



Title	2003年十勝沖地震(Mw8.0)の余効変動を用いた北海道南西部の粘弾性構造推定
Author(s)	石田, 優香; Ishida, Yuka; 高橋, 浩晃 他
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 86, 1-12
Issue Date	2023-03-26
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.86.1
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/88554
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/
Type	departmental bulletin paper
File Information	GBHU_86_p1-12.pdf



2003 年十勝沖地震 (Mw8.0) の余効変動を用いた 北海道南西部の粘弾性構造推定

石田優香¹・高橋浩晃²・大園真子²

¹ 北海道大学大学院理学院

² 北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター

(2023 年 2 月 20 日受理)

Estimation of viscoelastic structure in southwestern Hokkaido due to post-seismic deformation of the 2003 Tokachi-oki earthquake (Mw8.0)

Yuka ISHIDA¹, Hiroaki TAKAHASHI², Mako OHZONO²

¹ Graduate School of Science, Hokkaido University

² Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Hokkaido University

(Received 20 February, 2023)

Long-term post-seismic crustal deformation characteristics in southwestern Hokkaido induced by the 2003 Tokachi-oki earthquake (Mw 8.0) were investigated using the F5 GNSS daily coordinate data. Comparison of the detrended coordinate time series before and after the 2003 Tokachi-oki earthquake indicated that post-seismic horizontal deformation exceeded co-seismic displacements and continued at least 7.5 years until the day of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake (M9.0). Viscoelastic subsurface models were examined to fit to observed horizontal displacement time series. Parameters of elastic layer 20~30km and viscosity 1×10^{18} Pa s well reproduced features of observed displacement time series. Estimated coefficient suggest relatively low viscosity in southwestern Hokkaido and was well consistent with that from previous studies in this region.



I. は じ め に

マグニチュード7を超えるような地震が発生した際、震源に近い場所に加え、震源から離れた場所でも余効変動が数年～十数年間観測されることがある(Heki et al., 1997; Qiu et al., 2018; Watanabe et al., 2014; Tomita et al. 2015; Honsho et al., 2019; 不破・大園, 2018). 余効変動の主な要因として、断層面上での余効すべり、アセノスフェアでの粘弾性緩和、上部地殻での間隙弾性反発が挙げられる。余効すべりは、地震の際にすべった断層やその周辺部が地震後もゆっくりすべる現象で、地震後数ヶ月～数年間続く短期的な変動である。粘弾性緩和は、地震の発生により下部地殻や上部マントルの粘弾性層にかかった応力がゆっくりと時間をかけて緩和される現象で、地震後数年～十数年の長期間の変形が観測される場合がある。間隙弾性反発は、急激な断層運動で生じた伸長・圧縮応力により岩石（多孔質弾性体）中に含まれる間隙流体が流出・流入することで岩石の体積歪の変化が発生し、地表での沈降・隆起を引き起こす現象であるが、継続期間は地震後数日～数ヶ月と短い。

北海道においても、これまでの先行研究において地震発生後に観測された地殻変動を説明するために粘弾性構造モデルが推定されている。2003年十勝沖地震については、Itoh and Nishimura(2016)やItoh et al.(2019)が粘弾性構造モデルを推定したが、これらの研究では対象領域を石狩低地帯よりも東側の地域とした。また、Ueda et al.(2003)は、1993年に発生した北海道南西沖地震の余効変動から北海道南西部の粘弾性構造を推定した。

2003年十勝沖地震では、北海道南西部においても粘弾性緩和によると考えられる長期的な余効変動が観測されている。本研究では、2003年十勝沖地震後に観測された余効変動データを利用して北海道南西部の粘弾性構造の推定を行う。

II. データと粘弾性構造推定

・座標時系列データ

本研究では、研究対象を北海道南西部として、地殻変動のデータは国土地理院が運用するGNSS連続観測網GEONETの電子基準点の日々の座標値・F5解（村松ほか, 2021）を使用した（Fig.1）。F5解は、固定点解析の精度向上や対流圏遅延の推定方法変更による安定化などから、従来利用されてきたF3解（中川ほか, 2009）に比べてより高精度な座標値である。最新の国際地球基準座標系ITRF2014に準拠するIGS14座標系での日々の座標値で、欠測等による解析結果の大きな飛びを改善するために、国内外100点程度のIGS(International GNSS Service)観測点を拘束点として利用し、固定点であるつくば1の日々の座標値を求めている。アンテナ交換などにより発生したオフセットの補正には、国土地理院より提供されている補正データ（corr5o.dat）を使用した。

・座標時系列データの処理方法

2003 年十勝沖地震前後での地殻変動時系列の特徴を抽出するため、F 5 解座標データから地震時変位を取り除いた上で変動の傾向の比較を実施した。1996 年 3 月から 2011 年 3 月 10 日 (2011 年東北地方太平洋沖地震の前日) までの座標データに対して、最初に 2003 年十勝沖地震による地震時変位量を算出し除去する。本研究では、地震発生の前後 10 日間の座標値の平均値をとり、それらの差を地震時変位量とした。

