

GNSS 連続観測システム (GEONET) が捉えた海溝型巨大地震に伴う余効変動の時間変化 Postseismic Deformation Following Great Earthquakes, Based on GEONET

測地観測センター 木村久夫・宮原伐折羅・宮川康平
Geodetic Observation Center Hisao KIMURA, Basara MIYAHARA and Kohei MIYAGAWA

要 旨

2011年3月11日、東北地方の沖合で平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震(M9.0, 以下、太平洋沖地震と呼ぶ)が発生した。国土地理院のGNSS連続観測システム(GEONET)は、この地震に伴い、M牡鹿の観測点で東南東方向に540cmの地殻変動を観測するなど、東日本を中心とした広い範囲で大きな地殻変動を観測した(水藤他, 2011a)。また、地震後に東北地方を中心とした広い範囲で、余効変動と呼ばれる継続した地殻変動も観測され(水藤他, 2011b)、2012年12月現在も継続している。国土地理院では、地震後のGEONET観測点の座標時系列を関数に近似することで、余効変動の推移を監視し、第191回地震予知連絡会(2011年6月)から報告を行っている。本稿では、太平洋沖地震の余効変動について、GEONETの観測結果を関数で近似する手法の妥当性に関して検討を行った結果を報告する。

さらに、太平洋沖地震と同じく海溝型の巨大地震であった平成15年十勝沖地震(M8.0)においても、長期間の余効変動が報告されているため、同じ手法で検証を行った。

1. はじめに

平成15年十勝沖地震に伴って観測された余効変動に関しては、指数関数、対数関数によって観測値を近似する試みが検討されており、地震予知連絡会においてその結果が報告されている(国土地理院, 2004)。しかしながら、近似における詳細な条件が示されておらず、またどの近似関数を用いるのか、どの程度の期間の観測値を用いて計算を行うのがよいか、十分に検討がされていないため、太平洋沖地震の余効変動を関数近似するにあたって、最適な近似の方法について、再度検討を行った。検討は、どの近似式を用いることが妥当か、また、近似計算は、本来は十分に時間が経過して余効変動が収束し、プレート運動などによる一定の速度で変動が生じる定常の状態になってから行うことが望ましいが、余効変動が継続する中で、どの程度の期間の観測値が得られれば妥当な近似が可能となるかについて行った。検討は、震源近傍の沿岸域に設置された、非常に大きな余効変動が観測されている観測点から、本震に伴い生じたすべりの縁辺に位置する房総半島・

青森県沿岸の観測点まで、余効変動が明瞭に観測された範囲を網羅するように行ったが、本報告では、余効変動の特徴を明瞭に示す4観測点を選んで議論を行った(図-1)。

さらに、検討した近似手法を用いて、十勝沖地震に関しても再度検証を行った。

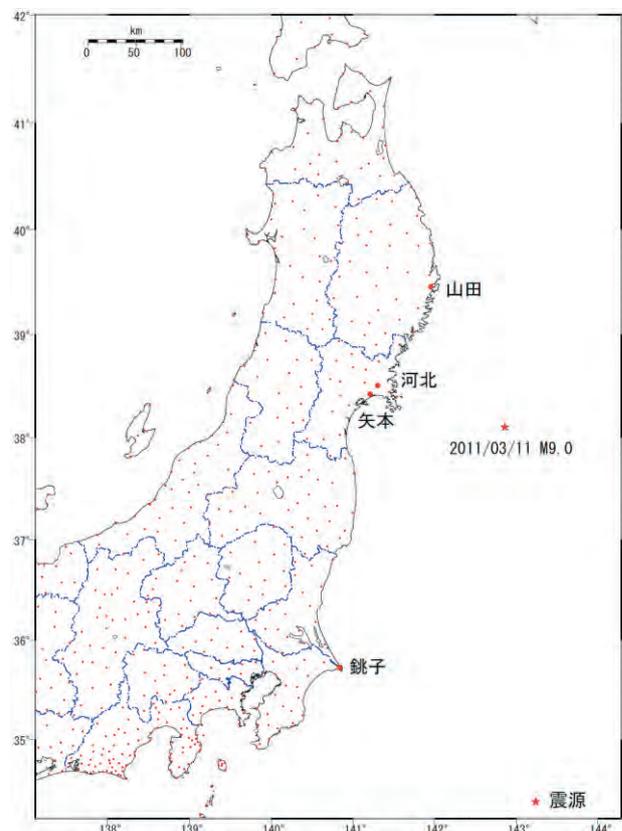


図-1 電子基準点配点図

2. 物理モデルと近似式

余効変動の時間的な推移を説明するモデルとしては、地震によって断層がすべることで、その断層の周辺部に蓄積した歪が、地震後にゆっくりとすべることで徐々に解消していくという摩擦モデル(Marone et al., 1991)と、上部マントルの粘弾性が緩和する効果により生じるというモデル(Pollitz, 2003)の二つが挙げられる。本稿では、太平洋沖地震に伴う余効変動について、Marone et al.に基づく摩擦モデルを適応した検討結果を報告する。

Marone et al.の摩擦モデルは、一次元のモデルでは、観測点における余効変動の時間変化は対数関数で近似される。

$$\text{disp.} = a \log\left(1 + \frac{t}{b}\right) + c \quad (1)$$

ここで、 t は地震発生からの経過時間で、パラメータ c は地震に伴う地殻変動量を表す。

また、Pollitz の粘弾性効果によるモデルでは、余効変動の時間変化は、指数関数で表わされる。

$$\text{disp.} = a \exp\left(-\frac{t}{b}\right) + c \quad (2)$$

以後、これらのモデルにおけるパラメータ b を時定数と呼ぶ。

3. 対数近似と指数近似の検討

指数関数と対数関数のいずれが観測値をよく説明するか、時定数の推定を3成分独立に行う場合と水平成分から推定した時定数を上下成分にも適用した場合といずれが観測値をよく説明するか等に関して検討を行った。なお、近似関数のパラメータ推定は、gnuplot の fit 機能を用いて、最小二乗法で推定した。また、余震活動に伴い生じた地殻変動は、各々オフセット量を算出して取り除いている。

