

11 - 8 北海道東方沖の相対的地震活動度の静穏化のその後： 有意検出から 10 年後の現状

Current status of the Relative Quiescence of the seismicity off the east coast of Hokkaido: a decade after its significance was revealed

松浦 律子・石辺 岳男 (公益財団法人地震予知総合研究振興会)

橋間 昭徳 (東京学芸大学)

Ritsuko S. Matsu'ura, Takeo Ishibe (ADEP)

Akinori Hashima (Tokyo Gakugei Univ.)

予知連会報 101 号¹⁾に報告された、千島海溝西端部、えりも岬～根室半島～色丹島の沖合領域の地震活動度の静穏化は、現地の住民にとっては 2010 年頃既に体感で近地の有感地震数の減少として認知される程顕著なものであったが、この領域は国境に近く必然的に地震観測網の北東端部にあたるため、地震規模レンジの広い長期均質データが得難い。標準 ETAS モデルからの乖離である相対的静穏化として開始期が 2009 年初頃と統計的に有意検出できたのは、2014 年である。この海域では 17 世紀に超巨大プレート間地震が発生したと津波堆積物から推定されており、Matsu'ura et al.²⁾ や岡村・行谷³⁾ は 1611 年慶長三陸津波が千島海溝での 17 世紀の超巨大地震に該当して既に 400 年以上経過していると考えている。例え 1611 年が該当しなくとも、南海トラフの宝永地震よりも前回からの経過年数は十分大きいと推定される。この領域は日本の他の何処よりも巨大地震の切迫性が高いので、この静穏化は十分注視され、実際海底地震計による臨時観測等が実施されるなど、静穏化検出は学術的注目喚起に貢献できた。

今回は前回から 5 年経過し、2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震 (以下 3.11 と略) 発生から 12 年経過して、3.11 発生後の周辺部の多大な地震活動等の変化も定常的になりつつあるので、再度 ETAS モデルを用いた点過程解析で、前回まだ変化点導入ペナルティーを大きく凌駕していなかった 2015 年末頃の静穏化の終了=活動度の回復の有意性に関して検討した。解析データは前回と同様、第 1 図の黒破線で示された範囲に分布する気象庁震源である。現在 2021 年までしか利用できない ISC 震源とも比較したが、ISC 震源との差は震央分布と深さのばらつきが気象庁震源の方が若干大きい程度であり、大きい差異はなかった。

尚、1994 年 10 月の北海道東方沖地震 (M8.2:スラブ内地震) のような、2003 年十勝沖地震 (M8.0:プレート境界地震) とは異なる地震タイプを M5.7 以上の全地震で分離してターゲットのプレート境界地震だけの解析が実施できないこと、震源の深さ精度が時期によって異なること、から領域内の深さ 120km まで全ての地震を対象とした。1919 年以降の気象庁カタログの N-T 図、M-T 図 (第 2 図) および規模別頻度分布 (第 3 図) から、前回同様 1965 年 7 月以降の M5.7 以上のデータを用いた。また、2023 年 3 月以降解析領域に M5.7 以上の地震は 2023 年 12 月 20 日現在まで 1 個も発生していないが、計算は 2023 年 3 月末日を終点とした期間で実施したものを示す (第 1 表)。

点過程解析のモデルは第 4 図に示した 3 種類を中心に検討した。静穏化の始期と終期を動かして AIC が小さい主な物を第 1 表に纏めた。有感地震数変化で判る程の静穏化であったので、(1) の活動低下が無いとするモデルは (2) や (3) の静穏化が有ったモデルよりも AIC は十分大きくなる。しかし静穏化の終了は、前回同様圧倒的な有意性は示していない。データと AIC 最小のモデルとの比較を第 5 図に示す。第 5 図最下段のモデルと実データとの乖離度合いを見ると、右端の最近は

