

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—

佐野 修 (東濃地震科学研究所)

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校正されているので、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ている。そのため擾乱の影響を除いた応力状態を知るには、計測された応力変化と遠方応力場の関係を示す観測方程式を解く必要がある。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結果、応力センサーの感度特性が岩盤の弾性率の影響を受けること、および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、自己完結的に遠方応力変化を決めることができることを示した。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、モルタルの弾性率の影響についても検討を加えた。第三報では、応力計で計測されたデータを観測方程式に代入して解いた結果と理論潮汐解析結果を比較することにより、観測方程式の解は有効応力を与えること、およびその解から水圧に *Biot-Willis* 係数 α をかけた $\alpha \mathbf{P}$ を引くことにより全応力が求まることを示した(引張応力を正とする)。本報告では 2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震による地震波形を川崎他 [2014] による理論解析結果と比較することにより、応力計および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。本研究の解析原理は第一報および第二報に詳しく示されているが、概略を述べると以下のとおりである。まず、ボアホールの擾乱を受けない状態の遠方応力場を観測座標系に関する応力成分 σ_{ij} で表す。応力計内の異なる方向を向いた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 σ'_{ij} とすると、二階のテンソルの座標回転により、 σ'_{ij} は観測座標系の応力成分で表される。したがって応力センサーにおよぼす σ'_{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、遠方応力 σ_{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 番目のセンサーの σ_{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 σ_{ij} の関係は

$$S_p = c_{pij} \sigma_{ij} \quad (1)$$

と表すことができる。添え字 ij はテンソルの加算規約が適用される。この方程式を観測方程式とよぶ。未知数の数、すなわち三次元で6つ以上、二次元で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、 σ_{ij} を求めることができる。

3. 三次元有限要素法解析

既報と同様に、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。実際のセンサー部は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センサー部材が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ィフネスをもつ単純構造モデルに置き換えた。なお、解析には三次元有限要素法解析プログラム(3D- σ : 地層科学研究所)を用いた。

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、それぞれモデルの端面に 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、力を加えた面に垂直なすべての端面について、面に垂直な変位を拘束した場合(変位拘束)、面に垂直な変位を許した場合(変位自由)、さらに、変位拘束条件でモデル上面の地表面方向(上下)の変位のみ自由とした場合、以上、三とおりについて解析を実施した。

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が、三次元有限要素法解析では、すべての物体力をモデル境界の表面力に置き換えた(その原理は、例えば、Aki and Richards, 1980)。また、相対する端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。なお、既報と同様に、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. 観測方程式の解の意味

含水したきれつや空隙を含む岩盤に力が作用したときの力と変形と水の移動の関係を扱う 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、すなわち有効応力を与えると考えられる。理論固体潮汐解析結果や理論地震波形のように水圧の寄与分を考慮していないモデルによりえられた結果は全応力なので、理論と観測方程式の解を比較する際には観測方程式の解、すなわち有効応力から水圧の寄与分、 αP を引く必要がある(引張応力を正とする)。ただし α は Biot-Willis の係数である。すなわち、

$$\sigma_{ij}(\text{全応力}) = \sigma_{ij}(\text{有効応力}) - \delta_{ij} \alpha P \quad (2)$$

により、全応力が求められる。ただし δ_{ij} はクロネッカーのデルタである。

5. 陶史の森(TOS)でえられた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(TOS)で観測した結果を川崎他[2014]による理論解析結果と比較して図示すると図1のとおりである。地震波形が重なるのを避けるため、シフトして図示されているが、上から順にラディアル、トランスバース、水平面内主値および鉛直応力である。相対的に滑らかな曲線が理論波形であり、高周波を含む曲線が観測結果である。また、川崎他[2014]の計算では鉛直応力がゼロと仮定されている。理論波形と観測結果の形状は良く似ているが、第一報で示したとおり、岩盤の弾性率が50 GPaの場合、感度係数が約0.5程度となるため観測結果の振幅は理論波形の振幅よりかなり小さい。

