

東北太平洋沖地震後に活発化した関東の地震活動の予測と検証

東京大学地震研究所

第 355 回地震調査委員会 (2021 年 3 月 9 日)

概要

2011 年東北地方太平洋沖地震後に活発化した関東の地震活動は、大森-宇津式 (以下, OU 則) に従って次第に減少しており, Nanjo et al. (2013) (以下, N1 論文と略す) において, 関東で発生する地震数を予測しているが, この予測が, 2021 年 3 月 1 日現在, 観測された地震数と矛盾が無いかを調べた. M7 クラスの地震は現時点では発生していないが, 予測と観測は矛盾しない. $M \geq 4$ 以上の地震についても, 概ね予測と観測数に矛盾はない. ただし, $M \geq 5$ 以上の地震については, 観測数と比較して過小となっており, GR 則と OU 則のパラメータについては, より最適な値が存在する. N1 論文に比べ, 現状の地震活動は, b 値が小さく, 背景地震活動度については, 0 ではないと仮定したほうがより現実の地震活動を表している. GR 則と OU 則の最適パラメータを採用した今後 5 年, 30 年の予測を行うと M6.5 程度の地震は 2026 年 3 月までに, M7 程度の地震は 2050 年 3 月までに発生している可能性が高い. 但し, 予測誤差が大きいため解釈には注意が必要である.

1. はじめに

2011 年東北地方太平洋沖地震後に活発化した関東の地震活動は, 大森-宇津式 (以下, OU 則) に従って次第に減少している. N1 論文は, 2012 年 5 月 30 日現在入手可能であった気象庁一元化震源に基づいて, 関東で発生する地震数を予測した. この予測が, 2021 年 3 月 1 日現在, 観測された地震数と矛盾が無いかを調べた.

2. 予測の範囲と方法

N1 論文で対象とした領域は図 1 に示した北緯 35-36.5, 東経 139.3-140.7 度, 深さ 0-150 km である. 2012 年 5 月 30 日現在入手可能であった気象庁一元化震源に基づいて, Gutenberg-Richter の規模別頻度分布則 (以下, GR 則) (図 2) と OU 則 (図 3) を当てはめて, 関東で発生する地震数を予測した.

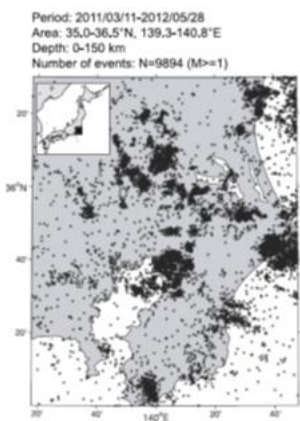


図 1. 予測の対象とした領域.

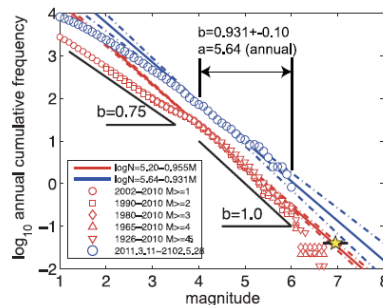


図 2. 予測に用いた地震の規模別頻度. N1 論文より.

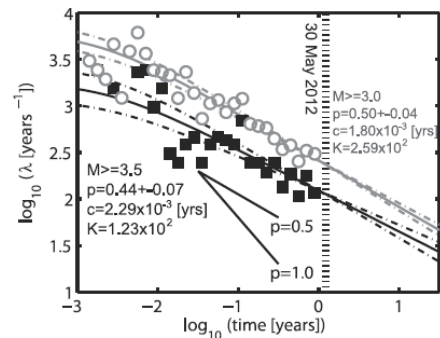


図 3. 予測に用いた地震数の時間変化と OU 則による当てはめ. N1 論文より.

3. 予測の検証方法

N1 論文で予測された地震数を, 予測対象範囲と期間で発生した地震数と比較して, 日本の「地震予測可能性検証実験

(Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability in Japan: CSEP_Japan)」で用いられている N テスト (Tsuruoka et al., 2012) を用いて検定した。N テストは、予測が観測値に対して過小か、過大かを評価することができる指標を与える。CSEP では、N の指標 (δ) が 0.025 以下の時、検定で棄却される。

4. 結果

N1 論文の図 (図 1) 内では、M6.7-7.2 の地震は現在まで発生していない。2012 年 6 月 1 日から予測数は 2021 年 3 月 1 日までに発生する予測数は 0.39 個であり、これは N テストによって、過小にも過大にも予測されていないと評価された (Table 1)。さらに、N1 論文に記載されている GR と OU のパラメータを用いて予測される、 $M \geq 5$ 及び、 $M \geq 4$ の地震発生数の予測値と観測値を比較・検定した結果を Table 2, Table 3 に示す。2021 年 3 月 1 日までの発生数は、 $M \geq 5$ では予測数が 22.76 個、観測数が 37 個、 $M \geq 4$ では予測数が 194.24 個、観測数が 217 個で、 $M \geq 4$ において、N テストで棄却されなかったが、 $M \geq 5$ においては棄却された。参考のために、2014 年 3 月 1 日時点での結果も Table 1, 2, 3 に再掲した。

