

地殻変動連続観測に用いる変位センサーの性能評価

増田正孝^{*†}・芹澤正人^{*}・渡辺 茂^{*}

Evaluation of the Displacement Sensor for Crustal Deformation Observation

Masataka MASUDA^{*†}, Masato SERIZAWA^{*}, and Shigeru WATANABE^{*}

はじめに

横坑を利用した地殻変動連続観測には、石英管伸縮計や水管傾斜計を用いたひずみや傾斜の観測がある。東京大学地震研究所では2016年現在、油壺、鋸山、富士川、室戸、弥彦、内浦の6カ所の横坑でこれらの観測が行われている（東京大学地震研究所観測開発基盤センター, 2016a, 2016b, 2016c）。これらの横坑での石英管伸縮計や水管傾斜計による観測では、環境ノイズの影響の受けやすさに大きな違いがある。水管傾斜計では離れた2点で独立に水位変動を測定し、その差から傾斜量を求めるため、同相ノイズはキャンセルされる。そのため温度や気圧の変動、ポット内の水分の蒸発等の影響を直接には受けにくい。一方で、伸縮計は地面の伸縮を変位センサーで測定するものである。伸縮計には傾斜計のような同相ノイズをキャンセルする機構がなく、ノイズと信号（実際の地殻変動）を見分けることが容易ではない。そのため、伸縮計で用いられるセンサーの温度特性や長期安定性が重要であるが、その評価は今まであまりされてこなかった。また、近年ではスロースリップイベントに伴うひずみや傾斜の変動が観測されており（Fukuda *et al.*, 2014）、従来の地殻変動連続観測に重要であった年単位での安定性のみならず、数日といった時間スケールでの安定性や高いSN比も求められている。そこで我々は、石英管伸縮計で用いられている変位センサーの温度特性、長期安定性、自己ノイズを調べた。

石英管伸縮計の原理は単純である。横坑内の岩盤に石英管を固定し（固定端）、逆の端は自由に伸縮できるようにして固定はしない（自由端）。石英の代わりに線膨張係数の小さな金属が用いられることもあるが、原理は同じであ

る。石英管の長さは一般的に数10mとなるので、石英管の中間部分は石英管の自由な動きを妨げないようにステンレス線や板バネ等で支持されており、なおかつ環境温度変動の影響を受けにくくするように断熱材で覆われている。石英管の自由端側で、石英管と地面との水平方向の距離の変動を、感度の高い変位センサーで観測する。ひずみとは変位の空間微分であるが、近似的に変位センサーで観測した距離変動を基準長となる石英管の長さで割って得られる。ここで重要なのが変位センサーやロガーの性能である。先に述べたように1カ所のひずみの観測データのみからではノイズなのか地殻変動なのかを見分けるのは難しい。そこで今回我々は変位センサーとロガーの性能評価を行った。なおここでいう変位センサーの性能とは、電源回路やプリアンプ回路を含んだ性能であることに注意されたい。

変位センサーの性能評価

ここでは変位センサーの感度、温度依存性、安定性、ノイズの評価を行う。石英管伸縮計で我々が用いている変位センサーはBaumer社の渦電流式変位センサーIWR-M12U9501である。渦電流式の変位センサーは一般的にコイルと発振や検波、線形化のための電子回路からなる。原理としてはまずコイルに交流を流すことで高周波磁界を発生させ、センサーと対峙する金属に渦電流を発生させる。渦電流の影響によるコイルのインピーダンスが、金属とコイル間の距離に依存することを利用し、距離に比例する電圧に変換して出力させる。この変位センサーの写真を図1に、仕様や特徴を表1に示す。

まず変位センサーの感度を知るため、金属板とセンサーを対峙させ、その間隔の変化量と電圧の関係を測定した。このセンサー感度は対峙する金属板の材質（導電率）によって異なる。ここでは横坑内での地殻変動観測と同じ条件にするため、金属板には直径40mmのアルミを用いた。この金属板とセンサーの間隔の調整にはマイクロメータ式Xステージを用いた。10 μ mずつ一方向に動かして電圧を

2016年11月18日受付, 2017年1月13日受理.

