3.6 測地観測データを用いた長期予測手法の高度化（サブテーマ 3.3）

(1) 業務の内容

(a) 業務題目　「測地観測データを用いた長期予測手法の高度化」

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
国立大学法人京都大学防災研究所附属地震災害研究センター	教授	西村　卓也
国立大学法人京都大学防災研究所附属地震災害研究センター	特定研究員	Dhanya Thomas
国立大学法人京都大学防災研究所附属地震災害研究センター	オフィスアシスタント	平子　豪
国土交通省国土地理院地理地殻活動研究センター	センター長	矢来　博司
国土交通省国土地理院地理地殻活動研究センター地殻変動研究室	室長	宗包　浩志

(c) 業務の目的

GNSS や InSAR などの測地観測データを用いて、ひずみ速度分布から内陸地震の長期発生確率を計算するための手法を高度化すると共に、国内の活断層の平均変位速度を推定することで測地学的に活断層評価を行う手法を試行する。

(d) 3 か年の年次実施業務の要約

1）令和 7 年度：

測地学的手法により観測されたひずみ速度から内陸地震を発生させる弾性ひずみを抽出するために、過去の大地震に伴う粘弾性緩和を原因とする余効変動の影響を定量的に見積もり、補正する手法を開発した。近年の地震の余効変動の解析結果から推定された地下の粘弾性構造を用いて、現在のひずみ速度場に有意な影響を与える地震の規模と発生年の範囲を見積もり、必要に応じて過去の地震の震源断層モデルを構築することで、現在の変位・ひずみ速度に対する補正速度の計算を行った。

2）令和 8 年度：

測地学的手法により観測されたひずみ速度から内陸地震を発生させる弾性ひずみを抽出するために、プレート沈み込み帯におけるプレート間固着などの影響に関する評価を行い、現在の観測変位・ひずみ速度に対する補正を行うための計算手順の整理を行う。また、測地学的データを用いた活断層のすべり欠損速度の推定手法の開発を行う。

3）令和 9 年度：

前年度までに観測されたひずみ速度に対する補正手順を確立する予定であるが、補正後のひずみ速度にも地震を引き起こさない非弾性変形が含まれている可能性が高い。弾性変形と非弾性変形の比を推定するために、サブテーマ 1 及び 2 などの結

果を踏まえた過去の地震活動データを用い、地域依存性を含めた検討を行って、全国の測地観測データを用いた地震発生確率の試算を行う。

(2) 令和 7 年度の成果

(a) 業務の要約

本業務は、日本列島で現在観測されている地殻変動に含まれる過去の大地震による粘弾性緩和による余効変動の影響を定量評価することを目的とした。粘弾性緩和による余効変動は数十年から数世紀に及ぶため、地震間の地殻変動評価や地震ハザード評価に重要である。計算コスト削減のため、粘弾性計算プログラム VISCO1D を用いてマグニチュード、経過時間、断層タイプに応じた影響範囲（臨界半径）の経験則を構築し、有意な余効変動をもたらす地震を抽出した。その結果、599 年以降の 2,425 地震のうち 34 地震が現在も影響を持つと判明した。特に 2011 年東北地方太平洋沖地震の寄与が最大であり、余効変動は主に東北日本に集中する一方、南海トラフ沿いでも継続が確認された。これらを合算すると最大約 76 mm/年に達し、余効変動が現在の地殻変動解釈において無視できないことを示した。

(b) 業務の成果

大地震の発生後に観測される地震前とは傾向の異なる地殻変動は余効変動と呼ばれる。余効変動の原因として、余効すべり、粘弾性緩和、間隙弾性反発の 3 つの主要なメカニズムがあることが知られているが、地震が発生するリソスフェアの下にあるアセノスフェアの粘弾性緩和による余効変動（例えば、Nur and Mavko, 1974）は大地震の後、数十年から数世紀にわたって継続することがある。そのため、現在 GNSS 等によって観測されている地殻変動には、過去の地震に伴う余効変動の影響が含まれている可能性がある。この余効変動の影響を定量化することは、長期的な地震間地殻変動の推定や、地震ハザード評価の精度向上にとって重要であるため、本業務では、現在の日本列島で観測されている地殻変動に影響を及ぼしている過去の大地震に起因する変位速度とひずみ速度の定量的な評価を行った。

