

12-4 北海道東方沖の相対的地震活動度の静穏化と現状

Relative quiescence and the current status of the seismicity east off Hokkaido

松浦 律子 (公益財団法人地震予知総合研究振興会)

Ritsuko S. Matsu'ura (Association for the Development of Earthquake Prediction)

地震活動度の相対的静穏化は、通常状態が明瞭であった余震活動中でまず示された¹⁾。二次余震を伴う様な隣接地域を破壊する大粒の余震発生前には、余震活動度の静穏化とその回復が多例に共通していた。この性質はリアルタイムの余震監視実験に用いられ、実際に1995年兵庫県南部地震の直後2時間を除けば規模が最大だったM4.7の余震(1995年当時、現在はM5.1)発生の事前予測成功という成果も挙げた²⁾。

巨大地震の発生前に震源域周辺で地震活動度が年単位で低下する現象は、古くから第二種空白域として定性的に報告されていた³⁾。余震の活動度の場合には注目すべき領域は本震周辺に特定可能であり、時間的には大森-宇津公式からの乖離を監視すれば良い。着目すべき場所や期間が地震活動度以外の独立な情報から絞り込めない状態では、長期・広域での地震活動度の良いモデルである最尤ETASモデルからの乖離⁴⁾を用いれば、余震活動中と同様に活動度の変化を定量的に扱える。これが地震活動度の相対的变化の検出であり、この手法は大地震前の静穏化を、場所や空間選択の恣意性を防ぎ、イベント発生前に統計的有意性を客観的に明白にでき、「後知」でなく予め研究的に注目すべき領域を検出するには有用である。実際に東北地方沖の日本海溝沿いの広域には、2007年には有感地震数の減少として生データですら注目された顕著な地震活動度の低下が出現したが、2008年にはそれが1885年以来の $M \geq 6.0$ のカタログでも顕著なものであることが報告され、1793年や1897年8月に類似するM8程度の地震の再来が切迫していると指摘されていた⁵⁾。実際には2011年に、破壊開始点は指摘エリア内であったものの、規模がはるかに大きい東北地方太平洋沖地震が発生した。

2010年には、今度は北海道東部の十勝沖から択捉島沖にかけての千島海溝沿いの広範囲で地震活動度の低下が、やはり現地での有感地震数の減少として注目されるようになった。北海道の東方沖エリアは日本の地震観測網の端にあたり、明治から戦前の地震カタログでは、東北沖のような解析がM6以上でも実施できない。時期によるデータの粗密を確認するとWWSSN観測網が国際的に整備された1965年以降の半世紀分であれば、定量解析が可能であった。北海道東方沖の領域の相対的静穏化が、半世紀の中では唯一2009年頃から正規分布換算で 3σ 以上有意になっていることが2014年には報告された⁶⁾。

気象庁の地震カタログは遡って不定期に改訂されるため、今回は、2018年7月初旬に取得した気象庁の地震カタログセットを使って1965年7月~2018年6月の53年間の第1図に示した領域の $M \geq 5.7$ の地震を用いて、相対的静穏化報告以降最近の4年間も加えた現時点での状況を確認した⁷⁾。この領域は日本の観測網の端であるため、震源深さに関わらずデータを用いたので、解析データは198km以浅である。第2図に解析範囲の1923年以降のカタログの累積地震数とM-T図を、第3図に規模別頻度分布を示す。

第4図には全期間53年間で同一のETASモデルに適合=地震活動度の変化が無いとした場合の最尤解と実際の地震発生とを示す。期間中1994年北海道東方沖地震や2003年十勝沖地震の様な大規模地震後はETAS効果でflt (frequency-linearized time : 表1注参照) 時間軸は実時間より伸長する。

ETAS 効果が低い時期は実時間にほぼ比例する。データとよく合致した ETAS モデルから求めた ft 軸の n 区間内には、平均で n 個の地震が発生する。例えば $n=10$ の ft 期間中に実際の発生した地震数と期間長との差を求め、Wilson-Hilferty 変換で標準ガウス分布に変換すれば、相対的な地震活動度変化が見易くなる。この地域で $M \geq 5.7$ で $n=10$ は実時間で平均 2 年半程度の期間に相当する。53 年間で唯一 3σ を越えて静穏側に振れている期間の開始と終了時期とを求めるために、活動度の低下時期 T_q を導入したモデル、更に回復した時期 T_r を導入したモデルを検討すると、表 1 のように静穏化が 2008 年 10 月～2015 年 6 月末と 7 年弱見られ、現在は回復して 3 年以上経過しているとするモデルが最適であった(第 5 図)。判断には累積地震数に変化点を導入する際の AIC のペナルティとして理論値の 6^8 を用いた。

