(12) 大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構 統計数理研究所

1. はじめに

統計数理研究所は2005年4月にリスク解析戦略研究センターを設置、その下に地震予測解析グループを置いた。その使命は「統計モデルによる地震(余震)活動の計測、異常現象の定量的研究、及び、それらにもとづく地震(余震)の発生確率予測とその評価法、などについて研究する」ことである。

地震予測解析グループが主に取り組んだのは、ETAS モデルや新たに開発した各種の確率点過程モデルを駆使 した多様な地震活動の解析、大地震の確率予測について 実用化への見通しと、そのための予測評価の研究である。

以下に、この10年間地震予知連絡会で報告した内容 と、関連する成果について取りまとめた。地震予知連絡 会報に掲載された多くの報告の詳細は地震学関連学術 誌に掲載されている(引用文献参照)。

2. 大地震の確率予測の実用化に向けて

2.1 多重確率予測式

無情報の基での大地震の確率予測(永年確率)は極めて小さいが、何らかの異常現象が現れると、その予測確率は増える。確率予測の計算をするにあたって、前兆事象と異常事象は明確に使い分ける必要がある。前者は既に大地震が起きてしまってから分かる概念であり、後者は「前兆かもしれない普段と違う現象」で、地震予測では異常事象が前兆事象である確率が問題となる。なので、我々は経時観測データの異常を明瞭に定義し、それらが前兆として大地震に至る確率(「適中率、hit rate」)を求める作業をする必要がある。

1970年代後半、伊豆地域で長期、中期、短期の各種の異常事象が観測された。宇津は「多重確率予測式(multi elements prediction formula)」(図 1 参照)を考案して、予知連での報告に基づき 1978年の伊豆大島近海地震の予測確率を試算した 1)。また Cao と安芸 71)は同時期に起こった中国の海城地震や唐山地震などに関して事後的に試算した。決定論的地震予知としては前者が成功、後者が失敗の例として有名であるが、1 日当たりの最終確率は両方とも約 10%であることに留意したい。これらの研究に付随して「確率利得(probability gain)」⁷⁰⁾という重要な概念(図 1 参照)が浮き彫りになった。この概念は、統計地震学の研究で、これまで理論的に散見される。

しかし、その後 40 年も経つのに、確率予測が運用されなかった。これは主に「地震予知」についての希望的目標で、的中率の高い異常現象の発掘を目指したためで、 圧倒的多くの大地震が不意打ち的に起きる(予知率が低い)という結果になったためと考えられる。 これを克服する為には、低い適中率でも出来るだけ多くの異常現象を発掘し予知率を高める必要がある 108), 109). たとえば、地震活動に適用した ETAS モデルのように、各種観測量の経時変化の標準的なモデルをたて、平時の変動からの、何らかの外れ(不適合)を異常として予知率を高めるべきである。地震活動以外にも、今日ではGNSS の変化のデータ解析が有望である(3.2 節参照). 異常事象が前兆なのか、どの程度切迫性があるのかなどの推定には、多くのデータで異常値解析を開発して異常事象を積み重ね、低いなりにも有意な的中率を求める必要がある.

大地震に至る高い適中率や確率利得を出すことは困難であろうが、それでも独立な幾つかの異常の予測因子が重なれば、多重確率予測式によって、大地震予測の確率が実用的なものまで高まることがある^{1),53),71)}.

現状では、独立性を担保するような短期・中期・長期の予測確率を組み合わせる 450,990,1080,1090 のが有望であり、最近筆者も M7.3 熊本地震に関して多重確率予測公式で試算し、異なる前提での予測確率のバラツキを示した 520,540,540,540,540 異常事象の独立性が保証できない場合は、多重確率予測公式を一般化したロジット (logit) 関数の展開モデル 630,690,720 で算出し、AIC 比較でモデルが改善できれば確率利得が高まること期待される 990,1080,1090 将来的には時空間でも多重確率の予測モデル開発が望まれる 990,1090.

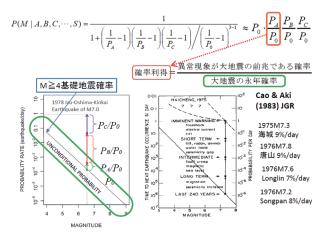


図 1 多重確率予測式 (multi elements prediction formula)

2.2 永年確率の評価

広域の地震活動のための階層的時空間 ETAS モデルを提案した $^{27),59),82),109)$. その結果、将来の M6.0 以上の大地震や歴史被害地震(M7 クラス以上)の大地震の大多数が常時活動度 μ (x,y) の高いところに発生している(図 2 参照) $^{23),59)}$. 大地震の大きさ分布は Gutenberg-Richter (GR) を仮定する $^{54),108}$.

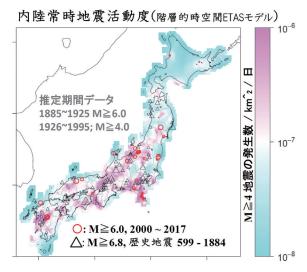


図2 常時地震活動度の地域性と被害地震

2.3 長期の確率予測

大地震の切迫度を見積るためには地震調査委員会の主要断層破壊の長期予測が参考になる。例えば熊本地震をめぐる多重確率予測の試算に使った確率は九州の地域的な30年確率予報を用いた^{54),108)}.

Brownian Passage Time (BPT) 更新過程に基づいて、不確定かつ少数の地震発生年代データから更新時間間隔のばらつき度(パラメタ α)の不偏推定法を与えた $^{28), 60), 64), 101)</sup>$

更新時間の不確定なデータのもと、予測の精度を従来の手法などと比較検証した結果、事後分布のベイズ予測が最も良い精度をもつ⁶⁴.

2.4 中期の確率予測

大地震が連発するのは珍しくない。日本に於ける各々の大地震について、その後に起きた全ての大地震との時間差と距離を重ね合わせてプロット(図3参照) $^{80,45)$. $^{108)}$ すると、近傍に別の大地震が起きる頻度(単位面積当たり)は遠方のどこかに起きる場合より数倍高くなっている。これらはストレス変化や地震動による地震の誘発現象を示唆している。 Δ CFS(Coulomb failure stress)の空間分布は誘発や静穏化の場所に関する参考になる 60,70,120,140,160,170,190,460 .

