

# 2011年東北地方太平洋沖地震後の余効変動の時空間関数モデリング Spatiotemporal Functional Modeling of Postseismic Deformations after the 2011 Tohoku-Oki Earthquake

測地部 藤原 智

Geodetic Department FUJIWARA Satoshi

飛田幹男<sup>1</sup>

TOBITA Mikio

地理地殻活動研究センター 小沢慎三郎

Geography and Crustal Dynamics Research Center OZAWA Shinzaburo

## 要 旨

2011年東北地方太平洋沖地震の発生から10年以上が経過したものの、余効変動と呼ばれる地震後の地殻変動は継続している。余効変動は緩やかに減速していく変化のため、単純な関数を使用して高精度に近似することができる。国土地理院のGNSS連続観測点である電子基準点網が継続的に蓄積した膨大な量の観測データについて統計データ処理を行い、余効変動を対数関数と指数関数を組み合わせて近似・予測する時系列及びその空間分布のモデルを得た。この時空間モデルは北海道から中部地方に至る広い領域で約10年間の残差を数cm以下で近似することができた。このモデルを利用して余効変動の時系列を精査したところ、2015年2月以降に広域かつ一定速度で進行する新たな変動が見いだされ、この一定速度の成分を新たに関数項として追加することで、時空間モデルの余効変動の推定精度を向上させた。このモデルの特徴は、各関数の緩和時定数を全ての観測点と成分に同じ値を適用することで関数の取扱いを簡単にすることである。この関数モデルの係数の空間分布はランダムではなく空間的に滑らかであり、関数モデルの短期成分と長期成分の空間分布と、別途物理シミュレーションで計算された余効すべりと粘弾性緩和の空間分布は互いによく似ている。したがって関数モデルの各項は、地震発生に関与する物理メカニズムに関する情報を含んでいる。このモデルは、地殻変動の予測のほか、小さな変化の識別や正確な位置決めのためのモデリングなどの実用的なアプリケーションに応用することができ、利用範囲が広い。

## 1. はじめに

地震は地下の断層が急激に動く現象であり、地震に伴って地表では時間的にステップ状の地殻変動が観測される。地震の規模（マグニチュード）が大きくなると、地震後に余効変動と呼ばれるゆっくりとした地殻変動が長期間にわたって観測される。2011年3月11日、東北地方を中心とする広域を襲った

マグニチュード9の地震（以下「2011年東北地方太平洋沖地震」という。）は水平方向に5m、垂直方向に1mをそれぞれ超える地殻変動をもたらした。地震後の余効変動も大きく、場所によっては1mを超えている（Ozawa et al., 2011; 2012）。

2011年東北地方太平洋沖地震のような海洋の地下で発生する大地震の余効変動は、主に海洋プレートと大陸プレートの境界面での余効すべり（地震時のすべりに励起された地震後のゆっくりとしたすべり）と上部マントルの粘弾性緩和（地震時の応力に励起された流動によるもので地下の物質が粘性や弾性を持っていることに起因する）のために発生することはよく知られている。なお、多孔質物質による弾性反発（地震時に変形した後に間隙流体が流動する）による余効変動がわずかに（数cm未満）発生する可能性もあるとされる。これらの余効変動の時空間分布を理解することで、地下で発生している物理メカニズムの理解、地震発生過程の推定に役立つ。このほか、地殻変動全体から大きな余効変動を取り除くことによって、余効変動以外の原因によって引き起こされた小さな地殻変動の検出に役立つ。

Tobita (2016) は、大地震の余効変動の時系列を近似するために、対数関数と指数関数を組み合わせた関数モデルを構築し、広範囲にわたる余効変動の時空間変化を高精度に予測した。このことは、大地震後に地下で進行している現象が比較的単純かつ広域で同様な物理メカニズムによって引き起こされることを示唆している。本手法は統計処理を用いた関数モデルの作成であるので、物理メカニズムに依存しないアプローチであり、物理シミュレーション結果と比較することは有意義である。

本研究では、2種類の主要な解析を紹介する。第1は、2011年東北地方太平洋沖地震後約11年間の電子基準点で得られた地殻変動データに本手法を適用し、その有効性を検証し、改良を加えることでモデルの余効変動の予測精度を向上させる。第2に、各時系列の観測点ごとの係数の空間分布（空間関数）を、余効すべりや粘弾性緩和などの物理モデリング



るそれぞれの代表的な地殻変動を示した。このこと  
によって、緩和時定数 ( $b$ ,  $e$  及び  $g$ ) を求める過程  
において、それらは非線形最小二乗計算に強い制約  
条件となった。なお、非線形最小二乗計算では複数の  
初期値を与えて繰り返し計算を行っており、残差  
と赤池情報量規準 (AIC) を検証することで緩和時定  
数の最終解を求めた。

余効変動には、数日から数千日の広範囲の緩和時  
定数を持つ変動が含まれる。これらの変動は式(1)に  
表される、緩和時定数が異なる各関数項の合計とし  
て表される。緩和時定数  $b$ ,  $e$  及び  $g$  を決定するた  
めに使用される非線形最小二乗法は、計算に時間がか  
かり、局所的な解に陥ってしまう可能性がある。し  
たがって、時間関数の共通性により、4 つの観測点  
で緩和時定数を注意深く厳密に決定した後、繰り返  
し計算をしなくても短時間で解を決定できる線形最  
小二乗法を使用して各観測点と成分に固有の係数  $a$ ,  
 $c$ ,  $d$  及び  $f$  を決定することが合理的である。これは  
次の式(2)のように表すことができる。

$$F(t, x, y) = \sum \text{time\_}f(t) \cdot \text{space\_}f(x, y) \quad (2)$$

$\text{time\_}f(t)$  が式(1)の各項となる時間関数 ( $\ln(1+t/b)$ ,  
 $\ln(1+t/e)$ ,  $-\exp(-t/g)$  及び  $t$ ),  $\text{space\_}f(x, y)$  が座標( $x$ ,  
 $y$ )における空間関数 ( $a$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $f$  及び  $V$ ) であり、時  
間関数と空間関数を掛け合わせた項の総和が全体の  
余効変動である。係数  $a$ ,  $d$ ,  $f$  は、それぞれの項目  
が代表する緩和時定数を持つ物理メカニズムの寄与  
の大きさを振幅として示している。この式は、主成  
分分析 (PCA) および独立成分分析 (ICA) で使用さ  
れる式と似ている。Munekane (2012) は、PCA を  
使用して時間関数を統計的に解いた。これらの PCA  
や ICA の方法では、時間関数は直交関数又は独立関  
数に分けられる。ただし、関数の形式は事前に指定  
されず、本研究での方法は、関数の形式を  $\log +$   
 $\log + \exp$  として事前に与えている。その結果として、  
本方法では各観測点での観測値とモデル値の間の残  
差は、必ずしも最小値となるわけではないことに注  
意が必要である。ただし、残差が許容範囲内にある  
限りは、簡略化された関数を使用して、任意の観測  
点での観測値を時空間でモデル化でき得るという利  
点がある。さらに、外挿として将来予測への利用が  
可能である。

このように、本研究では、GEONET の 200 か所以  
上の電子基準点 (図-1) を使用して各観測点・成分  
の余効変動の時空間分布を予測するモデルを検証し  
改良を行った。

### 3. 結果

#### 3.1 時間関数

表-1 に、2.0, 3.9, 5.8 及び 8.9 年を各近似期間と  
するモデルの緩和時定数  $b$ ,  $e$  及び  $g$  の計算結果をま  
とめた。ここで、例えば 2.0 年モデルとは、2011 年  
東北地方太平洋沖地震の発生翌日 (3 月 12 日) から  
731 日間 (2.0 年) を近似期間として 4 つの電子基準  
点 (皆瀬, 宮古, 矢本, 銚子) で緩和時定数を決定  
した後、図-1 の観測点について各成分の空間関数を  
求め、732 日以降の余効変動を関数として予測する  
モデルである。計算は観測データが蓄積すること実  
行したため、これらの近似期間は等間隔ではない。  
また、2015 年 2 月前後でデータ近似結果に明らかな  
違いが見られたため、2015 年 2 月までを近似期間と  
したモデル (3.9 年モデル) を追加した。

表-1 によれば、緩和時定数  $b$  と  $e$  は、近似期間が  
長くなるにつれて増加する傾向がある。これに対し  
て、2.0 年と 3.9 年モデルの  $g$  の値はわずかな変化で  
あるものの、次の 5.8 年モデルの  $g$  の値は著しく増  
加している。5.8 年および 8.9 年モデルにおける  $g$  の  
値である 45 万日とは 1200 年以上であり、数年の近  
似期間から緩和時定数が適切に計算できたとは考え  
にくく、関数モデルが適合せずに計算過程で値が飽  
和してしまっただと考えられる。

図-2 は、2011 年東北地方太平洋沖地震の震源地に  
比較的近い電子基準点の川井と志津川及び震源地か  
ら比較的離れた電子基準点の上ノ国と名立 (図-1)  
について、表-1 に示された近似期間ごとの緩和時定  
数を使用して関数モデルによって予測された時系列  
を示している。図-2 のこれらの関数近似は、4 つの  
電子基準点 (皆瀬, 宮古, 矢本, 銚子) の時系列か  
ら推定されたモデル・パラメータが広範囲の他の観  
測点に適用できることを示している。なお、図-2 は、  
2026.5 年までの外挿された予測も示している。

図-2 について、最初に 2.0 年と 3.9 年モデルの時  
系列を較べてみる。全ての観測点で、南北 (NS) 成  
分の 2.0 年モデルは 3.9 年モデルよりも小さい値を  
示しており、2.0 年モデルの南北成分は、2013 年に

表-1 各近似期間のデータ近似によって求められた緩和時定数

近似 期間 (年)	近似期間の 日数	近似期間の 終了年月	緩和時定数 (日)		
			短期 対数関数 $b$	長期 対数関数 $e$	指数関数 $g$
2.0	731	2013 年 3 月	1.38	82.0	3217
3.9	1438	2015 年 2 月	1.59	148.6	3645
5.8	2115	2016 年 12 月	1.98	128.7	450,000
8.9	3256	2020 年 2 月	2.12	287.5	450,005

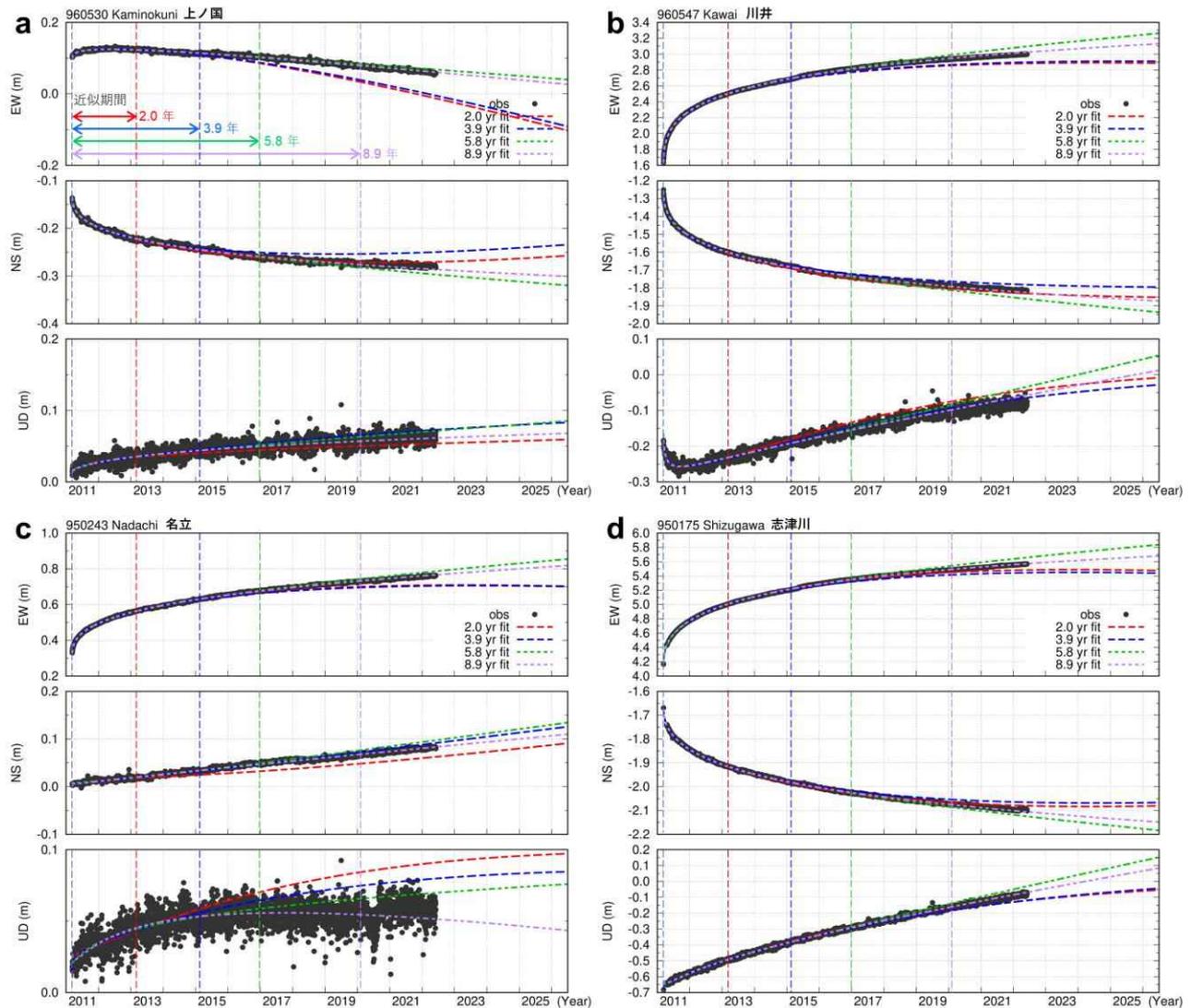


図-2 関数モデルによる余効変動予測の時系列

a 上ノ国, b 川井, c 名立, d 志津川の各電子基準点(場所は図-1)における東西(EW), 南北(NS)及び上下(UD)の各成分。黒い点: 毎日の観測値。破線: 各近似期間(2.0, 3.9, 5.8, および8.9年)による関数モデルの予測値。