まず、指数関数と対数関数によるフィッティングの比較では、地震後 80 日間の観測値を用いた近似の結果を比較した場合、指数関数よりも対数関数の方が観測値をよく説明することがわかる (図-2)。この傾向は、より長期の観測値を用いてフィッティングした場合も変わらない (図-3)。これは、プレート境界面の震源断層の深部で滑りが生じているとした摩擦モデルが妥当であることを示唆している。

次に時定数の推定方法について、3成分独立に行う場合と水平成分から推定した時定数を上下成分に適用する場合の比較を行った。上下方向の座標推定値は、水平成分に比べ、ばらつきが大きいので、上下成分のみ独立にパラメータを推定すると上下成分のパラメータの値が安定しないことがわかった。また、水平成分から推定した時定数を用いてフィッティングを行った場合も、上下成分の観測値を十分に説明できることが判明した (図-4)。

以上の検討結果については、第 193 回地震予知連絡会 (2011 年 11 月) から、報告に反映している。

さらに、近似関数のパラメータ推定において、迅速解 (Q3)、最終解 (F3) のいずれを用いるのが適当か検討を行った。推定に使用する観測値については、地震直後の解析結果がまだ十分に多くない段階

で、推定に用いるサンプル数を増やして推定パラメータを安定させることを目的に、Q3 解を用いることにした。座標推定値の精度としては、F3 解が最も高いので、通常であれば F3 解が算出された後は F3 解を用いて近似関数のパラメータ推定を行うことが適当と考えられるが、F3 解は夏期にデータ時系列にばらつきが大きくなるなど季節による系統的な誤差が認められることから、サンプル数が十分となっても、精度はやや低く個々のデータのばらつきは大きいので、季節に依存したばらつき程度に変化が見られない Q3 解を用いてフィッティングを行うこととした。

4. 近似関数の計算期間の検討

図 2 を詳しく見ると、パラメータ a , c の推定値は計算期間が変わっても大きく変化せず安定しているのに比べ、時定数 b の推定値は計算期間の増加とともに大きくなっていることがわかる。特に、地震後 1 年を過ぎた頃から、上下成分に対数関数からの乖離が顕著に認められるようになってきたため (図-4)、詳細に検討した。

この乖離が生じる原因の一つとして、地震直後 1 ヶ月程度に生じた余効変動の変化率が、それ以降に比べて非常に大きいため、フィッティング関数全体にその影響がおよんでおり、変化率が小さくなるそれ以降のデータとうまくフィッティングできていないことが原因の一つと考えられる。そこで、地震後 30 日のデータを除外して対数関数へフィッティングを行ったところ、地震直後のデータを含んでフィッティングした場合と比べて、データ全体、特に地震後 1 年を過ぎてからのデータをより説明することが示された (図-5)。なお、地震後 100 日のデータを用いた場合については、実質 70 日間という少ないデータで近似を行うことになるため、パラメータが安定して求まらず、観測値と完全にずれるため、図には示していない。地震直後のデータにこのような乖離が生じた原因としては、余効滑りの領域が時間とともに若干変化したこと、あるいはモデル式(1)が単純化され過ぎて実際の現象をモデル化できていないことが考えられる。いずれにせよ、地震後、特に直近の将来に想定される地殻変動の推移を監視するという目的からすると、より安定した推定パラメータが得られるよう、地震直後のデータを除外して計算を行うほうが適当であることがわかった。第 196 回地震予知連絡会 (2012 年 8 月) 以降は、この方法で推定した結果を報告している。

