

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7年度
成果報告書

令和8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6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 :

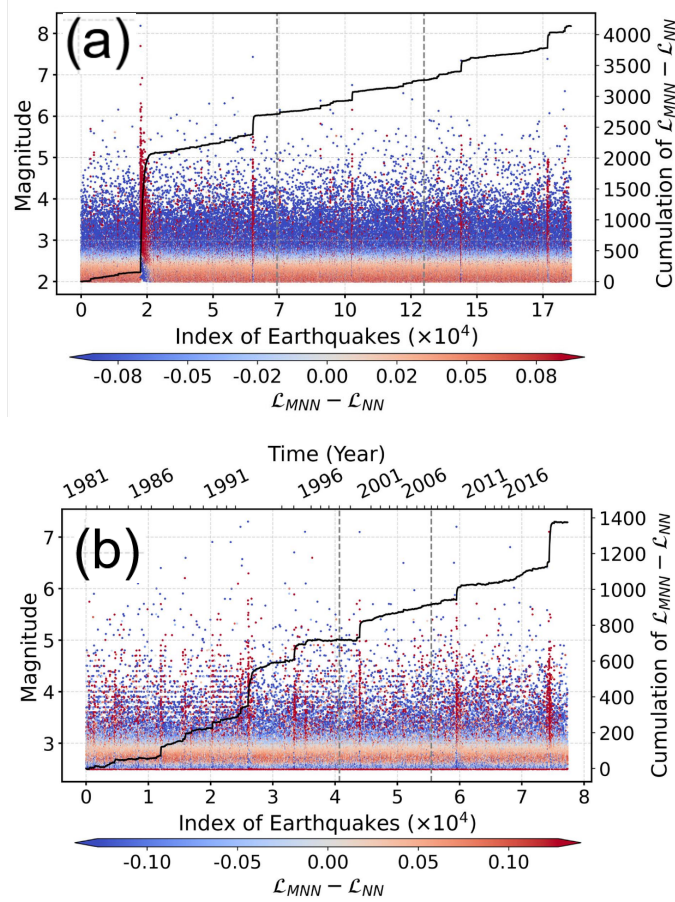


図 1 実地震活動における震級依存性の不顕著性の検証

地震クラスター内における震級相関の有無は未解決問題である。本研究では、履歴依存型 MNN と履歴非依存型 NN のイベントごとの情報利得 (PEIG) に基づき解析を行う。正の PEIG は過去震級の寄与を示すが、STAI や微小地震の欠測により見かけ上の依存性が生じうる。本図ではこれを合成および実カタログで検証する。(a) は震級独立だが欠測を含むカタログであり、ETAS により観測バイアスを模擬した。(b) ではカリフォルニアの ComCat カタログ ($M_{\text{cut}} = 2.5$) を用いる。横軸はイベント番号 (実データでは時間軸併記)、灰色破線は学習・検証・テストの境界を示す。各点の色は PEIG、黒実線は累積利得を表す。合成および実カタログ (ComCat, SCEDC) とともに、STAI 区間に対応して累積利得が急増し、それ以外ではほぼ一定となる。同様の傾向は他カタログでも確認される。さらにカットオフ震級 M_{cut} を増加させると、平均利得は 0 に収束し、分散はサンプル減少により増大する。

以上より、観測される利得は主として STAI および微小地震の欠測に起因する観測過程の影響と解釈され、内在的な震級依存性は不顕著である。震級およびその差は頑健な時間相関を示さず、Gutenberg-Richter 則および震級独立性仮定の妥当性が支持される。この結果は、ETAS モデルの拡張において物理的トリガリング機構の複雑化よりも、観測過程 (検出確率・完全性) の明示的モデリングが重要であることを示唆する。

テーマ B :

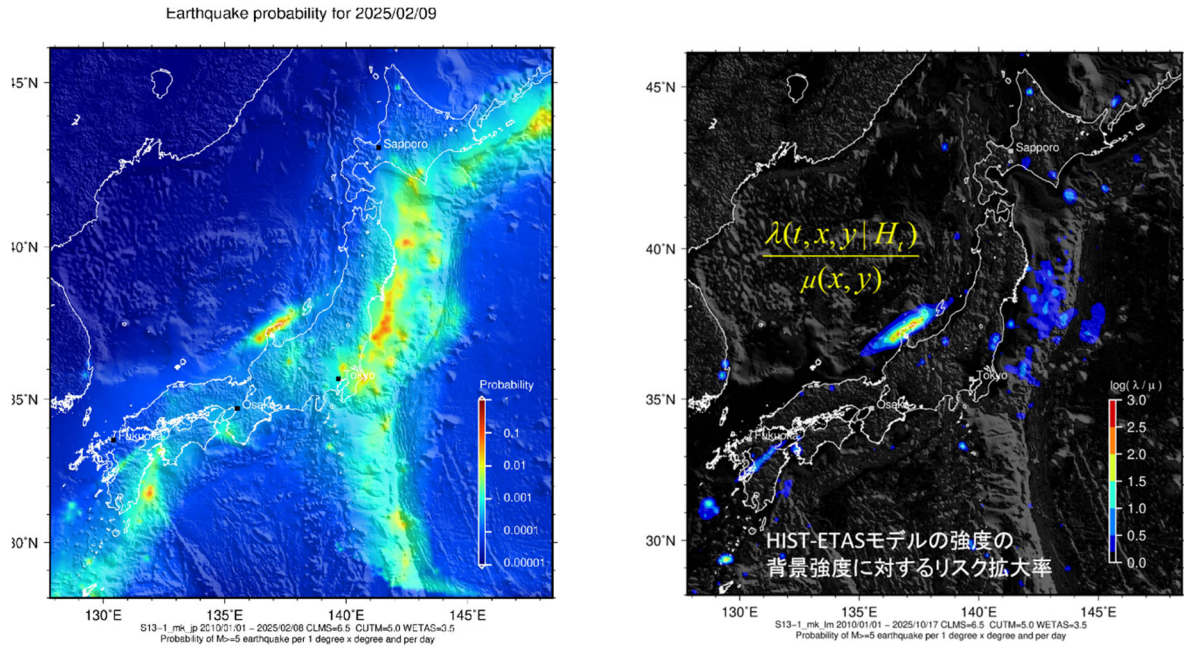


図 2 地震活動度と確率利得密度関数の動画のひとコマ。左側パネルは HIST-ETAS モデルによる 2025 年 2 月 8 日の $M \geq 5$ 地震活動度 (event/deg²/day)。右側パネルは同日の危険度拡大率。

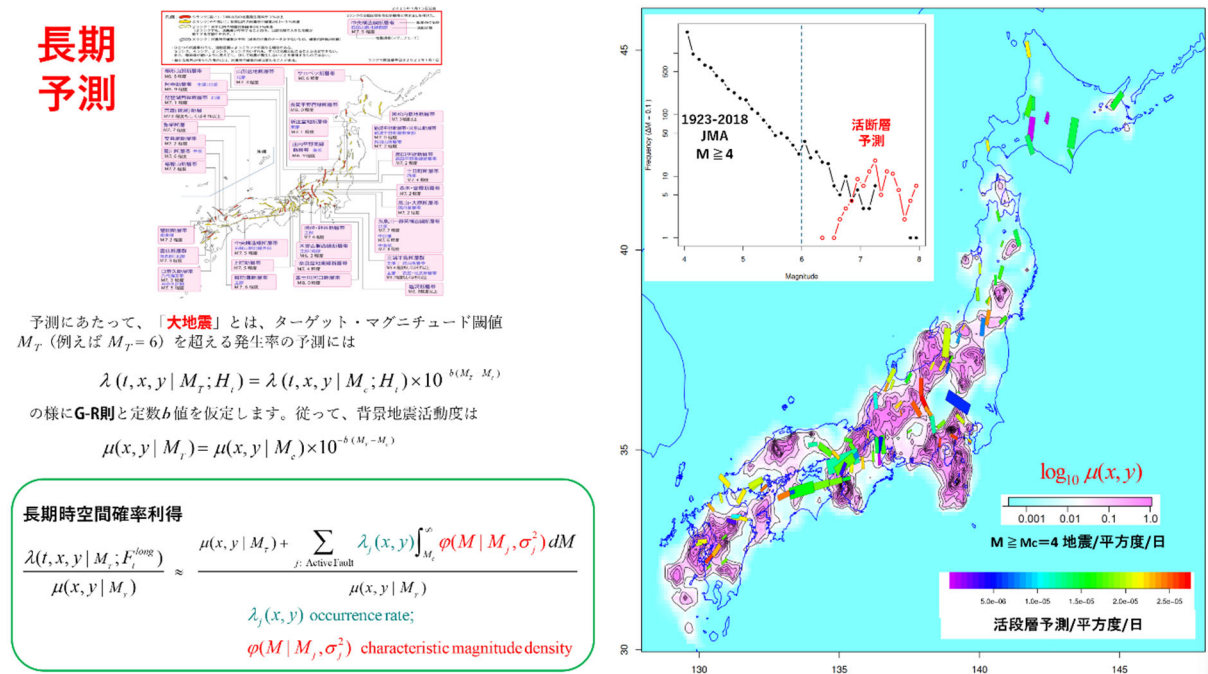
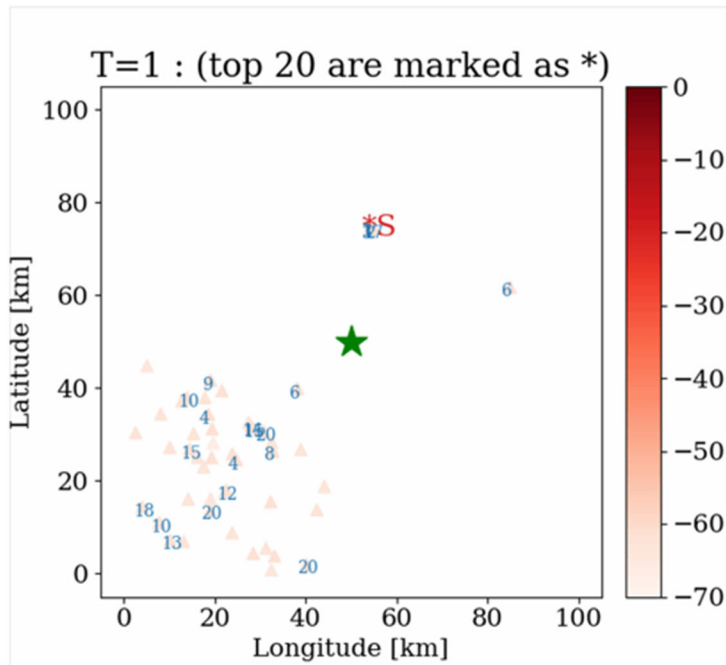


図 3 内陸部の長期予測。地震調査研究推進本部は M7 クラスの直下型地震について 30 年発生確率を示している。一方、背景地震活動度 μ と活断層地震の危険度との間には明確な空間相関は認められない。従って長期予測では、広域については b 値を一定 (例えば 0.9) とし、活断層については特性マグニチュード分布を用いる。

テーマC:

時変最適観測点グループと逐次重要度ベクトルI



時不変最適観測点グループと累積重要度ベクトルI

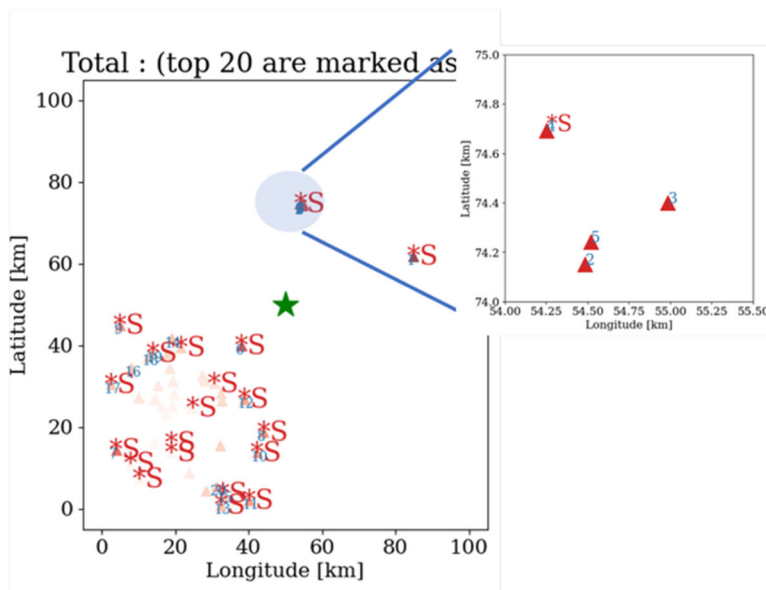


図3 緊急地震速報の高度化のための動的観測点選択と時不変観測点選択法。テーマCとテーマDの協働により動的・時不変での挙動が整合的になるような手法を開発した。(Yano et al., in prep.)

テーマD:

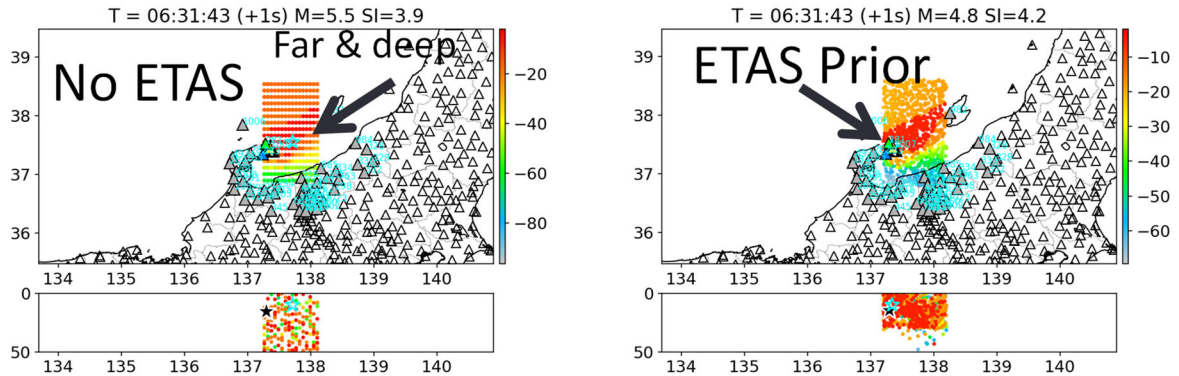


図4 ETAS地震予測を用いたIPF法拡張とPLUM法ハイブリッド化による震源推定精度・警報性能向上手法の確立。緊急地震速報では、短時間で震源決定を行うため、地震発生直後のデータが少ない時点では精度が低いという問題がある。特に、観測点分布が偏っている能登半島先端のような地域では、予測誤差が大きくなる。そのため、ETAS地震予測を利用して、震源推定を高度化する手法を開発した。ETAS地震予測を事前情報として初期サンプリングに利用するETAS事前情報と、ETAS地震予測を尤度関数の一部として利用するETAS尤度関数を構築した。

2024年6月3日の能登半島地震の余震に開発した手法を適用した。ETAS事前情報を利用したときは、最初の数秒の震源推定は改善されたが、リサンプリングすると推定震源の場所は悪くなった。ETAS尤度関数も併用した場合は、どの時間においても震源推定の精度が向上した。ETAS地震予測を利用した震源推定は、観測点のカバレッジが悪い場合に、震源推定精度を向上する手法として有効であることが示された。

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

はじめに	v
目 次	vi
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7年度の成果	4
2. 2 テーマB：地震活動の予測システムの構築	26
(1) 業務の内容	26
(2) 令和7年度の成果	28
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	43
(1) 業務の内容	43
(2) 令和7年度の成果	44
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	49
(1) 業務の内容	49
(2) 令和7年度の成果	50
3. まとめ	58
4. 活動報告	59
5. むすび	62

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。

まず、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「残差解析」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 異常現象の因果性の評価と外部変数入力

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 統計基盤数理研究系 教授	庄 建倉	R7. 4. 1 ～ R8. 3. 31	24,000,000 円 (テーマ B 尾形良彦、C 矢野恵佑、D Wu Stephen の配分を含む)	7,200,00 円
県立広島大学 大学教育実践センター 准教授	岩田 貴樹	R7. 4. 1 ～ R8. 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 [実施業務の要約]

深さと震源メカニズムの両方を組み込んだ高次元時空間 ETAS モデルと重み付き尤度に基づく非ベイズカーネル型 ETAS モデルを実装し、背景地震活動と GNSS などの異常現象の間の関係のモデリングを始め、群発地震の乖離活動および全球の地震活動の相対的静穏化や活発化などの各種の統計的異常現象を抽出した。

4) 令和 6 年度 [実施業務の要約]

震源メカニズムを取り入れた高次元時空間 ETAS モデルにより、GCMT カタログを解析した。欠測データの推定のためにモンテカルロ法を用いた GP-ETAS モデルを開発した。二次余震や摩擦構成則を考慮した空間カーネルによりモデルを改善し、背景応力場の推定にも対応した。能登半島の地震活動に非ベイズカーネル型モデルを適用し、予測性能の比較指標（周辺・条件付きスコア）を開発した。さらに、機械学習を用いた点過程モデルと ETAS モデルの比較や、SSE・流体誘発など外部励起要因と地震活動の相関性を解析するモデルを開発した。

5) 令和 7 年度 [実施業務の要約]

GNSS 異常現象を用いた地震活動解析について、既存データおよび解析手法を用いて継続的に実施した。あわせて、研究者が利用可能な環境整備を目的として、ETAS モデルの標準的バージョンについて検討を行い、スタンドアロン実行可能形式での統合および再利用可能なライブラリ化に向けた整備を進めた。

(d) 令和 7 年度の業務の目的

1) A-1 高次元 ETAS モデル

深さおよび震源メカニズムを組み込んだ高次元時空間 ETAS モデルを用いて、日本地域の地震カタログデータに対する解析および地震発生予測の数値実験を行う。あわせて、ETAS モデルの各種バージョンの整理・統合を進め、スタンドアロンで実行可能なパッケージおよび再利用可能なコードライブラリの整備を図る。さらに、短期余震欠測の影響を考慮するため、欠測データ推定および補完に関する手法の検討・改良を行う。

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

時空間 ETAS モデルと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て、背景応力場および背景地震活動の推定手法の改良を行う。あわせて、GNSS などの地殻変動データから得られる歪み情報を入力とした地震活動モデルの精度向上を図る。

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

令和 7 年度の計画書には含まれていない。

4) A-4 異常現象の因果性の評価と外部変数入力

機械学習および AI を活用した点過程モデルの構築を進め、異常現象を考慮した地震確率予測手法の高度化を図る。また、従来の ETAS モデルとの比較を通じて、外部変数の導入による予測性能への影響を評価する。

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

令和7年度の計画書には含まれていない。

(2) 令和7年度の成果

(a) 業務の要約

1) A-1 高次元 ETAS モデル

解析パッケージ群の整理・統合を進め、再現性の高い地震予測実験を実施可能とした。また、ETAS モデルに関して欠測データの影響を考慮した解析手法の検討を行い、短期余震欠測に対応するためのモデル改良に取り組んだ。

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

時空間地震活動モデルのクラスター成分に非等方性を導入するための手法について検討を行い、既存モデルとの比較評価を実施した。また、背景地震活動度の時間変化（非定常性）を考慮したモデル拡張を試みるとともに、GNSS等の地殻変動データから得られる歪み場を入力とする統合解析基盤の整備を進めた。

3) A-4 異常現象の因果性の評価と外部変数入力

ニューラル更新点過程（NRPP）モデルを構築し、ETAS モデルと比較して余震系列の非線形的特徴の再現性向上を確認した。また、カルマンフィルタを導入したNKF-ETAS モデルを検討し、短期的な地震活動変化への追従性の改善を試みた。さらに、AIを用いたマグニチュード依存性およびクラスタ構造の解析を行い、STAI 条件下における統計的特性の評価を実施した。

(b) 業務の成果

1) A-1 高次元 ETAS モデル：

a) 情報理論的枠組みによる地震予測可能性の定式化と評価

本研究は、「地震は本質的にどこまで予測可能なのか」という、地震学における根源的かつ未解決の問いに対し、情報理論に基づく統一的な枠組みから体系的な整理と再定式化を行ったものである。地震現象は完全なランダム過程ではない一方で、一般に想定されるような決定論的予測も成立しないという中間的性質を有する。本研究は、この「部分的に予測可能である」という性質を定量的に記述し、その理論的境界と実用的到達可能性を明確に区別することを目的とする。

従来の地震予測研究は、主として個別モデルの構築や性能比較、あるいは運用的な予測システムの開発に焦点が当てられてきた。しかしながら、「そもそも地震はどれだけ予測可能なのか」という問い自体は、明確に定義されないまま議論されることが多かった。本研究ではこの点に着目し、予測可能性を「将来の地震活動に関する不確実性が、過去の観測やモデルによってどれだけ削減され得るか」という量として定義した。具体的には、シャノンエントロピーを不確実性の尺度とし、完全ランダムな参照系（最大エントロピー分布）と真の地震発生過程とのエントロピー差を「内在的予測可能性」として定式化した。さらに、カルバック・ライブラー情報量を用いることで、実際の予測モデルがこの理論的上限に対してどの程度の情報を捉えているかを評価する枠組みを提示した。

この理論的枠組みを点過程モデルに適用し、ポアソン過程および ETAS モデルのエントロピー率を導出した。その結果、ポアソン過程が与えられた制約の下で最大エントロピー、すなわち完全ランダム性の基準となる一方、ETAS モデルのような自己励起型モデルでは、条件付き強度関数の時間変動により情報利得が生じ、これが予測可能性の源となることを示した。特に、分岐比 (branching ratio) やクラスタリングの強度が増すほど、エントロピー率の低下、すなわち予測可能性の増加が顕著になることを理論的に明らかにした。

この視点に基づき、地震予測可能性を時間・空間・マグニチュードの三側面から整理した。時間および空間に関しては、余震系列に代表されるクラスタリング構造や、背景地震活動の空間的不均一性が主要な予測可能性の源であり、ETAS 型モデルがその大部分を説明している。一方、マグニチュードについては状況が大きく異なる。グーテンベルク・リヒター則により個々の地震規模の分布はよく記述されるが、これはあくまで周辺分布であり、事象間の依存構造を含まない。したがって、マグニチュードの予測可能性を向上させるためには、周辺分布と多変量依存構造を明確に分離し、後者に含まれる情報を抽出する必要がある。しかしながら、現時点では統計的に有意かつ安定したマグニチュード依存構造は十分に確立されておらず、この分野は依然として重要な課題を残している。