続いて、地震発生後の余効変動の有無の確認のため、地震発生前の期間の座標データに対して直線変化・年周変化・半年周変化を仮定した以下の式を用いてフィッティングを行い算出した。

$$d(t) = at + b + \sum_{i=1}^2 \{c_i \sin(2\pi it) + d_i \cos(2\pi it)\}$$

ここで、 $d(t)$ は時刻 t における変位の各成分 (東西, 南北または上下), a と b の項が直線変化, c_1 と d_1 の項が年周変化, c_2 と d_2 の項が半年周変化を表す項であり、これら 6 つのパラメータを非線形最小二乗法で推定した。観測値を十分に再現できるような回帰曲線を求めるためには、季節変動などの周期的変動の推定精度の安定性のために観測データが 2.5 年以上あることが望ましい (Blewitt and Lavallée, 2002) ため、使用する観測点を 2001 年以前より観測が行われている観測点に絞って計算した。

・粘弾性構造モデル計算

本研究では、北海道南西部での 2003 年十勝沖地震後の余効変動の原因として粘弾性緩和を仮定し、観測された変動を再現できるような構造モデルの推定を実施した。対象領域は震源域から離れた地域であり、影響が小さいことが示されている余効すべりの効果は考慮せず (Itoh et al., 2019), また、数年以上継続する成分を利用することから、比較的短期間で収束する間隙弾性反発については考慮しないこととした。

粘弾性緩和による地表変位の時空間変化の理論計算は $v2fidg$ (Fukahata and Matsu'ura, 2005; Fukahata and Matsu'ura, 2006) を用いて実施した。このプログラムでは、弾性体と Maxwell 粘弾性体の水平半無限 2 層構造を仮定し、層中の断層の食い違い力源により生じる内部変形を計算することができる。また、計算の際には国土地理院が発表した 2003 年十勝沖地震の断層モデルを使用した (<https://www.gsi.go.jp/cais/HENDOU-hendou18.html>)。

地下構造として弾性 - 粘弾性体の半無限 2 層構造を仮定し、Ueda et al. (2003) を参考に仮定したモデル 1 を初期モデルとし、弾性層の層厚や粘弾性層の粘性率、地震波速度を変えた合計 7 つのモデルを用いて計算を行った (Table.1)。model 7 の地震波速度は、Miyamachi et al. (1994) で示された北海道南西部での深さ 20 km 地点での地震波速度の値を参考に設定した。

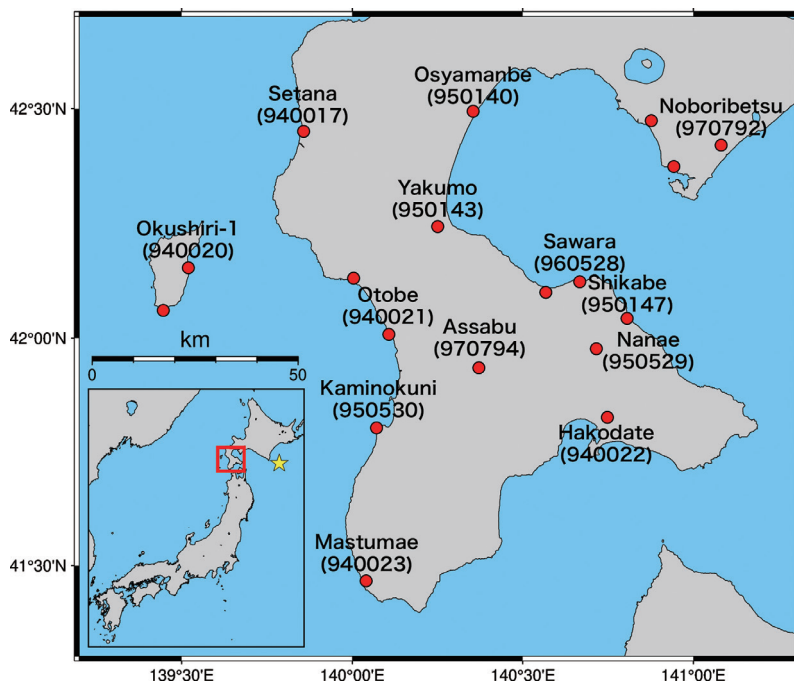


Fig. 1. Location map of the study area (southwestern Hokkaido). Red circles and yellow star denote the location of the GEONET sites and hypocenter of the 2003 Tokachi-oki earthquake, respectively.