歴史上、日本列島には多くの大地震が発生しているが、全ての大地震による粘弾性緩和による余効変動を計算するのは計算コストが膨大となってしまう。そのため、過去の大地震のうち、現在の地殻変動に有意な寄与をしている地震のみを抽出することが望ましい。この抽出を行うため、地震後の粘弾性変形の計算コード VISCO1D（Pollitz, 1997）を用いて、地震のマグニチュード（M_w）、発生からの経過時間（t）、及び断層タイプ（逆断層、横ずれ断層、正断層）とテクトニック環境（地殻内地震、海溝型地震）別に、有意な余効変動が期待される震源からの影響範囲に関する経験則を導出した。余効変動の計算のための地殻構造として、深さ方向のみに変化する 1 次元の成層構造とし、地殻内地震の場合は厚さ 30 km、海溝型地震の場合は厚さ 60km の弾性層と、その深部（地殻内地震の場合：深さ 30～220 km、海溝型地震の場合：深さ 60～220 km）のアセノスフェアに対応する層にはバーガース粘弾性体を仮定した。アセノスフェアのマクスウェル粘性率とケルビン粘性率は、それぞれ 1×10^{19} Pa・s 及び 5×10^{17} Pa・s と仮定した。また、深さ 220～660 km の上部マントルに対応する層については、マクスウェル粘性率を 1×10^{20} Pa・s とするマク

スウェル粘弾性体モデルを適用した（図 1)。弾性定数については、PREM（Dziewonski et al., 1981）の値を採用した。地震の震源断層の長さ、幅、すべり量については、2 つの発生環境（地殻内地震と海溝型地震）と 3 つの断層タイプ（逆断層（TH)、横ずれ断層（SS)、正断層（NF)）についてそれぞれの標準的なスケーリング則を用いて、マグニチュード M_w 6.0〜9.5 の範囲に対する具体的な値を決定した。計算領域は、日本列島を中心とする 15° × 15° の領域とし、0.5° 間隔の等間隔グリッドにおいて、VISCO1D を用いて地表での変位速度とひずみ速度の時空間的変化を計算した（図 2)。

速度については 0.5 mm/年、ひずみ率については 20 nanostrain/年をしきい値として採用し、各マグニチュード及び断層タイプについて、計算した変位速度とひずみ速度がしきい値を超えて継続する最大距離と最大期間を推定した。その後、マグニチュードと断層タイプ毎に、変位速度とひずみ速度がしきい値を下回る震源距離（以下「R_{crit}：臨界半径」という。）を算出した。図 3 に、逆断層型沈み込みイベントにおける R_{crit} の時間的変化の例を示す。R_{crit} は一般的に地震のマグニチュードとともに増加し、規模の大きいイベントほど、変位・ひずみ速度の両方がより長期間継続することが分かった。臨界半径が 1,500 km に収束しているのは、モデル領域を有限にしたためそれ以上の距離を評価できなかった見かけ上のものである。次に、これらのモデル出力を用いて、(M_w, $\log_{10}$t）空間内の不規則な間隔で配置されたデータ点に対して区間線形補間を適用し、地震のマグニチュード(M_w)、経過時間（t)、及び影響を受ける領域（R_{crit}）の間の経験的関係を構築した（図 4)。補間された曲面は、元となる VISCO1D の計算結果をかなりよく再現している。さらに、この経験的関係を用いて、現在観測されている地殻変動に有意な余効変動が含まれる可能性のある過去の地震を抽出した。そして、抽出された各地震に対して VISCO1D を用いて粘弾性変形を計算し、2026 年 1 月 1 日時点における、過去の地震に起因する粘弾性緩和による余効変動の変位・ひずみ速度の合計を計算した。

VISCO1D の計算結果から、地殻内地震と海溝型地震の両方について、大規模な地震の後、数年から数世紀にわたり、粘弾性緩和による余効変動が継続することが明らかになった。ここで仮定したしきい値に基づく継続期間は、水平変位速度に対する継続期間がひずみ速度に対するものよりも長く、海溝型地震の場合の方がその傾向が顕著であることが分かった。例えば、M_w 7.9 の逆断層型地殻内地震の場合、地震後にひずみ速度がしきい値(≥20 nanostrain/年）を超えて 212 年間継続し、水平変位速度（≥ 0.5 mm/年）は 287 年間継続する。M_w 7.9 の逆断層型海溝型地震の場合、対応する継続期間はひずみ速度で 87 年、水平変位速度で 137 年となる。M_w 9.5 の逆断層型海溝型地震の場合、地震後のひずみ速度と水平変位速度は、それぞれ 360 年と 1734 年間しきい値を超えて継続することが分かった（図 5)。