さらに本研究は、地震カタログ以外の補助的観測データの役割についても、情報理論的に明確な解釈を与えた。すなわち、地殻変動、地球化学的異常、電磁気観測などの高次元データは、それ自体が予測能力を持つのではなく、将来の地震活動に関する条件付きエントロピーを低減させる場合、すなわち相互情報量を増加させる場合にのみ予測に寄与する。この枠組みにより、異なる種類の観測データの有効性を共通の尺度で評価することが可能となる。

本研究の重要な貢献は、予測可能性を「モデルの性能」ではなく「系が本質的に持つ情報構造」として捉え直した点にある。この枠組みにより、(1) 理論的な予測限界、(2) 個々のモデルが達成している実際の性能、(3) データやモデルの改善によって達成可能な余地を明確に分離して議論することが可能となった。これにより、見かけ上の予測性能の向上が本質的な情報の増加によるものか、それとも単なるモデル調整の結果に過ぎないのかを識別できる。

以上のように、本研究は地震予測を「不確実性の削減過程」として統一的に再定義し、予測限界の理解、モデル評価、観測戦略の最適化に関する理論的基盤を提供するものである。この情報理論的視点は、地震学にとどまらず、気候変動、火山活動、水文学などの複雑自然現象の予測可能性を議論する上でも有効な一般的枠組みとなることが期待される。

b) ガウス過程に基づく非定常背景地震活動率のための GP-ETAS モデルの開発

本研究では、時間依存型背景地震活動率の推定を目的として、ガウス過程 (Gaussian Process, GP) を導入した GP-ETAS モデルを開発した。本モデルは、地震発生 of 統計的モデリングにおいて広く用いられている ETAS モデルを拡張し、従来は定常または単純

な関数で仮定されていた背景地震活動度を、非パラメトリックかつ時間依存的に表現可能としたものである。特に、ガウス過程事前分布を用いることで、背景活動率の複雑な時間変動を柔軟に捉える統一的なベイズ推論枠組みを構築した。

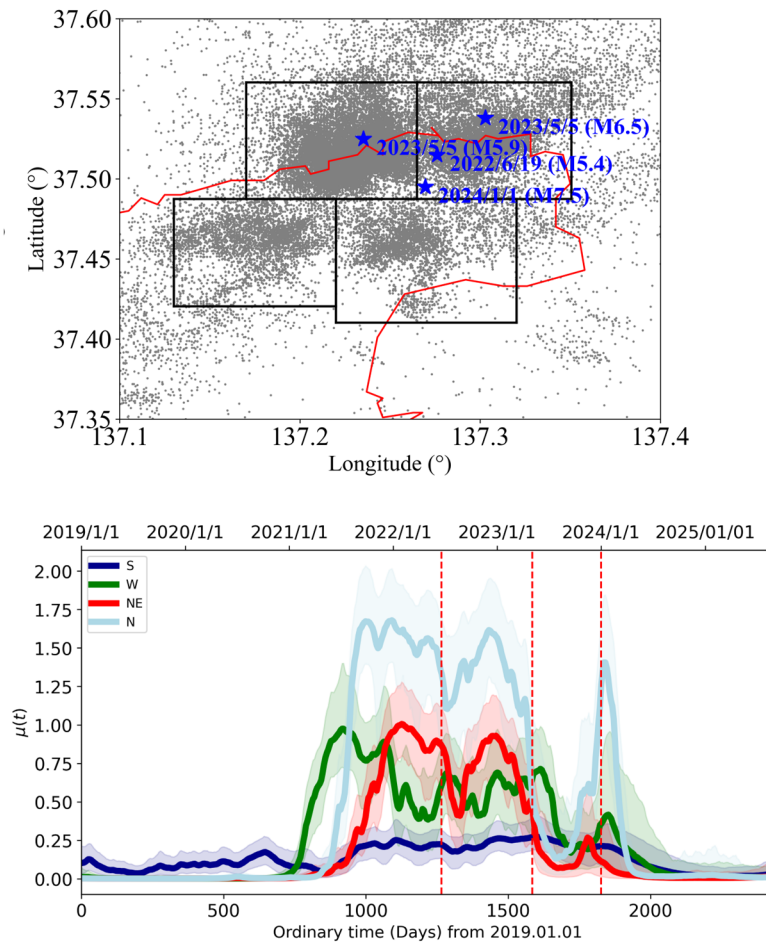


図1 能登地域における研究領域および地震活動分布。左パネルは観測された地震活動の空間分布を示し、下パネルはMatérn型共分散関数を用いたGP-ETASモデルにより推定された背景地震活動度を示す。

本モデルでは、条件付き強度関数を従来のETAS構造に基づき定義しつつ、背景活動率に対してシグモイド関数をリンク関数としたガウス過程を導入している。この設定により、特定の関数形を仮定することなく、データから背景活動の時間変動パターンを自動的に学習することが可能となる。また、統計的推論の実装にあたっては、確率的デクラスタリングによる潜在分岐構造の導入、ポリャ-ガンマ補助変数を用いたロジスティック変換の扱い、さらにマーク付きポアソン過程に基づく数値積分といった複数の尤度拡張を組み合わせることで、Gibbsサンプリングに基づく効率的なベイズ推論アルゴリズムを構成した。加えて、誘導点(inducing point)手法を導入することにより、計算負荷の低減も図っている。

シミュレーション実験においては、背景地震活動率が緩やかに変化する場合および急激に変動する場合の双方に対して検証を行った。その結果、GP-ETASモデルは複雑

な時間変動構造を安定的に再現できることが確認された。特に、従来のスプラインベース手法 (SP-ETAS) と比較して、急峻な変化や局所的な変動をより適切に捉える傾向が見られた一方、カーネル選択に対しても推定結果は比較的安定であり、実用上の頑健性が示された。

さらに、能登半島の群発地震活動への適用においては、GP-ETAS モデルにより推定された背景活動率は、地震活動の開始および進展過程に対応する非定常的な変動を明瞭に捉えた。特に、時間的に局所的な活動度の増加や細かな揺らぎが検出され、従来のスプラインベースモデルでは十分に表現されなかった特徴が明確化された。このような結果は、地下における流体移動やスロースリップ等の物理過程と整合的であり、統計モデルとしての解釈可能性を維持しつつ、非定常地震活動の記述能力が向上していることを示唆するものである。

また、本モデルは背景活動度を柔軟に推定できることから、余震直後などに発生する一時的なカタログの不完全性 (欠測データ) に対しても一定のロバスト性を有しており、短期的な地震活動解析への応用可能性も示された。実データ解析においても、クラスター構造の識別や背景地震と誘発地震の分離に関して、従来の最尤推定法に比べてより明確な構造が得られることが確認されている。

以上より、本研究で開発した GP-ETAS モデルは、時間依存型背景地震活動率の推定において高い柔軟性と表現能力を有し、非定常地震活動の特徴をより精緻に捉えることが可能であることが示された。一方で、モデルの柔軟性に起因する過学習や推定の不安定性の可能性についても留意が必要であり、今後は正則化やモデル選択の観点からの検討が重要である。

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

摩擦構成則に基づく地震活動モデル (Dieterich モデル) を時空間化する際、各地震による応力の空間的な拡がりを表わすカーネル関数を導入する。既存研究 (例えば Cattania et al., [2015, JGR]) では地球物理学的な観点に基づいてカーネル関数のパラメータを固定しているが、データからパラメータを推定するなどの工夫により、実際の地震活動への適合性をより高めた。

さらに多くの研究が用いている、応力の拡がり同心円状となる「等方カーネル」を楕円状にした「非等方カーネル」に換える工夫も行った。同様の工夫は時空間 ETAS モデルに対して Ogata [1998] が行っている。但し Ogata [1998] はまず地震の時空間分布からクラスターを構成し、各クラスターに異なる非等方性に関するパラメータ (以下「非等方パラメータ」) を与えるという 2 段階推定を行っている。この推定方法では余震域など比較的小領域のデータに対しては過適合となり、むしろ全地震に対して共通の非等方パラメータを与えた方がよい可能性が考えられる。それで、実際の小領域データに対して非等方パラメータを「共通」「異なる」とした場合について、AIC に基づくモデル比較を行った。

複数の余震および群発地震データに対して時空間 ETAS モデルによる解析を行った結果、非等方パラメータを「異なる」としたより「共通」とした方がよいケースが多く見られた。特に余震データにおいては、一例として 2018 年北海道胆振東部地震の余震データの解析結果（左図）が示すように、ある程度線上に並ぶ余震分布の構造が捉えられている。

そして、この非等方カーネルを導入した時空間 ETAS および Dieterich モデルを足し合わせた混合モデルを構築した。この混合モデルと時空間 ETAS あるいは Dieterich モデル単独を複数の余震および群発活動データに適用し、やはり AIC に基づくモデル比較を行った。解析した 4 事例中 3 事例において混合モデルが最も（有意に）よいモデルとなった。モデル改善の特徴を掴むべく、各モデルから得られた強度関数を比較したが、明らかな改善点を見出すことは出来なかった（右図に例として 2004 年新潟県中越地震の余震データの時間変化についてのものを示す）。このことから、混合モデルは細かい改善を積み重ねて、地震活動の時空間領域全体に対する適合度を高めていると考えられる。モデル改善点の特徴は明瞭ではないが、（単独の）時空間 ETAS モデルが有意に改善され、結果として得られる背景地震活動もより適切なものであると言える。

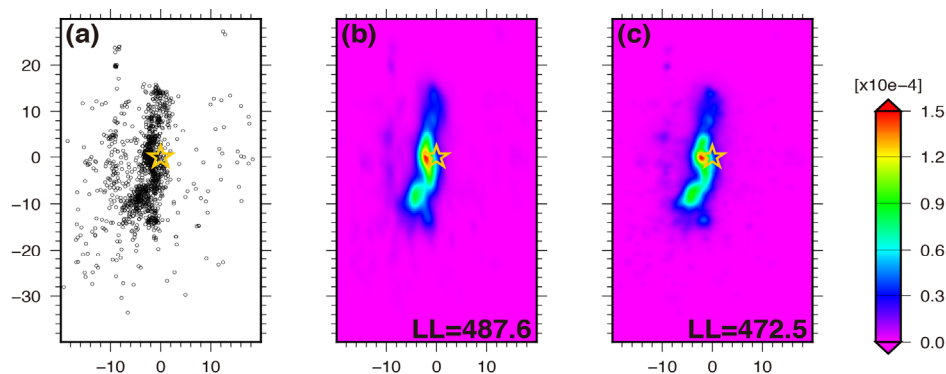


図 2. 2018 年北海道胆振東部地震の余震分布（図 a、黒丸）について、本研究で提案した「共通」の非等方パラメータを用いた場合（図 b）と、Ogata [1998] が提案した「異なる」非等方パラメータを用いた場合（図 c）における空間密度分布推定結果（推定された時空間 ETAS モデルを時間に関して積分したもの）の比較。図 b および c における右下の数字は、“LL” は推定された空間分布と図 a に示した実際の空間分布から計算された対数尤度を表す。なお、AIC による比較では「共通」の方が「異なる」より 14.1 よい。星印は本震震央を表す

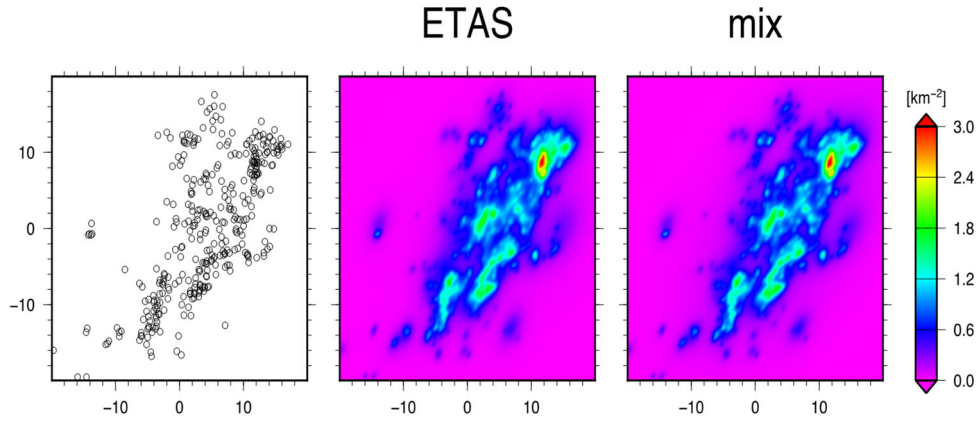


図 3. 2004 年新潟県中越地震の余震（黒丸、左図）に対して、時空間 ETAS（中図）および「混合モデル」（右図）から得られた空間密度分布推定結果。両者間には、人の目で見ると明瞭な差は見出しづらい。

3) A-4 異常現象の因果性の評価と外部変数入力

a) 地震活動モデリングのための時空間ニューラル更新過程に基づく枠組み

ST-NKF (Spatio-Temporal Neural Kernel Function Hawkes Model)

本研究では、地震発生の時空間的な複雑性と非定常性を、従来の経験的パラメトリックモデルより柔軟に表現することを目的として、Neural Modulated Renewal Process (NMRP) を時空間拡張した Spatio-Temporal Neural Modulated Renewal Process (ST-NMRP) を開発した。従来、地震活動の予測には ETAS モデルが広く用いられてきたが、時間・空間の励起構造に固定的な関数形を仮定するため、実際の地震活動に見られる複雑な依存関係を十分に表現できない場合がある。本研究では、この課題に対し、時間方向には renewal process に基づく柔軟なハザード関数を導入し、空間方向には最近の地震履歴に条件づけられた空間確率密度をニューラルネットワークで表現する枠組みを構築した。

性能評価には、California を対象とした EarthquakeNPP ベンチマークの 3 つの地震カタログを用いた。その結果、ST-NMRP は既存の spatiotemporal neural point process モデルより高い対数尤度を示し、時間方向の予測性能では ETAS モデルを上回る結果を得た。空間方向では、長期の履歴情報を利用する標準 ETAS に対してはやや劣る場合があったが、同一の履歴長に制限した limited-history ETAS と比較すると、3 カタログ中 2 つで優位、総合対数尤度では全カタログで改善が確認された。これは、ST-NMRP の性能上の制約がモデル構造そのものではなく、主として計算上の履歴長制約に起因することを示唆している。

また、空間重み付け機構について、一様型、時間依存型、マグニチュード依存型、時間・マグニチュード統合型の複数方式を比較した結果、地震間時間が最も有効な条件付け変数であり、マグニチュードの寄与は相対的に限定的であることが明らかとなった。さらに、本研究では ST-NMRP に基づく合成地震カタログのシミュレーション手法も整備し、将来の地震活動を確率的に再現することで、空間ハザードマップの作成

など予測応用への展開可能性を示した。

以上より、ST-NMRP は、従来の ETAS モデルの構造的知見を保持しつつ、深層学習の柔軟性を導入した新しい時空間地震活動モデルとして有望であり、今後の地震予測・ハザード評価への応用が期待される。本研究は、Earth's Future 誌（インパクトファクター：8.2、2025年）に掲載受理された。

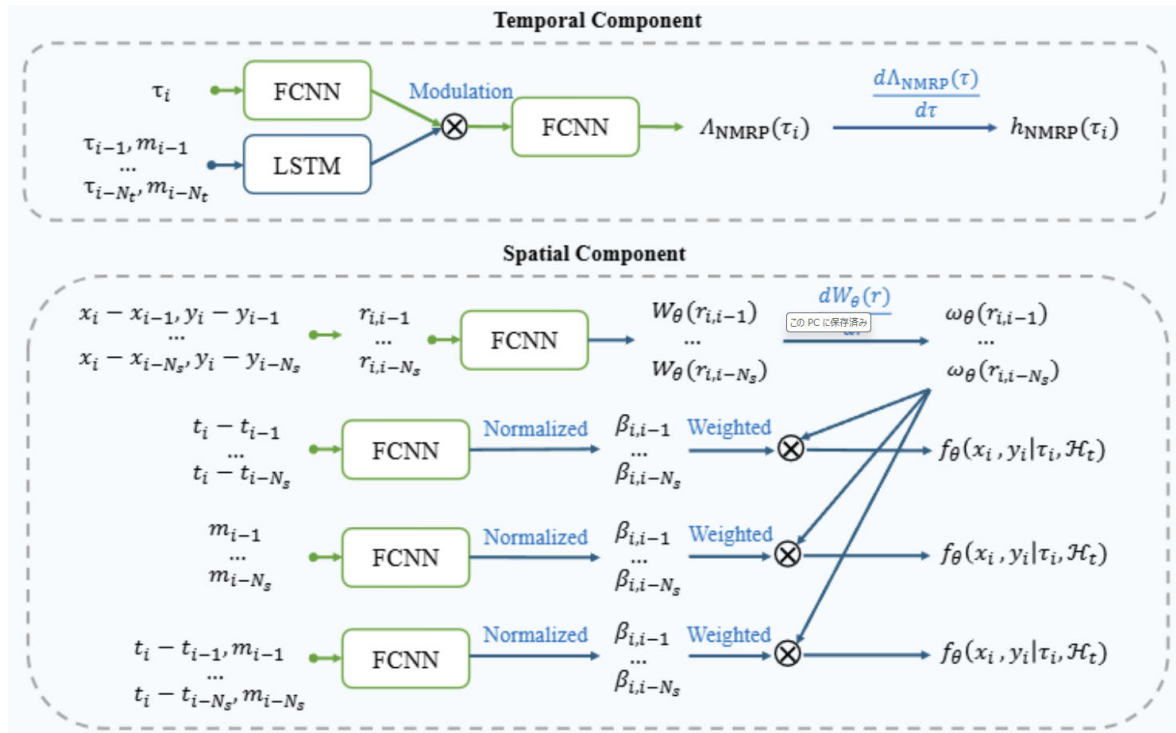


図 4. ST-NMRP の模式的構造。本モデルは二つの構成要素からなる。(1) 時間成分は NMRP の枠組みに基づいて時間ハザード関数をモデル化し、履歴的な時間情報の符号化には長短期記憶ネットワーク (LSTM) を用いる。(2) 空間成分は、過去の地震データに基づく三種類の重み付け戦略を組み込んだ全結合型ニューラルネットワーク (FCNN) により、空間確率密度関数 (PDF) をモデル化する。これらの重み付け戦略は、地震間時間、マグニチュード、およびそれらの統合に基づくものであり、それぞれ ST-NMRPT、ST-NMRPM、ST-NMRPJ モデルとして実装されている。

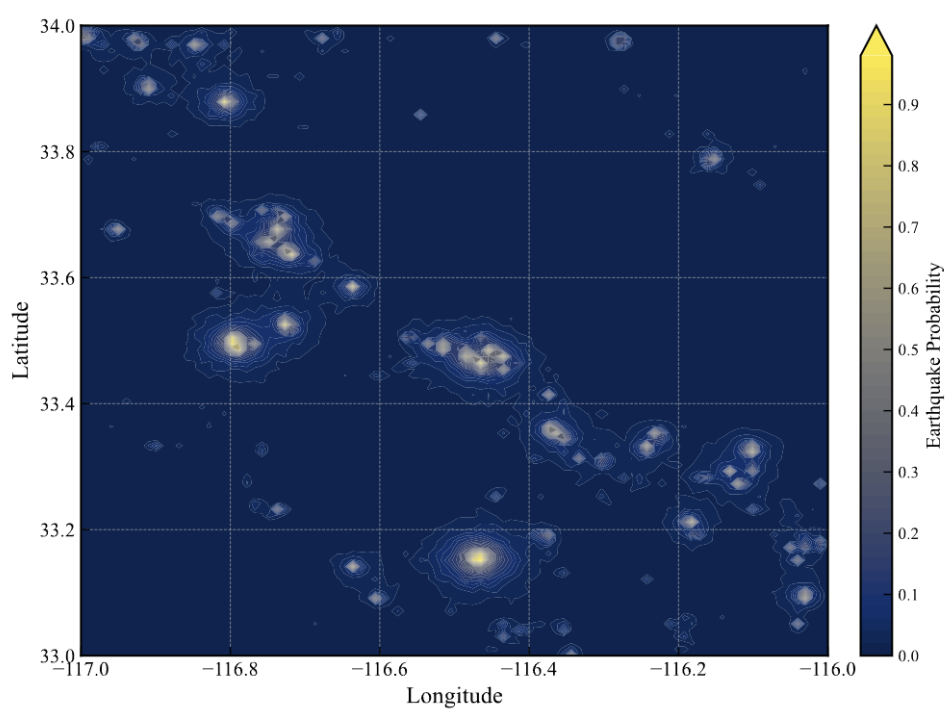


図 5. SanJac 地域における今後 30 日間の地震発生確率の空間分布。1000 個のシミュレーションカタログに基づいて推定した。カラーバーは、各グリッドセルにおいてマグニチュード 1 以上の地震が少なくとも 1 回発生する確率を示す。

b) 深度学习モデルを用いたクラスター内マグニチュード依存性の検証

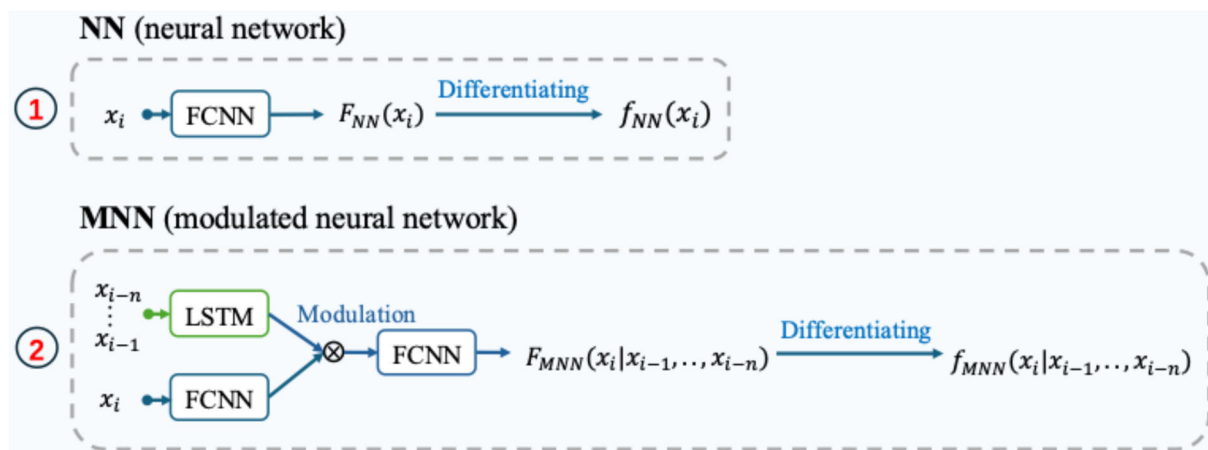


図 6. 地震規模の確率密度関数 (magnitude PDF) を推定するための履歴非依存モデル (NN) と履歴依存モデル (MNN) の構造。上段 (NN) では、入力 x_i (地震規模) を全結合ニューラルネットワーク (FCNN) により累積分布関数 $F_{NN}(x_i)$ として推定し、その微分により確率密度関数 $f_{NN}(x_i)$ を得る。下段 (MNN) では、過去の規模履歴 (x_{i-1}, \dots, x_{i-n}) を LSTM により符号化し、その情報で FCNN の出力を変調することで、条件付き累積分布関数 $F_{MNN}(x_i | x_{i-1}, \dots, x_{i-n})$ を推定する。さらに微分により条