Table 1. Subsurface structure models used in this study.

	model 1	model 2	model 3	model 4	model 5	model 6	model 7
Elastic layer P-wave velocity[km/s]				6.59			6.25
Visco-elastic layer P-wave velocity[km/s]				7.50			6.90
Elastic layer S-wave velocity[km/s]				3.77			3.60
Visco-elastic layer S-wave velocity[km/s]				4.30			3.90
Elastic layer thickness[km]	40.0	40.0	30.0	30.0	20.0	20.0	40.0
Elastic layer density[g/cm ³]				2.85			
Visco-elastic layer density[g/cm ³]				3.20			
Viscosity of visco-elastic layer[Pa s]	4.0×10^{18}	1.0×10^{18}	4.0×10^{18}	1.0×10^{18}	4.0×10^{18}	1.0×10^{18}	4.0×10^{18}

Ⅲ. 結 果

・ 2003 年十勝沖地震の余効変動

2003 年十勝沖地震の発生から 2011 年東北地方太平洋沖地震の間での余効変動の時空間特性を確認するために、対象領域に設置されている GEONET 観測点 9 点の座標時系列を確認した。その結果を Fig.2 に示す。また、地震前後での変動の様子をわかりやすくするため、各観測点の観測開始から 2003 年 9 月 25 日（十勝沖地震の発生前日）までの F5 解座標データから直線トレンドと年周・半年周変動、また、2003 年十勝沖地震の地震時変位を取り除いたものを Fig.3 に示す。この際に座標時系列から取り除いた地震時変位の水平成分は Fig.4 にまとめた。2003 年十勝沖地震による地震時変位は、震源域から 300 km 以上離れた北海道南西部においても、例えば奥尻 1(940020) でおよそ 2 cm の地震時変位が観測されている。

対象領域では、2003 年十勝沖地震以降にグラフの傾きが変化している点から (Fig.2, Fig.3), この地震を境に変動の傾向が変化していることがわかる。また、このグラフの傾きが 2003 年以降 2011 年まで元の状態に戻っていないことから、この変動は 2003 年十勝沖地震の発生からおおよそ 7 年半経っても継続していたことが考えられる。

観測値の大きさから、地震による変動のうち上下成分は大きくても数 cm 程度と水平成分（特に東西方向）と比べて小さく議論が困難であるため、この後の観測値と計算値の比較の際には水平変動のみ議論することとする。

・ 北海道南西部の粘弾性モデル推定

北海道南西部で地震発生後にみられた非定常変動を再現するための粘弾性構造の推定を行う。

水平変位の絶対値と東西・南北成分の観測値と計算値の時間変化を比較した結果をそれぞれ Fig.5 と Fig.6 に示す。対象領域のうち、北部に位置する瀬棚 (940017)(Fig.5, 6(a)) では、水平変位の絶対値では同じ粘性率 ($1 \times 10^{-18} \text{ Pa s}$) で弾性層の厚さが異なる model 2 と mode 4 の両方で観測値をおおよそ再現することができるものの、成分ごとに見た場合には、南北方向は同じ粘性率で弾性層の厚さが 20 km である model 6 で最も観測値に近い結果を示した。奥尻 1 (940020) と鹿部 (950147) (Fig.5, 6 (b),(c)) では、粘性率を $1 \times 10^{-18} \text{ Pa s}$ と設定したモデルを用いて絶対値・成分ともに観測値をよく再現することができた。対象領域の南部に位置する松前 (940023) (Fig.5, 6(d)) では、他の場合と比較して変位絶対値の振幅の再現が十分ではないが、model 2・4・6 の減衰の時定数は観測値とおおよそ一致している。

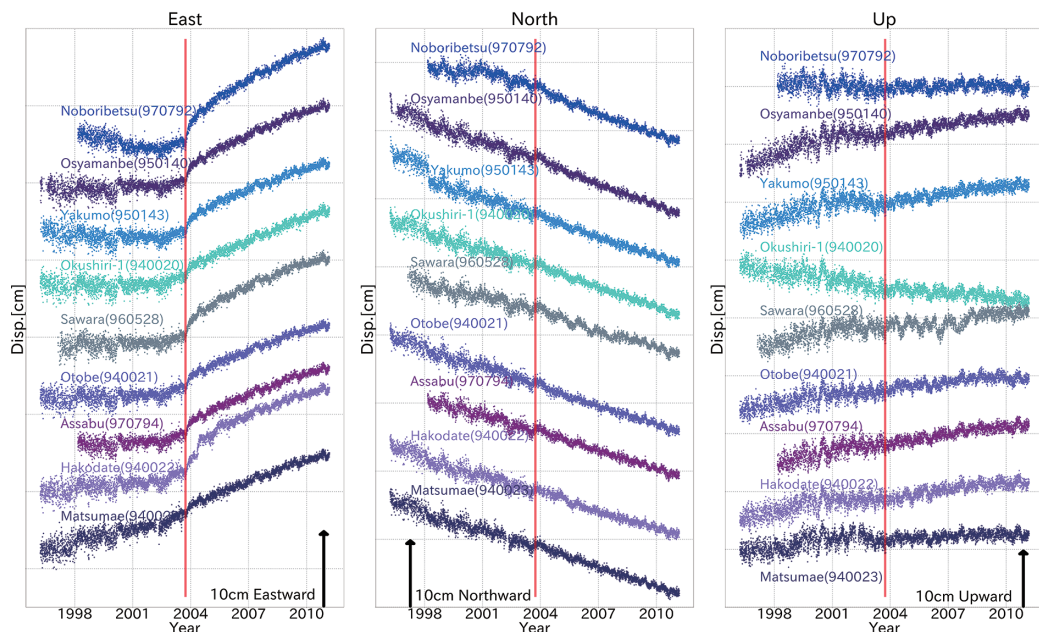


Fig. 2. Coordinate time series. Locations of station are denoted in Fig.1. Red vertical line indicates the date of the 2003 Tokachi-oki earthquake. Co-seismic displacement induced by the 2003 Tokachi-oki earthquake were eliminated.