固定局である福江に生じた局所変動の影響を受けることで、全ての観測所で同じ変動が見られていると考えられる。固定局の影響のように、近似データの期間が短くなることによって引き起こされる予測誤差は回避しがたい。なお、緩和時定数の違いによる影響については、議論の章で後述する。

固定局の影響にもかかわらず、図-2に示される、2.0年モデルと3.9年モデルの将来予測の時系列が互いに平行であり、それらの長期的な傾向が類似していることを示している。これは、一番長い緩和時定数を持つ指数関数項の緩和時定数が10年程度と両方の時系列ではほぼ同じであることから生じている。また、プレート運動が原因と考えられる定常速度 $V$ は、地震から約10年後には比較的支配的になる。したがって、長期的な傾向は両方のモデルに適切に含

まれ、時間の経過とともに変化することは小さいと考えられる。また、2.0年モデルは値を求めた期間が短期のため小規模なノイズにも左右されやすいものの、予測期間が10年程度でも、長期的な誤差は数cmにすぎず、余効変動全体が1mを超えることもあるため、利用目的の精度が10cm程度であれば2.0年モデルであっても十分な精度が得られると考えてよい。

2.0年と3.9年のモデルと5.8年と8.9年のモデルはそれぞれお互いに整列(平行)しており、同様の変化時系列を示しているものの、これら2つのグループの間に顕著な違いが見られ、3.9年から5.8年の間に関数モデルの予測に大きな影響を与える体系的な変化が起こったことを示している。これは、表-1にも現れているように、5.8年モデルと8.9年モデル

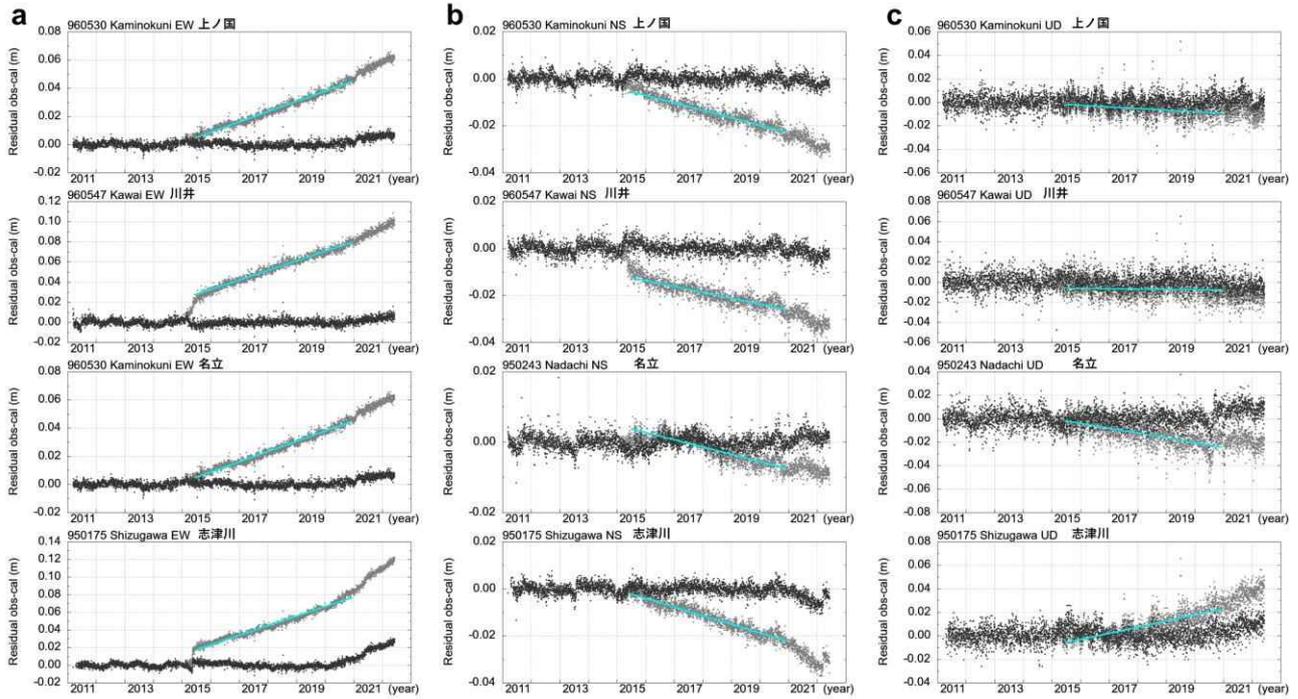


図-3 観測値と3.9年モデルの残差の時系列

電子基準点(上ノ国, 川井, 名立, 志津川)における **a** 東西 (EW), **b** 南北 (NS), **c** 上下 (UD) の各成分の残差. 灰色の点: 式(3)に基づく3.9年モデルの残差. 黒い点: 式(4)に基づく3.9年モデルの残差. 水色の直線: 2015年12月から2020年12月までの灰色の点の近似.

では  $g$  の適切な値を計算できていないという事実と一致している. 近似期間が一番長い8.9年モデルが全期間を通じて一番時系列を残差が小さく表現できているのは当然であるが, 関数モデルとしてはこれが最適とはいえない.

この3.9年から5.8年の間に傾向の変化がなぜ生じたのかを解明するために, 図-3に3.9年モデル(2015年2月まで)の予測に基づく残差の時系列を示した. 予測値は観測値に対して2015年2月まではほぼ1cm以内で一致していたが, その後, 2015年2月17日の三陸沖の地震(M6.9)(以下「2015年三陸沖地震」という.), 5月13日の宮城沖の地震(M6.8)(以下「2015年宮城沖地震」という.)の頃から一定方向に残差が蓄積することとなった. このことは, 今回の解析に用いた200点以上のほとんど全てで見られている. つまり, 2015年2月以降, 北海道から中部までの1000kmにわたる広域かつ全成分に一定速度で進行する残差が発生している. このことは, それまで続いていた余効変動とは異なる別の事象がこの時期に発生し, それが継続していることで本来の関数モデルの成立条件が崩れ, 前述の  $g$  の値も異常になってしまったと考えられる. したがって, 式(1)の関数モデルを使うには近似期間として, 3.9年より長い期間は採用すべきではない.

この2015年2月から発生した変化について, 変化が一番顕著な東西(EW)成分を詳しく見てみると,

上ノ国や名立では2015年初めごろから直線的な変化が始まっているが, 川井や志津川では2月から7月ごろにかけてだらだらとした変化が発生している. なお, 南北成分の2013年7月頃に共通に見られる5mm程の変化は固定局の福江によるものである.

図-3からはいずれの観測点, いずれの成分においても2015年中頃に直線的な成分が新たに現れていることが分かる. この新たな成分を関数としてモデル化するにあたり年周成分があることを考慮して, 2015年12月から2020年12月の5年間について直線を最小二乗法で当てはめた. もちろん, 2015年以降の新たな成分が直線ではない性質をもった関数である可能性はあるが, 直線以上に複雑な関数を示唆する変化は見いだせておらず, 最小限のシンプルな関数で表現できることから, 本研究では2015年以降について, 下記の(3)と(4)式をTobita(2016)の修正関数モデルとして提案する:

$$D(t) = a \ln(1+t/b) + c + d \ln(1+t/e) - f \exp(-t/g) + Vt \quad (t < t_0) \quad (3)$$

$$D(t) = a \ln(1+t/b) + (c+c') + d \ln(1+t/e) - f \exp(-t/g) + (V+v)t \quad (t \geq t_1) \quad (4)$$

ここで,  $c'$ と $v$ は, 直線で近似することによって求めた各観測点・成分ごとの定数である. 図-4の読み取

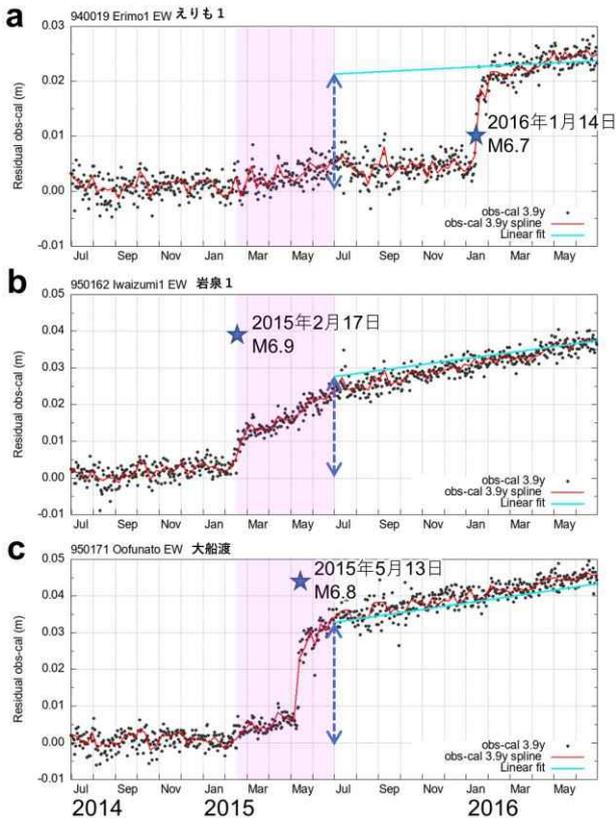


図-4 2015年前後の特徴的な残差の時系列

**a** えりも1, **b** 岩泉1, **c** 大船渡の各電子基準点(場所は図-5)の東西(EW)成分の残差。黒い点:観測値と3.9年モデルの残差。赤い線:スプライン補間で平滑化された残差。水色の線:2015年12月から2020年12月までの直線近似の延長線。星印:各観測所近傍で発生した余震の発生時期。両矢印の点線:gap<sub>2015</sub>の量。

り値から,  $t_0$  は非定常的な変化の始まりの時期である2015年2月17日( $t_0=1439$ 日),  $t_1$  はほぼ直線的な変化として落ち着く2015年7月1日( $t_1=1573$ 日)とした。

図-4a, 4b, 及び4cは, 3つの電子基準点(位置は図-5)の東西成分の2015年から2016年の初めまでの特徴的な変化を示している。図-1のほとんどの観測点で, 2015年から2016年までの大きな余震の地殻変動(図-4及び5a)は1cm未満であり, その後に小さな余効変動が続いた。いずれも小さい上にお互いに重畳しており, 2011年の東北地方太平洋沖地震の余効変動からこれらを分離することは困難である。

2015年から発生した地殻変動の残差の主な特徴は以下のとおりである。第1に, 2015年1月以前はほぼ変化はなく平坦であり, 式(1)の関数モデルが十分機能していること, 第2に, 2月の2015年三陸沖地震, 5月の2015年宮城沖地震及び2016年1月14日の浦河沖地震(M6.7)(以下「2016年浦河沖地震」という。)の地震時の変動がそれぞれの地震の近傍の観測点に現れていること, 第3に, 2015年2月か

ら7月の間に一定のトレンドをもった, 直線的な変動(図-4のピンク色の領域)が広域に含まれていること, 第4に, 2016年2月以降は式(4)の $vt$ で表される変動に落ち着いていることである。これらのうち, この期間内に特有の変動は第2の地震時の変動と第3の2月から7月の期間に続いた変動である。図-4a, 4cのように, 余震の震源のごく近傍では第2の地震時の変動が大きいが, 大部分の場所では第3の2月~7月のゆるやかな変動が目立つ。このうち, 第3の変動はこの時期に発生した2月と5月の地震時の変動と余効変動を含んでいる。余効変動は大きくとも数mmと小さく, 継続時間も不明瞭のため, これらの地震の影響を分離できず, これらの地震に伴う変動は一体として取り扱うことにする。したがって, 7月にみられる変位速度の変化は余震の影響の重量による見かけ上のものの可能性はあるものの, 7月以降の等速度成分(式(4)の $v$ )の存在は確実であろう。