件付き確率密度関数 $f_{MNN}(x_i | x_{i-1}, \dots, x_{i-n})$ を得る。この枠組みにより、過去の地震規模が現在の規模分布に与える影響を評価できる。

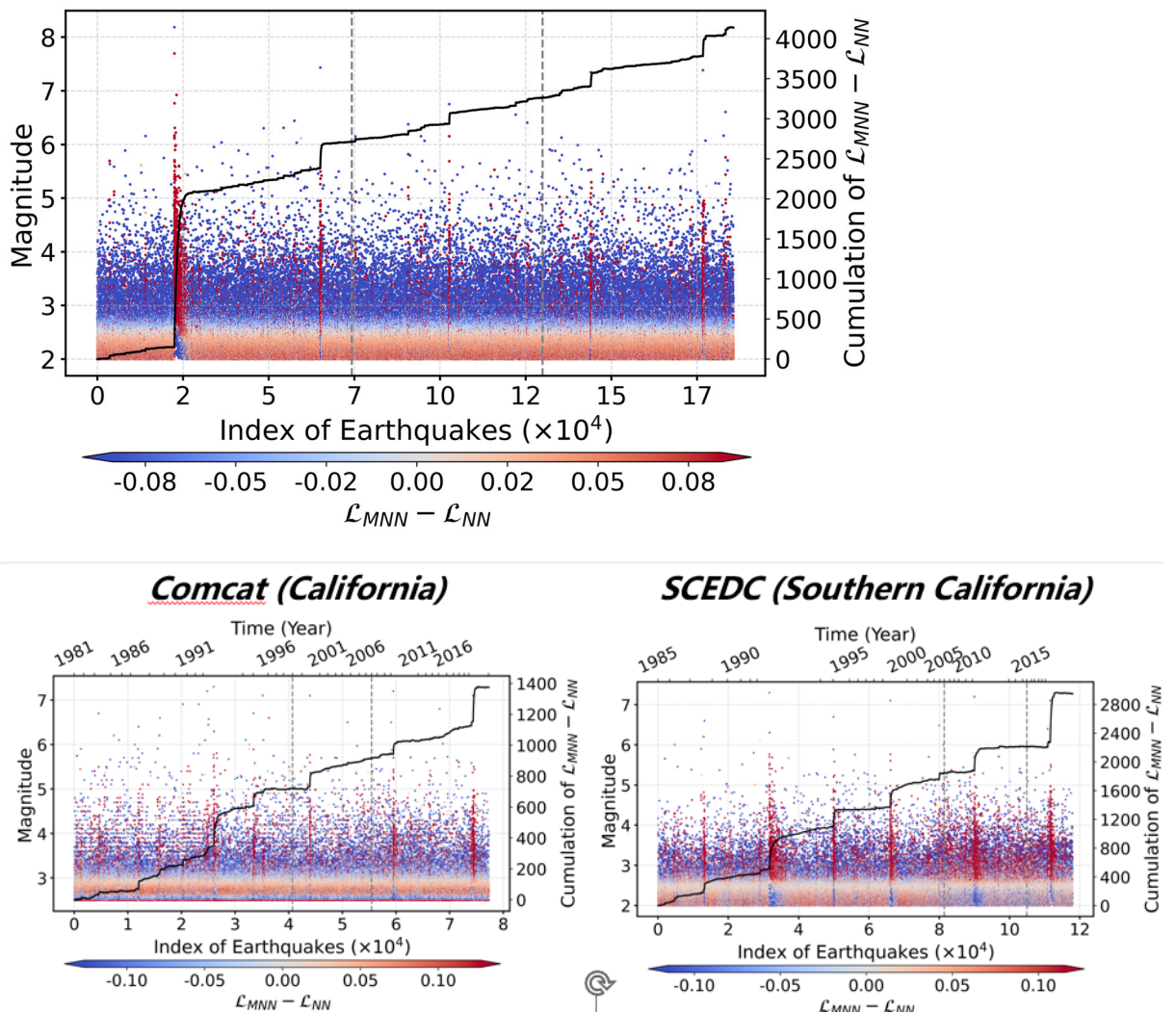


図 7. 5つの地震カタログにおける性能比較。(上)は独立なマグニチュードを持つ不完全な合成カタログ、(左下)および(右下)は実データ(ComCatおよびSCEDC)を示す。横軸はイベント番号(下軸)、実データでは上軸に発生時刻も併記している。データは訓練・検証・テストに分割され、灰色破線はその境界を示す。各点は個々の地震を表し、色はMNNがNNに対して得たイベントごとの対数尤度利得を示す。黒実線はその累積値である。

本研究は、地震規模の時間依存性という古典的かつ未解決の問題に対し、従来とは異なる視点から再検討を試みたものである。従来の多くの研究では、ニューラルネットワークを含む高性能モデルは「予測性能の向上」を指標として評価されることが多く、その内部で何が学習されているかについては十分に検討されてこなかった。本研究ではこの点に着目し、ニューラルネットワークを単なるブラックボックスとして扱うのではなく、その出力の構造、特にイベントごとの対数尤度の差分に踏み込んで解

析することで、モデルがどのような情報を利用しているのかを明示的に検証した。

そのために導入したのが、履歴依存型モデル (MNN) と履歴非依存型モデル (NN) の比較に基づくイベント単位情報利得 (PEIG) である。これは単なる平均的な性能差ではなく、個々の地震イベントにおいて履歴情報がどの程度予測に寄与しているかを可視化する指標であり、ニューラルネットワークの「どこで・なぜ」性能が向上しているのかを直接的に示す。本研究の第一の特徴は、このようにしてニューラルネットワークの内部挙動を解析対象とし、従来見過ごされがちであった出力の微細構造を物理的解釈の文脈に引き戻した点にある。

この枠組みを用いて合成データおよび実地震カタログを解析した結果、興味深いことに、ニューラルネットワークが捉えている「依存性」の多くは、実際の物理的相関ではなく、短期余震不完全性 (STAI) や小地震の欠測といった観測バイアスに起因するものであることが明らかとなった。すなわち、モデル性能の向上は必ずしも新たな物理的知見を意味するものではなく、データの不完全性に対する適応である場合がある。このことは、深層学習モデルの解釈に対して重要な警鐘を与えるものであると同時に、その挙動を詳細に解析することで、逆に観測バイアスの構造を診断できる可能性を示唆している。

さらに本研究は、深層ニューラルネットワーク (DNN) が単なる予測ツールにとどまらず、物理仮説の検証手段としても有効であることを示した点に意義がある。従来、物理モデルの検証は解析的または統計的手法に依存することが多かったが、本研究では「履歴を与えた場合に予測性能が本質的に向上するか」という観点から、地震規模の独立性仮定を直接的に検証した。その結果、観測バイアスを適切に考慮すれば、地震規模およびその差分には有意な時間依存性は認められず、Gutenberg-Richter 則および ETAS モデルにおける規模独立性の仮定が依然として妥当であることが確認された。

以上より、本研究は、ニューラルネットワークの「解釈可能性」を一步進め、モデル出力の構造そのものを科学的検証に利用する新たなアプローチを提示するとともに、深層学習を物理仮説検証の道具として活用する可能性を示したものである。これは、データ駆動型手法と物理的理解の橋渡しを行う一つの方向性を与えるものであり、今後の統計地震学および広く複雑系科学における方法論的發展に寄与することが期待される。

b) 引き続き異常現象の因果性の評価及び地震発生予測の検証

地震発生に先行して観測される非地震性の物理・化学的異常現象については、近年、複数の観測に基づく報告が蓄積されている。例えば、超低周波 (ULF) 帯の地磁気変動や大気中の一酸化炭素 (CO) 濃度異常は、地震に先行して生じうる現象として統計的な関連性が指摘されている (Han et al., 2014; Zhang et al., 2024)。しかしながら、これらの前兆現象は時空間的に一貫した挙動を示すとは限らず、地震予測への応用可能性の評価には体系的かつ統計的な検証が必要である。

本研究では、これら非地震性異常を外因的励起 (external excitation) として ETAS モデルに組み込んだ拡張モデル (ETAS+ULF+CO) を構築し、地震発生予測性能の定量的評価を行った。ULF データには柿岡観測所 (KAK) および鹿屋観測所 (KNY) の観測値を用い、全球擾乱の影響を補正した上で異常指標を定義した。また、CO データには NASA の MERRA-2 データセットを用い、MSSA により長周期成分を除去した後、統計的閾値に基づいて異常を抽出した。解析対象は 2001 年から 2010 年における KAK 周辺 100km 以内の $M_j \geq 4.0$ 、深さ 60km 未満の地震 218 件であり、同期間に ULF 異常 410 件、CO 異常 542 件が検出された。

提案モデルでは、異常発生時刻に基づくガウスカーネル型応答関数を導入し、外部励起の時間的影響を条件付き強度関数に組み込んだ。最大尤度推定によりモデルを適合させた結果、ULF および CO 異常を導入したモデルは、従来の ETAS モデルと比較して対数尤度および赤池情報量規準 (AIC) の双方において改善を示した。特に、時間依存 ETAS モデルにおいて背景地震と分類されていたイベントの一部が外部励起として再説明され、背景割合は 81% から 65.8% へと低下した。また、総情報利得は 10.246 の向上を示した。

さらに、時間をランダム化した異常データを用いた検証により、モデル性能の改善が過学習によるものではないことを確認した。これらの結果は、個々の前兆信号の有意性は限定的であるものの、複数の異常指標を統合することで短期地震予測の性能向上に寄与し得ることを示している。

本研究成果は、非地震性前兆情報を統計的地震発生モデルに統合する枠組みとして整理され、査読付き論文として Geophysical Research Letters (GRL) に掲載された。以上より、複数の外部励起要因を組み込んだ統計モデルは、非定常地震活動の理解および短期予測精度の向上に向けた有効な手法となる可能性が示された。本研究は、Geophysical Research Letters 誌 (IF: 4.6、2024 年) に掲載された。

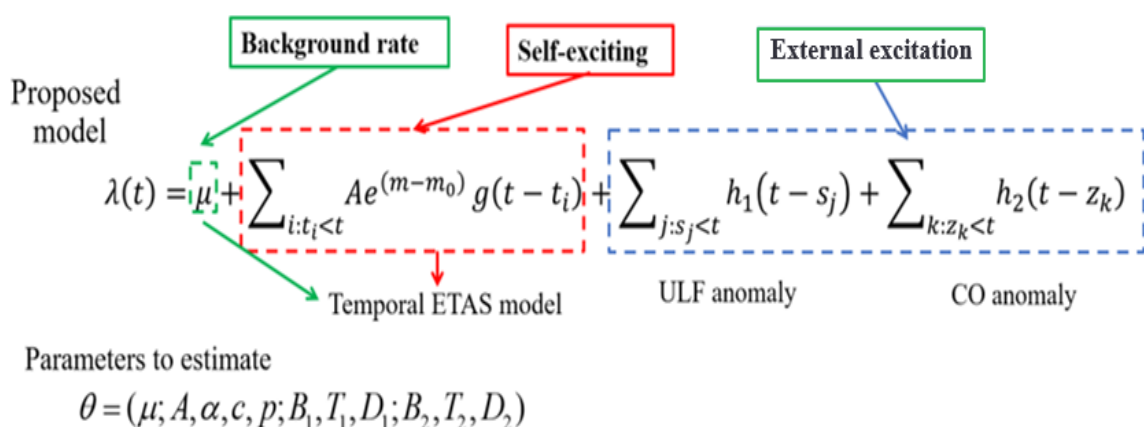


図 8. 新しいモデルの条件付き強度関数の定式化

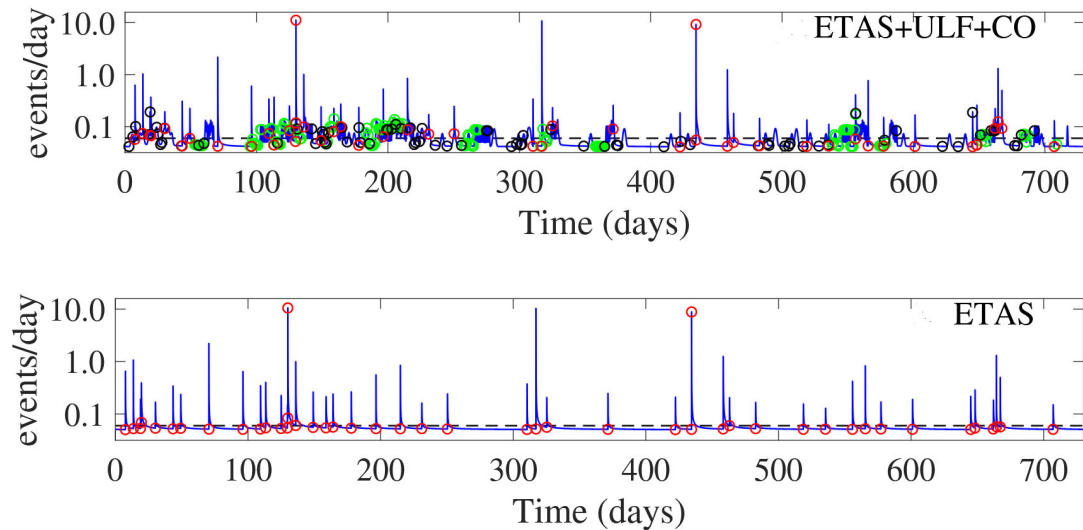


図 9. 新しいモデル（上段）および標準的 ETAS モデル（下段）をデータに適合させて得られた部分条件付き強度（期間：2003 年初め～2004 年末）。横軸は 2003 年 1 月 1 日からの日数を示す。

引用文献

- Cattania, C, SHainzl, LWang, BEnescu, and FRoth (2015), Aftershock triggering by postseismic stresses: A study based on Coulomb rate-and-state models. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 120, 2388-2407. doi: 10.1002/2014JB011500.
- Han, P., Hattori, K., Zhuang, J., Chen, C.-H., Liu, J.-Y., & Yoshida, S. (2017). Evaluation of ULF seismo-magnetic phenomena in Kakioka, Japan by using Molchan's error diagram. *Geophysical Journal International*, 208(1), 482-490. doi: 10.1093/gji/ggw404
- Ogata, Y. Space-Time Point-Process Models for Earthquake Occurrences. *Annals of the Institute of Statistical Mathematics* 50, 379-402 (1998). <https://doi.org/10.1023/A:1003403601725>
- Zhang Y., Zhuang J., Zhu K., Han P., Chen H., Zhan C., Li W., Niu Y. (2025) Incorporating non-seismicity precursors into earthquake probabilistic forecasting model. *Geophysical Research Letter*. 52:e2025GL117972. doi:10.1029/2025GL117972
- Zhan C., Zhuang J., Wu S. (2025) Flexible seismicity modeling with neural modulated renewal processes. *Earth's Future*, in press. DOI: 10.1029/2025EF007342.

(c) 結論ならびに今後の課題

1) A-1 高次元 ETAS モデル

深さおよび震源メカニズムを組み込んだ高次元 ETAS モデルと、ガウス過程に基づく GP-ETAS モデルを構築・適用し、地震発生過程の記述および予測性能の向上を確認

した。特に、背景地震活動の非定常性を柔軟に捉えることで、短期余震不完全性 (STAI) や小地震欠測に対して一定のロバスト性を有することが示された。また、情報理論の枠組みにより地震予測可能性を再定義し、時間・空間構造に由来する予測可能性と、マグニチュードに関する独立性とを明確に区別した。今後の課題としては、他地域への適用による汎用性の検証、リアルタイム予測に向けた計算効率の向上、ならびに短期的欠測補完手法の精度評価が挙げられる。

2) A-2 背景地震活動と背景応力場の推定

地震活動のクラスター構造に非等方性を導入した時空間モデルの構築・評価を行い、従来の等方モデルに比べてデータ適合度の向上が確認された。特に、非等方パラメータを個別ではなく共通とする設定が、小領域の余震・群発地震データに対して安定かつ有効であることが示された。また、非等方カーネルを導入した ETAS モデルと Dieterich モデルの混合モデルにより、多くの事例において統計的に有意な改善が得られ、時空間分布の記述精度が向上した。一方で、混合モデルによる改善は全体的な適合度の向上として現れる傾向があり、その要因の詳細な解釈には一定の課題が残されている。今後は、非等方性の物理的背景に関する検討、モデルの簡素化および解釈性の向上、ならびに多様な事例への適用を通じた汎用性の検証を進める必要がある。

3) A-4 異常現象の因果性の評価と外部変数入力

本研究では、時空間ニューラル更新過程 (ST-NMRP) および非地震性異常を組み込んだ拡張 ETAS モデルを構築・適用し、地震活動の記述および予測に関する新たな枠組みを提示した。ST-NMRP により、従来の ETAS モデルでは表現が困難であった非定常かつ複雑な時空間依存構造を柔軟に捉えられることが確認され、対数尤度の観点から既存モデルに対する性能向上が示された。また、ULF 地磁気変動および CO 濃度異常を外部励起として統合したモデルにより、予測性能の改善および背景地震の再解釈が可能であることが示された。さらに、ニューラルネットワークの出力構造の解析を通じて、性能向上の一部が観測バイアスに起因する可能性を明らかにし、深層学習を物理仮説検証に活用する有効性を示した。今後は、計算効率の向上およびモデルの適用範囲の拡張に加え、地震カタログにおける人工的な問題を修正するために AI を活用し、さらに異常のビッグデータセットから前兆情報を探るためにも AI を活用すべきである。

(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 47 件、うち海外計 20 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
大地震直後からの余震による高周波エネルギー輻射量推移の過去統計（口頭発表）	澤崎 郁	ISM STAR-E 2025年度研究集会，統計数理研究所	2026年3月16日	国内	
非定常ETASモデルによる地震活動理解：仮定・推定・解釈上の注意（口頭発表）	熊澤 貴雄	ISM STAR-E 2025年度研究集会，統計数理研究所	2026年3月17日	国内	
Estimating Inhomogeneous Spatio-Temporal Background Intensity Functions using Graphical Dirichlet Processes（口頭発表）	Bañales Isaias Manuel Ramirez	ISM STAR-E 2025年度研究集会，統計数理研究所	2026年3月17日	国内	
Development and Applications of the Spatiotemporal GP-ETAS Model（口頭発表）	牛 源源	ISM STAR-E 2025年度研究集会，統計数理研究所	2026年3月17日	国内	○
ETASモデルと摩擦構成則地震活動モデルの混合モデルの時空間への拡張（口頭発表）	岩田 貴樹	ISM STAR-E 2025年度研究集会，統計数理研究所	2026年3月17日	国内	
長期から即時に至る時空間地震予測とモニタリング：成果と展望（口頭発表）	庄 建倉	ISM STAR-E 2025年度研究集会，統計数理研究所	2026年3月17日	国内	○
Residual analysis	Zhuang Jiancang	2026 ISI-ISM-	2026年2	国外	

in point process and state space modelling (口頭発表)		ISSAS Joint Conference, 台北, 台湾	月9日		
Spatio-temporal background seismicity modeled using Gaussian processes (ポスター発表)	Niu Yuanyuan, Zhuang Jiancang	AGU25 Annual Meeting, New Orleans, U. S. A.	2025年 12月15日	国外	
Seismogenesis from the Finite Elastic Deformation of Geometric Asperities (ポスター発表)	Tsai Victor C., Aso Naofumi, Hirth Greg, Lee Jaeseok	AGU25 Annual Meeting, New Orleans, U. S. A.	2025年 12月16日	国外	
Spatiotemporal Distribution of Volcanic Earthquakes off Izu Oshima (ポスター発表)	Arakawa Hinako, Aso, Naofumi	AGU25 Annual Meeting, New Orleans, U. S. A.	2025年 12月18日	国外	
A General Framework for Residual Analysis (口頭発表)	Zhuang Jiancang	Mathematics of Risk-2025,メルボルン, オーストラリア	2025年 11月13日	国外	
Earthquake predictability and probability forecast (口頭発表)	Zhuang Jiancang	12th ACES International Workshop, 台北, 台湾	2025年 11月6日	国外	○
An extension of the non-stationary ETAS model to the space-time modeling (ポスター発表)	Iwata Takaki	12th ACES International Workshop, 台北, 台湾	2025年 11月5日	国外	
Gaussian process modeling of time-dependent	牛源源, 庄建倉, Petrillo Giuseppe	日本地震学会 2025年度秋季大会, 福岡	2025年 10月20日	国内	

background seismicity (口頭発表)					
2025年トカラ列島近海における群発地震活動の時空間発展 (口頭発表)	加藤 愛太郎, 八木原 寛, 平野 舟一郎, 中尾 茂, 酒井 慎一	日本地震学会 2025年度秋季大会, 福岡	2025年 10月21日	国内	
断層パラメタの直感的理解のためのビーチボール立体模型の開発 (ポスター発表)	麻生 尚文, 伊倉 真論, 日下部 秀太	日本地震学会 2025年度秋季大会, 福岡	2025年 10月20日	国内	
2023年の伊豆大島北部における火山性地震の時空間分布 (口頭発表)	荒川 日南子, 麻生 尚文	日本地震学会 2025年度秋季大会, 福岡	2025年 10月22日	国内	
後続破壊のP波を用いたマグニチュード即時推定の試み (ポスター発表)	小寺 祐貴	日本地震学会 2025年度秋季大会, 福岡	2025年 10月21日	国内	
松代地震から判ること (招待講演)	松浦 律子	日本地震学会 2025年度秋季大会, 福岡	2025年 10月21日	国内	
気象庁の地震火山業務における先端AI活用とその課題 (口頭発表)	溜瀨 功史	2025年度統計関連学会連合大会, 大阪	2025年9月10日	国内	
On the Development of the ETAS Model in Seismicity Modeling (招待講演)	Zhuang Jiancang	The 3rd Joint Conference on Statistics and Data Science in China (2025 JCSDS), 杭州, 中国	2025年7月13日	国外	○
Investigating aseismic drivers of swarm-like seismicity (招待講演)	Petrillo Giuseppe	The 3rd Joint Conference on Statistics and Data Science in China (2025	2025年7月13日	国外	