2017 年頃に比べると地震活動の低調さは 2/3 程度には減少しているがまだ -1σ 未満で停滞している。

AIC 最小のモデルは 2009 年初から 2015 年末の丸 7 年間、背景活動度がそれ以前の 2 割以下に低下して ETAS 効果も見られなかったが、2016 年以降は 2008 年末以前と同程度の背景活動度と ETAS 効果とが復活している、というモデルとなる。しかしながら、これは AIC の変化点導入ペナルティーを統計理論値で最低の 6 とした場合であり、地震数を考慮した場合のペナルティーの取り方によっては、静穏化が現在も継続中である、とするモデルとの差は十分に有意ではない。また実際に 2016 年以降最近まで M6 程度の地震が散発的に極小数発生してはいるものの、活動の回復は極めて弱い。一方、解析領域より北東側のロシア領の沿岸部沖合では、既に ETAS 効果を伴った活動が近年見られて、所謂ドーナツ状態が出現している。今回は、3.11 の影響を定性的に「東北日本東側沿岸部一帯のプレート間地震が消費するひずみエネルギーが殆ど使われた」ことによる抑制傾向と推測して、地震活動度の回復がマスクされる可能性を懸念していたが、現実は逆になっている。

そこで今回は、定量的に 3.11 の地震時の弾性効果とその後長期的に働く粘弾性効果とを検討した。CAMP モデルのプレート形状⁴⁾で同じ構造を用いて産出された 3.11 の震源モデル⁵⁾を用いて、3.11 の地震時の弾性的および地震後百年間の粘弾性的影響を、厚さ 60km の弾性体が粘性率 10^{19}Pa s の半無限粘弾性体の上に載っている水平二層構造で計算⁶⁾した(第 6 図, 第 7 図)。受け手の断層モデルを、解析領域で代表的なプレート境界地震である 2003 年十勝沖地震の F-NET によるメカニズム解⁷⁾と同一として、深さ 10km と 30km と 2 種類で、地震時の弾性的影響だけでなく、地震後の粘弾性緩和に関して百年後まで試算した。その結果、数 kPa ~ 十数 Pa 程度の発生促進の影響があることが判明した。3.11 は従来の日本周辺の大地震とは桁違いに大きく、千島海溝沿いも含めて東北日本に影響を与えている。定量的には、3.11 後の最近 12 年間は余効滑りまで考慮したとしても、千島海溝西端部周辺はむしろプレート境界地震の発生が促進されている。にも関わらず ETAS 解析でも 2016 年以降の地震活動度の回復が鈍いということは、17 世紀型のような地震の準備過程としての静穏化プロセスが現在も未了である可能性が高い。またその準備過程は十数 Pa 程度の応力変化相当以上の影響があることになる。

この様な別の活動促進要因が徐々に増加傾向にある千島海溝西端部では、3.11 前の東北地方のように、静穏化の終了が明瞭に検出できるかは不明である。また地震活動が低調である、ということは、将来の震源域の物理的状态を地震活動から検出する事は困難であるということの意味する。幸い解析領域より東側のウルップ島などの沖合領域では既に M6 の地震などが散発的ではあるが発生している。このような地震の波が、想定される震源域を通過してくる波形などを色々な期間で比較するなど、能動的な震源域の物理的状态の時期による差異の把握作業を工夫しつつ監視する必要がある。

また、当該地域は、そもそもプレート境界の巨大地震の中で日本付近では最も切迫性が高い領域であるので、大きい揺れを感じたら、近隣住民は速やかに高台に避難するなど、慎重な行動が今後倦まず弛まず継続されるような努力も理学の専門家として関係者に奨励し続ける必要がある。

