

情報科学を活用した地震調査研究プロジェクト
(STAR-E プロジェクト)

長期から即時までの時空間地震予測と
モニタリングの新展開

令和4年度
成果報告書（案）

令和5年5月

文部科学省研究開発局

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

本報告書は、文部科学省の科学技術試験研究委託事業による委託業務として、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が実施した令和4年度「情報科学を活用した地震調査研究プロジェクト(STAR-E プロジェクト)「長期から即時までの時空間地震予測とモニタリングの新展開」」の成果を取りまとめたものです。

グラビア

テーマA：非定常 ETAS モデルのベイズ解析での流体駆動の群発地震の量的特徴付け

非定常ETASモデル： $\lambda_{\theta}(t|H_t) = \mu(t) + \sum_{\{t_i: S \leq t_i < t\}} K_{\theta}(t_i) e^{\alpha(M_i - M_c)} / (t - t_i + c)^p$

$\lambda_{\theta}(t|H_t), \mu(t), K_{\theta}(t_i)$

単位は地震数/日、各色は下図に対応

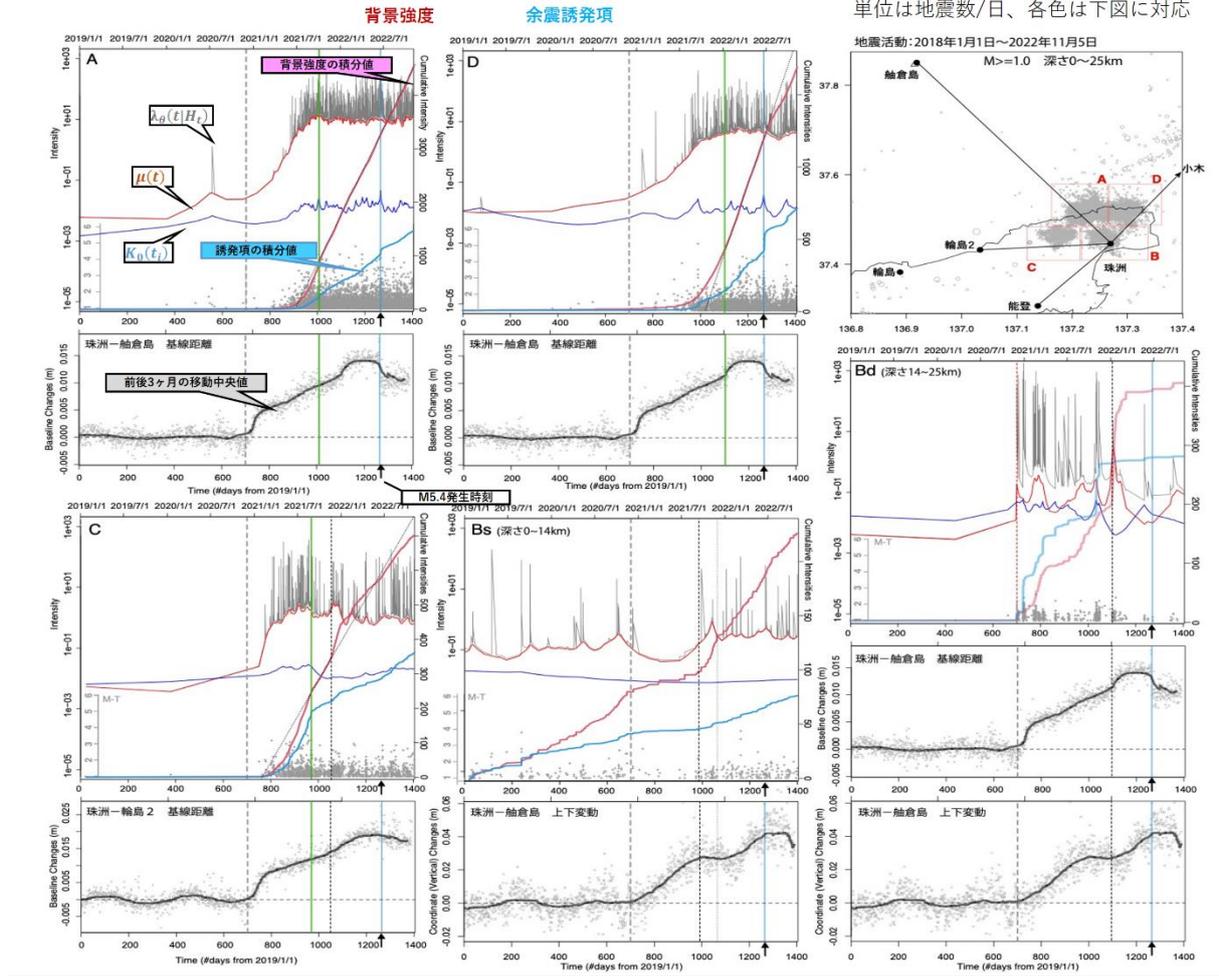


図1 各地域の地震活動と地殻変動：右上の地図パネルの赤矩形は地震活動の領域分け (A~D) で黒丸はGNSS観測点。A, C, D, Bs, Bd地域の各パネルは各領域で非定常ETASモデルのパラメータ推定とGNSS斜距離または上下変化。すなわち、赤曲線は非定常ETASモデルの背景強度関数とその累積関数、青曲線は余震誘発強度関数とその累積関数の時間変化。灰色点はM-T図。下段は当該の斜距離及び上下変動 (灰色丸) で、前後の90日の移動中央値 (黒曲線) を含む。各縦点線に有意な変動時期を示す。

テーマB：背景地震活動度を用いた内陸地震の長期予測と検証評価

直下型大地震について背景地震活動度から長期の確率予測の実装を達成し、予測評価を他モデルとの比較を実施した。

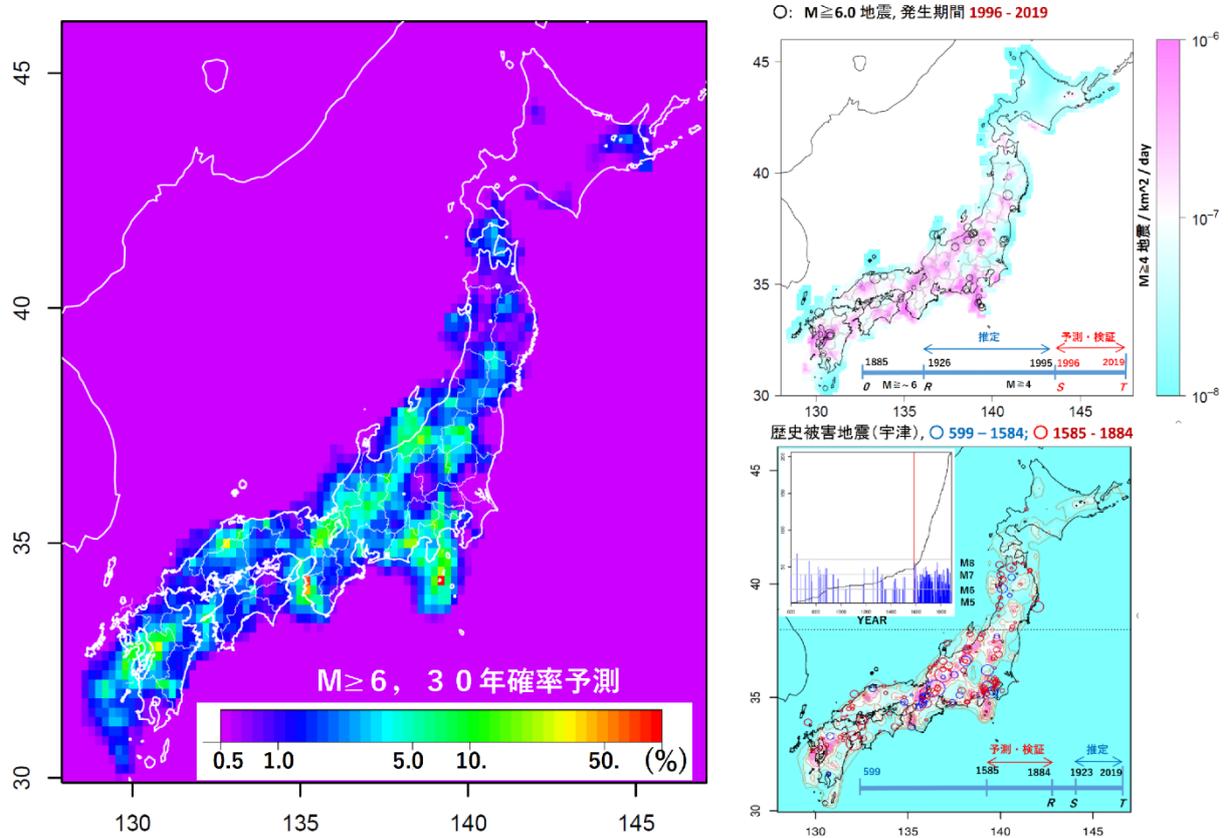


図2 確率予測と結果。右側上下図は対象期間 1923-2018 年の日本周辺における $M \geq 4.0$ の地震の震央（色付点）に対する最適な μ の MAP 推定。カラーは線形化された頻度で、1 日・ 1 deg^2 当たりの確率を表す。左側図は $b = 0.9$ を仮定した場合、日本内陸部の各 $0.2^\circ \times 0.2^\circ$ セル（約 400 km^2 ）において 30 年間に $M \geq 6$ が発生する確率予測。

テーマC及びD：緊急地震速報技術である拡張 IPFx 法の改良

テーマCとDの協同で緊急地震速報時の観測点選択法の検討を開始した。

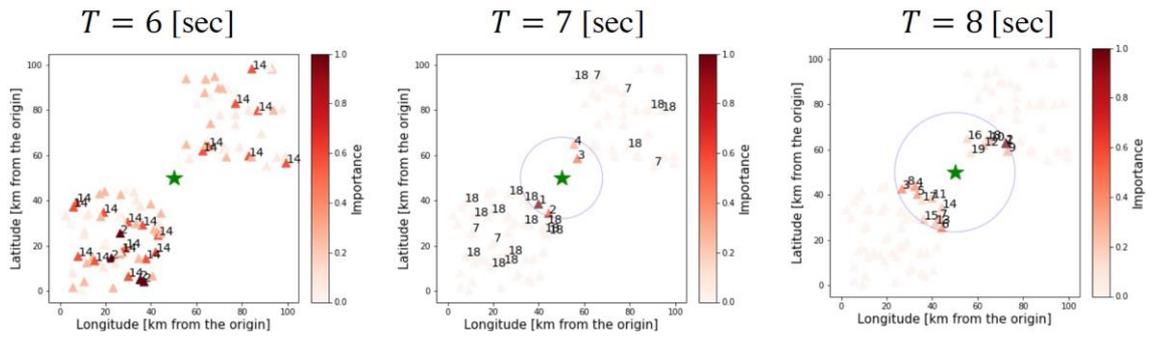


図3 観測点の重要度の時間変化。三角印は観測点、小さい数字は重要度の順位を示す。

はじめに

本プロジェクトは、多様で複雑な地震活動のもと、熊本地震列や東北沖前後の大地震、南海トラフ地震、1938年福島沖大群発地震などのような、連発大地震発生の可能性を考慮した時空間 ETAS モデルなどによるオンラインの短期確率予測から即時把握を可能にし、地震動モニタリングを含む有益なモデルの開発・展開・実装を目的とする。緊急時に対応して臨時観測網を含む観測点の多量さや多種多様性を考えた、大地震後の臨時観測における各種観測網の配置設計を予測の観点から事前に機動的に最適化する自動化アルゴリズムを開発する。こうして発展した統計学の理論と手法を、日本の地震データや測地データの解析・予測に創造的に応用・発展させる。

時空間 ETAS モデルを始めとした長期・中期・短期の多項目の確率予測から想定された地震学的シナリオの配分確率のもと、地震動予測や緊急観測網の機動的な展開や首都圏観測網などの効果的な利用を目指す。とくに予測を合わせ技（多項目複合確率予測）として確率利得を高め、オンライン予測で実装することを目指す。オンラインの確率予測の出力は、緊急地震速報の事前シナリオに活用するとともに、システムの信頼性を向上させるための事前情報として使用し、また想定された地震学的シナリオの配分予測確率のもと地震動予測や緊急観測網の機動的な展開を目指す。

以上の成果の各種の予測出力（地図、画像、動画）の可視化手段を整備し、各種のデータがリアルタイムに使用可能な状況に備え、本研究プロジェクトの課題間の連携で、それぞれの専門分野の特長を最大限に活用し地震分野の発展と地震防災の対策に貢献をもたらす所存である。

目次

1. 研究課題の概要	1
2. 研究成果の説明	2
2. 1 テーマA：日本地域データ解析による地震活動モデリングと方法論の高度化 ..	2
(1) 業務の内容	2
(2) 令和4年度の成果	3
2. 2 テーマB：地震活動の予測システムの構築	2 2
(1) 業務の内容	2 2
(2) 令和4年度の成果	2 3
2. 3 テーマC：予測とモニタリングのための観測網情報統合最適化	3 5
(1) 業務の内容	3 5
(2) 令和4年度の成果	3 6
2. 4 テーマD：情報科学に基づいて即時地震動予測の高速化と高精度化	4 5
(1) 業務の内容	4 5
(2) 令和4年度の成果	4 6
3. まとめ	5 2
4. 活動報告	5 3
5. むすび	5 5

1. 研究課題の概要

連発大地震発生の可能性を考慮した短期確率予測および即時把握をするため、地殻変動や地震動モニタリングを含む各種予測モデルの開発・展開・実装を目的とする。そのため統計地震学や多変量時系列解析を含む統計科学の最新の高次元大容量の計算方法を活用して、地震発生の長期・中期・短期予測と即時把握とそれらの信頼度を与える。

先ず、時空間 ETAS モデルを震源データの不均質性などを克服し高度化し、地殻変化や地震活動の異常変化などを考慮し、長期・中期・短期といった異なる時間スケールの確率予測とそれらの複合的確率予測をオンライン・システムに実装する。リアルタイムの確率予測の出力は、以下のように、緊急地震速報の事前シナリオの想定尤度に活用するとともに、システムの信頼性を向上させるための事前情報として使用できるようにする。

多様で複雑な地震活動のもと、連発大地震発生の可能性を考慮した時空間 ETAS モデルなどによるオンラインの短期確率予測から即時把握を可能にし、地震動モニタリングを含む必要なモデルの開発・展開・実装を目的とする。開発に際して重み付きグラフデータ解析の知見等最新の機械学習手法を取り入れた高度化を図る。

緊急時に対応して臨時観測網を含む観測点の多量さや多種多様性を考えた、大地震後の臨時観測における各種観測網の配置設計を予測の観点から事前に機動的に最適化する自動化アルゴリズムを開発する。

各種の予測出力（地図、画像、動画）の可視化手段を整備し、震源の速報データなどがリアルタイムに使用可能な近未来状況に備える。

以上、研究目的は以下のように列挙される。

- ・背景地震活動度、地殻歪み蓄積率、活断層 BPT モデルのベイズ予測による永年・長期の確率予測の実装。
- ・時空間 ETAS モデルによるオンライン短期確率予測の実装。
- ・ETAS モデル「残渣解析」や GNSS 地殻変化データなどの異常解析データベースに基づく中期予測の全国展開。
- ・事前に考えられるシナリオと時空間 ETAS モデルなどでのオンライン予測に対応した地震動予測や、連発地震のもとでの安定した高速高精度の緊急地震速報システムの実装。
- ・機動的予測・モニタリングのための地震計や測地計の最適な観測網情報統合の自動構築。
- ・各種統計地震学ベイズモデルの推定パラメータや予測の可視化、新規観測網配置最適化ソフトウェアの開発、および即時地震動予測精度の可視化ソフトウェアの提供。

2. 研究成果の説明

2. 1 テーマA：日本地域データ解析による地震活動モデリングと方法論の高度化

A-1 高次元 ETAS モデル

A-2 摩擦構成則に基づく応力と地震活動との定量的関係を用いることによる、背景地震活動と背景応力場の推定

A-3 時空間的非定常・非一様性を調査する階層モデリング

A-4 地殻変動異常現象の因果性の評価

A-5 地震活動の ETAS モデルからの乖離の異常と物理的解釈

(1) 業務の内容

(a) 業務の目的

多様な高次元・大容量データの解析に資するためマーク付き点過程をはじめとする統計地震学や多変量時系列解析の最新の計算方法を活用して、地震発生の長期・中期・短期予測と即時把握とそれらの応用可能性を追求する。多様で複雑な地震活動のもと、連発大地震発生の可能性を考慮した高度化時空間 ETAS モデルなどによるオンラインの短期確率予測モデルの開発・展開につながることを目的とする。先ず、令和3年度と4年度で従来の時空間 ETAS モデルを高度化する。令和3年度で震源データの不均質性などを克服する。

(b) 研究者の所属、氏名、研究実施期間、研究費等

所属機関・部局・職名	氏名	研究実施期間	配分を受けた研究費	間接経費
統計数理研究所・モデリング研究系・准教授	庄 建倉	R4. 4. 1 ～ R5. 3. 31	28,508,000 円	8,552,000 円
県立広島大学・大学教育実践センター・准教授	岩田 貴樹	R4. 4. 1 ～ R5. 3. 31	1,000,000 円	300,000 円

注) 配分を受けた研究費は、間接経費を含まない額。

(c) 5か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 令和3年度 [実施業務の要約]

高次元 ETAS モデル、背景地震活動、および異常現象のモデル化については、地震メカニズム解成分を含むモデルや全地球のモデルを作成し、これらに基づいた異常現象解析についても検討することとした。