		JCSDS)			
Bayesian inference of spatiotemporal Hawkes processes (招待講演)	Niu Yuanyuan	The 3rd Joint Conference on Statistics and Data Science in China (2025 JCSDS)	2025年7月13日	国外	
Quantifying Earthquake Predictability and Advancing Forecasting (招待ポスター)	Zhuang Jiancang	海城地震50周年記念国際シンポジウム, 瀋陽, 中国	2025年7月10日	国外	
Deciphering Early Aftershock Behaviors Following Moderate-size Earthquakes in the Cahuilla swarm (招待講演)	Peng Zhigang, Ding Changchang, Si Xu, Zhuang Jiancang	海城地震50周年記念国際シンポジウム, 瀋陽, 中国	2025年7月9日	国外	
Earthquake Modeling Incorporating Physical Observations (ポスター発表)	Chen Hongyan, Wang Rui, Zhuang Jiancang, Huang Qinghua, Hattori Katsumi, Han Peng	海城地震50周年記念国際シンポジウム, 瀋陽, 中国	2025年7月10日	国外	
Flexible Seismicity Modeling With Modulated Neural Renewal Processes (口頭発表)	Zhan Chengxiang, Zhuang Jiancang, Wu Stephen	海城地震50周年記念国際シンポジウム, 瀋陽, 中国	2025年7月9日	国外	○
Incorporating Non-Seismic Precursors into Earthquake Forecasting Models (ポスター発表)	Zhang Yiqun, Zhuang Jiancang, Han Peng and Zhu Kaiguan	海城地震50周年記念国際シンポジウム, 瀋陽, 中国	2025年7月10日	国外	○
Stalking Impending Mainshocks with Sawtooth Envelopes (口頭発表)	Petrillo Giuseppe., Lippiello Eugenio, DalZilio, L. and Godano, C.	海城地震50周年記念国際シンポジウム, 瀋陽, 中国	2025年7月10日	国外	

情報理論に基づく地震予測可能性の定量化（口頭発表）	庄 建倉	日本地球惑星科学連合 (JpGU)2025年大会，幕張	2025年5月30日	国内	
Gaussian Process Model for Spatio-temporal Background Seismicity（口頭発表）	牛 源源，庄 建倉	日本地球惑星科学連合 (JpGU)2025年大会，幕張	2025年5月26日	国内	○
Stress-informed ETAS model and its application to reservoir earthquakes（招待講演）	韓 鵬，Wang Rui， Miao Miao，Zhao Cuiping，Lu Renqi， Lei Hongfu ，Yao Mendi，庄 建倉， Huang Qinghua，服部克巳	日本地球惑星科学連合 (JpGU)2025年大会，幕張	2025年5月25日	国内	
Integrating Seismo-Magnetic Anomalies and the ETAS Model（口頭発表）	李 文超，服部 克巳， 吉野 千恵，庄 建倉	日本地球惑星科学連合 (JpGU)2025年大会，幕張	2025年5月25日	国内	
非定常化された時空間ETASモデル（ポスター発表）	岩田 貴樹	日本地球惑星科学連合 (JpGU)2025年大会，幕張	2025年5月28日	国内	
Characteristics of seismicity before and after the 2023 Turkey earthquakes（ポスター発表）	楠城 一嘉，熊澤 貴雄，井筒 潤，堀 高峰，長尾 年恭，尾池 和夫	日本地球惑星科学連合 (JpGU)2025年大会，幕張	2025年5月28日	国内	
Time-dependent activity of LFE and ordinary earthquakes in Izu Peninsula（口頭発表）	楠城 一嘉，行竹 洋平，熊澤 貴雄	日本地球惑星科学連合 (JpGU)2025年大会，幕張	2025年5月28日	国内	
Global investigation of foreshock acceleration prior	小山 凱，西川 友章， 西村 卓也	日本地球惑星科学連合 (JpGU)2025年大会，幕張	2025年5月27日	国内	

to large earthquakes (口頭発表)					
複数のGNSS測位解を用いた2014-2016年紀伊水道スロースリップイベントの時空間発展 (ポスター発表)	岡田 望海, 三井 雄太, 加藤 愛太郎	日本地球惑星科学連合 (JpGU) 2025年大会, 幕張	2025年5月26日	国内	
伊豆大島近海の浅部における火山性地震に見られる線状構造 (口頭発表)	荒川 日南子, 麻生 尚文	日本地球惑星科学連合 (JpGU) 2025年大会, 幕張	2025年5月29日	国内	
再帰型ニューラルネットワークを用いたb値推定 (口頭発表)	麻生 尚文	日本地球惑星科学連合 (JpGU) 2025年大会, 幕張	2025年5月26日	国内	
Strain rate field estimation in Southeastern Europe (ポスター発表)	上田 拓, Socquet Anne, Métois Marianne, 岡崎 智久, 西村 卓也	日本地球惑星科学連合 (JpGU) 2025年大会, 幕張	2025年5月28日	国内	
Anomaly Detection Using a Probabilistic Model for Tectonic Tremors (口頭発表)	矢野 誠也, 井出 哲, 野村 俊一	日本地球惑星科学連合 (JpGU) 2025年大会, 幕張	2025年5月28日	国内	
よりロバストなP波PLUM法の検討 (ポスター発表)	小寺 祐貴	日本地球惑星科学連合 (JpGU) 2025年大会, 幕張	2025年5月29日	国内	
新しい日本および周辺の歴史地震・被害地震カタログについて (口頭発表)	松浦 律子, 加納 靖之	日本地球惑星科学連合 (JpGU) 2025年大会, 幕張	2025年5月26日	国内	
Quantifying Earthquake Predictability and Advancing Forecasting (招待講	Zhuang Jiancang	EGU General Assembly 2025, ウィーン, オーストリア	2025年4月29日	国外	

演)					
Evaluating Earthquake Forecast with Likelihood-Based Scores (口頭発表)	Zhuang Jiancang	EGU General Assembly 2025, ウィーン, オーストリア	2025年5月2日	国外	
Non-stationary GP-ETAS model (ポスター発表)	Niu Yuanyuan, Zhuang Jiancang	EGU General Assembly 2025, ウィーン, オーストリア	2025年4月30日	国外	○

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載 : 計 11 件、うち海外計 11 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
Yearly-scale deep crustal fluid transfer implied by gravity changes from in-situ observations around the 2021 Yangbi MS6.4 earthquake, China	Wang, L.; Chen, S.; Zhuang, J.; Liu, Y.; Jia, L.; Han, J.; Zhang, B.; Li, Y.	Tectonophysics	2026年03月04日	海外	
A Full Space-Time-Magnitude Extreme-Event Distribution for an ETAS Cluster	Petrillo, G.; Spassiani, I.; Zhuang, J.	Seismological Research Letters	2026年03月03日	海外	○
NESTORE algorithm: a machine learning approach for strong aftershock forecasting	Gentili, S.; Brondi, P.; Chiappetta, G.D.; Petrillo, G.; Zhuang, J.; Anyfadi, E.-A.; Vallianatos, F.; Caravella, L.; Magrin, E.; Comelli, P.; Di Giovambattista,	Bulletin of Geophysics and Oceanography	2026年02月13日	海外	

	R.				
Exploring tidal modulation of seismicity in Southern California	Lu, W. ; Xue, L. ; Yue, H. ; Zhuang, J. ; Zhao, L.	JGR: Solid Earth	2025年12月21日	海外	
Incorporating non-seismicity precursors into earthquake probabilistic forecasting model	Zhang, Y. ; Han, P. ; Chen, H. ; Zhan, C. ; Niu, Y. ; Zhuang, J. ; Zhu, K.	Geophysical Research Letters	2025年12月16日	海外	○
Statistical characteristics of seismicity correlated with crustal fluids in the Noto Region	Guo, Y. ; Zhuang, J. ; Yin, G. ; Zhang, H.	JGR: Solid Earth	2025年09月17日	海外	
Modeling Seismic Intensity Envelopes for Earthquake Early Warning Applications	Peng, H. ; Yamada, M. ; Wu, S.	BSSA	2025年08月14日	海外	
Identification of Higher-mode Numbers in Dispersion Curves for Rayleigh Wave Inversion	Yang, X.H. ; Han, P. ; Zhuang, J. ; Zhou, Y. ; Bai, G. ; Li, R.	IEEE TGRS	2025年07月14日	海外	
Revisiting seismicity criticality	Li, J. ; Sornette, D. ; Wu, Z. ; Zhuang, J. ; Jiang, C.	JGR: Solid Earth	2025年06月18日	海外	
Bi-segment fault rupture and long-lasting intraslab aftershock activity during the 2017 Mw 8.2 Tehuantepec, Mexico earthquake	Chen, F. ; Wang, D. ; Xu, S. ; Yan, B. ; Zhang, J. ; Guo, Y. ; Yao, D. ; Zhuang, J. ; Suárez, G. ; Shearer, P.	JGR: Solid Earth	2025年06月15日	海外	
The Influence of Stress Release on the Spatial and Magnitude	Petrillo, G. ; Lippiello, E. ; Zhuang, J. ;	Geophysical Journal International	2025年06月09日	海外	

Distribution of Subsequent Earthquakes	Marzocchi, W.				
--	---------------	--	--	--	--

(e) 特許出願、ソフトウェア開発、使用・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. 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-2 欠損データの補完

B-3：ETAS による短期・リアルタイム予測と可視化

B-4. ETAS モデルからの乖離の異常と中期予測システムの構築

B-5. 前震と b 値

B-6：ハイブリッド型予測モデルの構築

(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 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。

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、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・ 特任教授(名誉教授)	尾形 良彦	R7. 4. 1 ～ R8. 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 特任教授	楠城 一嘉	R7. 4. 1 ～ R8. 3. 31	1,000,000 円	300,000 円

(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 [実施業務の要約]

統計数理研究所が所有する「可視化装置ワークステーション」の撤去により、空間的予測や評価が実施不可能になって、やむなく、研究室ワークステーション取得済みのデータを用いて、時間領域に限定して、日本内陸部の短期予測とその評価を行うこととした。また本震直後の余震データの欠測という深刻な問題の統計的克服などに取り組み、今回の成果を次年度の時空間 ETAS モデルに関する計画に繋げることとした。

4) 令和 6 年度 [実施業務の要約]

海域を含む全日本で運用されるオンライン短期予測および大規模地震の長期予測システムの実用化のため、可視化と情報共有が実現できる基盤を整備した。さらに、地震カタログが示す時空間における不均質性を定量的に評価し、その結果を元に小地震の情報も統合することで、下限マグニチュードが低い不均質なデータにも対応可能な階層的時空間 ETAS モデルの推定結果を補正する新たな計算法を提案した。この手法により、より精緻な精度解析が実現できるようになった。

5) 令和 7 年度 [実施業務の要約]

多項目確率予測式における確率利得を、階層時空間 ETAS (HIST-ETAS) モデルの背景強度関数および地震マグニチュードの頻度則に基づく地域性に基いて算出し、日本周辺の大地震に関する常時活動確率密度関数を提供する時空間プラットフォームを形成する。常時活動確率密度関数に対する、HIST-ETAS モデルの自励項の比率は、短期予測、さらに可能であれば中期予測におけるリスク増大係数を示し、その時空間的な可視化を実現する。この可視化機能は自動または半自動のオンライン・システムを通じて提供する。また現時点で利用可能な諸異常現象を探索し、それらの経験的リスク増大関数を構成し、時空間的な変化を可視化する。これを B-3 のプラットフォームに追加し組み込むことで、多項目確率予測式を活用した時空間的短期予測の精度向上を目指す。

(d) 令和 7 年度の業務の目的

1) B-3. ETAS による短期・リアルタイム予測と可視化

多項目確率予測式における確率利得を、階層時空間 ETAS (HIST-ETAS) モデルの背景強度関数および地震マグニチュードの頻度則に基づく地域性に基いて算出し、日本周辺の大地震に関する常時活動確率密度関数を提供する時空間プラットフォームを形成する。常時活動確率密度関数に対する、HIST-ETAS モデルの自励項の比率は、短期予測、さらに可能であれば中期予測におけるリスク増大係数 (Risk Enhancement Factors) を示し、その時空間的な可視化を実現する。この可視化機能は自動または半自動のオンラインシステムを通じて提供する。

2) B-6. ハイブリッド型予測モデルの構築

現時点で利用可能な諸異常現象を探索し、それらの経験的リスク増大関数を構成し、時空間的な変化を可視化する。これを B-3 のプラットフォームに追加し組み込むことで、多項目確率予測式を活用した時空間的短期予測の精度向上を目指す。

(2) 令和 7 年度の成果

(a) 業務の要約

- 1) B-3. 大地震発生 の 長期・中期・短期予測に関する、多項目確率予測式における確率利得密度関数を、階層時空間 ETAS (HIST-ETAS) モデルの背景強度関数および地震マグニチュードの頻度則に基づく地域性に基いて算出し、日本周辺の大地震に関する常時活動確率密度関数を提供する時空間プラットフォームを形成する。常時活動確率密度関数に対する、HIST-ETASモデルの自励項の比率は、短期予測の可視化機能は自動または半自動のオンライン・システムを通じて提供する。
- 2) B-6. そのうえで、余震活動の相対的静穏化、ゆっくりすべり事象、繰り返し地震などから中期予測における経験的リスク増大係数を示し、その時空間的な可視化を実現する。これらを HIST-ETASモデルの背景地震活動度を基準としたプラットフォームに追加し組み込むことで、多項目確率予測式を活用した時空間的短期予測の精度向上を目指す。

(b) 業務の成果

1) B-3: ETAS による短期・リアルタイム予測と可視化

震源データから「階層ベイズ型的時空間 Epidemic-Type Aftershock Sequence」(HIST-ETAS) モデル

$$\lambda(t, x, y | H_t) = \mu(x, y) + \frac{K_0(x_i, y_i)}{(t - t_i + c)^{p(x_i, y_i)}} \left[\frac{(x - x_i, y - y_i) S_j^{-1} (x - x_i, y - y_i)^t}{e^{\alpha(x_i, y_i)(M_i - M_0)}} + d \right]^{-q(x_i, y_i)}$$

を推定する。ここで、一定の大きさ以上の地震については、震央座標 (x_j, y_j) や分散行列 S_j は準リアルタイム (例えば 1 時間以内) で検出地震群から AIC で判定されるものであり、余震や群発地震の非等方性の短期空間予測を準リアルタイムで近似する。 $\mu(x, y)$ は時間経過に依存しない常時活動度であるが、これは地域的に数桁の違いで変化し、大地震の長期的予測に有用である。すなわち常時活動度の高い地域は、大地震の予測結果や歴史地震の多発域と調和的である。 $K_0(x, y)$ は短期確率予測に必須の余震生産性のパラメータである。この他にも HIST-ETAS モデルの主要パラメータは、地震活動パターンの地域的非一様性を表すために地震の位置に依存する。

大地震後には余震が継続して発生する。主要な余震の多くは数日以内に発生するだけでなく、本震直後の周辺地域では短期的大地震リスクが極めて高く、この期間の予測は重要である。HIST-ETAS モデルにより、短期的な誘発リスクの高まりを示す**リスク拡大関数**を算出し、余震発生の時空間分布を評価する。これらは図 10 のように地図上で可視化され、群発地震などの短期異常活動をリアルタイムで把握可能となった (尾形 2024 ; 楠城 2025)。さらに、Gutenberg-Richter (G-R) 則に基づき、大きな後続地震の危険拡大度を時空間的に表示できる。

また、余震や群発地震を常時的地震活動から強調表示するオンライン・モニタリングにより、余震域内および近傍における大地震の時空間リスク拡大関数を推定できる。加えて、Single Link Cluster 法により前震の候補群を抽出し、大地震発生の時空間確率密度および従属性マグニチュード（非 G-R 式）を定量的予測することで、時間・空間・マグニチュード分布の確率予測が可能となる見通しが得られた（Nomura and Ogata, 2023）。

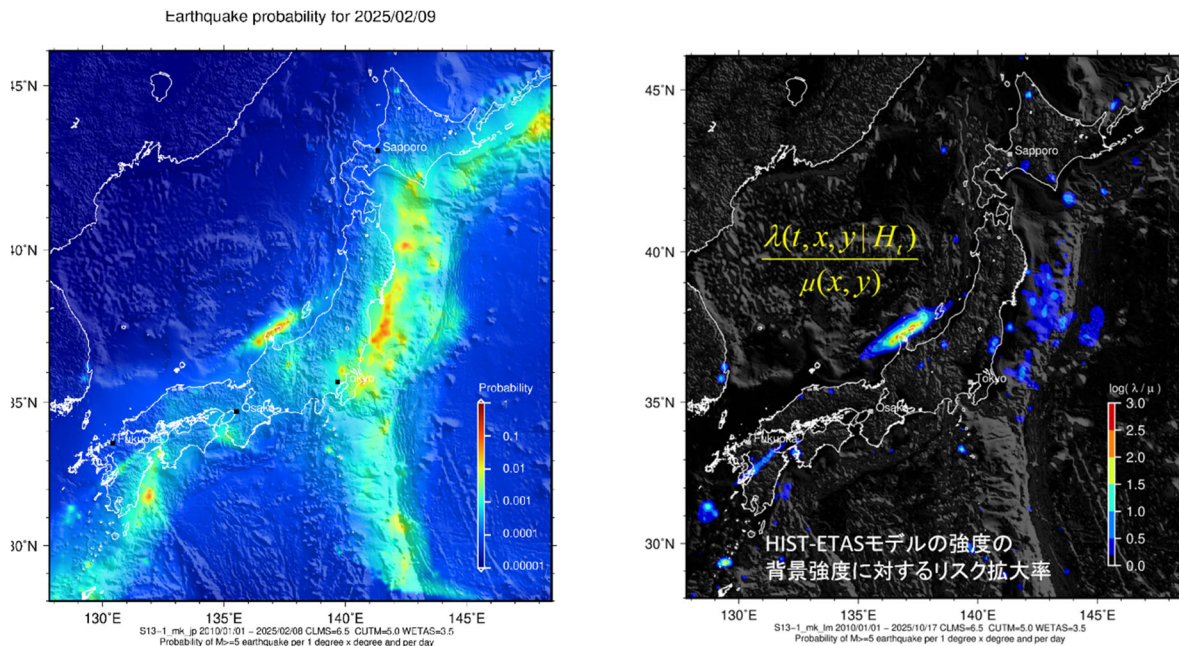


図 10. 地震活動度と確率利得密度関数（STPGD）の動画のひとコマ。左側パネルは HIST-ETAS モデルによる 2025 年 2 月 8 日の $M \geq 5$ 地震活動度（event/deg²/day）。右側パネルは同日の危険度拡大率。

2) 課題 B-6：ハイブリッド型予測モデルの構築

多項目予測式（Utsu 1977、Aki 1981）における常時確率は地域差を考慮して設定する必要がある。本研究では、下限マグニチュード M_c （例えば内陸域では $M_c = 4.0$ ）において最適な HIST-ETAS モデルを推定する。予測において「大地震」とは、あらかじめ設定したターゲット・マグニチュード閾値 M_T （例えば $M_T = 6$ ）を超える事象と定義し、その発生率の推定には G-R 則と一定の b 値を仮定する。

HIST-ETAS モデルにより推定された背景地震活動強度に基づき、異常現象が地域ごとの地震発生確率をどの程度増加させるかを定量的に評価することは極めて重要である。このため、本研究では Vere-Jones (1978) の Risk Enhancement Factor に相当する時空間確率利得密度関数（Spatio-Temporal Probability Gain Density; 以下 STPGD）を用いて拡張する。STPGD とはある条件情報（余震、静穏化、SSE、前震候補など）が与えられたとき、背景地震活動度に対して、大地震の発生確率が時空間的にどれだけ増減するかを表す密度関数である。言い換えると、「どこで」「いつ」「どの程度」平常時（背景）より危険が増しているかを、連続的に示す指標である。STPGD は、時空間変数の関数として多項目

モデル

$$\lambda(t, x, y | M_T; F_t^1, \dots, F_t^K) \approx \mu(x, y | M_T) \times \prod_{k=1}^K \frac{\lambda_k(t, x, y | M_T; F_t^k)}{\mu(x, y | M_T)}$$

で表現され可視化される。

長期予測

地震調査研究推進本部は、図 11 に示すように、内陸部で発生が想定される M7 クラス地震の予測を公表している。西村（2022）は、地殻歪蓄積率に基づく地震発生確率と HIST-ETAS モデルの背景地震活動度 $\mu(x, y)$ に基づく確率を比較した。前者は歪蓄積率に基づく確率分布が主要活断層の分布と良く対応する。一方、背景地震活動度 μ は過去約 140 年間の地震記録から推定される指標であり、地質学的時間尺度で M7 以上の大地震が想定される活断層との間に、図 11 に示されるように相補的であり、明瞭な正の相関は認められない。

M7 クラス以上の地震は、活断層規模に対応する特性的地震と考えられており、M6 クラス以上の予測には、背景地震活動度に加え、活断層の情報や歪の蓄積の考慮が重要である。この考え方にに基づき、活断層に付随するリスクも定量化する。これは、30 年間の発生確率を 1 日単位に換算し、対象となるマグニチュードとその不確実性を考慮して算出するものである。

したがって、長期 STPGD は

$$\frac{\lambda(t, x, y | M_T; F_t^{long})}{\mu(x, y | M_T)} \approx \frac{\mu(x, y | M_T) + \sum_{j: \text{Active Fault}} \lambda_j(x, y) \int_{M_c}^{\infty} \varphi(M | M_j, \sigma_j^2) dM}{\mu(x, y | M_T)}$$

で定義される。ここで、右辺の分子は図 11 の中央図に示した矩形 j 内の確率を 1 日単位に換算した値であり、 $\varphi(M | M_j, \sigma_j^2)$ は特性マグニチュード分布を示します。この活断層に関する STPGD は、背景活動度とは独立と仮定し、多項目予測確率式に組み込む。

特に、M7 クラスの要注意活断層地域（隠れ活断層を含めて）のように、第 1 図で可視化されている様に、常時活動度が低い地域で突然に地震活動が観測される場合、そこでの STPGD が高くなる可能性がある。このような状況はリアルタイム監視において特に重要であり、前震候補としての確率予測を積極的に試みる必要がある。

長期予測



予測にあたって、「大地震」とは、ターゲット・マグニチュード閾値 M_T (例えば $M_T=6$) を超える発生率の予測には

$$\lambda(t, x, y | M_T; H_i) = \lambda(t, x, y | M_c; H_i) \times 10^{b(M_T - M_c)}$$

の様に G-R 則と定数 b 値を仮定します。従って、背景地震活動度は

$$\mu(x, y | M_T) = \mu(x, y | M_c) \times 10^{-b(M_T - M_c)}$$

長期時空間確率利得

$$\frac{\lambda(t, x, y | M_T; F_i^{\text{long}})}{\mu(x, y | M_T)} \approx \frac{\mu(x, y | M_T) + \sum_{j: \text{Active Fault}} \lambda_j(x, y) \int_{M_i}^{\infty} \phi(M | M_j, \sigma_j^2) dM}{\mu(x, y | M_T)}$$