今回の解析から、北海道東部沖合では有意な静穏化が長期間出現し、現在は回復したと判断できる状態にあることが判った。相対的静穏化からは、着目すべき領域と大地震の切迫性とが検出できるだけで、これ以上場所や規模、発生時期の絞り込みは他の情報に依るほかない。当該地域の中心である根室半島沖では 1894 年根室半島沖以後は、やや規模が小さい 1973 年根室半島沖地震しか発生しておらず、M8 程度の地震発生の可能性は高い。さらに 17 世紀型と呼ばれ発生間隔が 400 年程度とされる、釧路等北海道東部広域に津波浸水痕跡を残した巨大地震が 1611 年慶長三陸地震である可能性が極めて高い⁹⁾ことから、こちらも切迫性が高いと言える。従って地震学界は北海道東部に関して早急に能動的な現在の当該領域の物理的な場の状態把握を推進すべきである。特に地殻変動や波形を用いた検討が望ましい。また、この地域で巨大なプレート間地震が発生すれば、北海道東部に加えて青森や岩手を始め、東北地方東岸にも大津波が及ぶことを一般に広く周知して、今度こそ早めの避難行動が東日本の太平洋沿岸部で徹底実践されるような啓蒙や広報の努力も必要である。

念のため今回使用したと同じ時点の 1923 年以降の気象庁カタログと 1885 年から 1922 年までの宇津カタログとを用いて、1885 年から東北地方太平洋沖地震発生前日まで 126 年間余の東北地方の東側沖合(第 6 図)の M6 以上の地震に ETAS 解析を実施した。この場合静穏化は 1997 年半ばから約 10 年間継続し、回復から約 4 年弱で東北地方太平洋沖地震が発生している(第 7 図)。

尚、北海道東方沖でも、東北地方東方沖でも、東日本の太平洋海域では、M5.7 や M6 以上の地震であっても、ETAS モデルのベース発生率から期待される独立地震 (=非クラスター地震) は全体の 1/3 程度であり、2/3 の地震は余震的なクラスターに属する従属地震である。従っていまだによく行われている地震カタログの除群処理は、カタログを半分以上削り取っていないければ、恣意的且つ不完全であり、活動度の定量的な監視には利用できないことを、改めて注意喚起しておく。また、ETAS モデルはカタログの M の均質性に大きく影響される。カタログ作成には長期的な一貫性、或いはモデルに M の遷移影響を組み込み可能とする処理方法の変遷情報がセットで保持されていることが、定量的な活動度の監視には必須であることも指摘しておく。

参考文献

- 1) Matsu'ura, R. S., 1986, Precursory Quiescence and Recovery of Aftershock Activities before Some Large Aftershocks, Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo, **61**, 1-65.
- 2) 統計数理研究所・東京大学地震研究所, 1995, 兵庫県南部地震の余震活動度の準リアルタイム監視—1月25日23時16分M4.7余震の事前予測, 予知連会報, **54**, 600-607.
- 3) e.g. 宇津徳治, 1999, 地震活動総説, 12.7 節, 東京大学出版会, 659-679.
- 4) Ogata, Y., 1989, Statistical model for standard seismicity and detection of anomalies by residual analysis,