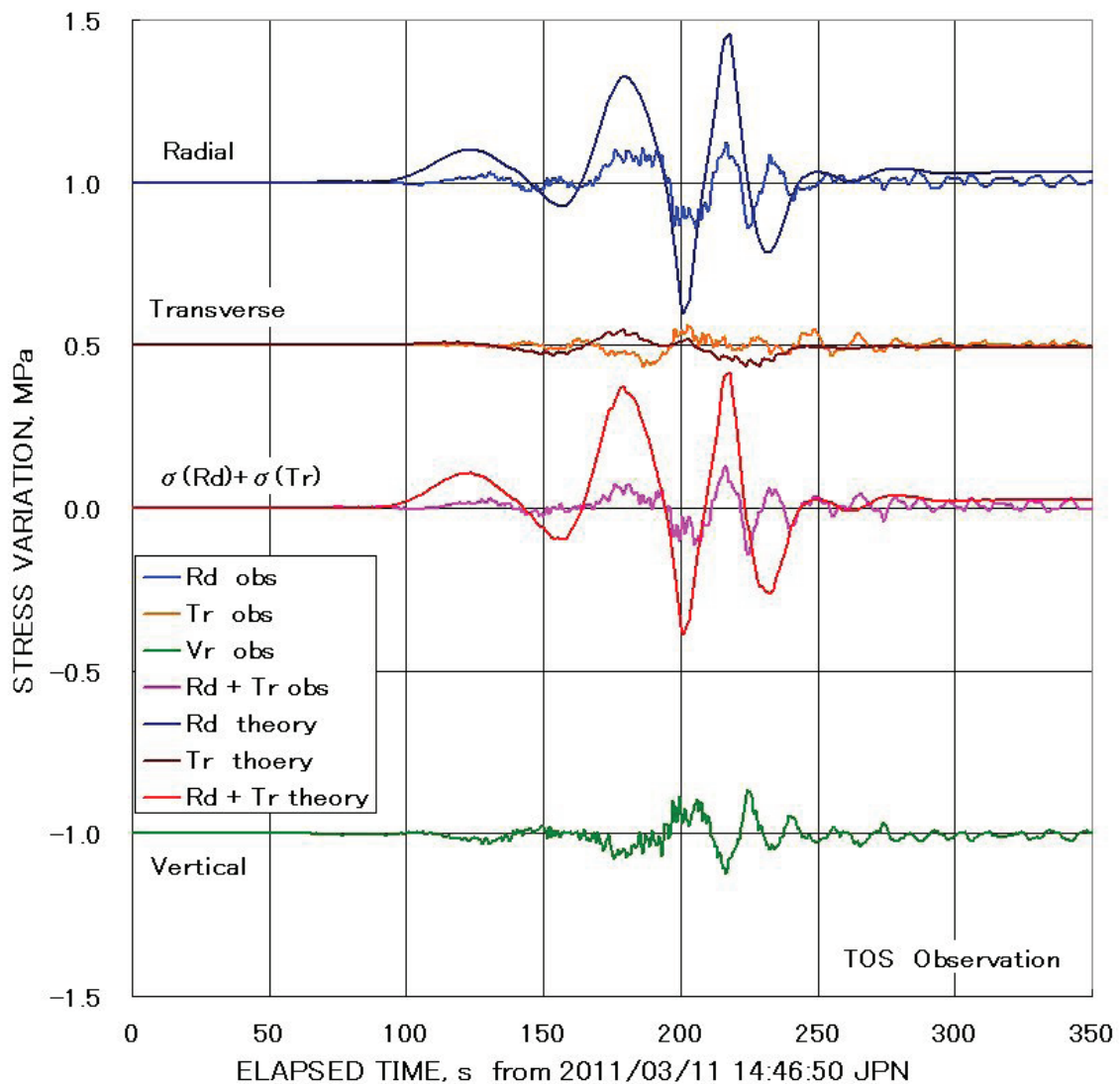


図1. 陶史の森に設置された応力計で観測された東北地方太平洋沖地震による応力波。比較的なめらかな曲線は川崎他[2014]による理論波形。

式(1)で示される観測方程式に観測結果を代入してえられた遠方応力場を図示すると図2のとおりである。ただし観測方程式では鉛直応力を主応力と仮定している。観測方程式の解は有効応力であり、理論波形は全応力であるため、完全には一致していないが、観測結果そのままよりは理論波形に近づいていることがみてとれる。繰り返しになるが、理論波形と観測方程式の解のいずれが正しいという問題ではない。理論波形は水圧応答がない岩盤内の応力変化であり、観測方程式の解は含水している岩盤内に実際に生じている有効応力変化である。