$\lambda_j(x, y)$ occurrence rate;
 $\phi(M | M_j, \sigma_j^2)$ characteristic magnitude density

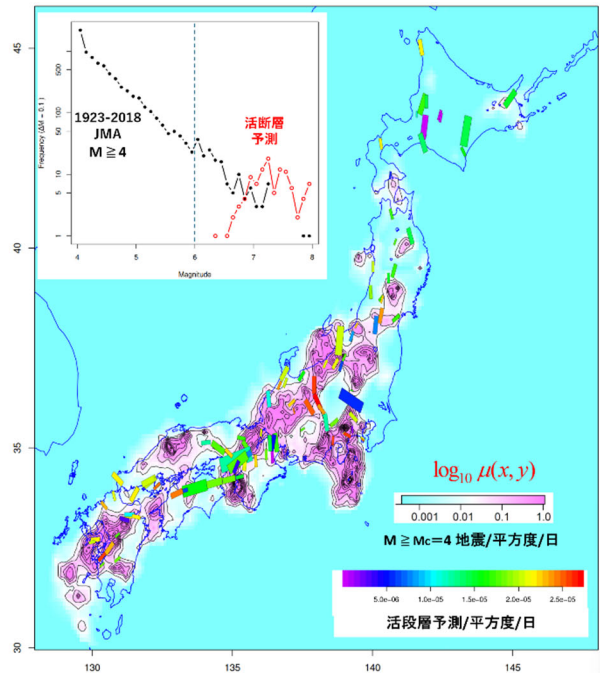


図 11. 内陸部の長期予測。地震調査研究推進本部は M7 クラスの直下型地震について 30 年発生確率を示している。一方、背景地震活動度 μ と活断層地震の危険度との間には明確な空間相関は認められない。従って長期予測では、広域については b 値を一定 (例えば 0.9) とし、活断層地震については特性マグニチュード分布を用いる。

中期予測

中期的地震前兆現象は、数週間から数年、場合によっては約 10 年前から出現し得るが、その時間的境界は不明確である。ゆっくりすべり事象 (SSE)、繰り返し地震、余震活動の相対的静穏期は、大地震に先行する応力蓄積・解放過程を反映する可能性が指摘されてきた。しかし、これらの現象が予測に与える定量的寄与は十分に解明されていない。その主因として、大地震事例の希少性、物理的解釈の非一意性、ならびに前向き検証に基づく統計的評価枠組みの不足が挙げられる。

本研究では、中期的予測の枠組みにおいて、これらの現象を条件情報として導入した場合に、大地震の条件付き発生確率が背景地震活動モデルに対してどのように変化するかを検討した。空間的ブートストラップおよび時間的シミュレーション手法を用い、東北日本沈み込み帯における SSE や繰り返し地震活動が予測性能をどの程度改善するかを検証するとともに、日本全国の相対的地震静穏期が断層状態の時間変化に関する補完的情報となるかを評価した。

余震活動の相対的静穏化

余震活動度の異常として静穏化現象を解析した。全国約 70 年間の地震データを用い、

余震列に対して下限マグニチュードを変えた変化点解析を行い、有意な変化を静穏化異常と定義した。その結果、静穏化異常は 37 例、異常なしは 39 例であった。これらを点過程の経験的パーム (Palm) 平均により解析したところ、静穏化異常を伴う場合、数年後地震源から約 2 度離れた周辺域を中心に、大地震発生率が数倍に増加することが示された。この時空間的リスク拡大をパーム関数としてモデル化し、多項目予測に組み込む。

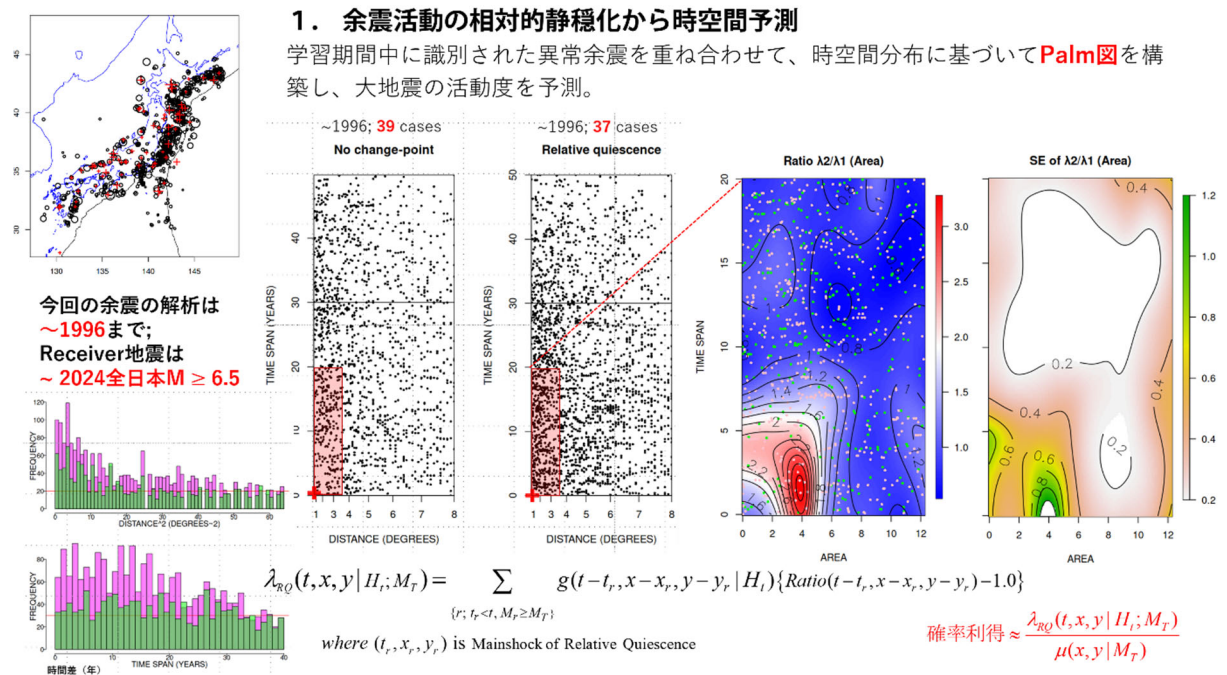


図 12. 相対的静穏化の有無による後続大地震の空間・時間分布。左上パネルは 対象とした余震系列の主震 (赤+) と後続の大地震 (○, $M \geq 6.5$, 1923~2024)。左下ヒストグラム頻度は、主震からの距離の円環面積 (deg²) に対する $M \geq 6.5$ 地震の重ね合わせ頻度 (上段) および経過時間当たりの発生数 (下段)。紫色ヒストグラム頻度は相対的静穏化ケース, 緑色ヒストグラム頻度は通常活動 (変化点なし) のケースを示す。中央の 2 パネルは識別された余震系列の主震 (赤+) から後続大地震までの時間差と距離の重ね合わせ分布で、左側が正常、右側が相対静穏化の Palm 点配置パネル。横軸の距離は円環面積に比例するよう距離二乗でスケールしている。右側の 2 パネルは中央 Palm 点配置ピンク域の密度比の平滑化 (左) と誤差 (右) で、色標と等高線の数字を重ね合わせ数で正規化すると STPGD が推定できる。

ゆっくりすべり

房総沖、東北沖、北海道東方沖を含む沈み込み帯において、過去 20~30 年間に観測されたスロースリップ事象 (SSE) データ (Okada and Nishimura, 2025) に基づき、大地震との時空間相関を解析した。本解析では、房総沖の SSE を除外し、除群化した大地震のみを抽出した時空間分布を用いた。結果を図 13 に示す。右側の二図は、SSE の位置を原点

(赤いプラス印)として大地震の分布を平行移動し、Palm 平滑化したものである。縦軸は時間（前後 20 年）、横軸は距離を表す。

その結果、SSE 発生後の大地震分布は一様なランダムではなく、原点（SSE）から約 3 度離れた領域で発生頻度が相対的に高まる傾向が確認された（図 13）。これは時空間的な偏りの存在を示しており、中期的モニタリングにおける確率的予測への適用可能性を示唆する。帰無仮説として、大地震データに対する空間ブートストラップおよび一様なランダム時間シミュレーションによって、SSE と $M \geq 6.5$ 地震が独立な時空間データを作成し比較すると、最大 STPGD は高々数倍と推察される。

また、同様の指標は、中規模の繰り返し地震（Igarashi 2020; 気象研究所 2014）を基準事象として用いた場合にも、概ね同様の結果が得られる。

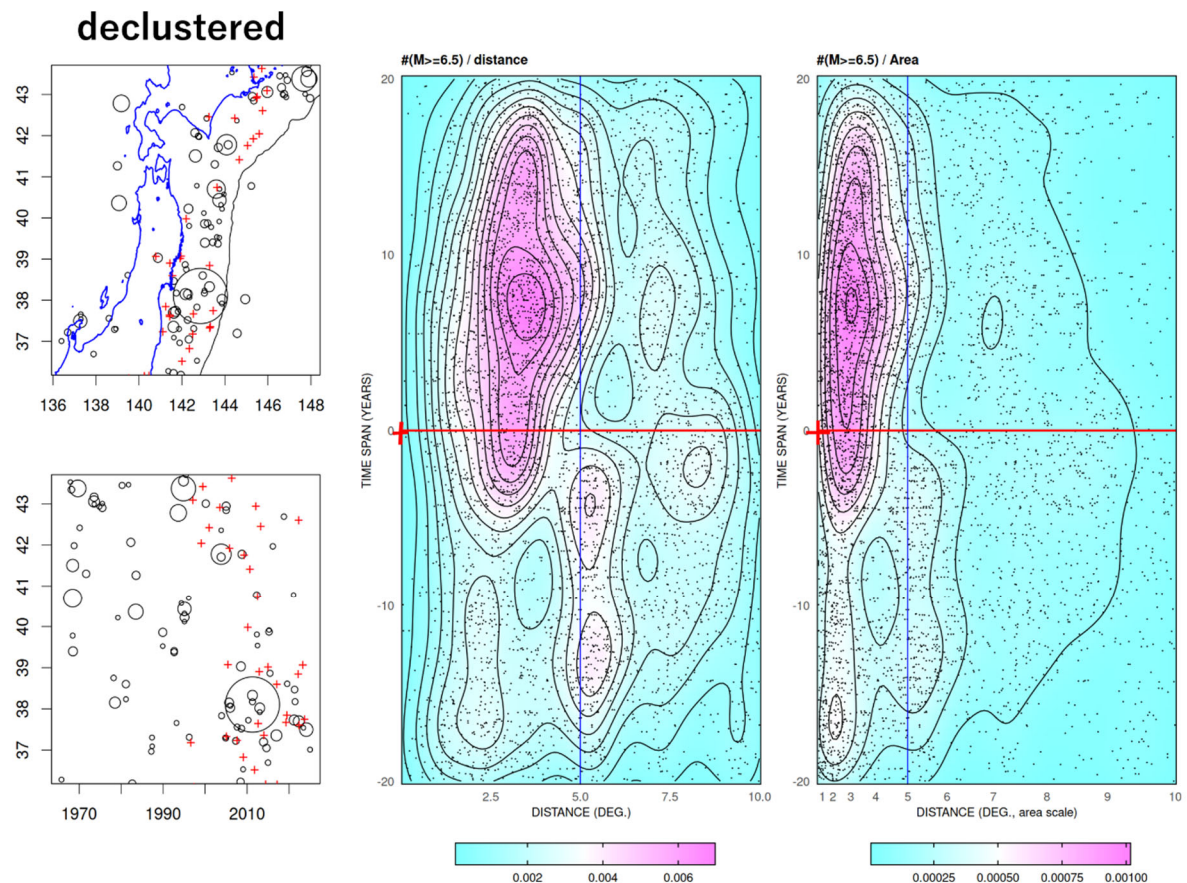


図 13. スロースリップ事象（SSE）と大地震の相関。左上パネルは、1996～2025 年に観測された SSE（赤い+）と、マグニチュード 6.5 以上の除群版地震（円）の空間分布を示す。左下パネルは、1965～2024 年における除群版地震（円）と SSE（赤い+）の緯度と経過日数の関係を示す。中央および右パネルは、SSE（赤い+）を基準とした $M \geq 6.5$ 地震との時間差（-20 ~ 20 年）および距離（10° まで）の重ね合わせ分布（Palm 点配置）と、その点密度の平滑化結果を示す。横軸は距離（中央）および、円環面積に比例するよう距離の二乗でスケールした距離（右）である。

引用文献

- Nomura, S. and Ogata, Y. (2023). Cluster-based foreshock discrimination model with flexible time horizon and mainshock magnitudes. *Progress in Earth and Planetary Science* 10, 20, <https://doi.org/10.1186/s40645-023-00548-0>.
- 尾形良彦 (2024) YouTube <https://www.youtube.com/@yosihikoogata784>
- 楠城一嘉 (2025) 日本周辺の地震活動の特徴 / Characteristics of seismicity in and around Japan, <https://shizuoka-earth.org/index.php/2023/02/28/japan/>
- Utsu, T. (1977) Probabilities in Earthquake Prediction, *J. Seismol. Soc. Japan*, 2nd Series, 30 (2) 179-185 doi: 10.4294/zisin1948.30.2_179
- Aki, K. (1981) A probabilistic synthesis of precursory phenomena, *Earthquake Prediction* (eds. D. W. Simpson and P. G. Richards), Maurice Ewing Series, 4, 566-574, AGU, Washington, DC, 566-574.
- Vere-Jones, D. (1978). Earthquake prediction - A statistician's view, *J. Phys. Earth.* 26, 129-146.
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jpe1952/26/2/26_2_129/_pdf
- 西村卓也 (2022) 測地データを用いた地殻内地震の長期予測, 第3回内陸で発生する地震の調査観測に関する検討ワーキンググループ、調査推進本部
<https://www.jishin.go.jp/main/seisaku/hokoku23o/nk2-4.pdf>
- Okada Y and T Nishimura (2025) Investigation on short-term slow slip events in the northeast Japan subduction zones using decadal GNSS data, *Earth, Planets and Space*, 77 (45) <https://link.springer.com/article/10.1186/s40623-025-02175-z>
- Igarashi, T. (2020) Catalog of small repeating earthquakes for the Japanese Islands, *Earth Planet Space* 72, 1-8, <https://link.springer.com/article/10.1186/s40623-020-01205-2>
- 気象研究所 (2014) 日本各地域の繰り返し相似地震発生状況に関する研究, 気象研究所技術報告, 72 https://www.mri-jma.go.jp/Publish/Technical/DATA/VOL_72/index.html
DOI : 10.11483/mritechrepo.72

(c) 結論ならびに今後の課題

長期予測では、内陸部の背景活動度 $\mu(x, y)$ は M6 クラスまでの地震予測に有効であり、M7 クラス以上の特性的地震は活断層に基づく長期予測と相補的に扱う必要がある。同様に、プレート境界地震についても、背景活動度 μ とアスペリティ起源の特性的地震に基づく長期予測を相補的に統合すべきである。

短期予測では、本震直後の検出率と G-R 則の b 値変化の把握が重要である。前震候補の予測は、マグニチュード従属列を含む地震群の集中性に関する統計的識別問題として整理

できる。深層学習と統計地震学的モデル化の統合は、予測精度と信頼性の向上に寄与する可能性がある。

中期的予測では、相対的静穏化とスロースリップ（SSE）を条件情報として導入し、背景地震活動モデルに対する大地震の条件付き発生確率の変化の評価を試みた。東北日本沈み込み帯における SSE や、割愛したが、繰り返し地震などの予測寄与を検証するとともに、全国規模の静穏期が断層状態の時間発展に関する補完情報となるかを検討した。

Palm 平滑化に基づく **shot noise** 応答関数は、ポアソン過程を仮定した近似により推定したため不偏でなく、その積分として得られる確率利得は高々数倍にとどまる。しかし、大地震との因果性を探る時空間 **shot noise** モデルの手がかりとしては有用である。今後の課題は、応答関数推定に残るバイアスと不確実性の低減であり、異常現象の座標ごとに柔軟な応答関数を許しつつ、ベイズ的制約によって過度な逸脱を抑える枠組みが有望である。現状でも本枠組みは、微小異常を継続的に監視し、地震発生確率の時空間変化を尤度指標により評価できる点で有効であり、確率予測の高度化に資する。

今後は、より多様な異常現象の抽出が重要である。例えば余震活動の空白・希薄化域など時空間局所的な変化や、活動重心移動といった時空間的に不均質な変化を、どのように定量化して、確率利得に結びつけるかが課題である。また、GNSS データの活用も重要である。プレート境界域ではスロースリップの逆解析に加え、基線距離時系列の単純な異常値解析によっても、数倍の利得が期待されるという報告がある。一方、内陸部では中小地震に伴うコサイスマック・アフターサイスマック変動を適切に除去しなければ、事前すべりなどの異常検出は困難である。このため、地震活動を入力とした時空間測地変化モデルの開発が喫緊の課題である。

(c) 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 31 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
大地震の短期から長期にわたる時空間予測の展望(口頭発表)	尾形 良彦	ISM STAR-E 2025年度研究集会, 統計数理研究所	2026年3月 16日	国内	
地震活動の予測システムの構築に向けて: 静岡県立大学の研究(口頭発表)	楠城 一嘉	ISM STAR-E 2025年度研究集会, 統計数理研究所	2026年3月 16日	国内	
日本でのリアルタイム余震予測におけるGR則のb値の推定手法の比較(口頭発表)	上田 拓, 久保久彦, 汐見 勝彦	ISM STAR-E 2025年度研究集会, 統計数理研究所	2026年3月 16日	国内	
HIST-ETASモデルとGNSSデータに基づくトンガ海溝非正常変位イベントの解釈(口頭発表)	三井 雄太	ISM STAR-E 2025年度研究集会, 統計数理研究所	2026年3月 16日	国内	
非正常ETASモデルによる地震活動理解: 仮定・推定・解釈上の注意(口頭発表)	熊澤 貴雄	ISM STAR-E 2025年度研究集会, 統計数理研究所	2026年3月 17日	国内	
Foreshock Acceleration Linked to Slow Earthquakes Before a Large Earthquake(口頭発表)	西川 友章	ISM STAR-E 2025年度研究集会, 統計数理研究所	2026年3月 17日	国内	
最近の一元化地震カタログの紹介(口頭発表)	溜瀧 功史	ISM STAR-E 2025年度研究集会, 統計数理研究所	2026年3月 17日	国内	

Development and Applications of the Spatiotemporal GP-ETAS Model (口頭発表)	牛 源源	ISM STAR-E 2025年度研究集会, 統計数理研究所	2026年3月 17日	国内	
長期から即時に至る時空間地震予測とモニタリング: 成果と展望 (口頭発表)	庄 建倉	ISM STAR-E 2025年度研究集会, 統計数理研究所	2026年3月 17日	国内	
Spatio-temporal background seismicity modeled using Gaussian processes (ポスター発表)	Niu Yuanyuan, Zhuang Jiancang	AGU25 Annual Meeting, New Orleans, U. S. A.	2025年12 月15日	国外	
Statistical Properties of Early Aftershocks Following Moderate-size Earthquakes in the Cahuilla swarm (ポスター発表)	Ding Chang, Peng Zhigang, Zhuang Jiancang, Si Xu	AGU25 Annual Meeting, New Orleans, U. S. A.	2025年12 月16日	国外	
Retrospective Forecasting of Volcanic Eruptions Based on b-value Time Series Analysis (ポスター発表)	Bantidi Thystere, Nanjo Kazuyoshi., Ishibe Takeo, Enescu Bogdan, Nishimura Takeshi, Besa Anscair Mukange	AGU25 Annual Meeting, New Orleans, U. S. A.	2025年12 月17日	国外	
Earthquake predictability and probability forecast (口頭発表)	Zhuang Jiancang	12th ACES International Workshop, 台北, 台湾	2025年11 月6日	国外	
An extension of the	Iwata Takaki	12th ACES	2025年11	国外	

non-stationary ETAS model to the space-time modeling (ポスター発表)		International Workshop, 台北, 台湾	月5日		
Earthquake Interaction During Swarms Through a Modified ETAS Model (招待講演)	Aso Naofumi	12th ACES International Workshop, 台北, 台湾	2025年11月6日	国外	
地震予測における異常現象の確率評価と実用化への課題 (一般講演)	尾形 良彦	日本地震学会 2025年度秋季大会, 福岡	2025年10月20日	国内	○
余震活動におけるETASパラメータ変動についての予備的考察 (ポスター発表)	熊澤 貴雄, 尾形 良彦	日本地震学会 2025年度秋季大会, 福岡	2025年10月21日	国内	
駿河トラフの浅い領域で数ヶ月間継続するスロースリップイベント (口頭発表)	三井 雄太, 菊地 祐次, 加納 将行	日本地震学会 2025年度秋季大会, 福岡	2025年10月21日	国内	
中米沈み込み帯・エルサルバドル沖における繰り返し地震の検出 (口頭発表)	西川 友章	日本地震学会 2025年度秋季大会, 福岡	2025年10月22日	国内	
日向灘における群発地震検出とスロー地震との関係の調査 (口頭発表)	吉村 嶺, 西川 友章	日本地震学会 2025年度秋季大会, 福岡	2025年10月21日	国内	
統計モデルを用いた大地震前の前震活動加速現象に関する全世界的調査 (口頭発表)	小山 凱, 西川 友章	日本地震学会 2025年度秋季大会, 福岡	2025年10月21日	国内	
大地震の確率予測の展望 — 多項目予測法の活用 — (口頭発表)	尾形 良彦	2025年度統計関連学会連合大会, 大阪	2025年9月10日	国内	○
点過程モデルを用い	熊澤 貴雄, 尾	2025年度統計関	2025年9月	国内	

た異常地震活動の解析と余震の収束性について（口頭発表）	形 良彦	連学会連合大会，大阪	10日		
Earthquake forecasting based on b value and background seismicity in Yunnan, China（口頭発表）	Wang Rui, Zhang Yuchen, Shi Haixia, Miao Miao, Zhuang Jiancang, Chang Ying, Jiang Changsheng, Meng Lingyuan, Li Danning, Liu Lifang, Su Youjin, Zhang Zhenguo, Han Peng	海城地震50周年記念国際シンポジウム，瀋陽，中国	2025年7月9日	国外	
On the Development of the ETAS Model in Seismicity Modeling（招待講演）	Zhuang Jiancang	The 3rd Joint Conference on Statistics and Data Science in China（2025 JCSDS），杭州，中国	2025年7月13日	国外	
Earthquake forecasting based on b value and background seismicity in Yunnan, China（口頭発表）	Wang Rui, Zhang Yuchen, Han Peng, Shi Haixia, Miao Miao, Zhuang Jiancang, Chang Ying, Jiang Changsheng, Meng Lingyuan, Li Danning, Liu Lifang, Su	日本地球惑星科学連合（JpGU）2025年大会，幕張	2025年5月25日	国内	