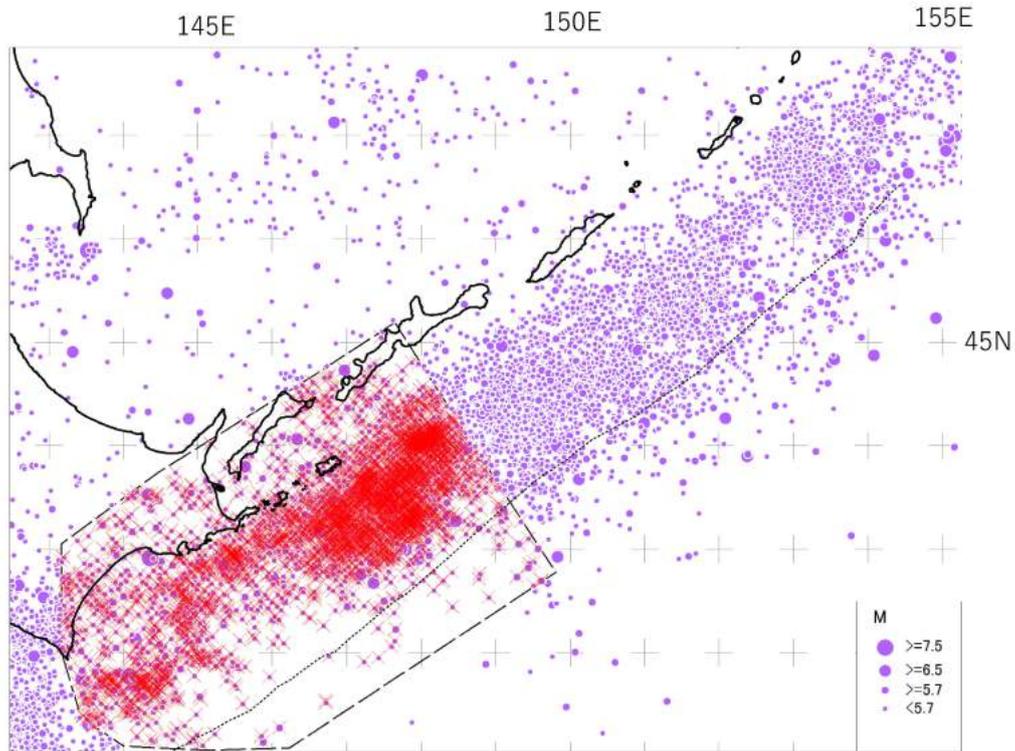
- 5) Matsu'ura, R. S., 2008, On the recent relative quiescence in the area east off Tohoku district, northeastern Japan, *Proceed. ASC2008*, Y3-215.
- 6) 松浦律子, 2014, 根室沖を含む北海道東部沖広域で継続中の大きな相対的地震活動度の静穏化について, *日本地震学会講演予稿集*, 2014年度秋季大会, D21-03.
- 7) 松浦律子・岩佐幸治, 2018, 北海道東部沖合の地震活動静穏化の現状, *日本地震学会講演予稿集*, 2018年度秋季大会, S23-02, 77.
- 8) 二宮嘉行, 2018, 変化点解析におけるモデル選択理論, リスク解析戦略研究センターシンポジウム (https://www.ism.ac.jp/risk/contents/pdf/h29_risk_sympto.pdf), 2018.7.17 開催.
- 9) Matsu'ura, R. S., Y. Mitsuhashi, and Y. Fukahata, 2017, A new approach to comprehend historical tsunami source, Abstract of IAG-IASPEI Symposium 2017 in Kobe, S04-2-02, 695.

表1 図4の全データに対する種々の点過程モデルのパラメーター値と AIC/2
 上表の1行目は全期間に1つの ETAS モデルの場合. 2行目以降は変化点 Tq (静穏化開始期) を導入した場合. 静穏期は危険度 λq のポアソンとする.
 下表はさらに 2015年7月を Tr (回復期開始) として危険度 λr を加えた場合.
 陰付の AIC/2 は変化点無しモデルよりも AIC が小さい良いモデルを示す.

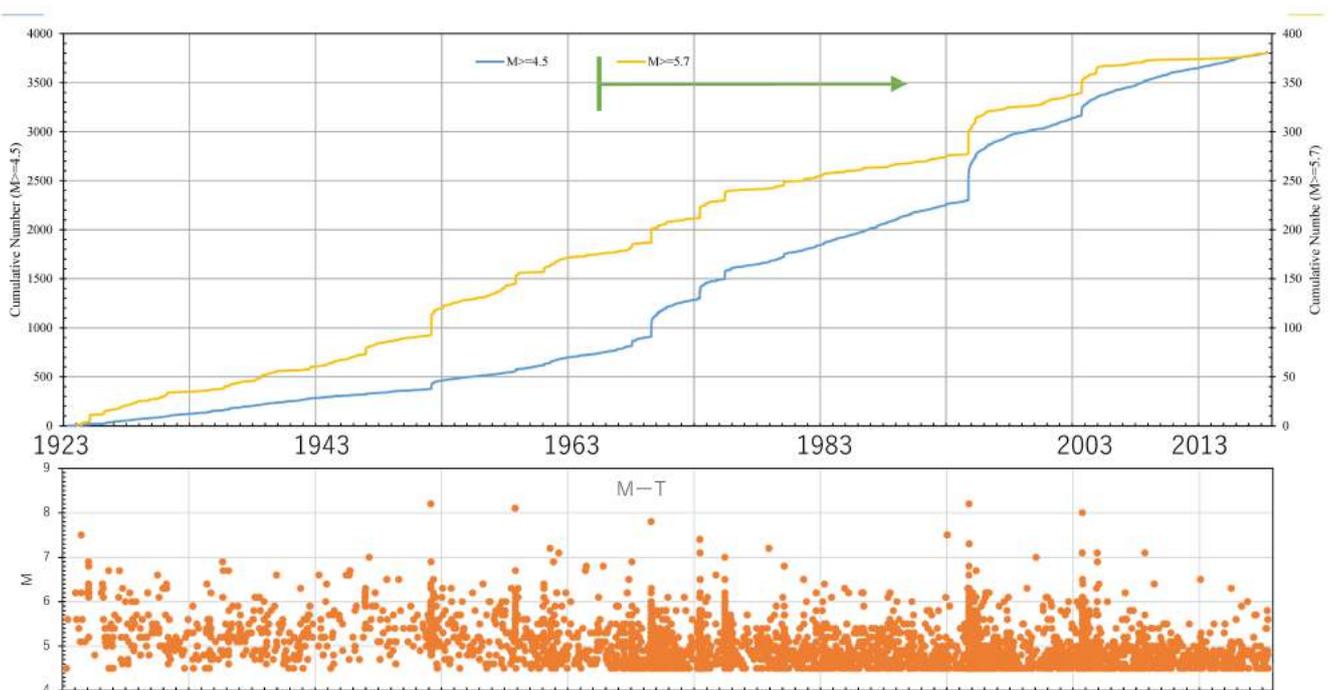
Table 1 Parameter and half-AIC values of various models for the whole data shown in Fig. 4.
 The top row shows the simple ETAS model for the whole term. Tq is the beginning of the quiescence. The lower table shows those for a model with the recovery after Tr. Rows with shaded AIC/2 are models with smaller AICs than the simple ETAS. Parameters are as follows: $\lambda(t) = \mu + \sum_{t>t_j} ke^{VM_j}/(t-t_j+c)^p$ for $t \leq T_q$, $\lambda(t) = \lambda_q$ for $T_q < t \leq T_r$, $\lambda(t) = \lambda_r$ for $T_r < t$, and $flt(t) = \int_{T_s}^{T_e} \lambda(s)ds$.