2) 令和4年度 [実施業務の要約]

時空間 ETAS モデルを断層破壊モデルと比べて余震強度が調和的な結果を得た。また発震メカニズムを時空間 ETAS モデルに組み込んだ。そして地球規模の地震を解析するための全地球 ETAS モデルを開発した。

3) 令和5年度

背景地震活動、GNSS などの異常現象のモデル化、乖離地震活動の探索、乖離地震活動の探索について取り組む。

4) 令和 6 年度

背景地震活動、乖離地震活動の探索、乖離地震活動の探索を前年度に続いて取り組み、GNSS と地震活動因果解析に取り組む。

5) 令和 7 年度

引き続き GNSS 異常現象による地震活動因果解析に取り組む。

(d) 令和 4 年度の業務の目的

- ・実際に F-net 地震カタログを高次元時空間 ETAS モデルに入力するための解析用のソフトウェアを作成
- ・大地震の破壊域形状や震源メカニズムなどによる余震配置への影響を考慮し、余震群の位置座標から断層形状を再構築して求める手法を日本の地震活動に適用し、オンラインで解析した予測試験
- ・摩擦構成則に基づく応力と地震活動との定量的関係を用いることにより、背景地震活動と背景応力場の推定を行い、実データを用いた解析
- ・常時地震活動度の解析と短期予測に応用されている時間および時空間の非定常・非一様性を表現する、「ベイズ的 ETAS モデル」及び「重み付き尤度に基づく非ベイズカーネル型モデル」の、2 つの異なったアプローチの予測性能の比較評価
- ・異常現象の因果性の評価及び外部変数入力的一端として、多くの観測異常データに対し異常診断法を適用し、地震発生予測における異常として有意かどうかの組織的な検証
- ・時間域の ETAS モデルを標準ベースラインモデルとして使用し、通常地震活動の相対的静穏化・活発化や、ゆっくりすべりに起因する群発活動などの、モデルの非適合度の各種の統計的異常現象の検出および物理的解釈

(2) 令和 4 年度の成果

(a) 業務の要約

1) A-1 高次元 ETAS モデル

高次元時空間 ETAS モデルを高度化するための解析用のソフトウェアを公表した。特に全球地震活動を解析できる球面版 ETAS モデルを実装した。余震群の位置座標から断層形状を再構築して求める手法をオンラインで解析し予測試験を行った。世界の各地域における地震発生パターンの比較・調査を開始した。応力と地震活動との定量的関係から、実データを用いて背景地震活動と背景応力場の推定を行った。但し、モデルは時間のみを変数としたものとし、また余震活動など限られた小領域での解析を中心とした。

2) A-2 摩擦構成則に基づく応力と地震活動との定量的関係を用いることによる、背景地震活動と背景応力場の推定

余震活動の時間減衰などから対数的な応力の時間変化が想定されており、摩擦構成則の統計モデル版の本手法から従来の想定ではパラメトリックモデルにより応力の時間変化を表現してもこれに似通った応力の時間変化が得られた。

3) A-3 時空間的非定常・非一様性を調査する階層モデリング

非定常 ETAS モデルのベイズ解析での流体駆動の群発地震の特徴付けが可能になり、各地で進行中の群発地震活動のモニタリングに使っている。さらに「ベイズ的 ETAS モデル」と「重み付き尤度に基づく非ベイズカーネル型モデル」の、異なったアプローチの短期予測性能を比較評価するための高速度計算機環境を整えた。

4) A-4 地殻変動異常現象の因果性の評価

多くの観測異常データに対し異常診断法を適用し、地震発生予測の共変量として有意かどうかを組織的に検証し予測するツールとして有用であることを実証した。検証では、外部情報によって影響される予測モデルを作成するとともに、応答関数（切迫性などの警告期間の情報）を抽出した。

5) A-5 地震活動の ETAS モデルからの乖離の異常と物理的解釈

時間域の ETAS モデルを標準ベースラインモデルとして使用し、通常地震活動の相対的静穏化・活発化や、ゆっくりすべりに起因する群発活動など、モデルの非適合度や GNSS 基線距離時系列などの各種の統計的異常現象を検出し、ゆっくりすべりシナリオの測地学的モデルなどの解釈を試みた。

(b) 業務の成果

1) A-1 高次元 ETAS モデル

球面版 ETAS モデル 地球規模あるいは高緯度地域の地震発生を解析・予測するために、特に世界規模の遠隔地震相互作用に関連して、時空間 ETAS モデルを平面型から球面型に改編し、FORTRAN ソフトウェアパッケージ SETAS を実装し、公表した(Xiong Z et al, 2023)。このパッケージは、3 種類の境界（無境界、四辺形境界、球形多角形境界）で指定された地域の地震データに球面版 ETAS モデルを適合させることができた。本ソフトウェアは、Global Centroid Moment Tensor (Global CMT) カタログを用いてテストされ、日本とアラスカのローカル地震に両バージョンをフィットさせて、通常の平面上の ETAS モデルと比較した。その結果、球面版モデルは、広い範囲の全球データでも高い計算効率を持ち、局所スケールでは定評のある平面版 ETAS モデルと整合性があることが分かった。このモデルを用いて、世界の各地域における地震発生状況の調査を開始した。結果の一つは、バックグラウンドの地震活動が過去

15 年間定常的であったことである。 発表した論文に関連アルゴリズムの詳細と使用方法を説明した。

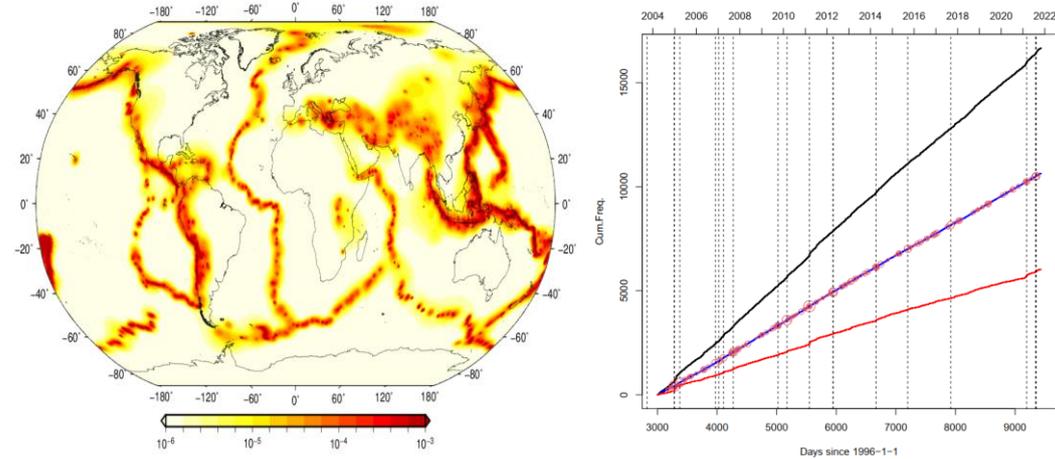


図1 全球時空間 ETAS モデルで推定された $M_w > 5.2$ の背景地震活動率 (イベント/日/deg²) の空間変化(左)および背景地震活動の累積時間変化(右、中間の丸付き青線)。最上の黒線は全活動、最下の赤線はトリガー効果の地震の累積時間変化。

震源メカニズムを組み込んだ ETAS モデルへの拡張

F-net データの解析により、日本の背景地震活動と誘発された地震における種々の震源メカニズムの確率分布を求めるために、各震源メカニズムは基準震源メカニズムを起点として特定の極を中心に回転した結果として分解された。背景地震については、各領域の平均震源メカニズムを参照震源メカニズムとし (Kagan Y et al, 2014)、誘発された地震の参照震源メカニズムは親地震の震源メカニズムをとった。背景地震と局所平均震源メカニズムの間の回転角および親地震とその直接の子イベント間の回転角、ETAS モデルから、確率で重み付けして再構成した。また、回転極はほぼ一様に分布していることが分かった。令和 3 年度の結果の上で、令和 4 年度発震機構を組み込んだ ETAS モデルを以下のように提案した。

$$\lambda(t, x, y, \phi) = \mu(x, y) \zeta(\Delta(\phi, \phi_0(x, y))) + \sum_{t_i < t} \kappa(m_i) g(t - t_i) f(x - x_i, y - y_i; m_i) \xi(\Delta(\phi, \phi_i))$$

上式において ϕ は震源メカニズムを表し、 $\Delta(\phi_1, \phi_2)$ は 2 つの地震機構 ϕ_1 と ϕ_2 の間の回転角度を表し、 $\phi_0(x, y)$ は位置 (x, y) の平均震源メカニズムである。背景地震と誘発された地震の両方の震源メカニズムの分布は、基準震源メカニズムに対する角度分布で表すことができる。背景地震の基準機構は背景地震の平均震源メカニズムであり (1)、誘発された地震の基準機構は親地震の震源メカニズムである (2) という違いがある。つまり

$$\zeta(\Delta) = \exp[A_1 e^{-B_1 \Delta}] \xi_0(\Delta), \quad (1)$$

$$\xi(\Delta) = \exp[A_2 e^{-B_2 \Delta}] \xi_0(\Delta). \quad (2)$$

そして、これらの回転角度の密度関数は、いずれも一様な確率密度関数 $\xi_0(\Delta)$ に、二重指数関数のスケーリング係数を掛けて与えることができる。密度関数の正規化を考

えると、実際には合計2つの新しいパラメータが導入された。この結果は2022年度統計関連学会大会にて発表された。

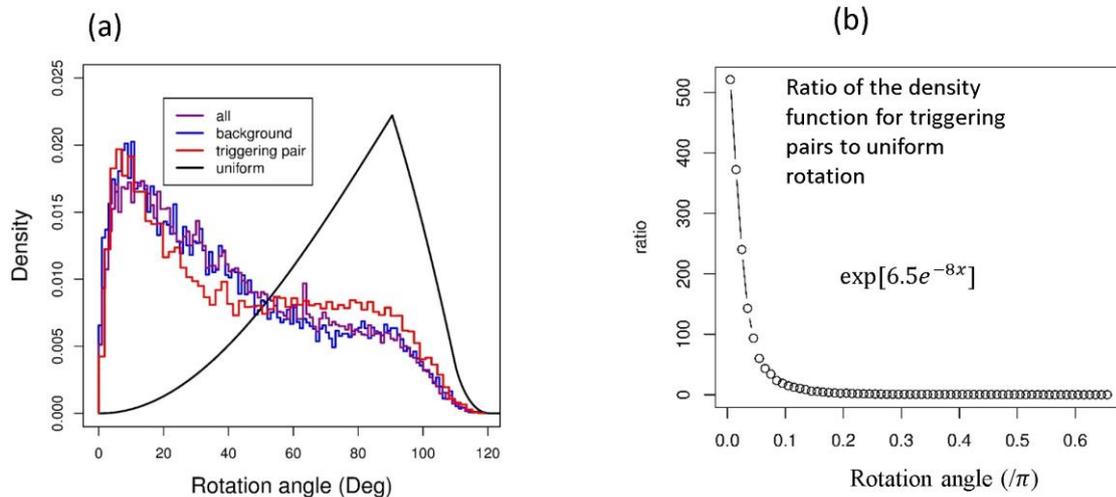


図2 (a)は背景地震と誘発された地震における震源メカニズムの回転角の再構成された確率密度関数、(b)は誘発された地震の震源メカニズム間の回転角の確率密度関数と一様回転確率密度関数の比を示している。

2) A-2 摩擦構成則に基づく応力と地震活動との定量的関係を用いることによる、背景地震活動と背景応力場の推定

摩擦構成則の統計モデル版 ETAS (Epidemic Type Aftershock Sequence) モデルを改良するものとして、「摩擦構成則」に基づく Dieterich モデルを導入することを試みた。

ETAS モデルにおいては地震活動を「クラスター成分」と「(比較的) 長期の地震活動変化 (トレンド) 成分」に分けて地震活動のモデリングを行っている。前者は余震発生による応力変化に伴う余震の発生 (自己励起過程) に対応し、後者は余効変動など (比較的) ゆっくりとした応力変化 (背景応力場) に伴う余震の発生にそれぞれ対応する。後者については、元々定常項が用いられていたが (Ogata Y et al, 1988)、多項式 (Iwata T et al, 2006) や区分線形関数 (Kumazawa T et al, 2014) によるモデリングがある。但し、これらの試みでは背景応力場と地震活動との関係が明示的ではない。これに対し、Dieterich モデルを導入することで、両者の関係をより直接的に表すことが可能となる。ところで、従来研究では Dieterich モデルにおける背景応力場の応力変化が時間一定と仮定されていることが殆どである。これに時間変動を許すことで、より現実的なモデリングを行った。

背景応力場の応力レート (単位時間あたりの応力変化) は2つの地震発生間においては一定とし、地震発生時にステップ状に変化し得るものとした。但し、応力レートは (ある程度) 滑らかに変動とする平滑化条件を課し、平滑化の強さも「フルベイズ」と呼ばれる枠組みで応力レート (や ETAS モデルおよび Dieterich モデルのパラメータ)

と同時に推定を行った。推定アルゴリズムにはマルコフ連鎖モンテカルロ法を用いた。そして、この推定手法を 1995 年兵庫県南部地震の余震データに適用した。

これまでの研究においては余震活動の時間減衰などから対数的な応力の時間変化が想定されており、本推定手法からもこれに似通った応力の時間変化が得られた。但し、従来の想定ではパラメトリックモデル（関数形の決まったもの）により応力の時間変化を表現していたが、本手法では関数形を特定しない柔軟なモデリングとなっており、従来想定よりも、より適切なモデリングへの展開が期待される。

3) A-3 時空間的非定常・非一様性を調査する階層モデリング

非定常 ETAS モデルから見える群発地震活動の地域的变化 石川県能登半島で 2020 年 11 月末から活発化した群発地震は 4 つの震央クラスター A~D に分かれており、群発期以前から活動の見られた領域 B 浅部の活動が 2020 年 11 月末に 14km 以深へ移動して以降、時間を置いて周辺の 3 領域で C, A, D 順に次第に活発化した。非定常 ETAS モデル (Kumazawa T et al, 2013) を各領域に当てはめ推定した。このモデルは定常 ETAS モデルの背景強度 μ と余震的誘発率 K_0 のパラメータが時間 t に依存すると仮定したものである。モデルパラメータ推定に加えて、各領域 A~D を通る GNSS 斜距離や珠洲観測点の上下変動との対応も考察した。

背景強度の時間変化 $\mu(t)$ と斜距離の加速的増大は、珠洲観測点周辺の上昇時刻に始まって、B 地域深部から他地域の脆性断層内への流体貫入による破壊に至るシナリオと矛盾しない。 $\mu(t)$ や珠洲-舳倉島や珠洲-輪島 2 の斜距離の加速的増大の開始時刻および等速的増大に転じる遅延や時間間隔は、B 地域と群発他地域が離れていることに関係していると思われる。すなわち B 地域と他地域には地震の空白域がみられるが、そこで流体圧増加に起因する非地震性すべりや断層開口が生じたと考えられる。また B 地域深部 (Bd) での間欠的な群発地震で $\mu(t)$ の増加と後続地震への余震誘発率 $K_0(t)$ との比が大きく異なる場合があり、余震活動度の小さい $\mu(t)$ の増加が地殻変動に大きく寄与しているのではないかと推察する (熊澤, 尾形, 2023)。

非正常ETASモデル： $\lambda_{\theta}(t|H_t) = \mu(t) + \sum_{i:S \leq t_i < t} K_0(t_i) e^{\alpha(M_i - M_c)} / (t - t_i + c)^p$,