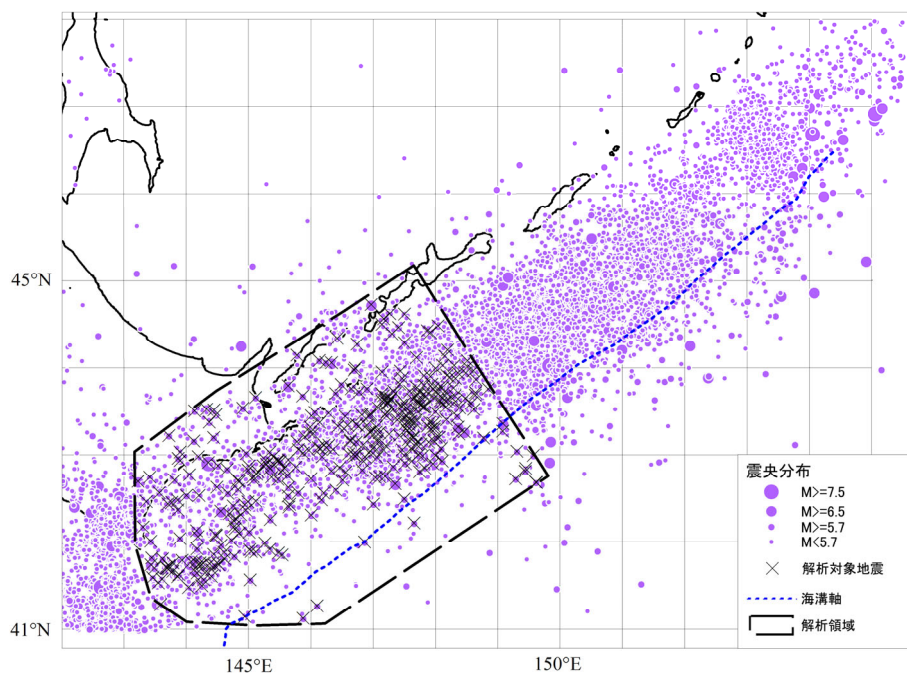
謝辞

5 年ぶりの再検討の機会を頂き、図らずも粘弾性的に 2011 年以降継続的に発生が促進されていることを示せた。堀高峰氏ほか予知連の方々には感謝する。1952 年十勝沖地震の氷交じりの津波被

害の災害教訓を拾って下さって、困難を伴う冬季での津波避難訓練等を北海道各地で実現させつつある国交省や地元自治体・住民など関係者の賢明な努力にも感謝する。そういった現実的備えの進展こそが、年単位で注目地点を抽出するのがせいぜいである地震活動度のデータ検討による予知研究の継続に意義を与えるものである。