上記のような計算手法により、西暦 599 年から 2025 年までの歴史地震に対する余効変動の有無を、国土地理院 GEONET 電子基準点及びソフトバンク独自基準点の位置において調査した。宇津（1990）と気象庁一元化震源に基づく 2,425 個の地震を対象に、地震のマグニチュード、経過時間、及び影響範囲を評価した。2026 年 1 月 1 日時点で有意な余効変動が継続していると特定された地震は、計 34 地震であった（表 1)。解析領域において、有意な余効変動を生じている最古の地震は、1854 年安政東海地震（M_w8.38）であり、現在の地殻変動に対する広範囲な余効変動を及ぼしている地震としては、M_w9.1 の 2011 年東北地方太平洋沖地震が挙げられる。図 6 は、これら 34 個の地震について、水平変位速度

と上下変位速度の和を示したもので、余効変動が主に東北日本に集中していることが分かる。図 7 は、水平変位速度の絶対値と面積ひずみ速度の分布であるが、これらも東北日本で過去の地震による余効変動が大きいことを示すとともに、南海トラフ沿いの西南日本においても、1944 年の東南海地震及び 1946 年の南海地震に関連する余効変動が、振幅は小さいもの現在でも継続していることが分かる。余効変動が現在も続いている 34 地震の地震名と規模（M_w）及び 2026 年 1 月 1 日現在の変位速度は、表 1 にまとめられている。2026 年 1 月 1 日現在の余効変動は 2025 年 12 月 8 日に発生した青森県東方沖の地震によるものが最大であるが、これは地震発生直後の時期で計算したためであり、広域に対する影響という意味では、前述のとおり東北地方太平洋沖地震の影響が大きい。34 個の大地震の余効変動を合計すると、水平変位速度の最大値は 169 mm/年に達し、地震後の粘弾性緩和による余効変動が現在の地殻変動を解釈する上で、無視できないことが示された。

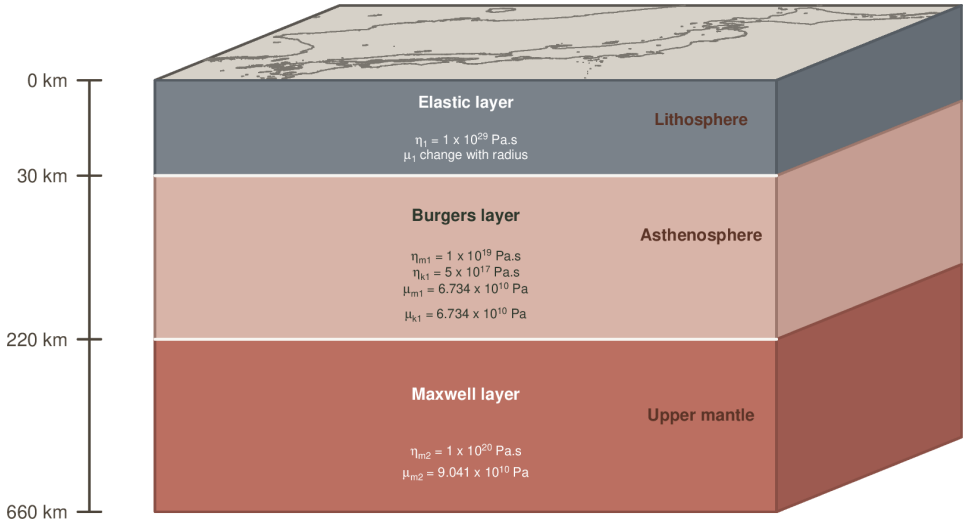


図 1 粘弾性緩和の計算に用いた 1 次元地下構造の模式図（地殻内地震の場合）。弾性リソスフェア、バーガース粘弾性アセノスフェア、マクスウェル粘弾性上部マントルからなる。