この検討結果から、地震後数ヶ月程度の余効変動の推移に基づいて、数年後の余効変動の状態を予測する際には、大きな乖離が生じるリスクがあることに留意する必要がある。

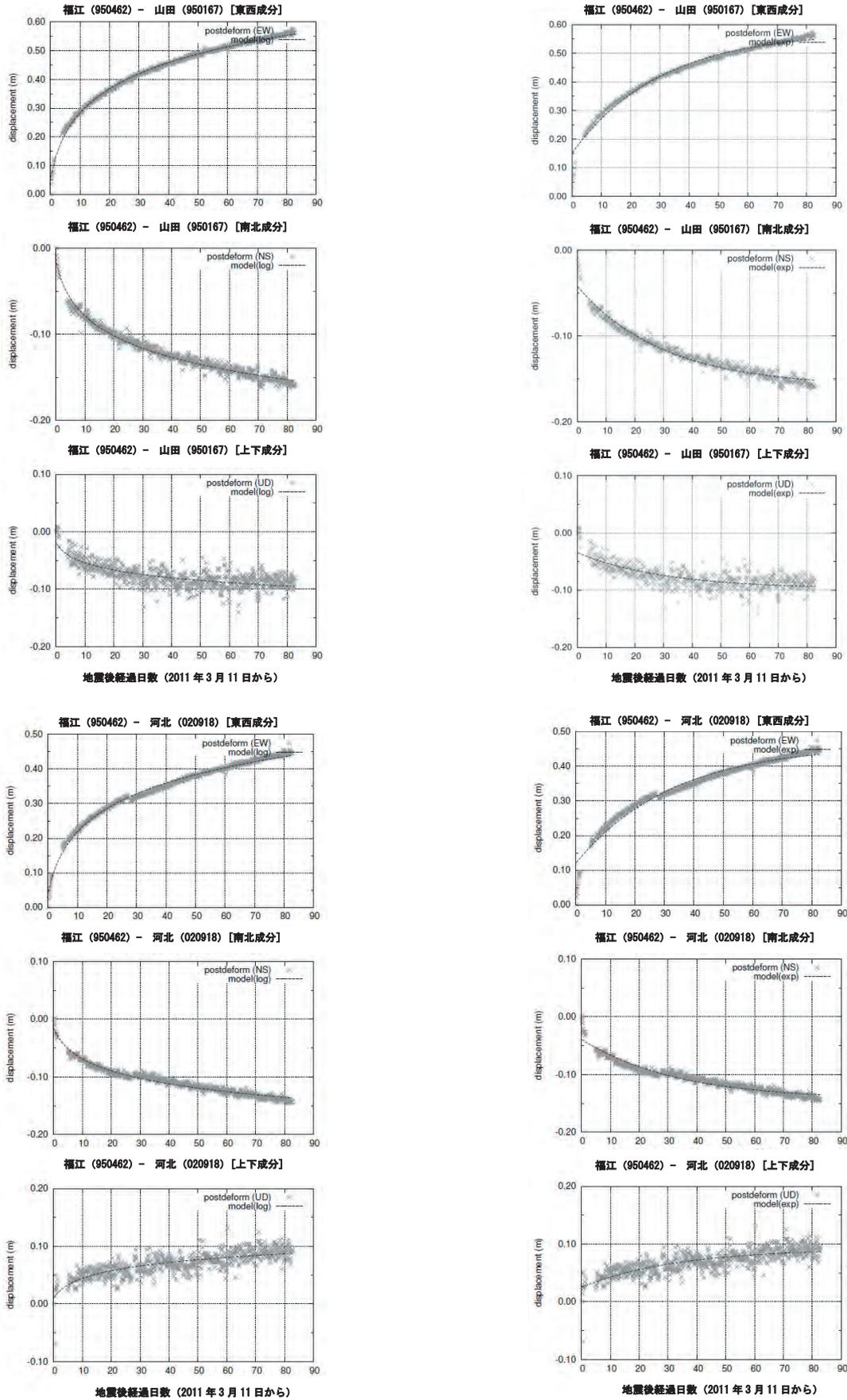


図-2 対数関数 (左) と指数関数 (右) による近似計算結果
(上3段: 山田、下3段: 河北)

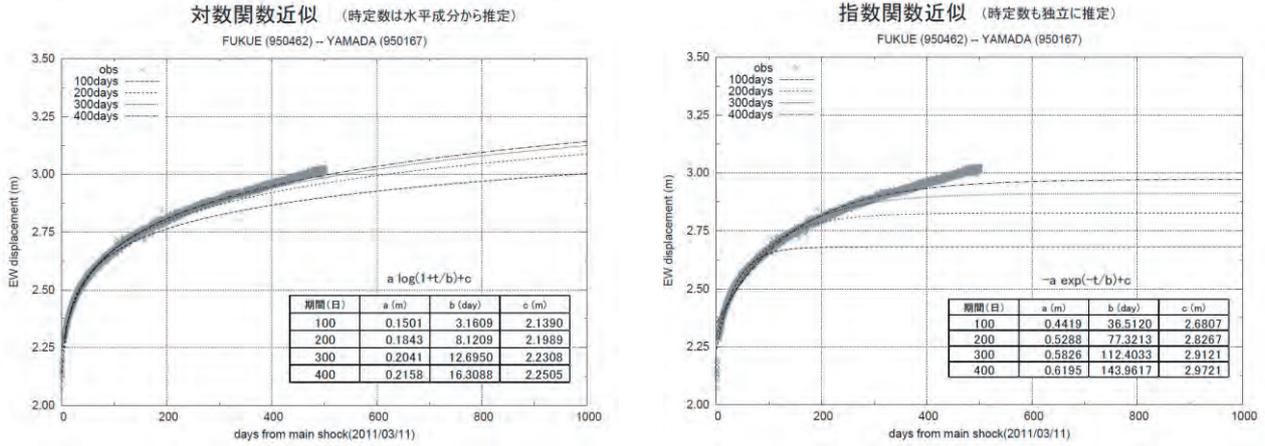


図-3 計算期間を変えた時の近似結果
(山田, 東西成分) (左図: 対数関数, 右図: 指数関数)