一般に或る地域で有意な地震活動の異常(静穏化など)を検出しても、そのうち何%が、どれくらい経って、どの辺りの大地震発生に結びつくか、予測は現状では難しい。しかし余震活動に静穏化が検出されたとき、以下のような経験則が参考になる^{8),45),108)}。すなわち途中から余震頻度がETASモデルの予測発生率に比べて有意に少なくなる現象(相対的静穏化)は45%ほどの余震列で認められ⁹⁸⁾、これは特に珍しくない。しかし近辺で別の大きな地震が起こる確率は、余震活動がETASで順調に推移している場合より、高くなる.

相対的静穏化が長期間(たとえば数ヶ月以上)に及ぶと、日本においては、余震域近辺(たとえば200km以内)で、6年以内の期間に、本震と同規模以上の地震が起きる発生確率利得は、その他の場合より3~4倍以上も高い(図3参照)¹⁰⁸⁾.

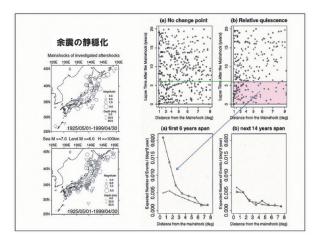


図3 大地震の誘発頻度を余震の相対的静穏化で分類

2.5 前震の確率予報と検証

「前震かもしれない地震(群)」が実際に「前震」である確率予測を考える。先ずリアルタイムで地震群や孤立地震を定める必要がある。その上で、本震、余震、そして前震の定義を定める。そして前震を識別するために、群の先頭地震の緯度・経度、群内マグニチュード列の増減、群内の地震同士の時間および空間集中度を考慮し、今後、より大きな地震が起きる確率を算定する 31),34),55). 58),63),69),72)。そのような学習期間を経て、予測期間に順次確率予測すると、推定された確率と実際の適中率は概ね整合して有意である結果が得られている 34),63),69),85)。

独立な GR マグニチュード列で時空間 ETAS 合成データを生成したものより気象庁(JMA)カタログ実データの方が前震予測の実験結果で卓越している $^{69),92)$. さらに JMA カタログの実マグニチュード列から生成した時空間 ETAS 合成データの場合の方が,独立な GR マグニチュード列で生成された時空間 ETAS 合成データより卓越している $^{92)}$.

また、前震のマグニチュード列の確率予測列は、独立の GR 則(b=0.9)に基づく予測列より勝れていると評価された $^{55,62),69)}$.

2.6 余震確率予報

本震後1日のうちに、大きな余震は全体の半分ほど 起きている。連鎖するかもしれない大地震も半分ほど の確率で起きる。したがって、データ取得の悪条件に も関わらず、できるだけ早い機会の予報は被災地で切 望される。このために余震のマグニチュードのGR式と 大森宇津の余震減衰公式に併せて、時間経過とともに 改善する余震の検知率(欠測率)のモデルを考え提案した 10),48),75),87),96),102),107). これによると本震の規模を超える確率も予測できる。また、大森宇津式の代わりに ETAS モデルで将来の余震列のシミュレーションを繰り返すことによる、余震活動の中期確率予測法を提案した 49),96),102),103),117).

最近、防災科学技術研究所と協力して Hi-net の自動処理震源を使ったリアルタイム余震確率予測システムを開発し、本震の 3 時間後から予測を開始している。これは、編集された JMA データに基づくものに比べて遜色ない精度で機能していること、さらに本震発生以前に求められている標準(generic)予測モデルより有意に有効であることを示した 53),58),66),69),113)。これまでの 10 例ほどの予測から、本震(と思われていた地震)よりも大きな地震(2016 年熊本地震や 2019 年 California Ridgecrest地震)の確率予測は、それなりに大きな確率であり、前震予測としても大いに参考になる。

同様に、震災地域と周辺部の各地点で、本震直後からの連続地震計記録の極大振幅(分割小時間区間の最大振幅)列から確率的な極大振幅予測を考えた⁶⁹.

3. 各種異常現象の統計的研究

3.1 余震活動の 時空間的変化とパタン異常

時間 ETAS モデル $^{6),7),9),12),14),16),17),19),104)$ や階層的時空間 ETAS モデル $^{58),61),68),69),114)$ による時空間余震予測を回顧的に実行した。下限マグニチュードが十分であれば、リアルタイムで逐次予測できる状態である。

余震活動の時間送りを大森宇津式で伸縮変換(大森 宇津式の積分曲線で時間座標を変換)し、余震群内の 時空間的分布を見ると、余震域全域で一様な発生経緯を 示す場合もあるが、各部分領域で全く異なったパタンの こともある ^{18), 24), 41), 52), 78), 80), 104), 109)}. 特に、大きな余震が 発生する前には局所的な静穏化・活発化パタンや震源移 動をすることがある。このようなパタン異常は局所的な slow slip などが余震域の中でも起きている可能性がある ことを示す。

3.2 地殼変動異常

或る断層ですべり運動があったとすると、GEONET 時系列データで、それに見合った測地学的変化がある。通常では観測基線距離の縮みまたは伸び率が一定であることが期待されるが、内陸の被害地震(2004 年中越地震^{11),19),77}、2007 年能登半島地震^{21),83)}、2007 年中越沖地震^{22),83)}、2007 年福岡県西方沖地震^{13),19),79)}、2006年千島沖列島の余震活動^{20),24),80)} 2008 年岩手・宮城内陸地震^{25),29),81)})や 2013 年北淡地震の最大余震⁴¹⁾の事前に系統的なずれが生じた。これらの異常をターゲット断層内の前駆的なすべりと周辺の地震活動異常で整合的

に説明した.