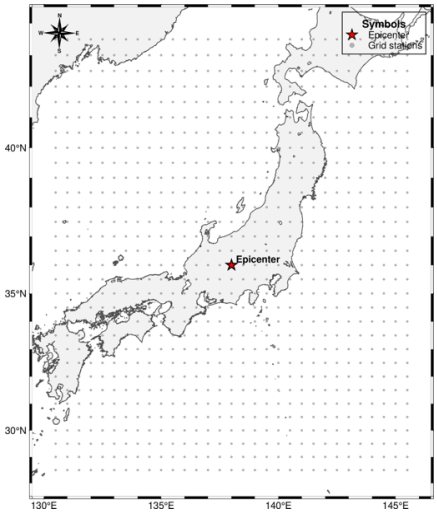


図 2 本研究におけるモデル計算領域。

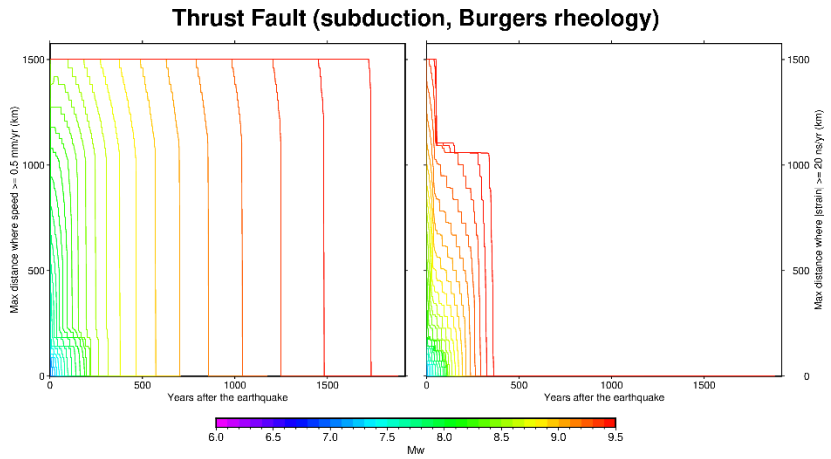


図 3 逆断層型海溝型地震における臨界半径（R_{crit}）の時間的変化。左の図は、水平変位速度が 0.5 mm/年を超える最大距離を示し、右の図は、ひずみ速度が 20 nanostrain/年を超える最大距離を、地震からの経過時間の関数として示す。図中の線の色は、地震のマグニチュード（M_w 6.0～9.5）を表す。

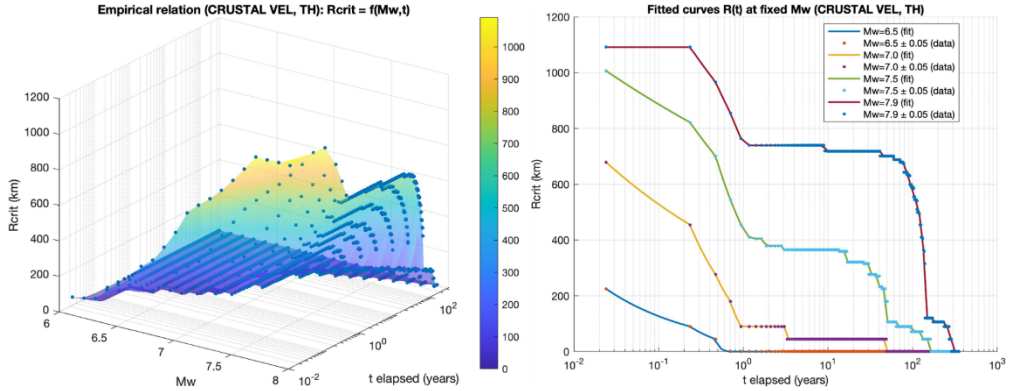


図 4 逆断層型地殻内地震について、地震のマグニチュード（M_w）、経過時間（t）、及び臨界半径（R_{crit}）の経験的関係。左図は、粘弾性余効変動の計算値の R_{crit} を(M_w, $\log_{10}$t)空間にプロットしたものであり、右図は、ある特定のマグニチュードにおける R_{crit}(t)の近似曲線と、それに対応するモデル結果を比較したもの。補間した曲線は、VISCO1D による実計算値をよく再現している。