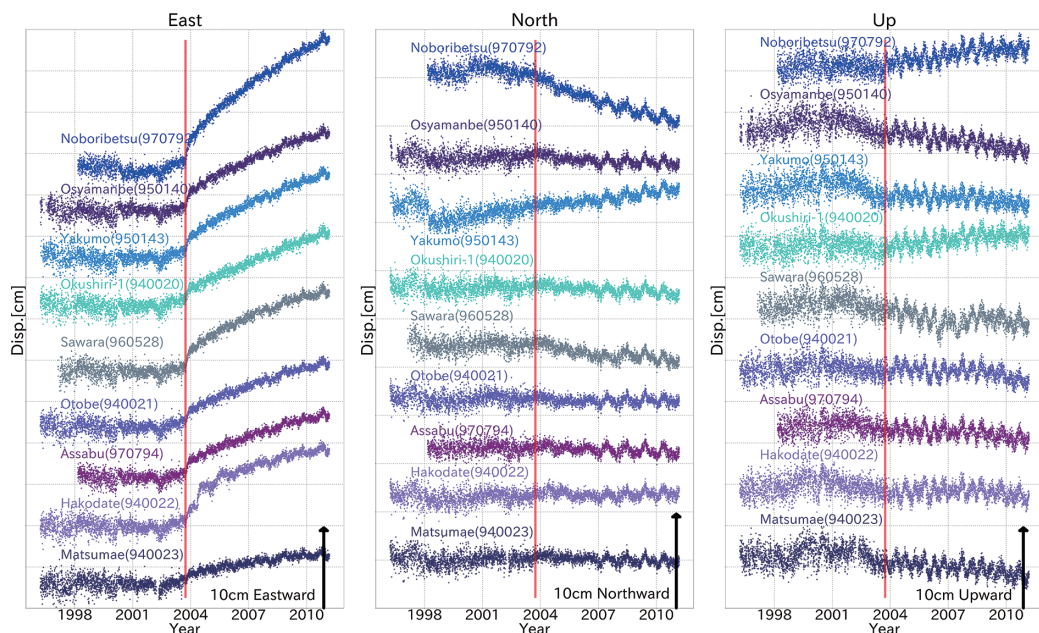


Fig. 3. Detrended coordinate time series. Red vertical line indicates the date of the 2003 Tokachi-oki earthquake. Co-seismic displacement induced by the 2003 Tokachi-oki earthquake were eliminated.

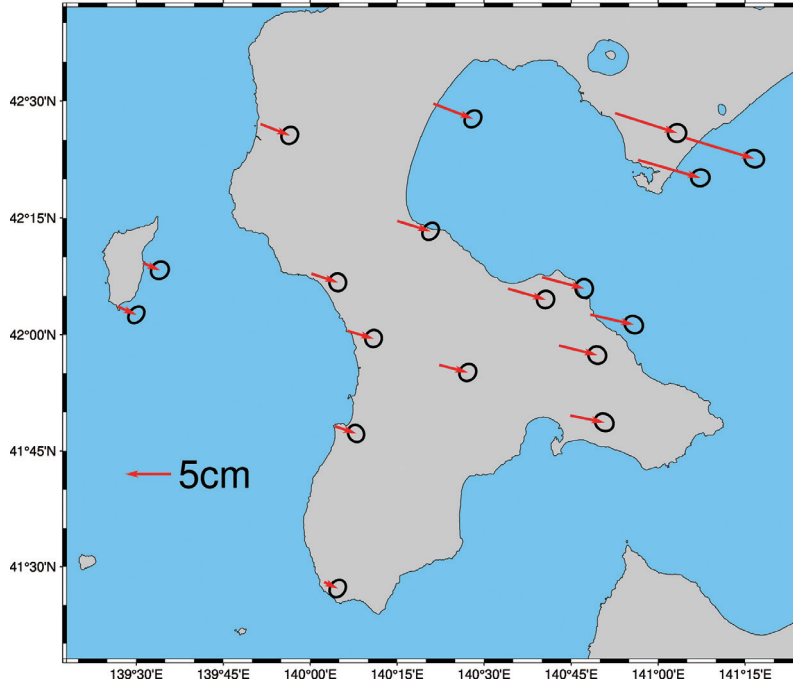


Fig. 4. Co-seismic displacements induced by the 2003 Tokachi-oki earthquake with error ellipses (1-sigma).