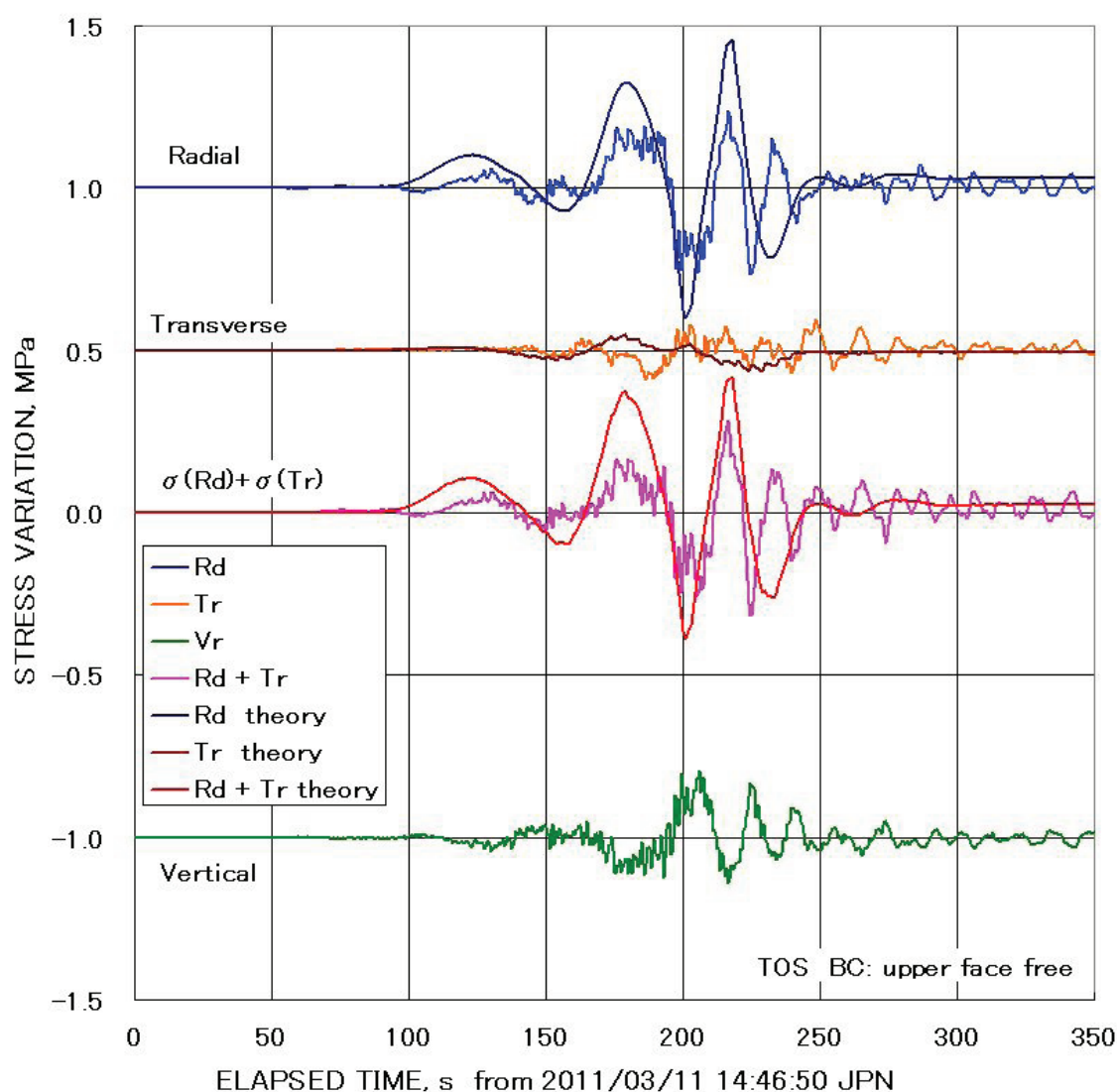


図2. 陶史の森に設置された応力計の観測結果を観測方程式に代入し有効応力を求めた結果。比較的なめらかな曲線は川崎他[2014]による理論波形。

理論波形と比較するためには、4節で解説したとおり、観測方程式の解から αP を引いて全応力を求めることが必要である。しかし陶史の森には水圧記録が存在しないため、式(3)に示すとおり、有効応力の平均応力と全応力の平均応力の差により αP を求めた。

$$\alpha P = \sigma_{11}(\text{有効応力})/3 - \sigma_{11}(\text{全応力})/3 \quad (3)$$

ただし、 σ_{11} はテンソルの加算規約を適用する。また、理論解析結果は鉛直応力がゼロと仮定されていることに留意が必要である。このようにして求めた全応力と理論波形を比較して図示すると図3のとおりである。観測方程式の解から αP を引いてもとめた全応力変化は理論解析結果ときわめて良く一致している。このようにして求めた鉛直応力は約200秒までほぼゼロであり、理論解析でなされた仮定がほぼ成り立っていることがわかる。また、