2012 年 6 月 1 日から 2021 年 3 月 1 日までの M4 以上の地震から推定される b 値は、0.796 であった。N1 論文で仮定した $b=0.931$ は、その後の b 値より大きかったと言える。なお、OU 則の p 値は、2021 年 3 月までのデータで、バックグラウンドの地震活動度を 0 とした場合は 0.41 ($M > 3.0$) となり少し小さい値となっており、当初の予測よりも地震活動度は高いと言えるが、バックグラウンドの地震活動度を 0 としない場合には、 $p=0.66$ となり (図 4) こちらのほうが実際の活動をより説明している。

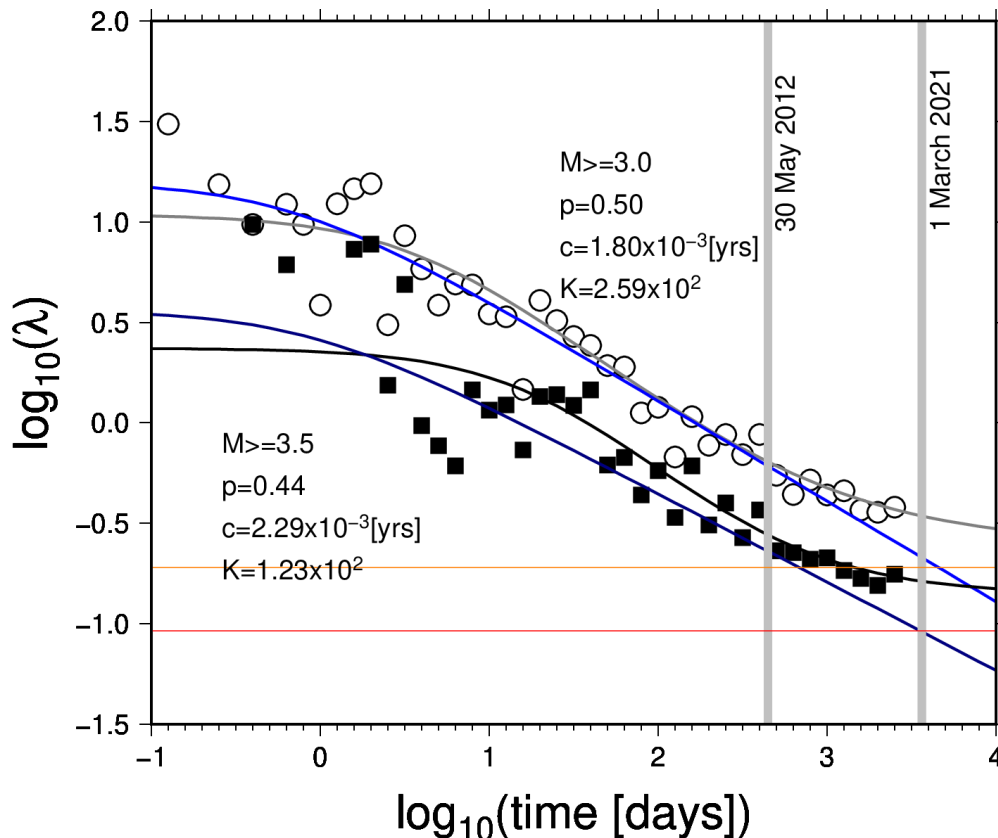


図 4. 予測に用いた地震数の時間変化と OU 則による当てはめ。青 ($M \geq 3.0$)・紺 ($M \geq 3.5$) の実線は Nanjo et al (2013) によるパラメータを用いた予測。灰色 ($M \geq 3.0$)、黒 ($M \geq 3.5$) の実線は実際の観測から求めた最尤推定パラメータによる。オレンジ ($M \geq 3.0$) および赤 ($M \geq 3.5$) の実線は、2001 年から 10 年間のバックグラウンドの地震活動度 ($=\mu$) を示している。

5. 議論

東北地方太平洋沖地震発生直後の b 値, p 値, a 値については 2019 年 3 月 1 日時に地震活動の解析によりそれぞれ 0.75, 0.44, 4.88 としたので, この値を利用した際の結果を Table 4 に示す. これらのパラメータ値による地震数の予測によると N テストはすべてパスしている。そこで, 2012 年 6 月 1 日以降は, この解析領域においては M6 を超える地震が発生していないため, 今後 5 年間に於いても M6 を超える地震が発生していない場合の地震予測数と N テスト (δ_2) の結果を調査し Table5 にまとめた。 δ_2 は, 帰無仮説「地震発生予測数が観測数に比べて過大であるとは言えない」を棄却する有意水準であり, M6.2-6.7 の 2026/3/1 の δ_2 は 0.021 なので, この検定値が意味するところは, 2026/3/1 には M6.5 程度の地震が発生しているはずであるということになる。一方, M7 程度の地震については 2026/3/1 まで発生していなくてもおかしくないということの意味している。さらに, M7 程度の地震の今後数十年の地震予測数 (N) と N テスト (δ_2) の検定値 (δ_2) を調査すると, 2030/3/1 (N:1.8916, δ_2 :0.148), 2040/3/1 (N:2.5366, δ_2 :0.077), 2050/3/1 (N:3.0885, δ_2 :0.044), 2060/3/1 (N:3.5807, δ_2 :0.027)となる。有意水準を 0.025 から 0.05 とすれば, M7 程度の地震は 2050 年 3 月までには発生している可能性が高いということになる。参考のために, N1 論文のパラメータを用いて M6.2-6.7 に対する地震予測数と N テスト (δ_2) の結果を Table5 の最右列に示す。地震予測数は約 1/2.4 となり, δ_2 も約 10 倍大きくなり, 有意水準 0.05 では帰無仮説を棄却できない。