Tq	Npar	Penalty	AIC/2	μ	κ	γ	c	p	Netas	Nq	λq
None	5	-	763.50	0.00375	1.54E-08	2.29	0.00749	1.04	205		
2004末	6	3	774.82	0.00343	1.54E-06	1.64	0.00172	0.996	190	15	0.0030
2005末	6	3	771.99	0.00336	3.74E-07	1.77	0.00313	1.00	192	13	0.0028
2006末	6	3	770.71	0.00329	6.03E-08	2.10	0.0058	0.989	192	13	0.0031
2007末	6	3	768.09	0.00441	1.54E-08	2.29	0.00785	1.03	195	10	0.0026
2008Mar.末	6	3	768.45	0.00423	2.12E-08	2.24	0.00673	1.03	195	10	0.0027
2008June末	6	3	768.80	0.00427	2.61E-08	2.22	0.00656	1.03	195	10	0.0027
2008Sep.末	6	3	761.08	0.00434	1.92E-08	2.26	0.00694	1.03	197	8	0.0022
2008末	6	3	761.78	0.00433	1.87E-08	2.26	0.00701	1.04	197	8	0.0023
2009Mar.末	6	3	762.16	0.00431	1.91E-08	2.26	0.00711	1.04	197	8	0.0024
2009June末	6	3	761.96	0.00434	2.81E-08	2.21	0.00626	1.03	198	7	0.0021
2009Sep.末	6	3	762.26	0.00437	2.11E-08	2.25	0.00725	1.04	198	7	0.0022
2009末	6	3	766.56	0.00385	1.18E-07	1.99	0.00349	0.976	198	7	0.0023
2011/3/11	6	3	769.50	0.00241	1.71E-08	2.29	0.00327	0.973	198	7	0.0026