$\lambda_{\theta}(t|H_t), \mu(t), K_0(t_i)$

単位は地震数/日、各色は下図に対応

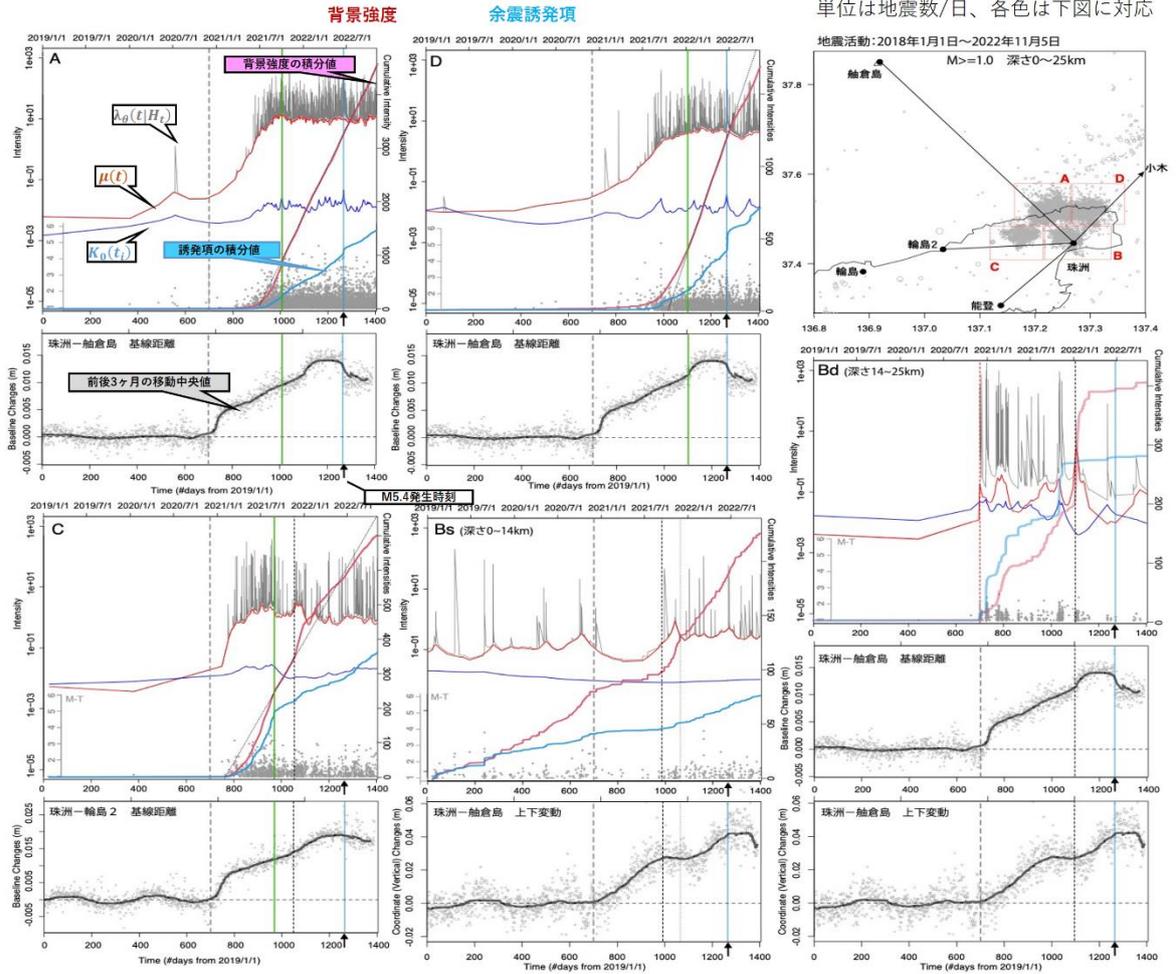


図3 各地域の地震活動と地殻変動. 右上の地図パネルの赤矩形は地震活動の領域分け (A~D) で黒丸はGNSS観測点. A, C, D, Bs, Bd 地域の各パネルは非正常ETASモデルのパラメータ推定 (上) とGNSS斜距離・上下変化 (下). 赤曲線は背景強度とその累積、青曲線は余震誘発強度とその累積の時間変化、灰色点はM-T図、下段は当該の斜距離及び上下変動 (灰色丸) で、前後の90日の移動中央値 (黒曲線) を含む。各縦点線に有意な変動時期を示す。

4) A-4 地殻変動異常現象の因果性の評価

地震活動のクラスタリング効果はETASモデルをベースラインとして採用し、そのうえで以下の様に地震予測における異常性の効果をモデル化した:

$$\lambda(t) = \mu + \sum_{i:t_i < t} \kappa(m_i)g(t - t_i) + \sum_{j:s_j < t} \xi(E_j)h(t - s_j).$$

上式中、 $\mu + \sum_{i:t_i < t} \kappa(m_i)g(t - t_i)$ は時間的なETASモデルの条件付き強度であり、最終項で、 $\xi(E_j)$ は大きさ E_j の異常度、そして $h(t) = \exp[-t^2/(2D^2)]$ である。上式において、 s_j は異常時刻と t_i は地震時刻、 D は警戒時間窓の長さである。これらのパラメータ値は最尤法によって推定し、モデルの適合度はAICで比較することができる。

上記のモデルを用いて、気象庁柿岡観測所の磁気記録の異常の発生時刻と、観測所から100km以内の $M \geq 4.0$ 地震との相関関係を解析した（図4a）。その結果、この観測点の磁気信号異常は近隣の地震発生強度に対して弱い説明効果を示している。ただし、大きな地震に対して効果はより顕著で、たとえばETASモデルに対するマグニチュード5.0以上の地震の平均確率利得は1.40まで上昇した。図4bは、自己励起効果（高いスパイク）と異常の説明効果（低い山々）の両方を示している。より高い確率の利得を持つ予測を達成することができるモデルを獲得するためには、より長期の物理・地球科学データの系統的観測とモデリング研究が必要である。

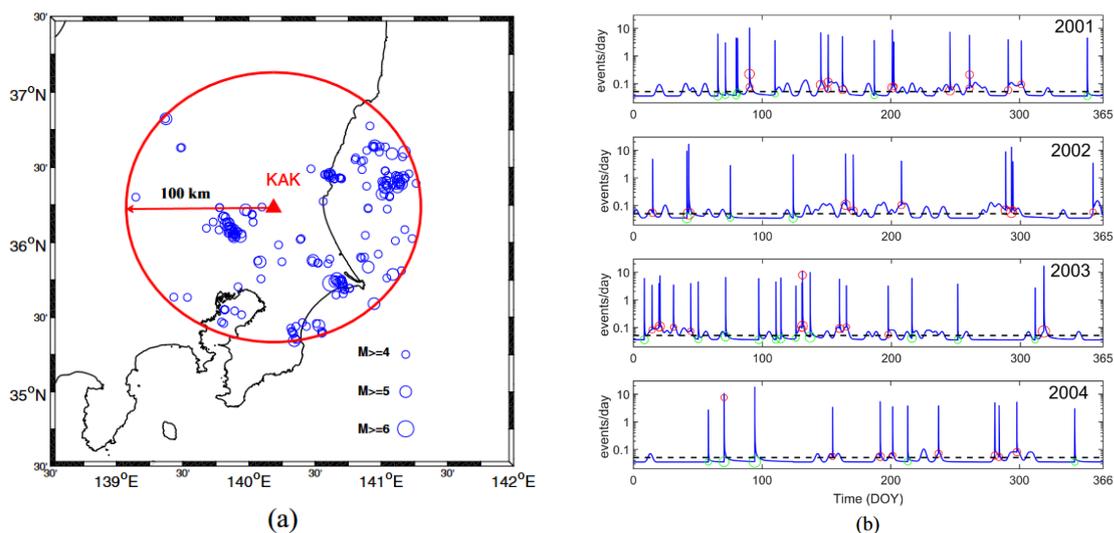


図4 (a) 柿岡観測所の位置 (▲) と2001年から2010年までにかけて発生した近隣の $M4.0+$ の地震の震央位置。(b) 青曲線は適合モデルによる強度変化で、水平破線は $M4.0+$ の地震の平均発生率、○と○は各地震の発生時刻における条件付強度の値の位置を示し、○は条件付強度が平均率より高い時間帯に発生した地震で、○は平均値より低い時間帯に発生した地震を表している。

5) A-5 地震活動のETASモデルからの乖離の異常と物理的解釈

南海トラフ地域における群発地震の検出、その特徴およびスロースリップ現象との関連性 南海トラフの沈み込み帯ではスロー地震(SSE)や低周波地震が発生しており、相互に過渡現象を誘発すると考えられている。本研究では非正常な背景地震活動率を組み込んだ時空間ETASモデルを用い、Nishikawa and Ide(2017)とPeng et al.(2021)が提案した異常活動検出手法を適用して南海トラフ沿いの選択領域においてSSEに関連する可能性のある地震活動を調べたところ、 $M \geq 1.0$ の地震で999個の群発地震系列が検出された。これらは同領域における地震の約18%(13,387個)を占め、日向灘、豊後水道、紀伊水道、東海沖に多く分布する。群発地震の7割近くは西部に位置し、南部ほど発生率が高いという特徴がある。このことは南部でSSEの発生間隔が短いことと一致する。

群発地震の発生領域は大域的にはSSEを空間的に補完するように分布しているが、

豊後水道、紀伊半島南西部、東海沖では SSE と部分的に重なる。群発地震の発生時刻を SSE の発生時刻と比較すると、一部の SSE では発生期間中に群発地震が活発化することが分かった。この現象は 2003 年と 2010 年の豊後水道の SSE で特に顕著であり、この地域における群発地震が SSE と良く相関することが示唆される。群発地震と SSE の相関は南海領域では一般的な現象ではないが、異常な地震活動の過渡現象を検出し特徴付けることは、南海沈み込み帯の地震性・非地震性の相互プロセスを理解する上で重要である (Guo Y et al, 2023)。

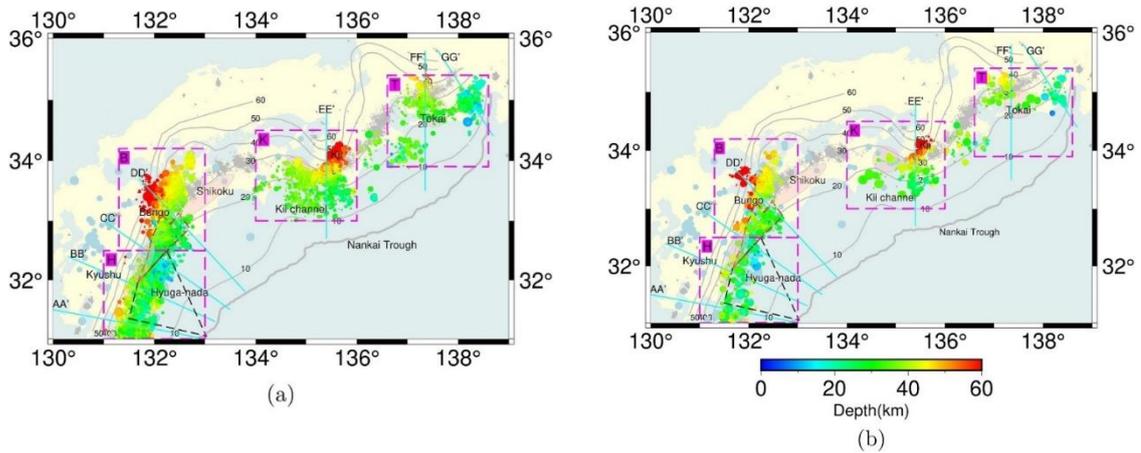


図5 検出された異常地震列の空間分布：(a)群発地震群、(b)余震系列群。色付きの円は地震深度を示し、大きさはそのマグニチュードを表す。

ETAS を用いた低周波地震の解析 富士山直下で 2003-2019 年に起きた低周波地震を ETAS モデルで解析した結果、東北沖地震(2011年3月11日)の4日後に起きた静岡東部地震により活動が活発化し、今もなお、以前の活動レベルに戻っていないことが分かった。静岡東部地震が起きた影響で、マグマだまりの周辺に亀裂が生じマグマシステムが変化して、低周波地震が活発化したことが示唆される。

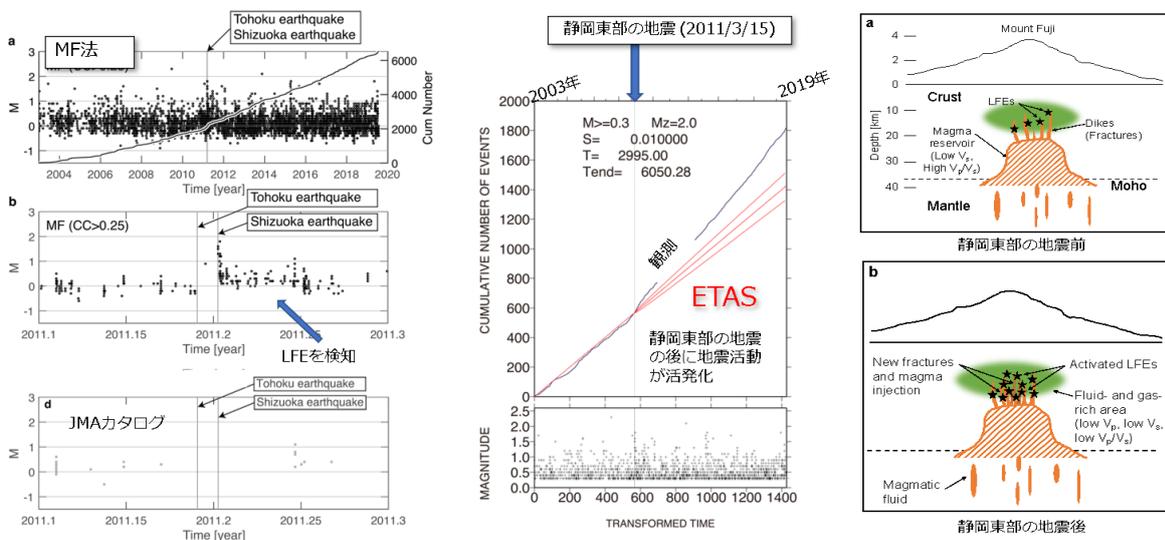


図6 富士山直下の低周波地震の解析。左側パネル：低周波地震を検知する研究の結果、静岡東部地震(2011年3月15日)の直後に低周波地震が起きていた。中央パネル：ETAS解析により静岡東部地震のタイミングで低周波地震の活動が活発化したことが判明した。赤線は、2003年から静岡東部地震までの地震活動に基づくETASから期待される活動レベル。黒線は観測された活動レベル。右側パネル：静岡東部地震が起きた影響で、マグマだまりの周辺に亀裂ができ低周波地震が活発化したことを示す模式図。

引用文献

- Xiong Z, Zhuang J (2023) *SETAS: a spherical version of the space–time ETAS model*. **Seismological Research Letters**. doi:10.1785/0220220198
- Zhuang J, Ogata Y, Vere-Jones D (2002). *Stochastic declustering of space-time earthquake occurrences*. **Journal of the American Statistical Association**, 97: 369-380.
- Zhuang J, Ogata Y, Vere-Jones D (2004). *Analyzing earthquake clustering features by using stochastic reconstruction*. **Journal of Geophysical Research**, 109, No. B5, B05301, doi:10.1029/2003JB002879
- Kagan Y, Jackson D (2014) *Statistical earthquake focal mechanism forecasts*. **Geophysical Journal International**. 197: 620-629. doi:10.1093/gji/ggu015
- Ogata Y, (1988), *Statistical models for earthquake occurrences and residual analysis for point processes*. **J. Amer. Stat. Assoc.** 83:9-27.
- Iwata T., Katao H. (2006). *Correlation between the phase of the moon and the occurrences of microearthquakes in the Tamba region through point-process modeling*, **Geophys. Res. Lett.**, 33: L07302, doi:[10.1029/2005GL025510](https://doi.org/10.1029/2005GL025510)
- Kumazawa. T, Ogata Y (2014). *Nonstationary ETAS models for nonstandard earthquakes*. **Annals of Applied Statistics**. 8:1825-1852. Doi: 10.1214/14-AOAS759
- Kumazawa T, Ogata Y (2013) *Quantitative description of induced seismic activity before and after the 2011 Tohoku-Oki earthquake by nonstationary ETAS models*. **J. Geophys. Res. Solid Earth**, 118 (12): 6165–6182. doi: 10.1002/2013JB010259
- 熊澤貴雄, 尾形良彦 (2023). *非定常ETASモデルから見える能登半島群発地震活動の地域的变化(続報2)*. **地震予知連絡会会報** 109 (7-2): 321-325, 2023年3月.
- Nishikawa T, Ide S (2017). *Detection of earthquake swarms at subduction zones globally: Insights into tectonic controls on swarm activity*. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, 122(7), 5325–5343. <https://doi.org/10.1002/2017jb014188>
- Peng W, Marsan D, Chen K H, Pathier E (2021) *Earthquake swarms in Taiwan: A composite declustering method for detection and their spatial characteristics*. **Earth and Planetary Science Letters**, 574:117160. doi:10.1016/j.epsl.2021.117160
- Guo Y, Zhuang J, Zhang H. (2023) *Detection and characterization of earthquake swarms in Nankai and its association with slow slip events*. **Journal of Geophysical Research:**

(c) 結論ならびに今後の課題

1) A-1 高次元 ETAS モデル

球面上の ETAS モデルソフトウェアを公表した。球面上の ETAS モデルによって、全地球の地震活動の特徴付けと各種の統計的異常現象の検出を試みた。発震機構を組み込んだ ETAS モデルを実装した。

今後は時空間 ETAS モデルを基盤に、震源の深さ、主な地震の断層形状、および発震機構をオンラインの震源データから推定する予測システムの実現を試みる。郭・庄・平田が提案したオンライン予測実施する首都圏直下の 3 次元 ETAS モデルの高度化を目指したい。

2) A-2 摩擦構成則に基づく応力と地震活動との定量的関係を用いることによる、背景地震活動と背景応力場の推定

余震活動の時間減衰などから対数的な応力の時間変化が想定されており、摩擦構成則の統計モデル版の本手法から、従来の想定ではパラメトリックモデルにより応力の時間変化を表現してもこれに似通った応力の時間変化が得られた。本手法では関数形を特定しない柔軟なモデリングとなっており、従来想定よりも、より適切な背景地震活動と背景応力場の推定への展開を試みる。

3) A-3 時空間的非定常・非一様性を調査する階層モデリング

非定常 ETAS モデルのベイズ解析での流体駆動の群発地震の特徴付けが可能になった。「ベイズ的 ETAS モデル」と「重み付き尤度に基づく非ベイズカーネル型モデル」の短期予測性能を比較評価するための高速度計算機環境を整えた。

今後は群発地震の詳細を捉えるため、下限マグニチュードに捉われることなく、検出率を考慮した解析が可能なモデルを追求したい。リアルタイムで、後続する最大地震発生確率などを予測するモデルを作成したい。結果の可視化による情報発信に向けた検討を含め、次年度で実装したい。

4) A-4 地殻変動異常現象の因果性の評価

多くの観測異常データに対し異常診断法を適用し、地震発生予測の共変量として有意かどうかを検討し検証した。検証では、外部情報によって影響される予測モデルを作成するとともに、予測の時間効果の応答関数のモードなどを抽出した。