IV. 考 察

2003 年十勝沖地震前後の座標時系列からは、北海道南西部で余効変動が減衰しながらも少なくとも 7 年半続いていたことが明らかになった。水平余効変動の絶対値は、例えば瀬棚観測点では 2003 年十勝沖地震の発生以降、2003 年 9 月 27 日から 2011 年東北地方太平洋沖地震前日までの約 7.5 年間で 11.0 ± 0.4 cm におよび、これは地震時変位量 (3.4 ± 0.9 cm) のおよそ 320 % に相当する。これは、北海道南西部では地震時変動よりも地震後変動による変位の方が大きいことを示しており、震源から相対的な遠隔地においても長期間の地殻変動場を検討する場合には粘弾性緩和による影響を考慮する必要性を示している。

粘弾性構造モデルを用いた理論余効変動時系列と観測値との比較では、瀬棚 (940017)、奥尻 1 (940020)、鹿部 (950147) では観測値と理論値でよい一致を示した。松前 (940023) では、観測値の振幅が理論値よりもやや大きくなった。

観測値を最も説明できる粘弾性構造として、弾性層厚 20~40 km、粘性率 1×10^{-18} Pa s が得られた。推定された粘性率は、Ueda et al.(2003) が求めた北海道南西部の値 (4×10^{-18} Pa s) や、Ohzono et al.(2012) が推定した東北地方脊梁部の値 ($2 \times 10^{-18} \sim 5 \times 10^{-18}$ Pa s) とよい一致を示す。一方で、Itoh and Nishimura(2016) が求めた北海道東部の粘性率である 2×10^{-19} Pa s よりは有意に小さい。これは、北海道南西部と北海道東部では粘弾性構造が大きく異なっていることを示唆

する．北海道は石狩低地帯を境に東側が千島弧，西側が東北日本弧に属しており，地熱構造的・電磁氣的に異なる特徴をもつ（西田・橋本，2007；江原，1974；Nishida, 1982）．久保田ほか（1998）にて，石狩低地帯を境に北海道東部と比較して，北海道南西部は相対的に地下温度勾配が大きくなっていることが示されていることから，北海道東部と南西部で粘性率の違いが存在し，地震後の余効変動特性に大きな影響を与えている可能性が考えられる．また，観測点によって弾性層厚が異なる（20～40 km）可能性が示されたが，これは秋田（2014）の地温勾配データより示された北海道南西部でのパッチ状の高地温勾配域のような，ローカルな地下構造の変化を示している可能性がある．

より長期間の GNSS 観測の結果は，2011 年東北地方太平洋沖地震の影響を受けるため，本研究では余効変動の評価に 2011 年 3 月までの座標時系列しか用いていない．そこで，2003 年十勝沖地震に伴う余効変動の継続時間を推定する一つの手法として，地震発生から 50 年間の変動の様子を，観測値から推定された複数の粘弾性構造モデルから計算した．粘性率は，先ほどまでのモデル計算のうち，地震後の観測値を最も再現できたモデルで採用した粘性率（ $1 \times 10^{-18} \text{ Pa s}$ ）に固定し，地震波速度を Ueda et al.(2003) と Miyamachi et al.(1994) で示された北海道南西部での値を参考に設定し，弾性層厚を 20～40 km の間で変化させた 6 つのモデル（Table.2）を用いて粘弾性緩和による変動の様子と，緩和時間を算出した（Fig.7）．なお，model A～C は Table.1 の model 6，4，2 にそれぞれ対応する．緩和時間の算出は，本研究の対象領域と震源域との距離から余効すべりを考慮せず粘弾性緩和のみの影響を計算していることから，不破・大園（2018）と同様の方法を採用し，粘弾性緩和の継続の尺度である緩和時間 τ の関数として地震発生からの経過時間 t における変位 $u(t)$ を近似する以下の近似式を，理論計算より求めた粘弾性緩和による変動量に対して用いることで計算を行った．E は振幅，C は切片である．

$$u(t) = E \left\{ 1 - \exp \left(-\frac{t}{\tau} \right) \right\} + C$$

Table.2 の 6 つのモデルより算出した緩和時間は，対象領域の北部よりも南部の方が長く，室蘭（940018）で 4.1～5.2 年，上ノ国（950530）で 6.0～7.0 年，松前（940023）で 7.4～9.5 年となった．また，余効変動は Fig.7 より緩和時間の短い北部でも 2011 年東北地方太平洋沖地震の発生後 2015 年頃まで緩やかながらも変動が継続している可能性が示唆される．