兵庫県南部地震による丹波地域や和歌山地域の地震活動の活発化、浜名湖直下のスロースリップによる中部近畿地方各地の静穏化や活発化など、地震後すべりや間欠的なすべり運動も、周辺部の地震活動の相対的静穏化や活発化を可視化した⁵⁾。それらの異常変化とすべりによる CFS 変化の増減パタンとは良く一致する。

プレート境界域のスロー地震域付近(房総沖, 茨城沖, NZ ヒクランギ沖など)での ETAS モデルによる地震活動の異常解析や、非定常 ETAS モデルで群発地震活動が検出され ^{69), 90), 93), 100)}, これらに対応した GNSS 測地時系列の異常変化が良く対応している ⁶⁹⁾. GNSS 測地時系列の異常変化とスロー地震、群発地震などの相互関係が指摘されている ^{69), 100)}

3.3 伊豆東方沖の群発地震活動の推移の予測 ^{51), 69), 105)}

伊豆東方沖における群発地震発生領域では総地震発生数とマグマ貫入量の指標となる地殻内体積歪みの観測量との有意な相関関係が知られている。非定常 ETAS モデルを用いて伊豆東方沖の群発地震活動を解析したところ、地震活動度の変動よりも常時地震活動強度の変動の方が体積歪みの変動に対して勝れて高い相関を持つ。ここで体積歪みの変動データは気圧、潮汐、降水量の影響を取り去り補正した上でコサイスミックな短期変動量を取り除いたものである。そこで、先行する補正済みの体積歪みの観測量時系列から ETAS モデルの常時地震活動強度を予測し、そのうえで群発地震の頻度の予測へと繋げるモデルを提案した。したがって、群発地震の開始位置が分かれば、同一の応答関数によって、体積ひずみ計変化データから半日程経った常時地震活動度が精度良く予測できる。

3.4 小繰り返し地震の統計モデル

プレート境界面の各スポットで発生する小繰り返し地震に対し、ストレスの蓄積・解放を BPT 過程として時空間モデルに発展させた ^{43), 44), 94), 101), 106)}. 過剰な適合を避けるために、時間変動や空間変動の平滑性や不連続性について最適なモデルは ABIC 最小化法に従った ^{43), 94)}. 特に、北日本太平洋沖のプレート境界で観測された小繰り返し地震に当てはめた結果、大地震の前と後の準静的すべり、相対的な固着域など、それぞれの特徴的な時空間変化を捉えている ¹⁰⁶⁾. 本モデルは GEONET 観測網から離れた沖合の海洋底下におけるプレート境界での固着域と応力場の変動の可視化でモニタリングに有用と考えられる。今後、小繰り返し地震の近傍の中小地震による地震時の変化と前後のゆっくり滑りを適切に分離するという課題がある。

3.5 マグニチュードの時系列

大地震の永年確率を求める際や、CSEP における地震

活動予測モデルでは、全域及び全期間にわたって同一の b 値の GR 則に基づく独立分布系列が仮定されている。しかし b 値や非 GR マグニチュード分布は地震活動の履歴などに依存する可能性がある $^{62),69),114)$. これらをどのように活用して、勝れた予測につなげるかの課題が残る $^{114)}$

3.6 地震発生データと異常時系列との因果関係モデル

従来から地震統計学の分野で議論されているものとして、地震発生の周期性(季節性や潮汐周期など)や地域的関連性などがある。これらの統計解析のために、地震活動の連鎖続発性を組み込んだ点過程モデルが有効である ^{3), 69), 74), 98), 99), 109)}

特に、地域的関連性を調べた点過程モデルは、各種異常現象の発生の地震発生への統計的因果関係を議論し、前兆現象たりうるか否かの有意性や時間遅れを調べることにも応用できる。例えば1982年から16年間にわたる中国北京市付近における日別地電位異常強度データが地震発生(M4以上)の前兆たりうるかをAICによるモデル適合度比較によって確かめた^{31,721,951,991}.電位異常強度データを考慮したほうが地震活動の良い予測を得られたが、ETASに比べた確率利得は高々数倍である。

3.7 確率予測や警告型予測の評価法

地震予測可能性の研究には, 予測結果が客観的に評 価できることが必要不可欠である. 確率の数値予測を出 すことが難しい場合の警告型の予測(二値予測)でも, 予測結果を評価するための Molchan diagram や ROC 曲 線などのグラフ法やギャンブルスコア法が提案されてい る. これらにも地震の大きさや活動度の経験的な基準確 率(相場)の設定が不可欠である. ギャンブルスコア法 は相場に基づいた公平な賭けのもと、警告型予測の成功 または失敗の結果の得失スコアを比較する評価法である ^{30), 91), 97)}. 基準確率としては、GR 則を地震の大きさの出 現頻度とし、時間・空間に一様な地震発生モデル(定常 ポアソン過程)が考えられている.しかし、より現実的 に、地震活動度に合わせた空間非一様なポアソン過程や 地震の連鎖続発過程 (例えば ETAS) などを基準モデル に設定すると、従来の警告型予測が良い評価を得るのは 難しくなる⁹⁷⁾

確率予測では、滅多に起こらない大地震と発生頻度の高い中小の地震では、予測が当たった場合でも外れた場合でも評価値が大きく違う。地震活動度による地域差も評価に関わる。先ず各地域の地震活動に適合した経験的な基準予測を確立する必要がある。かくして確率予測の成績を測るスコアとして情報利得 500,880,970,109) が合理的である。

もし将来に地震活動に構造的変化がなければ、赤池情報量規準 AIC や ABIC は提案モデルの将来の予測の良

さを予め現在のデータのみで推定できる^{50),97)}. 例えば, 最適な前震予測式の構成に多用されている^{63),69),72)}.

筆者らが前震予測計算式 $^{72),99)}$ を提案してから 17 年経った時点で,東北地方太平洋沖地震とその顕著な前震活動を含む確率予測を検証した $^{34),69),85)$. 最大地震(本震)が特に大きい $(M \ge 6.5)$ 地震群だけを選び出すと,群れの初期の段階における前震の識別確率は一層明瞭である $^{34),85)}$. 3.5 節のマグニチュード列独立性のテスト $^{62)}$.

4. 大地震前後の地震活動の統計的解析

4.1 2008 年岩手宮城内陸地震前の東北地方の地震活動

2008 年 6 月 14 日の岩手・宮城内陸部地震(M7.2)に 先立つ 10 年間余りの東北地方の地震活動の相対的静穏 化を報告した^{25),81)}. 震源断層内の前駆すべりを仮定し て,東北地方と周辺部でのクーロン破壊応力の増減に基 づいて対応する地震活動の異常変化の説明を試みた. 因 みに東北地方沖合にも見られた広域地震活動異常パタン ^{25),81)} は 2011 年東北沖 M9 地震の前駆的活動異常であっ た可能性がある(4.3 節参照).

また M7.2 断層モデルの西部直近の領域で約1年前から地震活動が顕著に活発化し、対応する GPS 基線距離 異常から、すべりは断層深部延長部に移動したものと考えた ^{29),81)}

余震域の北緯39度付近の高密度クラスターは本震の数日後にかなり低くなって、対応するように近隣GNSS観測点の地震後変位は加速されたように見える⁷⁸⁾.