今後は時間的切迫性や影響域スケールに関する異常の応答関数を、テーマ B-4 に組み込むことを目指したい。

5) A-5 地震活動の ETAS モデルからの乖離の異常と物理的解釈

時間域の ETAS モデルを標準ベースラインモデルとして使用し、通常地震活動の相対的静穏化・活発化や、ゆっくりすべりに起因する群発活動など、モデルの非適合度などの各種の統計的異常現象を検出し、物理的解釈を試みた。特に、南海トラフ地域における群発地震の検出し、その特徴およびスロースリップ現象との関連性を探した。

今後は点過程の残差理論に基づいた、より多くの異常現象の検出方法を開発したい。

(d) 成果の論文発表・口頭発表等

1) 学会等における口頭・ポスター発表 : 計 26 件、うち海外計 9 件

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別	主たる成果
富士山噴火予知実現のための多角的監視 22-11（口頭発表）	長尾 年恭 鴨川 仁 楠城 一嘉 上嶋 誠 佐柳 敬造	京都大学吉田キャンパス・国際科学イノベーション棟シンポジウムホール（日本地震予知学会 第 9 回学術講演会）	2022年 12月 23-24日	国内	
ETASモデル：クラスター性を表すための点過程モデル	岩田 貴樹	早稲田大学国際会議場（第13回横幹連合コンファレンス）	2022年 12月18日	国内	
Estimation, diagnostics, and extensions of nonparametric Hawkes processes（口頭発表）	Zhuang, J.	UNSW シドニー, オーストラリア (Statistics Across Campuses Seminar, ハイブリッド開催)	2022年 12月2日	国外	
Bayesian merging of earthquake catalogs from multiple sources（口頭発表）	庄 建倉* 司 政亜	札幌市・北海道立道民活動センターかでの2・7（日本地震学会 2022 年度秋季大会）	2022年 10月25日	国内	

富士山の低周波地震の検知と統計解析（ポスター発表）	楠城 一嘉* 行竹 洋平 熊澤 貴雄	札幌市・北海道立道民活動センターかでの2・7 （日本地震学会2022年度秋季大会）	2022年 10月26日	国内	○
Slow Earthquakes in the Japan Trench, ポスター発表（ポスター発表）	西川 友章* 井出 哲 西村 卓也	札幌市・北海道立道民活動センターかでの2・7 （日本地震学会2022年度秋季大会）	2022年 10月26日	国内	
能登半島群発地震の非定常性の解析（口頭発表）	熊澤 貴雄* 尾形 良彦	札幌市・北海道立道民活動センターかでの2・7 （日本地震学会2022年度秋季大会）	2022年 10月24日	国内	○
The research and application of the spherical space-time ETAS model（口頭発表）	熊 子瑤* 庄 建倉	札幌市・北海道立道民活動センターかでの2・7 （日本地震学会2022年度秋季大会）	2022年 10月24日	国内	○
Verification of Seismic Gap by means of physical and statistical models（口頭発表）	Petrillo, G.* Zhuang, J. Lippiello, E.	札幌市・北海道立道民活動センターかでの2・7 （日本地震学会2022年度秋季大会）	2022年 10月25日	国内	
Second-order smoothness prior over the Delaunay Tessellation and its application to gravity Bayesian inversion（口頭発表）	牛 源源* 庄 建倉	札幌市・北海道立道民活動センターかでの2・7 （日本地震学会2022年度秋季大会）	2022年 10月25日	国内	

Evaluating earthquake forecasts with likelihood based marginal and conditional scores (口頭発表)	Zhuang, J.	IESC コルシカ, フランス (第12回統計地震学国際ワークショップ, StatSei12)	2022年 10月21日	国外	
A size distribution of deep low-frequency tremors in the Nankai Trough zone: Modeling with a mixture distribution (ポスター発表)	Iwata, T.	IESC コルシカ, フランス (第12回統計地震学国際ワークショップ, StatSei12)	2022年 10月 17-18日	国外	
The research on the spherical space-time ETAS model (ポスター発表)	Xiong, Z.	IESC コルシカ, フランス (第12回統計地震学国際ワークショップ, StatSei12)	2022年 10月 19-20日	国外	○
Defining and testing the predictive efficacy of a realistic spring block model (ポスター発表)	Petrillo, G.	IESC コルシカ, フランス (第12回統計地震学国際ワークショップ, StatSei12)	2022年 10月 19-20日	国外	
Toward constructing a statistical model for slow earthquakes (ポスター発表)	Nishikawa, T.	奈良春日野国際フォーラム薨 (International Joint Workshop on Slow-to-Fast Earthquakes 2022, ハイブリッド開催)	2022年 9月14日	国内	
【招待講演】地震活動による点過程モデルの改良：残差解析からの学習 (口頭発表)	庄 建倉	成蹊大学 (2022年度統計関連学会連合大会, ハイブリッド開催)	2022年 9月7日	国内	○

A spherical version of the space-time ETAS model (口頭発表)	熊子瑤* 庄建倉	成蹊大学 (2022年度統計関連学会連合大会, ハイブリッド開催)	2022年 9月5日	国内	○
Bayesian earthquake forecasts based on the ETAS model (口頭発表)	Petrillo, G.* 庄建倉	成蹊大学 (2022年度統計関連学会連合大会, ハイブリッド開催)	2022年 9月7日	国内	○
Second-order smoothness prior over the Delaunay Tessellation and application on gravity Bayesian inversion (口頭発表)	牛源源* 庄建倉	成蹊大学 (2022年度統計関連学会連合大会, ハイブリッド開催)	2022年 9月5日	国内	
【基調講演】 Studies to evaluate seismicity using statistical methods (口頭発表)	Nanjo, Kazu Z.	2022 Electromagnetic Studies of Earthquakes and Volcanoes (EMSEV) (National Central University, Taoyuan, Taiwan)	2022年 8月 22-26日	国外	○
Stochastic Reconstruction: A Data-driven Method for Extending and Estimating Seismicity Clustering Models (口頭発表)	Zhuang, J.	オンライン開催 (AOGS2022 VIRTUAL, 19th Annual Meeting Asia Oceania Geosciences Society (AOGS))	2022年 8月2日	国外	

【招待講演】 Response of a granular sandwich to external vibrations: How to control the transmitted acoustic frequency (口頭発表)	Petrillo, G.	CNR Main Conference Hall, ローマ, イタリア (Coarse-grained description for non-equilibrium systems and transport phenomena)	2022年 7月5日	国外	
Refining the ETAS model: non-stationary background rate, hypocentral depth, source rupture geometry, and focal mechanism (口頭発表)	庄 建倉	幕張メッセ(日本地球惑星科学連合2022年大会, ハイブリッド開催)	2022年 5月25日	国内	
【招待講演】 Point-process modelling of earthquakes incorporating ULF seismo-magnetic anomalies (口頭発表)	Han, P.* Chen, H. Zhuang, J. Hattori K.	幕張メッセ(日本地球惑星科学連合2022年大会, ハイブリッド開催)	2022年 5月22日	国内	
階層型時空間ETASと時空間ポアソン過程モデルによる日本内陸部の地震発生確率の予測と検証 (口頭発表)	尾形 良彦	幕張メッセ(日本地球惑星科学連合2022年大会, ハイブリッド開催)	2022年 5月25日	国内	
Temporal and spatial variations in seismicity characteristics after the 2011 Tohoku-Oki earthquake estimated from HIST-ETAS model (ポスター発表)	上田 拓* 加藤 愛太郎	幕張メッセ(日本地球惑星科学連合2022年大会, ハイブリッド開催)	2022年6月 3日	国内	

GNSSによって観測された能登半島群発地震に伴う地殻変動（口頭発表）	西村 卓也* 西川 友章 佐藤 大祐 平松 良浩 澤田 明宏	幕張メッセ（日本地球惑星科学連合2022年大会，ハイブリッド開催）	2022年 5月27日	国内	
The research and application of the spherical spacetime ETAS model（口頭発表）	Xiong, Z.* Zhuang, J.	幕張メッセ（日本地球惑星科学連合2022年大会，ハイブリッド開催）	2022年 5月25日	国内	○
Preliminary forecasting model for tectonic tremor activity using a renewal process（ポスター発表）	井出 哲* 野村 俊一	幕張メッセ（日本地球惑星科学連合2022年大会，ハイブリッド開催）	2022年 6月2日	国内	
Everything you always wanted to know about <i>b</i> -value*（*but were afraid to ask）（口頭発表）	Taroni, M.* Selva, J. Marzocchi, W. Zhuang, J.	Austria Center Vienna (ACV) (European Geoscience Union (EGU) General Assembly 2022, ハイブリッド開催)	2022年 5月26日	国外	

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載 : 計 18 件、うち国外計 15 件

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所（学会誌・雑誌等名）	発表した時期	国内・外の別	主たる成果
非定常ETASモデルから見える能登半島群発地震活動の地域的变化（続報2）	熊澤 貴雄 尾形 良彦	地震予知連絡会会報	2023年 3月	国内	○

Detection and characterization of earthquake swarms in Nankai and its association with slow slip events	Guo, Y. Zhuang, J. Zhang, H.	Journal of Geophysical Research: Solid Earth	2023年 3月10日	国外	○
SETAS: A spherical version of the space-time ETAS model	Xiong, Z. Zhuang, J.	Seismological Research Letters	2023年 2月27日	国外	○
Statistical evaluation of earthquake forecast efficiency using earthquake-catalog and fault slip rate in the Sichuan-Yunnan region, China	Zhang, B. Chen, S. Zhuang, J. Zhang, B. Wu, X. Liang, B.	Frontiers in Earth Science	2023年 2月15日	国外	
High probability of successive occurrence of Nankai megathrust earthquakes	Fukushima, Y. Nishikawa, T. Kano, Y.	Scientific Reports	2023年 1月10日	国外	
A review on slow earthquakes in the Japan Trench	Nishikawa, T. Ide, S. Nishimura, T.	Progress in Earth and Planetary Science	2023年 1月3日	国外	
ETASモデル：クラスター性を表すための点過程モデル	岩田 貴樹	第13回横幹連合コンファレンス予稿集	2022年 12月	国内	○
Forecasting tectonic tremor activity using a renewal process model	Ide, S. Nomura, S.	Progress in Earth and Planetary Science	2022年 12月8日	国外	
The debate on the earthquake magnitude correlations: a meta-analysis	Petrillo, G. Zhuang, J.	Scientific Reports	2022年 11月30日	国外	

Estimating the completeness magnitude m_c and the b -values in a snap	Godano, C. Petrillo, G.	Earth and Space Science	2022年 10月25日	国外	
An analytic expression for the volcanic seismic swarms occurrence rate. A case study of some volcanoes in the world	Godano, C. Tramelli, A. Mora, M. Taylor, W. Petrillo, G.	Earth and Space Science	2022年 10月18日	国外	
非定常ETASモデルから見える能登半島群発地震活動の地域的变化(続報)	熊澤 貴雄 尾形 良彦	地震予知連絡会会報	2022年 9月	国内	○
An updated version of the ETAS model based on multiple change points detection	Benali, A. Zhuang, J. Talbi, A.	Acta Geophysica	2022年 8月18日	国外	
Statistical Seismology	Zhuang, J.	Encyclopedia of Mathematical Geosciences. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Daya Sagar, B.S., Cheng, Q., McKinley, J. and Agterberg, F. (eds)	2022年 8月4日	国外	
A Simultaneous Estimation of the Baseline Intensity and Parameters for Modulated Renewal Processes	Zhuang, J. Siew, H-Y.	Axioms	2022年 6月23日	国外	

A Bayesian algorithm for magnitude determination by merging multiple seismic networks	Si, Z. Zhuang, J. Jiang, C.	Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)	2022年 6月10日	国外	
Testing of the Seismic Gap Hypothesis in a Model With Realistic Earthquake Statistics	Petrillo, G. Rosso, A. Lippiello, E.	Journal of Geophysical Research: Solid Earth	2022年 5月19日	国外	
The Dependence on the Moho Depth of the b -Value of the Gutenberg-Richter Law	Godano, C. Tramelli, A. Petrillo, G. Sessa, E.B. Lippiello, E.	Bulletin of the Seismological Society of America 2022	2022年 4月14日	国外	

(e) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願
なし

2) ソフトウェア開発 : 計1件

名称	機能
Spherical Space-Time Point-Process Models (SETAS)	球面版 ETAS モデルによるデータフィッティングおよび地震カタログの確率的除群法 (http://bemlar.ism.ac.jp/zhuang/software/SETAS.zip)

3) 仕様・標準等の策定
なし

2. 2 テーマB：地震活動の予測システムの構築

B-1 ETAS による長期予測

B-3 ETAS による短期・リアルタイム予測と可視化

B-4 中期予測システムの構築

B-5 前震とb値

(1) 業務の内容

(a) 業務の目的

連発大地震発生の可能性を考慮した時空間 ETAS モデルなどによるオンラインの短期確率予測モデルの開発・展開・実装を目的とする。地震発生の長期・中期・短期予測と即時把握とそれらの信頼度を与える。

先ず、HIST-ETAS に基づく短期および長期予測を最初の3年程で実現し、令和5年度に震源データの不均質性などを克服した階層的時空間 ETAS (HIST-ETAS) モデルを高度化し余震予測のオンライン化を実装する。そして、地殻変動や地震活動の異常変化などの把握を令和5年度以降追求し、これらを考慮し、長期・中期・短期といった異なる時間スケールの確率予測とそれらの複合的確率予測をオンライン・システムに実装することを最終目的とする。逐次、リアルタイムの短期確率予測の出力を、以下のように、緊急地震速報の事前シナリオの想定尤度に活用するとともに、システムの信頼性を向上させるための事前情報として使用できるようにする。

(b) 研究者の所属、氏名、研究実施期間、研究費等

所属機関・部局・職名	氏名	研究実施期間	配分を受けた研究費	間接経費
統計数理研究所・名誉教授	尾形 良彦	R4.4.1 ～ R5.3.31	テーマA（統 数研配分）の 額に含まれる	同左
静岡県立大学・グローバル地域センター・特任准教授	楠城 一嘉	R4.4.1 ～ R5.3.31	1,000,000 円	300,000 円

注) 配分を受けた研究費は、間接経費を含まない額。

(c) 5か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 令和3年度 [実施業務の要約]

M4以上の内陸直下型地震の短期・長期予測モデルを作成した。さらに、沖合も含む時空間確率予測を偏りなく実施するための地震カタログのデータ欠測補完のモデルの作成に取り組んだ。並びに、既存の各前震確率予測手法の比較のための確率予測評価法を検討した。

2) 令和4年度 [実施業務の要約]

ドロネー平面分割に基づく階層時空間モデル (HIST-PPM) ソフトウェアを公開した。これによって、各種の予測出力の可視化 (地図、画像、動画) を準備し、地震活動がリアルタイムに使用可能な近未来状況に備える。内陸地震の長期予

測を目的として日本内陸のバックグラウンド地震を評価した。

3) 令和 5 年度

沖合を含めた全日本の長期確率予測法を確立し、地震カタログのデータ欠測の補完を含めたオンライン短期・中期予測に取り組む。時空間的に異常現象を定義・調査し、それらに基づいた前兆確率予測の算定法を考案する。前震確率のオンライン予測の実装に取り組む。以上について、それぞれの予測評価法を考案する。

4) 令和 6 年度

オンライン短期予測や前震確率予測と実装の可視化・情報共有を目指し、異常現象による中期予測による確率利得の計算法を追求する。

5) 令和 7 年度

HIST-ETAS モデルの短期・中期予測と前震確率予測のオンライン実装、各種異常現象による中期予測、長期予測を合わせて複合予測し、可視化・情報共有する。

(d) 令和 4 年度の業務の目的

- ・国内各地の直下型大地震の永年活動度を与え長期予測確率およびその予測性能を情報利得（対数尤度）での評価比較
- ・中規模地震（例えばマグニチュード 4 以上）が内陸部で発生するたびに HIST-ETAS モデルの条件付き強度関数の時空間変化を計算し、後続する最大地震発生確率などの予測
- ・HIST-ETAS モデルを基盤に（a）震源の深さ（b）主な地震の断層形状および（c）発震機構（テンソル）の成分をオンラインの震源データから推定する自動予測システムの実現
- ・複合要素予測に利用するために危険度拡大率（確率利得）の時間的切迫度や地域範囲の時空間スケージング関数を求め、その実装をめざす。
- ・G-R 則 b 値の変化や前震識別を通して非定常・非独立性を導入した予測の可能性の研究

(2) 令和 4 年度の成果

(a) 業務の要約

1) B-1 ETAS による長期予測

階層ベイズ的時空間 ETAS (HIST-ETAS) モデルと G-R 則から、内陸部各地の背景活動度を与え、直下型大地震の長期予測確率を与えた。ついで、内陸部の長期・中期予測を目指して非一様定常ポアソン時空間モデルを求めた。それらの予測性能を情報利得（対数尤度）で評価比較したところ、大地震の長期予測は階層

ベイズ的時空間 ETAS (HIST-ETAS) モデルの背景活動度と G-R 則、内陸部各地の前者、中地震の中期予測は非一様定常ポアソン時空間モデルと G-R 則が優れていることが分かった。論文が EPS に掲載された。