この2種類(第2と第3)の変動によるトータルの変位量を, 式(4)の2015年7月1日( $t_1$ )の値から式(3)の2015年2月16日( $t_0-1$ )の値の差として求めた。この量は図-4で2015年7月に描かれている矢印付き破線の量であり, 本研究では“2015年のギャップ”と呼ぶことにする。2016年浦河沖地震による変動は2016年1月に発生しており厳密には2015年内に発生していないが, 後述するように式(4)の $v$ 項の発生との関連が深く, また, 2016年浦河沖地震の影響を受ける北部の観測点では $v$ の値が小さいために余震による変動が発生した時期が異なることによるギャップ量の誤差は小さい。したがって, これらを一連の2015年のギャップに含めて議論することにする。

以上のことから, 式(4)のうち, 2015年からの新たな成分は次式のように記述できる。

$$c'+vt=gap_{2015}+v(t-t_1) \quad (t \geq t_1), \quad (5)$$

ここで,  $gap_{2015}$ は2015年のギャップ量であり, この式は $t_1$ 以降に適用する。なお, 2015年から2016年にかけての変動は単純に関数モデル化できないため, 便宜的な処置として, 関数上では2015年のギャップは2015年2月16日から7月1日の間に発生したものとし, 2015年2月~7月( $t_0 \leq t < t_1$ )の間は段差ができないように式(3)と(4)を直線でつなぐこととする。このため, 改良関数モデルを使用する際は, 2015年2月~2016年1月の期間に不連続が含まれることに注意が必要である。

上記第3の一様な変化の始まりの日時は, GNSSの日々の観測値にばらつきがあるために厳密には確定できないが, 図-4に示されるように2015年2月17日の2015年三陸沖地震とほぼ同時のようである。このことは三陸沖において2015年2月に超低周波地震(VLFE)やスロースリップ(SSE)が発生していた(Baba et al., 2020; Honsho et al., 2019)ことと整

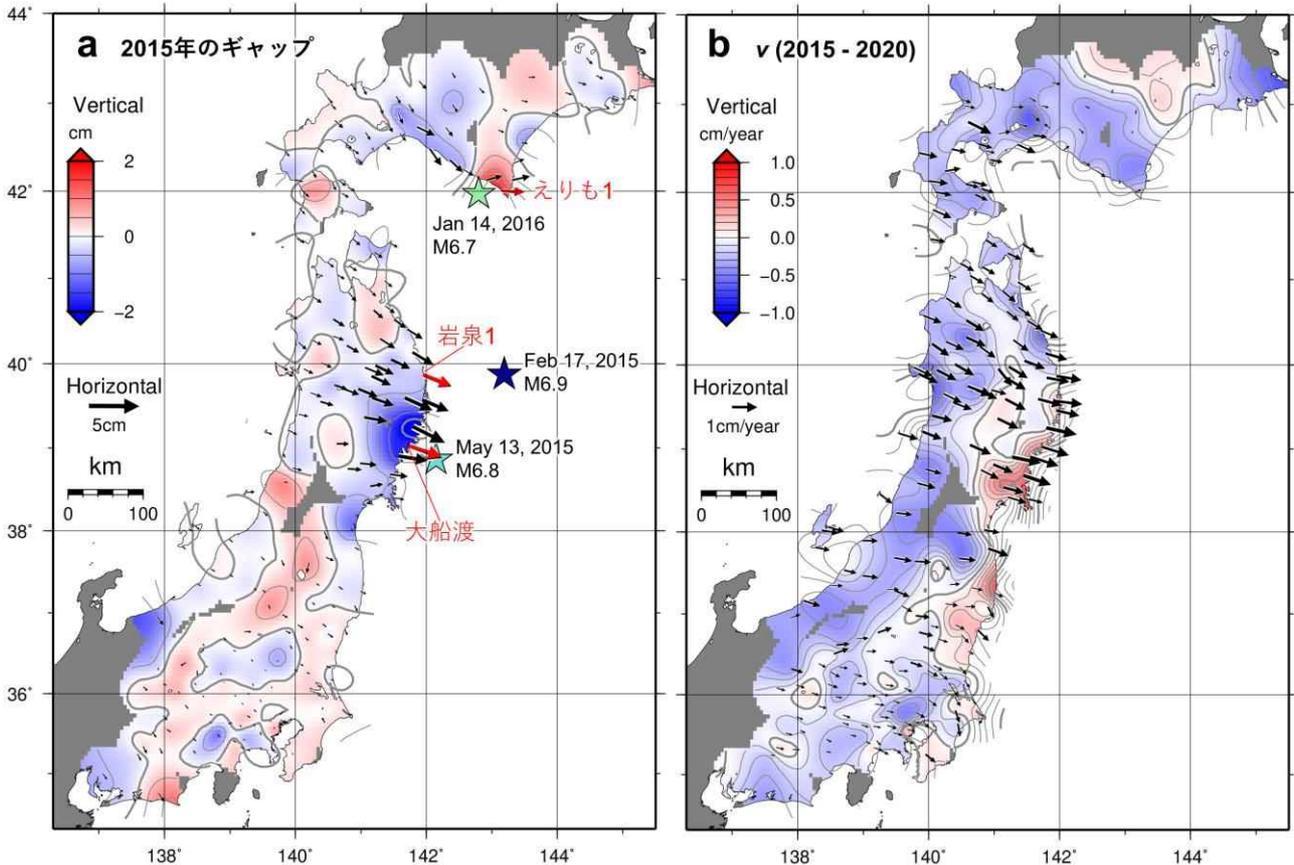


図-5 2015年のギャップと2015年から継続している定常速度項の空間分布

a  $gap_{2015}$  の量の分布。赤：図-4の電子基準点。星印：2015年に余効変動時系列に影響を与えた余震の震央。  
b 2015年に新たに発生し、その後の継続している定常速度項 ( $v_t$ ) の分布。

合的であり、2015年三陸沖地震は一連の現象のトリガーとなった可能性がある。

ここで式(4)の妥当性を検証するために、図-5aに  $gap_{2015}$ 、図-5bに  $v$  の空間分布図をそれぞれ示す。図-5では、ベクトル分布は各点の値について平滑化等を行わずに描いており、各成分とも隣接点との値の差は1cm以下である。なお、電子基準点のF5解のばらつき(標準偏差)は点にもよるが図-3や4からも分かるように数mm程度であり、図-5は十分な精度を持っている。図-5aでは、近傍で発生した3つの余震の影響が目立つ。図-5bでは北海道から中部地方にかけての広域に様な変動が広がっているのが分かる。各観測点の各成分に  $v_t$  という直線を個別に当てはめることは、各観測点特有のローカルな現象等に過剰に合わせ込んでしまう可能性がある。しかしながら、図-5bからは、 $v$  が空間的にスムーズに分布しており、広域で系統的に発生している物理現象を捉えていると考えられ、式(4)の仮定が妥当であることの傍証となる。

図-6に式(3)及び(4)に基づいた4つの電子基準点(図-2と同じ点)の変化グラフを示す。ここまでの結果を踏まえて、全体の緩和時定数は3.9年モデル

の値を用い、2015年7月以降に直線的な変動である  $v_t$  を追加するものである。グラフとして各項の初期値はそれぞれゼロから始まるように描いており、指数項(式(3)及び(4)の第4項)には定数を足して表示している。各観測点での地殻変動の時間変化パターンは同じではなく、それぞれの地域での固有の変化パターンを示しているものの、どの観測点のどの成分においても式(4)による改良関数モデルと非常に一致を示している。全観測点(約220点)での総合的な標準偏差は2020年12月までで東西、南北成分で3mm以下(水平成分で4mm以下)、上下成分でも8mm以下と、極めて良好な数値を示している。

図-6には最終的なトータルな関数モデル値に加えて、短期対数項、長期対数項、指数項及び2つの定常速度項の各成分も同時に示している。観測点や成分によって異なるものの、水平成分は各項がほぼよく混合しており、上下は長期をもつ指数項が卓越していることが分かる。

注目すべき点は、Tobita (2016) が予測したように、矢本付近(本報告では図-6の志津川)の上下変位は地震前の標高にほぼ戻ったものの、引き続き隆起の

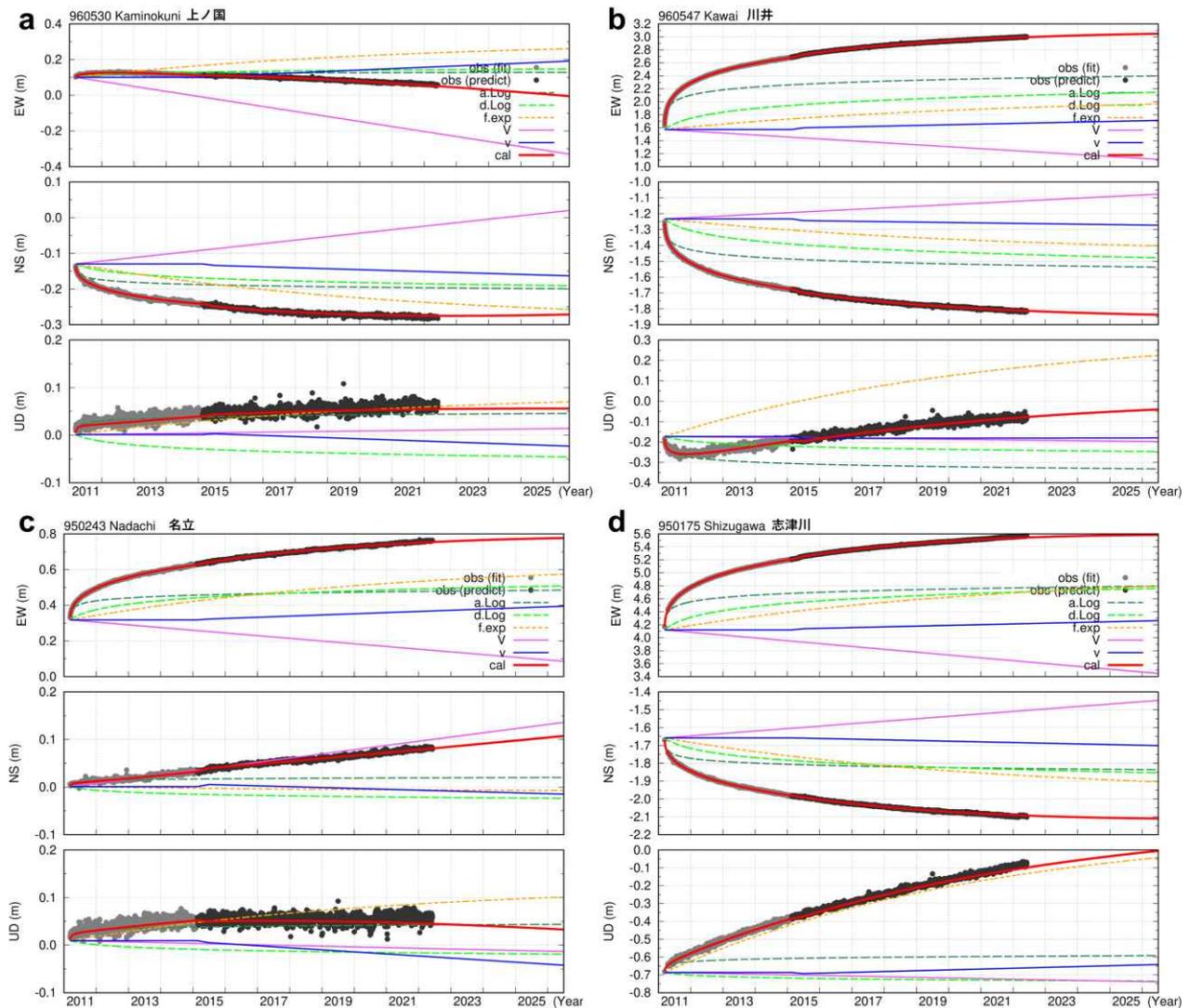


図-6 余効変動の観測値、予測値及び予測値の各成分の時系列

**a** 上ノ国, **b** 川井, **c** 名立, **d** 志津川の各電子基準点 (場所は図-1) における東西 (EW), 南北 (NS) 及び上下 (UD) の各成分. 灰色の点: 3.9年モデルの近似期間に使用された毎日の観測値. 黒い点: 予測期間中の毎日の観測値. 赤い線: 式(3)及び(4)に基づいて予測された値. 他の線: 関数モデルの各項の予測値 (本文参照).

傾向が大きく, 地震後 10 年が経過しても地震前のトレンド (各式の  $V_t$  項) に戻っていないことである. 図-6 には近い将来の外挿による予測も示しており, さらに何年か経過しても地震前のトレンドに戻るとは予測されていない.

### 3.2 空間関数

各緩和時定数を決定したので, 次に式(2)での空間関数となる各項の空間分布を見つめる. 図-7 及び 8 に地震 3 年後 (2014 年 3 月 11 日) 時点での, 短期対数項, 長期対数項, 指数項及び定常速度項 ( $V_t$ ) の分布を示す. この時点では  $v$  項はゼロであり, 2015 年以降の  $v$  項は図-5b に描かれている. なお, 図-7 と同様に地震 5 年後を描くと, 短期対数項, 長期対数項, 指数項, 定常速度項が, それぞれ地震 3 年後に

対して 1.08 倍, 1.22 倍, 1.52 倍, 1.67 倍となり, より長期の項の寄与が大きくなる.

