

12 - 5 東北地方太平洋沖地震の余効変動の予測実験

Experimental forecast of postseismic deformation of the 2011 Tohoku-oki earthquake

飛田 幹男 (国土地理院)

Mikio Tobita (Geospatial Information Authority of Japan)

1. はじめに

平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震の余効変動の時系列に関数近似を行うという予測実験を通して、余効変動予測力の実力・限界・課題を示す。東北沖地震の余効変動は、主にプレート境界面上の余効滑りと上部マントルの粘弾性緩和により生じていると考えられるが、余効変動予測は、こうした物理現象のより正確な推定のためにも有効と考えられる。対数・指数関数の混合モデルを用いることで、場所によって異なる複雑な余効変動の振る舞いを近似できるようになり、また短期予測の見通しが立ちつつある。まずは短期予測力の検証を行い、20 年後の予測を試みることを通して、非常に困難な中長期予測における課題を明らかにする。

2. 地震後 2 年時点の余効変動予測力の検証

2015 年 8 月の第 208 回地震予知連絡会の重点検討課題の検討 (飛田, 2016) で示したモデル 2 に基づく余効変動予測の検証を行った。これは、地震後 2 年間 (2011 年 3 月 12 日から 2013 年 3 月 11 日まで) のデータのみを用いた近似関数を外挿した予測を固定し、その後の修正は行わないという方針で、実データによる予測力の検証を実施している。モデル 2 は、次式で表される、いわゆるダブル対数+指数モデルである。

$$D(t) = a \ln(1+t/b) + c + d \ln(1+t/e) - f \exp(-t/g) + Vt, \quad (1)$$

ここで、 $D(t)$ は余効変動時系列の東、北または上成分、 t は地震後の日数、 \ln は自然対数、 b, e, g は対数関数または指数関数の緩和時定数、 V は定常速度である。

第 1 図は、余効変動の予測実験の試行に用いている 4 つの観測点 (a), (b), (c), (d) の配置図である。宮城県の (a) 矢本観測点、千葉県の (b) 銚子観測点、岩手県の (c) 宮古観測点、秋田県の (d) 皆瀬観測点では、ノイズ (バラツキや季節変化等) に対する余効変動シグナルの比である S/N が極めて高く高品質なデータが得られている。これらの観測点では、地震直後とその後の上下変動が特徴的であり、グローバル解算出に有効であるため、関数近似と余効変動予測の計算のために選抜した。また、定常速度 V は、1997 年 4 月 1 日から 2000 年 3 月 31 日の観測値の近似直線の傾きの値で固定している。

第 2 図に、モデル 2 による近似力と短期予測力を示した。(1) 式における時定数 b (対数関数)、 e (対数関数)、 g (指数関数) の推定値は、それぞれ、1.4 日、82.0 日、3217.0 日である。これらの時定数は、第 1 図の 4 観測点で共通であり、かつ、東西・上下・南北成分で共通である。観測点や成分ごとに異なるのは、振幅 a, d, f とオフセット c と定常速度 V である。

まず、近似期間 (地震後 2.0 年間) における赤の計算値は黒の観測値を非常によく近似している。また、対数関数に沿った短期的な沈降と指数関数に沿った長期的な隆起により、沈降が隆起に転じる様子が再現されている。次に、予測期間 (地震後 2.0 年から 4.9 年) における赤の計算予測値とグレーの観測値を比較し、短期予測力を検証すると、2016 年 1 月までの 4.9 年間の短期的予測は依然良好である。

3. モデルと時定数の普遍性

こうして推定された時定数とモデルの組み合わせは、推定に用いた4つの観測点以外でも通用するかどうか検証したところ、多くの観測点で通用することが確認され、東北沖地震による余効変動全体に対して普遍的に通用することが判明した。このことから、地表のそれぞれの場所における地殻変動が固有の時定数を持つというよりもむしろ、固有の時定数をもつ地下の地殻変動源（余効滑りや粘弾性緩和）の影響が、東日本の広い範囲に地震後一貫して及んでおり、地表のそれぞれの観測点への寄与の割合が異なっているために、余効変動の振る舞いが観測点毎に異なるのではないかと考えられる（Tobita, 2016）。