全体の余震活動は東北沖地震後, 相対的静穏化した.

4.2 2009 年 8 月駿河湾の地震の余震活動と静岡県中 西部地域の地震活動²⁶⁾

駿河湾の地震(M6.5)が2009年8月11日に発生したが、その後の余震活動を調べた. さらに想定東海地震の震源域を含む静岡県中西部における1995年以来の15年弱の地震活動の経緯を調べた. 各地域の地震(余震)活動にETASモデルをあてはめ、有意な活動変化があるか否かを確かめ、その時空間変化を調べた. その上で、地震活動の変化を調和的に説明できる地殻変動のシナリオを考えた.

4.3 2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震

顕著な前震活動は 3 月初めに始まり、 3 月 9 日の M7.3 最大前震の後の余震活動($M \ge 4.0$)は 3 月 11 日の M9 の地震まで大森宇津式で良く当てはまったが、p 値は有意に 1 より小さく b 値も極めて低かった $^{32,85)}$. そして M9 本震が起きると、この余震領域での減衰は極端に静穏化した $^{32)}$. M9 地震までの活動を大森宇津式でデトレンドした変換時間に対する経度や緯度の時空間パタン(3.1節)は甚だしく非一様であり顕著な震源移動があった $^{32)}$.

沖縄奄美諸島を除く全日本の1926年から M9 の地震時までの M5 以上の地震データを確率的除群化で常時地震を得たところ、M9 地震までの10年間、日本周辺全域で常時地震が疎らになった³²⁾.

2008 年岩手宮城県内陸地震の前の東北地方と沖合の各地域に見られた地震活動異常パタン^{25),81)} は、宮城・福島県沖の広域スロースリップに基づく地震活動の異常パタンと極めて良く似ている(文献32の7図). 従って、これらの地震活動異常はM9地震の前駆的活動異常であった可能性がある.

1923 年以降の東北地域の M5 以上の地震活動を ETAS モデルで当てはめ、 M9 の M5 以上の累積余震数と比較すると、ほぼ予測どおりである。しかし 1997 年 10 月の震源の一元化以降のターゲット期間の当てはめだと累積余震数は ETAS 予測の 2 倍ほどになる ³⁶⁾. 後者の場合は一元化からの期間での広域静穏化のためであると考えられる ³²⁾.

東北地方太平洋沖地震の余震活動³⁶⁾を大森宇津式で デトレンドした時空間分布で比べた³³⁾.

また東北沖 M9 地震から静的および動的に誘発された 内陸地震の余震活動を調べた ^{33), 35), 38), 90)}. 誘発による日 本列島 ³⁸⁾, 南関東(首都圏) ^{38), 68)} や東北地方および糸 魚川静岡構造帯における将来の大地震の長期的発生確 率の増加について GR 則を仮定して推定した ³⁵⁾.

M9 余震活動の一環として,2012 年 12 月 7 日に三陸沖で M7.3,2013 年 10 月 26 日に M7.1 の,ア ウターライズ領域と近辺で正断層型の地震が起きた。M9 余震データには部分的に 2012 年 8 月頃から夫々に相対的な静穏化がみられ,これらはプレート境界深部でのゆっくり滑りを仮定すれば,ストレスシャドウで活動低下の説明ができる 47 . 因みに,同様なスロースリップで正断層型の 1933 年三陸沖地震(M8.3)前の地震活動の静穏化について再考した。

4.4 2016 年鳥取県中部の地震前後の活動 58)

M6.6 鳥取県中部地震の約1ヵ月前からの地震活動について前震の確率を求めた. 内陸部にしては高い確率で、本震後低下した.

余震確率の早期予報の推移が Hi-net 震源カタログで良く予測できている。また ETAS モデルでのシミュレーションによる余震活動の中期予測を試みた。さらに CSEP 日本で検証中の階層的時空間 ETAS モデルによる 確率予測動画を高精度版で示した。

前震本震余震活動をETASモデルで解析した.活動 度の推移はETASモデルで良くあてはまるが,9月の前 震活動は北西方向に移動,M4.2で始まる前震は深い方 向に移動,余震活動は西方に拡散している.

4.5 2016 年熊本地震

余震域と周辺部での本震発生前における地震活動の 多様性の詳細を定常 ETAS モデル, 非定常 ETAS モデル, およびマグニチュード頻度のモデルを用いて解析検討し

異なる方法で M6.5 熊本地震の「余震活動」から M7.0 以上の本震が起こる予測確率を求めた。 M6.5 熊本地震の余震の M7.3 地震前の前震確率 55). 114 は概ね 5% 以上である。これに比べて M7.3 地震や 2005 年 M7.0 福岡県西方沖地震や 2015 年 M7.1 年鹿児島県西方沖地震のような本震 - 余震型系列は 3%以下の低い前震確率を与えている

早期余震予測を実施し¹¹³⁾,欠測を考慮した ETAS モデルのパラメタ推定法を提案した¹¹¹⁾.CSEP 日本で検証実施中の同一の階層的時空間 ETAS モデルによる予測の高精度動画を示した¹¹⁴⁾.

余震域には主に深さ方向に非一様なb値分布が見られる 55), 56), 65), 110).

4.6 2016 年 4 月 1 日三重県南東沖の地震(M6.1)に 続く群発地震活動 ⁵⁷⁾

JMA 震源カタログと、地震波形データから Matched Filter 法で再決定した震源データによる、非定常 ETAS モデルによる解析や非定常 b 値解析を行った。いずれのデータでも震源の拡散や移動が見られ、本震と誘発群発地震がプレート境界で起きたことを示唆している。

その後、南海トラフの巨大地震との関係として短期的な影響は見られなかった。西南日本における地震活動異常としては、昭和の東南海地震や南海地震前後の回顧的な地震活動解析 4,73) が参考になるかもしれない。

4.7 2013 年 4 月 13 日淡路島付近の地震 41)

1995 年兵庫県南部地震(M7.2)の震源域における余震活動は数年後僅かながら活発化していた³⁹⁾が、M7.2 本震後の同地域内の余震活動を5年後までETASモデルで当てはめ、淡路島付近の地震(M6.3)まで予測を延長すると相対的な活発化が顕著に見える。ETAS変換時間に関する余震活動の時空間図では余震域が拡大(活発化)し、北東端で最大余震(M5.1)が発生し、南西端への拡張(活発化)の後に淡路島付近の地震(M6.3)が発生している。この経緯について、淡路島付近の地震の断層深部延長部ですべりがあったものと仮定して余震活動域のCFS増加を調べ、余震活発化との整合性を確認した。さらに、同すべりによる地表の変動方向を描き、GNSS観測点と繋がるGEONETの基線長の時系列を調べた。

余震活動は、5月 26 日現在、M1 以上では順調に推移しているように見える 46 .