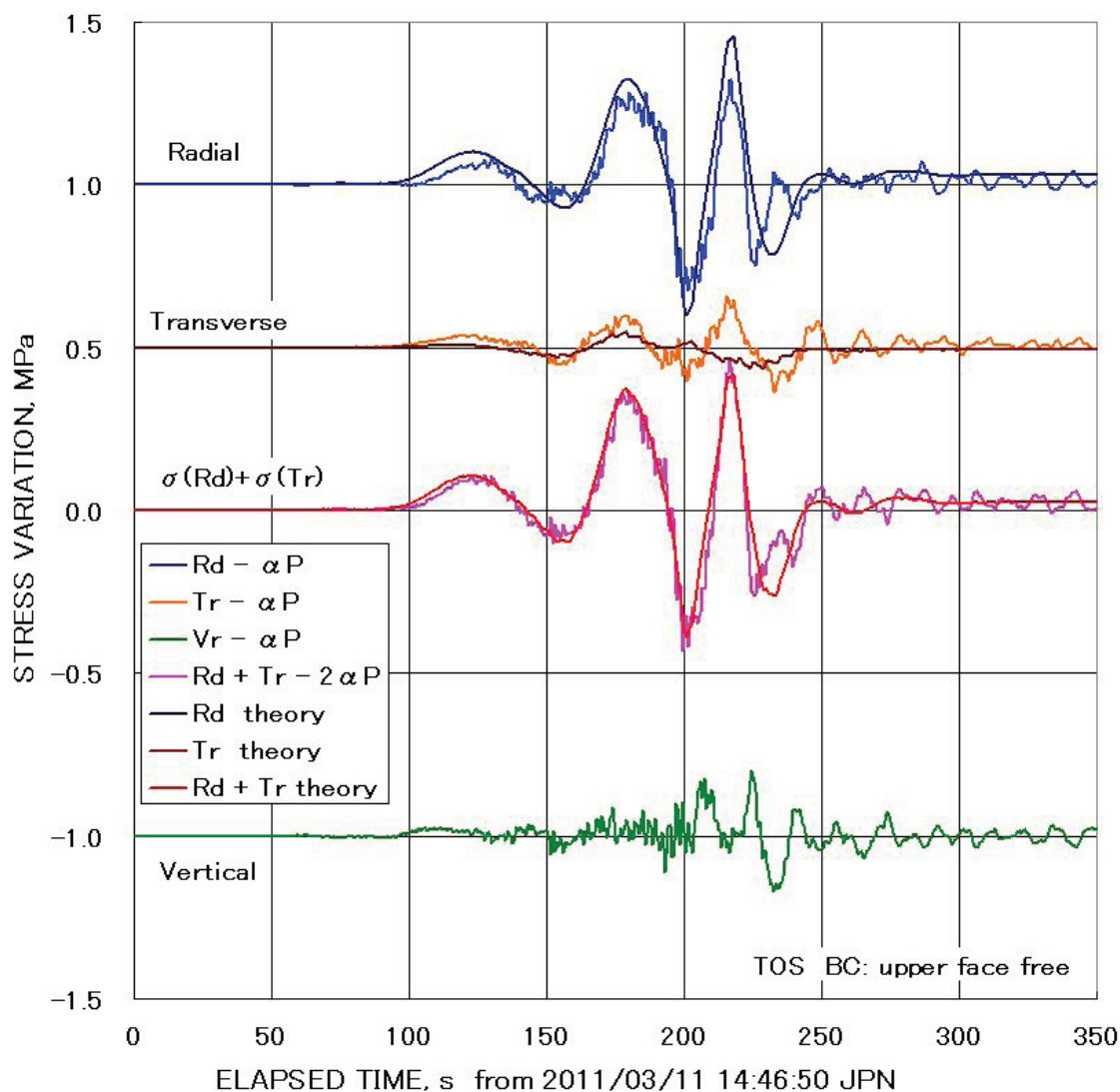


図3. 陶史の森に設置された応力計の観測結果を観測方程式に代入し解を求めた結果から αP を引き全応力に変換した結果。川崎他[2014]による理論波形ときわめて良い一致が認められる。

鉛直応力のノンゼロ成分の大部分が高周波成分であることは理論解析のモデルが単純すぎることを示唆している。

6. 超深層ステージ(STG200)でえられた結果と理論地震波形の比較

陶史の森(TOS)の解析で全応力の計算に用いられた式(3)には観測方程式の解だけでなく理論解析結果も含まれている。計算内に理論解析結果が含まれた全応力と理論解析結果がきわめて良く一致していると判断しているが、可能ならば理論解析結果を使わない結果と比較すべきであろう。超深層ステージ(STG200)には水圧計が設置されているので、その解析が可能であるが、図4に示すとおり、2011年3月の地震発生時にはSTG200の応力センサーの感度が初期感度から大きく変化していた。図4には2011年2月の最初の二週間に観測された三方向の水平センサーの出力および Gothic2 による理論潮汐が上段に、鉛直応力、水圧、および水平面内主値が下段に示されている。特に SH1 と SH2 の感度低下が著しく、SH1 の感度は初期感度の 1/10 以下である。応力計設置時に事前想定を超えた出水があったことがトラブルの遠因と考えられる。応力センサーとモルタルの境界やモルタル内部のきれつの増加が感度低下の原因と考えられ、STG200n が設置された経緯がある。