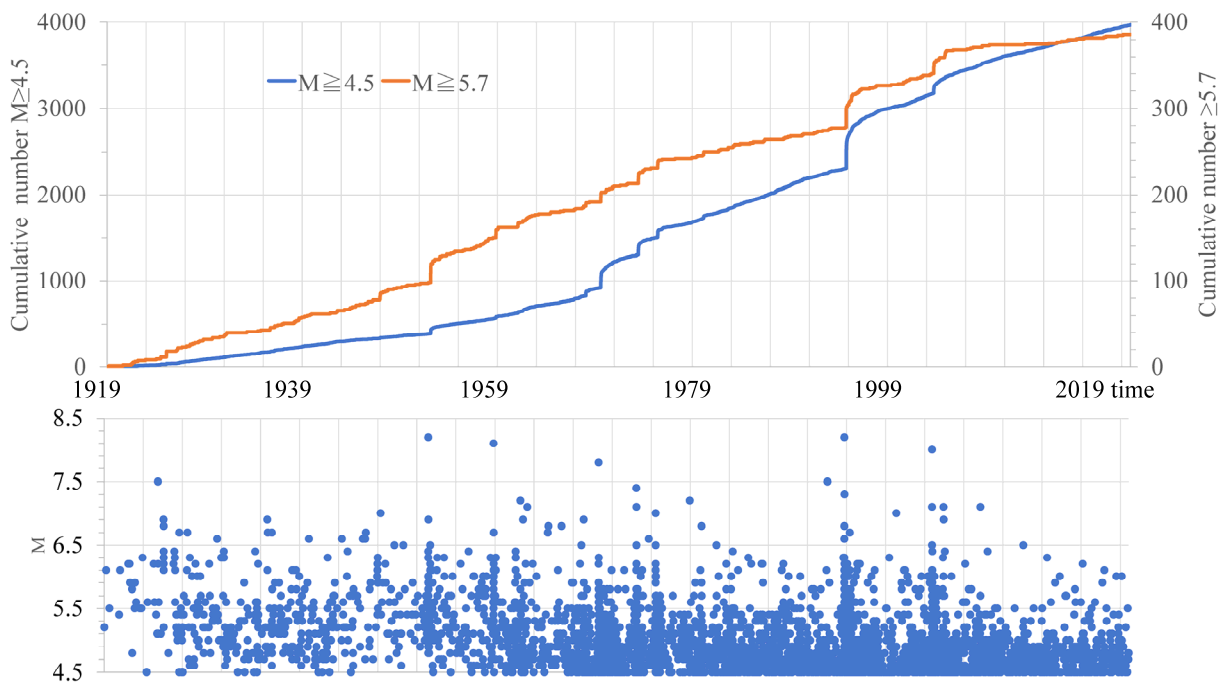
参考文献

- 1) Matsu'ura (2019), *予知連会報*, **101**, 475-483.
- 2) Matsu'ura et al. (2017), IAG-IASPEI2017 abstract book, S04-2-02, p. 695.
- 3) Okamura and Namegaya (2011), *活断層・古地震研究報告*, **11**, 15-20.
- 4) Hashimoto et al. (2004), *Pure Appl. Geophys.*, **161**, 2053-2068.
- 5) Hashimoto et al. (2012), *Geophys. J. Int.*, **189**, 1-5, doi: 10.1111/j.1365-246X.2011.05368.x
- 6) Hashima et al. (2014), *Pure Appl. Geophys.*, **171**, 1669-1693.
- 7) https://www.fnet.bosai.go.jp/event/tdmt.php?_id=20030925194900&LANG=ja (2023May01 閲覧)



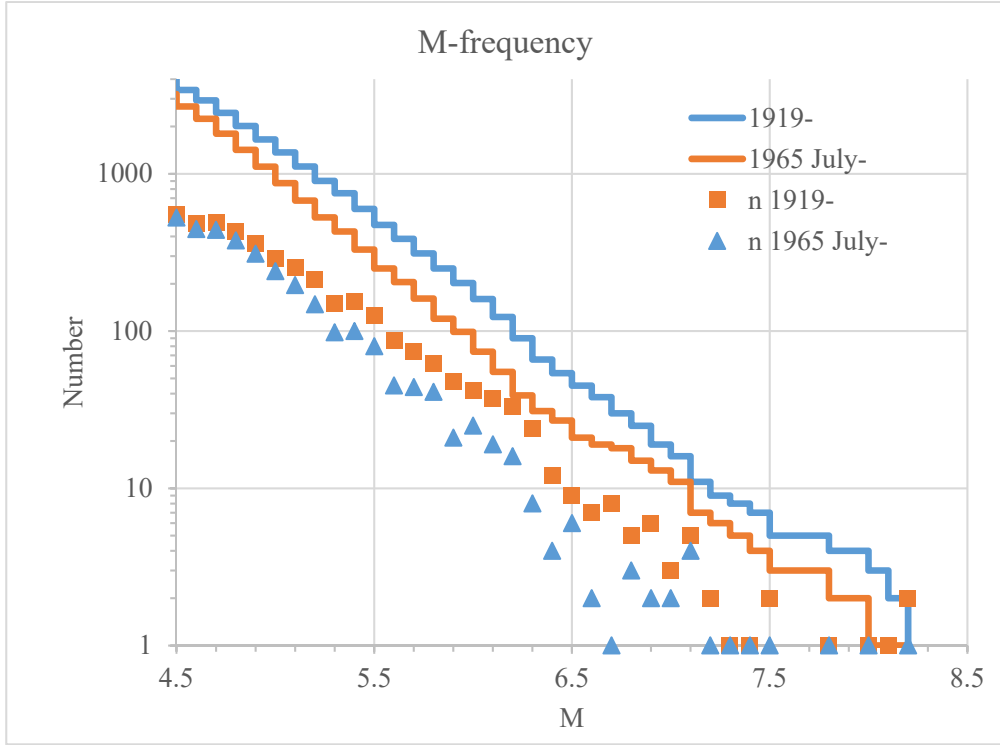
第 1 図 解析領域周辺の気象庁震央分布と解析対象地震。M4.5 以上の 1919 年～2023 年 11 月 19 日の気象庁震源(気象庁ウェブサイトから 2023 年 11 月 21 日取得)の震央を M に応じた大きさの円で表示。深さは 120km 以下。M5.7 以上の点過程解析対象地震には黒×で表示。

Fig. 1 The analyzed area and distribution of JMA epicenters around it. $M \geq 4.5$ earthquakes of 120 km or shallower depths from 1919 to Nov. 19, 2023 in the JMA catalog on Nov. 21, 2023 are shown. Chishima trench and the analyzed area are also shown.



第 2 図 第 1 図の解析エリア内の累積地震数と M-T。M の下限は 4.5 (左縦軸) と 5.7 (右縦軸) とを示した。

Fig. 2 Cumulative numbers of earthquakes in the analyzed area shown in Fig. 1. M-T is also shown. Cumulative numbers of $M_{th4.5}$ and $M_{th5.7}$ are shown for left and right axes, respectively.