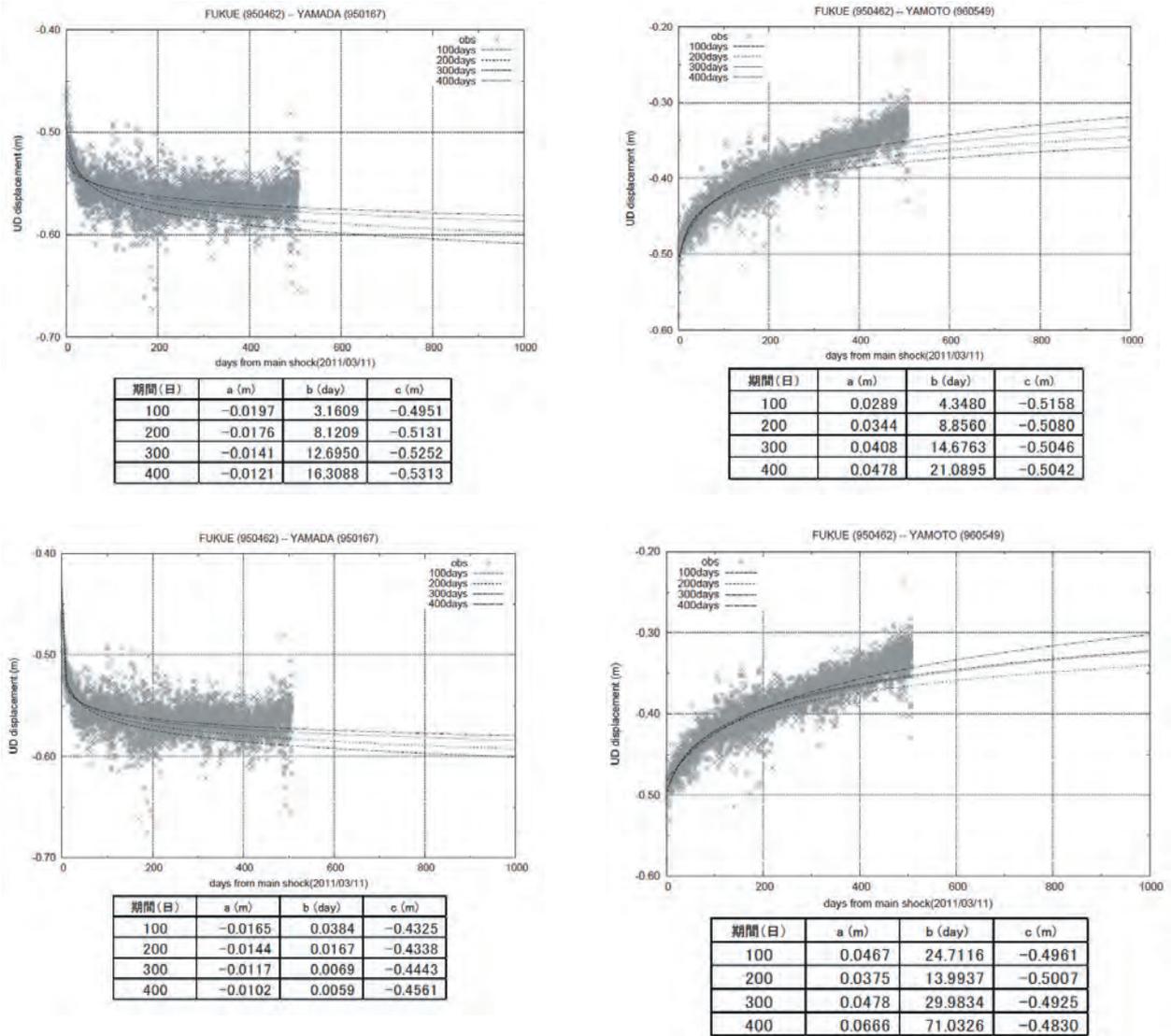


図-4 上下成分の近似結果比較 (左図: 山田, 右図: 矢本)
上段: 水平成分から時定数を計算, 下段: 上下成分から計算

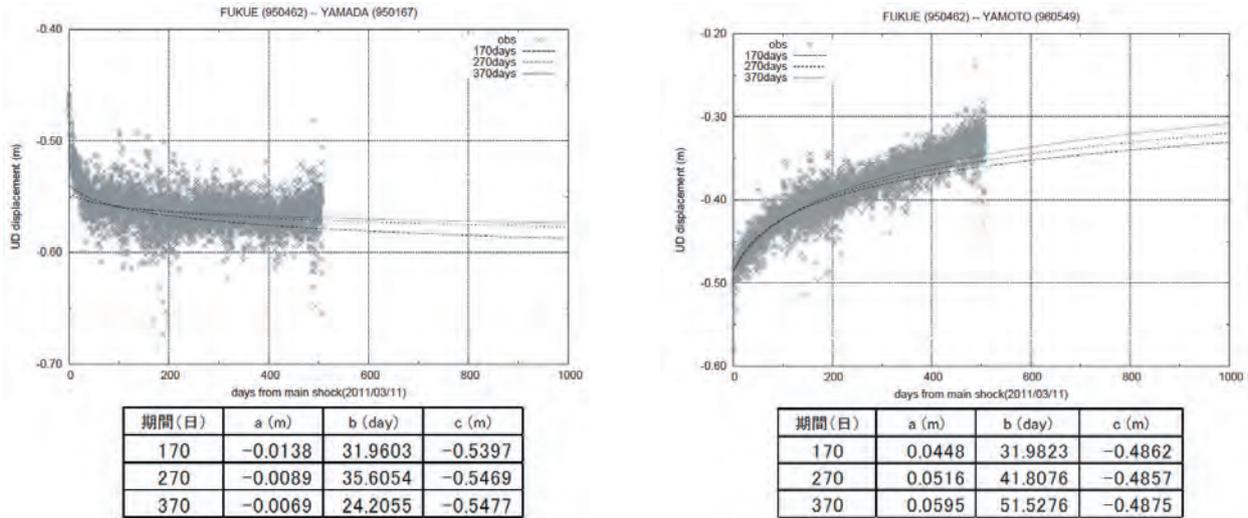


図-5 地震後 30 日のデータを除外した場合 (左図: 山田, 右図: 矢本)

5. 近似関数変更の検討

Perfettini と Avouac は, Marone らのモデルはプレート運動に伴う定常的な地殻変動の効果を考慮していないため, 余効変動が収束し, 定常的な地殻変動が支配的となる長期間のデータにあてはめることは困難であることを指摘している (Perfettini and Avouac, 2004). 彼らによるプレートの定常運動の効果を入れたモデルは次の式で表わされる.

$$\text{disp.} = a \log \left[\frac{d}{b} \left(e^{\frac{t}{d}} - 1 \right) + 1 \right] + c \quad (3)$$

観測期間 t がパラメータ d の推定値より十分小さければ, この式は(1)式に近似される. 逆に, パラメータ d が観測期間に対して小さく推定される場合には, この近似は成り立たず, プレートの定常運動による効果が明瞭になる. つまり, パラメータ d は, 観測においてどの程度のタイムスケールがあればプレートの定常運動の影響が現れるかを示す指標としてみることができる. また, (3)式は, t が大きくなると, 一定速度 a/b で変化する式となり, この速度が観測点におけるプレート運動に伴う定常的な地殻変動の速度を与える.

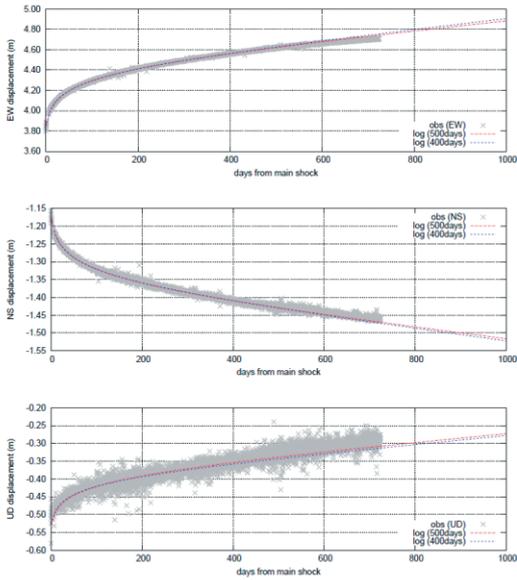
計算に用いる観測期間 t を長くすると, パラメータ d の値が計算に用いた観測期間に比べて小さくなり, プレートの定常運動の影響が現れてくることが期待される. 計算に用いる期間を 400 日から 700 日まで 100 日ごとに変えて計算してみると, 岩手県沿岸から宮城県沿岸の余効変動の大きな地域では, 矢本をはじめとして, d の値は計算に用いる観測期間が長くなるにつれて大きくなり, 求められた値は観測期間と同程度かやや小さい値であることから, すでに定常運動の影響が現れていると考えられる (図

-6). 一方, 房総半島の銚子をはじめとする, 余効変動が震源近傍の沿岸域と比較して小さい地域では, d の値は, 計算に用いる観測期間に比べて大きめに決まることが多い. この地域においては, 観測期間を検討時点において最も長い 700 日とした場合でも, 摩擦モデルで表現される余効すべりの影響が支配的な状態にあり, (3)式と(1)式の近似が成り立っていることが推察される (図-6). 余効すべりが徐々に小さくなり, プレートの定常運動による効果が観測値に現れるまでには, さらに長期の観測が必要であることが推測される.

