

## 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。現状において、既存データの関数近似は容易であるが、未来を予測するのは困難であり、予測手法は確立していない。

### 2. 余効変動時系列近似のための対数・指数関数混合モデル

従来、余効変動時系列の関数近似に用いられてきた対数関数(log)や指数関数(exp)は、解析時点までの既存の余効変動時系列データを関数近似する多くの場合に利用可能である。特に、連続観測でないデータや誤差の大きいデータの場合には、logでもexpでも関数近似は容易である。しかし、関数近似が成功したからといって、それが地下で進行している物理現象(粘弾性緩和や余効滑り等)を正しく反映しているとは限らない。また、その後の進行を予測できるとは限らない。より正確な物理現象のモデリングと予測力の向上のための必要条件として次の項目を設定する：

- 1) (時定数は変動機構固有の値だとすると) 余効変動3成分の時定数が等しい。
- 2) 近接した観測点間で、時定数が近い値をとる。
- 3) 近似期間が変わっても時定数等のパラメータ推定値が安定している。
- 4) (近似が良好であることに加え、) 予測が良好。
- 5) 残差平方和が(極小でなく)最小のグローバル解。

これらの条件の内、3)と4)を満たすには、logとexpの混合モデルが有効であることを1年前に報告した。しかし、4)と5)までの条件を満たす解を得るのは非常に困難であった。そこで、

- A) S/Nが高く、季節変化の少ない高品質の観測データのみを使用。
- B) 極端な2)の条件として、「すべての観測点で時定数が等しい」と仮定。
- C) 定常速度 $V$ の推定は行わない。

という工夫により、すべての条件を満たすグローバル解が得られるようになった。

本論では、次の3つの関数近似のための対数・指数関数混合モデルを紹介する：

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

$$D(t) = a \ln(1+t/b) + c + d \ln(1+t/e) - f \exp(-t/g) + Vt, \quad (2)$$

$$D(t) = a \ln(1+t/b) + c - d \exp(-t/e) - f \exp(-t/g) + Vt, \quad (3)$$

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。(1)式は対数+指数モデル(以下、モデル1)、(2)式はダブル対数+指数モデル(以下、モデル2)、(3)式は対数+ダブル指数モデル(以下、モデル3)である。

第1図は、工夫Aを実現するために選抜した高品質の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。また、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、工夫Cのために、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た。

### 3. 対数・指数関数混合モデルによる余効変動短期予測結果

モデル1、2、3による短期的予測結果(時系列グラフ)は、地震予知連絡会会報第95巻(本巻)「3-2 東北地方の地殻変動」(国土地理院)を参照されたい。3つの対数・指数関数混合モデルはどれも従来のlogまたはexpのみの関数と比べて予測力が高い。2年間の近似期間におけるAICは、モデル1:-93387、モデル2:-93865、モデル3:-93893で、モデル1に比べて、モデル2と3が有意に優れているが、モデル2と3の差は小さくわずかにモデル3の近似力が上回っている。

第2図に、モデル3による近似力と短期予測力を示した。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、かつ、2015年7月までの2.3年間の短期的予測は良好である。モデル3の計算式(3)における時定数 $b$ (対数関数)、 $e$ (指数関数)、 $g$ (指数関数)の推定値は、それぞれ、2.4日、213.3日、2100.0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。

これらのモデル(特にモデル2と3)が高い近似力と短期予測力を持つことから、余効変動の発生源(例:余効滑り、粘弾性緩和)は、広域を地震後数年間一貫して作用したことが示唆される。また、長期的粘弾性緩和が徐々に効いてきていることが示唆される。