6. 結論

東北地方太平洋沖地震後の活発化した関東の地震活動は GR 則と OU 則およびその最適なパラメータを用いることにより説明できることが示された。M7 クラスの地震は現時点では発生していないが, 予測と観測は矛盾しない。今後 5 年間, M7 クラスの地震が発生しないとしても予測と観測が矛盾しない。なお, 関東の地震活動度は, 2001 年からの 10 年間の活動度よりも高い状態のままであり, 今後 5 年間に於いても M6.5 程度の地震の発生は否定できない。定量的な予測とその評価をすることは重要である。

Table 1. Predicted and Observed numbers of earthquakes with a magnitude of 6.7 - 7.2

Parameter a=5.64 b=0.931 p=0.50 c=1.8e-3

| Date | Year ¹⁾ | Predicted | Observed | δ_1 (under) | δ_2 (over) |
|----------|--------------------|-----------|----------|--------------------|-------------------|
| 2014/3/1 | 2.973306 | 0.1180 | 0 | 1.000 | 0.891 |
| 2021/3/1 | 9.973990 | 0.3914 | 0 | 1.000 | 0.679 |

1) Years from 2011 March 11

Table 2 Predicted and Observed numbers of earthquakes with a magnitude of 5.0-9.0

Parameter a=5.64 b=0.931 p=0.50 c=1.8e-3

| Date | Year ¹⁾ | Predicted | Observed | δ_1 (under) | δ_2 (over) |
|----------|--------------------|-----------|----------|--------------------|-------------------|
| 2014/3/1 | 2.973306 | 6.8653 | 13 | 0.026 | 0.986 |
| 2021/3/1 | 9.973990 | 22.7649 | 37 | 0.003* | 0.998 |

1) Years from 2011 March 11 *) Rejected with a significance level of 0.025 (prediction is underestimated)

Table 3 Predicted and Observed numbers of earthquakes with a magnitude of 4.0-9.0

Parameter a=5.64 b=0.931 p=0.50 c=1.8e-3

| Date | Year ¹⁾ | Predicted | Observed | δ_1 (under) | δ_2 (over) |
|----------|--------------------|-----------|----------|--------------------|-------------------|
| 2014/3/1 | 2.973306 | 58.5774 | 52 | 0.820 | 0.221 |
| 2021/3/1 | 9.973990 | 194.2400 | 217 | 0.055 | 0.953 |

1) Years from 2011 March 11

Table 4 Predicted and Observed numbers of earthquakes with a magnitude of 4.0-9.0, 5.0-9.0 and 6.7-7.2

Parameter a=4.88 b=0.75 p=0.44 c=1.8e-3

| Magnitude | Predicted | Observed | δ_1 (under) | δ_2 (over) |
|-----------|-----------|----------|--------------------|-------------------|
| 6.7-7.2 | 1.1627 | 0 | 1.0 | 0.311 |
| 5.0-9.0 | 37.8332 | 37 | 0.575 | 0.489 |
| 4.0-9.0 | 212.9267 | 217 | 0.402 | 0.622 |

Table 5 Predicted numbers of earthquakes and δ_2 value with a magnitude of 6.2-6.7 and 6.7-7.2

| | M6.2-6.7 | | M6.7-7.2 | | M6.2-6.7(N1 論文) | |
|----------|-------------------|------------|-------------------|------------|-------------------|------------|
| | Predicted numbers | δ_2 | Predicted numbers | δ_2 | Predicted numbers | δ_2 |
| 2021/3/1 | 2.7572 | 0.063 | 1.1627 | 0.311 | 1.1432 | 0.317 |
| 2022/3/1 | 2.9762 | 0.050 | 1.2551 | 0.282 | 1.2292 | 0.289 |
| 2023/3/1 | 3.1866 | 0.040 | 1.3438 | 0.254 | 1.3114 | 0.264 |
| 2024/3/1 | 3.3900 | 0.032 | 1.4295 | 0.233 | 1.3904 | 0.242 |
| 2025/3/1 | 3.5860 | 0.027 | 1.5122 | 0.215 | 1.4662 | 0.223 |
| 2026/3/1 | 3.7760 | 0.021 | 1.5923 | 0.199 | 1.5394 | 0.210 |

文献

Nanjo, K., S. Sakai, A. Kato, H. Tsuruoka and N. Hirata. (2013), Time-dependent earthquake probability calculations for southern Kanto after the 2011M9.0 Tohoku earthquake, *Geophys. J. Int.*, doi: 10.1093/gji/ggt009.

Tsuruoka, H., N. Hirata, D. Schorlemmer, F. Euchner, K.Z. Nanjo and T.H. Jordan (2012), CSEP Testing Center and the first results of the earthquake forecast testing experiment in Japan, *Earth Planets Space*, 64, 8, 661--671.