どの項においても空間分布はランダムではなく, 系統的な空間的広がりを示している. 空間波長は緩和時定数が短期のものほど短くなっており, 短いもので数 10km であるが, 大まかには 100km 程度の空間波長であろう. 空間関数は数式としての関数では簡単には表現できないものの, 各成分とも空間的に短波長の変化はほとんどないために, データがない点であっても, 線形等の簡単な空間補間でグリッド化した空間関数を得ることができる.

こうした空間分布は, 地下の物理現象とその分布によって生じており, それぞれが緩和時定数の異なった時間関数によって分離されていることから, 地

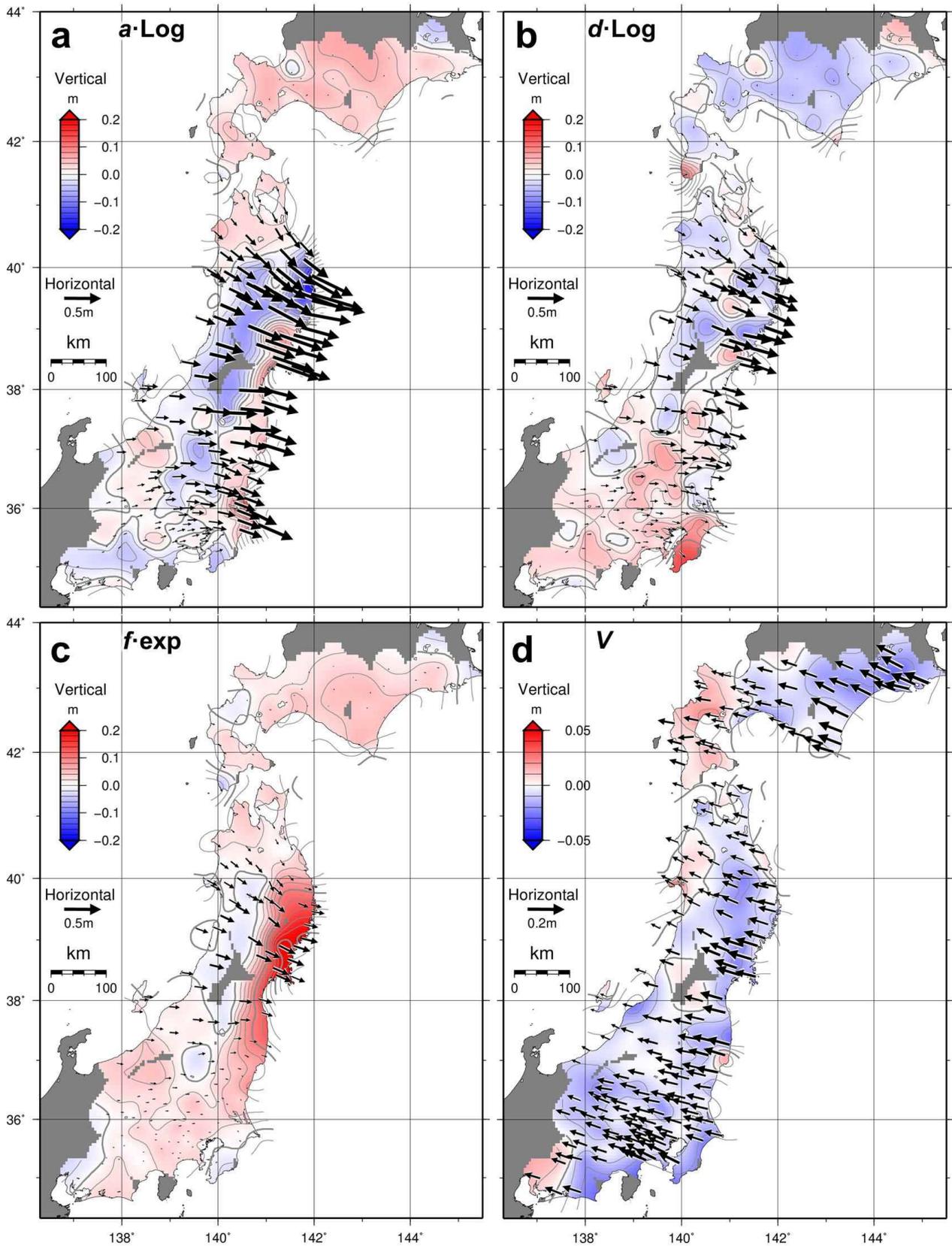


図-7 地震後3年における予測値各項の空間分布  
**a** 短期対数項, **b** 長期対数項, **c** 指数項, **d** 定常速度項. 各成分とも, 地震発生直後をゼロとしたときの地震後3年時(2014年3月11日)の積算値.

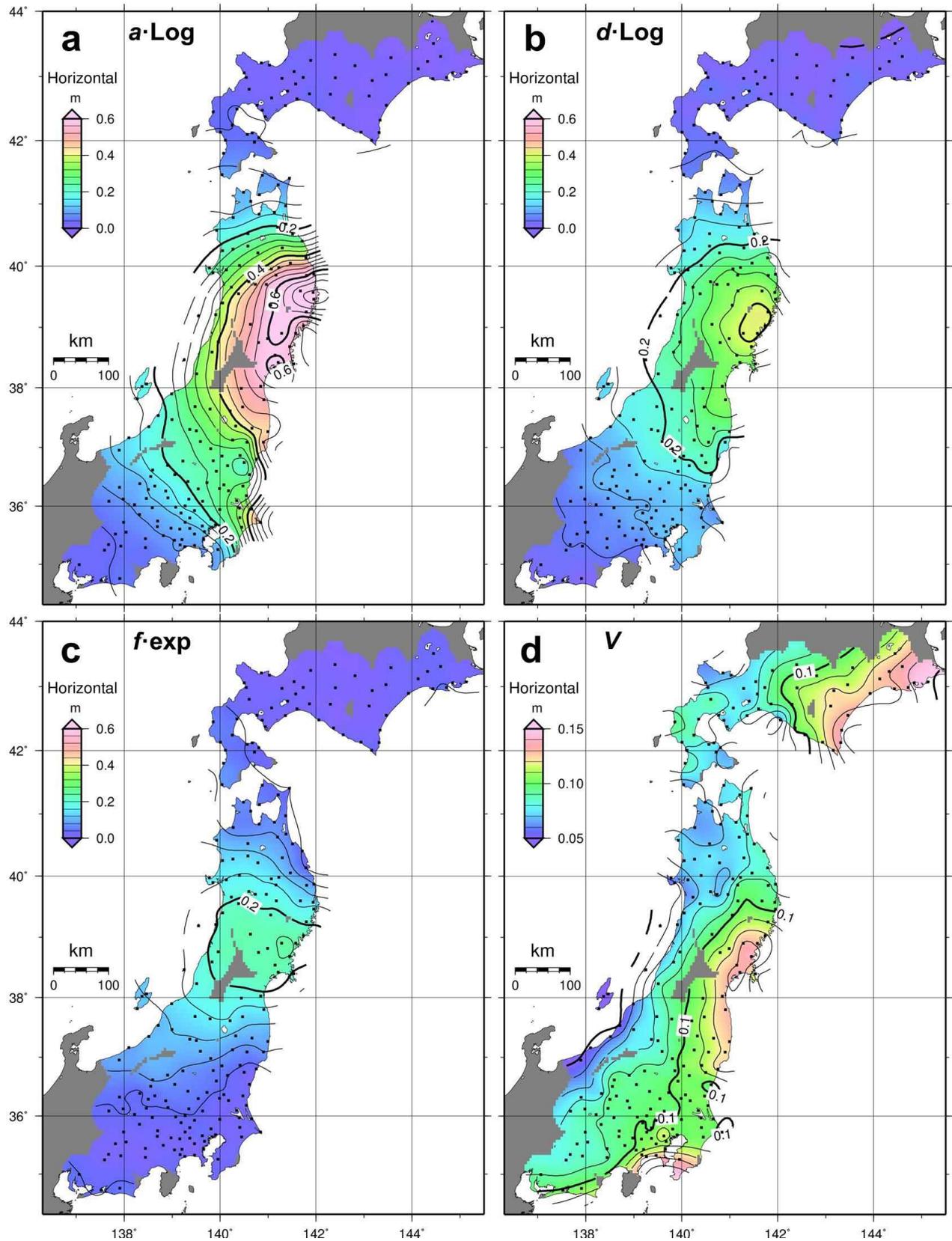


図-8 地震後3年における予測値各項の水平成分の大きさの空間分布  
 a 短期対数項, b 長期対数項, c 指数項, d 定常速度項. 各成分とも, 地震発生直後をゼロとしたときの地震後3年時(2014年3月11日)の積算値.

震の余効変動が時間と地下の場所にそれぞれ関連をもった現象によって引き起こされていることを示唆するものである。例えば、図-7aの短期対数項は他の成分に比べると、空間分布が複雑であり、より浅くて狭い範囲で発生している現象の影響を受けていると考えられる。

#### 4. 議論

##### 4.1 同一の緩和時定数を使うことの有効性

緩和時定数を全ての観測点、全ての成分で同一としていることの是非を検証するため、ここでは、2.0年と3.9年の異なる近似期間に対する緩和時定数(表-1)が異なる値をもっていることを利用する。

Tobita (2016) の手法では、緩和時定数 ( $b, e, g$ ) を非線形最小二乗法であらかじめ求める期間と、その結果求められた緩和時定数を用いて観測点ごとの空間関数である係数 ( $a, c, d, f$ ) を線形最小二乗法で求める期間は同一である。そこで、2.0年と3.9年の近似期間から求めた異なる緩和時定数(表-1)を使って、それぞれ3.9年の期間で点ごとの係数(空間関数)を求めた。そして、この異なる緩和時定数による時系列の差について、図-1に示された観測点において地震後15年間の標準偏差を求めると、東西、南北、上下成分がそれぞれ、0.19, 0.13, 0.30 cm となった。つまり、点ごとの係数を求める期間が同じであれば、異なる緩和時定数の影響は十分小さいことが分かった。

緩和時定数が変わることによって空間関数も変わる。ここで緩和時定数を変えたもの(3.9年から2.0年)について、各項ごとの空間関数の比を各観測点で求め、そのヒストグラムを図-9に示した。各空間関数は、ランダムであったり地域ごとに変化したりしたのではなく、短期対数項、長期対数項、そして指数項がそれぞれ0.87, 1.05, 1.17倍とほぼ一定の割合で一義的に変化したことが分かった。つまり、緩和時定数が変わることで、空間関数 ( $a, d, f$ ) の間の配分が全観測点において一定の割合で変化した。2.0年のほうが3.9年のものに比べていずれの緩和時定数についても短期で、全体の関数モデルとしての値を同じに保とうとするため、長期の時間関数に対応する空間関数ほど大きくなっている。表-1に示したように、それぞれの緩和時定数(数日、数十日、数千日)が大きく異なっていることから、各項の緩和時定数が多少変わったとしても、これらの緩和時定数に応じた空間関数側の配分が変わって、全体の関数モデル値が変わらないようにする作用であると考えられる。したがって、個別の観測点で異なる緩和時定数の成分が含まれているとしても、全体を統一の緩和時定数の関数で近似できることの理由ともなっている。

ここで分かったことは以下の2つである。(1) 緩和時定数が増えると、短期対数項、長期対数項及び指数項の配分は全観測点で一定の割合で変化し、トータルの関数モデルとしての変化を吸収する。つ

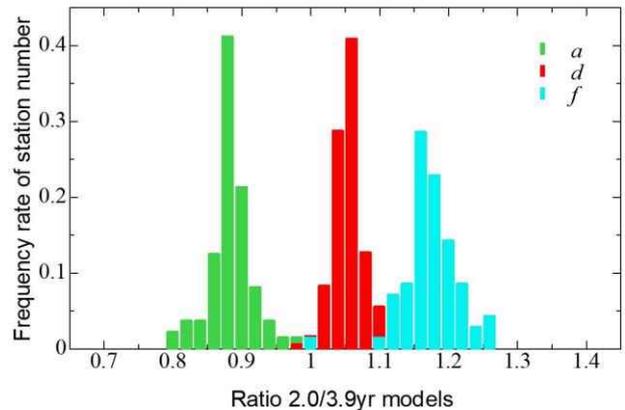


図-9 緩和時定数を変化させたときの空間関数の変化率

緩和時定数を3.9年モデルから2.0年モデルに変えたときの各観測点における空間関数の変化比のヒストグラム。緑：短期対数項 ( $a$ )、赤：長期対数項 ( $d$ )、青：指数項 ( $f$ )。

まり、緩和時定数と各項の係数である空間関数が強い相関(トレードオフ)を持っていることを表している。(2) 前項の結果、緩和時定数が最適解から少しずれても空間関数を変えることで総合的な予測精度を十分保つことができる。

観測点ごとに緩和時定数が異なると考えられるにも関わらず、同一の緩和時定数を使っても各空間関数が増えることで関数全体としては点ごとの時系列によく適合しうることが分かった。このことは、緩和時定数が同一であるべきことを示すものではないことに注意が必要である。しかし、余効変動を簡便な手法で近似する手段として同一の緩和時定数を各観測点・成分に用いることが十分有効であることを示すものである。