(1) 式のパラメータ推定は、非線形最小二乗推定であり、グローバル解を得ることは容易ではない。一方、推定された時定数が普遍性を持ち、これを定数と扱うことができる場合には、線形最小二乗推定に簡素化され、グローバル解は容易に求めることができる。このように線形化されたモデルと時定数を東海地方の地殻活動時系列データに適用したところ、2013年頃から始まった長期的ゆっくり滑りの有効な抽出に成功した。

このように、混合モデルと普遍的な時定数の組み合わせにより、非線形推定が線形化され、GEONET観測点の余効変動モデル化が簡素化された。ただし、混合モデルは高品質データのみにも適用可能であり、年周変化やバラツキの大きいデータ（つまりS/Nの小さなデータ）では有効に機能しないため、周期成分の補正など別途工夫が必要である。

4. 対数・指数関数混合モデルによる余効変動の20年予測

モデル $2[\log 1 + \log 2 + \exp]$ を用い、 t を延長することで20年後の予測結果が計算できる。できるだけ正確な予測とするため、地震後2016/01/16までの4.9年間の最新データを使用して、計算式(1)の各パラメータを推定した。時定数 b (対数関数)、 e (対数関数)、 g (指数関数) の推定値は、それぞれ、1.65日、119.0日、450000.日である。矢本・宮古・皆瀬観測点の東向きの変動は20年後(2031年)も継続するとの予測になったが、近似期間が2.0年の予測結果では、2024年以降に西向きに反転するとの予測になっていた。こうした違いは、主に長期の時定数 g が大きく異なることに起因しており、近似期間による長期の時定数の安定化が課題である。矢本観測点の地震時沈降は2020年までに回復、宮古観測点の地震時沈降は2030年代に回復、との予測になった。銚子観測点では、近似期間による予測結果の変化は小さいが、この理由は粘弾性緩和を表すと考えられる長期の指数成分の寄与が小さいためとみられる。

ただし、長期的な余効変動予測結果は、長期の時定数 g 及び仮定した(1997から2000年観測値に基づく)定常速度 V に大きく依存し、最終的な余効変動速度は定常速度に収束するという予測結果となった。今後、実際の余効変動とモデル予測結果を比較することで、定常速度 V が普遍的に存在するかどうか等、疑問が解ける可能性がある。

5. 上下変動の推移と地震後20年後の予測分布図

第3図に20年後の上下変動予測分布図の例を示した。地震前の高さを基準にして、地震時の上下変動後の高さを青、2016年1月16日現在の高さを赤、地震後20年後の予測高さをオレンジで示した。左右の図ではオレンジの予測結果が異なっている。左の図は4.9年の近似期間に基づく余効変動が長期的に継続するという予測結果、一方右の図は2.0年の近似期間に基づく余効変動が早期に終息するという予測結果である。違いの主な原因は、長期の指数関数の時定数が450000.日(左)と

3217.0日(右)と異なるためである。宮城県とその周辺の第3図で示した観測点の20年後予測結果は、左図では「沿岸の全点で地震時沈降が回復する」、右図では「一番回復が鈍い牡鹿では -35 cm まで回復する」である。岩手県から千葉県に至る太平洋沿岸全体の地震時沈降は、隆起が長期継続する予測(左)によれば、「太平洋沿岸の地震時沈降は20年以内にほぼ回復する」一方、早期終息予測(右)では、「20年以内に多くの場所で40 cm以内の沈降レベルまで回復する」との予測結果となった。