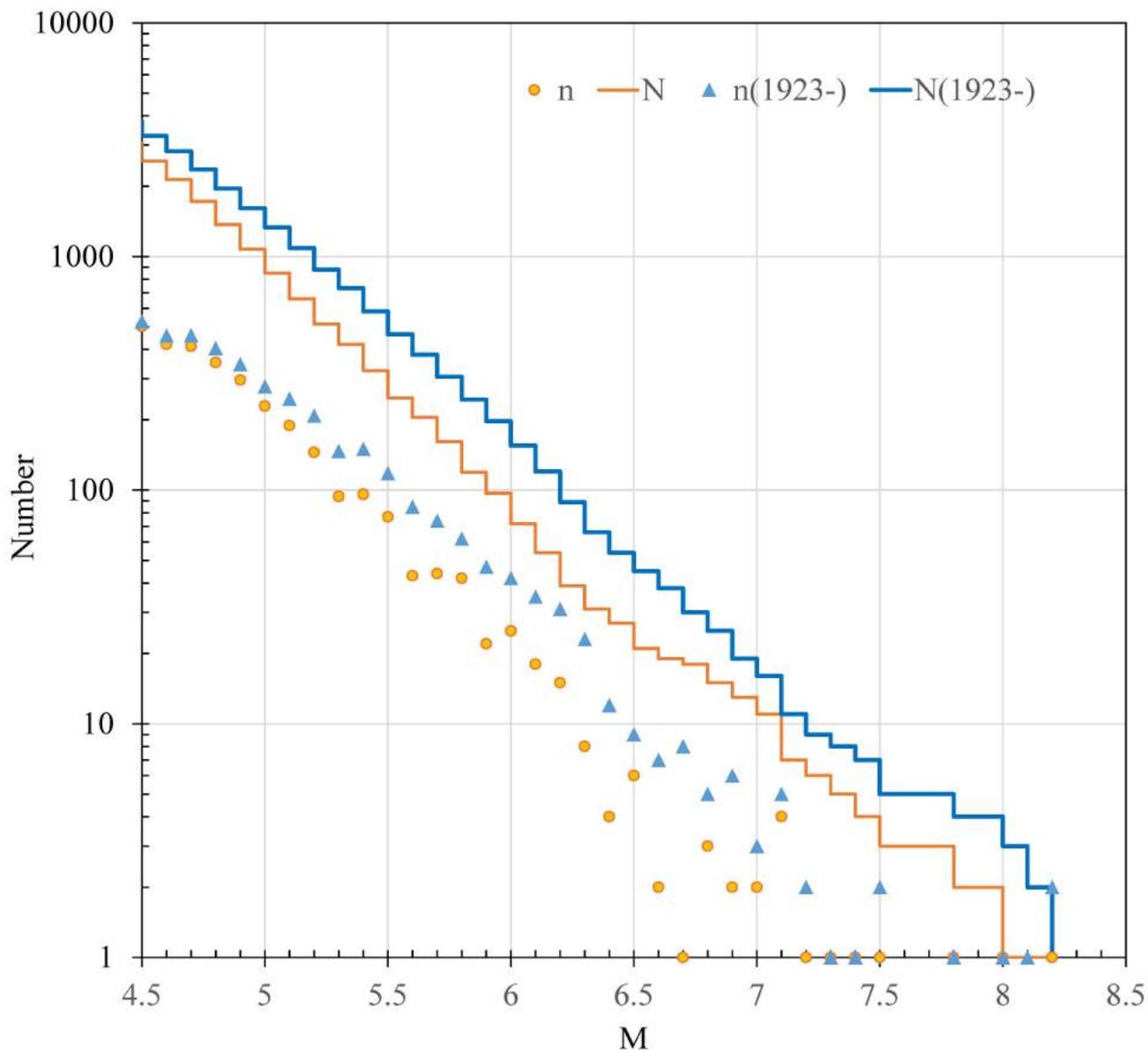
Tq	Npar	Penalty	AIC/2	Tr	Nr	λq	λr
2008Sep.末	7	6	761.78	2015June末	6	0.00081	0.00547



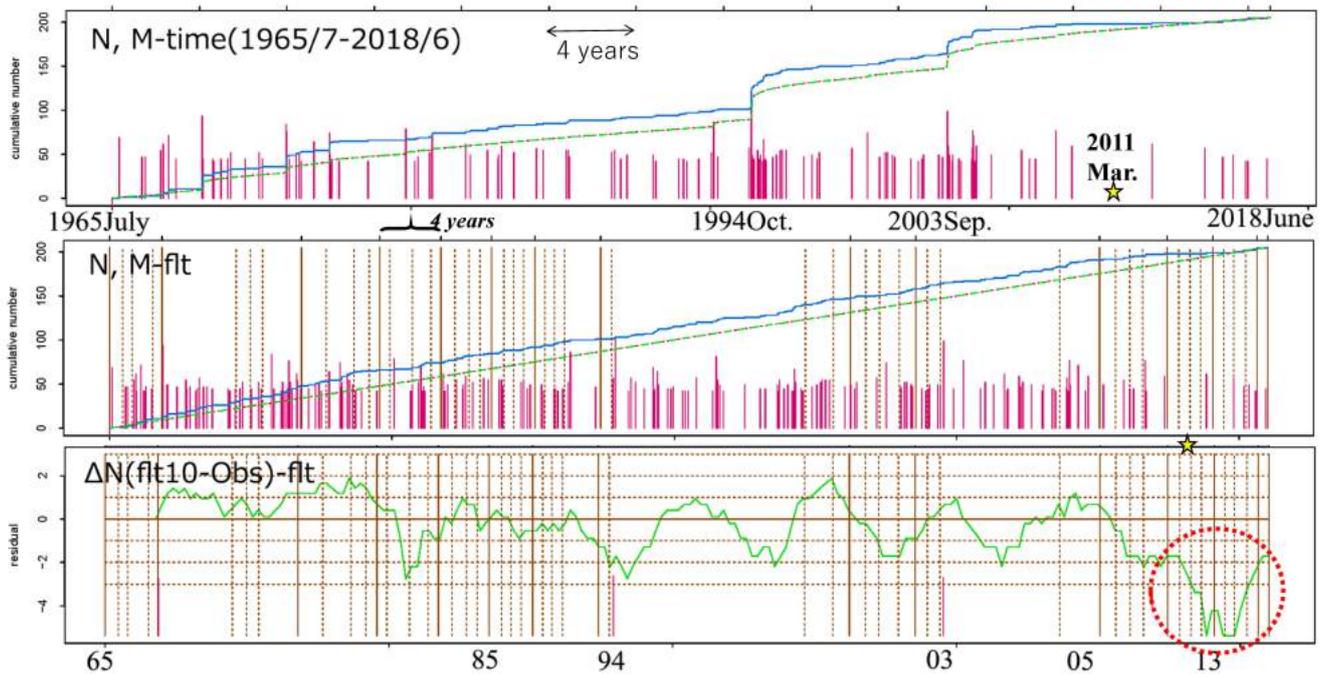
第1図 北海道東部から千島列島周辺の気象庁カタログの震央分布
 解析領域は破線で囲まれた範囲。図2,3に示したデータには赤×マークを十畳してある。
 Fig. 1 Epicenter distribution of JMA catalogue (1923-June 2018, $M \geq 4.5$)
 Earthquakes in the area shown by the broken line are analyzed regardless of the depth.