4.8 2018 年大阪北部の地震⁶⁶⁾

余震活動のリアルタイム予測システム¹¹³⁾で本震の3時間後から予測を実施した.

4.9 2018 年北海道胆振東部地震

Hi-net 自動処理震源によるリアルタイム予測システムで本震の 3 時間後から予測を実施した $^{66),113)}$.

余震域と周辺部での本震発生前後における地震活動を ETAS モデル、非定常 ETAS モデルなどを用いて詳細に解析した ^{67),116)}. 特に余震活動の常時地震活動強度が一時的に 10 倍近く急増し、その後回復している.これに対応して余震群の南端で「群発型」活動が認められる.

余震空間分布には主に深さ方向に非一様なb値分布 が見られる.

4.10 関東地方直下の地震予測

100km 深までの地震活動を解析,予測するために,階層的時空間 ETAS を 3 次元空間に拡張し,さらに M9 東北沖地震の影響を考慮した $^{68),\,112),\,115}$. 関東直下では三つのプレートが重なって,諸パラメタの空間変化は極めて非均質であるが,特に常時地震活動度は大地震の予測に,余震生産性パラメタは短期予測にとって,特徴的パタンを示し,予測の重要な位置情報になる. $1926\sim2016$ 年で JMA データ (M \geq 4) をあてはめた本モデルを使って,3 次元時空間地震活動の予測結果を示した.一例として,2018 年 6 月時点に予測した結果は,その後 1 年に起きた M \geq 3 の地震発生位置と比べると良好である.

4.11 2004 年 12 月 M9.1 スマトラ地震に先行した地 震発生率の変化について ^{40), 89)}

2004年12月26日のM9.1スマトラ地震の前まで、スマトラ・アンダマン諸島地域における広域地震活動を1973年からの期間で調べた。全期間を通じて同じパラメタの定常なETASモデルより、ある変化時点を境にして異なるパラメタのETASモデル(two-stage ETAS model)を当てはめた場合がデータに良く適合した。しかしUSGSのNEICの震源カタログとISCカタログでは矛盾した結論になる。前者のデータでは相対的に活発化し、後者では相対的に静穏化した。原因と考えられることは包括的核実験禁止条約(CTBT)に基づく国際データセンター(IDC)のデータの扱いにあると考えられる。NEICは非採用であったが、ISCカタログはIDCデータを含めたために、マグニチュード偏移が起きたと考えられる。

5. おわりに

歴史的記録や地球物理学や地質学の知見に基づいた 数々の地震シナリオに加えて、各種観測データに適合し た統計モデルを開発し、それを基準に使ってデータから 異常事象を検出する作業が求められる。そのうえで異常事象が大地震の前兆たり得るのかを統計的に識別し予知率を高める。異常事象と大地震発生との統計的因果関係を解析するため、時空間的な危険度や切迫度の変化をモデル化して確率的予測に結びつける。そのために確率点過程 ^{98,109)} の考え方が重要である。一種類の異常事象だけでは十分大きな確率利得や的中率で予測できないかも知れないが、幾種類かの異常事象が観測されれば、確率予測の実用化が拓かれると考える。

2節ではその骨子を概説し、解説論文 ^{93), 98), 109)} に取りまとめた。予知率を高めるための異常現象の検出例や方法を異なる観点から3節と4節に記述したが、異常事象のリアルタイム監視ができる様になるには数多くの課題がある。

(尾形 良彦)

参考文献

予知連絡会報:

- 1) 宇津徳治 (1979). 連絡会報 21 (7-4), 164-166.
- 2)「地震予知連絡会 40 年のあゆみ」統計数理研究所 (尾形良彦) 85-88, 2009.
- 3) 異常現象データと地震発生の相関解析および複合 危険度予測:北京付近における日別地電位異常強度 データ(1982-1997) を例として, **66**(10-4), 562-570, 2001
- 4) 1944 東南海地震および 1946 南海地震前後の地震活動の変化について, **70** (7-3), 378-383, 2003.
- 5) 統計的時空間モデルで検出された中部・近畿地方の 地震活動の変化 (1995-2001), **70** (6-3), 361-363, 2003.
- 6) 2003 年宮城県北部の前震活動と余震活動および 周辺部の地震活動の統計解析, 71 (2-12), 260-267, 2004.
- 7) 宮城県沖プレート境界型大地震までの東北地方に おける地震活動, **71** (2-13), 268-278, 2004.
- 8) 静的トリガリングと統計. 72(11-7).631-637.2004
- 9) 2003 年十勝沖地震 (M8.0) 前後の北日本における 地震活動の特徴について, **72** (2-7), 110-117, 2004.
- 10) 地震検出率とb値の同時推定と余震の確率予測, 73 (11-10), 666-669, 2005.
- 11) 2004 年新潟県中越地震 (M6.8) の余震活動の特徴 と地震前の周辺部における地震活動の特徴につい て, **73** (7-4), 327-331, 2005.
- 12) 2003 年十勝沖地震 (M8.0) と 2004 年釧路沖の地震 (M7.1) の余震活動および北海道東部の内陸地震活動の特徴について, 74 (2-6), 83-88, 2005.
- 13) 2005 年福岡県西方沖の地震 (M7.0) 前の九州地方 及び付近における中期的な地震活動の特徴につい