HIST-ETAS model (e.g., Ogata, 2004)による地震活動のモデル化

Seismicity rate (event/day/degree²)

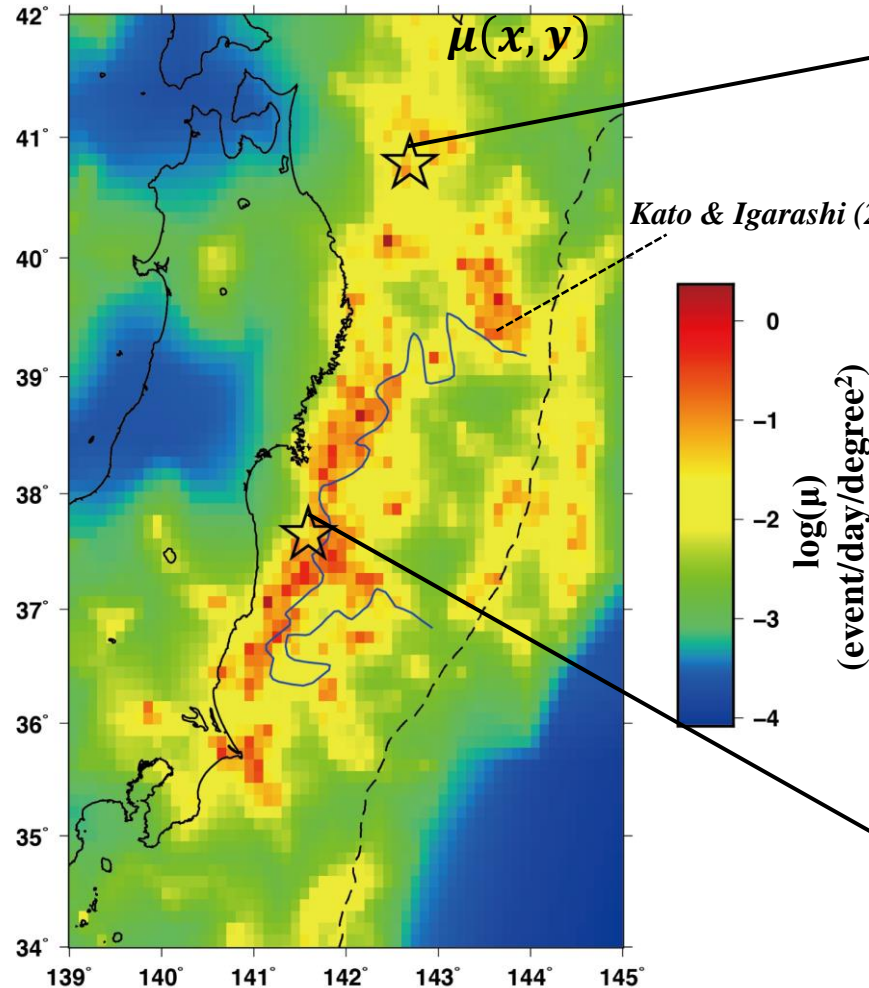
$$\lambda(t, x, y | H_t) = \mu(x, y) + \sum_{t_i < t} \frac{K(x_i, y_i)}{(t - t_i + c)^{p(x_i, y_i)}} \left[\frac{(x - x_i, y - y_i) S_i \begin{pmatrix} x - x_i \\ y - y_i \end{pmatrix}}{\exp\{\alpha(x_i, y_i)(M_i - M_c)\}} + d \right]^{-q(x_i, y_i)}$$

Background rate
(tectonic stress loading
e.g. plate motion)

Rate of aftershock
(earthquake-to-earthquake interaction)

- ・使用したカタログ
JMA一元化処理震源カタログ(M4以上 & 深さ60km以浅)
- ・パラメータの推定期間：M9発生時-2018/12/31
- ・履歴として使用したカタログ：1997/10/01-M9発生時

東北沖地震以降～2018



・Background rateは、大すべり域 (Kato & Igarashi, 2012)の端で高い傾向。

・Background rateは、時間の経過とともに減少(次頁)。

・推定したパラメータの空間分布を基にして、青森県沖と福島県沖の震央部分のBackground rateとAftershock rateを計算。
Probabilityは、それぞれの値をSeismicity rateで除して計算。

【2020/12/21 青森県沖 (M6.5)】

| | Seismicity rate (event/day/degree ²) | Probability |
|------------------------------------|--|-------------|
| Seismicity rate | 4.82e-2 | |
| Background rate | 4.73e-2 | 98% |
| (Background rate before 2011/3/11) | (2.44e-2) | |
| Aftershock rate | 8.19e-4 | 2% |

【2021/2/13 福島県沖 (M7.3)】

| | Seismicity rate (event/day/degree ²) | Probability |
|------------------------------------|--|-------------|
| Seismicity rate | 9.71e-2 | |
| Background rate | 2.96e-2 | 31% |
| (Background rate before 2011/3/11) | (1.38e-2) | |
| Aftershock rate | 6.74e-2 | 69% |

背景地震活動の個数

① 2011/3/11-2012/3/11

② 2012/3/11-2013/3/11

③ 2013/3/11-2014/3/11

④ 2014/3/11-2015/3/11

⑤ 2015/3/11-2016/3/11

⑥ 2016/3/11-2017/3/11

⑦ 2017/3/11-2018/3/11

⑧ 2018/3/11-2019/3/11

⑨ 2019/3/11-2020/3/11

Frequency
(event/ $0.1^\circ \times 0.1^\circ$)