2) B-3 ETAS による短期・リアルタイム予測と可視化

中規模地震が内陸部で発生するたびに短期的に地震の発生し易さのオンライン予測を HIST-ETAS モデルにより計算した。

3) B-4 中期予測システムの構築

余震活動の相対的静穏化異常から近傍での大規模地震の切迫度や地域性の時空間スケーリング関数を求めた。

4) B-5 前震と b 値

地震群内の先行地震同士の統計的識別に基づいて、将来、より大きな地震が発生する確率のモデルを構築した。論文を投稿中である。

(b) 業務の成果

1) B-1 ETAS による長期予測

背景地震活動度を用いた内陸地震の長期予測と検証評価 直下型地震を予測するモデルとして、内陸部で一様な配置のモデル (a); 非一様な配置のモデル (b); 地域性を考慮した 2 種類の時空間 ETAS モデル (c および d) から誘発項を取り除いた背景活動密度の予測性能を比較評価した。

マグニチュード分布のグーテンベルク・リヒター則で b 値が内陸全域で 0.9 を仮定し、発生地震結果の「対数尤度スコア」によると、HIST-ETAS-5pa モデル (下記の左側図の配色や等高線) は、右図で予測された M6 以上の内陸地震の長期確率予測、および歴史被害地震の発生場の所在の説明、に最も優れている (下記の表の赤字は最大対数尤度値)。

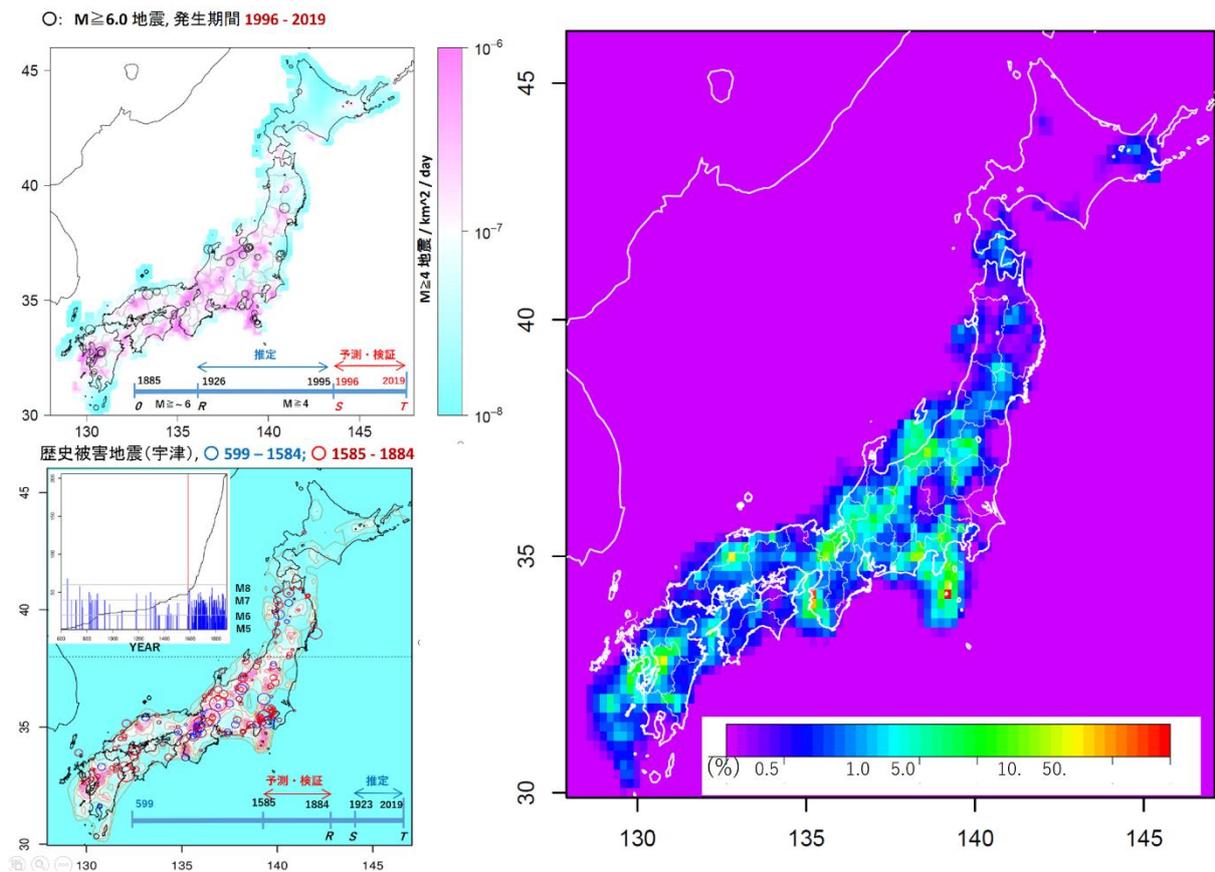


図1 a) 対象期間1923-2018年の日本周辺における $M \geq 4.0$ の地震の震央(色付点)に対する最適な μ のMAP推定。カラーは線形化された頻度を指し、日 deg^2 当たりの確率を表す。b) $b = 0.9$ を仮定した場合、日本内陸部の各 $0.2^\circ \times 0.2^\circ$ セル(約 400km^2)において30年間に $M \geq 6$ が発生する確率。

表1 予測期間(1996年~2019年)

予測マグニチュードの範囲	$M \geq 4.0$	$M \geq 4.5$	$M \geq 5.0$	$M \geq 5.5$	$M \geq 6.0$	$M \geq 6.5$	$M \geq 7.0$
地震数	2765	990	305	103	43	18	5
(a) 内陸部一様ポアソン密度	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
(b) 不均質な最適ポアソン密度	2835.0	1024.9	264.8	60.1	12.3	9.8	2.5
(c) HIST-ETAS- μK の背景密度	2270.7	843.5	230.0	53.7	16.9	9.2	3.0
(d) HIST-ETAS-5paの背景密度	2576.7	954.1	263.7	61.6	19.9	10.6	2.5

表2 歴史被害地震の予測期間(1585~1884年); 予測範囲 北緯 38° 以南(北海道、

予測マグニチュードの範囲	全て	$M \geq 5.5$	$M \geq 6.0$	$M \geq 6.5$	$M \geq 7.0$	$M \geq 7.5$
地震数	131	129	114	57	25	3
(a) 内陸部一様ポアソン密度	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
(b) 不均質な最適ポアソン密度	-7.8	-11.3	-15.7	-16.3	-12.4	-1.2
(c) HIST-ETAS- μK の背景密度	32.9	28.1	24.0	9.8	4.0	1.1
(d) HIST-ETAS-5paの背景密度	36.7	31.8	29.4	12.5	5.5	1.6

北東北を除く)

2) B-3 ETAS による短期・リアルタイム予測と可視化

内陸部について時空間 ETAS (HIST-ETAS) モデルによるオンライン短期確率予測の実装

内陸部で中規模地震が発生するたびに短期的に地震の発生し易さのオンライン予測を HIST-ETAS モデルにより計算し、3次元 AVS 可視化システムに組み込み、結果を動画で表現し活動度のモニターをできるようにした。当座の中期予測は、非一様定常ポアソン時空間モデルで実装した。

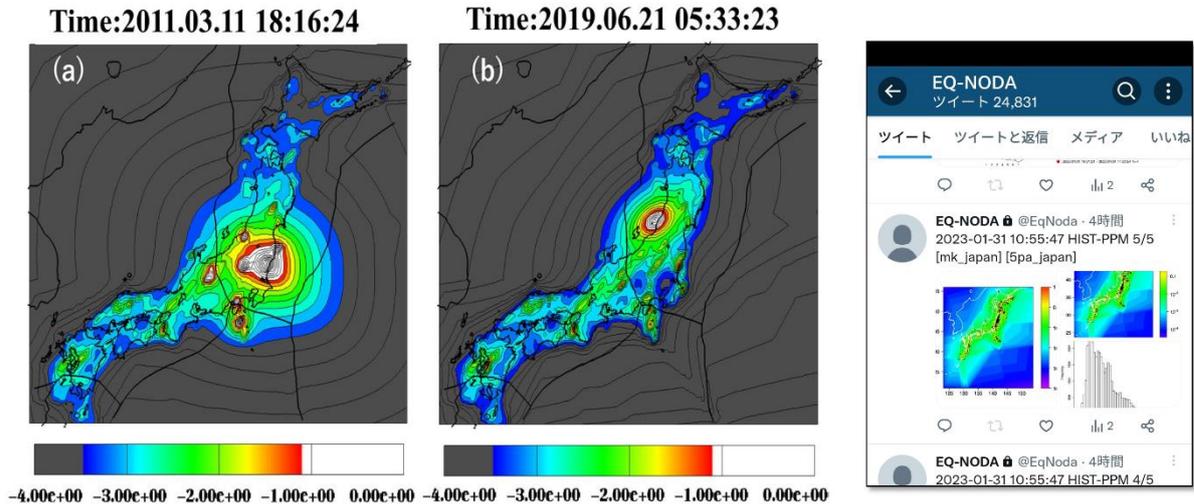


図2 HIST-ETAS-5paモデルについて、(a) 学習期間1885-2018、(b) 予測期間2019-2021年9月開始における、上部に記載した日時における最適MAPパラメータの条件付き強度関数のスナップショット。両画像の等高線は、対数スケールで共通の等距離間隔を表示している。画像下の色票は、 $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ セルあたりの $M \geq 4.0$ 事象の発生率を常用対数スケールで示した。右端の画像は、日別定期的に計算された、b値、非定常ポアソン強度関数、HIST-ETASモデルを関係者に共有するデバイスの開発。

3) B-4 中期予測システムの構築

ETAS モデルからの乖離の異常と中期予測システムの構築

余震活動の相対的静穏化異常やトリガー効果から近傍での大規模地震の切迫度や地域性の時空間スケール関数を提案した(尾形, 2021)が、その組織的な検証には時間が掛かり、次年度以降で模索したい。これに基づいて、最終的な目標である複合要素予測の危険度拡大率(確率利得)の一要素として利用可能にしたい。

4) B-5 前震とb値

前震確率予測とb値

地震群内の先行地震同士の統計的識別に基づいて、日本の進行中の地震活動について、一回り大きな地震が起きる予測確率がリアルタイムで計算できるように実装を整えた。b値のオンライン予測の可視化を与えたので、マグニチュードの空間b値の時空間変化をオンラインで計算し、それらの結果を日本地図上に表示して、Twitterに投稿する仕組みを作成した。この様にして予測性能を調査できる土台ができた。

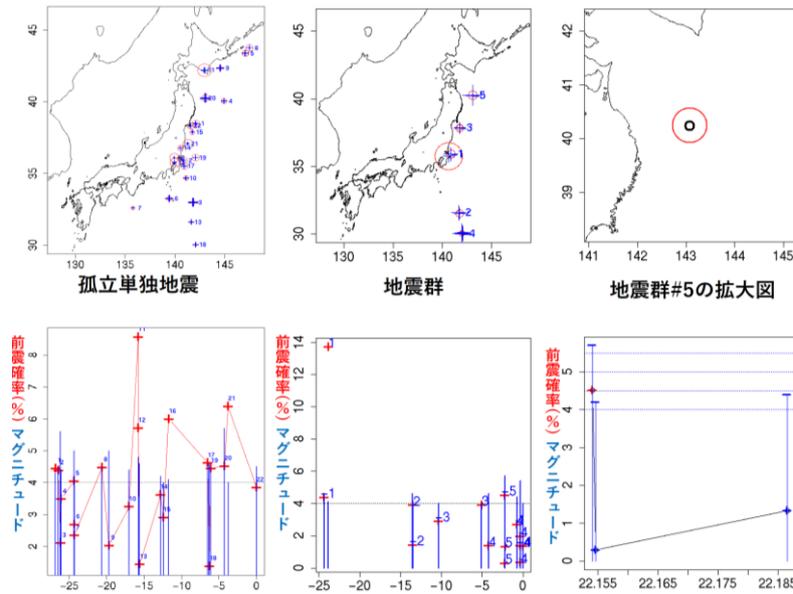


図3 左側パネル：Single-Link法による地震群のリアルタイムオンライン同定と前震確率予測およびマグニチュード列精査による b 値変化モニタリングの結果例。2023年3月末現在で将来1ヵ月以内に各地震群で現在の最大マグニチュードよりM0.4以上の大きな地震が起こる確率予測（+印）。

熊本地震前後の地震活動を精査し、M6.5以降の地震活動のb値は続くM7.3地震の震源域では平時より高く偽陰性ケースだった(Nanjo et al, 2022)。つまり、M6.5地震以降のb値は徐々に上昇し、M7.3地震の震源域で大地震が起きない可能性が高いというシグナル(陰性)が出たが、実際はM7.3地震が起きたので陰性が偽りだったというケースである。

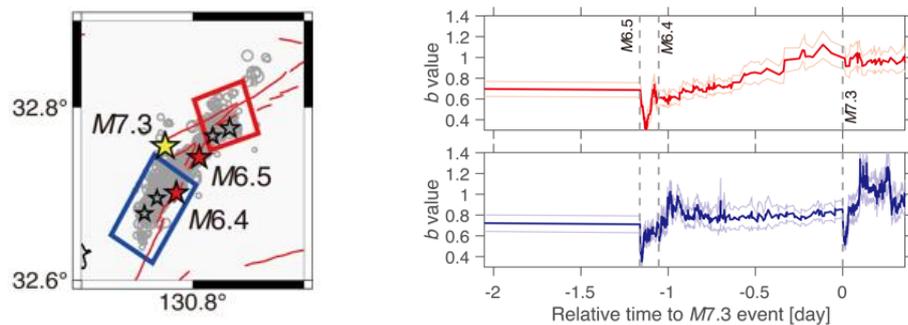


図4 熊本地震の起きた断層沿いのb値の変化。左側パネル：本震(M7.3)は2016年4月16日に布田川断層で発生した。震央を黄色の星印で示す。その約1日前に日奈久断層でM6.5の前震が起き、M6.4の前震が起きた(赤色の星印で震央を示す)。前震活動は本震直前まで活発だった(灰色の点)。右側パネル(上)：M6.5の前震以降、布田川断層沿いのb値は大きくなり(力は徐々に低くなり)、本震直前では、M6.5の前震の前と比べて、b値は大きかった(十分に力は低かった)。ここで、左側パネルの赤四角の中の地震活動をb値で解析した。この結果から、断層面に沿ってゆっくりした滑りが起き、いわゆる、”前駆滑り”が起きた可能性が考えられる。右側パネル(下)

b値の解析から、日奈久断層沿いのb値は本震直前と比べて高くなったとは言えない。ここで、左側パネルの青四角の中の地震活動を解析した。

引用文献

- ・ 尾形良彦(2021)階層的時空間 ETAS モデルに基づく短期・中期・長期予測および背景率予測—自動予測の開発に向けて。地震予知連絡会会報 **105**(12-10):493-499. https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou105/12_10.pdf
- ・ Nanjo K Z, Izutsu J, Orihara Y, Kamogawa M (2022) *Changes in seismicity pattern due to the 2016 Kumamoto earthquake sequence and implications for improving the foreshock traffic-light system*. **Tectonophysics**, 822: 229175. doi: 10.1016/j.tecto.2021.229175.

(c) 結論ならびに今後の課題

1) B-1 ETAS による長期予測

階層ベイズ的時空間 ETAS (HIST-ETAS) モデルと G-R 則から、内陸部各地の背景活動度を与え、直下型大地震の長期予測確率を与えた。ついで、内陸部の長期・中期予測を目指して非一様定常ポアソン時空間モデルを求めた。それらの予測性能を情報利得（対数尤度）で評価比較したところ、大地震の長期予測は前者、中地震の中期予測は後者が優れている。大地震の長期予測は被害歴史地震の配置を良く説明できることを定性的に示した。以上の根拠で、直下型地震の長期確率予測は地震活動の立場から公表できる。

今後領域を広げて、全日本の大地震の長期期予測も実装して、可視化による情報発信に向けた検討をする。その際、海域における地震の欠測率が甚だしいため HIST-ETAS モデルによる大地震直後の予測バイアスを避ける推定法や予測が今後の計画で渴望される。

当座の中期予測は非一様定常ポアソン時空間モデルで実装し、良い成績であることを示したが、さらに今後、HIST-ETAS モデルのシミュレーションによる中期予測を試み、時空間モデルの予測と性能を比較し、改善できるかの結果を出したい。

2) B-3 ETAS による短期・リアルタイム予測と可視化

内陸部で中規模地震が発生するたびに短期的に地震の発生し易さのオンライン予測を HIST-ETAS モデルにより計算し、3次元 AVS 可視化システムに組み込んだ。当座の中期予測は、非一様定常ポアソン時空間モデルで実装した。

3) B-4 中期予測システムの構築

余震活動の相対的静穏化異常やトリガー効果から近傍での大規模地震の切迫度や地域性の時空間スケーリング関数を提案した。切迫度や地域性の時空間スケー

リング関数は、次年度以降の目標である複合要素予測の危険度拡大率（確率利得）の一要素として利用可能にしたい。

4) B-5 前震とb値

地震群内の先行地震同士の統計的識別に基づいて、日本の進行中の地震活動について、一回り大きな地震が起きる予測確率がオンラインで計算できるように実装を整えた。さらに、前震の定義を拡張して、最大マグニチュードを少しでも更新する地震が発生する確率予測の一般化モデルを与え、その評価を実施したい。

b値のオンライン予測の可視化を与えたので、予測性能を調査できる土台ができた。同時に、前震確率予測の実装をしたが、予測に対して実際はどのように推移したかを評価したい。マグニチュード系列は通常 G-R 則により定常・独立の場合が採用されているが、前震の識別を通して、非定常非独立性を導入した予測の優位性を追求することが可能になった。

