

連続観測応力計の観測レンジは如何に広いか？

東濃地震科学研究所 石井 紘、浅井康広、古本宗充

Abstract

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震 ($M_w=9.0$) においては長周期成分を記録するために設置されている STS 地震計や速度型地震計はほとんどスケールアウトして大振幅は記録できなかった。しかしながら当研究所で開発した複数の連続観測用の応力計や歪計はすべて最大振幅まで記録できた。そこで連続観測用ボアホール応力計・歪計の観測可能レンジを調べた。その結果、当研究所の応力計や歪計は高感度成分でも広い観測可能レンジを有し、周波数も直流成分まで応答し、東北地震より数倍以上大きな地震の波形でもスケールアウトすることなく記録できることがわかった。また、当研究所のボアホール応力計や歪計が東北地方の東北地震に最も近い海岸に設置してあってもスケールアウトすることなく記録できたであろうことが確かめられた。

応力計・歪計による東北地震の記録

東濃地震科学研究所では1台の計器で深部ボアホールにおいて多種類・多成分の観測が可能な計器(地殻活動総合観測装置)を開発し、複数の観測点において観測を継続している。東北地震においては当研究所の長周期波動を記録するために作動している STS1 地震計、Guralp 地震計やサーボ速度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。F-ネットの STS 地震計もほとんどスケールアウトしていた(NIED, 2011)。しかし地殻活動総合観測装置に搭載している応力計や歪計はスケールアウトすることなく波形を記録することが出来た(Ishii and Asai, 2015)。TOS ボアホール観測点(深度 512m)で記録した東北地震の応力計と STS1 地震計の記録例が図1に示してある。観測された記録は震源から約 600km 離れているが応力計の記録はスケールアウトすることなく記録できているが STS1 地震計の記録はスケールアウトしている。

応力計と STS 地震計の観測可能レンジ

観測可能なレンジを見積もるために初動が到達する直前のグランドノイズと最大振幅あるいはスケールアウト振幅を比較した。石井他(2017)によると応力計のノイズは約 0.022kPa であり、STS1 地震計は約 2.0×10^{-6} m/s である。応力計のノイズは応力のグランドノイズよりセンサーのノイズが大きいため記録されているのはセンサーのノイズである。STS1 地震計のスケールアウトした振幅は 1.6×10^{-2} m/s であるから(スケールアウトの振幅)/(STS1 のノイズ)は 8.0×10^3 となり、78.1dB となる。鉛直成分応力計は高感度成分と低感度成分を搭載しているがここに示した応力計は高感度成分である。(最大の応力振幅)/(応力計のノイズ)は 1.2×10^4 となり、82.9dB となる。ここで STS1 地震計の場合はスケールアウトした振幅であり、応力計の場合は観測された最大振幅である。しかしながら応力計の場合はより大きな振幅まで観測可能である。Ishii & Asai (2015)には応力計の説明と感度検定の結果が述べられている。それによると応力計の高感度鉛直成分は 2.02MPa まで観測可能である。従って(観測可能応力振幅)/(応力計のノイズ)は 9.2×10^4 となり、99.3dB となる。この場合は瑞浪観測点の STS1 地震計と比較して約 11.5 倍観測可能レンジが広いことになる。表 1 に STS1 地震計と応力計の高感度鉛直成分の観測可能範囲の比較を示している。STS1 地震計の場合は仕様によると clip level が設定されており、 ± 13 mm/sec と記載されている。これはマグニチュード 9.5 程度の地震が震央距離 30 度程度までスケールアウトせずに観測できるように設定されたものである。STS1 地震計は長周期まで観測可能にするためフィードバック方式を採用している。このため大出力の場合は大きな電流をフィードバックする必要があるためこのような制限を設定していると考えられる。応力計の場合は感度を落とした出力信号を記録する必要はなく高感度成分で十分 3.11 地震の 6 倍程度大きな地震波でも記録することができる。応力計は応力ばかりでなく歪も観測できている(Ishii & Asai, 2015)。感度検定結果から換算すると歪ノイズは 2.9×10^{-9} となり、鉛直歪の最大振幅と歪ノイズの比は 9.3×10^4 となり、99.3dB で応力とほとんど同じ観測レンジになる。

応力計の応力と歪の観測可能レンジ

応力計は応力と歪の両方を観測できるのでこの節では応力計の応力と歪の各成分に関して観測可能レンジについて議論する。(Ishii & Asai, 2015)において応力計の応力および歪の感度検定が示されており、そ