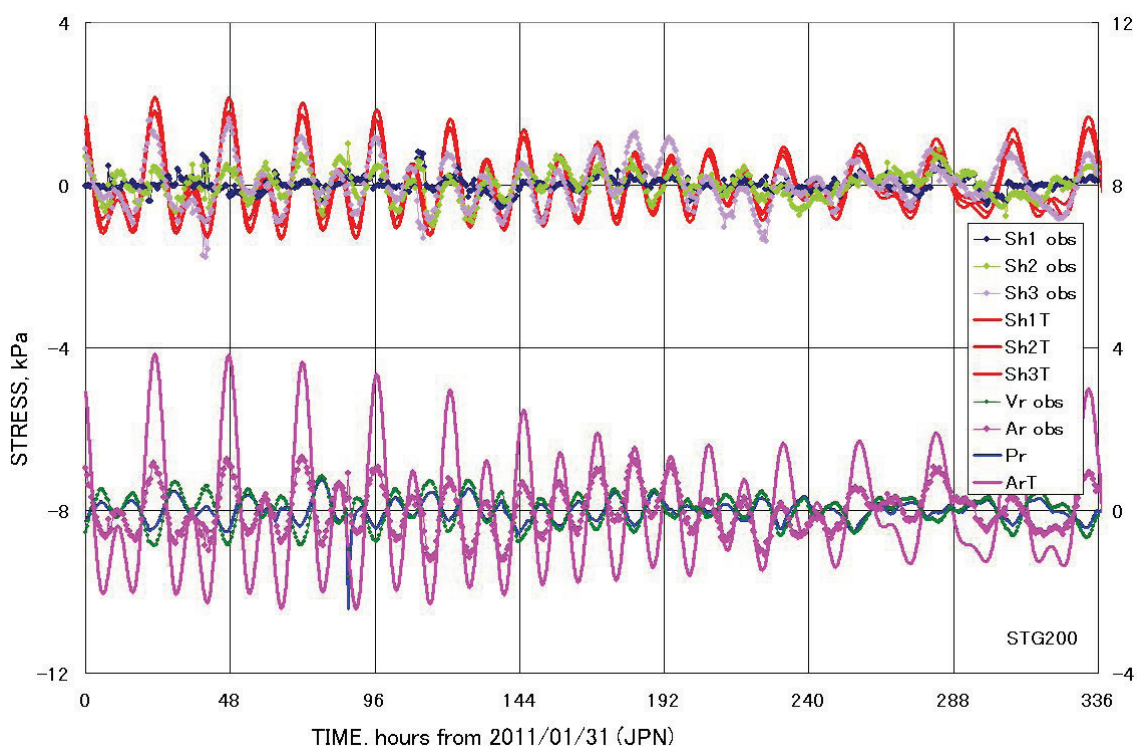


図4. 2011年2月の二週間に超深層ステージに設置された応力計(STG200)で観測された結果。水平面内の三方向(SH1, SH2, SH3)および Gothic2 による理論潮汐が上段に、鉛直応力、水圧および水平面内主値が下段に示されている。SH1 および SH2 の感度低下が著しい。特に SH1 の感度は初期感度の 1/10 以下である。

図4に示すとおり，2011年2月の時点で応力計センサーの感度が初期感度と異なっている．そこで，観測方程式を解いた結果から αP を引いた結果とGotic2を用いた理論潮汐と比較することにより感度を再評価した．式(1)が示すとおり，応力計の出力はセンサー軸に平行な応力だけでなく，すべての応力成分の影響を受ける．本研究では，センサー軸に平行な理論潮汐とのみ比較する手法を繰り返し，トライアル&エラーで再評価した．10回目の結果を示すと図5のとおりである．大気圧の影響やスポットノイズが残っているが，改善されていることが見てとれる．