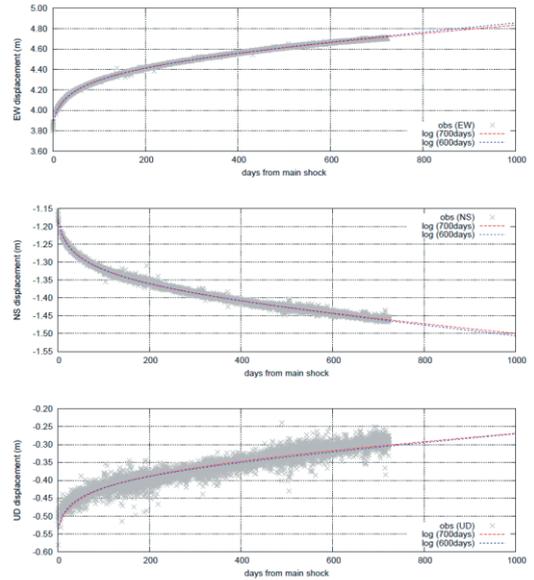
前述の通り, プレートの定常運動による効果が支配的な定常状態では, (3)式におけるパラメータの比 a/b は, プレート運動による定常速度を与えるはずである. しかし, 太平洋沖地震に適用した今回のケースでは, 岩手県沿岸から宮城県沿岸の余効変動の大きな観測点で, (3)式において東向きで隆起の速度が推定されている. これらの速度は, この地域で地震前に観測されていたプレート運動の圧縮による西向きで沈降する定常運動と整合しない. 前段で述べたとおり, この地域では(3)式と(1)式の近似が成り立たないことから, 摩擦モデルで表される余効すべり以外の変動が生じていることが推察されるが, 推定された速度から見ると, この変動はプレートの定常運動に起因する変動とは明らかに異なっている. このことは, プレート運動による定常的な圧縮など, 地震前に観測点を長期にわたって一定速度で変動させていた定常の変動以外に, この地域の観測点を地震後に変動させる現象が生じており, その影響が観測値に含まれている可能性を示唆している. その原因としては, 粘弾性緩和による地殻変動が観測値で検出できる大きさで生じはじめた可能性が挙げられる. 地震後に継続する地殻変動から, その原因を特

定するために資する有効な情報を得るため、今後も地殻変動の推移を注意深く監視したい。

福江 (950462) - 矢本 (960549)



福江 (950462) - 矢本 (960549)



地震後 400 日までのデータによる推定値
 $disp = a \log(1 + d/b(e^{t/d} - 1)) + c$

成分	a [m]	b [day]	c [m]	d [day]	χ^2
東西	+0.1308	4.24	+3.8482	247.62	
南北	-0.0430	4.24	-1.1742	247.62	1.51
上下	+0.0305	4.24	-0.5246	247.62	

地震後 500 日までのデータによる推定値
 $disp = a \log(1 + d/b(e^{t/d} - 1)) + c$

成分	a [m]	b [day]	c [m]	d [day]	χ^2
東西	+0.1351	4.88	+3.8553	278.63	
南北	-0.0448	4.88	-1.1756	278.63	1.50
上下	+0.0340	4.88	-0.5311	278.63	

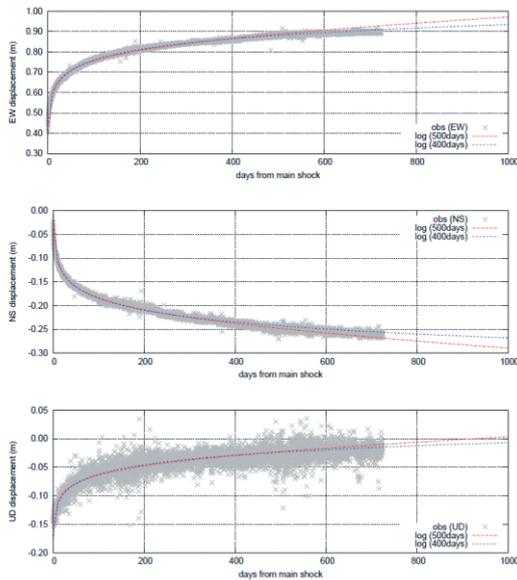
地震後 600 日までのデータによる推定値
 $disp = a \log(1 + d/b(e^{t/d} - 1)) + c$

成分	a [m]	b [day]	c [m]	d [day]	χ^2
東西	+0.1432	6.27	+3.8685	336.89	
南北	-0.0471	6.27	-1.1812	336.89	1.72
上下	+0.0384	6.27	-0.5353	336.89	

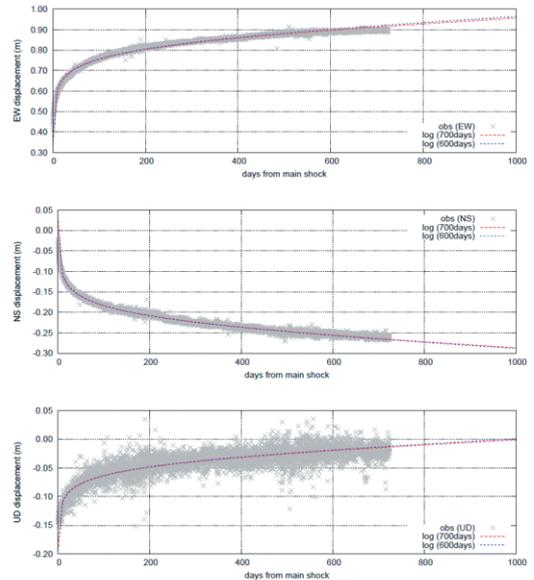
地震後 700 日までのデータによる推定値
 $disp = a \log(1 + d/b(e^{t/d} - 1)) + c$

成分	a [m]	b [day]	c [m]	d [day]	χ^2
東西	+0.1529	8.36	+3.8854	419.43	
南北	-0.0505	8.36	-1.1860	419.43	1.85
上下	+0.0434	8.36	-0.5379	419.43	

福江 (950462) - 銚子 (93022)



福江 (950462) - 銚子 (93022)