の論文の表1に応力値および歪値と出力電圧の関係が求められている。TOS 観測点の応力計の AD 変換は±4V である故、出力電圧はこの範囲内のみ有効である。感度検定結果と出力電圧を考慮すると応力と歪の観測可能レンジを求めることができる。求められた応力と歪の観測可能範囲は表2に示されている。応力値の水平成分の観測可能範囲は 3.6~4.6MPa で高感度鉛直成分(2.02MPa)より広い。応力計は低感度鉛直成分を常備しているが観測可能範囲は 32.5MPa であり、震源近傍においても観測出来る値である。一方、歪の観測可能範囲は高感度成分で 10^{-4} のオーダーとなっている。低感度歪成分においては 10^{-3} のオーダーであり、岩石の破壊限界歪近くまで観測可能となっている。AD 変換器の入力が±4V 以上の高分解能のものが開発されれば、応力および歪の観測可能範囲は更に広がる。

ボアホール応力計は東北地方海岸において東北地震を観測できたか？

前節では応力計の応力と歪に関する観測可能範囲を示した。震源から約 600km 離れた TOS 観測点において観測された鉛直応力の地震波形の最大振幅は約 300kPa であり、振り切れずに記録している。しかし震源に近い東北地方の海岸に設置していた場合はどうであろうか。東北地震の震源に最も近いと思われる電子基準点、牡鹿(EL05741346001)と女川(EL05741533502)について考える。「牡鹿」基準点の震央距離は約 121km であり両点の距離は 17.2km である。牡鹿と女川の地震による変位は 5.3m と 4.96m である。従って歪は約 2×10^{-5} である。表 2 によると観測可能範囲は $2.2 \times 10^{-4} \sim 2.6 \times 10^{-3}$ であり、全ての歪計はスケールアウトすることなく歪変動を記録できていることがわかる。花崗岩の弾性定数は $4 \sim 9 \times 10^{10}$ Pa 程度であるから応力変化は 0.8~1.8MPa と推定できる。表 2 によると観測可能範囲は 2.0MPa ~32.5MPa であり、全ての応力計でスケールアウトすることなく応力変化が記録できていることがわかる。

結論

東北地方太平洋沖地震($M_w=9.0$)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。しかしながらほとんどの速度型地震計や STS 地震計はスケールアウトして大振幅は記録できていない。そこで連続観測用ボアホール応力計はどの程度の振幅まで観測が可能であるかを調べた。応力計は応力だけでなく歪も観測可能であるので応力と歪の両方について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。

当研究所で開発した応力計や歪計は DC からの長周期地震波動を記録できる上大きな地震でもスケールアウトすることなく記録することができる。従って将来的に津波予報の研究に有効に利用できる可能性を有している。

参考文献

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、古本宗充、浅井康広、(2017)応力計の観測レンジについて —STS1 地震計との比較—、東濃地震科学研究所 地殻活動研究委員会報告書、No.38, pp1-3.

NIED (National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)
www.fnet.bosai.go.jp/waveform/?LANG=ja