(d) 成果の論文発表・口頭発表等

1) 学会等における口頭・ポスター発表 : 計 21 件、うち海外計 3 件

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別	主たる成果
地殻活動の予測実験（1）－ 内陸地震の短期確率予測と評価について（口頭発表）	尾形 良彦	国土地理院関東地方測量部 （第238回地震予知連絡会例会 地震予知連絡会活動報告，ハイブリッド開催）	2023年 2月28日	国内	○
2023年2月6日に発生したトルコ中部地震の余震活動について（口頭発表）	尾形 良彦， 熊澤 貴雄	国土地理院関東地方測量部 （第238回地震予知連絡会例会 地震予知連絡会活動報告，ハイブリッド開催）	2023年 2月28日	国内	
プレート間非地震性すべり速度のトレンドを考慮した繰り返し地震の短期予測（口頭発表）	野村 俊一	2022年度「繰り返し地震再来特性の理解に基づく地殻活動モニタリング」研究集会，オ	2023年 2月3日	国内	

		ンライン			
背景地震活動と繰り返し地震など（口頭発表）	尾形 良彦	2022年度「繰り返し地震再来特性の理解に基づく地殻活動モニタリング」研究集会，オンライン	2023年 2月3日	国内	○
富士山噴火予知実現のための多角的監視 22-11（口頭発表）	長尾 年恭 嶋川 仁 楠城 一嘉 上嶋 誠 佐柳 敬造	京都大学吉田キャンパス・国際科学イノベーション棟シンポジウムホール（日本地震予知学会 第9回学術講演会）	2022年 12月 23-24日	国内	
【招待講演】静岡県立大学グローバル地域センター自然災害研究部門の業務活動と研究活動の一例の紹介（口頭発表）	楠城 一嘉	静岡地方気象台（静岡地方気象台談話会）	2022年 11月28日	国内	
昭和南海トラフ地震周辺域の回顧的モニタリング（口頭発表）	尾形 良彦	札幌市・北海道立道民活動センターかでのる2・7（日本地震学会2022年度秋季大会）	2022年 10月24日	国内	
富士山の低周波地震の検知と統計解析（ポスター発表）	楠城 一嘉* 行竹 洋平 熊澤 貴雄	札幌市・北海道立道民活動センターかでのる2・7（日本地震学会2022年度秋季大会）	2022年 10月26日	国内	○
プレート間非地震性すべり速度の時空間変化を考慮した繰り返し地震の短期予測（口頭発表）	野村 俊一* 内田 直希 尾形 良彦	札幌市・北海道立道民活動センターかでのる2・7（日本地震学会2022年度秋季大会）	2022年 10月25日	国内	

能登半島群発地震の非定常性の解析（口頭発表）	熊澤 貴雄* 尾形 良彦	札幌市・北海道立道民活動センター かでの2・7 （日本地震学会2022年度秋季大会）	2022年 10月24日	国内	
Prediction and validation of short-to long-term earthquake probabilities in inland Japan using the hierarchical space-time ETAS and space-time Poisson process models（ポスター発表）	Ogata, Y.	Southern California Earthquake Center （2022 SCEC Annual Meeting, オンライン参加）	2022年 9月 11-14日	国外	○
【招待講演】地震活動による点過程モデルの改良：残差解析からの学習（口頭発表）	庄 建倉	成蹊大学 （2022年度統計関連学会連合大会，ハイブリッド開催）	2022年 9月7日	国内	
大地震発生！後続地震のリアリティタイム予測（口頭発表）	尾形 良彦	成蹊大学 （2022年度統計関連学会連合大会，ハイブリッド開催）	2022年 9月5日	国内	○
On statistical methods applied to recent earthquake swarms（口頭発表）	熊澤 貴雄* 尾形 良彦	成蹊大学 （2022年度統計関連学会連合大会，ハイブリッド開催）	2022年 9月5日	国内	○
【基調講演】 Studies to evaluate seismicity using statistical methods（口頭発表）	Nanjo, Kazu Z.	2022 Electromagnetic Studies of Earthquakes and Volcanoes (EMSEV) （National Central University,	2022年 8月 22-26日	国外	

		Taoyuan, Taiwan)			
Cluster-based Foreshock Discrimination Models for Flexible Prediction Schemes (口頭発表)	Nomura, S.* Ogata, Y.	オンライン開催 (AOGS2022 VIRTUAL, 19th Annual Meeting Asia Oceania Geosciences Society (AOGS))	2022年 8月2日	国外	○
大きな地震連鎖の確率 とシナリオをどう求め る (口頭発表・招待講 演)	尾形 良彦	オンライン開催 (日本地震学会 特 別シンポジウム 大地震発生! 「1週 間程度は注意」の 次は? - 後発地震 と臨時情報 -)	2022年 7月23日	国内	
リアルタイム余震活動 予測システム: 最近5年 間の予測実績と検証 (ポスター発表)	汐見 勝彦* 近江 崇宏 尾形 良彦 澤崎 郁	幕張メッセ(日本 地球惑星科学連合 2022年大会, ハイ ブリッド開催)	2022年 6月2日	国内	
A study on detection of low-frequency earthquakes at Mt. Fuji and data quality evaluation (ポスター 発表)	楠城 一嘉* 行竹 洋平	幕張メッセ(日本 地球惑星科学連合 2022年大会, ハイ ブリッド開催)	2022年 6月2日	国内	
非定常ETASモデルで捉 える能登半島群発地震 活動の地域的变化 (口 頭発表)	熊澤 貴雄* 尾形 良彦	幕張メッセ(日本 地球惑星科学連合 2022年大会, ハイ ブリッド開催)	2022年 5月25日	国内	
Preliminary forecasting model for tectonic tremor activity using a renewal process (ポス ター発表)	井出 哲* 野村 俊一	幕張メッセ(日本 地球惑星科学連合 2022年大会, ハイ ブリッド開催)	2022年 6月2日	国内	

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載 : 計7件、うち国外計3件

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所（学会誌・雑誌等名）	発表した時期	国内・外の別	主たる成果
非定常ETASモデルから見える能登半島群発地震活動の地域的变化(続報2)	熊澤 貴雄 尾形 良彦	地震予知連絡会会報	2023年 3月	国内	
背景地震活動度を用いた内陸地震の長期予測と検証評価	尾形 良彦	地震予知連絡会会報	2023年 3月	国内	○
High probability of successive occurrence of Nankai megathrust earthquakes	Fukushima, Y. Nishikawa, T. Kano, Y.	Scientific Reports	2023年 1月10日	国外	
地震学習会「ジオパーク活動で使える地震学6: 決定論的地震予知から確率論的地震予測への道のり」参加報告	楠城 一嘉	地震学会ニューズレター, 第75巻, NL5号, NL-5-21	2023年 1月10日	国内	
A review on slow earthquakes in the Japan Trench	Nishikawa, T. Ide, S. Nishimura, T.	Progress in Earth and Planetary Science	2023年 1月3日	国外	
非定常ETASモデルから見える能登半島群発地震活動の地域的变化(続報)	熊澤 貴雄 尾形 良彦	地震予知連絡会会報	2022年 9月	国内	
Prediction and validation of short-to-long-term earthquake probabilities in inland Japan using the hierarchical	Ogata, Y.	Earth Planets and Space	2022年 7月18日	国外	○

space-time ETAS and space-time Poisson process models					
---	--	--	--	--	--

(e) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

2. 3 テーマC：予測とモニタリングのための観測網情報統合最適化

C-1 ノイズ情報及び予測情報を利用した動的観測点統合法

C-2 逆解析のための観測点統合・選択法の開発

(1) 業務の内容

(a) 業務の目的

緊急時に対応して臨時観測網を含む観測点の多量さや多種多様性を考えた、大地震後の臨時観測における各種観測網の配置設計を予測の観点から事前に機動的に最適化する自動化アルゴリズムを開発する。最初の2年程でデータの質が観測点によって異なる状況での逆解析のため客観的な観測点の重み選択や外れ値処理法を開発する。同時に、開発した観測点選択法をテーマDにおけるPLUM法に組み込み、緊急地震速報の精度を高めることを検討する。高度化に際して重み付きグラフデータ解析の知見等から最新の機械学習手法の成果を取り入れた高度化を図る。令和5年度以降は静的な選択から動的な選択への拡張の検討・新規観測網配置の提案を行う。

(b) 研究者の所属、氏名、研究実施期間、研究費等

所属機関・部局・職名	氏名	研究実施期間	配分を受けた研究費	間接経費
統計数理研究所・数理・推論研究系・准教授	矢野 恵佑	R4.4.1 ～ R5.3.31	テーマA（統 数研配分）の 額に含まれる	同左

注) 配分を受けた研究費は、間接経費を含まない額。

(c) 5か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 令和3年度 [実施業務の要約]

GNSS データから SSE を検出するために、いわゆる l_1 -ノルムに基づいてのトレンドフィルタリング手法を開発し、四国西部の GNSS データへの適用により従来から知られているゆっくり滑り (SSE) に加えて、12 個の新しい SSE を発見した。さらに、開発手法内で利用している情報量規準の振る舞いによる逆解析用観測点統合選択法について議論した。

2) 令和4年度 [実施業務の要約]

GNSS データから SSE を検出するために、 l_1 -ノルムに基づいてのトレンドフィルタリング手法を開発し、西四国直下の 12 個の未知の SSE を発見した。

3) 令和5年度

前年度に引き続き逆解析用観測点統合選択法の開発を進める。更に、より実用に即すために、観測点の選択法・統合法について動的な要素の導入を検討する。

4) 令和6年度

前年度に引き続き逆解析用観測点統合選択法及び動的観測点統合選択法の開発を進める。加えて、新規最適設計に取り組む。

5) 令和7年度

前年度までの研究で開発した手法群を提供する。

(d) 令和4年度の業務の目的

- ・データの質の時間的な変化を取り入れた統合法及びテーマBで得られる予測情報を補助情報として利用した統合法の開発
- ・逆解析用の観測点情報の統合・選択法の開発

(2) 令和4年度の成果

(a) 業務の要約

1) C-1 ノイズ情報及び予測情報を利用した動的観測点統合法

異なる地震観測網から取得した地震マグニチュードの統一的なカタログを作成するための、ノイズと予測情報を考慮した動的観測点統合法を開発した。

2) C-2 逆解析のための観測点統合・選択法の開発

東北大学と協働し、1_1トレンドフィルタリングの予測誤差挙動による観測点選択を含むゆっくり滑り検知手法を開発した。該当の論文は国際誌に出版され、コードは公開している。さらに、テーマDと協働し、緊急地震速報時の観測網選択のため、事後分布の無限小ジャックナイフ近似による観測網選択アルゴリズムの開発を開始した。

(b) 業務の成果

1) C-1 ノイズ情報及び予測情報を利用した動的観測点統合法

複数の地震観測網で測定された地震マグニチュードのベイズ的統合 異なる地震観測網から取得した地震マグニチュードの統一的なカタログを作成するため、ノイズと予測情報を考慮した動的観測点統合法を開発した。

提案手法では、各観測点から得られた地震マグニチュードの情報をガウス分布として扱い、その平均として未知の真のマグニチュード、分散として観測ノイズに関連する分散を取り入れた。そして、真のマグニチュードに一樣な事前分布を仮定したベイズ的な枠組みを利用して真のマグニチュードの事後確率密度分布を導き出す。

本手法の効果を検証するために、真のマグニチュードが既知の合成カタログを用いて頑健性のテストを行った。その後、イタリアの6つの地震観測網から得られたデータに対して本手法を適用し、観測データの統合を行った。

その結果、本手法は、各観測網で観測されたマグニチュードの一貫性を考慮しつつ、ノイズ情報を用いて効果的にデータを統合することができることがわかった。ここで得られた統一的なカタログは、地震ハザード評価や地震動解析において価値のある情

報源を提供する。さらに、同手法は、機械学習手法やその他の地震観測網のデータを統合することで新たなアプローチとしても活用可能である。今後はテーマ A 及び B で得られる ETAS による予測情報を統合し手法の改良を行う。

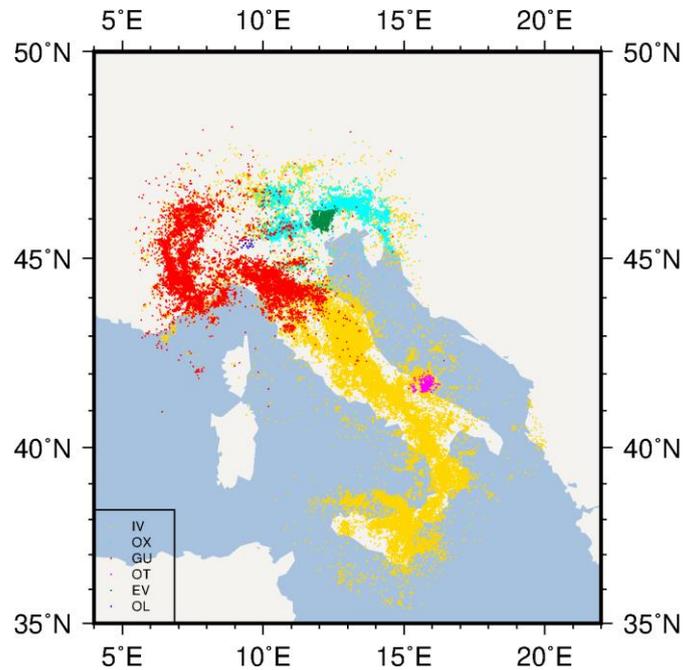


図1 イタリアの観測ネットワークカタログに掲載された地震の震源地分布。IV (INGV)、OX (OGS)、GU (University of Genoa)、OT (University of Bari)、EV (Collalato Seismic Network)、OL (Cornegliano Laudense Seismic Network) の各ネットワークから報告された地震をそれぞれ黄色、シアン、赤、マゼンタ、緑、青のドットで示す。

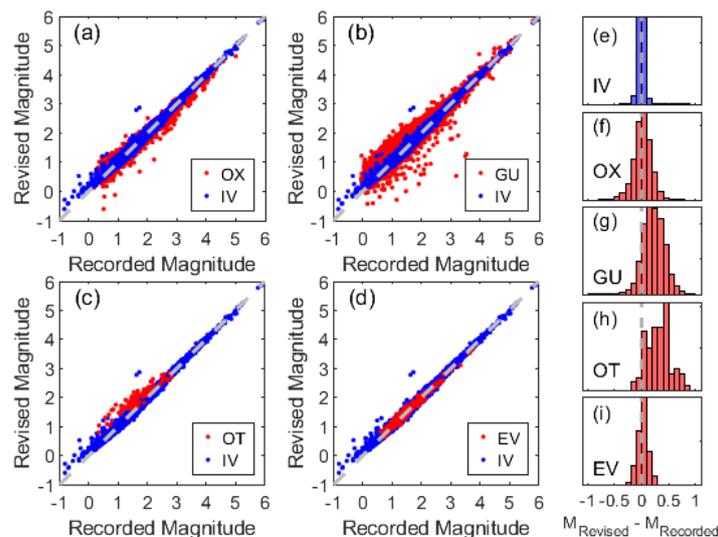


図2 (a)--(d) 観測ネットワーク間における、元のマグニチュードとベイズインバージョンアルゴリズムに基づき算出された修正値の比較。(e)--(i)各ネットワークにおける、修正後の大きさで修正前の大きさの差のヒストグラム。

2) C-2 逆解析のための観測点統合・選択法の開発

ゆっくりすべりの自動検知法 東北大学課題と共同し、四国西部のゆっくりすべりの自動検知法を開発・論文化した(Yano and Kano, 2022)。

この自動検知法において、GNSS 観測点の選択法を提案した。具体的には、Mallows' C_p を用いて「フィルタリング結果が区分線形になりやすい」観測点を情報量規準の挙動から自動選択する手法である(図3)。多くの観測点からある種 S/N が高い観測点を同定することができ、それによってこれまでに知られていなかった小さなゆっくりすべりを同定することができた。

さらに、テーマ D と協同し緊急地震速報法である拡張 IPF 法における観測点選択の最適化を検討した。具体的にはベイズ感度公式に基づく観測点選択法(Iba and Yano, 2023,2022)の適用を検討した。これは事後分布の形状を Kullback—Leibler divergence の意味で変化させないような観測点を同定する手法である。既存の観測点選択手法と比べて尤度に基づき観測点ごとのノイズレベルや異なる計測情報を統合した選択や動的な選択が行える点が特徴である。提案手法によって、直感とある程度一致した観測点選択ができていたことが確認できた(図4)。

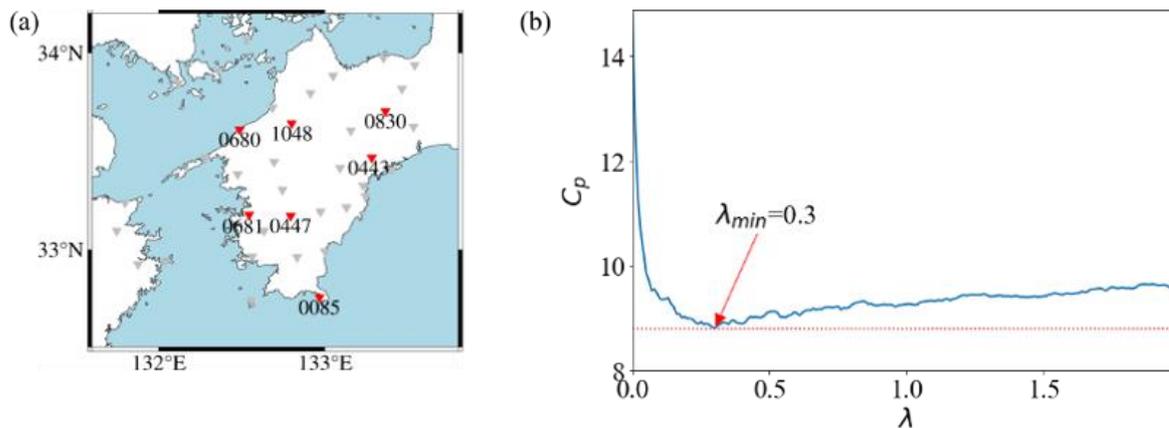


図3 情報量規準(Mallows' C_p)の振る舞いによる観測点選択。(b)のようにMallows' C_p の最適点が一意に定まるような観測点を選ぶ。この手法によって四国西部のGNSS観測点でのプレートの沈み込み方向への変位が区分線形になりやすい観測点を(a)のように選ぶことができた。