第2図 解析領域内の地震累積数と M-T 図
 Fig. 2 Cumulative number and M-T diagram of earthquakes in the area shown in Fig. 1.
 Earthquakes of $M \geq 5.7$ and July 1965-June 2018 are analyzed.



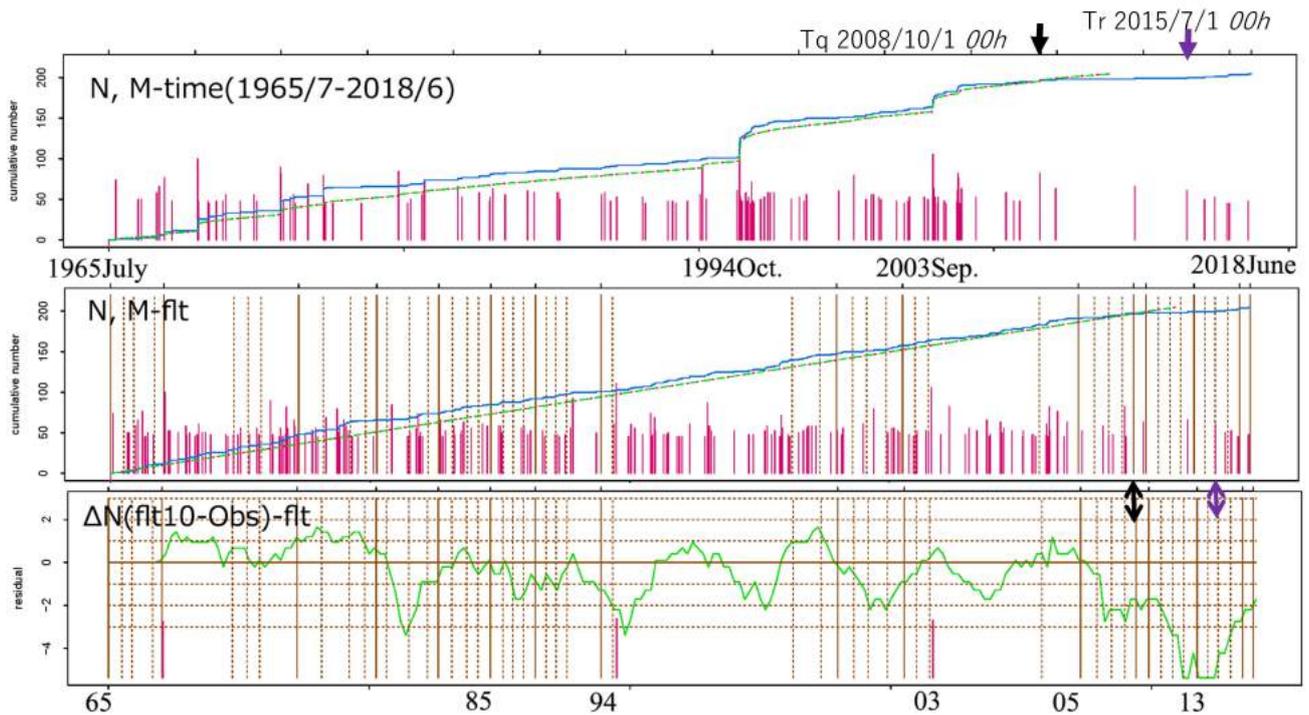
第3図 図2のデータの規模別頻度分布
 青は1923年以降と橙、1965年7月以降.
 Fig. 3 Magnitude frequency of data shown in Fig. 2.
 1923-June 2018 (blue) and July 1965-June 2018 (orange) are shown.