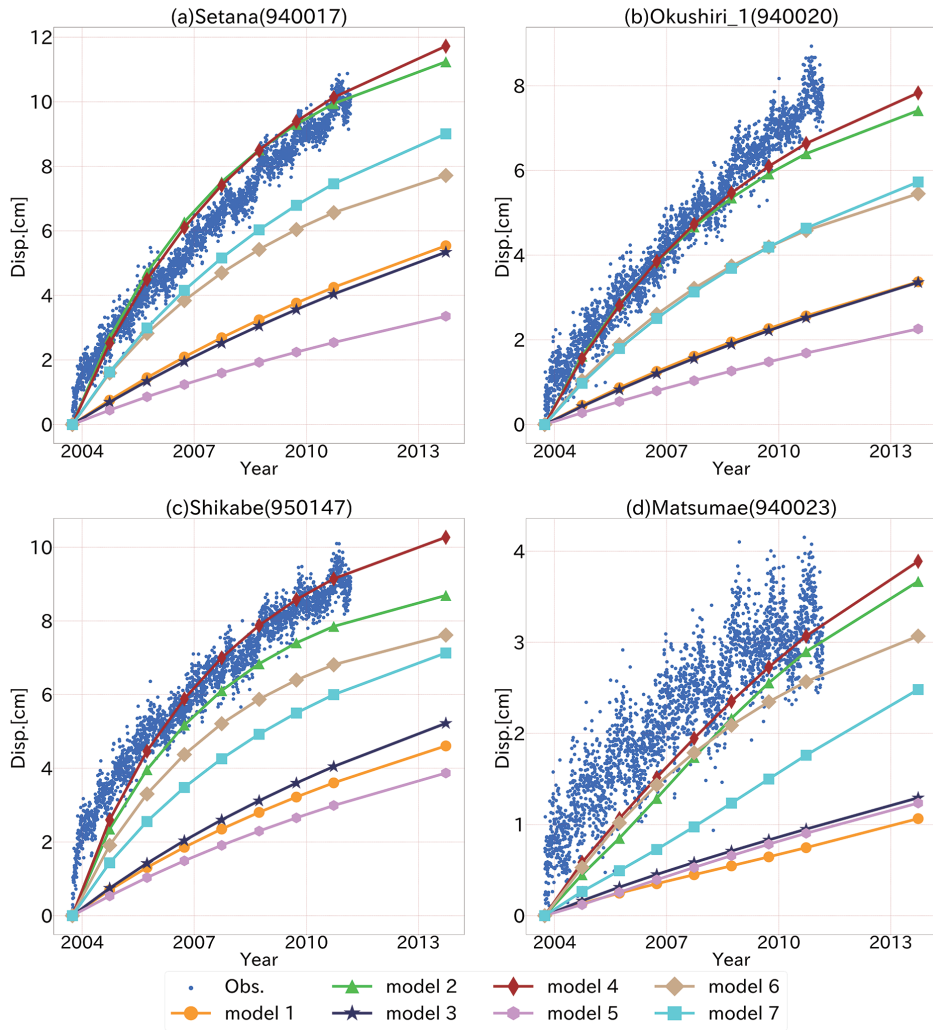


Fig. 5. Comparison of absolute horizontal displacement and theoretical one. Blue points and lines with signs indicate observation value and calculation results, respectively. Model parameters were summarized in Table.1.

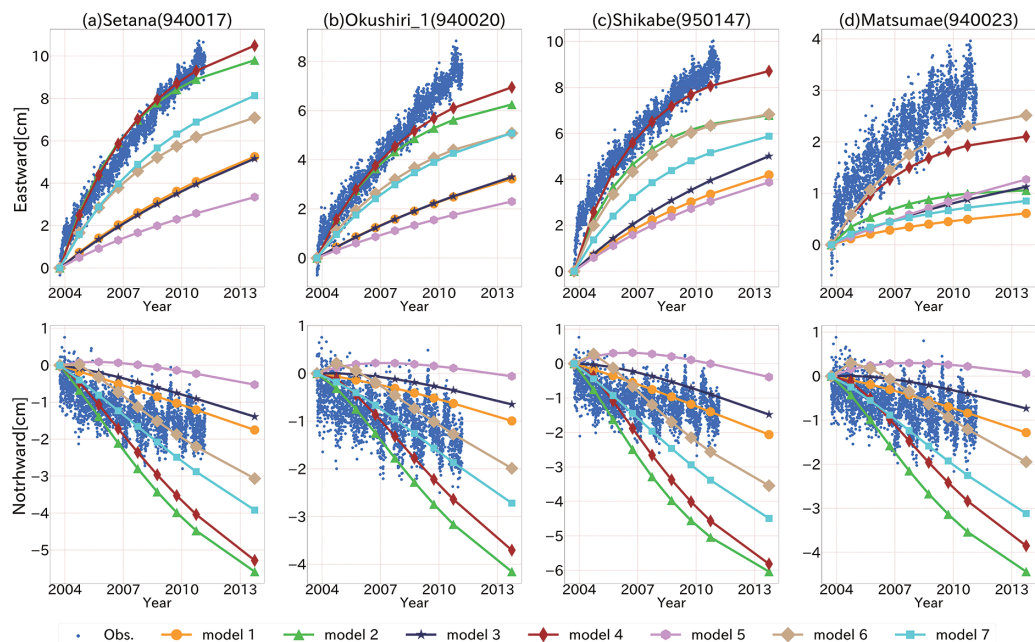


Fig. 6. Comparison of observed horizontal components and theoretical ones. Upper and lower graphs indicate East-West and North-South component, respectively.