2020/12/21

2021/02/13

東北・北海道太平洋沖における浅部超低周波地震の網羅的検出

概要

沈み込み帯のプレート境界面の巨大地震発生領域の周辺部では、通常の地震のほかに、スロー地震と呼ばれる、通常の地震よりも遅いすべり速度で断層破壊が起こる現象が発生しており、巨大地震との関連が指摘されている。本研究では、東北地方から北海道にかけての太平洋沖において、スロー地震の一種である浅部超低周波地震（以下、VLFE）を網羅的に検出し、巨大地震との時空間分布の関連性を調査した。その結果、十勝沖および岩手県沖・茨城県沖では、それぞれ2003年9月26日の十勝沖地震（Mw 8.0）と2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震（以下東北地震、Mw 9.0）の後に、それらの地震の余効すべりによるものと考えられるVLFEの発生数の急激な増加が見られた。一方、宮城県沖・福島県沖では東北地震後にVLFEの活動の静穏化が見られた。これは、宮城県沖・福島県沖が東北地震の大すべり域の内部にあたり、東北地震によって、プレート境界に蓄積していた歪みを解消したためと考えられる。また、十勝沖地震後の十勝沖・青森県沖および東北地震前の宮城県沖では、数ヶ月～1年程度の間隔のVLFEのバースト的活動が見られた。

1. はじめに

VLFEは、スロー地震の一種であり、主に20-50秒の周期で観測される。スロー地震には巨大地震発生帯のdowndip側で発生する深部スロー地震と、海域の海溝寄りで発生する浅部スロー地震が存在する。東北地方から北海道にかけての太平洋沖では、2003年に十勝沖地震、2011年に東北地方太平洋沖地震が発生しているほか、先行研究で浅部VLFEが観測されている。本研究では、任意の位置に仮想震源を設定できるという利点から、3次元速度構造モデルを仮定した理論波形をテンプレートとしたマッチドフィルター法を用いて、東北地方から北海道にかけての太平洋沖で網羅的にVLFEを検出し、当該地域における巨大地震とスロー地震の時空間的関連性を調査した。

2. VLFEの検出方法

本研究では、2003年1月から2018年7月までのF-netの波形データに、0.02-0.05 Hzのバンドパスフィルターを適用したものをを用いた。東北地方から北海道にかけての太平洋沖のプレート境界面上に123点の仮想震源グリッドを設定し、プレート境界面の形状および太平洋プレートの沈み込み方向から計算された発震機構解を仮定して、各仮想震源から近い10個のF-net観測点で理論波形を計算し、テンプレートとした（図1）。理論波形は3次元不均質構造モデルを仮定し、3次元差分法シミュレーションによって計算した。テンプレートと波形データとの相関係数を1秒おきに計算し、相関係数の全成分の平均が、解析期間における中央絶対偏差の9倍を超えた時間にイベントを検出した（図2）。