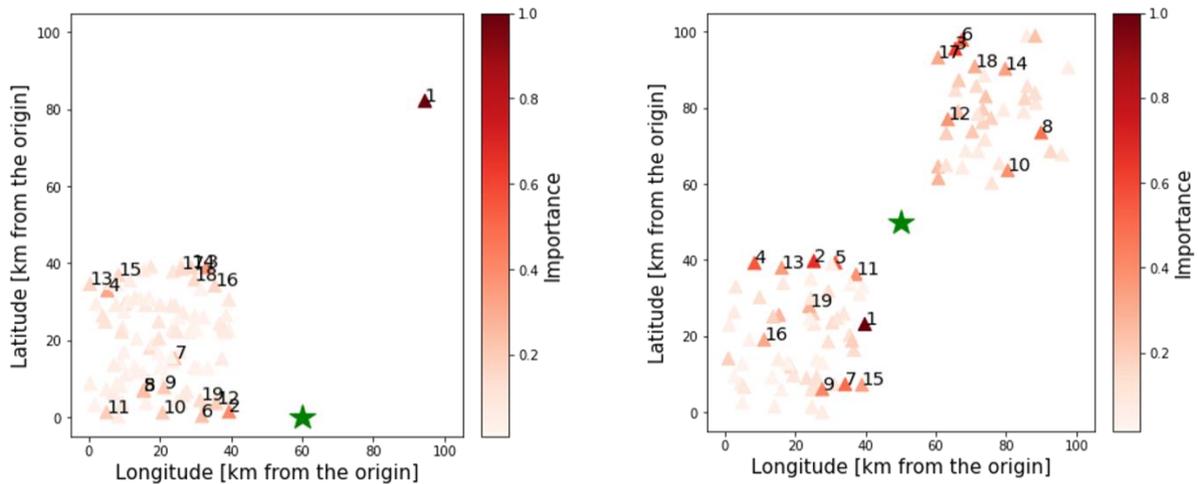


図4 ベイズ感度公式を用いた観測点選択。二つの図は二つの震源位置や観測点位置のシナリオにおける観測点重要度を表示している。緑色の星は震央位置であり、赤い三角は観測点である。上位の20点には順位を付している。

引用文献

- [C2-1] Yano K, Kano M (2022) ℓ_1 trend filtering-based detection of short-term slow slip events: Application to a GNSS array in southwest Japan. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, 127:e2021JB023258
- [C2-2] Iba Y, Yano K (2023) Posterior covariance information criterion for weighted inference. **arXiv:2106.13694**, accepted at **Neural Computation**.
- [C2-3] Iba Y, Yano K (2022) Posterior covariance information criterion for arbitrary loss functions. **arXiv:2206.05887**

(c) 結論ならびに今後の課題

1) C-1 ノイズ情報及び予測情報を利用した動的観測点統合法

異なる地震観測網から取得した地震マグニチュードの統一的なカタログを作成するため、ノイズと予測情報を考慮した動的観測点統合法を開発した。今後はテーマA及びBと協働し、ETASモデルの予測情報を取り組むことでより高精度化を目指す。

2) C-2 逆解析のための観測点統合・選択法の開発

東北大学課題と共同し、四国西部の短期的ゆっくりすべりの自動検知法を開発・論文化した。この自動検知法において、GNSS観測点から「フィルタリング結果が区分線形になりやすい」観測点を情報量規準の挙動から自動選択することができた。さらに、テーマDと協働し緊急地震速報法である拡張IPF法における観測点選択の最適化を検討した。具体的にはベイズ感度公式に基づく観測点選択法の適用を検討した。今後はさらに観測点が増えた場合への対処を考えていく。

(d) 成果の論文発表・口頭発表等

1) 学会等における口頭・ポスター発表 : 計 20 件、うち海外計 1 件

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別	主たる成果
【招待講演】 Recent advances of data science techniques in seismology(口頭発表)	Yano K.	National Cheng Kung University, 台南 (Slow-to-Fast Earthquake Workshop in Taiwan)	2023年 3月14日	国外	○
【招待講演】人工知能による複数観測点を用いた地震・測地イベント検知手法開発（口頭発表）	矢野 恵佑	国土地理院関東地方測量部 （第238回地震予知連絡会例会 地震予知連絡会活動報告，ハイブリッド開催）	2023年 2月28日	国内	○
緊急地震速報における観測点選択（口頭発表）	矢野 恵佑 山田 真澄 溜瀨 功史 Stephen Wu 伊庭 幸人	東京大学地震研究所 共同利用研究会「地震動をはじめとする地球科学データの即時解析・即時予測・情報利活用」	2023年 1月 11-12日	国内	○
Minimum information dependence modeling for mixed domain data（口頭発表）	矢野 恵佑* 清 智也	つくば国際会議場（2022年度科学研究費シンポジウム 大規模複雑データの理論と方法論～新たな発展と関連分野への応用，ハイブリッド開催）	2022年 11月5日	国内	○

Bayesian merging of earthquake catalogs from multiple sources (口頭発表)	庄 建倉* 司 政亜	札幌市・北海道立 道民活動センター かでの2・7 (日本地震学会 2022年度秋季大 会)	2022年 10月25日	国内	○
最小情報従属モデルを用いた混合ドメインデータの依存関係の解析:メカニズム解と深さの依存関係解析への適用(ポスター発表)	矢野 恵佑* 清 智也	札幌市・北海道立 道民活動センター かでの2・7 (日本地震学会 2022年度秋季大 会)	2022年 10月26日	国内	○
Distributed Acoustic Sensing (DAS)による低周波地震の検出(口頭発表)	加藤愛太郎* 鶴岡 弘 篠原 雅尚 江本 賢太郎 木村 恒久 岡村 健志 菊池 豊	札幌市・北海道立 道民活動センター かでの2・7 (日本地震学会 2022年度秋季大 会)	2022年 10月24日	国内	
High-rate GNSSデータの同化による2003年十勝沖地震の初期余効すべりの推定(ポスター発表)	加納 将行* 伊東 優治	札幌市・北海道立 道民活動センター かでの2・7 (日本地震学会 2022年度秋季大 会)	2022年 10月26日	国内	
GNSSデータへの深層学習の適用による短期的SSEの断層すべり直接推定(口頭発表)	中川 亮* 福島 洋 加納 将行 矢野 恵佑 平原 和朗	鹿児島大学稲盛会 館 (日本測地学会第 138回講演会, ハ イブリッド開催)	2022年 10月5日	国内	
【坪井賞受賞記念講演】測地データに基づく沈み込み帯における断層の摩擦特性とすべりの多様性に関する研究(口頭発表)	加納 将行	鹿児島大学稲盛会 館 (日本測地学会第 138回講演会, ハ イブリッド開催)	2022年 10月6日	国内	

【招待講演】高次元・無限次元モデルにおける予測分布（口頭発表）	矢野 恵佑	成蹊大学 (2022年度統計関連学会連合大会, ハイブリッド開催)	2022年 9月6日	国内	
マルチドメインデータのための最小情報従属モデリング（口頭発表）	清 智也* 矢野 恵佑	成蹊大学 (2022年度統計関連学会連合大会, ハイブリッド開催)	2022年 9月5日	国内	
ランジュバン動力学を用いた過剰パラメータモデルの汎化ギャップ推定（口頭発表）	奥野 彰文* 矢野 恵佑	成蹊大学 (2022年度統計関連学会連合大会, ハイブリッド開催)	2022年 9月7日	国内	
正則化による地震波速度推定精度の改善と構造変化の検出について（口頭発表）	倉田 澄人* 山中 遥太 矢野 恵佑 駒木 文保 椎名 高裕 加藤 愛太郎	成蹊大学 (2022年度統計関連学会連合大会, ハイブリッド開催)	2022年 9月5日	国内	
【招待講演】情報科学と地球物理学の融合によるSlow-to-Fast地震現象の包括的理解（口頭発表）	加藤 愛太郎	成蹊大学 (2022年度統計関連学会連合大会, ハイブリッド開催)	2022年 9月7日	国内	
Probe into Slow & Fast Earthquakes by Distributed Acoustic Sensing (DAS)（口頭発表）	加藤愛太郎* 鶴岡 弘 篠原 雅尚 江本 賢太郎 木村 恒久 岡村 健志 菊池 豊	幕張メッセ（日本地球惑星科学連合2022年大会, ハイブリッド開催）	2022年 5月27日	国内	
Potential of Megathrust Earthquakes along the Southern Ryukyu Trench Inferred from GNSS Data（ポスター発表）	加納 将行* 池内 葵 西村 卓也 宮崎 真一 松島 健	幕張メッセ（日本地球惑星科学連合2022年大会, ハイブリッド開催）	2022年 6月3日	国内	

表)					
MCMC法を用いた構造境界近傍における震源位置決定と2004年新潟県中越地震の余震への適用（口頭発表）	椎名 高裕* 加納 将行 加藤 愛太郎	幕張メッセ（日本地球惑星科学連合2022年大会，ハイブリッド開催）	2022年 5月22日	国内	
ノンパラメトリックベイズ法を用いた時空間点過程モデルに基づく地震イベントデータのクラスタリング（ポスター発表）	遠山 瑠唯* 倉田 澄人 矢野 恵佑 駒木 文保	幕張メッセ（日本地球惑星科学連合2022年大会，ハイブリッド開催）	2022年 5月30日	国内	
構造正則化を用いた地震波速度トモグラフィの性能検証（ポスター発表）	倉田 澄人* 山中 遥太 矢野 恵佑 駒木 文保 椎名 高裕 加藤 愛太郎	幕張メッセ（日本地球惑星科学連合2022年大会，ハイブリッド開催）	2022年 5月30日	国内	

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載 : 計2件、うち国外計2件

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所（学会誌・雑誌等名）	発表した時期	国内・外の別	主たる成果
A Bayesian algorithm for magnitude determination by merging multiple seismic networks	Si, Z. Zhuang, J. Jiang, C.	Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)	2022年 6月10日	国外	○
ℓ_1 trend filtering-based detection of short-term slow slip events: Application to a GNSS array in Southwest Japan	Yano, K. Kano, M.	Journal of Geophysical Research: Solid Earth	2022年 4月18日	国外	○

(e) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発 : 計 1 件

名称	機能
ℓ_1 trend filtering based detection of short-term slow slip events	地殻変動データに対して外れ値処理結果・ ℓ_1 トレンドフィルタリング結果・ C_p 規準値・検知確からしさを出力するプログラム（東北大学の課題との共同公開）

3) 仕様・標準等の策定

なし

2. 4 テーマD：情報科学に基づいて即時地震動予測の高速化と高精度化

D-1 ETAS 地震予測を事前情報に活用

D-2 最適な観測網情報に基づく拡張 IPF 法の開発

(1) 業務の内容

(a) 業務の目的

このテーマでは、連発大地震発生の可能性を考慮した短期確率予測および即時把握をするため、地殻変動や地震動モニタリングを含む各種予測モデルの開発・展開・実装を目的とする。そのため統計地震学や多変量時系列解析を含む統計科学の最新の高次元大容量の計算方法を活用して、地震発生 of 長期・中期・短期予測と即時把握とそれらの信頼度を与える。最初の2年半はETAS地震予測と最適な観測網情報の導入を集中し、最後の2年半は新しい緊急地震速報アルゴリズムの高速化、最適化、と結果の可視化に注力する。

(b) 研究者の所属、氏名、研究実施期間、研究費等

所属機関・部局・職名	氏名	研究実施期間	配分を受けた研究費	間接経費
京都大学防災研究所・地震防災部門・准教授	山田 真澄	R4. 4. 1 ～ R5. 3. 31	1, 800, 000 円	540, 000 円
統計数理研究所・データ科学研究系・准教授	ウ・ステファン	R4. 4. 1 ～ R5. 3. 31	テーマA（統 数研配分）の 額に含まれる	同左

注) 配分を受けた研究費は、間接経費を含まない額。

(c) 5か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 令和3年度 [実施業務の要約]

ETAS 地震予測を事前情報への活用を検討したが、今年度はリアルタイムでの ETAS 予測が得られていないため、代わりに IPF 法の適用範囲を調べ、新しい事前情報の導入の準備を検討した。

2) 令和4年度 [実施業務の要約]

IPFx 法を改良し、台湾中央気象台の地震波観測データを用いて良好な検証を行った。

3) 令和5年度

最適な観測網情報の導入による、拡張 IPF 法を完成させる。そして、現在使用されている緊急地震速報のアルゴリズム（拡張 IPF 法と PLUM 法）はそれぞれに長所と短所があるため、二つの手法をハイブリッド化する。

4) 令和6年度

拡張 IPF 法と PLUM 法のハイブリッド化を完成させて、緊急地震速報の予測結果を可視化するシステムの開発を着手する。

5) 令和 7 年度

ETAS 地震予測と最適な観測網情報の導入を成功した上で、網羅的な地震データを使って、改善した緊急地震速報を評価する。そして、緊急地震速報の予測結果を可視化して、情報共有システムを構築する。

(d) 令和 4 年度の業務の目的

- ・ 事前に考えられるシナリオと時空間 ETAS モデルなどでのオンライン予測に対応した地震動予測や、連発地震のもとでの安定した高速高精度の緊急地震速報システムの実装、および即時地震動予測精度の可視化ソフトウェアの提供。
- ・ 緊急地震速報の最適なパフォーマンスを発揮するため、テーマ C と連携して観測点の情報量を評価し、リアルタイムで地震動波形を利用した観測点選択システムの開発

(2) 令和 4 年度の成果

(a) 業務の要約

1) D-1 ETAS 地震予測を事前情報に活用

今年度は、ETAS 地震予測を事前情報に活用する拡張 IPFx 法の開発を本格的に開始した。ETAS モデルの理解を深めるため、ETAS モデルを利用して日本の地震カタログの分析検討を行った。前震活動の後に本震が発生する確率は 10%以下であることが示された。

2) D-2 最適な観測網情報に基づく拡張 IPF 法の開発

テーマ C の成果であり事後分布の無限小ジャックナイフ近似を用いて最適な観測網情報の選択アルゴリズムの開発を始めた。また、確率モデルを用いて緊急地震速報の社会的有用性を評価し、国際論文誌に発表した。

(b) 業務の成果

1) D-1 ETAS 地震予測を事前情報に活用

ETAS モデルを利用した震源推定の精度改善 震源の推定精度を改善するため、テーマ A の成果である ETAS モデルによる地震活動予測をベイズ推論用の事前情報として導入することにより、震源の推定精度に与える影響を検討した。地震発生直後のデータの少ない時点においては、事前分布の影響が大きいため、ETAS モデルの情報を正しく採用することは重要である。まず、ETAS モデルを過去の地震カタログに適用し、ある地震が独立した地震か誘発地震かを分別した。地震カタログをクラスタリングした結果、前震を伴う中規模以上の地震は、前震の半径 3km 以内で発生していることが

分かった。つまり、ある地震が発生した時に半径 3km 以内の場所では地震発生確率が高くなることが示された。

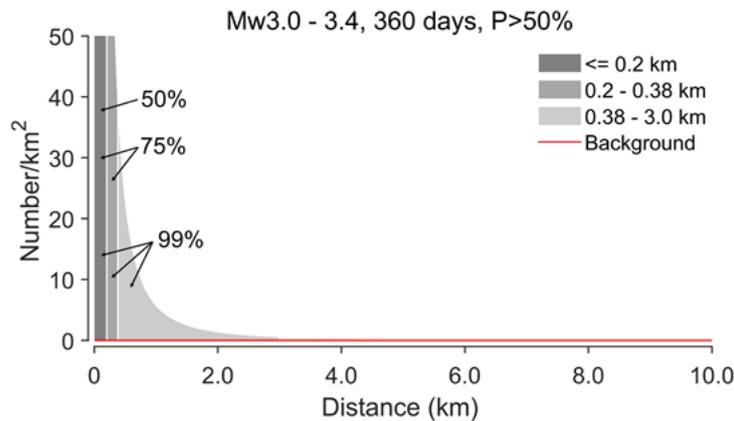


図1 前震とそれに引き続く本震との距離の差

2) D-2 最適な観測網情報に基づく拡張 IPF 法の開発

緊急地震速報における観測点選択の改善 最適な観測網情報に基づく拡張 IPF 法 (Yamada et al,2021)の開発について、現在の緊急地震速報は計算時間の制限により、最初のトリガ観測点の近傍にある少数の観測点データのみ使用している状況である。しかし、利用する観測点データを最適化することで、ノイズによるトリガを減らし震源推定精度を改善できると考えられる。現在の拡張 IPF 法では、第一トリガ観測点の近傍と、第一トリガ観測点のボロノイセルの中心から方位角のカバレッジを考慮して 50 点を選択している。この選択方法を評価するため、テーマ C で開発したベイズ感度公式に基づく観測点選択法を利用して、観測点の重要度を評価する手法を検討した。まずはランダムに配置された観測点を利用して数値実験を行った。その結果、観測点の重要度は地震波形が伝播していくにしたがって変化し、震源に近い観測点の重要度が高いことが分かった。