第 3 図 第 2 図の地震の規模別頻度分布. 気象庁カタログの全期間と解析した 1965 年 7 月以降の二期を示した.
 Fig. 3 Frequency of magnitude in the analyzed area. Blue indicates data from 1919 to Nov. 19, 2023, and orange indicates data from July 1965, after WWSSN observation had started.

$$\lambda_o(t) = \mu + \sum_i^N \kappa \exp\{\alpha(M_i - M_{th})\} / (t - t_i + c)^p \quad (1)$$

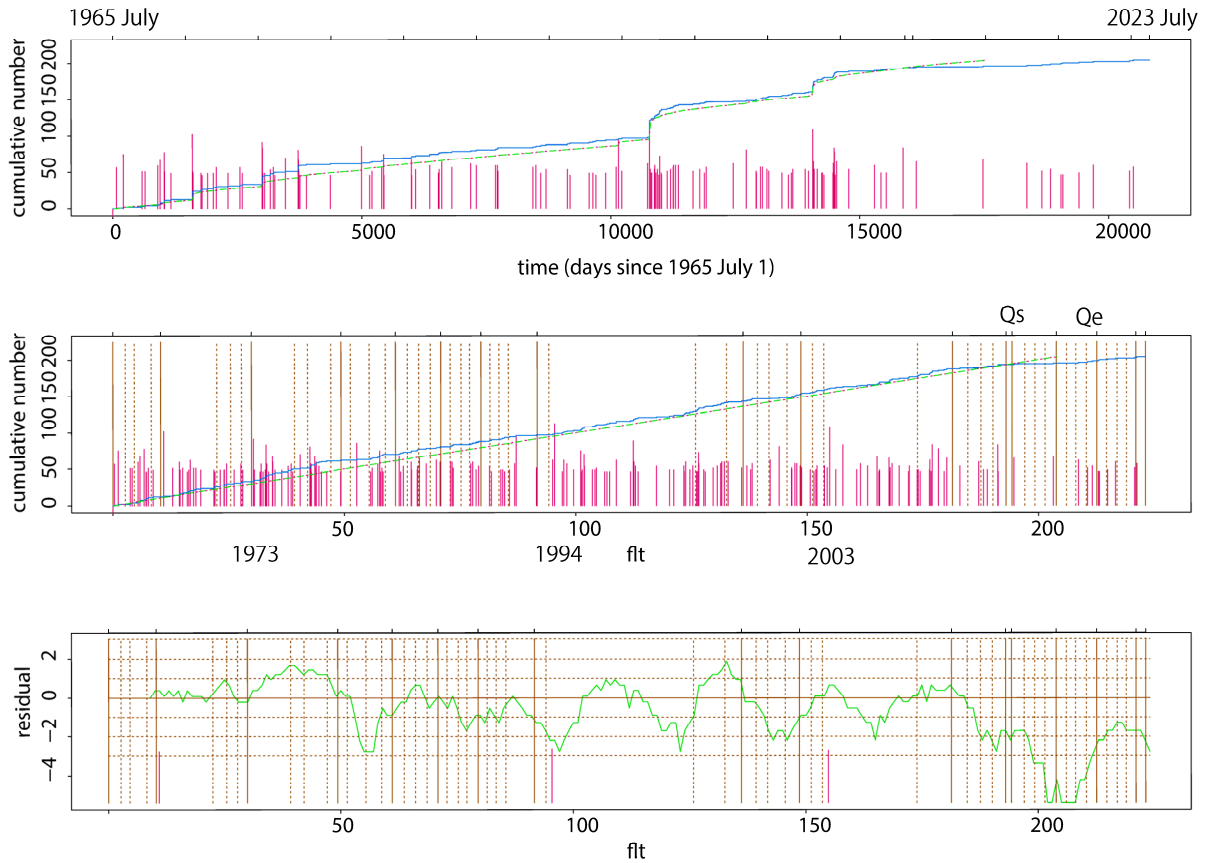
$$\lambda_q(t) = \begin{cases} \mu_o + \sum_i^N \frac{\kappa \exp\{\alpha(M_i - M_{th})\}}{(t - t_i + c)^p} & \text{where } t \leq Q_s, t > Q_e \\ \mu_q + \sum_i^N \frac{\kappa \exp\{\alpha(M_i - M_{th})\}}{(t - t_i + c)^p} & \text{where } Q_e \geq t > Q_s \end{cases} \quad (2)$$

$$\lambda_{q'}(t) = \begin{cases} \mu_o + \sum_i^N \frac{\kappa \exp\{\alpha(M_i - M_{th})\}}{(t - t_i + c)^p} & \text{where } t \leq Q_s, t > Q_e \\ \mu_{q'} & \text{where } Q_e \geq t > Q_s \end{cases} \quad (3)$$

If $\{Q_s, Q_e\}$ is short, $AIC(\lambda_{q'})$ is often more efficient.