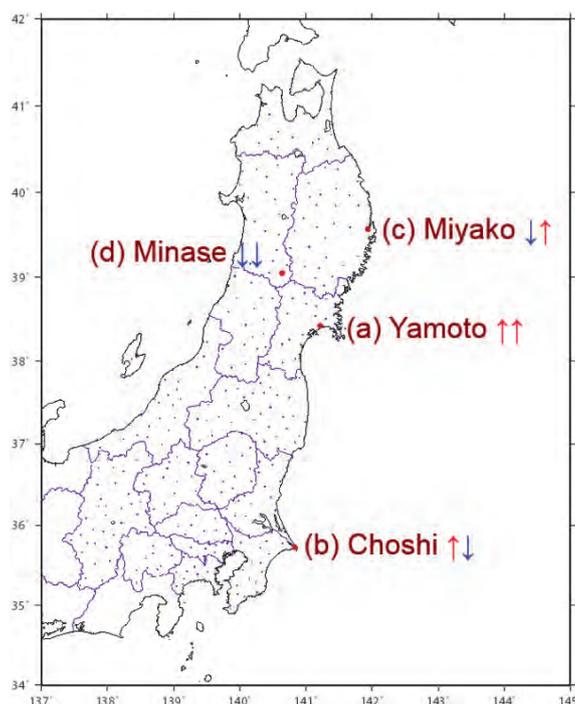
6. まとめ

対数・指数関数混合モデルにより短期予測力は向上し、2年間の近似期間以降、4.9年までの短期予測は依然良好である。また、4観測点3成分同時推定で得られた1組の時定数が東日本全体全体で普遍的に通用する可能性が示された。この普遍性により線形化された関数近似混合モデルを東海の地殻活動監視に適用し、長期的SSEの検出に成功した。課題として、中長期予測は、長期の時定数と定常速度に強く依存し、前者の時定数は近似期間によって不安定であることが把握された。また、副次的効果として、線形化によりGEONET観測点の余効変動モデル化が簡素化された。

なお、対数・指数関数混合モデルに関する詳細については、Tobita (2016) を参照していただきたい。

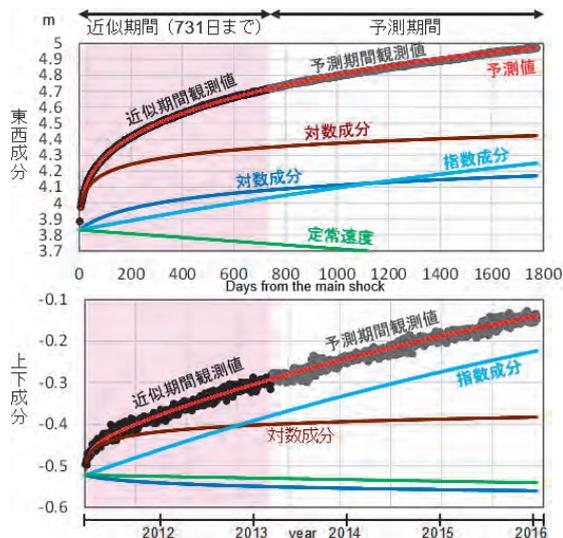
参考文献

- 1) 飛田幹男 (2016) 東北地方太平洋沖地震の余効変動の予測実験, 地震予知連絡会会報, 95, 12-5, 420-424.
- 2) Tobita M (2016) Combined Logarithmic and Exponential Function Model for Fitting Postseismic GNSS Time Series after 2011 Tohoku-Oki Earthquake. Earth Planets Space. doi: 10.1186/s40623-016-0422-4

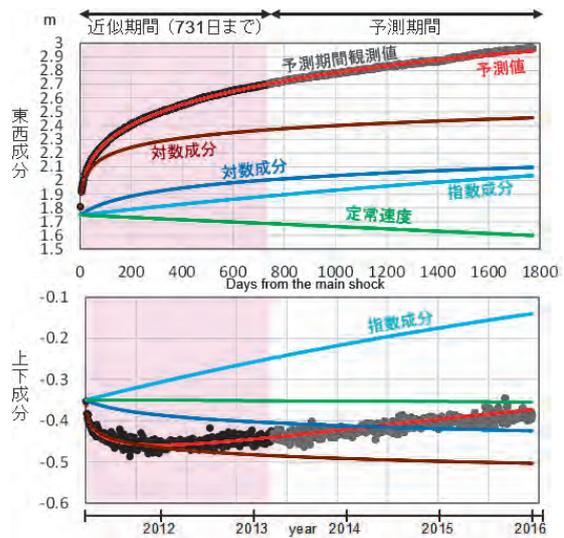


第1図 東日本のGONET観測点配置図。青点は国土地理院のGEONET観測点を示す。宮城県の(a)矢本観測点、千葉県の(b)銚子観測点、岩手県の(c)宮古観測点、秋田県の(d)皆瀬観測点を、関数近似と余効変動予測の計算のために選抜した。観測点名に続く上下の矢印「↑」と「↓」は、地震直後の上下変動及びその後の上下変動を表す。

Fig. 1 Location map of GNSS stations. The dots denote the permanent GNSS stations in the GEONET of GSI. The Yamoto, Choshi, Miyako, and Minase stations have observed extremely high quality GNSS data, which were mainly used in this study. The up and down arrows denote the uplifts and subsidences immediately after the 2011 Tohoku-Oki earthquake (first arrow) and afterwards (second arrow), respectively.