- て, 74 (10-18), 523-528, 2005.
- 14) 福岡県西方沖の余震活動について: 最大余震 (M5.8)以前に報告された相対的静穏化と余震域を ストレスシャドウにするような前駆すべりのシナリオ, 74 (10-19), 529-535, 2005.
- 15) 近年の顕著な地震の余震活動について, **75**(11-4), 593-597, 2006.
- 16) 活動域における顕著な余震活動とそれまでの常時 地震活動の様式との比較について, **75**(11-5), 598-601, 2006.
- 17) 2005 年 8 月 16 日の宮城県沖地震 (M7.2) の周辺 部の活動と余震活動について, **75** (3-6), 129-131, 2006.
- 18) 余震活動の時空間的異常とストレス変化の空間分布, 76 (11-1), 590-597, 2006.
- 19) 地震活動異常と地殼変動異常 2004 年中越地震と 2005 年福岡県西方沖の地震の前の中期的変化について, 77 (11-4), 452-459, 2007.
- 20) 千島列島沖の地震活動の時空間パタンとストレス変化、78 (2-3), 60-66, 2007.
- 21) 能登半島周辺の地震活動と地殻変動について, 78 (7-11), 399-404, 2007.
- 22) 2007 年中越沖地震の余震活動および周辺部の地震 活動と地殻変動について, **79** (7-3), 345-352, 2007.
- 23) 最近30年の大地震発生と指定地域について,79 (12-1),623-625,2008.
- 24) 2006 年千島列島沖地震の余震活動の時空間変化と ストレス変化 - アウターライズ地震の前駆すべり の可能性-, **80** (12-5), 562-567, 2008.
- 25) 2008 年岩手・宮城内陸地震前の東北地方の地震活動について, **82**(3-5), 96-105, 2008.
- 26) 2009 年 8 月駿河湾の地震の余震活動と静岡県中西 部地域の地震活動, **83** (6-4), 231-236, 2009.
- 27) b 値と ETAS モデルにもとづく日本列島の標準的地 震発生予測、**83**(1-2), 5-8, 2010.
- 28) 活断層のずれ情報を利用した BPT 過程の事前分布 によるベイズ型予測について, **84**(11-11), 231-236, 2010.
- 29) 2008 年岩手宮城内陸地震前の断層南部周辺の地殻 変動について、**84**(3-5), 93-97, 2010.
- 30) 警報型地震予測の性能評価法について, 85(12-7), 451-452, 2011.
- 31) 前震の確率予報の実施, 85 (12-4), 440-444, 2011.
- 32) 東北地方太平洋沖地震の前震活動と広域的静穏化について, 86(3-20), 134-141, 2011.
- 33) 東北地方太平洋沖地震の余震と連鎖地震, **86** (3-19), 126-133, 2011.

- 34) 前震の確率予報の実施と評価: 東北地方太平洋沖 地震までの15年間, 86(3-18), 123-125, 2011.
- 35) 東北地方太平洋沖地震の余震活動と松本付近の誘発地震活動,**87**(12-13),546-553,2012.
- 36) 東北地方太平洋沖地震の余震活動, **88** (3-3),100-103, 2012.
- 37) 東北地方太平洋沖地震によって誘発された地域の 地震活動の長期確率予測, **88**(3-2), 92-99, 2012.
- 38) 東北地方太平洋沖地震によって誘発された日本列 島の中長期確率予測の時空間分布, **88**(1-6), 35-39, 2012.
- 39) 1995 年兵庫県南部地震によって誘発された地震活動の遡及的予測と解析, **89**(8-2), 278-281, 2013.
- 40) 2004 年 M9.1 スマトラ地震に先行した地震発生率の変化について、**89**(12-11), 432-440, 2013.
- 41) 2013 年 4 月 13 日淡路島付近の地震 (M6.3) までに 至る兵庫県南部地震の余震活動などの異常変化つ いて, 90 (8-3), 352-355, 2013.
- 42) 東北地方太平洋沖地震の余震活動 (2011.3.11 2013.2.2), **90** (3-2), 104-108, 2013.
- 43) 時空間非定常 BPT モデルと北日本太平洋沖沈み込み帯の小繰り返し地震(1993.7.15 2011.3.10) の解析例(1), **90**(2-2), 49-53, 2013.
- 44) 時空間非定常 BPT モデルによる北日本太平洋沖沈 み込み帯の小繰り返し地震 (1993.7.15 - 2011.3.10) の解析例 (2) -特に主要地震の前と後の変化につい て-, 90 (2-3), 54-57, 2013.
- 45) 大地震の確率予測と統計モデル, **91** (12-6), 387-395, 2013.
- 46) 2013 年 4 月 13 日淡路島の地震 (M6.3)の余震活動 (2011.4.13-2013.11.8), **91** (8-3), 267-268, 2014.
- 47) 東北地方太平洋沖地震のアウターライズ周辺での 余震活動について (2011.3.11-2013.10.26), **91** (3-3), 72-76, 2014.
- 48) 本震直後の余震のリアルタイム確率予測, 91 (3-2), 66-71, 2014.
- 49) ETAS モデルによる余震の確率予測, **92**(11-2), 386-389, 2014.
- 50) 常時地震活動・余震・誘発地震の予測能力と評価, **93**(12-7), 415-426, 2015
- 51) 伊豆東部の群発地震活動の推移の短期予測について, 94 (5-1), 136-144, 2015.
- 52) 統計モデルによる地震活動異常のモニタリング, **94** (12-8), 412-423, 2015.
- 53) 2016 年熊本地震の余震の確率予測, **96** (12-24), 662-667, 2016.
- 54) 熊本 M7.3 地震の確率予測の試算, 96 (12-23), 658-

- 661, 2016.
- 55) 2016 年熊本地震 (M7.3) の前震確率予測について, **96** (12-22), 652-657, 2016.
- 56) 2016 年熊本地震前の九州地域の地震活動および余 震活動の統計的モニタリング, **96** (12-21), 642-651, 2016.
- 57) 2016 年 4 月 1 日三重県南東沖の地震(M6.1)に続く 群発地震活動の統計解析, **96** (8-5), 304-310, 2016.
- 58) 2016 年鳥取県中部の地震(M6.6)前後の活動について, **97** (9-7), 368-374, 2017.
- 59) 日本列島内陸部の常時地震活動度について, **97** (1-3), 9-12, 2017.
- 60) 最新の活断層カタログに基づく BPT 予測, **98** (11-5), 443-448, 2017.
- 61) 2016 年熊本地震の余震活動について **98** (10-3), 386-391, 2017.
- 62) 次の地震のマグニチュード予測と評価 **99** (12-10), 452-455, 2018.
- 63) マグニチュードと時空間情報に基づく前震確率評価 モデルの識別性能, 99(12-9), 446-451, 2018.
- 64) BPT モデルの共通のばらつきパラメタの推定とベイズ型予測, **100** (11-2), 350-355, 2018.
- 65) 点過程モデルによる熊本地震前後の地震活動の解析, **100** (12-6), 397-404, 2018.
- 66) 2018 年大阪北部及び胆振地方の地震に対するリアリタイム余震確率予測, **101** (8-18), 407-410, 2019.
- 67) 北海道胆振東部地震の余震活動の特徴について, **101** (2-7), 73-77, 2019.
- 68) 首都圏直下の三次元地震活動の時空間統計モデル と詳細予測, **102** (4-5), 123-116, 2019.
- 69) 第 225 回地震予知連絡会重点検討課題「予測実験 の試行 06」リアルタイム短期予測の実施と評価に ついて、2019 年 11 月.