Tobita (2016) は一つの対数関数が別々の緩和時定数を持つ複数の対数関数や指数関数の和をよく近似することを示しており、そもそも一つの関数項が複数の別の関数の和であり得る。つまり、予測モデルの対数による各項自体がすでに複数の物理現象の和を表していると考えられる。このことから、余効変動の時系列が各関数に分離できたからといっても、それぞれの関数が特定かつ個別の物理現象を表しているとは限らないことには注意すべきである。緩和現象を近似する対数関数は万能がゆえに要注意といえよう。

##### 4.2 関数モデルと物理モデルの比較

大地震の余効変動は大別して余効すべりと粘弾性緩和によって引き起こされる。本研究の時空間モデルは、異なる緩和時定数の時間関数によって  $V_t$  項も含めると4つに分割されており、その空間分布(図-7及び8)もスムーズに広がっているために、各関数項がなんらかの物理メカニズムと関連することを示唆しており、各関数項と物理モデルとの空間分布

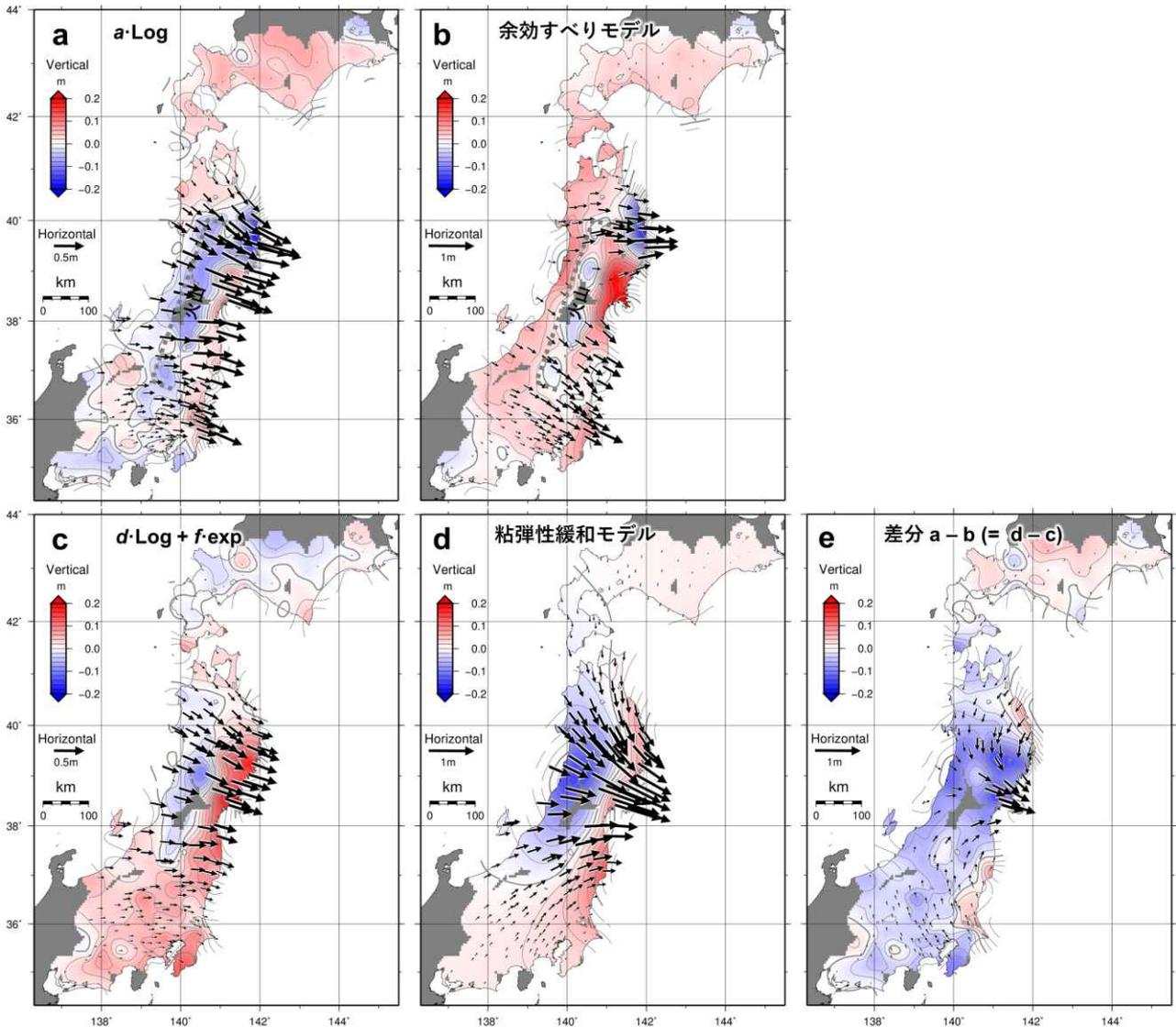


図-10 関数モデルと物理モデルの空間分布の比較

a 関数モデルの短期対数項. b 物理モデルに基づく余効すべり成分. c 関数モデルの長期対数項と指数項の和. d 物理モデルの粘弾性緩和成分. 各成分とも、地震発生直後をゼロとしたときの地震後3年時(2014年3月11日)の積算値. e aとbの差(dとcの差に同じ). 物理モデルはSuito(2017)による.

の比較を行う.

Suito(2017)は2011年東北地方太平洋沖地震の余効変動について、有限要素法を用いた3次元の粘弾性緩和モデルを構築している. 図-10a及び10bに、地震後3年にあたる2014年3月11日までの短期対数項とSuito(2017)に基づく余効すべり成分をそれぞれ示す. ここで、式(1)に表されるように、観測される地殻変動成分には余効すべり、粘弾性緩和及び定常速度項が含まれていると仮定し、物理モデルによる余効すべり成分とは、観測値から定常速度項 $V_t$ と粘弾性緩和モデル成分を差し引いたものである.

図-10a及び10bでは、宮古周辺の東向き成分及び沈降成分、銚子周辺の南東向き成分及び隆起成分が定性的にも定量的にも関数モデルと物理モデルがよく一致している. このように、両者は多くの場所で

良い一致を示しているものの、矢本周辺では関数モデルが大きな東成分を持っているにもかかわらず、物理モデルではほとんど水平成分がゼロである点が大きな違いである.

なお、東北地方の中央部分で北緯37度から40度の間にかけて北北東—南南西方向に数百kmにわたって列状の沈降成分が両者に一致して存在している. これは、地震後の火山の沈降(Takada & Fukushima, 2013)によるものと考えられ、物理モデルのほうは観測値からの差分で表現されているために、元来の観測値に含まれているものが現れているものであって、モデル化されているものではない.

時間関数の残りの長期対数項と指数項の二つについては、両者とも単独ではSuito(2017)の物理モデルとの関連はみられなかったが、この両者を足し合

わせたものと粘弾性緩和モデルを図-10c 及び 10d にそれぞれ示す。水平成分が全体的に東向きで、北側では南向き、南側では北向きの成分を持つこと、そして上下成分では、太平洋岸で隆起、日本海沿岸で沈降となることは両者で一致する。しかしながら、図-10a 及び 10b とは逆に、矢本周辺では物理モデルが大きな東向き成分を持っていることが大きく異なる。図-10e に、図-10d と 10c の差を描いてあり、明らかに矢本周辺の差が局所的に大きい。

関数モデルと物理モデルの違いの原因は、粘弾性緩和で実際に生じている現象が矢本周辺において他の地域に比べてより短期の緩和時定数を持っていて、主に余効すべり成分と考えられる関数モデルの短期対数項に漏れ込むことで生じたと考えると自然である。この点は前節で指摘した、一つの関数項が複数の物理現象の和であることの一例といえる。

この過程は以下のように説明できる。2011年東北地方太平洋沖地震の本震の地震時のすべり域は、矢本の沖合に存在し、ちょうど矢本近くまですべり域が伸びている (Ozawa et al., 2012, 後述の図-12a 参照)。したがって、本震後はこの周辺では余効すべりは小さい。この地域では、プレート境界面は陸地に近いために深くなり (図-1)、陸上で観測される余効変動は、より下側の海洋マントル内での粘弾性緩和の影響が小さくなり、上側の陸側のマントルウエッジ (沈み込むプレートと上側のプレートにはさまれたくさび型の領域) で生じる粘弾性緩和の影響が大きくなる。Suito (2017) によれば、陸側観測点の真下にあたるマントルウエッジの粘弾性は海洋マントルの 1/5 程度とされている。粘弾性が低ければ流動性が高まることでより短期で粘弾性緩和が進み、矢本周辺にこの影響が現れたと考えられる。

図-10 の水平成分には上述の関数モデルと物理モデルに明確な違いが見られているものの、上下成分には大きな違いは見いだせない。図-6 からは、上下成分は長期の指数項の寄与が大きいことが分かる。上下成分においてより長期項の寄与が大きくなるように物理モデルを改良することでモデルの精度向上へ貢献できるであろう。また、何百年もの長期にわたる上下変化を議論するにはこうした長期の粘弾性緩和の影響の考慮が必須であることが分かる。

ここで、粘弾性緩和モデルが関数モデルでは長期対数項と指数項の和になった理由を考察してみる。長期対数項に比べると指数項は緩和時定数が 20 倍以上長い (表-1)。したがって、粘弾性緩和を引き起こしている現象の緩和時定数は長いものから短いものまで非常に幅広いと考えられる。関数モデルと物理モデルが合わない理由としては、両モデルが現象をそれぞれ単純化していることに由来するものが当然存在するものの、時系列への他成分の混入のように、一つの物理現象が複数の時間関数に分かれたり、逆に複数の物理現象が一つの時間関数に含まれたりすることによる。この違いをうまく活かして両方を

組み合わせることによってより、例えば緩和時定数に応じた物理モデルを構築することで、地下の物性の違いを取り入れてより高度なモデル化につながるであろう。

#### 4.3 プレート境界面上のすべりモデルの推定

次に、これまでに見てきた地表の各変位が地下のどこでどれだけの現象として生じてきたのかを観測データからインバージョンによるモデル・シミュレーションを用いて調べてみる。なお、ここでの議論には二つの制限事項が存在する。第1の制限事項は、粘弾性緩和のモデル化が困難な点である。プレート境界面上のすべりであれば、すべりの場所はプレート境界面上に固定されるばかりか、すべりの向きをプレート沈み込みの方向からある程度拘束してモデル・シミュレーションすることが可能である。これに対して、粘弾性緩和については、場所がマントル内と3次的に広く存在するとともに、場所ごとの動きの向きが複雑であり、モデルとして単純化することが困難なことである。したがって、ここでは、主にプレート境界面上のすべりとして考えられる現象について取り扱うことにする。第2の制限事項は、我々の使っているデータが陸側にしかなく、海側のデータ (海底地殻変動) を使わずにモデルを構築しようとしているために、陸から遠く離れた沖合の余効すべりは陸上のデータだけでは推定できず、すべり域が陸から離れるにしたがってモデルの確実性が下がることである。したがって、太平洋側の沖合 (東側) になるほどプレート境界面上のすべりとして求められたものは厳密なものではなく、詳細な議論には適していないことである。

モデル・シミュレーションにはマルコフ連鎖モンテカルロ法 (MCMC 法) を用いた。この手法では事後確率分布に従う解 (サンプル) を多数生成させることで、知りたい結果の確率分布を効率的に得る手法である。残差を最小にする解ではなく、与えられた誤差の範囲内で観測値を説明し得る解の集合を確率的に得ることができる。すべり方向はプレート収束の反対方向に拘束し、地下の媒質として半無限弾性体を仮定している。図-11a は地震後3年時における短期対数項 (図-7a) を生じさせる原動力としてプレート境界面上のすべりとしてモデル化したものである。前述の議論のとおり、この成分にはマントルウエッジの粘弾性緩和で生じている変動も含まれていると考えられる。この3年間でのこの項のモーメント・マグニチュードは Mw8.3 になる。

図-11b は式(5)における 2015 年のギャップ  $gap_{2015}$  (図-5a)、図-11c は 2015 年7月以降の定常速度  $v$  (図-5b) を生じさせる原動力としてそれぞれプレート境界面上のすべりモデルとして求めたものである。図中の  $B$  から  $E$  の記号は図-11c にみられる特徴的な変動の場所を示したものである。図-11 の3つとも前述の2つの制限事項に由来する誤差が含まれるが、

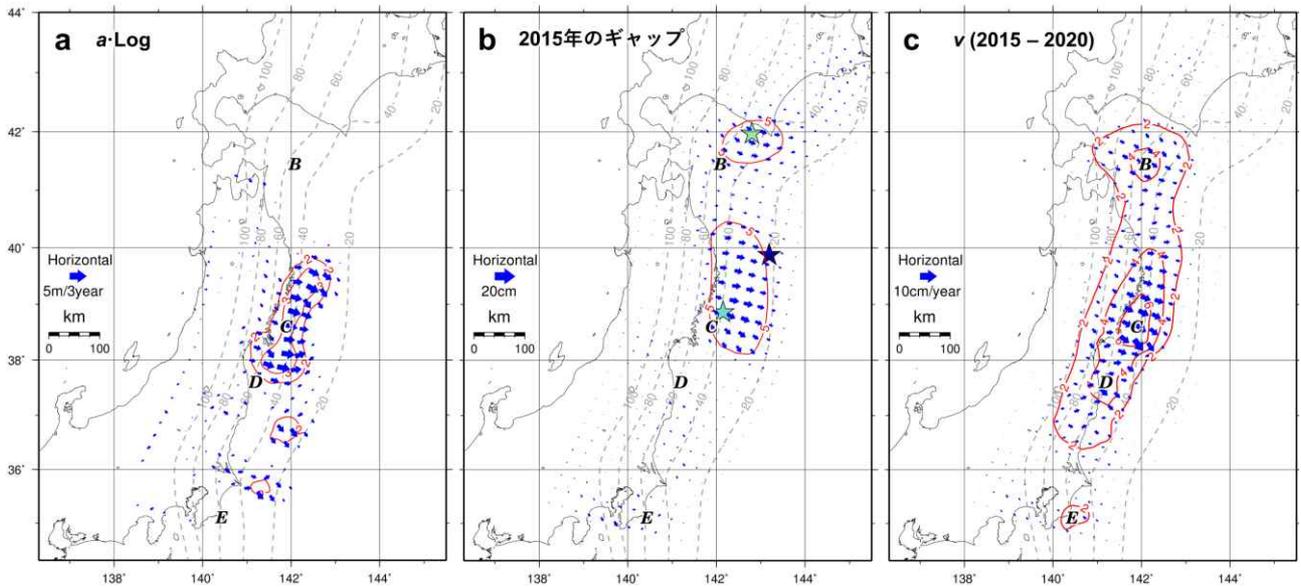


図-11 プレート境界面上のすべり成分モデル

**a** 地震後3年間の短期対数項の空間分布を説明するプレート境界面上のすべりモデル. **b**  $gap_{2015}$  の空間分布を説明するプレート境界面上のすべりモデル. **c** 2015年以降に発生した定常速度項  $vt$  の空間分布を説明するプレート境界面上のすべりモデル (1年あたり). 領域  $B$  から  $E$  は **c** で特徴的な変位を示している場所を表す.