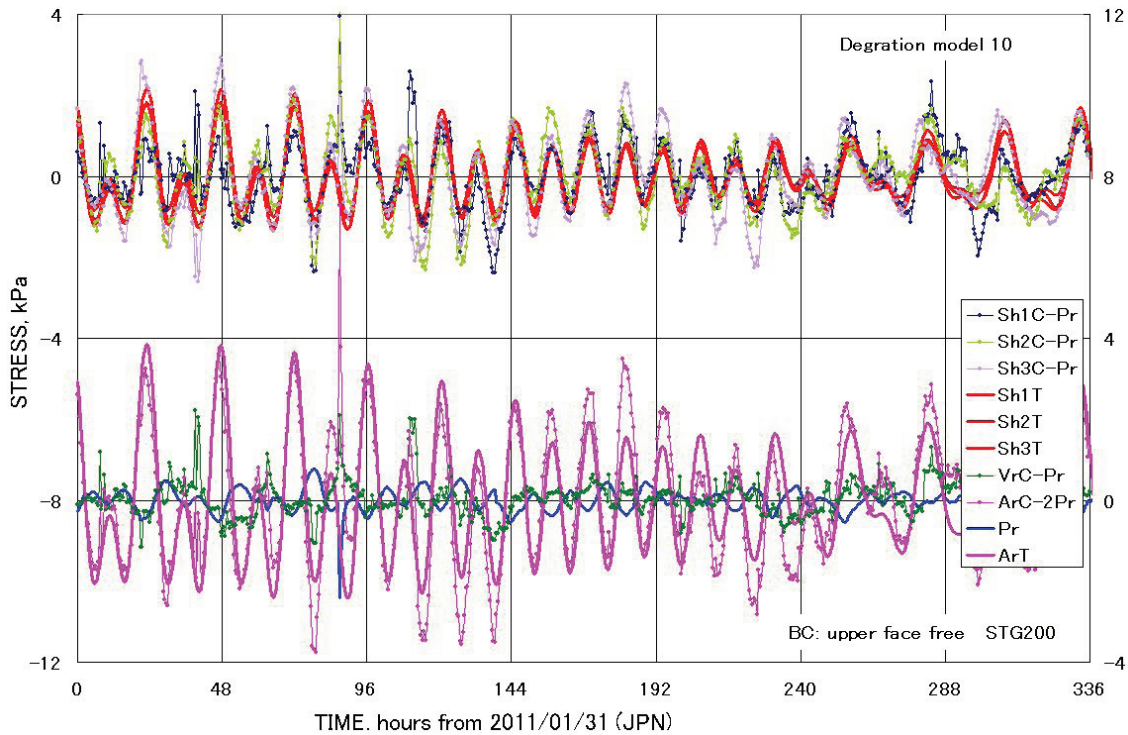


図5. 2011年2月の二週間に超深層ステージに設置された応力計(STG200)で観測された結果．Gotic2を用いた理論潮汐との比較により感度を再評価した．

2011年2月の二週間の観測データにもとづき，Gotic2を用いた理論潮汐と比較することにより各応力センサーの感度を再評価した．その結果を使用した観測方程式を用いて求められた解から αP を引いた結果(薄紫色表示)と陶史の森(TOS, 竹色表示)，および川崎他[2014]による理論地震波形を比較して図示すると図6のとおりである．STG200の計算には実測された水圧が使用されている．いずれも230秒程度までは比較的良い一致が認められる．特に，TOSの鉛直応力では高周波を主体としたノンゼロ成分が残っていたが，実測された水圧を計算に使用したSTG200の鉛直応力では約200秒まで極めて小さくなっていることに注目されたい．この違いの理由として，理論地震波形に用いたモデルが単純な断層モデ

ルであることが考えられる。この視点から理論地震波の計算結果を修正することも可能であろう。図6の最下段には、STG200で実測した水圧を用いてえられた αP と水圧を使わずに式(3)を用いたTOSでえられた αP が比較されている。おおむね良く一致している。