地震後 400 日までのデータによる推定値
 $disp = a \log(1 + d/b(e^{t/d} - 1)) + c$

成分	a [m]	b [day]	c [m]	d [day]	χ^2
東西	+0.0763	1.50	+0.4375	96777474.74	
南北	-0.0363	1.50	-0.0316	96777474.74	1.24
上下	+0.0243	1.50	-0.1647	96777474.74	

地震後 500 日までのデータによる推定値
 $disp = a \log(1 + d/b(e^{t/d} - 1)) + c$

成分	a [m]	b [day]	c [m]	d [day]	χ^2
東西	+0.0641	0.34	+0.3841	500.06	
南北	-0.0316	0.34	-0.0000	500.06	1.86
上下	+0.0200	0.34	-0.1795	500.06	

地震後 600 日までのデータによる推定値
 $disp = a \log(1 + d/b(e^{t/d} - 1)) + c$

成分	a [m]	b [day]	c [m]	d [day]	χ^2
東西	+0.0622	0.22	+0.3678	500.07	
南北	-0.0312	0.22	+0.0114	500.07	2.21
上下	+0.0192	0.22	-0.1831	500.07	

地震後 700 日までのデータによる推定値
 $disp = a \log(1 + d/b(e^{t/d} - 1)) + c$

成分	a [m]	b [day]	c [m]	d [day]	χ^2
東西	+0.0597	0.09	+0.3310	500.09	
南北	-0.0306	0.09	+0.0346	500.09	2.90
上下	+0.0185	0.09	-0.1955	500.09	

図-6 矢本, 銚子観測点における(3)式による計算結果
 (左図: 地震後 400, 500 日で計算, 右図: 地震後 600, 700 日で計算)

6. 十勝沖地震についての検討

十勝沖地震の際に行った関数近似では、地震後約半年のデータを用いて、対数関数近似と指数関数近似のフィッティングを行い、その結果について比較、検討している。そこでは、東西成分に関しては対数関数の方が観測値との整合がよいが、南北成分に関しては70~80日頃までは指数関数の方が整合がよいと報告されており、その原因としては、地震後70~80日で滑りの方向が変化したか、滑り域が移動した可能性が指摘された(国土地理院, 2004)。

この先行報告におけるフィッティング計算の妥当性を検証するには、同じ計算を再現して比較することが望ましいが、地震直後の観測値に大きな重みを付けている、東西成分と南北成分の関数形を変えた計算方法の根拠がどこにあるのか示されていないなど、計算に関する詳細な資料がなく、パラメータ推定の条件がわからないため、再現が困難であった。そこで、本報告で用いた手法により再度検証を行った。

地震前の観測値から、地震前の定常変動の速度を一次トレンドとして推定し、地震後の観測値から取り除いた後に、今回の手法を用いて対数関数近似を計算したところ、水平成分から推定した時定数を上下成分にも適用する方法で、水平成分における近似関数と観測値の整合が非常によいことが示された(図-7)。十勝地方から西側の観測点では、先行報告で南北の整合が悪くなると指摘されていた70~80日を超えて、2年程度にわたって、観測値と対数関数近似が整合している。上下成分については、余効変動による変位があまり大きくないため、地殻変動による変位とデータのばらつきとの差がわかりにくい、えりも2観測点、三石観測点などでは近似関数と観測値の整合性はよい。

理想的には、余効変動が完全に収束して、地震前の定常運動に戻るまでの観測値を用いて検証を行うことが望ましいが、根室から釧路地方にかけては、2004年11月29日に釧路沖の地震(M7.1)が発生したことにより、二つの地震の余効変動が重なってしまったため、十勝沖地震の余効変動のみを評価することが不可能となったが、釧路沖の地震前までは、対数関数による近似は観測値を良く説明している(図-8)。浜中観測点では、釧路沖の地震発生の前に南北成分が対数近似関数とやや乖離する傾向があるが、そもそも余効変動が小さい観測点であるため、変位の大きさと比較して有意とは判断できない。

以上の検討結果から、十勝沖地震の余効変動は、摩擦モデルによる余効すべりで十分説明できること

が確認された。また、太平洋沖地震では明確に見られた、観測期間が長くなるにつれて地震直後の観測値と近似関数が乖離する傾向については、十勝沖地震では認められておらず、余効滑りのすべり域の移動を示唆する余効変動の推移は認められていない。

7. まとめ

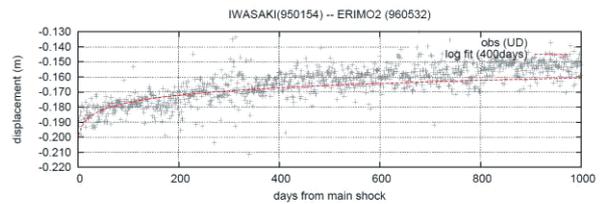
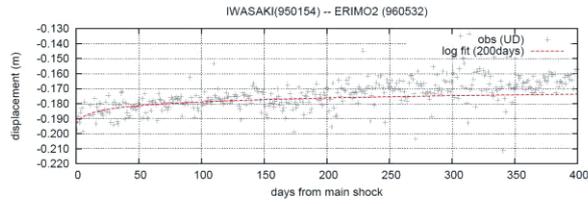
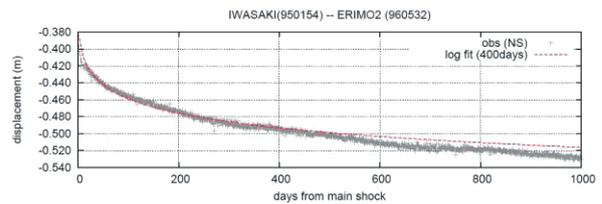
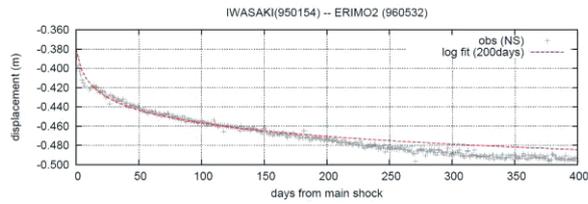
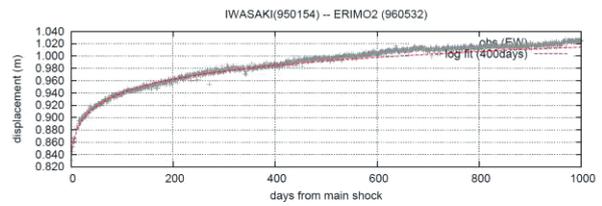
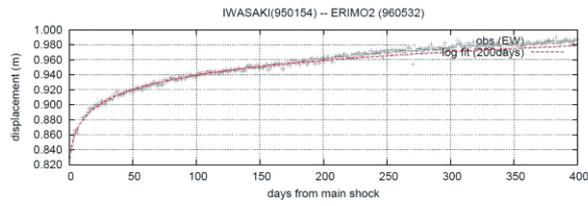
平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震後に観測されている余効変動は、2013年2月現在、対数関数による近似で観測値を十分に説明可能であることがわかった。ただし、地震後数カ月程度とその後で余効変動のふるまいが異なるため、地震後数ヶ月以降の余効変動を妥当に近似する近似関数の推定パラメータを安定して求めるには、少なくとも地震後200日程度の観測値が必要であり、期間が不十分な場合には近似関数と観測値の間に大きな乖離を生じる結果となる。地震後の成果改訂では、2011年5月末時点まで観測値を用いた対数関数近似からその後の変動量を推定したが、結果として過小評価で、その後実際に得られた観測値との乖離が生じていることから、引き続き余効変動を注意深く監視することで、基準点の精度確保を図っていく必要がある。