	Youjin, Zhang Zhenguo				
階層型時空間ETAS (HIST-ETAS) モデル を用いた広域地震予 測 (口頭発表)	尾形 良彦	日本地球惑星科 学連合 (JpGU)2025年大 会, 幕張	2025年5月 28日	国内	○
日向灘沖南部の余震 活動について (口頭 発表)	熊澤 貴雄, 尾 形 良彦	日本地球惑星科 学連合 (JpGU)2025年大 会, 幕張	2025年5月 28日	国内	
房総スロースリップ イベント高解像度推 定 (ポスター発表)	三井 雄太, 新 井 璃子, 渡邊 栞	日本地球惑星科 学連合 (JpGU)2025年大 会, 幕張	2025年5月 30日	国内	
スロー地震・繰り返 し地震の物理メカニ ズム (ポスター発 表)	渡邊 悠樹, 三 井 雄太	日本地球惑星科 学連合 (JpGU)2025年大 会, 幕張	2025年5月 30日	国内	
Evaluating Earthquake Forecast with Likelihood- Based Scores (口頭 発表)	Zhuang Jianchang	EGU General Assembly 2025, ウィーン, オー ストリア	2025年5月 2日	国外	

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載 : 計6件、うち国外計4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
Seismicity insights and forecasting with Delaunay-based hierarchical models	Ogata, Y.	Earth Planets Space	2026年02月 10日	国内	○
Interplay Between Slow - Slip Events and Seismicity in the Hikurangi Subduction Zone Revealed by a New High - Resolution Catalog	Allen, J. ; Wang, T. ; Bebbington, M. ; Chamberlain, C. J. ; Zhuang, J.	Seismological Research Letters	2026年01月 05日	海外	
統計地震学の現場か ら: ETASモデルで地 震活動を読み解く	尾形良彦	月刊統計	2025年12月	国内	○
Non-randomness of Japan megaquakes implied by stress recovery and accumulation	Nanjo, K. Z. ; Hori, T. ; Iwata, D.	Communications Earth & Environment	2026年02月 05日	海外	
Changes in seismicity in a volcanically active region of the Izu Peninsula, Japan	Nanjo, K. Z. ; Yukutake, Y. ; Kumazawa, T.	Journal of Volcanology and Geothermal Research	2025年09月 1日	海外	
What Triggered the 2021 eruption at Nyiragongo volcano (DR Congo)? Unraveling the	Bantidi, T. M. ; Nishimura, T. ; Nanjo, K. ; Enescu,	Journal of Volcanology and Geothermal Research	2025年08月 14日	海外	

Complex Interplay between tectonism and magmatism	B. ; Ishibe, T. ; Tuluka, G. M.				
---	---------------------------------------	--	--	--	--

(d) 特許出願、ソフトウェア開発、使用・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
- C-3 地震活動度・予測情報を利用した最適設計

(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 統計基盤数理研究系 准教授	矢野 恵佑	R7.4.1 ～ R8.3.31	テーマA（統 数研配分）の 額に含まれる	同左

(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 [実施業務の要約]

テーマDと連携し、緊急地震速報の精度及び計算速度向上に資する観測点選択手法の検討を行った。ベイズ感度公式を利用することで動的な観測点選択が行えることを確認し、手法の基礎を完成させ、いくつかの数値実験での検証を行った。次に、東北大課題と連携し、ノイズスペクトルのロバスト手法の開発及びその実データへの適用 特にGNSS観測点の選択に資するGNSS観測点の特性の把握を行った。最後にテーマAと協同し複数のカタログの地震マグニチュードを統合のベイズ的な推定手法を提案し、論文化を行った。

4) 令和6年度 [実施業務の要約]

テーマDと連携しベイズ感度公式に基づく動的観測点選択法を開発し、尤度関数を修正していくつかの数値実験での検証を行った。国立大学法人東北大学が実施する課題と連携し、昨年度開発したノイズスペクトルのロバスト手法の実データへの適用とプレプリント公開を行った。さらに、GNSS速度ベクトルからの観測点統合法を開発し、全地球および台湾のGNSSの観測点に適用し論文化した。テーマAと協同し複数のカタログの地震マグニチュードを統合のベイズ的な推定手法を提案し、論文化を行った。

5) 令和7年度 [実施業務の要約]

前年度までの研究で開発した手法群を提供した。特にベイズ感度公式に基づく緊急地震速報での観測点選択法を完成させた。

(d) 令和7年度の業務の目的

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

観測点情報を統合することでイベント検知精度や予測精度を高めることができるため、動的観測点選択法を用いた緊急地震速報の精度向上化の検討を行う。

2) C-2 逆解析のための観測点統合・選択法の開発

観測点情報として時系列のスペクトル特性に着目し、ノイズスペクトルのロバスト手法の開発及びその実データへの適用し、特にGNSS観測点の選択に資するGNSS観測点の特性の把握を行う。

3) C-3 地震活動度・予測情報を利用した最適設計

昨年度に引き続きテーマAと協同し、複数のカタログの地震マグニチュードを統合するベイズ的な推定手法の提案・論文化を行う。

(2) 令和7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

ノイズ情報及び予測情報を利用した動的観測点統合法の開発に引き続き取り組んだ。ベイズ感度公式を任意の損失やシナリオに使えるように拡張した論文が出版された。また、テーマDと検討を重ねていた観測点選択手法を完成させた。

2) C-2 逆解析のための観測点統合・選択法の開発

これまで開発してきた逆解析用の観測点情報の統合・選択法に関する論文が出版された。

3) C-3 地震活動度・予測情報を利用した最適設計

テーマAと協力し、地震活動度、マグニチュード、震度情報の最適な統合法の検討に基づき、異なるネットワークからの地震マグニチュードを統合する新しいベイズ法の手法とその応用を公開した。これにより、単一の地震観測ネットワークでは

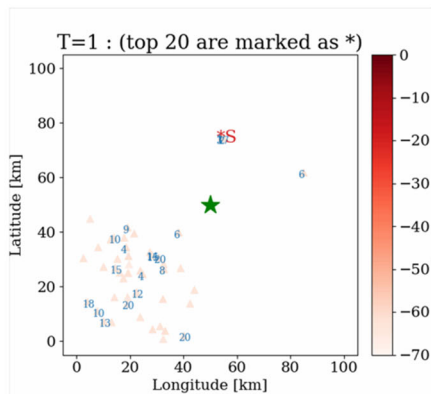
カバーできないような広範囲において、統計地震学的解析や地震ハザード評価を適用することが可能になった。

(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

テーマDと協同して検討していた緊急地震速報である拡張IPF法における動的観測点選択の最適化法を完成させた。また、完成手法に関する論文を執筆中である。

時変最適観測点グループと逐次重要度ベクトル



時不変最適観測点グループと累積重要度ベクトル

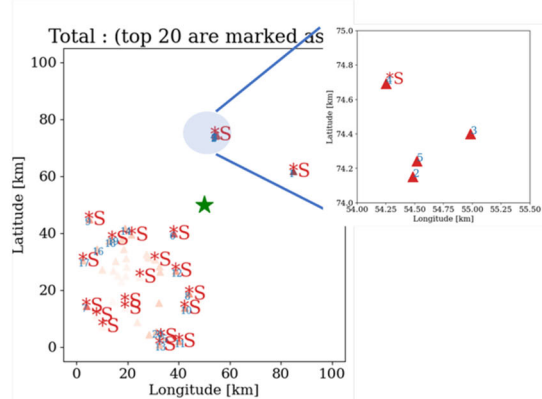


図 14. 動的観測点選択と時不変観測点選択法。両者が整合的になるような手法を開発した。

2) C-2 逆解析のための観測点統合・選択法の開発

昨年度国立大学法人東北大学が実施する課題と連携して開発したノイズスペクトルのロバスト推定手法をGEONET(F5解)に適用した論文が公開された。また、手法論文に関しても採択が決定した。

3) C-3 地震活動度・予測情報を利用した最適設計

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、本手法に関する論文を国際学術誌にて出版した。(Si, et al., 2025)

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をガウス分布に従う観測値とみなし、その平均を未知の真のマグニチュード、分散を観測ノイズに由来する不確かさとしてモデル化した。さらに、真のマグニチュードに対しては3種類の事前分布(情報なしの一様分布、切断されたGutenberg-Richter法則、検出率を考慮したGutenberg-Richter法則)を仮定し、ベイズ的枠組みにより事後確率密度分布を導出した。

手法の妥当性を確認するため、真のマグニチュードが既知である合成地震カタログを用いて頑健性の検証を行った。さらに、イタリアの地震観測網から得られた実データに本手法を適用し、複数ネットワークからの観測値の統合を実現した。

本手法は、将来的には機械学習手法との連携や、その他の観測データとの統合により、より高精度なマグニチュード推定を実現する新たなアプローチとしての応用も期待される。

引用文献

- Tetsuya Takabatake and Keisuke Yano, Towards a robust frequency-domain analysis: Spectral RY' {e}nyi divergence revisited, accepted at Annals of the Institute of Statistical Mathematics (arXiv:2310.06902)
- Masayuki Kano, Keisuke Yano, Yusuke Tanaka, Tetsuya Takabatake, Yusaku Ohta, Spatio-temporal characteristics in the GEONET F5 solution in the frequency domain estimated based on the robust spectral analysis, Earth Planets Space 77, 103, 2025 (DOI: <https://doi.org/10.1186/s40623-025-02236-3>)
- Yukito Iba and Keisuke Yano, Posterior Covariance Information Criterion for general loss functions, Bayesian Analysis, 2025 (DOI:<https://doi.org/10.1214/25-BA1536>, arxiv: arXiv:2206.05887)
- Site selection for earthquake early warning (with Masumi Yamada, Stephen Wu, Koji Tamaribuchi, and Yukito Iba in prep.)
- Si Z., Zhuang J., Jiang C., Gentili S., Wang W. (2024) A Bayesian merging of earthquake magnitudes determined by multiple seismic networks. Seismological Research Letters, 95:3221-3233. doi:10.1785/0220230404.

(c) 結論ならび

テーマDと協同して検討していた観測点選択手法を完成させた。また、これまでの研究の成果に関する論文が出版された。

(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7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
ベイズ感度解析による緊急地震速報における観測点選択（口頭発表）	矢野 恵佑	ISM STAR-E 2025年度研究集会, 統計数理研究所	2026年3月 16日	国内	

Extending Widely-Applicable Information Criterion (口頭発表)	Yano Keisuke	2026 ISI-ISM-ISSAS Joint Conference, 台北, 台湾	2026年2月11日	国外	
Stochastic determination of arrival time and initial polarity (口頭発表)	庄 建倉, 裴 璋来, 周 仕勇	日本地震学会 2025年度秋季大会, 福岡	2025年10月20日	国内	
ベイズ感度解析を用いた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, Wu Stephen, 溜瀧 功史, 伊庭 幸人	日本地震学会 2025年度秋季大会, 福岡	2025年10月20日	国内	○
線形磁化プラズマ装置におけるコヒーレント渦による間欠現象 (口頭発表)	矢野 恵佑, 佐々木 真, 河内 祐一, 山田 琢磨, 小菅 佑輔, 藤沢 彰英	2025年度統計関連学会連合大会, 大阪	2025年9月10日	国内	
Site selection based on Bayesian sensitivity for EEW (口頭発表)	矢野 恵佑, 山田 真澄, ウ・ステファン, 溜瀧 功史	日本地球惑星科学連合 (JpGU) 2025年大会, 幕張	2025年5月26日	国内	○
On the recurrence of slow slip events using the BPT distribution (ポスター発表)	矢野 恵佑, 加納 将行, 堀 高峰, 有吉 慶介	日本地球惑星科学連合 (JpGU) 2025年大会, 幕張	2025年5月28日	国内	

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載 : 計1件、うち国外計0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

Spatio-temporal characteristics in the GEONET F5 solution in the frequency domain estimated based on the robust spectral analysis	Kano, M. ; Yano, K. ; Tanaka, Y. ; 他	Earth Planets Space	2025年07月01日	国内	○
---	---	---------------------	-------------	----	---

(e) 特許出願、ソフトウェア開発、使用・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. 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

D-3 拡張 IPF 法と PLUM 法のハイブリッド化

(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	R6. 4. 1 ～ R7. 3. 31	1,500,000 円	450,000 円
統計数理研究所 先端データサイエンス 研究系 准教授	ウ・ステ ファン	R6. 4. 1 ～ R7. 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 [実施業務の要約]

緊急地震速報の精度と速度を向上させるために、ETAS モデルを緊急地震速報の事前情報として導入することを試みた。結果として、一部の地震事例では緊急地震速報の初期精度が向上したことが確認された。さらに、気象庁震度に基づく緊急地震速報の新たな評価基準を開発し、地域の最大揺れの超過確率の計算法を開発した。

4) 令和6年度 [実施業務の要約]

ETAS 情報を事前情報として緊急地震速報の IPF 法に統合することで、震源決定の精度向上に有効であることを、2024年6月3日の能登半島地震を例に示した。また、観測点選択を最適化するバイズ感度解析手法を導入し、限られたデータで最大

限の情報を得るための拡張 IPF 法を開発した。さらに、IPF 法と PLUM 法の推定結果を統合するために、IPF 法の予測信頼度を定量化する新たな評価基準の構築や、震源パラメータから地震動のエンベロープ波形を推定する手法の開発を行った。

5) 令和 7 年度 [実施業務の要約]

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した。

(d) 令和 7 年度の業務の目的

1) D-1 ETAS 地震予測を事前情報に活用

これまでに開発した、ETAS 地震予測を一日ごとに計算するシステムの構築、および ETAS 地震予測を震源決定手法の事前情報に利用する方法を、2024 年能登半島地震や沖合の地震に適用し、ETAS 地震予測の有無が震源決定に与える影響を調べる。また、開発中の IPFx 法のプログラムにオプションとして組み込み、リアルタイムでの実行を可能にする。

2) D-2 最適な観測網情報に基づく拡張 IPF 法の開発

緊急地震速報の警報時間を最大化するために、できるだけ少ないデータかつ多い情報量を得られるよう、観測点選択を最適化するテーマ C のベイズ感度解析手法に時間変化の概念を組み込み、時間とともに増加する情報量を考慮して、観測点選択を行う手法を開発する。

3) D-3 拡張 IPF 法と PLUM 法のハイブリッド化

IPF 法と PLUM 法の 2 つの手法の推定結果を統合するため、IPF 法の予測信頼度を定量化する新しい評価基準の構築を行う。これまでに構築した地震動エンベロープ曲線の距離減衰式を利用し、観測記録と比較することにより緊急地震速報の予測の信頼性を評価する手法の開発を行う。

(2) 令和 7 年度の成果

(a) 業務の要約

ETAS 地震予測を用いた震源決定手法を開発し、能登半島地震など実際の事例に適用して有効性を確認した。さらに、緊急地震速報の警報時間を最大化するため、時間変化を考慮した最適観測点選択手法を導入した拡張 IPF 法を構築した。また、IPF 法と PLUM 法を統合するハイブリッド化を進め、地震動エンベロープ解析に基づいて速報精度を定量的に評価する枠組みを整えた。

(b) 業務の成果

1) D-1 ETAS 地震予測を事前情報に活用

ETAS 地震予測を利用して、震源推定を高度化する手法を開発した。ETAS 地震予測を事前情報として初期サンプリングに利用する ETAS 事前情報と、ETAS 地震予測を尤度関数の一部として利用する ETAS 尤度関数を構築した。2024 年 6 月 3 日の能登半島地震の余震に開発した手法を適用した。ETAS 事前情報を利用したときは、最初

の数秒の震源推定は改善されたが、リサンプリングすると推定震源の場所は悪くなった。ETAS 尤度関数も併用した場合は、どの時間においても震源推定の精度が向上した。ETAS 地震予測を利用した震源推定は、観測点のカバレッジが悪い場合に、震源推定精度を向上する手法として有効であることが示された。成果は日本地震学会秋季大会で発表し、EPS 特集号への論文投稿に向けて準備中である。

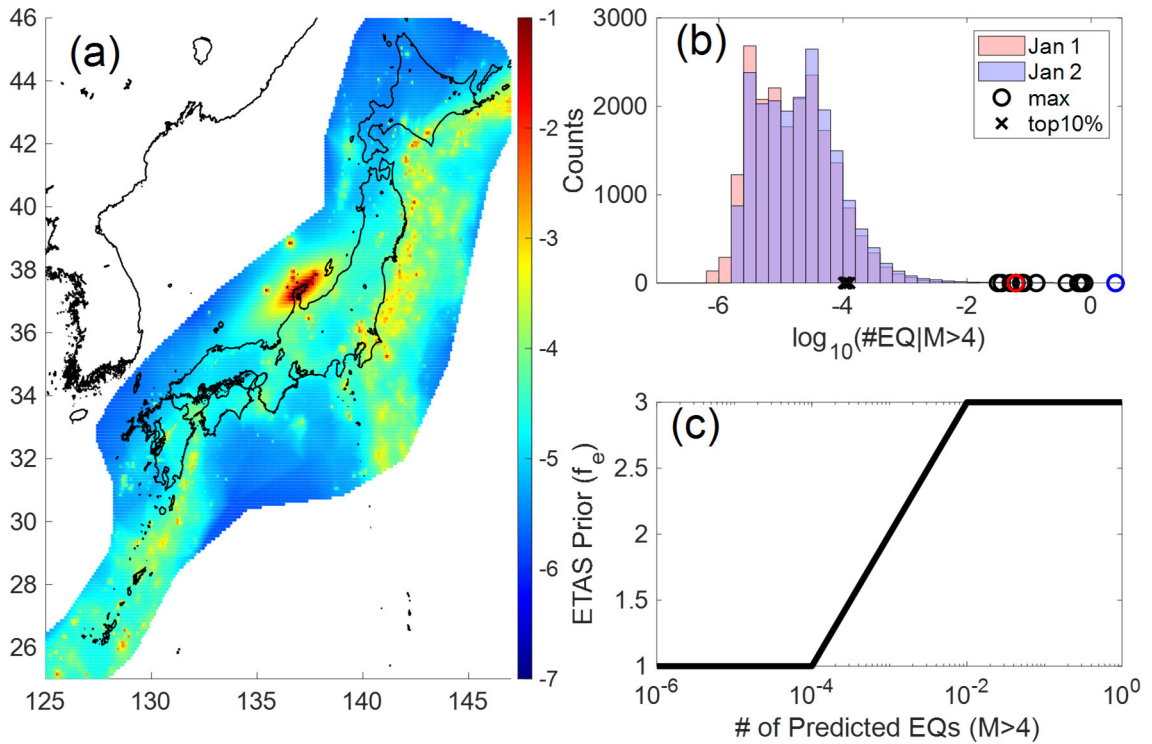
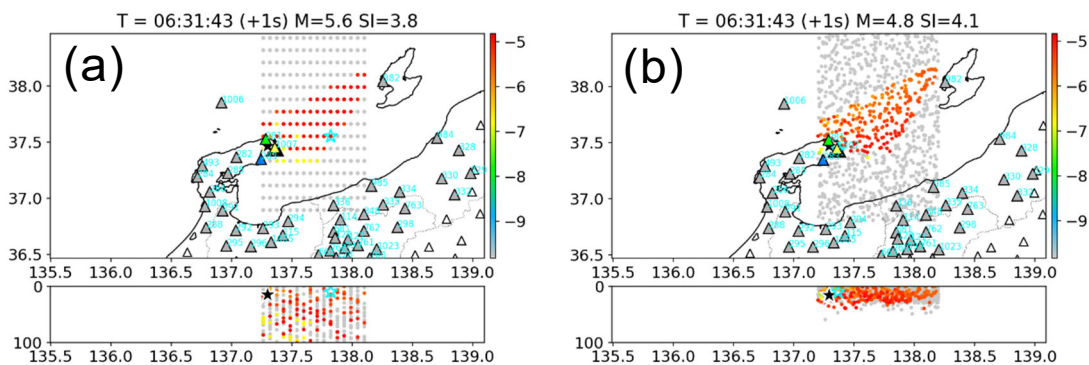


図 14. ETAS 予測を拡張 IPF 法の事前情報に利用した例 (a)2024 年 1 月 2 日の M4 以上の地震発生予測数 (b)各グリッドにおける発生予測数のヒストグラム(c)発生予測数を事前情報に変換する関係式



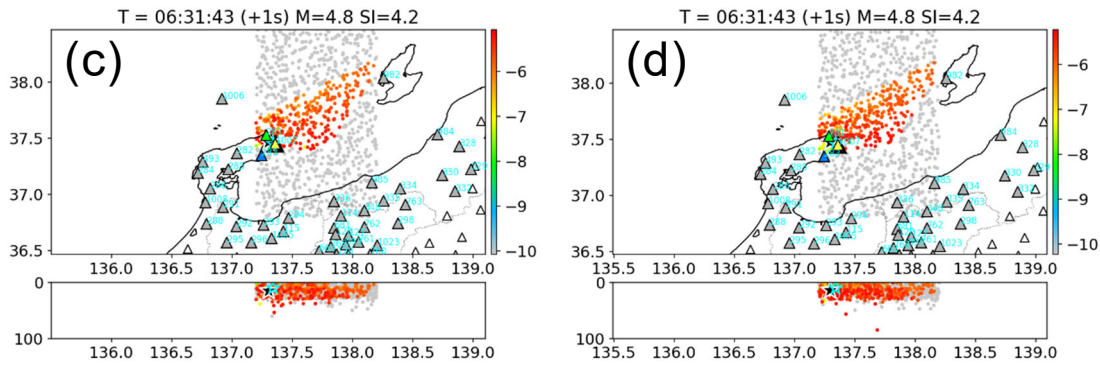


図 15. 2024 年 6 月 3 日の能登半島の地震に対する初期サンプルの例。(a) 元々の一様グリッドのサンプリング。(b) ETAS 予測を利用したサンプリング(深さ方向のみ、水平方向はなし)。(c) ETAS 予測を利用したサンプリング(深さ方向あり、水平方向は $k=1$)。(d) ETAS 予測を利用したサンプリング(深さ方向あり、水平方向は $k=2$)。