第 4 図 全期間に対する最尤 ETAS モデルと実際の地震累積数と正規分布変換した残差($n=10$ の場合)の時間変化

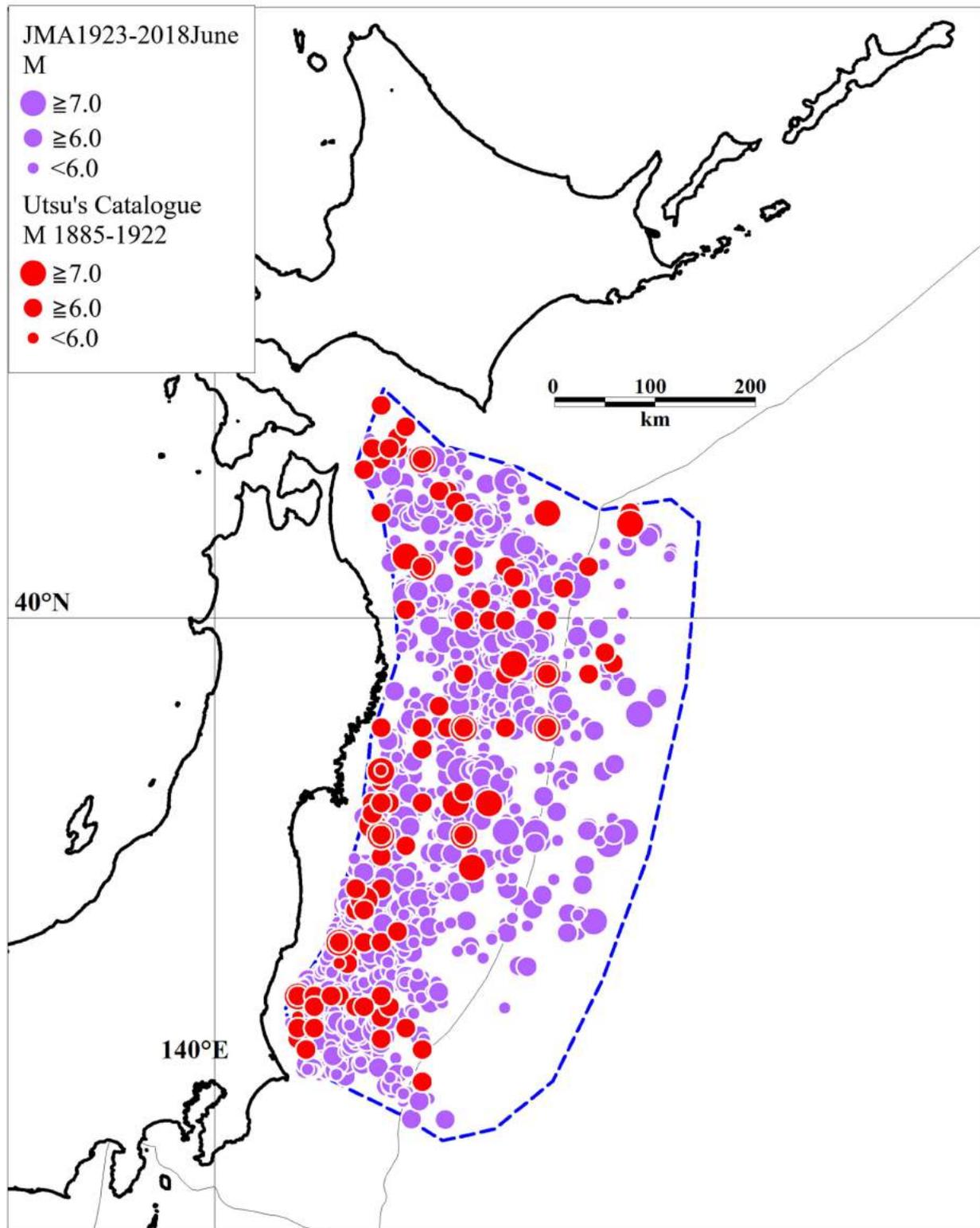
上図は通常的时间軸, 中図・下図は flt 時間軸. 上・中図の階段状の青線は観測, 黄緑の破線は ETAS モデルの理論累積地震数. 赤線の高さは地震の M を表す. 下図は $n=10$ の場合の観測と理論値との差. 丸で囲まれた部分が静穏化を示す. 中・下図の茶色の点線と実線は, 1 年と 4 年をそれぞれ示す. 星印は 2011 年 3 月 11 日を示す.

Fig. 4 The most likely ETAS model for the whole term and the cumulative number and M-T of earthquakes. In the upper graph, horizontal axis is the ordinary time, while those in the middle and the lower are the flt-time calculated by the ETAS model. The blue and green lines in the upper and the middle show the cumulative number of earthquakes observed and estimated by the ETAS model, respectively. The vertical dotted and solid brown lines in the middle and the lower show one year and four years. The height of red solid line shows M of an earthquake. In the bottom, only $M \geq 7.8$ are shown. The star shows the Mar. 11th, 2011. In the lower graph, converted O-C to $N(0,1)$ are shown for each flt=10. The circled part shows the only $<-3\sigma$ quiescence term in analyzed 53 years.