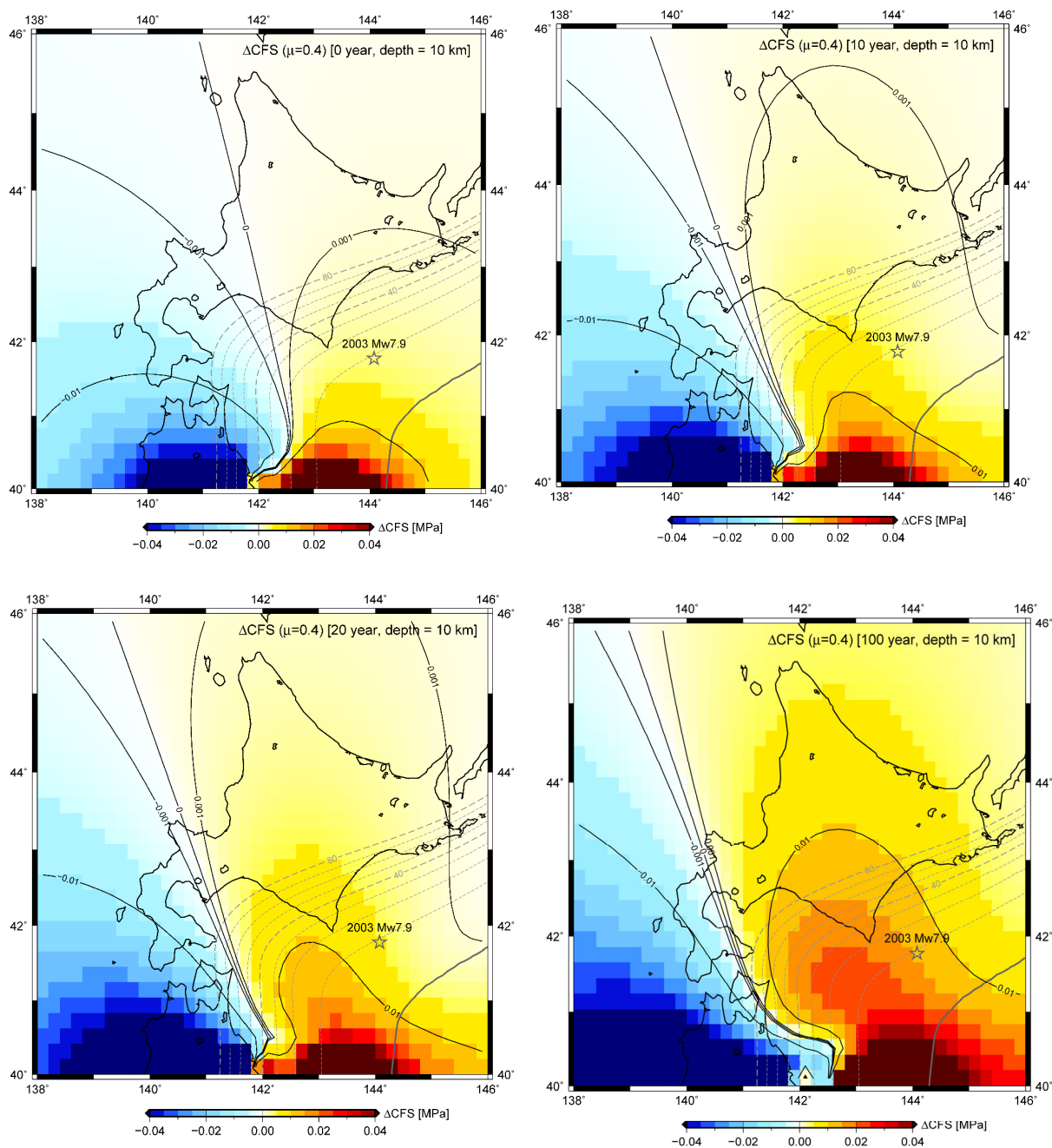
第 4 図 検討した ETAS モデルの地震発生率 $\lambda(t)$. Q_s, Q_e : 静穏化の開始時と終了時 $\mu_o, \mu_q, \mu_{q'}$: 通常および静穏期の背景発生率モデル (1) が活動度変化なしの単純モデル, (2), (3) は, 静穏期に ETAS 効果が有る場合と無い場合.