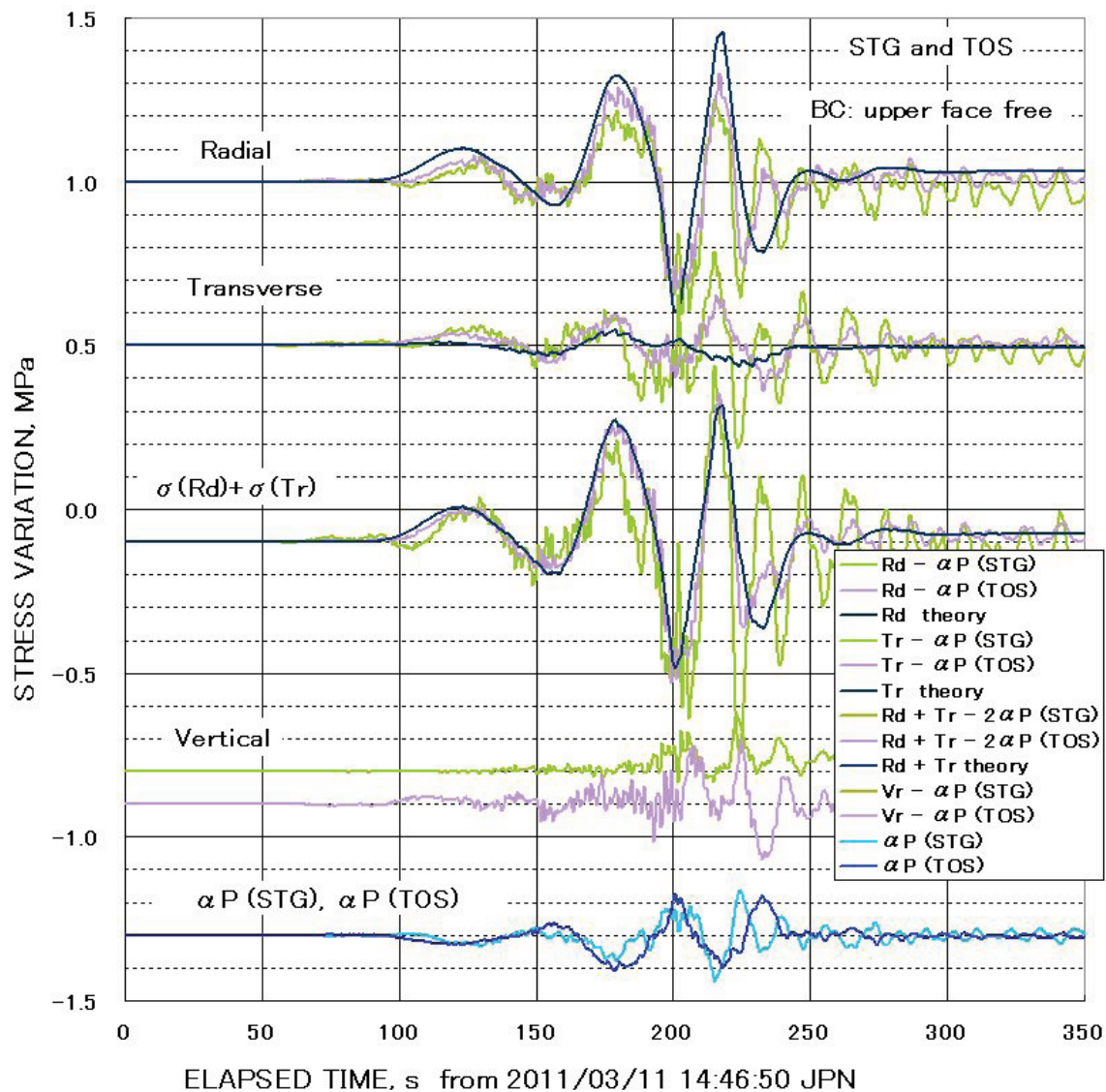


図6. Gotic2を用いた理論潮汐との比較により感度を再評価したSTG200の結果と陶史の森(TOS)の結果, および川崎他[2014]による理論地震波形の比較. STG200の全応力は観測方程式の解から実測された水圧を用いて求めた αP が引かれており, TOSの全応力は式(3)による αP が引かれている. 220秒程度までは互いに良く一致している. TOSの鉛直応力では高周波を主体としたノンゼロ成分が認められるが, 実測された水圧を計算にもちいたSTG200の鉛直応力は約200秒まできわめて小さいことに注目されたい. また, 最下段には実測水圧を用いた αP (STG200)と式(3)を用いた αP (TOS)が比較されているが, 220秒程度まで比較的良い一致が認められる.

7. 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、Poroelasticity 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および超深層ステージ 200 に設置された応力計および水圧計のデータを用い、観測方程式を解いて周辺岩盤内部の有効応力を求めた結果、および αP を引いて求めた全応力を川崎他[2014]による2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震の理論地震波形と比較した。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.
- 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, 地震2, 67, 2014, doi 10.4294/zisin.67.87
- 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.