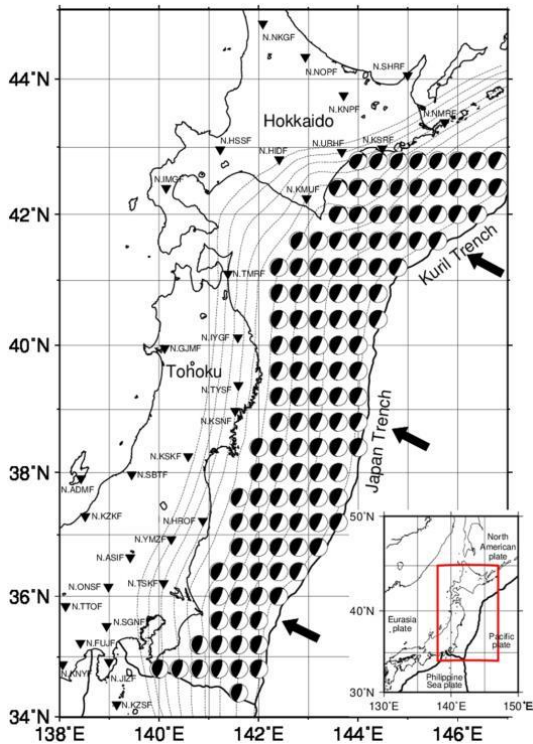


図 1. テンプレート波形計算に用いた仮想震源グリッドの位置と震源メカニズム解。

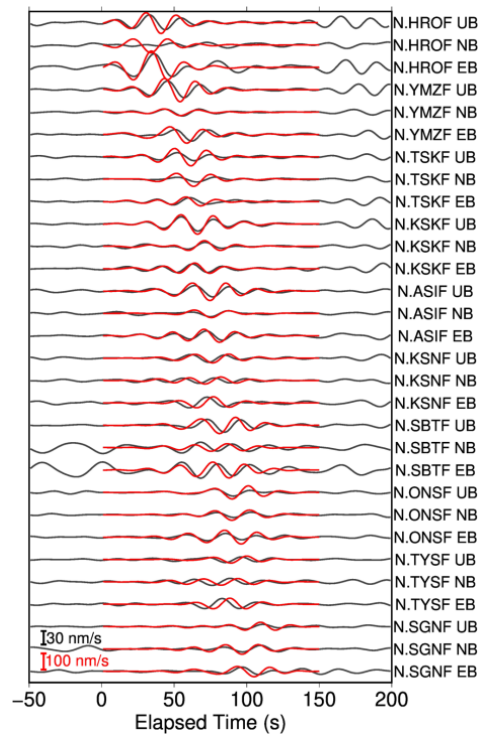


図 2. 142.0°N、36.8°の仮想震源で、2012/5/5 9:35:52 にイベントを検出した時間の理論波形（赤色）と観測波形（黒色）。

3. 結果・議論

3-1. 大地震の余効すべりに伴う VLFE 活動の活発化

図 3 に各仮想震源グリッドにおける VLFE の検出個数、図 4 に各地域の VLFE の検出個数の、解析開始日からの累積個数を示す。大地震の発生後、大すべり域の周辺部で、余効すべりよるものと考えられる VLFE の発生数の急激な増加が見られる。このような増加は、2003 年十勝沖地震後の十勝沖、2008 年福島県沖地震後の福島県沖、2011 年東北地震後の岩手県沖・茨城県沖で見られた。岩手県沖では、Mw 6-7 クラスの東北地震の余震によるものと考えられる VLFE 活動の活発化も見られた。十勝沖と、岩手県沖・茨城県沖の VLFE が活発な領域は、それぞれ測地的データから求められた十勝沖地震と東北地震の余効すべりの領域と重なっている（図 5・図 6）。

3-2. 大地震のすべり域における VLFE 活動の静穏化

宮城県沖・福島県沖のように、2011 年東北地震で大きくすべった領域内では、東北地震後は VLFE の活動は低調である。これは、この領域では東北地震によってプレート境界に蓄積していた歪みが解消されたためと考えられる。東北地震の大すべり域内で地震後に静穏化し、大すべり域の外側で地震後に活発化するという VLFE 活動の特徴は、先行研究で調査されたくり返し地震の活動と類似している（図 7）。

3-3. VLFE の間欠的なバースト的活動

十勝沖地震後の十勝沖・青森県沖や、東北地震後の宮城県沖では、数ヶ月～1 年程度の間隔の VLFE のバースト的活動が見られる。これはプレート間のわずかなすべりを反映しているかもしれない。