### 4. 対数・指数関数混合モデルによる余効変動の20年予測

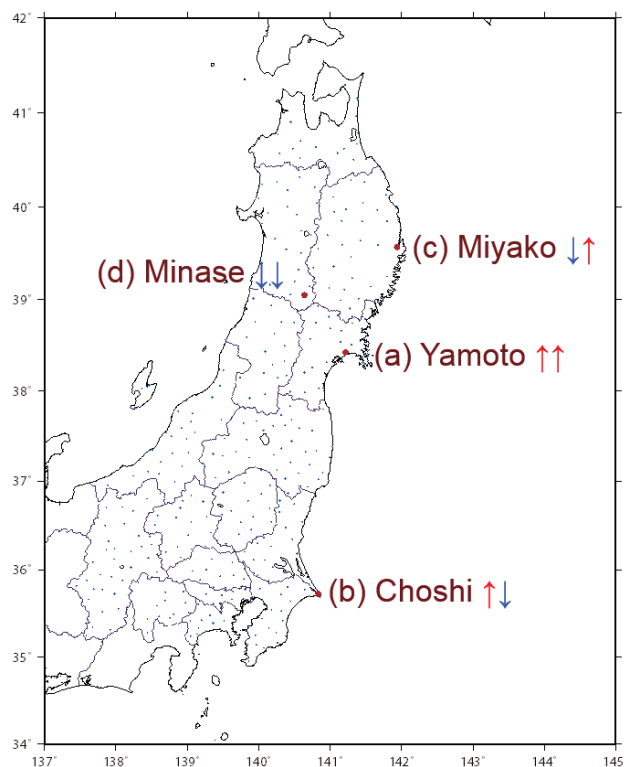
計算式(1)、(2)、(3)それぞれの係数が決まれば、 $t$ を延長することで予測が可能である。ここでは地震後20年先までの予測結果を示す。予測力が比較的低いモデル1 [log+exp]による予測結果はここでは省略する。モデル2 [log1+log2+exp]による予測では、矢本・宮古・皆瀬観測点は、2024年以降に西向きに反転、矢本観測点の地震時沈降は2020年頃回復、との予測になった。モデル3 [log+exp1+exp2]による予測では、矢本・宮古・皆瀬観測点は、2023年前後に西向きに反転、矢本観測点の地震時沈降は2025年前後に回復、その後沈降するとの予測になった(矢本観測点の例:第3図)。どのモデルにおいても、銚子観測点は今後西向きが加速、その後、ゆっくりと沈降へ、また皆瀬の沈降は継続するとの結果となった。

ただし、長期的な余効変動予測結果は、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. まとめ

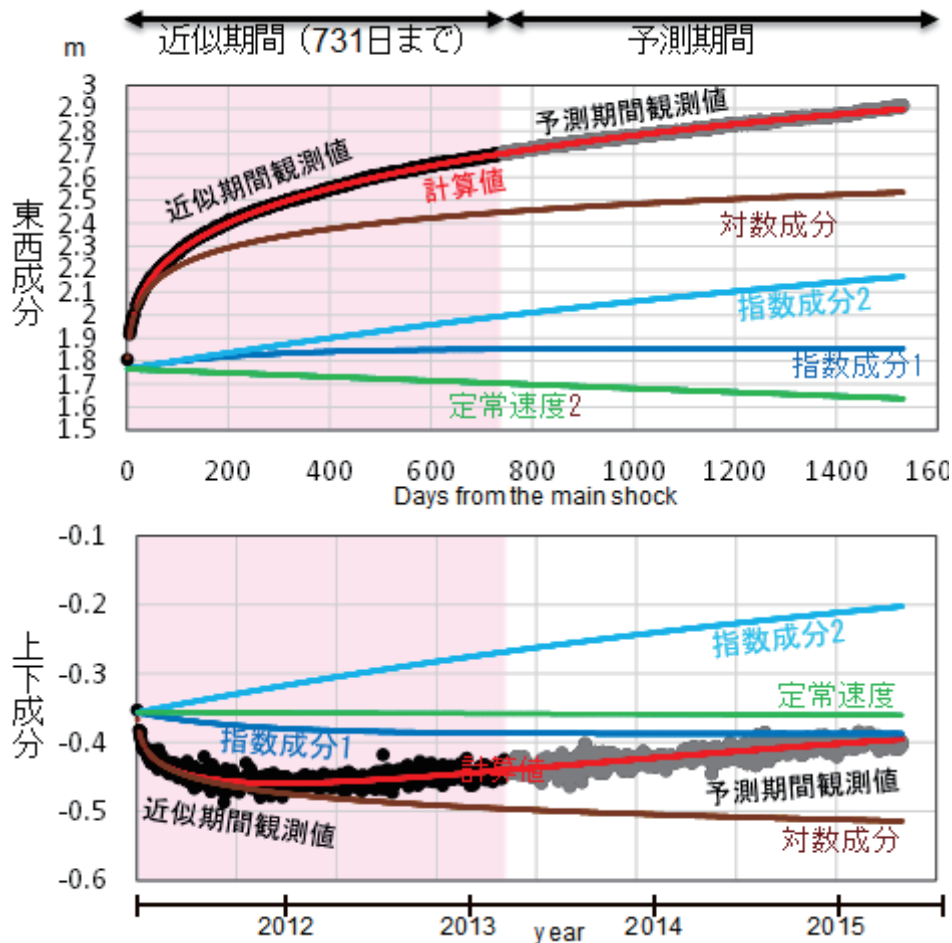
- (1) 余効変動時系列への近似関数の検証の結果、近似力が低いものから並べると：  

$$[\exp] < [\log] < [\exp 1 + \exp 2] < [\log + \exp] \sim [\log 1 + \log 2] < [\log 1 + \log 2 + \exp] \sim [\log + \exp 1 + \exp 2]$$
- (2) 対数と指数関数を組み合わせた混合モデルを用いた近似パラメータ推定においては、グローバル解を得るのは難しいが、GEONETのS/Nの高い余効変動時系列を用い、4観測点及び3成分（東・北・上）の共通時定数を同時推定する等の工夫により、グローバル解を得る手立てが確立されつつある。
- (3) 地震時沈降を回復するような地震後の隆起は鈍化しており、余効変動予測によれば地震時沈降を回復できる場所と難しい場所が存在する。
- (4) これらの余効変動モデルに基づく長期的な余効変動予測結果は、仮定した定常速度 $V$ に大きく依存する。
- (5) こうした余効変動の予測実験によって、余効変動予測の実力、より現実に近いモデル、定常速度 $V$ が定常的なものかどうか等が明らかになることが期待される。