Fig. 4 Occurrence rates [$\lambda(t)$] of ETAS models examined. Q_s, Q_e : Start and end times of a quiescence term. $\mu_o, \mu_q, \mu_{q'}$: background rates of each term. (1): a simple ETAS model, (2), (3): quiescence models with/without the ETAS effect.



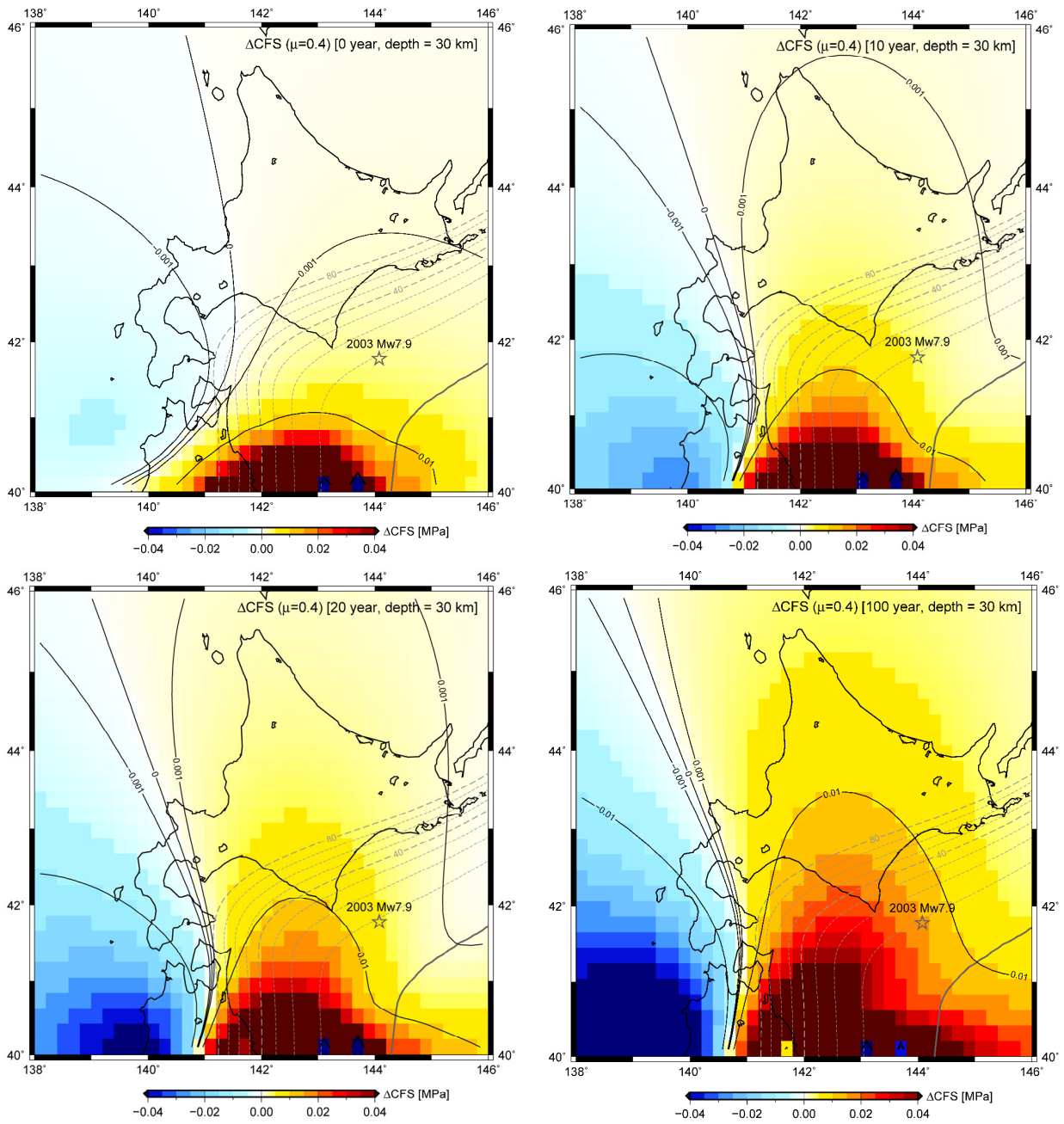
第 5 図 表 1 中の最小 AIC モデルと実際のデータの対比。時間軸は上段が通常，中・下段は Frequency-linearized time (flt)。上・中段は累積地震数（青実線）とモデルの予測値（破線）。赤棒は発生地震の M を示す。中・下段には実時間の 1 年・4 年を破線・実線で示す。下段は、5 flt 毎のモデルと実データの数の差。モデルと完全に一致すれば 0，最大の静穏化は -5 が下限な一方，活発化の上限は ∞ の片ぶれ分布であるものを、 $N(0,1)$ の正規分布に変換して表示したもの。0 がモデルとの完全合致，上は活発化，下は静穏化を示す。 Q_s 以降は -1σ 未満が現在まで継続している。