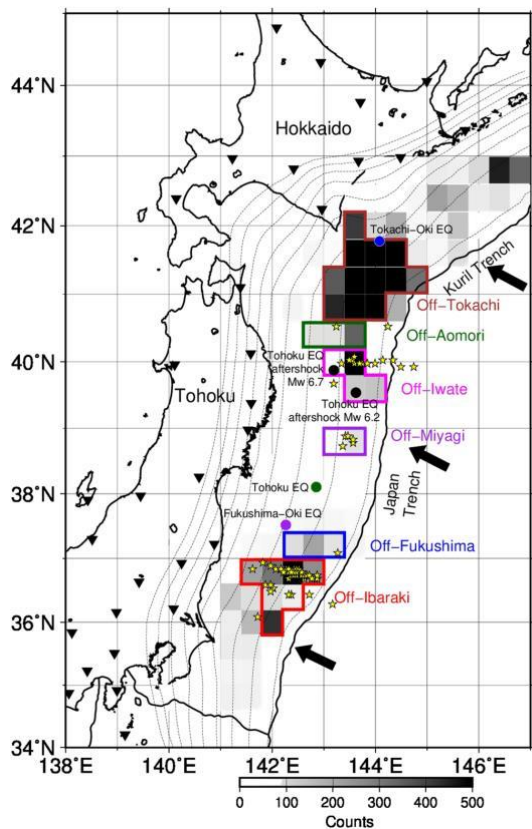


図 3. 各仮想震源グリッドにおける VLFE の検出個数。

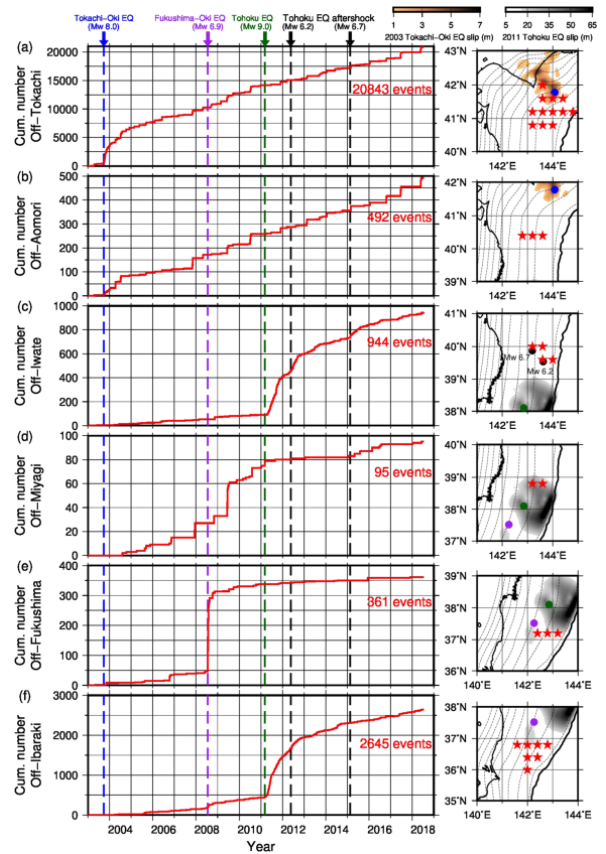


図 4. 各地域の VLFE の累積個数の時間変化。

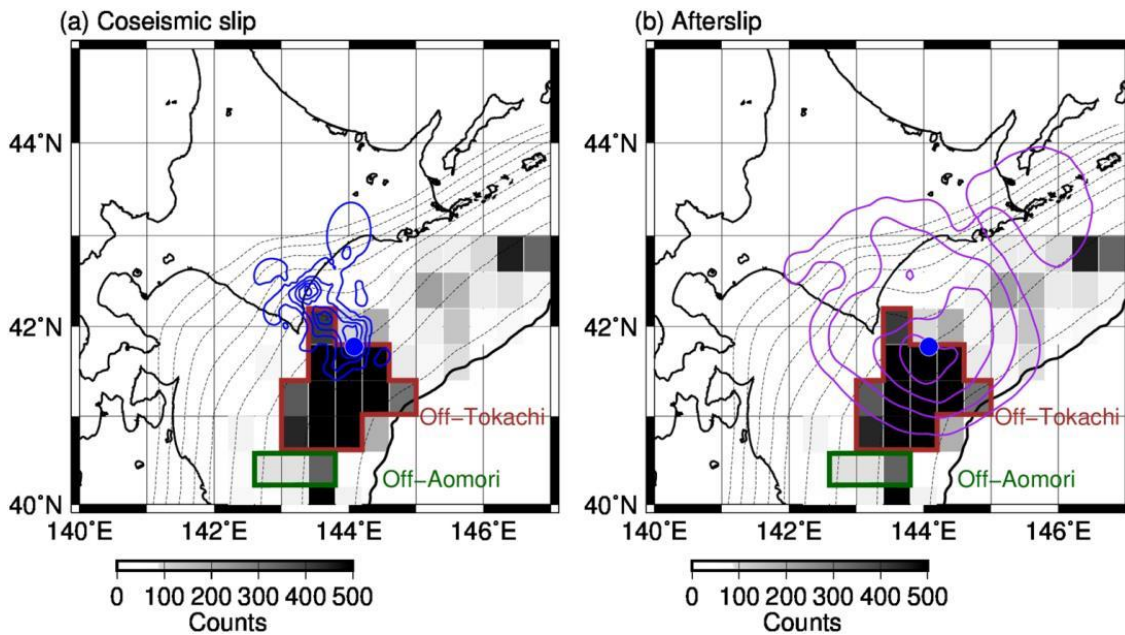


図 5. 測地的データから求められた、十勝沖地震の (a) 本震 (青色のコンター、1 m 間隔、Yagi, 2004) と (b) 余効すべり (紫色のコンター、0.2 m 間隔、Uchida et al., 2009) のすべり分布と VLFE の発生領域。

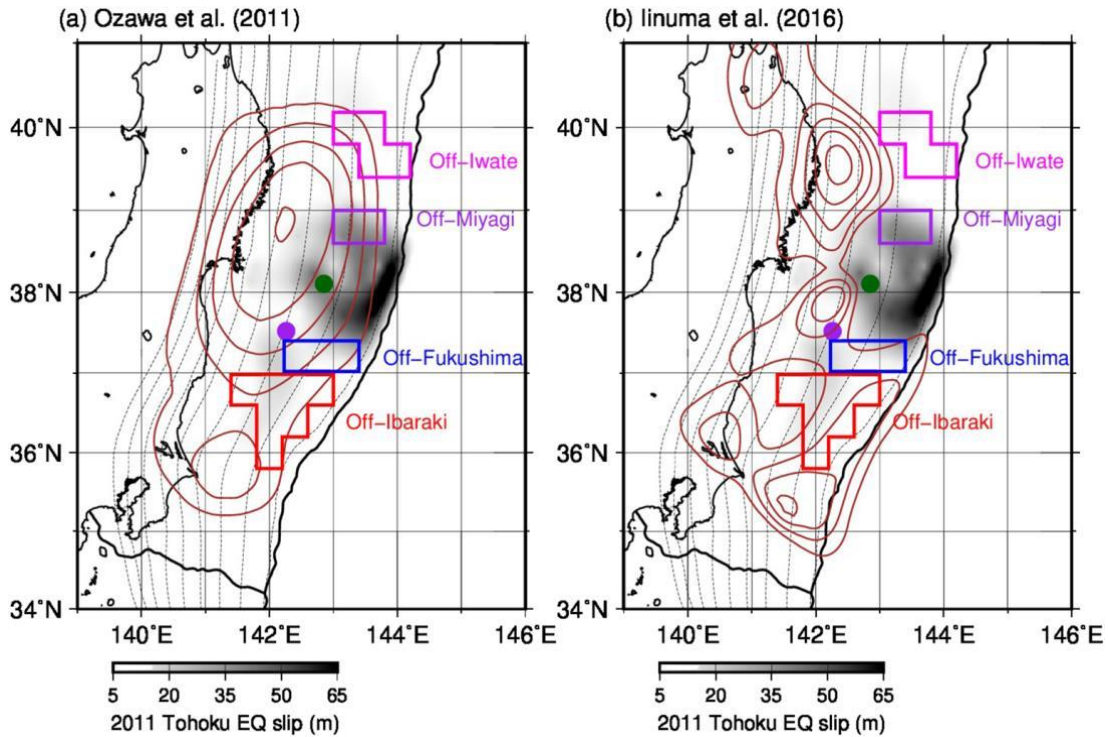


図6. 測地的データから求められた、東北地震の余効すべり（茶色のコンター、a: Ozawa et al., 2011、b: Iinuma et al., 2016）のすべり分布と VLFE の発生領域。