いずれも同じ条件の下でデータを解析しているため、これらの相互比較には意味がある。例えば、図-11aでは11bと11cに比べて $B$ の場所ですべりがなかったこと、11bでは $C$ の北東側にすべりの広がりが存在したことは定性的ではあるが意味がある。

なお、長期対数項や指数項についてもプレート境界面上のすべりとして計算することは可能であるが、前述のように余効すべりではなく粘弾性緩和成分が主体であるのでここでは取り上げない。

#### 4.4 2015年のギャップ

図-11bは、2015年のギャップを説明するプレート境界面上のすべりモデルである。2015年のギャップは、地震直後からの余効変動とは別に、2015年2月~2016年1月頃に発生した特異なすべりであり、3つの $M6$ 後半の地震による地震時及びそれらの余効変動が含まれている。図-11bからは、これらの変動の源となった領域は大きく2か所に分けられる。宮城沖( $C$ )については、2月の2015年三陸沖地震及び5月の2015年宮城沖地震の発生と関連している。北側の浦河沖( $B$ )についても2016年1月の2016年浦河沖地震の震源域に場所が一致する。

すべりのモーメント・マグニチュードを求めてみると、浦河沖では $Mw7.0$ 、三陸沖~宮城沖で $Mw7.3$ となり、各本震と余効変動だけではモーメント・マグニチュードを説明できず、また、その時間変化(図-4)からも通常地震の発生及び余効変動による地殻変動だけではなく、ずるずるとした大きな動きが発生していた。

3つの地震の発震機構は、プレート運動方向に圧縮軸をもつ逆断層型であり、太平洋プレートと大陸

プレートの境界で発生している。2015年三陸沖地震が2015年のギャップのトリガーだったのか、地震自体がなんらかの別の現象に誘発されたか、のいずれかについての直接の証拠は見いだされていない。しかし、前述したように2015年三陸沖地震によって周辺のVLFEが誘発されていることと、同時期に三陸沖でSSEが発生していることから、2015年のギャップもこの地震に深く関連していると考えることができる。いずれにせよ、すべりの場所・すべりの向きと変動の時期からは、3つの地震と2月から始まった新たなすべりに関連があるために、2015年のギャップとして一体として取り扱う。

#### 4.5 2015年以降の新たな定常すべり

観測値と式(1)に基づく関数モデルとの残差(図-3)に含まれる直線的な成分は、2015年に北海道から中部地方に至るまでの広域で同時に発生し、ほぼ一定速度で継続し、式(4)では $vt$ として表現されている。この成分の発生原因を探るため、プレート境界面上のすべりモデルとして求めたのが図-11cで、大きい場所で年間数cmのすべりとして求められた。この成分がプレート境界面上でのみ発生したのではなく、上部マントル内の粘弾性緩和で発生したものが漏れ込んできている可能性があるため、プレート境界面上のすべりを厳密にモデル化したものではない。しかしながら、図-3に示されている2015年以降の時間変化は定常的な速度で進んでおり、また、地震から数年後かつ震源から遠い浦河沖でも変動が観測されているため、全てが粘弾性緩和としては考えにくい。したがって広範囲でプレート境界面上の一定のすべりが継続している可能性が高いであろう。

この新たなすべりの発生場所は、プレート境界面上において、宮城沖(C)~福島沖(D)と浦河沖(B)の2か所に大別できる。宮城沖~福島沖では、2011年東北沖地震直後からの余効すべり域(図-11a)及びgap<sub>2015</sub>の原因となるすべり域(図-11b)の深い側に広がって一定速度のすべりとして発生したと考えられる。これに対して、浦河沖では2015年までには目立ったすべりは発生しておらず、2015年以降に新たに付け加わったものである。なお、2015年から2020年までのB領域とC及びD領域でのすべりをモーメント・マグニチュードを積算するとそれぞれMw7.4, 7.8となる。

次に、2015年以降の新たな定常速度項 $v_t$ (図-5a)と2011年以前から存在する定常速度項 $V_t$ (図-7d)との関係を見てみる。これらの $v$ と $V$ はほぼ逆向きであり、その大きさの比は、大きくても0.4程度である。どちらもほぼ定常の速度を持っていることから、 $V$ がプレート間の固着によって生じていたとすれば、2015年にその固着が緩んで $V$ が減少した量が $v$ にあたりと考えることもできる。

現時点では、2015年に $v$ の発生のトリガーとなった大きなイベント(大規模な地震等)も見いだせていない。2015年三陸沖地震は時期としては一致するものの、地震の規模としてはそれほど大きいものではない。もし仮に大きなイベントがあれば、その副次的な余効変動が時間につれて減少する形で発生するはずであり、 $v$ のように一定速度となるとは考えにくい。2015年に大きなイベントもなく、プレート間の定常的なすべりが、別の安定する定常状態に「静かに」転換したと考えるのが自然であろう。

「新たな定常状態」といっても、現時点では約7年間の継続が観測されたのみであり、定常状態なのではなく、極めて長い時定数をもつSSEであるという仮定も成り立つ。しかしながら、日本海溝付近では短期の浅いSSEはたびたび観測されているが、長期のSSEはほとんど観測されていない。そのすべり域の広さや時定数の長さからもSSEである可能性は低いであろう。

このように大きなイベントもなく静かに始まり継続しているこの現象の原因は不明である。ここでは、3つの仮説を挙げておく。第1の仮説は、この現象の定常さを考慮すると、2011年よりずっと前の「本来」の地殻変動の姿に戻ったというものである。つまり、2011年東北地方太平洋沖地震以前の定常速度 $V$ 自体が異常であって、地震の発生によってしばらくしてから2015年に状態が回復して元に戻ったという仮説である。第2の仮説は、2015年以降に発生した余震の影響である。前述したように地震時の大きなステップ状変化は取り除いているが、必ずしも全ての余震についてはないし、震源からある程度離れた場所ではこの操作は行われていない。また、余震自体の余効変動は考慮されていない。数多くの余震が広域で発生していることから、これらの変位

の総和が見かけ上定常速度として現れている可能性がある。第3の仮説は、短期対数項で表現されている余効すべりよりはるかに長い時定数を持つ余効すべりの発生である。図-11aと図-11cを比べると、図-11cのほうがプレート境界面の深い側に広がっており、全体の余効変動が小さくなっている中で長期の余効すべりが顕在化したという可能性である。

これらの仮説の検証にはさらなる観測や解析が必要であり、今後の余効変動の時間変化とその空間分布の継続的な監視が重要である。

#### 4.6 プレート境界面上のすべり域の変遷

図-11を元に、2011年以前から2020年に至るまでのプレート境界面上のすべり域の場所の変遷を一連で示したのが図-12である。図-12a, 12b, 12d及び12eの各図には期間ごとに前後する現象を二つずつ同時に描いてある。

図-12aは2011年以前からの定常速度 $V$ のプレート境界面上のすべりモデル(図-11と同様に計算。塗りつぶし域は10cm/年以上)と2011年東北地方太平洋沖地震のプレート境界面上のすべりモデル(Ozawa et al., 2012, 等すべり量線は10m以上)を示す。定常速度項 $V_t$ はプレート境界面上のすべりではなく、プレート境界面の固着として陸側プレートが押されていることによって発生しているので、この図では定性的に固着の強かった場所のおおまかな分布を表していると考えたほうがよい。2011年以前の固着の強かったプレート境界面の浅い側で2011年東北地方太平洋沖地震は発生している。

図-12bは2011年東北地方太平洋沖地震のプレート境界面上のすべりモデル(塗りつぶし域は10m以上)と、主に余効すべりと考えられる地震後3年間の短期対数項のプレート境界面上のすべりモデル(図-11a, 等すべり量線は2m以上)を描いてある。2011年東北地方太平洋沖地震の震源域の深い側に隣接して余効すべりが発生している。しかしながら、物理モデルとの比較から分かったように、このすべり分布には短期の粘弾性緩和が含まれていることに注意が必要である。

図-12dは余効すべりが継続している中で発生したgap<sub>2015</sub>のプレート境界面上のすべりモデル(図-11b, 等すべり量線は5cm以上)を示している。余効すべり域と一部重なりながらも余効すべり域の北東側でこのすべりが発生している。また、余効すべりとは離れた場所にある浦河沖(B)においてもgap<sub>2015</sub>が発生している。一連のgap<sub>2015</sub>を時系列で考えると、2015年三陸沖地震(図-12dのEQ2)の発生とほぼ同時にこの付近で2015年2月頃にVLFEやSSEが発生、全体に変位が進行し、5月のEQ3(2015年宮城沖地震)の発生、7月以降の新たな定常速度 $v$ の発生、そして翌年1月のEQ1(2016年浦河沖地震)の発生と続く。なお、浦河沖(B)の変動について、EQ1は2016年になってから発生しているものの、近傍の電子基準点えりも1の変位(図-4a)からは、2015年

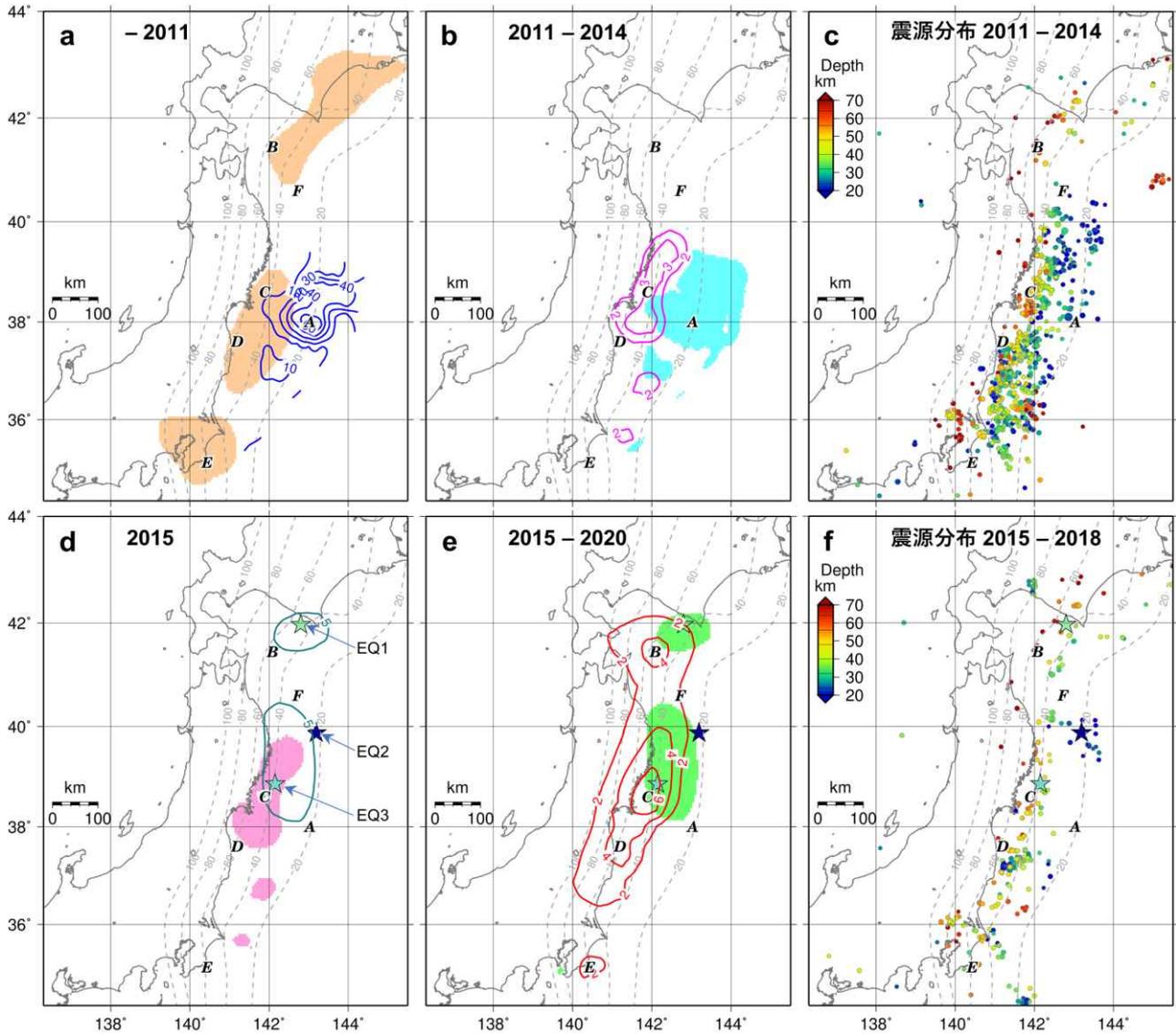


図-12 プレート境界面上のすべり域の時間変化

**a** 茶色塗りつぶし：2011年以前からの定常速度項  $V_t$  によるプレート境界面上のすべりモデル（10cm/年以上）。青等値線：2011年東北地方太平洋沖地震の地震時すべり分布（Ozawa et al. 2012, 10 m 以上）。