Fig. 5 Minimum AIC model in Table 1 versus actual data. The time axis of the upper panel is a normal time, while those in the middle and lower panels are the frequency-linearized time (flt). The upper and middle panels show the cumulative number of earthquakes (solid blue line) and the model predictions (dashed line). Red bars indicate M of each earthquake. In the middle and lower panels, one and four years of real time are shown by dashed and solid lines, respectively. The lower panel shows the difference between the model and the number of real data at every 5-flt. Since the difference shows the one-sided distribution with 0 for perfect agreement with the model, -5 for the maximum quiescence, and ∞ for some extreme activation, it is converted to the value distributed according to $N(0,1)$. In this panel, positive shows activation, and the negative shows the quiescence. After Q_s , negative values smaller than -1σ have lasted even after the detected Q_e .



第 6 図 厚さ 60km の弾性層が半無限粘弾性体の上にある二層構造モデルで計算した 3.11 による弾性・粘弾性変化による Δ CFS の値の分布。深さ 10 km で 2003 年十勝沖地震の F-NET によるメカニズムと同じ走向、傾斜、レーク角の断層に対する各地点での値。摩擦係数は 0.4、粘弾性率 10^{19} Pa s の場合。上段左、右、下段左、右に地震時、10 年後、20 年後、100 年後。静穏化していた領域では 2011 年以降プレート境界型の地震発生を促進する影響が徐々に増加している方向にある。

Fig. 6 Distribution of Δ CFS values due to elastic and viscoelastic changes caused by 3.11. The two-layer structure of the 60-km thick elastic layer lying on the semi-infinite viscoelastic body of 10^{19} Pa s is used for the calculation. The friction coefficient is set as 0.4. Faults of the same strike, dip, and rake angles as those of the F-Net solution of the 2003 off Tokachi earthquake are assumed as the receiver fault at each point of 10-km depth. Coseismic, 10 years later, 20 years later, and 100 years later are shown. The area concerned has been in the induced zone since 2011, and will be for years after.



第 7 図 深さ 30 km の場合の ΔCFS の値の分布. 深さ以外の計算条件は図 6 参照

Fig. 7 Distribution of ΔCFS values at 30-km depth. For other conditions, see the caption of Fig. 6.

第 1 表 各モデルの最小 AIC パラメータ値と AIC

Table 1 Minimum AIC for each set of (Q_s , Q_e), and parameter values of each model.
 Np: number of parameters CP: number of change points of a model

Q_s	Q_e	μ	κ	α	c	ρ	μ_q	μ_r	Np	CP	AIC
		$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-8}$		$\times 10^{-3}$		$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$			
No Change		2.41	1500	1.34	16.8	1.015	—	—	5	—	1665.8
2008/10/20	continuing	4.49	1.28	2.32	12.9	1.044	2.27	—	6	1	1620.6
2005/1/1	2016/1/1	4.11	1.00	2.34	3.04	0.997	2.38	= Q_s 前	6	2	1645.7
2009/1/1	2016/1/1	4.15	0.998	2.35	5.47	1.000	0.78	= Q_s 前	6	2	1614.7
2009/7/1	2016/1/1	2.61	1.95	2.21	4.68	0.935	0.84	= Q_s 前	6	2	1650.7
2009/7/1	2016/7/1	4.03	1.03	2.32	2.98	0.953	1.17	= Q_s 前	6	2	1638.0