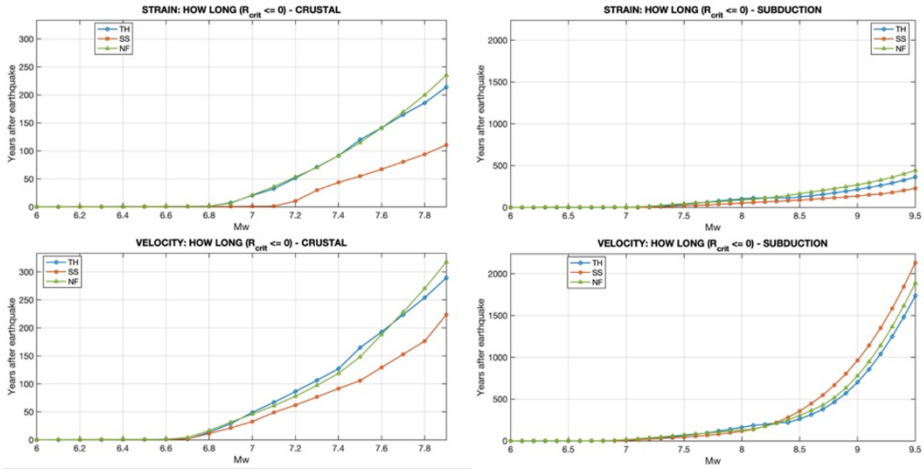


図 5 R_{crit} が 0 になる地震からの経過時間。上段はひずみ速度、下段は水平変位速度に関する図。左の列の図は地殻内地震の場合を示し、右の列の図は海溝型地震の場合を示す。青、赤、緑の曲線は、それぞれ逆断層（TH）、横ずれ断層（SS）、正断層（NF）型の地震を表す。