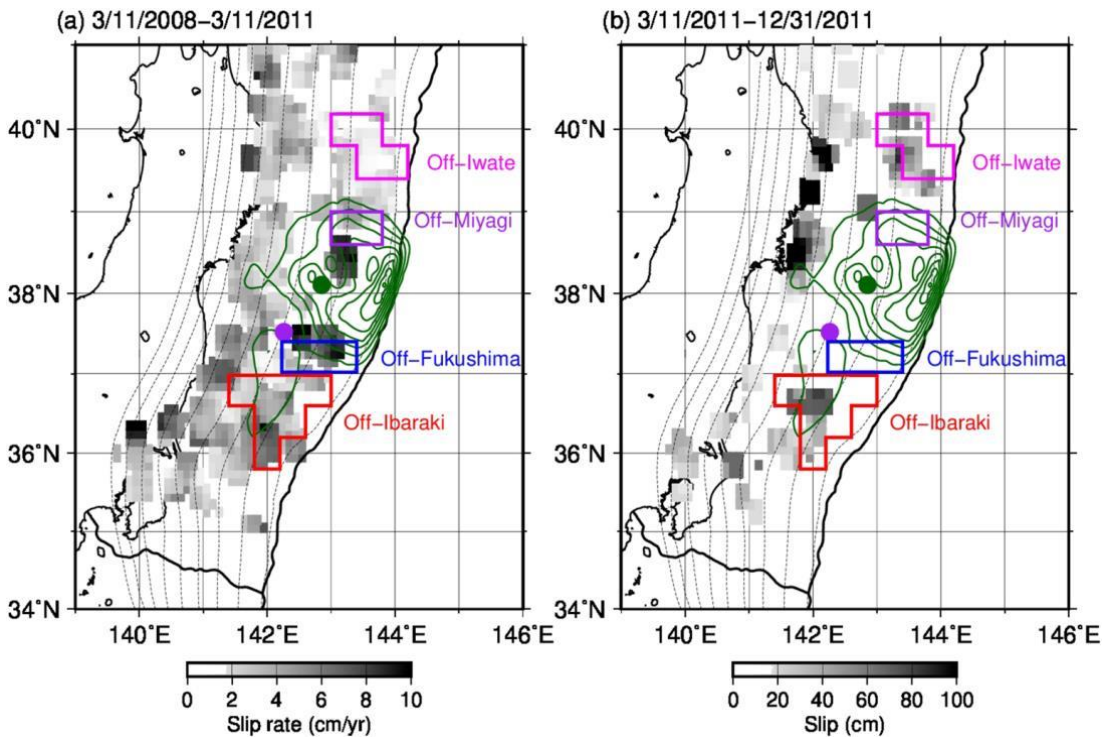


図7. 東北沖のくり返し地震の (a) 東北地震前および (b) 東北地震後のすべり量、東北地震の本震のすべり分布（緑色のコンター、10 m 間隔、Iinuma et al., 2012）と VLFE の発生領域。

5. 結論

図8に示すように、VLFEの活動は、大地震のすべり域の内部では地震後に静穏化し、すべり域の外部では地震後に活発化した。このように、VLFE活動と巨大地震のすべり域の時空間的対応が見られたほか、十勝沖地震後の十勝沖・青森県沖や、東北地震後の宮城県沖では、数ヶ月～1年程度の間隔のVLFEのバースト的活動が見られた。

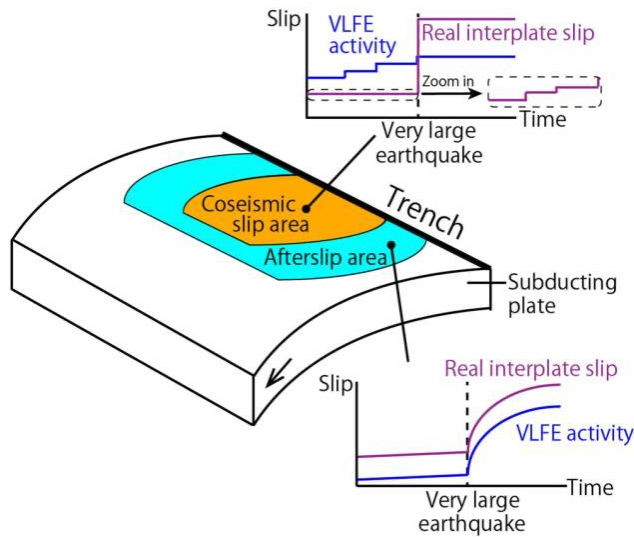


図8. VLFE活動と巨大地震のすべり域の時空間的対応。

(馬場慧)

文献

Baba, S., Takeo, A., Obara, K., Matsuzawa, T., & Maeda, T. (2020). Comprehensive detection of very low frequency earthquakes off the Hokkaido and Tohoku Pacific coasts, Northeastern Japan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125, e2019JB017988. <https://doi.org/10.1029/2019JB017988>