**b** 水色塗りつぶし：地震時すべり（10m 以上）。ピンク色等値線：地震後3年間の短期対数項（2m 以上）。

**c** 2011年から2014年までの震源分布図（2011年東北地方太平洋沖地震が発生した時期を含む。15km 以深,  $M > 4.5$ ）

**d** ピンク色塗りつぶし：地震後3年間の短期対数項（2m 以上）。緑色等値線： $gap_{2015}$  によるプレート境界面上のすべりモデル（ $> 5$  cm）。星印：EQ1, EQ2, EQ3 は、2016年浦河沖地震（ $M6.7$ ）、2015年三陸沖地震（ $M6.9$ ）、2015年宮城県沖地震（ $M6.8$ ）の震央。

**e** 緑色塗りつぶし： $gap_{2015}$  によるプレート境界面上のすべりモデル（5cm 以上）。赤色等値線：2015年以降の線形変形によるプレート境界面上のすべりモデル（2cm/年以上）。

**f** 2015年から2018年までの震源分布図（15km 以深,  $M > 4.5$ ）。星印：**d** と同じ。

領域 A は本震で最大変位が発生したと推定される位置を表し, B から E は, **e** での特徴的な変位の領域を表す。F はいずれの図でも変位が小さい領域を表す。

2月頃にゆっくりとした変動がわずかながらも開始している。こうしてみても、EQ1, 2及び3は一連の現象に関連していると考えられる。こうした新たなすべり域については、本研究で得られた余効変動の関数モデルからの残差を取ることによってはじめて新しく発見された現象である。

図-12eは、2015年に発生し、その後継続している定常速度 $v$ のプレート境界面上のすべり(図-11c, 等すべり量線は2cm/年以上)を示している。浦河沖(B)は $gap_{2015}$ (図-11b, 図-12e塗り潰し)の分布より南西側に少しずれている。なお、房総半島沖(E)は2018年に発生したSSEの影響を受けたものでこの期間内に定常的に継続した変動ではない。ただし、このSSEによるすべり域についても、関数モデルで適切に余効変動を取り除くことで明瞭に現れたものである。

B, C, DそしてEは図-12aの定常速度 $V$ および図-12eの定常速度 $v$ で場所がそれぞれほぼ一致している。ただし、2011年以前と2015年以降では、すべりの向きが逆であることに注意が必要である。つまり、2011年前に周囲よりは強く固着していた場所でひずみを解放する方向にすべっている。ただし、見方を変えると、2011年以前からの定常速度 $V$ のうち、震源に近いBからEにおいて、 $v$ の分だけ $V$ の速度が減少し、固着が緩む方向に変化したと考えることができる。EはSSEなので他とは物理メカニズムが少し異なるかもしれないが、ひずみの解放の点ではSSEの発生は固着が緩むことと同等であろう。なお、このことは、前述の2011年東北地方太平洋沖地震以前の定常速度 $V$ が異常であって、地震の発生によってしばらくした2015年に状態が回復して元に戻ったという仮説をすべり域の空間分布から補強するものである。なお、十勝沖以東では一致しないが、これは2011年東北地方太平洋沖地震の影響の外であると考えれば矛盾しない。

CとDは、2011年以前は固着が強かったが、地震後に余効すべり(ひずみの解放)を示し、2015年以降に新たな定常的なすべりが付け加わって、2011年以前に比べると固着が弱い状態で継続している。また、B, C及びDに共通して地震(余震)の発生が少ない(図-12c及び12f)。BについてはCとDと似ているものの、地震直後は余効すべりが周囲より小さい点が異なる。Bについては、1968年十勝沖地震(M7.9)の震源域を含んでおり、ひずみの蓄積が十分でなく2011年東北地方太平洋沖地震の余効すべりを起こすような条件ではなかったと考えられる。

次に、余効変動を引き起こしているすべりが周囲に比べて小さい場所に注目してみる。Bの東(十勝沖)、CとDの間(宮城沖)やF(青森東方沖)では2011年東北地方太平洋沖地震の余効すべりだけでなく2015年からの定常すべりが周囲より小さい。Bの東では2003年十勝沖地震、CとDの間は、2011年東北地方太平洋沖地震(図-12a)及びその直後の

余効すべり(図-12b)、Fでは1994年三陸はるか沖地震のそれぞれの震源域となっており、通常はプレート間の固着が強く、繰り返し大地震を引き起こす場所(アスペリティ)となっていることから、これらの場所では2011年東北地方太平洋沖地震の余効変動を引き起こしにくいと考えられる。

#### 4.7 誤差推定と予測のパフォーマンス

ここで関数モデルの誤差と将来予測性能について議論する。Tobita(2016)は、関数モデルに予測限界を生じさせる要素として、(1)定常速度 $V$ の推定誤差、(2)関数近似としての限界、(3)余効変動の物理機構(メカニズム)の変化、(4)大地震間のプレート境界面上すべり速度の変化、(5)別の地震による変動、(6)観測誤差の6つを挙げている。

観測値(図-6)を基に吟味してみると、(1)及び(2)の影響はこの10年間では明確には検出されていないため十分小さいと考えられる。(5)の他の地震による変動はマグニチュード7クラスだと震源に近い観測点では影響があるものの、ある程度離ればそれほど影響はない。(6)は観測点の樹木による電波の遮蔽などの環境による誤差は常に存在するものの、観測環境が良好な点を使うことでモデルへの影響を最小にできる。

本研究で新たに見いだされた関数モデルの精度を悪化させる要素は、時系列の途中から発生する広域の新たな現象(2015年~)と固定局の福江に起因する現象の2つである。最大の誤差要因となったのが前者の2015年以降の新たな定常速度 $v$ であり、これは上記のカテゴリーであれば(3)もしくは(4)にあたるものであろう。物理メカニズム自体の変化ではないのかもしれないが、広域で新たなすべり現象が始まることは全く予測されず、数年で数cmの残差を生むことになった。また、参照に用いる固定局に関する誤差はこうした地殻変動観測に常につきまとうものであり、根本的な解決が期待される。

このように、将来予測性能の評価は、2015年以降に生じた新たなすべり項の存在の有無で大きく異なる。 $v$ の値自体は小さいものの、定常速度であるので時間につれて一方向に蓄積してしまい、式(1)のモデルでは10年で10cmの誤差となる場所も存在する。この定常速度の変位を考慮した式(4)であれば、10年でも数cm以下の誤差でモデル化が可能である。それでは、さらに将来はどうなるであろうか。それは、式(4)の仮定が続くかどうかにかかっており、このような新たな現象が発生してしまえば、とたんに誤差が拡大することになる。実際に、図-3の東西成分では2020年以降にモデルからの乖離が見られ、今後数年で残差が数cmを超えることが予想される。したがって、現実的な関数モデルの運用にあたっては、計算する時点ごとの時系列からの残差を吟味して関数モデルの時点修正を随時行うべきである。なお、10年を超えるような長期的な予測については現時点では検証されておらず保証できるものはない。

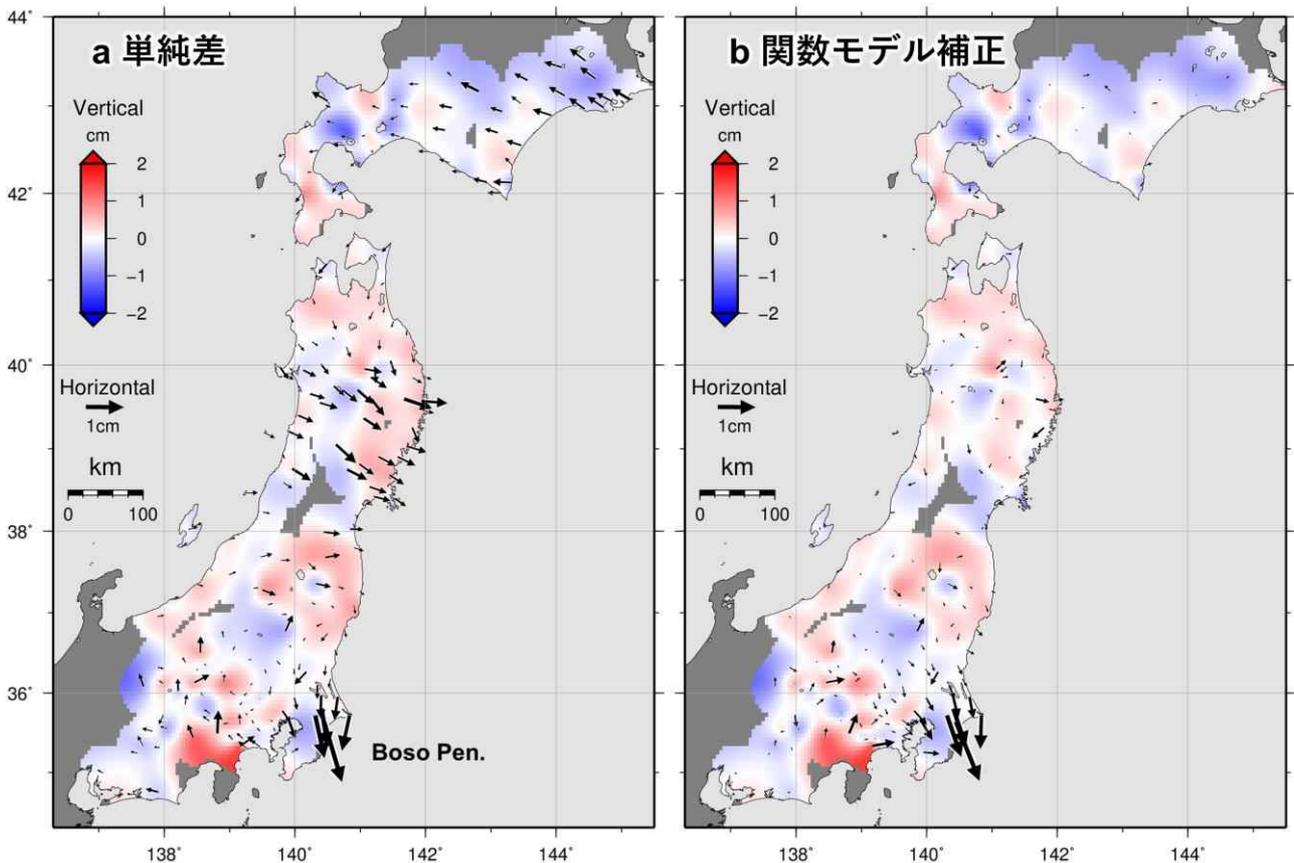


図-13 地殻変動検出のための単純差と関数モデル使用の比較  
 a 2018年5月20～29日と6月26～7月5日の10日間の平均の単純差  
 b 上記から本研究の関数モデルを差し引いて補正したもの

#### 4.8 関数モデルの利活用例

本研究の関数モデルは、広域を一度に取り扱うことができること、時空間関数なので場所と時間を与えるだけで計算できること、将来を予測できることが長所である。例えば、東北地方の太平洋岸では地面の隆起が続いており、港湾施設をどの潮位に合わせて改修すべきなのかの計画策定に支障を来している状況である。将来の隆起の量と時期が精度よく予測できれば、こうした将来の計画作成に貢献し得る。しかし、長期の将来予測精度については十分検証されていないので、ここでは比較的短期で微小な変動の検出の実例を2つ示す。