[†] masudama@eri.u-tokyo.ac.jp

^{*} 東京大学地震研究所技術部総合観測室

^{*} Technical Supporting Section for Observational Research, Technical Division, Earthquake Research Institute, the University of Tokyo.

測定し、変位センサーの測定範囲を超えたところで逆方向にまた $10\ \mu\text{m}$ ずつ動かしては電圧を測定した。

その結果が図2である。横坑内での観測では、変位センサーの出力が3~5Vの範囲に収まるよう設置し、測定している。そのためこの電圧の範囲のデータを取り出して直線フィットすることにより、センサー感度を求めた。感度は $10.9\text{mV}/\mu\text{m}$ でリニアリティエラーは0.5%と求まった。

次に変位センサーの温度依存性および長期安定性を測定するため、図3のように変位センサーをステージ上に取り付け、金属板と変位センサーの間隔が常に一定となるように固定した。変位センサーには試験対象である IWRM12U9501 と水管傾斜計で用いられている IWA30U9001 の2種類を用いた。これは温度変動に起因した変位センサーの出力の変動が、ステージの伸縮によるものかセンサーの応答であるかを切り分けるためのものである。ステージは温度変動の影響を受けて伸縮してしまうため、線膨張係数の小さなスーパーインバー（公称値 $9.9 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$ ）を用いて作製した。

金属板とセンサーを取り付けている台座の間隔が5cmなので、 1°C の温度変化による台座間距離の変動は $0.05\ \mu\text{m}$



図1. 伸縮計用変位センサー IWRM12U9501

表1. 伸縮計用変位センサー IWRM12U9501 の特性値 (公称)

供給電圧範囲	14-30V
消費電流(最大)	20mA
出力信号範囲	1-9V
残留リップル(最大)	0.50%
負荷抵抗	1k Ω
応答速度	0.5mm/ms
リニアリティエラー	$\pm 0.08\text{mm}$
繰り返し精度	$\pm 0.01\text{mm}$
使用温度範囲	0-60 $^\circ\text{C}$
温度ドリフト	$1\ \mu\text{m}/(\text{K mm})$

m程度と予想される。ステージの側面には温度測定用ICを取り付け、温度変動も測定した。またこの測定では、温度変動に対するロガーのAD変換への影響が大きいと、変位センサーの温度特性との切り分けができなくなる。そのため、ロガーの別のチャンネルの入力を短絡させ、ロガーのAD変換値の変動も同時に測定をおこなった。ロガーはシモレックス社製のSC-AD1217を用いた。これらの装置を鋸山観測所の横坑内に設置し、サンプリングレートは1Hzで観測を行った。

図4に変位センサーの出力変化量と温度の70時間分のデータを示した。変位に変動が見られた。この図の時刻で36時間を示すところに坑内の蛍光灯が点灯され、3.5時

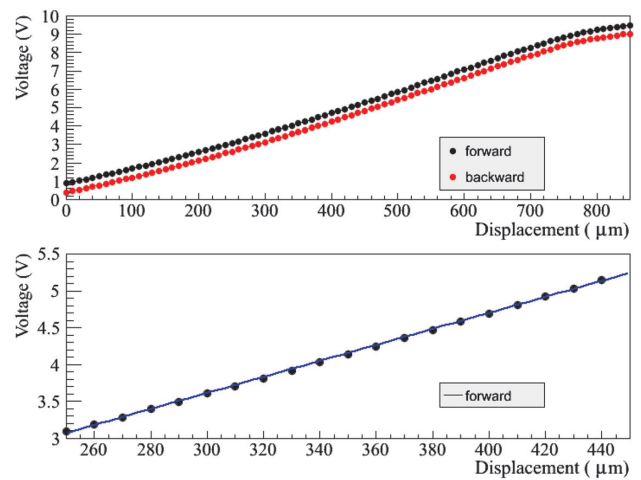


図2. 変位に対する変位センサーの出力電圧

上図では、金属板と変位センサー間の距離を近づけながら測定した場合のデータ（赤）と距離を遠ざけながら測定した場合のデータ（黒）を示している。赤点と黒点が重ならないよう、意図的に赤点を0.5V下方にずらして表示した。下図では変位量が250~450 μm の範囲を拡大して示した。青い線は最小二乗法で求めた回帰直線である。