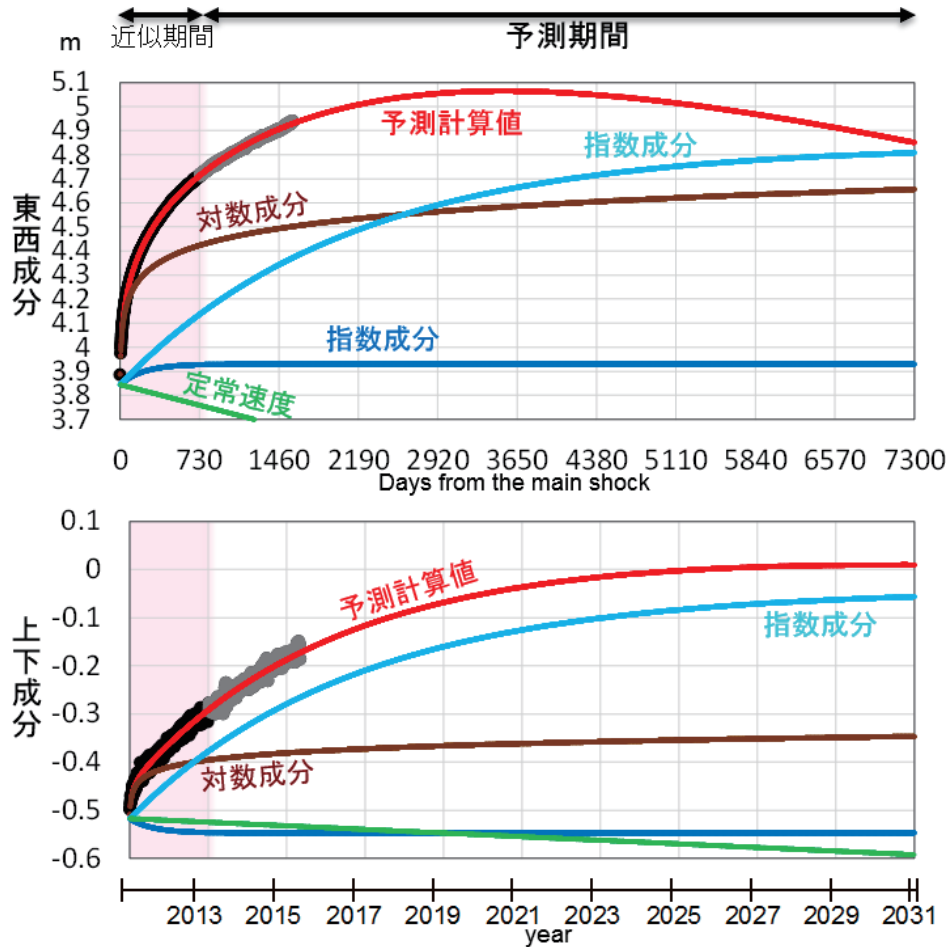
第1図 東日本のGONET観測点配置図。青点は国土地理院のGEONET観測点を示す。宮城県の(a)矢本観測点、千葉県(b)銚子観測点、岩手県(c)宮古観測点、秋田県(d)皆瀬観測点を、関数近似と余効変動予測の計算のために選抜した。観測点名に続く上下の矢印「↑」と「↓」は、地震直後の上下変動及びその後の上下変動を表す。

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.



第2図 「宮古」観測点のGNSS余効変動時系列に(3)式の対数+ダブル指数モデル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2015/7/11までの約2.3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，指数成分1，指数成分2，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 (3) of the log+exp+exp model. 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 4.3 years after the main shock based on the calculations using the model. The brown, blue, light blue, and green lines respectively indicate the logarithmic, exponential, 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.



第3図 「矢本」観測点の(3)式対数+ダブル指数モデルによる20年予測結果の例. 横軸は地震後の日数または西暦年, 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)に基づく, 2031/3/11までの約20年間の予測結果. 予測曲線の内訳として, 対数成分, 2つの指数成分, 定常成分も表示している.

Fig.3 Twenty-year predictions of the GNSS time series after the 20110311 earthquake obtained by the log+exp+exp model (Model-3). The red line fitted to the positions observed in the two-year fitting period (indicated by the purple background area) was extended to 20 years after the main shock based on the calculations using the model. The other notations are the same as in Fig. 2.