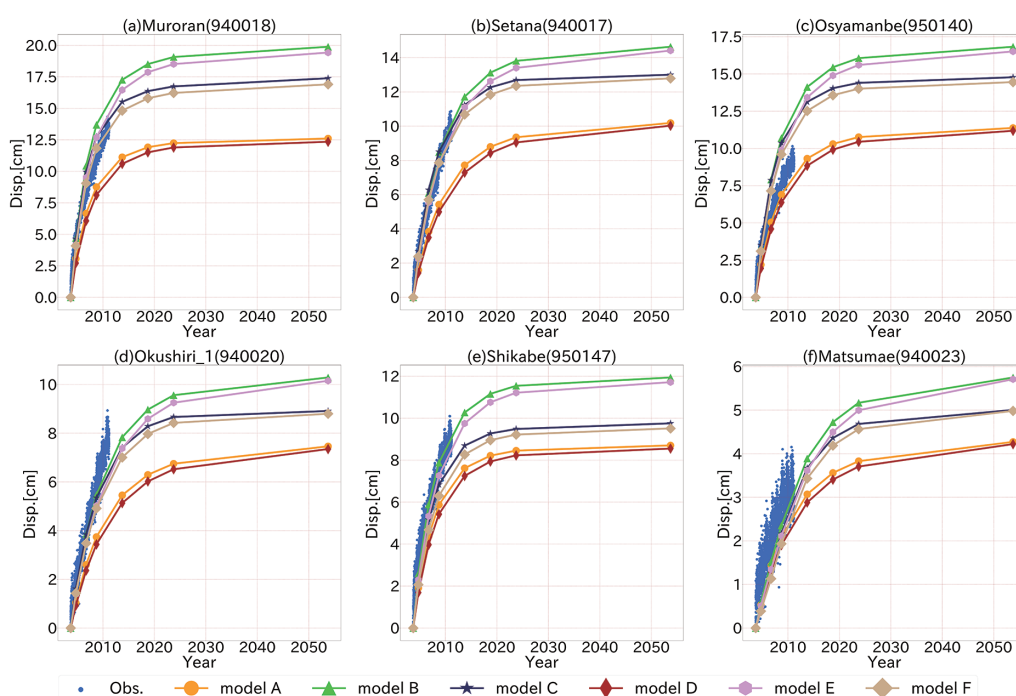
V. ま と め

GEONET の日々の座標解 F 5 解を用いて、北海道南西部で 2003 年十勝沖地震による余効変動が少なくとも 2011 年東北地方太平洋沖地震発生時まで継続していたことを明らかにした。この地域での累算余効水平変位量は、地震時変位量を上回っている。余効変動の原因を粘弾性緩和と仮定し、観測された変位時系列を再現できるような地下の粘弾性構造モデルを推定したところ、弾性層の厚さを 20~40 km、粘弾性層の粘性率を $1 \times 10^{-18} \text{ Pa s}$ とすると観測値をおおむね再現することができた。この結果は先行研究とも調和的である。北海道南西部は、下部地殻~上部マントルの粘性率が北海道東部に比べ小さく、地震の震源が離れている場合でも地震時変位に比べて相対的に大きな余効変動が長期間にわたり発生することが明らかにされた。

謝辞 本研究では国土地理院の GNSS 観測網 GEONET の座標解析解を使用させていただきました。また、粘弾性構造モデルの推定には京都大学防災研究所の深畑幸俊氏と統計数理研究所の松浦充宏氏のプログラム v2fidg を、計算の際の 2003 年十勝沖地震の断層モデルは国土地理院より発表されたものを使用させていただきました。記して感謝申し上げます。

Table 2. Subsurface structure models used in theoretical horizontal displacement calculation due to viscoelastic relaxation.

	model A	model B	model C	model D	model E	model F
Elastic layer P-wave velocity[km/s]		6.59			6.25	
Visco-elastic layer P-wave velocity[km/s]		7.50			6.90	
Elastic layer S-wave velocity[km/s]		3.77			3.60	
Visco-elastic layer S-wave velocity[km/s]		4.30			3.90	
Elastic layer thickness[km]	20.0	30.0	40.0	20.0	30.0	40.0
Elastic layer density[g/cm ³]			2.85			
Visco-elastic layer density[g/cm ³]			3.20			
Viscosity of visco-elastic layer[Pa s]			1.0×10^{18}			

**Fig. 7.** Predicted horizontal displacement calculated from estimated viscoelastic subsurface parameters, summarized in Table.2.

文 献

- 秋田藤夫, 2014. 「北海道における地熱開発の現状と課題」, 温泉科学, 63, 353-363
- Blewitt, G., Lavallée, D., 2002. Effect of annual signals on geodetic velocity. J. Geophys. Res., 107, ETG9-1-ETG9-11, doi:10.1029/2001JB000570
- 江原幸雄, 1974. 「地殻熱流量からみた北海道及びその周辺の地殻・上部マントルの熱的構造」, 北海道大学地球物理学研究報告, 31, 33-47, doi:10.14943/gbhu.31.33
- Fukahata, Y., Matsu'ura, M., 2005. General expressions for internal deformation fields due to a dislocation source in a multilayered elastic half-space. Geophys. J. Int., 161, 507-521.