その他の論文誌:

- 70) Aki, K. 1981. Earthquake Prediction (Maurice Ewing Series, 4), eds. D. W. Simpson and P. G. Richards, Washington, D.C.: American Geophysical Union, 566.4).
- 71) Cao, T, and Aki, K. 1983. Assigning preobability gain for precursors of four large Chinese earthquakes, *J. Gophys. Res.*, **88** (B3), 2185-2190.
- 72) Ogata, Y., Utsu, T. and K. Katsura, 1996, Statistical discrimination of foreshocks from other earthquake clusters, *Geophys. J. Int.*, 127, 17-30.
- 73) Ogata, Y. 2004. Seismicity quiescence and activation in western Japan associated with the 1944 and 1946

- great earthquakes near the Nankai trough, *J. Geophys. Res.*, **109**, B4, B04305, doi:10.1029/2003]B002634.
- 74) Zhuang J., Vere-Jones D., Guan H., Ogata Y. and Ma L. 2005. Preliminary analysis of observations on the ultra-low frequency electric field in a region around Beijing. *PAGeoph.*, 162, 1367-1396, doi:10.1007/s00024-004-2674-3 (with data).
- 75) Ogata, Y. and Katsura, K. 2006. Immediate and updated forecasting of aftershock hazard, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, 10, L10305, doi:10.1029/2006GL025888.
- 76) Ogata, Y. 2006. Monitoring of anomaly in the aftershock sequence of the 2005 earthquake of M7.0 off coast of the western Fukuoka, Japan, by the ETAS model, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, 1, L01303, doi:10.1029/2005GL024405.
- 77) Ogata, Y. 2007. Seismicity and geodetic anomalies in a wide area preceding the Niigata-Ken-Chuetsu earthquake of 23)October 2004, central Japan, *J. Geophys. Res.*, **112**, B10301, doi:10.1029/2006]B004697.
- 78) Ogata, Y. 2010a. Space-time heterogeneity in aftershock activity, *Geophys. J. Int.*, **181** (3), 1575-1592, doi:10.1111/j.1365-246X.2010.04542.x.
- 79) Ogata, Y. 2010b. Anomalies of seismic activity and transient crustal deformations preceding the 2005 M7.0 earthquake west of Fukuoka, *PAGeophys.*, **167** (8-9), doi:10.1007/s00024-010-0096-y.
- 80) Ogata, Y. and Toda, S. 2010. Bridging great earthquake doublets through silent slip: On- and off-fault aftershocks of the 2006 Kuril Island subduction earthquake toggled by a slow slip on the outer rise normal fault the 2007 great earthquake, *J. Geophys. Res.*, 115, B06318, doi:10.1029/2009JB006777.
- 81) Kumazawa, T., Ogata, Y. and Toda, S. 2010. Precursory seismic anomalies and transient crustal deformation prior to the 2008 Mw = 6.9 Iwate-Miyagi Nairiku, Japan, earthquake, *J. Geophys. Res.*, 115, B10312, doi:10.1029/2010JB007567.
- 82) Ogata, Y. 2011. Significant improvements of the space-time ETAS model for forecasting of accurate baseline seismicity, *Earth Planets Space*, **63**(3), 217-229,

- doi:10.5047/eps.2010.09.001
- 83) Ogata, Y. 2011. Pre-seismic anomalies in seismicity and crustal deformation: case studies of the 2007 Noto Hanto earthquake of M6.9 and the 2007 Chuetsu-oki earthquake of M6.8 after the 2004 Chuetsu earthquake of M6.8, *Geophys. J. Int.*, **186** (1), 331-348,
 - doi:10.1111/j.1365-246X.2011.05033.x. Erratum, Geophys. J. Int., 188 (3), 1454, doi:10.1111/j.1365-246X.2011.05306.x, http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-246X.2011.05306.x/abstract.
- 84) Nomura, S., Ogata, Y., Komaki, F. and Toda, S. 2011. Bayesian forecasting of the recurrent earthquakes and its predictive performance for a small sample size, *J. Gophys. Res.*, **116**, B04315, doi:10.1029/2010JB007917.
- 85) Ogata, Y. and Katsura, K. 2012. Prospective foreshock forecast experiment during the last 17 years, *Geophys. J. Int.*, **191** (3), 1237-1244, doi:10.1111/j.1365-246X.2012.05645.x.
- 86) Ogata, Y. 2013. A prospect of earthquake prediction research, *Statistical Science*, **28** (4), 521-541, doi:10.1214/13-STS439.
- 87) Omi, T., Ogata, Y., Hirata, Y. and Aihara, K. 2013. Forecasting large aftershocks within one day after the main shock, *Scientific Reports*, **3** (2218), doi:10.1038/srep02218.
- 88) Ogata, Y., Katsura, K., Falcone, G., Nanjo, K.Z. and Zhuang, J. 2013. Comprehensive and topical evaluations of earthquake forecasts in terms of number, time, space, and magnitude, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **103** (3), 1692-1708, doi:10.1785/0120120063.
- 89) Bansal, A.R. and Ogata, Y. 2013. A non-stationary epidemic type aftershock sequence model for seismicity prior to the December 26, 2004 M9.1 Sumatra-Andaman Islands mega-earthquake, *J. Gophys. Res.*, 118, 616-629, doi:10.1002/jgrb.50068.
- 90) Kumazawa, T. and Ogata, Y. 2013. Quantitative description of induced seismic activity before and after the 2011 Tohoku-Oki Earthquake by non-stationary ETAS models, *J. Gophys. Res.*, **118** (12), 6165-6182, doi:10.1002/2013]B010259.
- 91) Zechar, J.D. and Zhuang, J. 2014. A parimutuel