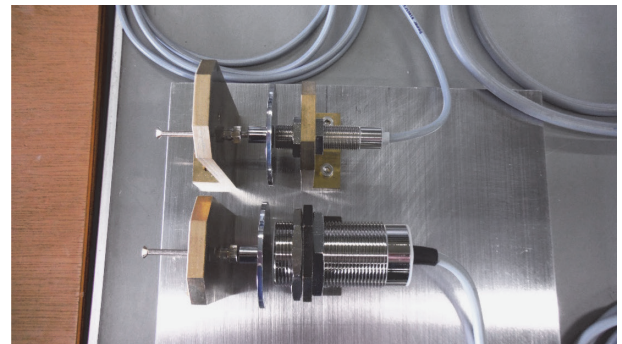


図3. ステージ上に設置された2種の変位センサー上：IWRM12U9501、下：IWA30U9001。この2種のセンサーはアルミ板と対峙するように設置されている。またこれらを設置しているステージは線膨張係数の小さなスーパーインバーを用いて作製した。

間後に消灯された。蛍光灯の放熱による温度上昇の影響が見られており、約 0.09℃ 上昇したことが図からわかる。この時の変位センサーの出力の変化量から温度係数を求めると 0.61 μm/℃ と求めた。ここで温度変化に対するステージの膨張の影響を見積もる。ステージ上に付けられている 2 つの台座間距離は 5 cm なので、ステージの伸びは $0.05 \text{ m} \times 9.9 \times 10^{-7} / \text{℃} \times 0.09 \text{℃}$ から 5 nm と見積もられる。この値は変位の変化量 55 nm に対して 1 桁小さいので、ステージの伸縮による影響は無視することとした。一方でもう 1 つ同じように取り付けられていた変位センサー IWA30U9001 の温度係数も求めたが、IWRM12U9501 の温度係数よりも 3 倍以上に大きく、ノイズも大きかったので、ステージの伸縮を測定できる性能はなかった。

先ほど求めた温度係数 0.61 μm/℃ を変位センサーのもつ温度特性とみなし、この温度特性が実際の観測でどの程度影響するかを、鋸山横坑内の 1 年間の温度変動データを用いて評価した。図 5 は 2014 年 7 月 20 日から 1 年間の坑内温度の変動を示している。データは 1 日ごとの平均値で