局所的な変動の抽出例として、2018年5月末～7月に発生した房総半島のSSE (Ozawa et al., 2019) について図-13に示す。一般に、微小な地殻変動を時系列から検出するためには、対象となる場所や時期に合わせて近傍に参照となる固定局を設定したり、広域の変動を除去するためにトレンドを観測点ごとに推定したりといった、各点に共通となる変動のモデル化をその都度ごとに行う必要がある。ここでは、数十日間の短期ではあるが、単純に2時期の差分を取った図-13aでは2011年東北地方太平洋沖地震の余効変動のみならず、北海道に見られるような定常

的な変動があちこちに含まれており、そのパターンも様でない。しかし、本研究で求めた時空間モデルを差し引いて時間変化を求めた図-13bでは房総半島のSSEのみがきれいに抽出されており、関数モデルを利用した手法は、2時期の単純差とは比べものにならない地殻変動抽出力を持っている。

この関数モデルはこうした局所的な現象の抽出にも使えるが、狭い範囲内では大地震の余効変動という広域の現象は均一的に現れるため、単純な差分でも十分なことが多い。図-13aでも、関東付近だけを見るならば、単純差が使える。これに対して、本関数モデルが真価を發揮するのは広域にわたる微小な現象の抽出である。こうした広域で微小な変動を検出する例として積雪による荷重変形 (Heki, 2001) を図-14に示す。この図は、例年3月上旬頃が最深積雪になることから地震後2020年までの各年(2015年を除く)3月11日前後の観測値と関数モデルの残差を求め、それらの8年分の平均値を描いたものである。積雪が100cmを超える地域と積雪荷重で地殻がへこむことで上下変位が $-0.05\text{cm}$ となる地域がよく一致する(図-14a)ほか、積雪荷重で地殻がたわむことで周囲の水平変位が積雪地域に向く変位(図-14b)が明瞭に現れている。変位量にして1~2mmという非常に小さな変化を求めてこうした図を作成するに

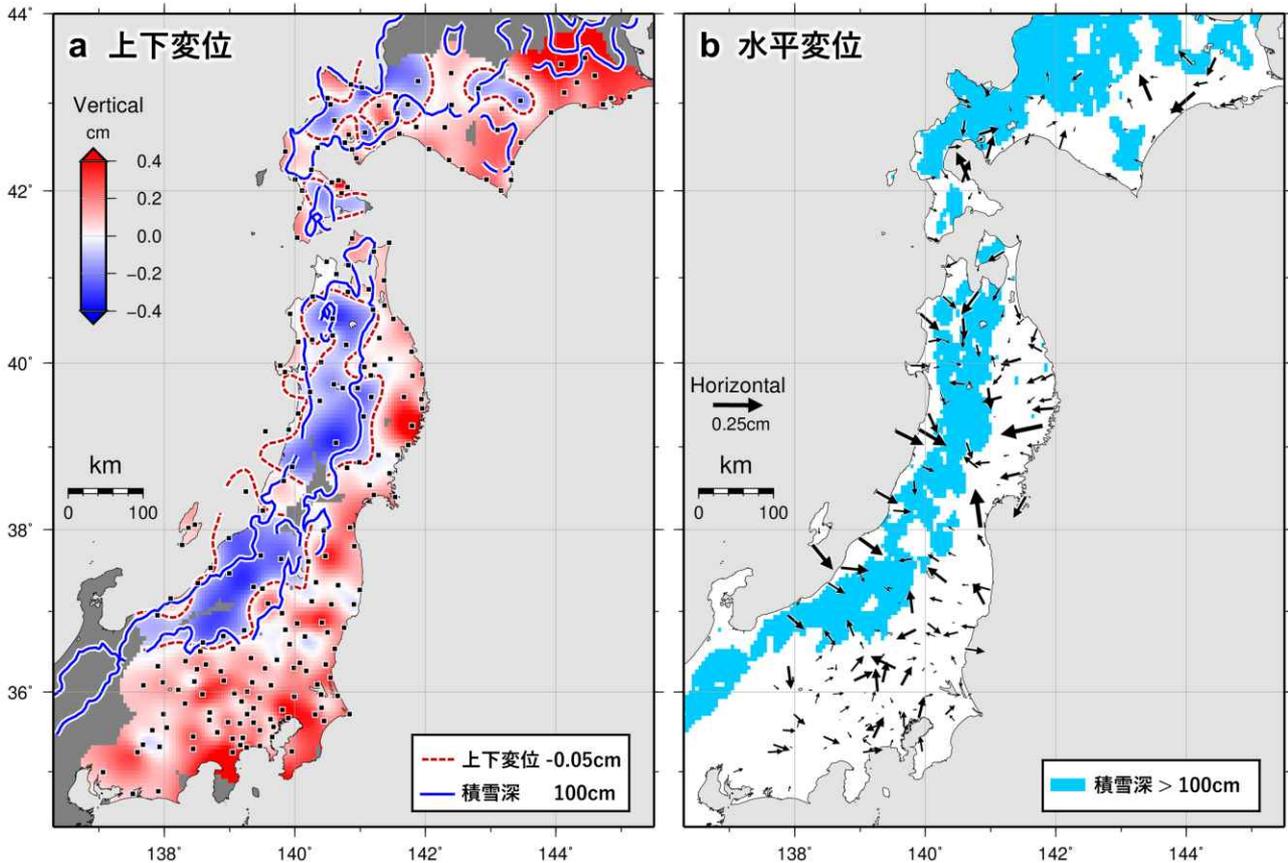


図-14 関数モデルによる積雪荷重変形の検出

a 上下成分. 赤色破線: 上下変位 $-0.5\text{mm}$ . 青線: 平均年最深積雪  $100\text{cm}$  (国土交通省, 2012).

b 水平成分. 青色塗りつぶし: 平均年最深積雪  $100\text{cm}$  以上.

両図とも, 2012年~2020年(2015年を除く)の各年3月11日前後10日間平均値を平均したもの.

は, 各点で変化を厳密にモデル化するなど複雑な操作が必要になるが, 一般的に作成しておいた関数モデルを差し引くだけでこうした図が簡単に描くことができる. このように, 広域かつ緩やかな変動検出には応用範囲も広い強力なツールである.

## 5. まとめ

2011年東北地方太平洋沖地震の余効変動を時空間で近似・予測する, 2つの対数関数と1つの指数関数の和を用いるモデルを検証・改良することで次の結論を得た.

- 1) Tobita (2016) の関数モデルは,  $1000\text{km}$  を超える広域において,  $1\text{m}$  を超える2011年東北地方太平洋沖地震の余効変動を10年後においても数  $\text{cm}$  程度の精度で予測できている.
- 2) 関数モデルの時間関数の緩和時定数は全観測点・成分に共通に同一のものを用いており, この時定数を変えると, 各時間関数の係数に当たる空間関数の配分は全観測点で一定の割合で変化し, 関数モデル全体としての変化を吸収する. したがって, 緩和時定数は観測点ごとに異なるにもかかわらず, 同一の緩和時定数を用いても関数モデル全体としては観測点ごとの時間変化によく適合し得

る.

- 3) 観測値からの関数モデルを差し引いた残差は余効変動ではない別の事象の発生を検出に極めて有効であり, 様々な分野での活用が期待できる. 特に, 広域かつ緩やかな変動検出での威力は大きい.
- 4) 観測値と関数モデルの残差からは2015年に広域での値の乖離が大きなイベント発生もなく始まったことが分かった. この乖離は新たな定常速度成分が発生する形となっており, そのまま継続し, 大きい場所では年間  $1\text{cm}$  程度ずつ蓄積している. この現象は, 広域かつ均一に観測されており, プレート境界面上のすべりとしてシミュレーションでモデルを作成してみると, 福島県沖以北の地震後の余効すべり域に加えて, 新たにその北側の浦河沖ですべりが発生し, 継続している.
- 5) 2015年からの新たなすべりを直線近似して組み入れることで関数モデルを改良し, 関数モデルとしての総合的な予測性能を格段に高めることができた.
- 6) 関数モデルの各項の観測点ごとの空間分布は, 別途物理モデルによって求められた余効すべりと粘弾性緩和とそれぞれ類似した空間分布を持つ

ている。つまり、各関数が時空間依存性を持った地下の物理メカニズムに関連していることが判明し、地震発生場の物理現象解明にも役立つ。

- 7) 関数及び物理モデルの比較から、陸地に近い震源域付近で発生した粘弾性緩和は比較的短期の緩和時定数を持っているほか、粘弾性緩和によって生じたと考えられる変動は数日から1000日以上まで、非常に幅広い時定数を持っていることが分かった。
- 8) 2011年の地震前からのプレート境界面上のすべ

り域の変遷を見てみると、2011年以前の固着域の浅い側で本震が発生、そして本震の深い側に隣接して余効すべりが発生した。その後、余効すべり域の北西側及び浦河沖で2015年前半に一時的にすべりがみられた後、それらのプレート境界面の深い側全体に広がる形で2015年以降の新たなすべりの発生（固着の緩み）と続いている。

(公開日：令和5年3月28日)

### 参考文献

- Baba, S., A. Takeo, K. Obara, T. Matsuzawa, and T. Maeda (2020): Comprehensive detection of very low frequency earthquakes off the Hokkaido and Tohoku Pacific coasts, Northeastern Japan, *Journal of Geophysical Research*, 125, e2019JB017988. doi: 10.1029/2019JB017988
- Fujiwara, S., M. Tobita, and S. Ozawa (2022): Spatiotemporal functional modeling of postseismic deformations after the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Earth, Planets and Space*, 74, 13. doi: 10.1186/s40623-021-01568-0
- Heki, K. (2001): Seasonal modulation of interseismic strain buildup in northeastern Japan driven by snow loads, *Science*, 293, 89-92. doi: 10.1126/science.1061056
- Honsho, C., M. Kido, F. Tomita, and N. Uchida (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, *Journal of Geophysical Research*, 124, 5990-6009. doi: 10.1029/2018JB017135
- Kita, S., T. Okada, A. Hasegawa, J. Nakajima, and T. Matsuzawa (2010): Anomalous deepening of a seismic belt in the upper-plane of the double seismic zone in the Pacific slab beneath the Hokkaido corner: Possible evidence for thermal shielding caused by subducted forearc crust materials, *Earth and Planetary Science Letters*, 290, 415-426. doi: 10.1016/j.epsl.2009.12.038
- 国土交通省 (2012) : 国土数値情報 (平年値メッシュデータ) . <https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-G02.html> (accessed 8 August. 2022).
- Munekane, H. (2012): Coseismic and early postseismic slips associated with the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake sequence: EOF analysis of GPS kinematic time series, *Earth, Planets and Space*, 64, 3. doi: 10.5047/eps.2012.07.009
- 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.
- Nakajima, J. and A. Hasegawa (2006): Anomalous low-velocity zone and linear alignment of seismicity along it in the subducted Pacific slab beneath Kanto, Japan: Reactivation of subducted fracture zone?, *Geophysical Research Letters*, 33, L16309. doi: 10.1029/2006GL026773
- Nakajima, J., F. Hirose, and A. Hasegawa (2009): Seismotectonics beneath the Tokyo metropolitan area, Japan: Effect of slab-slab contact and overlap on seismicity, *Journal of Geophysical Research*, 114, B08309. doi:10.1029/2008JB006101
- Ozawa, S., T. Nishimura, H. Suito, T. Kobayashi, M. Tobita, and T. Imakiire (2011): Coseismic and postseismic slip of the 2011 magnitude-nine Tohoku-Oki earthquake, *Nature*, 475, 373-376. doi: 10.1038/nature10227
- Ozawa, S., T. Nishimura, H. Munekane, H. Suito, T. Kobayashi, M. Tobita M, and T. Imakiire (2012): Preceding, coseismic, and postseismic slips of the 2011 Tohoku earthquake, Japan, *Journal of Geophysical Research*, 117, B07404. doi: 10.1029/2011JB009120
- Ozawa, S., H. Yurai, and T. Kobayashi (2019): Recovery of the recurrence interval of Boso slow slip events in Japan, *Earth, Planets and Space*, 71, 78. doi: 10.1186/s40623-019-1058-y
- Suito, H. (2017): Importance of rheological heterogeneity for interpreting viscoelastic relaxation caused by the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Earth, Planets and Space*, 69, 21. doi: 10.1186/s40623-017-0611-9
- Takada, Y. and Y. Fukushima (2013): Volcanic subsidence triggered by the 2011 Tohoku earthquake in Japan, *Nature Geoscience*, 6, 637-641. doi: 10.1038/ngeo1857
- Tobita, M. (2016): Combined logarithmic and exponential function model for fitting postseismic GNSS time series after 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Earth, Planets and Space*, 68, 41. doi: 10.1186/s40623-016-0422-4

### 付録1. 式(3)及び(4)の係数ファイル

2011年東北地方太平洋沖地震後の余効変動の時空間関数モデルを簡易的に利用するために、本稿の式(3)及び(4)の係数ファイル (Tohoku\_postseismic\_model\_parameter\_Fujiwara\_et\_al\_2023.csv) を提供する。本係数ファ

イルは、余震による影響の除去や固定局の処理方法等が本研究と異なると元のデータに合わなくなるほか、2022年以降のデータについては未検証という制限事項がある。したがって、高度な利用に当たっては、表-1に示された緩和時定数を用いて、最小二乗法で各観測点の時系列を近似することが望ましい。