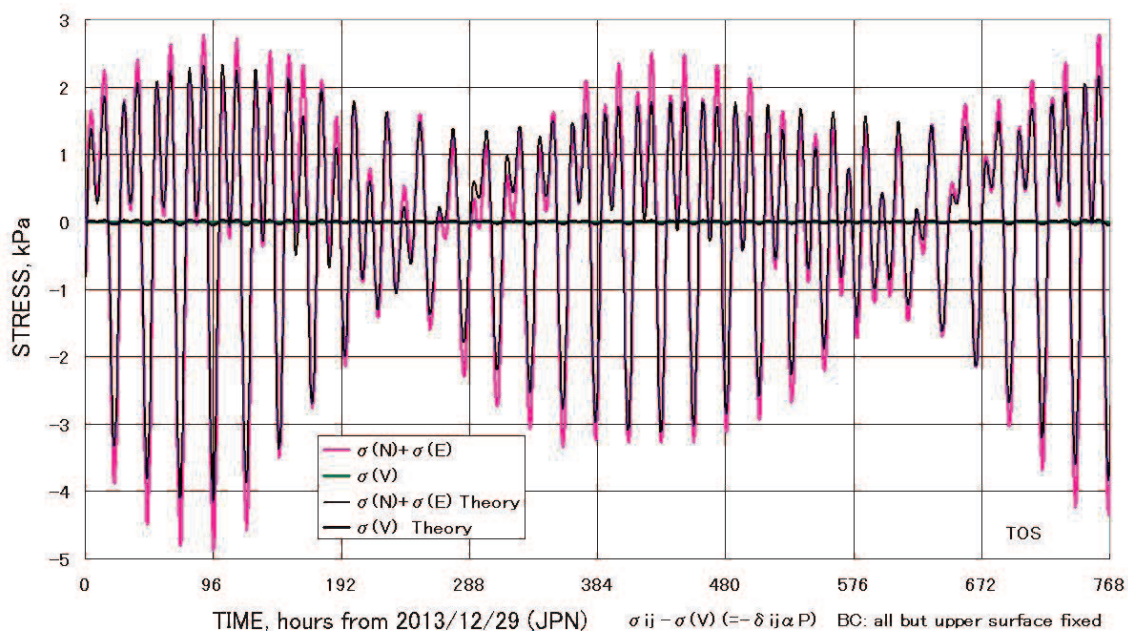


図4. 陶史の森に設置された応力計でえられた結果をもとに観測方程式を解き，鉛直応力を  $-\alpha P$  とみなして式(3)により求めた全応力変化．水平面内主値 ( $\sigma_N + \sigma_E$ ) がマゼンタ色，緑色が鉛直応力．理論固体潮汐は黒色で示されている．なお，鉛直応力は理論潮汐と遠方応力が重なって見えている．

きれつや空隙を含む岩盤に力が作用したときの変形を扱う Poroelasticity によれば，岩盤内のひずみは全応力の寄与分と水圧の寄与分の和であらわされる (例えば Wang, 2000)．本研究で採用された応力計はボアホール内にセットされた弾性部材に生じる応力を計測しているが，その応力の起源は弾性部材の端面の変位なので，この手法でえられる応力もまた全応力と水圧の寄与分の和となる．理論固体潮汐解析結果は全応力なので，理論と観測の結果を比較する際に，式(2)で示される観測方程式を解いてえられる結果，すなわち有効応力に水圧の寄与分， $\alpha P$  を加算する必要がある (圧縮応力を正とする)．ただし  $\alpha$  は Biot-Willis の係数である．すなわち，

$$\sigma_{ij}(\text{全応力}) = \sigma_{ij}(\text{有効応力}) + \delta_{ij}\alpha P \quad (3)$$

により，全応力を求める．ただし  $\delta_{ij}$  はクロネッカーのデルタである．陶史の森のボアホールでは応力計周辺の水圧変化が計測されていないが，図3に示すとおり，理論解析結果は潮汐の鉛直応力成分がほぼゼロであることを示しているのので，式(3)と比較すれば，観測方

程式を解いてえられる鉛直応力成分がほぼ $-\alpha P$ と等しいことがわかる。すなわち、水圧計測結果がなくても、全応力がほぼゼロの成分があれば、その方向の有効応力成分を $-\alpha P$ の代わりに用いることができる。

作業手順をまとめると、

- (1) 観測された結果を式(2)に代入してえられる観測方程式を解き、 $\sigma_{ij}$ を求める。
- (2) 応力計周辺の水圧変化がえられている場合 $\alpha P$ を、えられていない場合でも、鉛直応力変化がほぼゼロとみなせる場合には、観測方程式を解いた結果えられる鉛直応力成分を $-\alpha P$ とみなし、式(3)により、遠方の全応力変化を求める。

上記の手順により求められた全応力変化と理論潮汐解析結果を比較した結果を図4に示す。図中、マゼンタ色で示された水平面内主値、 $\sigma_N + \sigma_E$ 、および緑色で示された鉛直応力は、黒色で示された固体理論潮汐解析結果と良く一致している。なお、鉛直応力成分は水平面内主値と比較して桁違いに小さいため、同一スケールで示した図4では計算された全応力と理論潮汐が識別困難な程度に重なって見えている。この結果は新たに開発された応力計が岩盤内部の有効応力を十分高い信頼性で計測できていることを示している。

## 5. まとめ

ボアホール設置型応力計の観測値からボアホールの影響を受けない位置の遠方応力変化を求める問題は、周辺媒体と異種媒体内部の応力の関係を求めるインクルージョン問題である。そこでボアホール軸に垂直な方向を計測する目的で設置される水平応力計およびボアホール軸に平行な方向を計測する目的で設置される垂直応力計を岩盤内部のボアホールにモルタルで埋設した状態をモデル化し、センサー部で観測される応力変化と遠方応力の関係を岩盤およびモルタルの弾性率をパラメータとして三次元有限要素法をもちいて解析した。また、Poroelectricityによれば、岩盤内部に設置された弾性媒体内部の応力を計測するタイプの応力計でえられる応力は有効応力である。本研究では陶史の森に設置された応力計のデータにより作られる観測方程式を解き、周辺岩盤内部の有効応力を求めた結果にもとづき全応力を求め、理論固体潮汐解析結果と比較した。これらは良く一致しており、応力計の有効性が示された。

**謝辞** 本研究で使用したデータは石井紘博士と浅井康広博士により開発されたボアホール応力計によりえられたものである。

## 参考文献

- Aki, Keiiti, and Paul G. Richards; Quantitative Seismology, Theory and Methods, 1980.
- Ishii, Hiroshi, and Yasuhiro Asai; 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*, 2015, DOI 10.1186/s40623-015-0197-z.  
佐野 修, 地殻応力計測手法と岩石力学, *地学雑誌*, Vol. 114, No. 6, pp. 1003-1021, 2005  
Sano, Osam, Hisao Ito, Atsuo Hirata, Yoshiaki Mizuta, Review of methods of measuring  
stress and its variations; *Bull. Earthq. Res. Inst.*, Vol. 80, pp. 87-103, 2005.  
Wang, H.; *Theory of Linear Poroelasticity with Application to Geomechanics and  
Hydrology*, 2000.