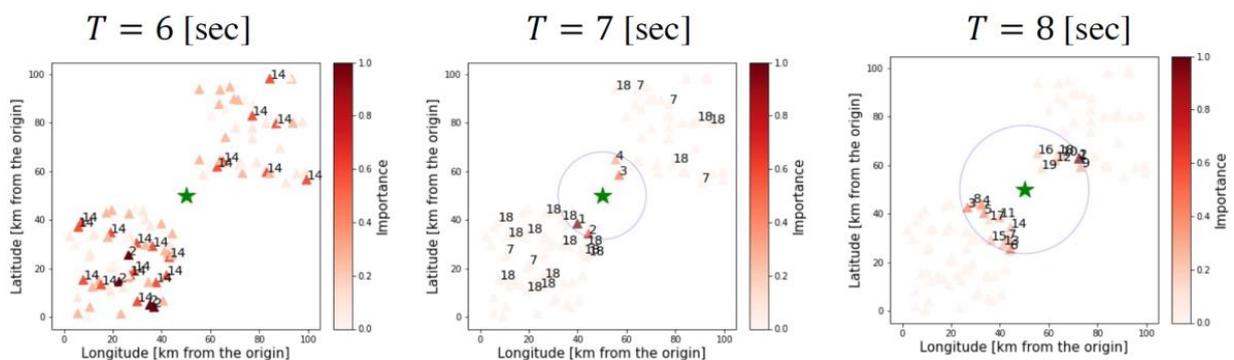


図2 観測点の重要度の時間変化。三角印は観測点、小さい数字は重要度の順位を示す。

引用文献

Yamada M, Tamaribuchi K, Wu S (2021) *The extended integrated particle filter method (IPFx) as a high-performance earthquake early warning system. Bulletin of the Seismological Society of America*, 111:1263–1272. doi:10.1785/0120210008

(c) 結論ならびに今後の課題

1) D-1 ETAS 地震予測を事前情報に活用

ETAS モデルを利用した震源推定の精度改善については、ETAS モデルによる地震活動予測をベイズ推論用の事前情報として導入するため、過去の地震カタログを解析し、本震と前震の関係を調べた。その結果、ある地震が発生した時に半径 3km 以内の場所では地震発生確率が高くなることが示された。今後この結果を利用して、ETAS モデルによる地震活動予測から予測される地震動の事前分布への変換を行う。

2) D-2 最適な観測網情報に基づく拡張 IPF 法の開発

緊急地震速報における観測点選択の改善については、テーマ C で開発したベイズ感度公式に基づく観測点選択法を利用して、観測点の重要度を評価する手法を検討し、数値シミュレーションを行った。その結果、観測点の重要度は地震波形が伝播していくにしたがって変化し、震源に近い観測点の重要度が高いことが分かった。今後はこの時間変化をどのように組み込むかを検討し、現実の観測点配置への適用を行う。

(d) 成果の論文発表・口頭発表等

1) 学会等における口頭・ポスター発表 : 計 12 件、うち海外計 2 件

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別	主たる成果
【招待講演】 Recent advances of data science techniques in seismology(口頭発表)	Yano K.	National Cheng Kung University, 台南 (Slow-to-Fast Earthquake Workshop in Taiwan)	2023年 3月14日	国外	
台湾の緊急地震速報システムと IPFx 法の適用（口頭発表）	山田 真澄 D.-Y. Chen	東京大学地震研究所 共同利用研究会「地震動をはじめとする地球科学データの即時解	2023年 1月 11-12日	国内	

		析・即時予測・情報 利活用」			
IPFx法改良のための地震波形の経験的エンベロープ関数の構築（口頭発表）	Peng, H., Wu, S. Yamada, M.	東京大学地震研究所 共同利用研究会「地震動をはじめとする地球科学データの即時解析・即時予測・情報利活用」	2023年 1月 11-12日	国内	○
緊急地震速報における観測点選択（口頭発表）	矢野 恵佑 山田 真澄 溜渕 功史 Stephen Wu 伊庭 幸人	東京大学地震研究所 共同利用研究会「地震動をはじめとする地球科学データの即時解析・即時予測・情報利活用」	2023年 1月 11-12日	国内	○
XY tracker: a new approach to estimate fault rupture extent in real time for large earthquakes（口頭発表）	Xiao, Y. Yamada, M.	東京大学地震研究所 共同利用研究会「地震動をはじめとする地球科学データの即時解析・即時予測・情報利活用」	2023年 1月 11-12日	国内	
拡張IPF法（IPFx法）を利用した2018年台湾花蓮地震の自動即時震源決定（口頭発表）	山田 真澄* 陳 達毅	札幌市・北海道立道民活動センターかでのる2・7 （日本地震学会2022年度秋季大会）	2022年 10月26日	国内	○
2011年東北地方太平洋沖地震後の未カタログイベントの検出（口頭発表）	溜渕 功史* 工藤 祥太	札幌市・北海道立道民活動センターかでのる2・7 （日本地震学会2022年度秋季大会）	2022年 10月25日	国内	
深層学習を用いた地震波形からの波動伝播方向推定の試み（ポスター発表）	小寺 祐貴	札幌市・北海道立道民活動センターかでのる2・7 （日本地震学会	2022年 10月26日	国内	

		2022年度秋季大会)			
【招待講演】 History of the Japanese Earthquake Early Warning System - lessons learned from failures (口頭発表)	Yamada, M.	2022 Earthquake Workshop, Jeju	2022年 8月31日- 9月2日	国外	
【招待講演】 2022年トンガの火山の噴火によって引き起こされた津波 (口頭発表)	山田 真澄* 何 東政 Mori James 西川 泰弘 山本 真行	幕張メッセ(日本地球惑星科学連合2022年大会, ハイブリッド開催)	2022年 5月26日	国内	
深層学習による地震波検測の検討: 2011年東北地方太平洋沖地震前後への適用 (ポスター発表)	溜瀧 功史	幕張メッセ(日本地球惑星科学連合2022年大会, ハイブリッド開催)	2022年 5月30日	国内	
統合的な地殻活動指標の構築に向けて— “ふつう” の地震活動の特徴に基づく異常度評価— (ポスター発表)	永田 広平* 溜瀧 功史 弘瀬 冬樹 野田 朱美	幕張メッセ(日本地球惑星科学連合2022年大会, ハイブリッド開催)	2022年 6月2日	国内	

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載 : 計2件、うち国外計2件

掲載した論文 (発表題目)	発表者氏名	発表した場所 (学会誌・雑誌等名)	発表した時期	国内・外の別	主たる成果
Automatic Hypocenter Determination with the IPFx method for the 2018 Hualien earthquake sequence.	Yamada, M. Chen, D.-Y.	Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences	2022年 6月16日	国外	○
XY tracker: a new approach to estimate fault rupture extent	Xiao, Y. Yamada, M.	Earth Planets Space	2022年 5月26日	国外	○

in real-time for large earthquakes					
---------------------------------------	--	--	--	--	--

(e) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

3. まとめ

先ず全体的な研究課題の計画を遂行するための計算機環境と組織的な研究体制を保持し、4テーマで成果を得ることができた。具体的には、以下の通りである。

テーマAでは、地震の物理を理解するための方法論を開発し、地震発生プロセスをより詳細に記述するためのモデルを作成することができた。令和4年度は、地球表面曲率を修正する球面上のETASモデル、背景地震活動の時間変動を検出する非定常ETASモデル、および空間、時間、およびマグニチュード以外の次元から地震のトリガーの複雑さを理解するための発震機構を組み込んだETASモデルを開発した。なかでも非定常ETASモデルは、気象庁の業務に使われるようになり、石川県能登地方の地震活動の評価について、地震調査委員会の現状評価でも使われている。地震前兆を含めるために、ETASモデルを自己励起部分、前兆項を外部励起部分とする自己・相互励起モデルを提案した。さらに、ETASモデル改良するものとして、「摩擦構成則」と呼ばれる物理則に基づく地震活動モデルであるDieterichモデルを導入することを試みた。これらのすべてのモデルは、地震データ解析の結果に基づいて慎重に設計・開発された。応用では、地震活動の標準地震モデルからの偏差を使用して、火山地域での流体侵入の検出や、スロースリップや低周波地震に関連する異常な地震群の検出などが行われた。これらすべての個々のモデルを統合して、予測およびデータ解析の目的で使用する準備ができています。

テーマBでは、連発大地震発生の可能性を考慮した短期確率予測および即時把握をするため、地殻変動や地震動モニタリングを含む各種予測モデルの開発・展開・実装を目指して、地震発生の長期・中期・短期予測と即時把握して、複合的確率予測をオンライン・システムに実装することを最終目的としている。今年度では複合的確率予測のベースライン確率として内陸の直下型大地震の長期予測について達成した。これは地震調査委員会の従来からの主要活断層などによる30年確率予測について、代替、補間予測法となる重要なアウトプットであると信じる。必然的に来年度には沖合を含む全日本について同様な長期予測とその検証に取り組む。短期予測として、前震確率や大地震直後の「大余震」もしくは連発大地震の確率予測につながるような研究課題の達成を目指す。中期予測について、今期は「非一様定常ポアソン時空間モデルによる確率予測が良い成績であること」を確認したが、さらに今後、HIST-ETASモデルのシミュレーションによる中期予測を試み、時空間モデルの予測と性能を比較し、改善できるかの結果を出したい。また、余震活動の相対的静穏化異常やトリガーリング効果から近傍での大規模地震の切迫度や地域性の時空間スケールリングを危険度拡大率（確率利得）の一要素として利用可能にしたい。さらにb値のオンライン時空間モニタリングが可能になったので、これも予測的立場から「異常性」の仮説を設定して検証を試みることができるようになったのは重要である。

テーマCでは、動的観測点統合法の開発・逆解析用の観測点情報の統合・選択法の開発・地震活動度・予測情報を利用した最適設計に関する検討を開始した。具体的には、ベイズ感度公式を利用した観測点重要度指標を提案し、緊急地震速報法における地震伝播を想定した状況で観測点の重要度が時間によって変化することを確認した。また、東北大学で実施の課題と共同し、四国西部の短期的ゆっくりすべりの自動検知法を開発・論文化した。この自動検知法において、GNSS観測点から「フィルタリング結果が区分線形になり

やすい」観測点を情報量規準の挙動から自動選択することができた。さらに、テーマ D と協同し緊急地震速報法である拡張 IPF 法における観測点選択の最適化を検討した。具体的には先ほどのベイズ感度公式に基づく観測点重要度の利用を検討した。最後に、地震活動度・予測情報を利用した最適設計に関する検討を開始した。具体的にはベイズ法による情報統合手法を開発した。

テーマ Dは ETAS モデルを利用した震源推定の精度改善および、テーマ C との連携による震源決定に用いる観測点選択手法の改良に取り組んだ。ETAS モデルによる地震活動予測をベイズ推論用の事前情報として導入するため、過去の地震カタログを解析し、本震と前震の関係を調べた。その結果、ある地震が発生した時に半径 3km 以内の場所では地震発生確率が高くなることが示された。ベイズ感度公式に基づく観測点選択法を利用して、観測点の重要度を評価する手法を検討し、数値シミュレーションを行った。その結果、観測点の重要度は地震波形が伝播していくにしたがって変化し、震源に近い観測点の重要度が高いことが分かった。

テーマ間の共同成果として、今年度ではテーマ C とテーマ D で共同の成果があがった。「2023 年度業務計画書」ではテーマ C 及び D とともに、テーマ A 及び B の結果を事前情報として展開することを目標としている。この目標を深めるために本プロジェクトの全メンバーはワークショップを催して交流を深め、全体的に順調に成果が上がっている。さらに、研究進捗の効率性、アウトプットの価値を評価し、今後数年間の研究進捗を円滑にするための計画を策定している。

4. 活動報告

<会議開催実績>

・統計地震学セミナー

第 83 回 2022 年 4 月 26 日 Petrillo, Giuseppe (元 Dep. of Mathematics and Physics, Universita della Campania "Luigi Vanvitelli", ITALY・研究員/統計数理研究所リスク解析戦略研究センター・外来研究員) Statistical mechanics models for seismic occurrence オンライン

第 84 回 2022 年 7 月 7 日 彭 鴻(Peng, Hong) (京都大学防災研究所附属地震予知研究センター・大学院生) Characteristics of foreshocks preceding the mainshocks in Japan オンライン

第 85 回 2022 年 10 月 3 日 西川友章 (京都大学防災研究所・助教 / 統計数理研究所リスク解析戦略研究センター・外来研究員) Application of the ETAS model to slow earthquake research オンライン

第 86 回 2022 年 11 月 14 日 Zhuang, Jiancang (庄 建倉) (統計数理研究所モデリング研究系・准教授) Evaluating earthquake forecasts with likelihood based marginal and conditional scores

Sofiane Rahmani (Center of Research in Astronomy, Astrophysics and

Geophysics(CRAAG), Algeria ・大学院生) Time-dependent and spatiotemporal statistical analysis of Algerian seismicity オンライン

第 87 回 2022 年 12 月 26 日 佐藤大祐 (京都大学防災研究所・JSPS 特別研究員)

Inventing appropriate solving methods of hierarchical Bayesian inversions when using regularization priors オンライン

第 88 回 2023 年 3 月 17 日 Hainzl, Sebastian (GFZ German Research Centre for Geosciences, Germany ・Senior Researcher) Stress-based seismicity modeling

Stockman, Sam (Computational Statistics and Data Science, University of Bristol, UK ・大学院生) Forecasting the 2016-2017 Central Apennines Earthquake Sequence with a Neural Point Process 統計数理研究所 及び オンライン

※セミナー終了後、研究テーマリーダーミーティングを実施。

・第 12 回 統計地震学国際ワークショップ (StatSei12)

コルシカ島 (Institut des Etudes Scientifiques de Cargèse, Corsica, フランス, 2022 年 10 月 17 日-21 日) で開催されました。プロジェクトリーダーの庄 建倉准教授 (Zhuang, Jiancang; organizer、プログラム委員), 熊 子瑤 (Xiong, Ziyao) 特任助教、ペトリロ・ジュゼッペ (Giuseppe, Petrillo) 特任研究員たちが出席・発表。

・STAR-E 勉強会

STAR-E 第 5 回勉強会 2022 年 9 月 20 日 オンライン

庄 建倉「長期から即時までの時空間地震予測とモニタリングの新展開 (研究課題紹介)」

Wang, Ting (Associate Professor, the University of Otago, New Zealand) Hidden Markov

models for spatiotemporal recurrence patterns of seismic tremors

野村 俊一 「アンサンブル学習を用いた前震識別モデル」

第 10 回 STAR-E 勉強会 2023 年 3 月 2 日 オンライン

矢野 恵佑 (統計数理研究所 准教授) 緊急地震速報における観測点選択

尾形 良彦 (統計数理研究所 名誉教授) 階層型時空間 ETAS モデルについて

※勉強会の前、各STAR-Eプロジェクト代表者ミーティングを実施。

<アウトリーチ活動>

・防災講座「静岡で知っておきたい地震と火山と防災」

楠城 一嘉特任准教授 (静岡県立大学) がコーディネーターを務める防災講座

【オンライン配信】2022 年度第 5 期講座 (全 3 回)「静岡で知っておきたい 地震と火山と防災」(第 1 回 2023 年 1 月 20 日(金)・第 2 回 2023 年 1 月 27 日(金)・第 3 回 2023 年 2 月 3 日(金) 時間は全て 19:30-21:00) を開催。

・WEB による公開

活動内容、成果の解説、ソフトウェアとそれらのマニュアル、データベース、本プロジ

ェクトを理解するための有用な基本情報など、アウトリーチを鋭意務めている。そのため WEB サイト <https://star-e.ism.ac.jp/index.html> を設けて統計数理研究所の関係プロジェクトの一つとしてリンクされている。また文部科学省の STAR-E プロジェクトのホームページからもリンクされている。

その他の独自のアウトリーチも ISM-STAR-E のコアメンバーで検討したい。

<記事等>

- ・(京都大学防災研究所 HP News) 山田 真澄 准教授(京都大学防災研究所)が、innovation ジェネレーションアワードおよび京都大学たちばな賞を受賞
- ・加納 将行助教(東北大学 地球物理学専攻)が第 30 回日本測地学会賞坪井賞を「測地データに基づく沈み込み帯における断層の摩擦特性とすべりの多様性に関する研究」について受賞
- ・矢野 恵佑准教授が日本統計学会第 36 回小川研究奨励賞を受賞
- ・山田 真澄准教授が、第 51 回日本地震学会記者懇談会で、「2022 年 1 月トンガ火山の噴火による津波の謎」の講演を実施

5. むすび

以上のように、各テーマにおいてそれぞれの研究課題を推進し、十分な成果・進捗が得られ、順調に研究が進展しているといえる。令和 4 年度中に、各テーマ間と他の STAR-E プロジェクトの研究課題との連携についても開始した。令和 5 年度では、課題全体で議論し今後の方針を検討することが重要である。そのためにも、各参加機関および協力機関のより一層の研究推進が必要不可欠であるが、これまでの進捗を見る限り、今後も十分な成果が出るであろうと期待している。

本研究プロジェクトについては、気象庁一元化震源カタログ、防災科学研究所 F-net データ、ハーバード大学 GCMT データ、国土地理院 GNSS データ、台湾中央気象台の地震波観測データ、イタリア国立火山学地球物理研究所 ISIDE カタログ、国立研究開発法人建築研究所の宇津歴史被害カタログを使用した。