2) D-2 最適な観測網情報に基づく拡張 IPF 法の開発

緊急地震速報の警報時間を最大化するために、できるだけ少ないデータかつ多い情報量を得られるよう、観測点選択を最適化するテーマ C のベイズ感度解析手法を導入して、観測点の情報量を評価する手法を開発し、様々な観測点の分布に対する情報量の評価を行った。本手法はベイズ同時重要度行列に基づく D-optimal 設計を用い、時間変化に応じた「時変最適観測点提案」と、シナリオに依存しない「時不変最適観測点提案」を可能とする新しい枠組みである。時間変動を考慮した観測点選択という概念は情報科学技術としても新規性が高く、地震防災情報の効率化に寄与する。複数のシナリオおよび観測点配置に対して本手法を適用し、直感と矛盾しない妥当な提案が得られることを確認した。成果は JpGU2025 および日本地震学会秋季大会で発表し、EPS 特集号への論文投稿に向けて準備中である。

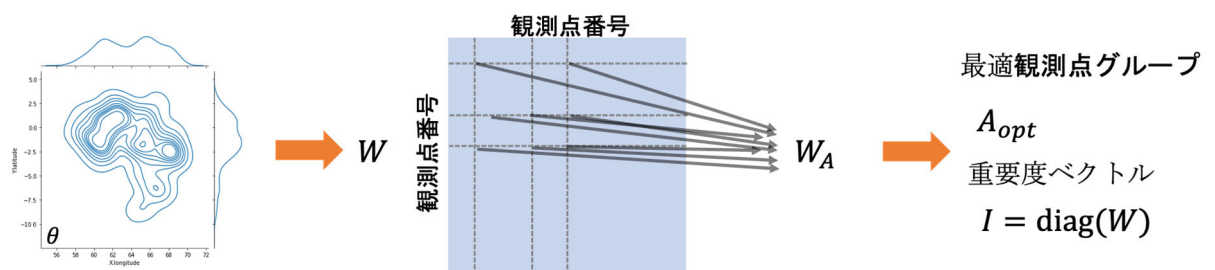


図 16. ベイズ感度解析に基づく IPF 法/IPFx 法での客観的観測点選択法の概念図。左が事後分布、真ん中が同時重要度行列 W となり、 W 小行列式を最大化する観測点グループを選択する。

3) D-3 拡張 IPF 法と PLUM 法のハイブリッド化:

IPF 法と PLUM 法の 2 つの手法の推定結果を統合するため、IPF 法の予測信頼度を定量化する新しい評価基準の構築を進めた。IPF 法の震源から求められる理論波形と観測波形を比較するため、震源パラメータから震度曲線を推定する手法の開発を行った。震度曲線のエンベロップをモデル化し、解析関数を提案した。気象庁、K-NET、KiK-net の 20 年間の 50 万以上の地震記録を用いて震度曲線を作成し、最適な包絡関数を同定した。既往の地震動予測式との比較を行い、震度最大値に関してはほぼ同等の結果となった。本研究の成果を査読論文としてとりまとめ、Bulletin of the Seismological Society of America に掲載された。

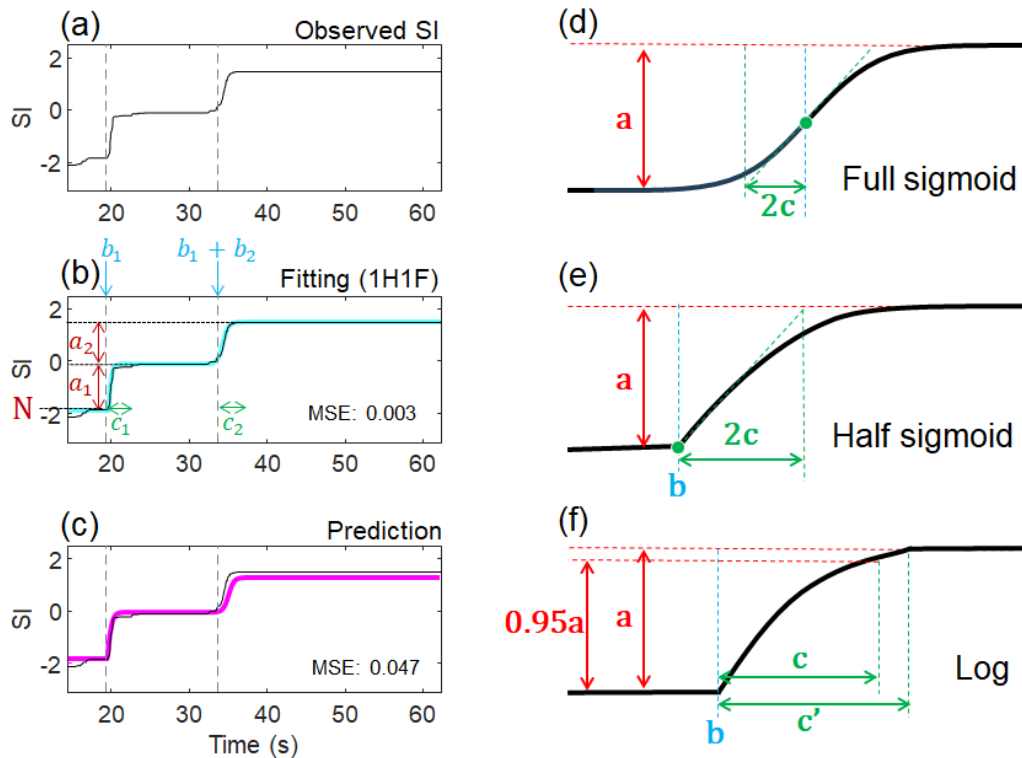


図 17. 震度曲線とエンベロップ関数の模式図。(a) 気象庁 E66 観測点における 2010 年 8 月 3 日午前 7 時 31 分の M4.6 イベントの震度曲線の例。(b) 震度曲線に対するエンベロップ関数のフィッティング。(c) 震度曲線に対するエンベロップ GMPE による予測エンベロップ関数。(d) 通常のシグモイド関数、(e) ハーフシグモイド関数、(f) 対数関数(久保&功刀, 2022)。

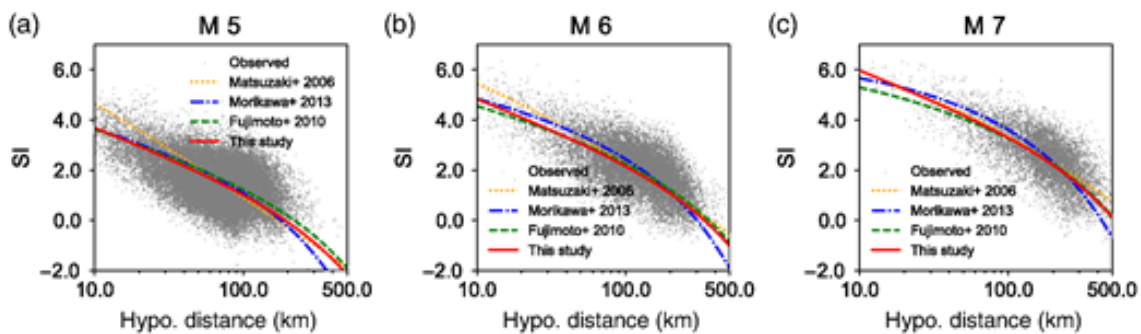


図 18. 過去の研究における地震動予測式 (GMPE) の比較 (松崎ら、2006 年 ; 藤本・翠川、2010 年 ; 森川・藤原, 2013) による震源深度 10km における気象庁マグニチュードの比較 (a) M 5、(b) M 6、(c) M 7。

(e) 結論ならびに今後の予定

ETAS 予測を震源推定の事前情報として統合し、リアルタイム解析への実装を達成した。観測網最適化とベイズ解析を組み合わせることで情報取得効率を向上させ、即時地震動予測の高精度化を実現した。さらに、PLUM 法との統合により信頼性評価を可能にする新たなアルゴリズムを確立し、緊急地震速報システムの高度化に大きく前進した。今後は、気象庁との共同研究を進め、実際のシステムにどのように組み込めるか、実用化に向けてより現実的な評価をする必要がある。

(f) 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 15 件、うち海外計 5 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
ETASを活用した緊急地震速報の震源決定 (口頭発表)	山田 真澄	ISM STAR-E 2025年度研究集会, 統計数理研究所	2026年3月 16日	国内	
Modeling Seismic Intensity Envelopes for Earthquake Early Warning Applications (口頭発表)	Stephen Wu	ISM STAR-E 2025年度研究集会, 統計数理研究所	2026年3月 16日	国内	
最近の一元化地震カタログの紹介 (口頭発表)	溜瀧 功史	ISM STAR-E 2025年度研究集会, 統計数理研究所	2026年3月 17日	国内	
A Case Study of Area-Based Earthquake Ground Motion Hazards in the San Francisco Bay Area (口頭発表)	Minson Sarah E., Wu Stephen, Au Siu-Kui, Cochran Elizabeth S., Yano Keisuke, Parker Grace	AGU25 Annual Meeting, New Orleans, U. S. A.	2025年12月 16日	国外	

	Alexandra, Baltay Annemarie, Milner Kevin, Page Morgan, Henze Chris				
Online testing of the IPFx method for the strong motion network in Taiwan (口頭発表)	Yamada Masumi	12th ACES International Workshop, 台北, 台湾	2025年11月6日	国外	
Development of the Nationwide Wavefield-Based EEW System in Japan (招待講演)	Kodera Yuki	12th ACES International Workshop, 台北, 台湾	2025年11月6日	国外	
ベイズ感度解析を用いた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, Wu Stephen, 溜瀧 功史, 伊庭 幸人	日本地震学会 2025年度秋季大会, 福岡	2025年10月20日	国内	
ETASモデルを利用した緊急地震速報の高度化 (口頭発表)	山田 真澄, Wu Stephen, 矢野 恵佑, 溜瀧 功史, 野口 恵司, 林元 直樹, 鶴岡 弘	日本地震学会 2025年度秋季大会, 福岡	2025年10月22日	国内	○
気象庁の地震火山業務における先端AI活用とその課題 (口頭発表)	溜瀧 功史	2025年度統計関連学会連合大会, 大阪	2025年9月10日	国内	
Application of machine learning for earthquake early warning (招待講演)	Wu Stephen	The 3rd Joint Conference on Statistics and Data Science in China (2025 JCSDS)	2025年7月13日	国外	○
Site selection based on Bayesian	矢野 恵佑, 山田 真澄, ウ・	日本地球惑星科学連合	2025年5月26日	国内	

sensitivity for EEW (口頭発表)	ステファン, 溜渕 功史	(JpGU)2025年大会, 幕張			
台湾の強震ネットワークを利用したIPFx法のオンライン試験 (口頭発表)	山田 真澄, 陳達毅, 張 毓軒	日本地球惑星科学連合 (JpGU)2025年大会, 幕張	2025年5月28日	国内	
海底地震津波観測網を活用した日向灘から四国沖の地震分析 (ポスター発表)	溜渕 功史, 秋山 加奈, 岩切一宏	日本地球惑星科学連合 (JpGU)2025年大会, 幕張	2025年5月28日	国内	
よりロバストなP波PLUM法の検討 (ポスター発表)	小寺 祐貴	日本地球惑星科学連合 (JpGU)2025年大会, 幕張	2025年5月29日	国内	
地震研究における大規模言語モデル活用の挑戦 (口頭発表)	久保 久彦, Wu Stephen, 加納将行, 加藤 慎也, 小穴 温子, 岡崎 智久, 岡田 望海, 亀 伸樹, 小寺 祐貴, 佐藤 大祐, 椎名高裕, 下條 賢梧, 溜渕 功史, 直井 誠, 西山 竜一, 平原 和朗, 宮本 崇, 山田 真澄	日本地球惑星科学連合 (JpGU)2025年大会, 幕張	2025年5月26日	国内	

2) 2. 学会誌・雑誌等における論文掲載：計1件、うち海外計1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 別	主たる成果
Modeling Seismic Intensity Envelopes for Earthquake Early Warning	Peng, H.; Yamada, M.; Wu, S.	BSSA	2025年08月14日	海外	○

Applications					
--------------	--	--	--	--	--

(g) 特許出願、ソフトウェア開発、使用・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、令和7年度において、地震活動解析および地震確率予測の実用化を視野に、ETASモデルの高度化および機械学習手法の導入を進めた。深さおよび震源メカニズムを組み込んだ高次元ETASモデルを用いた地震活動解析と予測実験を実施するとともに、解析パッケージ群の整理・統合を行い、再現性の高い地震予測実験を実施可能とする解析基盤を整備した。また、短期余震欠測（STAI）の影響を考慮した欠測補正手法の検討を行い、観測データの不完全性に対応可能な実用的解析手法の整備を進めた。さらに、摩擦構成則に基づく時空間地震活動モデルの拡張およびGNSS等の地殻変動データを活用した統合解析により、背景地震活動および背景応力場推定の精度向上を図った。加えて、ニューラル更新点過程モデル等を用いた機械学習型手法を導入し、外部変数を考慮した地震確率予測手法の実用的評価および異常現象の統計的特性の解析を実施した。

テーマBでは、多項目確率予測式における確率利得について、階層時空間ETAS（HIST-ETAS）モデルの背景強度関数と地震マグニチュードの頻度則に合わせて活断層地震危険度に基づく地域性を考慮して算出し、日本周辺における大地震の常時活動確率密度関数を提供する時空間プラットフォームの整備を行った。

また、背景強度関数に対するHIST-ETASモデルの自励項と前震予測の比率を指標とした短期予測に加え、中期予測に関する時空間確率利得密度関数（STPGD＝リスク拡大関数）の算出および具体的事例への適用を行った。さらに、これらの結果の時空間的な可視化を実現し、自動または半自動のオンライン・システムとして提供可能な形で整備した。

ハイブリッド型予測モデルの構築の課題として、現時点で利用可能な諸異常現象を探索し、それらの経験的リスク拡大関数を構成し、時空間的な変化を可視化した。これを上記のプラットフォームに追加し組み込むことで、多項目確率予測式を活用した時空間的短期予測の精度向上を目指した。

テーマCでは、令和7年度において、ノイズ情報および予測情報を活用した観測点統合・選択手法の高度化と実装に取り組んだ。動的観測点統合法については、テーマDと連携し、緊急地震速報の拡張IPF法における動的観測点選択の最適化手法を完成させ、時不変型観測点選択法との整合性を考慮した統一的手法を確立した。逆解析のための観測点統合・選択法に関しては、東北大学との協力のもと、ロバストスペクトル解析に基づくノイズスペクトル推定手法をGEONET（F5解）データに適用し、関連研究成果を論文として公表した。さらに、地震活動度および予測情報を利用した最適設計として、複数の地震観測網から得られるマグニチュード情報を統合するベイズ統合手法を開発し、国際学術誌において成果を公開した。本手法により、異なる観測ネットワークからの観測情報を統合した統一的地震カタログの構築が可能となり、広域的な統計地震学解析および地震ハザード評価への適用基盤を整備した。

テーマDは、テーマAとBと連携してETASモデルを緊急地震速報の事前情報として導入することを試みた。昨年度に研究を開始したIPF法の事前情報に活用する手法について改善を行った。事前情報だけでは十分な収束を得られず、尤度関数に過去の地震履歴やETAS予測を組み込むことで、情報量の少ない場所・時間での震源予測の精度を向上できることが示された。また、震源パラメータから震度曲線を推定するエンベロープの地震動予測式の成果については、英文ジャーナル Bulletin of the Seismological Society of America に発表された。

テーマ間の共同成果として、令和7年度においてもテーマ間の連携を強化し、複数の共同研究成果を得ることができた。具体的には、テーマAとBによりETASモデリングおよび地震予測におけるGNSSデータの活用に関する研究を進め、テーマA、BおよびCにより地震カタログの均質化に関する手法を整備した。また、テーマA、BおよびDにより緊急地震速報のためのETAS事前分布に関する検討を行い、テーマCとDにより緊急地震速報の決定ルールに関する研究を推進した。本プロジェクトでは、全メンバーが参加するワークショップを開催し、相互の交流と研究連携を深めた。これにより、テーマ間の協力を通じた研究成果の創出とその価値の評価を行い、社会実装を見据えた出口戦略に基づく研究成果の取りまとめを行った。

4. 活動報告

<会議開催実績>

1. 統計地震学セミナー

統計数理研究所（立川市）またはオンラインにて以下の通り開催し、研究の進捗を議論・共有、プロジェクト全体の進め方や次のステップの計画を議論した。

第104回 2025年12月23日(火) Yun, Naidan (運 乃丹) (名古屋大学大学院環境学研究科) Extremely Low Megathrust Strength and Shear Stress Reversal during the 2011 Tohoku-Oki Earthquake

第103回 2025年10月23日(木) 王 林海 (Wang, Linhai) (中国地震局 地球物理研究所) Yearly-scale deep crustal fluid transfer implied by gravity changes from in-situ observations around the 2021 Yangbi Ms6.4 earthquake, China

朴 健 (Piao, Jian) (北京大学 理論・応用地球物理学研究所) Modeling Long-term Seismic Hazard in North China Using ETAS-Simulated Catalogs and Ground-Motion Attenuation

詹 成祥 (Zhan, Chengxiang) (中国地質大学(北京)) Negligible Magnitude Dependence in Real Seismicity

第102回 2025年8月26日(火) 劉 天雅 (Liu, Tianya) (中国科学院大学) Correlation of earthquake occurrence among major fault zones in the eastern margin of the Tibetan Plateau through Earthquake Data Analysis

葛 凌飛 (Ge, Lingfei) (中国科学院大学) A Fault-Centric Earthquake Network

Based on Epidemic-Type Aftershock Sequence Model

韓 鍾銳 (Han, Zhongrui) (中国地震局地球物理研究所) Fine-Tuning Foundation Models for Seismic Event Classification Using the DiTing 2.0 Dataset

高 心語 (Gao, Xinyu) (中国科学院大学) Multiple aftershock mechanisms of 2014 Kangding doublet in eastern Tibet based on seismicity detection of machine learning

張 逸群 (Zhang, Yiqun) (中国吉林大学) Incorporating Non-Seismicity Precursors into Earthquake Probabilistic Forecasting Model

牛源 源 (Niu, Yuanyuan) (統計数理研究所) Gaussian process-based model for time-dependent background seismicity

第 101 回 2025 年 6 月 26 日(木) Dr. Wang, Yuchen (王 宇晨) (国立研究開発法人 海洋研究開発機構 (JAMSTEC) ・ 研究員) Tsunami Early Warning Using Offshore Observations

2. AGU25 Annual Meeting セッション運営

2025 年 12 月 15 日～16 日に米国ニューオーリンズで開催された「AGU25 Annual Meeting」において、“Integrating Physical, Statistical, and AI-Enhanced Methods in Seismic Hazard Assessment: Insights from Statistical Seismology and Machine Learning I-III” セッション (ポスター発表・口頭発表) の企画・運営を行った。

担当 : Zaccagnino David, Spassiani Ilaria, Shcherbakov Robert, 庄 建倉, Petrillo Giuseppe

3. 2026 年 2 月 16-17 日に統計数理研究所で ISM-STAR-E 研究集会を開催し、以下の報告を行った。

尾形 良彦 (統数研) 大地震の短期から長期にわたる時空間予測の展望 — 中期予測をどう考えるか? —

山田 真澄 (京大防災研) ETAS を活用した緊急地震速報の震源決定

楠城 一嘉 (静岡県大) 地震活動の予測システムの構築に向けて : 静岡県立大学の研究

矢野 恵佑 (統数研) ベイズ感度解析による緊急地震速報における観測点選択

上田 拓 (防災研) 日本でのリアルタイム余震予測における GR 則の b 値の推定手法の比較 (上田 拓、久保 久彦、汐見 勝彦)

三井 雄太 (静岡大) HIST-ETAS モデルと GNSS データに基づくトンガ海溝非定常変位イベントの解釈

澤崎 郁 (防災研) 大地震直後からの余震による高周波エネルギー輻射量推移の過去統計
WU STEPHEN (統数研) Modeling Seismic Intensity Envelopes for Earthquake Early Warning Applications

熊澤 貴雄 (統数研) 非定常 ETAS モデルによる地震活動理解 : 仮定・推定・解釈上の注意
Isaias Manuel Ramírez Bañales (イサイアス バニャレス) (京大) Estimating Inhomogeneous Spatio-Temporal Background Intensity Functions using Graphical Dirichlet Processes

西川 友章 (京大防災研) Foreshock Acceleration Linked to Slow Earthquakes Before

a Large Earthquake: Implications for Two-Stage Aseismic Processes
溜瀧 功史（気象庁地震火山部）最近の一元化地震カタログの紹介
牛源源（統数研）Development and Applications of the Spatiotemporal GP-ETAS Model
岩田 貴樹（県広島大）ETAS モデルと摩擦構成則地震活動モデルの混合モデルの時空間への拡張
庄建倉（統数研）長期から即時に至る時空間地震予測とモニタリング：成果と展望

4. 緊急地震速報に関する研究集会

2026年1月8日～9日 東京大学地震研究所 共同利用研究集会「地震のリアルタイムモニタリングと即時予測情報の活用」を開催した。担当：山田真澄（京大防災研）小寺祐貴（気象研究所、研究協力者）

<https://sites.google.com/view/sokuji-yosoku2025>

<アウトリーチ活動>

(イ) 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。

(ウ) 2025年10月01日 地震本部 から2025年09月26日に公表された「南海トラフの改訂版確率予測モデル」の基礎に、Ogata(2002, JGR)とNomura et al. (2011, JGR)が採用されています。

(エ) Progress in Earth and Planetary Science (PEPS)で2022～2023年に出版された論文の中から、下記の論文が The Most Cited Paper Award 2025 を受賞しました：西川友章, 井出 哲, 西村卓也: A review on slow earthquakes in the Japan Trench. 『日本海溝におけるスロー地震に関する総説』<https://doi.org/10.1186/S40645-022-00528-W>

(オ) 2025年5月16日、大阪・関西万博において、イタリア大使館主催、OGS (Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale) の協力のもと、日伊の専門家による地震リスク管理をテーマとした公開討論会が開催された。本プロジェクトからは庄建倉教授、楠城一嘉教授および加藤愛太郎教授が参加し、地震リスク管理について議論が行われた。緊急対応から長期計画に至るまで両国の知見が共有され、防災および社会レジリエンス強化に向けた連携の重要性が確認された。

<記事等>

(ア) 庄建倉 教授 (ISM Star-E プロジェクトリーダー) および 尾形 良彦 特任教授 (名誉教授) が「2025年 世界トップ2%の科学者」にランクインしました。この荣誉ある評価は、本プロジェクトにおける世界的な影響力を際立たせるものである。