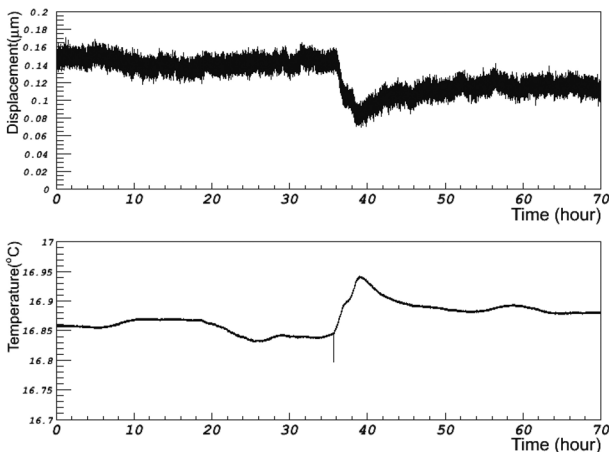


図 4. 変位量 (上) と温度 (下) の時間変動

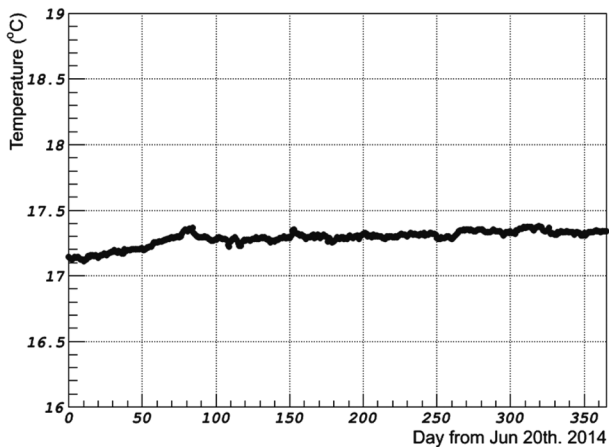


図 5. 鋸山観測所横坑内での 1 年間の温度変動

ある。この図を見るとほとんど年周変動も見られずに安定していることがわかる。この 1 年の温度変動は Peak-to-Peak 値で 0.3℃ 以下であった。0.5℃ の温度変動があるとする、変位量に換算して 0.31 μm 相当となる。基線長を鋸山観測所で使用されている伸縮計の 40 m と仮定して物理量であるひずみに換算すると、 7.8×10^{-9} str となる。鋸山観測所で観測される 1 年間あたりのひずみ量は $5 \times 10^{-7} \sim 3 \times 10^{-6}$ str (東京大学地震研究所観測開発基盤センター, 2016a) なので、温度変動によって予測される変位量は実際の観測量よりも 2 桁近く小さい。

次に長期安定性について調べるため横坑内での観測を継続して 150 時間分のデータを得た (図 6)。変位量の変化を良く見ると、温度変動によると思われる変動とは別に変位が徐々にドリフトしていく現象が見られる。その傾きを求めたところ、-0.20 nm/時間であった。なお温度変動の影響も考慮すると、ドリフトの傾きは -0.24 nm/時間と見積もられる。このドリフトの原因はこれだけのデータではわからない。このドリフトが同じ変化率で続いていくと仮定すると、1 年間のひずみ量に換算して 5.3×10^{-8} str となった。この値は先に求めた 0.5℃ 相当の温度変動よりも 1 桁大きい。ただし観測されるひずみ量と比較するとこのドリフトは 1 桁以上小さく、無視できる程度の大きさであると言える。ただしいくつかの制約により 150 時間分のデータしか取得できなかったため、実際にこのドリフトが長期間にわたって続くのか変化率が大きくなるのかは、今後調べる必要がある。

最後に、変位センサーのノイズについて調べた。図 7 は鋸山で得られた 150 時間分のデータをフーリエ変換して求めたスペクトルである。また、温度変動から予測されるスペクトルと比較するため、温度変動のスペクトルに温度係数とセンサー感度を掛け合わせ、変位センサー出力電圧に