- Fukahata, Y., Matsu'ura, M., 2006. Quasi-static internal deformation due to a dislocation source in a multilayered elastic/viscoelastic half-space and an equivalence theorem. *Geophys. J. Int.*, 166, 418-434, doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.02921.x
- 不破智志・大園真子, 2018. 「GNSS 観測に基づく 2016 年熊本地震 (M7.3) の余効変動時系列解析による九州地方の粘性構造の推定」, 北海道大学地球物理学研究報告, 81, 45-55, doi:10.14943/gbhu.81.45
- Heki, K., Miyazaki, S., Tsuji, H., 1997. Silent fault slip following an interplate thrust earthquake at the Japan trench. *Nature*, 386, 595-598, doi:10.1038/386595a0
- Honsho, C., Kido, M., Tomita, F., Uchida, N., 2019. Offshore postseismic deformation of the 2011 Tohoku earthquake revisited: Application of an improved GPS-acoustic positioning method considering horizontal gradient of sound speed structure. *J. Geophys. Res.*: 124, 5990-6009, doi:10.1029/2018JB017135
- Itoh, Y., Nishimura, T., 2016. Characteristics of postseismic deformation following the 2003 Tokachi-oki earthquake and estimation of the viscoelastic structure in Hokkaido, northern Japan. *Earth Planet Space*, 68, 156, doi:10.1186/s40623-016-0533-y
- Itoh, Y., Nishimura, T., Ariyoshi, K., Matsumoto, H., 2019. Interplate slip following the 2003 Tokachi-oki earthquake from ocean bottom pressure gauge and land GNSS data. *J. Geophys. Res.*: Solid Earth, 124(4), 4205-4230, doi:10.1029/2018JB016328
- Miyamachi, H., Kasahara, M., Suzuki, S., Tanaka, K., Hasegawa, A., 1994. Seismic Velocity Structure in the Crust and Upper Mantle beneath Northern Japan. *J. Phys. Earth*, 42, 4, 269-301, doi:10.4294/jpe1952.42.269
- 村松弘規・高松直史・阿部聡・古屋智秋・加藤知瑛・大野圭太郎・畑中雄樹・攪上泰亮・大橋和幸, 2021. 新しい GEONET 解析ストラテジによる電子基準点日々の座標値 (F5 解・R5 解) の公開, 国土地理院時報, 134, 19-32
- 中川弘之・豊福隆史・小谷京湖・宮原伐折羅・岩下知真子・川元智司・畑中雄樹・宗包浩志・石本正芳・湯通堂亨・石倉信広・菅原安宏, 2009. GPS 連続観測システム (GEONET) の新しい解析戦略 (第 4 版) によるルーチン解析システムの構築について, 地理院時報, 118, 1-112
- 西田泰典・橋本武志, 2007. 北海道における地殻, 上部マントルの熱的構造: 総合報告, 北海道大学地球物理学研究報告, 70, 1-12, doi:10.14943/gbhu.70.1
- Nishida, Y., 1982. Conductivity structure in and around Hokkaido, Japan as revealed by the period dependence of the CA transfer functions. *J. Geomag. Geoelectr.*, 34, 453-465, doi:10.5636/jgg.34.453
- 大久保泰邦・秋田藤夫・田中明子, 1998. 地温勾配図作成と地下構造を求める試み—北海道の例—, 日本地熱学会誌, 1, 25-29.
- Qiu, Q., Moore, J.D.P., Barbot, S., Feng, L., Hill, E.M., 2018. Transient rheology of the Sumatran mantle wedge revealed by a decade of great earthquakes. *Nat. Commun.*, 9, 995, doi:10.1038/s41467-018-03298-6
- Tomita, F., M. Kido, Y. Osada, R. Hino, Y. Ohta, T. Iinuma., 2015. First measurement of the displacement rate of the Pacific Plate near the Japan Trench after the 2011 Tohoku-Oki earthquake using GPS/acoustic technique. *Geophys. Res. Lett.*, 42, 8391-8397, doi:10.1002/2015GL065746
- Ueda, H., Ohtake, M., Sato, H., 2003. Postseismic crustal deformation following the 1993 Hokkaido Nansei-oki earthquake, northern Japan: Evidence for a low-viscosity zone in the uppermost mantle. *J. Geophys. Res.*: Solid Earth, 108, 151, doi:10.1029/2002JB002067
- Watanabe, S., Sato, M., Fujita, M., Ishikawa, T., Yokota, Y., Ujihara, N., Asada, A., 2014. Evidence of viscoelastic deformation following the 2011 Tohoku-Oki earthquake revealed from seafloor geodetic observation. *Geophys. Res. Lett.*, 41, 5789-5796, doi:10.1002/2014GL061134