東濃地震科学研究所パンフレット(2015)、http://www.tries.jp/activity/doc/2016052314301179_1.pdf

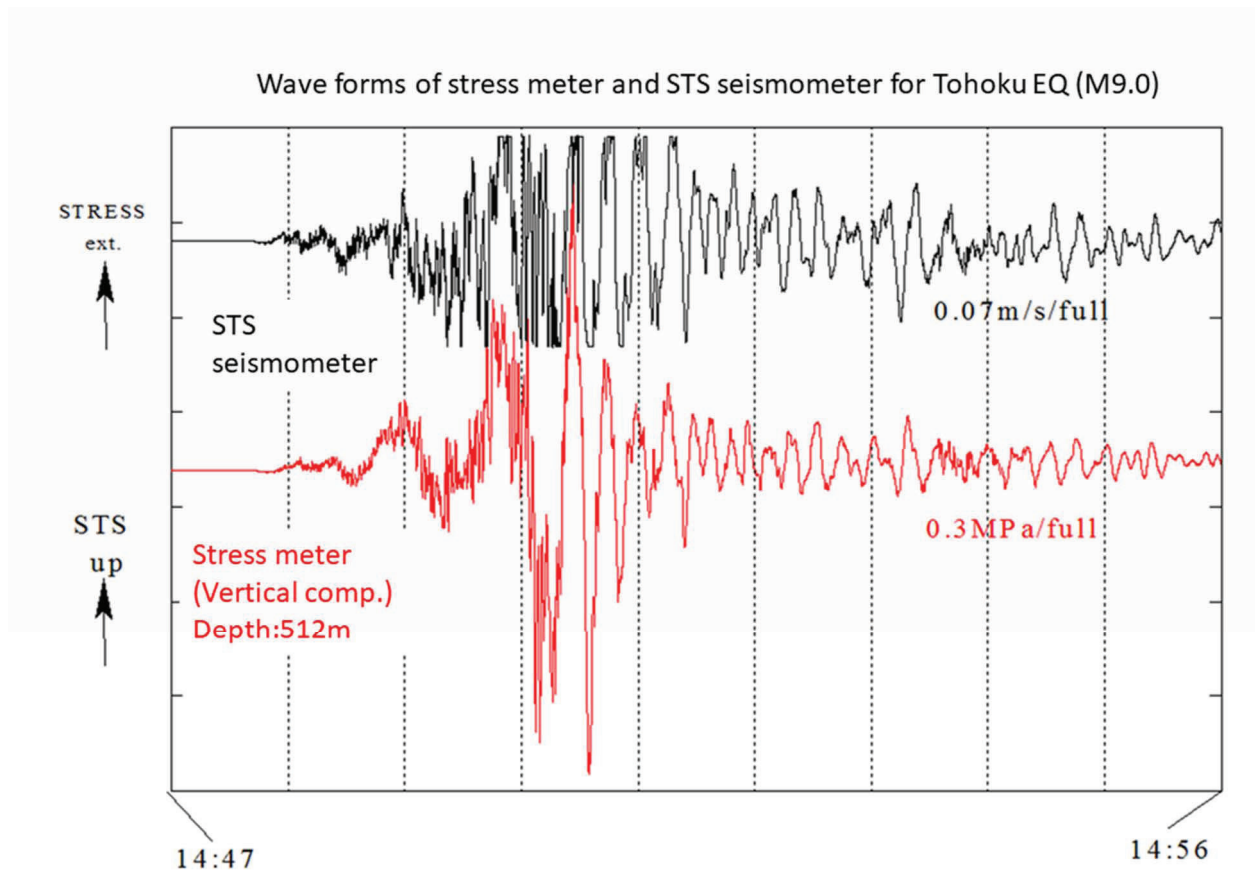


図1: 東北地方太平洋沖地震(M_w9.0)によって東濃地震科学研究所において観測された応力計(TOS 観測点:深度 512m)の鉛直成分と STS 地震計の鉛直成分(TOS 観測点)の地震動波形。

Comparison of observable range between STS and stress meter

STS地震計と応力計の観測可能範囲の比較(鉛直成分)

	ノイズ振幅 Noise amplitude	観測された最 大振幅 Maximum amplitude	最大振幅 / ノイズ振幅 Maximum amplitude/ Noise amplitude	観測可能振幅 / ノイズ振幅 Observable amplitude/ Noise amplitude
STS地震計 STS seismometer	2.0x10 ⁻⁶ m/s	1.6x10 ⁻² m/s	8.0x10 ³	8.0x10 ³
応力計 Stress meter	0.022kPa	約300kPa	1.4x10 ⁴	9.2x10 ⁴
備考		STS地震計はスケールア ウト振幅)		応力計は2.02MPaまで観 測可能 応力計 / STS =11.5

表1:STS1 地震計と応力計の観測可能範囲の比較

表2

Observable range of stress and strain for stress meter

応力計の応力と歪の観測可能範囲

応力計 Stress meter	観測可能範囲 Observable range	歪計 Strain meter	観測可能範囲 Observable range
高感度鉛直応力計 High sensitivity stress meter (vertical)	2.0 MPa	高感度鉛直歪計 High sensitivity strain meter (vertical)	2.7 x 10 ⁻⁴
高感度水平応力計 1 High sensitivity stress meter (horizontal-1)	4.6 MPa	高感度水平歪計 1 High sensitivity strain meter (horizontal-1)	2.4 x 10 ⁻⁴
高感度水平応力計 2 High sensitivity stress meter (horizontal-2)	3.6MPa	高感度水平歪計 2 High sensitivity strain meter (horizontal-2)	2.2 x 10 ⁻⁴
高感度水平応力計 3 High sensitivity stress meter (horizontal-3)	4.1MPa	高感度水平歪計 3 High sensitivity strain meter (horizontal-3)	2.2 x 10 ⁻⁴
高感度水平応力計 4 High sensitivity stress meter (horizontal-4)	4.1MPa	高感度水平歪計 4 High sensitivity strain meter (horizontal-4)	2.2 x 10 ⁻⁴
低感度鉛直応力計 Low sensitivity stress meter (vertical)	32.5MPa	低感度鉛直歪計 Low sensitivity strain meter (horizontal-1)	2.6 x 10 ⁻³

表2:応力計の応力と歪の観測可能範囲