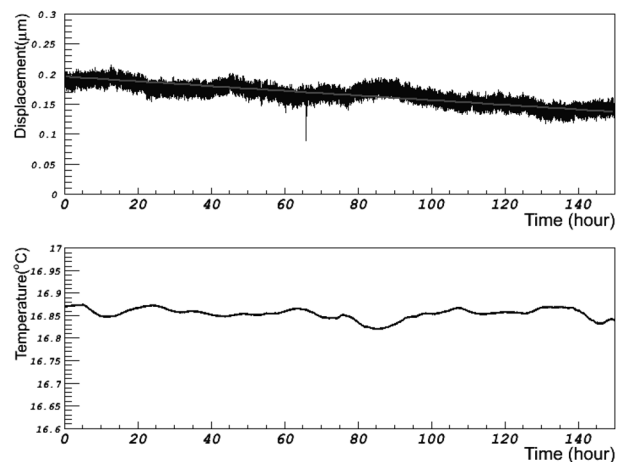


図 6. 変位量 (上) と温度 (下) の 150 時間分の変動
上の図中の線は最小二乗法で求めた回帰直線を示す。

換算して図示した（図7の赤線）。また、ロガーの自己ノイズのスペクトルも併せて図示した。図7から、鋸山観測所のように温度変動が小さい場所ではおよそ 4×10^{-5} Hz よりも低周波では温度変動による影響が見られるが、それよりも高周波では変位センサーの自己ノイズが支配的であるとわかる。また、1日（約 1.2×10^{-5} Hz）よりも低周波のスロースリップイベントを鋸山観測所と同環境の横坑で観測しようとする場合、ノイズ源は温度であることがわかる。この温度ノイズの大きさは $10 \text{ mV/Hz}^{1/2}$ に相当するので、ひずみ量に換算して $2.5 \times 10^{-8} \text{ str/Hz}^{1/2}$ となる。ただし、実際の伸縮計のデータには気圧や降雨のような気象擾乱による影響も効いてくるためそれらも考慮する必要がある。また、今回の観測から、変位センサーを用いたひずみ観測をするうえでロガー SC-AD1217 の自己ノイズが十分小さいこともわかった。

ま と め

地殻変動連続観測の伸縮計用の変位センサーとして用いられる IWRM12U9501 の変位感度、温度特性、長期安定性、自己ノイズを求め、評価を行った。年単位の時間スケールの地殻変動によるひずみと比較し、センサーのノイズや温度の影響は十分小さいことを確かめた。センサーのドリフトに関しては、地殻変動によるひずみよりも1桁以上小さいと見積もられたが、今後長期間の試験をおこないより詳しく調べることが課題となった。また1日から数日といった時間スケールの事象に対してもノイズレベルを求め、スロースリップのような事象への検出感度を評価した。

謝 辞：加藤照之教授には常日頃から地殻変動観測のアドバイスをいただきました。平田安廣元技術職員には地殻

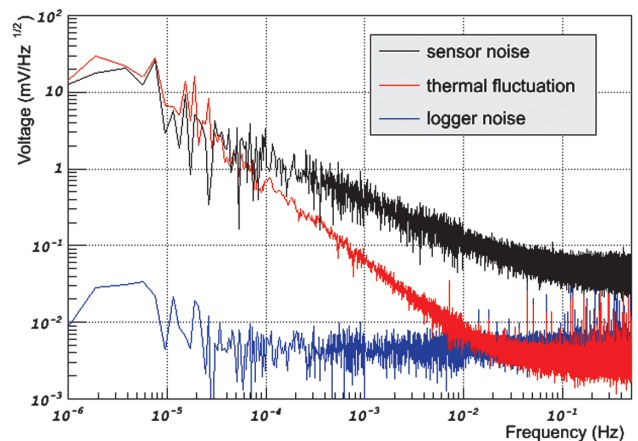


図 7. 変位センサーのノイズスペクトル

変動連続観測の基本を教えてくださいました。また査読者の新谷昌人教授と鈴木雄治郎助教には本稿を改善するうえで有益なご指摘を頂きました。渡邊篤志技術職員にも有益なご指摘を頂きました。ここに記して感謝申し上げます。

文 献

- Fukuda, J., A. Kato, K. Obara, S. Miura, and T. Kato, 2014, Imaging of the early acceleration phase of the 2013-2014 Boso slow slip event, *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 7493-7500.
- 東京大学地震研究所観測開発基盤センター, 2016a, 鋸山観測坑における地殻変動連続観測（1997年7月～2015年12月）, 地震予知連絡会会報, **96**, 132-133.
- 東京大学地震研究所観測開発基盤センター, 2016b, 富士川・駿河湾地方における地殻変動観測（その39）, 地震予知連絡会会報, **96**, 252-254.
- 東京大学地震研究所観測開発基盤センター, 2016c, 弥彦地殻変動観測所における傾斜観測（1967-2015）, 地震予知連絡会会報, **96**, 282-284.