- gambling perspective to compare probabilistic seismicity forecasts, *Geophys. J. Int.*, **199** (1), 60-68, doi:10.1093/gji/ggu137, October 2014.
- 92) Ogata, Y. and Katsura, K. 2014. Comparing foreshock characteristics and foreshock forecasting in observed and simulated earthquake catalogs, *J. Gophys. Res.*, 119 (11), 8457-8477, doi:10.1002/2014JB011250.
- 93) Kumazawa, T. and Ogata, Y. 2014. Nonstationary ETAS models for nonstandard earthquakes, Ann. Appl. Statist., 8 (3), 1825-1852, doi:10.1214/14-AOAS759, http://projecteuclid.org/euclid.aoas/1414091236.
- 94) Nomura, S., Ogata, Y. and Nadeau, R.M. 2014. Spacetime model for repeating earthquakes and analysis of recurrence intervals on the San Andreas Fault near Parkfield, California, *J. Gophys. Res.*, **119** (9), 7092-7122, doi:10.1002/2013JB010558.
- 95) Zhuang, J., Ogata, Y., Vere-Jones, D., Ma, L. and Guan, H. 2014. Statistical modeling of earthquake occurrences based on external geophysical observations: with an illustrative application to the ultra-low frequency ground electric signals observed in the Beijing region, in Seismic Imaging, Fault Damage and Heal, edited by Li Y., Germany: De Gruyter together with China: Higher Education Press, 351-376.
- 96) Omi, T., Ogata, Y., Hirata, Y. and Aihara, K. 2014. Estimating the ETAS model from an early aftershock sequence, Geophy. Res. Lett., 41, 850-857, doi:10.1002/2013GL058958.
- 97) 庄 建倉, 尾形良彦 2015. 地震予測の評価法について, 統計数理, 63(1), 29-44.
- 98) 尾形良彦 2015. 「特集 地震予測と統計モデル」について、統計数理、**63**(1), 1-2.
- 99) 尾形良彦 2015. 地震の確率予測の研究 その展望, 統計数理, **63**(1), 3-27.
- 100) 熊澤貴雄 2015. 地震活動の異常性とモデリング, 統計数理, **63**(1), 45-64.
- 101) 野村俊一 2015. 活断層で繰り返される地震の点過程 モデルとその長期確率予測,統計数理, **63**(1), 83-104.
- 102) 近江崇宏 2015. 本震直後からの余震活動のリアルタイム短期予測と中期予測、統計数理, **63**(1), 65-81.
- 103) Omi, T., Ogata, Y., Hirata, Y. and Aihara, K. 2015. Intermediate-term forecasting of aftershocks from an early aftershock sequence: Bayesian and ensemble

- forecasting approaches, *J. Gophys. Res.*: Solid Earth, **120** (4), 2561–2578, doi:10.1002/2014JB011456.
- 104) Ogata, Y. and Tsuruoka, H. 2016. Statistical monitoring of aftershock sequences: a case study of the 2015 Mw7.8 Gorkha, Nepal, earthquake, *Earth Planets Space*, **68** (44), doi:10.1186/s40623-016-0410-8.
- 105) Kumazawa, T., Ogata, Y., Kimura, K., Maeda, K. and Kobayashi, A. 2016. Background rates of swarm earthquakes that are synchronized with volumetric strain changes, *Earth and Planetary Science Letters*, 442, 51-60, doi:10.1016/j.epsl.2016.02.049.
- 106) Nomura, S. Ogata, Y., Uchida, N. and Matsu' ura, M. 2016. Spatiotemporal variations of interplate slip rates in northeast Japan inverted from recurrence intervals of repeating earthquakes, *Geophys. J. Int.*, **208** (1), 468-481, doi:10.1093/gji/ggw395.
- 107) Omi, T., Ogata, Y., Shiomi, K., Enescu, B., Sawazaki, K. and Aihara, K. 2016. Automatic aftershock forecasting: A test using real-time seismicity data in Japan, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **106** (6), 2450-2458, doi:10.1785/0120160100.
- 108) Ogata, Y. 2017a. Forecasting of a Large Earthquake: An Outlook of the Research, *Seismol. Res. Lett.*, 88 (4), 1117-1126, doi:10.1785/0220170006.
- 109) Ogata, Y. 2017b. Statistics of Earthquake Activity: Models and Methods for Earthquake Predictability Studies, Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 45, 497-527, doi:10.1146/annurev-earth-063016-015918.
- 110) Kumazawa, T., Ogata, Y. and Tsuruoka, H. 2017.

- Measuring seismicity diversity and anomalies by point process models: Case studies before and after the 2016 Kumamoto Earthquakes in Kyushu, Japan, *Earth Planets Space*, **69**, Article169, https://doi.org/10.1186/s40623-017-0756-6.
- 111) Zhuang, J., Ogata, Y. and Wang, T. 2017. Data completeness of the Kumamoto earthquake sequence in the JMA catalog and its influence on the estimation of the ETAS parameters, *Earth Planets Space*, **69** (36), doi:10.1186/s40623-017-0614-6.
- 112) Guo, Y., Zhuang, J. and Hirata, N. 2018. Modeling and forecasting 3D-hypocenter seismicity in the Kanto region, *Geophys. J. Int.*, **214**(1), 520-530, https://doi.org/10.1093/gji/ggy154.
- 113) Omi, T., Ogata, Y., Shiomi, K., Enescu, B., Sawazaki, K., and Aihara, K. 2018. Implementation of a Real Time System for Automatic Aftershock Forecasting in Japan, *Seismol. Res. Lett.*, **90** (1), 242-250, https://doi.org/10.1785/0220180213.
- 114) Ogata, Y., Katsura, K., Tsuruoka, H. and Hirata, N. 2018. Exploring magnitude forecasting of the next earthquake, *Seismol. Res. Lett.*, 89 (4), 1298-1304, doi:10.1785/0220180034, https://doi.org/10.1785/0220180034.
- 115) Ogata, Y., Katsura, K., Tsuruoka, H. and Hirata, N. 2019 High-resolution 3D earthquake forecasting beneath the greater Tokyo area, *Earth Planets Space*, **71** (113), https://doi.org/10.1186/s40623-019-1086-7.
- 116) Kumazawa, T., Ogata, Y. and Tsuruoka, H. 2019 Characteristics of seismic activity before and after the 2018 M6.7 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake, *Earth Planets Space* (in press).
- 117) Shcherbakov, R., Zhuang, J., Zöller, G. and Ogata, Y. 2019. Forecasting the magnitude of the largest expected earthquake, *Nature Comm.*, **10** (4051).