ダブル対数+指数関数モデルによる2年間のデータに基づく予測は依然良好。



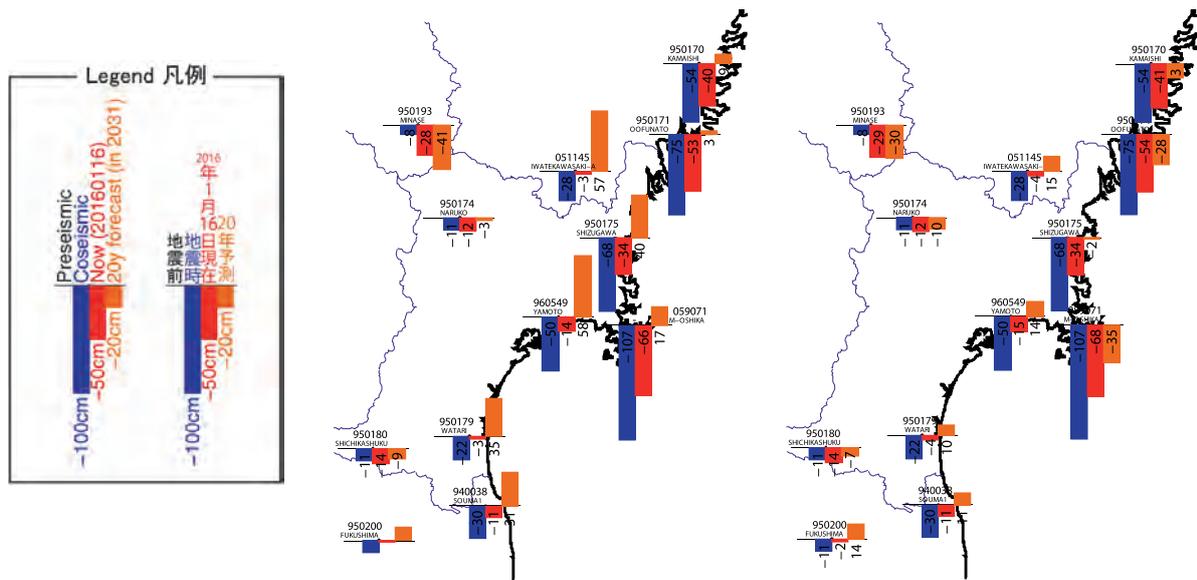
予測は依然良好。短期的な沈降と指数による長期的隆起で説明。

第2図 「矢本」観測点(左)と「宮古」観測点(右)のGNSS余効変動時系列に(1)式のダブル対数+指数モデル(モデル2)を適用した結果の例。横軸は地震後の日数、縦軸は地震直前からの地殻変動量で単位はメートル。地震後731日(2年)のデータを用いた関数近似により得られた予測曲線(計算値)は、その後2016/1/16までの約4.9年間の予測期間観測値の予測に成功している。予測曲線の内訳として、対数成分1、対数成分2、指数成分、定常成分も表示している。

Fig. 2 GNSS time series after the 20110311 earthquake, and the time series calculated using equation (1) of the log+log+exp model (Model 2). The black closed circles denote the observed GNSS positions two years after the main shock with respect to the position just before the main shock. The red line was fitted to the positions observed in the two-year fitting period (indicated by the purple background area) between March 12, 2011 and March 11, 2013. The red line was extended to 4.9 years after the main shock based on the calculations using the model. The brown, blue, light blue, and green lines respectively indicate the logarithmic, logarithmic, exponential, and steady velocity components, and have been drawn so that their intercept would be the same as that of the red line. The summations of these components using certain offsets correspond to the calculated positions indicated by the red line. The grey closed circles denote the observed GNSS position during the prediction period after the fitting period.

余効変動長期継続予測

余効変動早期終息予測



第3図 20年後の上下変動予測分布図。(左) 4.9年の近似期間に基づく余効変動が長期的に継続するという予測結果、(右) 2.0年の近似期間に基づく余効変動が早期に終息するという予測結果。地震前の高さを基準にして、地震時の上下変動が青、2016年1月16日現在の高さが赤、地震後20年後の予測高をオレンジで示した。

Fig. 3 Postseismic heights with respect to the position just before the main shock. The orange bars show twenty-year forecasts calculated with the data observed (left) in the 2.0 year fitting period, and (right) in the 4.9 year fitting period.