また、上下成分の変化に関しては、全体的に隆起する方向に近似関数から系統的に乖離が生じはじめてるように思われるが、この原因が対数関数近似モデルで表現可能な現象の限界によるものか、滑り域の移動が生じているのか、あるいは粘弾性緩和の効果による地殻変動が検出可能なサイズで生じ始めたのかを明らかにしていくためにも、今後も蓄積するデータから現象を読み解き、監視を継続する必要がある。

また、平成15年十勝沖地震後の余効変動についても、同じ手法を用いて検証を行ったところ、少なくとも地震発生後2年程度については、対数関数近似で観測値がよく説明できることが示された。この結果からは、太平洋沖地震と同様、余効滑りの滑り域に時間の経過に伴う顕著な移動はなかったものと推測される。

今回の関数近似の処理については、汎用性を持たせてデータの処理が行えるプログラム(スクリプト)を作成しているため、今後同様に余効変動が継続する巨大地震が発生し、対数関数近似による余効変動の監視が必要となった場合、本稿と同様の検討が適宜実施可能である。

(公開日:平成25年4月1日)

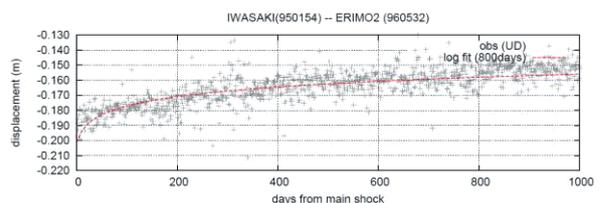
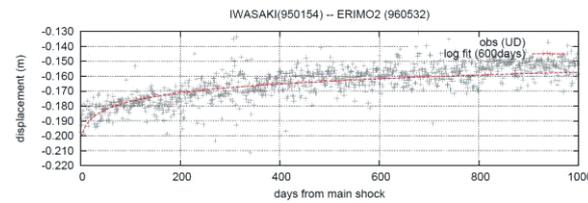
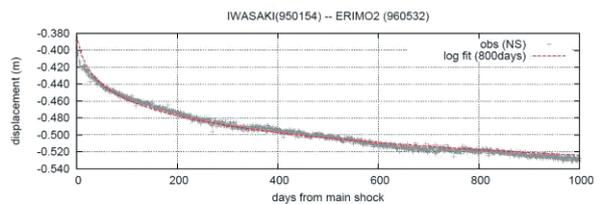
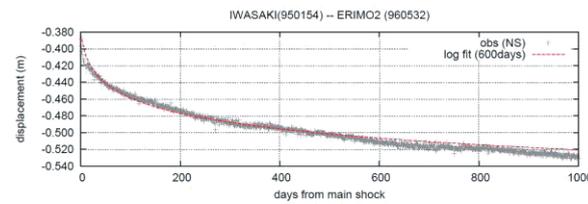
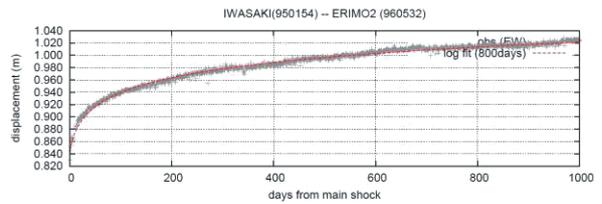
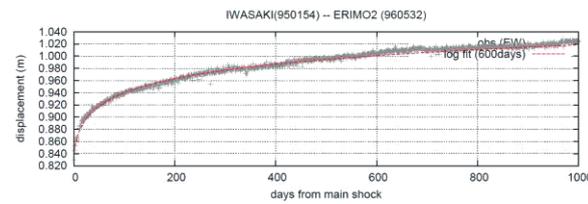


成分	fitting function (推定値 ± 漸近標準誤差)
東西	$(0.0286 \pm 0.0002) \log(1 + t/(2.21 \pm 0.19)) + (0.8297 \pm 0.0007)$
南北	$(-0.0201 \pm 0.0002) \log(1 + t/(2.21 \pm 0.19)) + (-0.3798 \pm 0.0009)$
上下	$(0.0038 \pm 0.0005) \log(1 + t/(2.21 \pm 0.19)) + (-0.1933 \pm 0.0018)$

reduced chi square : $\chi^2 = 0.8$

成分	fitting function (推定値 ± 漸近標準誤差)
東西	$(0.0328 \pm 0.0002) \log(1 + t/(5.08 \pm 0.36)) + (0.8409 \pm 0.0007)$
南北	$(-0.0254 \pm 0.0002) \log(1 + t/(5.08 \pm 0.36)) + (-0.3819 \pm 0.0007)$
上下	$(0.0072 \pm 0.0005) \log(1 + t/(5.08 \pm 0.36)) + (-0.1988 \pm 0.0017)$