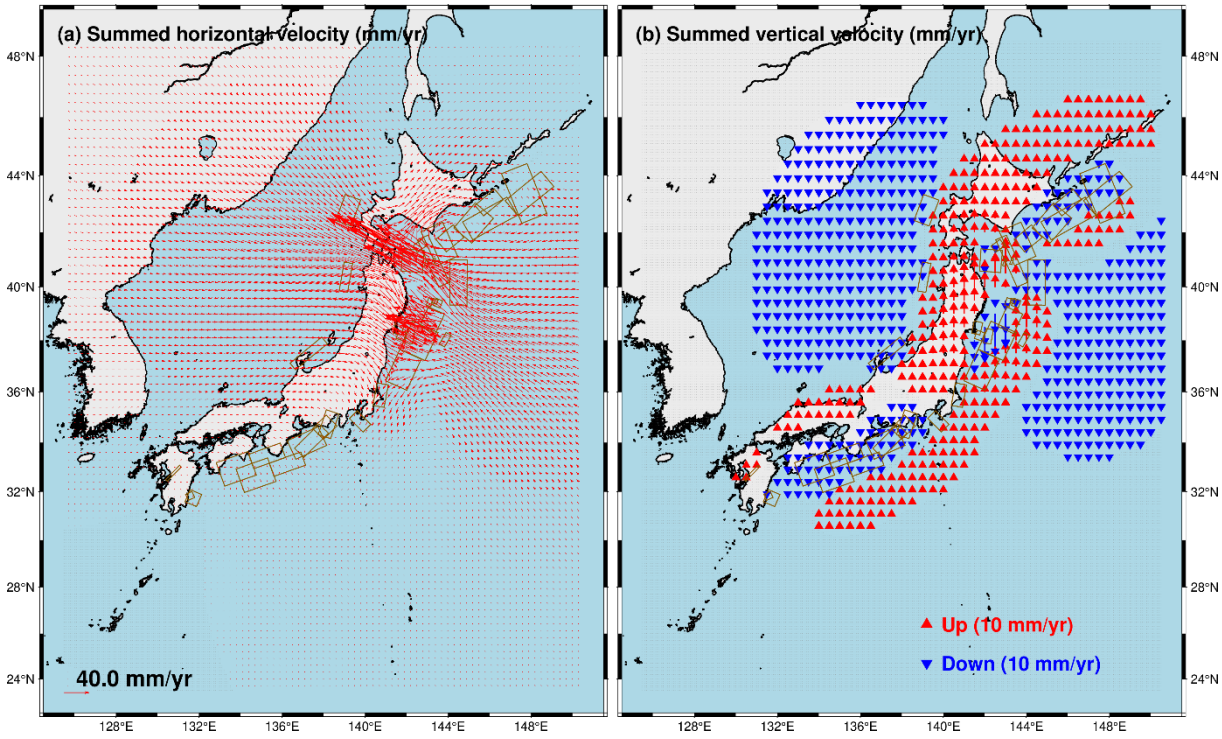


図 6 2026 年 1 月 1 日時点での過去の大地震の粘弾性緩和による余効変動の計算値の総和。（a）水平変位速度ベクトル。（b）上下変位速度分布。

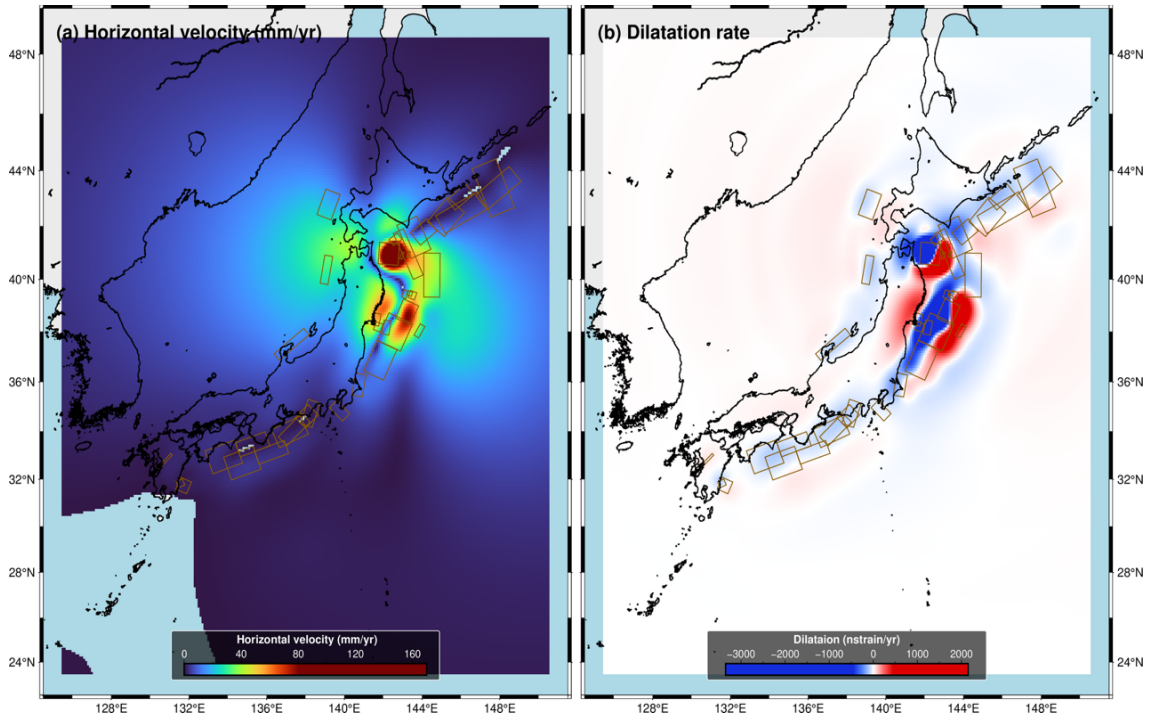


図 7 2026 年 1 月 1 日時点での過去の大地震の粘弾性緩和による余効変動の計算値の総和の分布。(a)水平変位速度の絶対値。(b) 面積ひずみ速度。

表 1 2026 年 1 月 1 日時点で有意な粘弾性緩和による余効変動を生じさせる過去の大地震の一覧表。最大変位速度は、水平成分の最大変位速度を表す。

番号	発生時刻（UTC）	Mw	断層タイプ	地震名	最大変位速度（mm/年）
1	1854-12-23 00:00:00	8.38	逆断層	1854 年安政東海地震	0.7
2	1854-12-24 07:00:00	8.54	逆断層	1854 年安政南海地震	1.1
3	1894-03-22 10:23:00	8.30	逆断層	1894 年根室沖地震	1.3
4	1896-06-15 10:32:00	8.45	逆断層	1896 年明治三陸地震	1.7
5	1923-09-01 02:58:32	7.92	逆断層	1923 年関東地震	0.7
6	1933-03-02 17:30:48	8.35	正断層	1933 年昭和三陸地震	1.0
7	1944-12-07 04:35:40	8.15	逆断層	1944 年東南海地震	2.3
8	1946-12-20 19:19:04	8.37	逆断層	1946 年南海地震	3.1
9	1952-03-04 01:22:44	8.17	逆断層	1952 年十勝沖地震	1.6
10	1968-05-16 00:48:55	8.22	逆断層	1968 年十勝沖地震	2.6
11	1968-05-16 10:39:02	7.57	正断層	1968 年十勝沖地震の余震	1.2
12	1969-08-11 21:27:36	8.00	逆断層	1969 年色丹島沖地震	1.9
13	1973-06-17 03:55:02	7.80	逆断層	1973 年根室半島沖地震	1.8
14	1978-06-12 08:14:25	7.59	逆断層	1978 年宮城県沖地震	1.7
15	1983-05-26 02:59:57	7.80	逆断層	1983 年日本海中部地震	2.5
16	1993-07-12 13:17:11	7.70	逆断層	1993 年北海道南西沖地震	1.8
17	1994-10-04 13:22:57	8.32	横ずれ	1994 年北海道東方沖地震	3.4
18	1999-09-20 17:47:29	7.70	逆断層	1999 年台湾集集地震	0.6
19	2003-09-25 19:50:07	8.00	逆断層	2003 年十勝沖地震	4.1
20	2011-03-11 05:46:18	9.10	逆断層	2011 年東北地方太平洋沖地震	82.5
21	2011-03-11 06:08:53	7.24	逆断層	2011 年東北地方太平洋沖地震余震（岩手県沖）	1.1
22	2011-03-11 06:15:34	7.76	逆断層	2011 年東北地方太平洋沖地震余震（茨城県沖）	4.9