第 5 図 静穏化前までのデータに対する最尤 ETAS モデルと実際の地震累積数とガウス分布変換した残差($n=10$ の場合)の時間変化
 黒と紫の矢印は静穏化の開始と終了時期を示す. 静穏化以降にも静穏化前の ft を外挿してある.

Fig. 5 The most likely ETAS model for the term before the quiescence (Tq) and the cumulative number and M-T of observed earthquakes.
 Black and purple arrows show the beginning (Tq) and the ending (Tr) of the quiescence detected. See the caption of Fig. 4 for others.



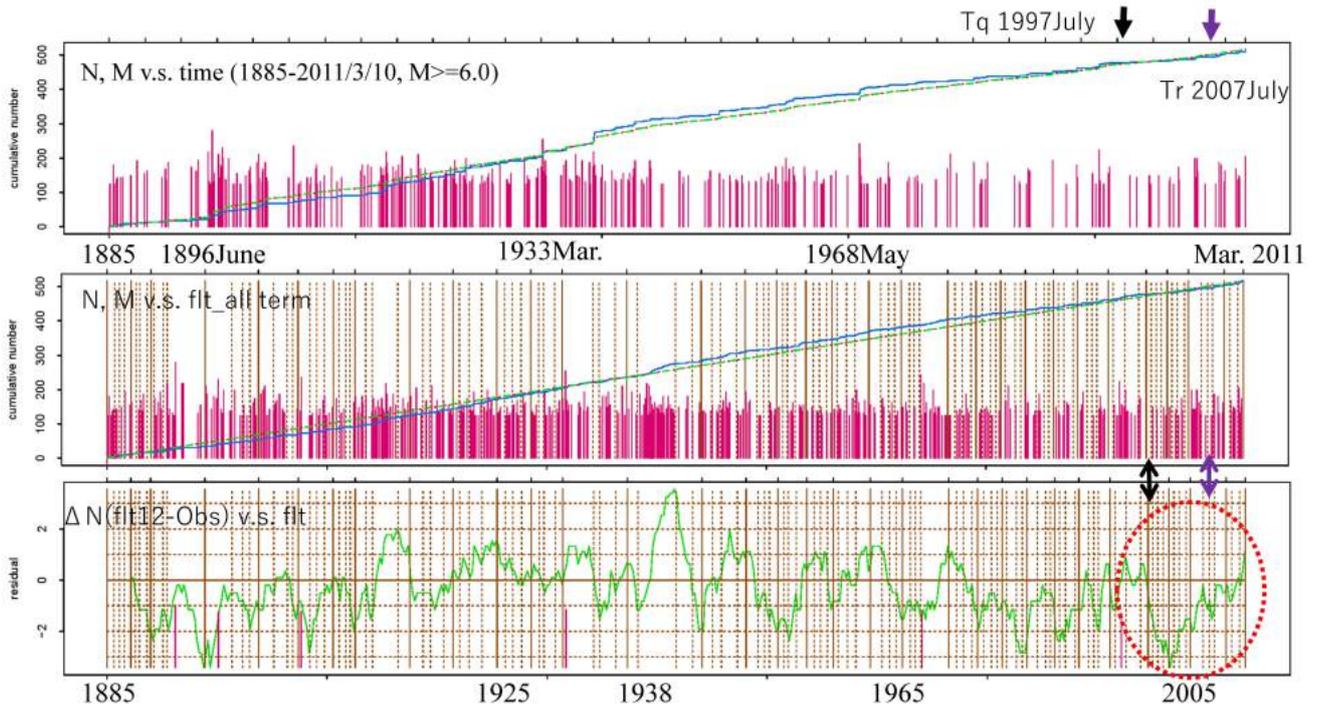
第 6 図 東北沖に関する解析領域内の震央分布

青点線が領域，紫は気象庁，赤は宇津カタログの震央．解析は M6.0 以上のみ使用した．

Fig. 6 Map of epicenters in the analyzed area for the relative quiescence of off Tohoku district.

Purple and red circles show JMA and Utsu's catalogues, respectively.

Gray lines show Kuril, Japan, and other trenches and troughs.



第7図 1885年から東北地方太平洋沖地震前日までの全期間に対する最尤ETASモデルと実際の地震累積数と正規分布変換した残差($n=12$ の場合)の時間変化
 $n=12$ はこの領域でM6以上の場合約3年間に相当する。

Fig. 7 The most likely ETAS model for the whole term and the cumulative number and M-T of earthquakes in Fig. 6 and $M \geq 6.0$.

The dotted circle shows the largest $<-3\sigma$ quiescence term in analyzed 126 years. The only $>+3\sigma$ corresponds to the 1938 off Fukushima swarm activity. $n=12$, which is equal to 3 years in off Tohoku for $M \geq 6.0$, is used. Black and purple arrows show the beginning and the ending of the quiescence detected. See the caption of Fig. 4 for others.