reduced chi square : $\chi^2 = 1.3$



成分	fitting function (推定値 ± 漸近標準誤差)
東西	$(0.0350 \pm 0.0002) \log(1 + t/(6.87 \pm 0.38)) + (0.8439 \pm 0.0006)$
南北	$(-0.0276 \pm 0.0001) \log(1 + t/(6.87 \pm 0.38)) + (-0.3830 \pm 0.0005)$
上下	$(0.0088 \pm 0.0004) \log(1 + t/(6.87 \pm 0.38)) + (-0.2009 \pm 0.0014)$

reduced chi square : $\chi^2 = 1.3$

成分	fitting function (推定値 ± 漸近標準誤差)
東西	$(0.0369 \pm 0.0001) \log(1 + t/(8.61 \pm 0.44)) + (0.8459 \pm 0.0005)$
南北	$(-0.0295 \pm 0.0001) \log(1 + t/(8.61 \pm 0.44)) + (-0.3832 \pm 0.0005)$
上下	$(0.0095 \pm 0.0003) \log(1 + t/(8.61 \pm 0.44)) + (-0.2012 \pm 0.0012)$

reduced chi square : $\chi^2 = 1.4$

図-7 平成 15 年十勝沖地震後の余効変動における えりも 2 の対数関数近似結果

(上左図 : 地震後 200 日, 上右図 : 地震後 400 日,

下左図 : 地震後 600 日, 下右図 : 地震後 800 日の計算結果)

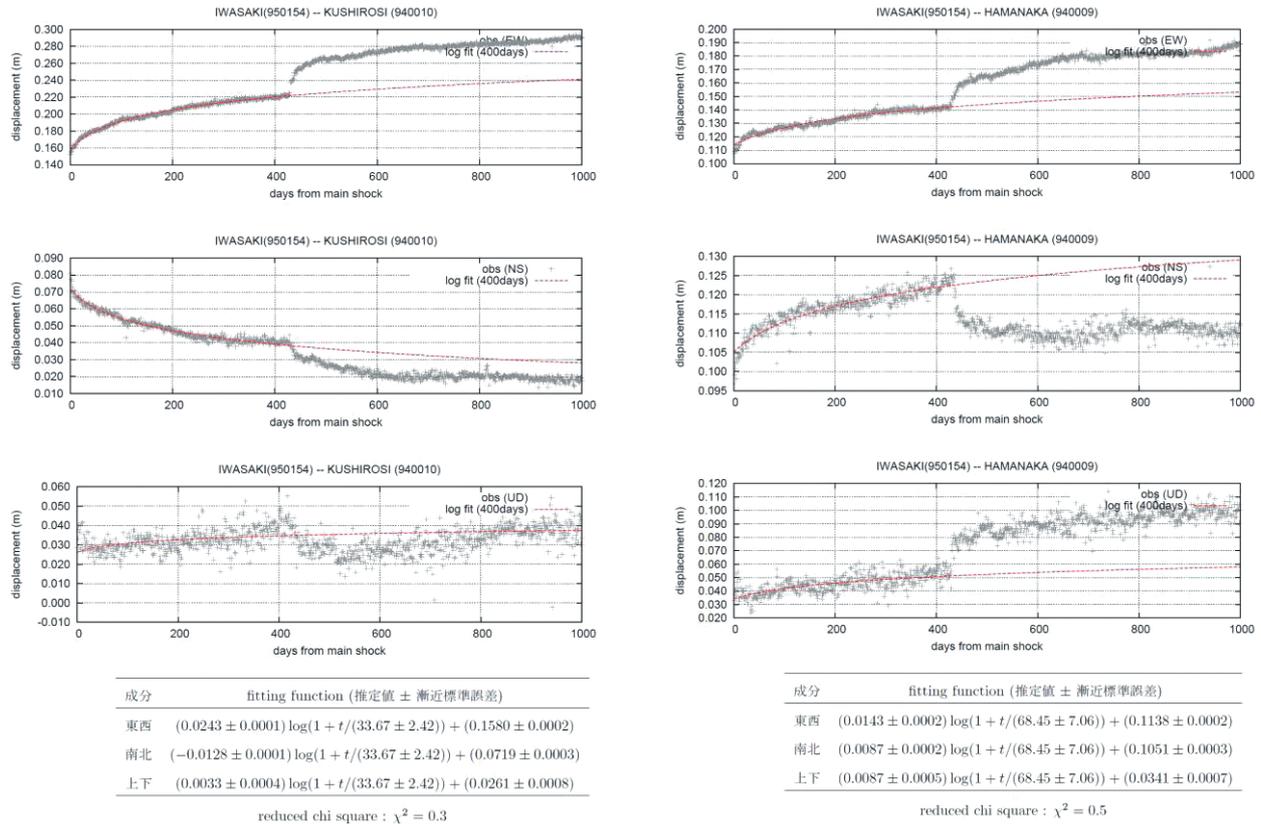


図-8 平成 15 年十勝沖地震後の余効変動 対数関数近似結果 (地震後 400 日のデータを使用)
(左図 : 釧路市, 右図 : 浜中)

参考文献

- C.J. Marone, C.H. Scholtz, R. Bilham(1991): On the Mechanics of Earthquake Afterslip, Journal of Geophysical Research, vol.96, no.B5, 8441-8452.
- F. Pollitz(2003): Transient rheology of the uppermost mantle beneath the Mojave Desert, California, Earth and Planetary Science Letters, vol.215, 89-104.
- H. Perfettini, J.-P. Avouac(2004): Postseismic relaxation driven by brittle creep: A possible mechanism to reconcile geodetic measurements and the decay rate of aftershocks, application to the Chi-Chi earthquake, Taiwan, Journal of Geophysical Research, vol.109, no.B2, B02304.
- 国土地理院 (2004) : 北海道地方の地殻変動 余効変動の時系列モデル, 地震予知連絡会 会報 第 72 巻, 81.
- 水藤尚, 西村卓也, 小沢慎三郎, 小林知勝, 飛田幹男, 今給黎哲郎, 原慎一郎, 矢来博司, 矢萩智裕, 木村久夫, 川元智司 (2011a) : GEONET による平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震に伴う地震時の地殻変動と震源断層モデル, 国土地理院時報, 122, 29-37.
- 水藤尚, 西村卓也, 小沢慎三郎, 飛田幹男, 原慎一郎, 矢来博司, 矢萩智裕, 木村久夫, 川元智司 (2011b) : GEONET による平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震に引き続いて発生している余効変動と余効すべりモデル, 国土地理院時報, 122, 39-46.