23	2012-12-07 08:18:31	7.30	逆断層	2012 年三陸沖の地震	1.3
24	2016-04-15 16:25:05	7.04	横ずれ	2016 年熊本地震	0.7
25	2021-03-20 09:09:45	7.05	逆断層	2021 年宮城県沖の地震	1.1
26	2021-05-01 01:27:27	6.90	逆断層	2021 年宮城県沖の地震	0.9
27	2024-01-01 07:10:23	7.51	逆断層	2024 年能登半島地震	2.1
28	2024-08-08 07:42:56	7.05	逆断層	2024 年日向灘の地震	1.0
29	2025-01-13 12:19:33	6.80	逆断層	2025 年日向灘の地震	0.9
30	2025-11-09 08:03:39	6.80	逆断層	2025 年三陸沖の地震	6.7
31	2025-11-09 08:54:39	6.40	逆断層	2025 年三陸沖の地震の余震	1.0
32	2025-12-08 14:15:10	7.56	逆断層	2025 年青森県東方沖の地震	182.2
33	2025-12-08 21:52:43	6.60	逆断層	2025 年青森県東方沖の地震の余震	4.8
34	2025-12-12 02:44:13	6.70	逆断層	2025 年三陸沖の地震	7.0

(c) 結論並びに今後の課題

令和 7 年度は、粘弾性緩和による余効変動計算プログラム VISCO1D を用いて、過去の大地震による余効変動の現在の地殻変動場における影響量を定量的に見積もった。過去の余効変動の影響を適正に補正することにより、長期的な地震間地殻変動を推定することができるため、内陸地震の長期予測の精度向上にも役立つと考えられる。しかし、今回計算した余効変動は単純な粘弾性構造を仮定しているため、東北地方太平洋沖地震のような余効変動が大きい場合に誤差が大きく、震源に近い場所では補正が必ずしも有効でないことも考えられる。そのような地震に対しては、時系列データに対する関数フィッティングによる補正の方が有効な場合も考えられるので、実際の補正を行う場合には、両者の結果を比較して適切な方法を選択する必要がある。

(d) 引用文献

Nur, A., and Mavko, G., Postseismic viscoelastic rebound, Science, 183(4121), 204-206, 1974.

Pollitz, F. F. Gravitational viscoelastic postseismic relaxation on a layered spherical Earth. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 102(B8), 17921-17941, 1997.

Dziewonski, A. and Anderson, D., Preliminary reference Earth model. Physics of the Earth and Planetary Interiors. 25 (4): 297–356, 1981.

宇津徳治，世界の被害地震の表（古代から 1989 年まで），宇津徳治，東京，243 p, 1990.