(イ) 尾形 良彦 特任教授（名誉教授）の業績が ScholarGPS（Meta Analytics 社）において以下の「専門」で世界高位にランクされた

5. むすび

以上のように、各テーマにおいて研究課題を着実に推進し、十分な成果および進捗が得られた。各テーマ間の連携に加え、STAR-E プロジェクト内の他の研究課題との協働も進められ、研究活動は順調に展開された。令和7年度には、課題全体として社会実装を視野に入れた出口戦略を踏まえ、研究成果の応用展開にも取り組んだ。これらの活動を通じて、本課題は当初計画した研究目標を概ね達成し、所期の成果を挙げたといえる。

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。

様式第 2 1

学 会 等 発 表 実 績

委託業務題目 「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」

機関名 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. 学会等における口頭・ポスター発表

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
大地震の短期から長期にわたる時空間予測の展望 (口頭発表)	尾形 良彦	ISM STAR-E 2025 年度研究集会, 統計数理研究所	2026年3月16日	国内
ETASを活用した緊急地震速報の震源決定 (口頭発表)	山田 真澄	ISM STAR-E 2025 年度研究集会, 統計数理研究所	2026年3月16日	国内
地震活動の予測システムの構築に向けて: 静岡県立大学の研究 (口頭発表)	楠城 一嘉	ISM STAR-E 2025 年度研究集会, 統計数理研究所	2026年3月16日	国内
ベイズ感度解析による緊急地震速報における観測点選択 (口頭発表)	矢野 恵佑	ISM STAR-E 2025 年度研究集会, 統計数理研究所	2026年3月16日	国内
日本でのリアルタイム余震予測におけるGR則のb値の推定手法の比較 (口頭発表)	上田 拓, 久保久彦, 汐見 勝彦	ISM STAR-E 2025 年度研究集会, 統計数理研究所	2026年3月16日	国内
HIST-ETASモデルとGNSSデータに基づくトンガ海溝非定常変位イベントの解釈 (口頭発表)	三井 雄太	ISM STAR-E 2025 年度研究集会, 統計数理研究所	2026年3月16日	国内
大地震直後からの余震による高周波エネルギー輻射量推移の過去統計 (口頭発表)	澤崎 郁	ISM STAR-E 2025 年度研究集会, 統計数理研究所	2026年3月16日	国内
Modeling Seismic Intensity Envelopes for Earthquake Early Warning Applications (口頭発表)	Stephen Wu	ISM STAR-E 2025 年度研究集会, 統計数理研究所	2026年3月16日	国内
非定常ETASモデルによる地震活動理解: 仮定・推定・解釈上の注意 (口頭発表)	熊澤 貴雄	ISM STAR-E 2025 年度研究集会, 統計数理研究所	2026年3月17日	国内
Estimating Inhomogeneous Spatio-Temporal Background Intensity Functions using Graphical Dirichlet Processes (口頭発表)	Bañales Isaias Manuel Ramirez	ISM STAR-E 2025 年度研究集会, 統計数理研究所	2026年3月17日	国内

Foreshock Acceleration Linked to Slow Earthquakes Before a Large Earthquake (口頭発表)	西川 友章	ISM STAR-E 2025 年度研究集会, 統計数理研究所	2026年3月17日	国内
最近の一元化地震カタログの紹介 (口頭発表)	溜瀧 功史	ISM STAR-E 2025 年度研究集会, 統計数理研究所	2026年3月17日	国内
Development and Applications of the Spatiotemporal GP-ETAS Model (口頭発表)	牛 源源	ISM STAR-E 2025 年度研究集会, 統計数理研究所	2026年3月17日	国内
ETASモデルと摩擦構成則地震活動モデルの混合モデルの時空間への拡張 (口頭発表)	岩田 貴樹	ISM STAR-E 2025 年度研究集会, 統計数理研究所	2026年3月17日	国内
長期から即時に至る時空間地震予測とモニタリング: 成果と展望 (口頭発表)	庄 建倉	ISM STAR-E 2025 年度研究集会, 統計数理研究所	2026年3月17日	国内
Residual analysis in point process and state space modelling (口頭発表)	Zhuang Jiancang	2026 ISI-ISM-ISSAS Joint Conference, 台北, 台湾	2026年2月9日	国外
Extending Widely-Applicable Information Criterion (口頭発表)	Yano Keisuke	2026 ISI-ISM-ISSAS Joint Conference, 台北, 台湾	2026年2月11日	国外
Spatio-temporal background seismicity modeled using Gaussian processes (ポスター発表)	Niu Yuanyuan, Zhuang Jiancang	AGU25 Annual Meeting, New Orleans, U.S.A.	2025年12月15日	国外
Statistical Properties of Early Aftershocks Following Moderate-size Earthquakes in the Cahuilla swarm (ポスター発表)	Ding Changchang, Peng Zhigan, Zhuang Jiancang, Si Xu	AGU25 Annual Meeting, New Orleans, U.S.A.	2025年12月16日	国外
A Case Study of Area-Based Earthquake Ground Motion Hazards in the San Francisco Bay Area (口頭発表)	Minson Sarah E., Wu Stephen, Au Siu-Kui, Cochran Elizabeth S., Yano Keisuke, Parker Grace Alexandra, Baltay Annemarie, Milner Kevin,	AGU25 Annual Meeting, New Orleans, U.S.A.	2025年12月16日	国外

	Page Morgan, Henze Chris			
Retrospective Forecasting of Volcanic Eruptions Based on b- value Time Series Analysis (ポスター発表)	Bantidi Thystere, Nanjo Kazuyoshi., Ishibe Takeo, Enescu Bogdan, Nishimura Takeshi, Besa Anscair Mukange	AGU25 Annual Meeting, New Orleans, U.S.A.	2025年12月17日	国外
Seismogenesis from the Finite Elastic Deformation of Geometric Asperities (ポスター発 表)	Tsai Victor C., Aso Naofumi, Hirth Greg, Lee Jaeseok	AGU25 Annual Meeting, New Orleans, U.S.A.	2025年12月16日	国外
Spatiotemporal Distribution of Volcanic Earthquakes off Izu Oshima (ポスター発表)	Arakawa Hinako, Aso Naofumi	AGU25 Annual Meeting, New Orleans, U.S.A.	2025年12月18日	国外
A General Framework for Residual Analysis (口頭 発表)	Zhuang Jiancang	Mathematics of Risk-2025,メル ボルン, オースト ラリア	2025年11月13日	国外
Earthquake predictability and probability forecast (口 頭発表)	Zhuang Jiancang	12th ACES International Workshop, 台北, 台湾	2025年11月6日	国外
An extension of the non- stationary ETAS model to the space-time modeling (ポスター発表)	Iwata Takaki	12th ACES International Workshop, 台北, 台湾	2025年11月5日	国外
Online testing of the IPFx method for the strong motion network in Taiwan (口頭発表)	Yamada Masumi	12th ACES International Workshop, 台北, 台湾	2025年11月6日	国外
Development of the Nationwide Wavefield- Based EEW System in Japan (招待講演)	Kodera Yuki	12th ACES International Workshop, 台北, 台湾	2025年11月6日	国外
Earthquake Interaction During Swarms Through a Modified ETAS Model (招 待講演)	Aso Naofumi	12th ACES International Workshop, 台北, 台湾	2025年11月6日	国外
Stochastic determination of arrival time and initial polarity (口頭発 表)	庄 建倉, 裴 璋 来, 周 仕勇	日本地震学会2025 年度秋季大会, 福 岡	2025年10月20日	国内
地震予測における異常現象 の確率評価と実用化への課 題 (一般講演)	尾形 良彦	日本地震学会2025 年度秋季大会, 福 岡	2025年10月20日	国内

ベイズ感度解析を用いた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, Wu Stephen, 溜瀧 功史, 伊庭 幸人	日本地震学会2025年度秋季大会, 福岡	2025年10月20日	国内
ETASモデルを利用した緊急地震速報の高度化（口頭発表）	山田 真澄, Wu Stephen, 矢野 恵佑, 溜瀧 功史, 野口 恵司, 林元 直樹, 鶴岡 弘	日本地震学会2025年度秋季大会, 福岡	2025年10月22日	国内
時空間ETASモデルにおける簡便化された非等方空間カーネル（ポスター発表）	岩田 貴樹	日本地震学会2025年度秋季大会, 福岡	2025年10月21日	国内
余震活動におけるETASパラメータ変動についての予備的考察（ポスター発表）	熊澤 貴雄, 尾形 良彦	日本地震学会2025年度秋季大会, 福岡	2025年10月21日	国内
Gaussian process modeling of time-dependent background seismicity（口頭発表）	牛 源源, 庄 建倉, Petrillo Giuseppe	日本地震学会2025年度秋季大会, 福岡	2025年10月20日	国内
2025年トカラ列島近海における群発地震活動の時空間発展（口頭発表）	加藤 愛太郎, 八木原 寛, 平野 舟一郎, 中尾 茂, 酒井 慎一	日本地震学会2025年度秋季大会, 福岡	2025年10月21日	国内
駿河トラフの浅い領域で数ヶ月間継続するスロースリップイベント（口頭発表）	三井 雄太, 菊地 祐次, 加納 将行	日本地震学会2025年度秋季大会, 福岡	2025年10月21日	国内
断層パラメータの直感的理解のためのビーチボール立体モデルの開発（ポスター発表）	麻生 尚文, 伊倉 真論, 日下部 秀太	日本地震学会2025年度秋季大会, 福岡	2025年10月20日	国内
2023年の伊豆大島北部における火山性地震の時空間分布（口頭発表）	荒川 日南子, 麻生 尚文	日本地震学会2025年度秋季大会, 福岡	2025年10月22日	国内
中米沈み込み帯・エルサルバドル沖における繰り返し地震の検出（口頭発表）	西川 友章	日本地震学会2025年度秋季大会, 福岡	2025年10月22日	国内
日向灘における群発地震検出とスロー地震との関係の調査（口頭発表）	吉村 嶺, 西川 友章	日本地震学会2025年度秋季大会, 福岡	2025年10月21日	国内
統計モデルを用いた大地震前の前震活動加速現象に関する全世界的調査（口頭発表）	小山 凱, 西川 友章	日本地震学会2025年度秋季大会, 福岡	2025年10月21日	国内
後続破壊のP波を用いたマグニチュード即時推定の試み（ポスター発表）	小寺 祐貴	日本地震学会2025年度秋季大会, 福岡	2025年10月21日	国内

松代地震から判ること（招待講演）	松浦 律子	日本地震学会2025年度秋季大会，福岡	2025年10月21日	国内
大地震の確率予測の展望 — 多項目予測法の活用 — （口頭発表）	尾形 良彦	2025年度統計関連学会連合大会，大阪	2025年9月10日	国内
点過程モデルを用いた異常地震活動の解析と余震の収束性について（口頭発表）	熊澤 貴雄，尾形良彦	2025年度統計関連学会連合大会，大阪	2025年9月10日	国内
線形磁化プラズマ装置におけるコヒーレント渦による間欠現象（口頭発表）	矢野 恵佑，佐々木 真，河内 祐一，山田 琢磨，小菅 佑輔，藤沢 彰英	2025年度統計関連学会連合大会，大阪	2025年9月10日	国内
気象庁の地震火山業務における先端AI活用とその課題（口頭発表）	溜渕 功史	2025年度統計関連学会連合大会，大阪	2025年9月10日	国内
On the Development of the ETAS Model in Seismicity Modeling（招待講演）	Zhuang Jiancang	The 3rd Joint Conference on Statistics and Data Science in China (2025 JCSDS)，杭州，中国	2025年7月13日	国外
Application of machine learning for earthquake early warning（招待講演）	Wu Stephen	The 3rd Joint Conference on Statistics and Data Science in China (2025 JCSDS)	2025年7月13日	国外
Investigating aseismic drivers of swarm-like seismicity（招待講演）	Petrillo Giuseppe	The 3rd Joint Conference on Statistics and Data Science in China (2025 JCSDS)	2025年7月13日	国外
Bayesian inference of spatiotemporal Hawkes processes（招待講演）	Niu Yuanyuan	The 3rd Joint Conference on Statistics and Data Science in China (2025 JCSDS)	2025年7月13日	国外
Stalking Impending Mainshocks with Sawtooth Envelopes（口頭発表）	Petrillo Giuseppe., Lippielo Eugenio, DalZilio, L. and Godano, C.	海城地震50周年記念国際シンポジウム，瀋陽，中国	2025年7月10日	国外

Quantifying Earthquake Predictability and Advancing Forecasting (招待ポスター)	Zhuang Jiancang	海城地震50周年記念国際シンポジウム, 瀋陽, 中国	2025年7月10日	国外
Deciphering Early Aftershock Behaviors Following Moderate-size Earthquakes in the Cahuilla swarm (招待講演)	Peng Zhigang, Ding Changchang, Si Xu, Zhuang Jiancang	海城地震50周年記念国際シンポジウム, 瀋陽, 中国	2025年7月9日	国外
Earthquake forecasting based on b value and background seismicity in Yunnan, China (口頭発表)	Wang Rui, Zhang Yuchen, Shi Haixia, Miao Miao, Zhuang Jiancang, Chang Ying, Jiang Changsheng, Meng Lingyuan, Li Danning, Liu Lifang, Su Youjin, Zhang Zhenguo, Han Peng	海城地震50周年記念国際シンポジウム, 瀋陽, 中国	2025年7月9日	国外
Earthquake Modeling Incorporating Physical Observations (ポスター発表)	Chen Hongyan, Wang Rui, Zhuang Jiancang, Huang Qinghua, Hattori Katsumi, Han Peng	海城地震50周年記念国際シンポジウム, 瀋陽, 中国	2025年7月10日	国外
Flexible Seismicity Modeling With Modulated Neural Renewal Processes (口頭発表)	Zhan Chengxiang, Zhuang Jiancang, Wu Stephen	海城地震50周年記念国際シンポジウム, 瀋陽, 中国	2025年7月9日	国外
Incorporating Non-Seismic Precursors into Earthquake Forecasting Models (ポスター発表)	Zhang Yiquan, Zhuang Jiancang, Han Peng, Zhu Kaiguang	海城地震50周年記念国際シンポジウム, 瀋陽, 中国	2025年7月10日	国外
情報理論に基づく地震予測可能性の定量化 (口頭発表)	庄 建倉	日本地球惑星科学連合 (JpGU) 2025年大会, 幕張	2025年5月30日	国内
Gaussian Process Model for Spatio-temporal Background Seismicity (口頭発表)	牛 源源, 庄 建倉	日本地球惑星科学連合 (JpGU) 2025年大会, 幕張	2025年5月26日	国内

Earthquake forecasting based on b value and background seismicity in Yunnan, China (口頭発表)	Wang Rui, Zhang Yuchen, Han Peng, Shi Haixia, Miao Miao, Zhuang Jiancang, Chang Ying, Jiang Changsheng, Meng Lingyuan, Li Danning, Liu Lifang, Su Youjin, Zhang Zhenguo	日本地球惑星科学連合(JpGU)2025年大会, 幕張	2025年5月25日	国内
Stress-informed ETAS model and its application to reservoir earthquakes (招待講演)	韓 鵬, Wang Rui, Miao Miao, Zhao Cuiping, Lu Renqi, Lei Hongfu, Yao Mendi, 庄 建倉, Huang Qinghua, 服部 克巳	日本地球惑星科学連合(JpGU)2025年大会, 幕張	2025年5月25日	国内
Integrating Seismo-Magnetic Anomalies and the ETAS Model (口頭発表)	李 文超, 服部 克巳, 吉野 千恵, 庄 建倉	日本地球惑星科学連合(JpGU)2025年大会, 幕張	2025年5月25日	国内
階層型時空間ETAS (HIST-ETAS) モデルを用いた広域地震予測 (口頭発表)	尾形 良彦	日本地球惑星科学連合(JpGU)2025年大会, 幕張	2025年5月28日	国内
日向灘沖南部の余震活動について (口頭発表)	熊澤 貴雄, 尾形 良彦	日本地球惑星科学連合(JpGU)2025年大会, 幕張	2025年5月28日	国内
Site selection based on Bayesian sensitivity for EEW (口頭発表)	矢野 恵佑, 山田 真澄, ウ・ステファン, 溜淵 功史	日本地球惑星科学連合(JpGU)2025年大会, 幕張	2025年5月26日	国内
On the recurrence of slow slip events using the BPT distribution (ポスター発表)	矢野 恵佑, 加納 将行, 堀 高峰, 有吉 慶介	日本地球惑星科学連合(JpGU)2025年大会, 幕張	2025年5月28日	国内
台湾の強震ネットワークを利用したIPFx法のオンライン試験 (口頭発表)	山田 真澄, 陳 達毅, 張 毓軒	日本地球惑星科学連合(JpGU)2025年大会, 幕張	2025年5月28日	国内
非定常化された時空間ETASモデル (ポスター発表)	岩田 貴樹	日本地球惑星科学連合(JpGU)2025年大会, 幕張	2025年5月28日	国内
Characteristics of seismicity before and after the 2023 Turkey earthquakes (ポスター発表)	楠城 一嘉, 熊澤 貴雄, 井筒 潤, 堀 高峰, 長尾 年恭, 尾池 和夫	日本地球惑星科学連合(JpGU)2025年大会, 幕張	2025年5月28日	国内

Time-dependent activity of LFE and ordinary earthquakes in Izu Peninsula (口頭発表)	楠城 一嘉, 行竹 洋平, 熊澤 貴雄	日本地球惑星科学連合 (JpGU) 2025年大会, 幕張	2025年5月28日	国内
Global investigation of foreshock acceleration prior to large earthquakes (口頭発表)	小山 凱, 西川 友章, 西村 卓也	日本地球惑星科学連合 (JpGU) 2025年大会, 幕張	2025年5月27日	国内
複数のGNSS測位解を用いた2014-2016年紀伊水道スロースリップイベントの時間発展 (ポスター発表)	岡田 望海, 三井 雄太, 加藤 愛太郎	日本地球惑星科学連合 (JpGU) 2025年大会, 幕張	2025年5月26日	国内
房総スロースリップイベント高解像度推定 (ポスター発表)	三井 雄太, 新井 璃子, 渡邊 栞	日本地球惑星科学連合 (JpGU) 2025年大会, 幕張	2025年5月30日	国内
スロー地震・繰り返し地震の物理メカニズム (ポスター発表)	渡邊 悠樹, 三井 雄太	日本地球惑星科学連合 (JpGU) 2025年大会, 幕張	2025年5月30日	国内
伊豆大島近海の浅部における火山性地震に見られる線状構造 (口頭発表)	荒川 日南子, 麻生 尚文	日本地球惑星科学連合 (JpGU) 2025年大会, 幕張	2025年5月29日	国内
再帰型ニューラルネットワークを用いたb値推定 (口頭発表)	麻生 尚文	日本地球惑星科学連合 (JpGU) 2025年大会, 幕張	2025年5月26日	国内
Strain rate field estimation in Southeastern Europe (ポスター発表)	上田 拓, Socquet Anne, Métois Marianne, 岡崎 智久, 西村 卓也	日本地球惑星科学連合 (JpGU) 2025年大会, 幕張	2025年5月28日	国内
Anomaly Detection Using a Probabilistic Model for Tectonic Tremors (口頭発表)	矢野 誠也, 井出 哲, 野村 俊一	日本地球惑星科学連合 (JpGU) 2025年大会, 幕張	2025年5月28日	国内
海底地震津波観測網を活用した日向灘から四国沖の地震分析 (ポスター発表)	溜瀧 功史, 秋山 加奈, 岩切 一宏	日本地球惑星科学連合 (JpGU) 2025年大会, 幕張	2025年5月28日	国内
よりロバストなP波PLUM法の検討 (ポスター発表)	小寺 祐貴	日本地球惑星科学連合 (JpGU) 2025年大会, 幕張	2025年5月29日	国内
地震研究における大規模言語モデル活用の挑戦 (口頭発表)	久保 久彦, Wu Stephen, 加納 将行, 加藤 慎也, 小穴 温子, 岡崎 智久, 岡田 望海, 亀 伸樹, 小寺 祐貴, 佐藤 大祐, 椎名 高裕, 下條 賢梧, 溜瀧 功史, 直井 誠, 西山 竜一,	日本地球惑星科学連合 (JpGU) 2025年大会, 幕張	2025年5月26日	国内

	平原 和朗, 宮本 崇, 山田 真澄			
新しい日本および周辺の歴史地震・被害地震カタログについて (口頭発表)	松浦 律子, 加納 靖之	日本地球惑星科学 連合 (JpGU) 2025年 大会, 幕張	2025年5月26日	国内
Quantifying Earthquake Predictability and Advancing Forecasting (口頭発表)	Zhuang Jiancang	EGU General Assembly 2025, ウィーン, オース トリア	2025年4月29日	国外
Evaluating Earthquake Forecast with Likelihood-Based Scores (口頭発表)	Zhuang Jiancang	EGU General Assembly 2025, ウィーン, オース トリア	2025年5月2日	国外
Non-stationary GP-ETAS model (ポスター発表)	Niu Yuanyuan, Zhuang Jiancang	EGU General Assembly 2025, ウィーン, オース トリア	2025年4月30日	国外

2. 学会誌・雑誌等における論文掲載

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
Yearly-scale deep crustal fluid transfer implied by gravity changes from in-situ observations around the 2021 Yangbi MS6.4 earthquake, China	Wang, L.; Chen, S.; Zhuang, J.; Liu, Y.; Jia, L.; Han, J.; Zhang, B.; Li, Y.	Tectonophysics	2026年03月04日	海外
A Full Space-Time-Magnitude Extreme - Event Distribution for an ETAS Cluster	Petrillo, G.; Spassiani, I.; Zhuang, J.	Seismological Research Letters	2026年03月03日	海外
NESTORE algorithm: a machine learning approach for strong aftershock forecasting	Gentili, S.; Brondi, P.; Chiappetta, G.D.; Petrillo, G.; Zhuang, J.; Anyfadi, E.-A.; Vallianatos, F.; Caravella, L.; Magrin, E.; Comelli, P.; Di Giovambattista, R.	Bulletin of Geophysics and Oceanography	2026年02月13日	海外
Seismicity insights and forecasting with Delaunay-based hierarchical models	Ogata, Y.	Earth Planets Space	2026年02月10日	国内

Interplay Between Slow - Slip Events and Seismicity in the Hikurangi Subduction Zone Revealed by a New High - Resolution Catalog	Allen, J. ; Wang, T. ; Bebbington, M. ; Chamberlain, C. J. ; Zhuang, J.	Seismological Research Letters	2026年01月05日	海外
Exploring tidal modulation of seismicity in Southern California	Lu, W. ; Xue, L. ; Yue, H. ; Zhuang, J. ; Zhao, L.	JGR: Solid Earth	2025年12月21日	海外
Incorporating non-seismicity precursors into earthquake probabilistic forecasting model	Zhang, Y. ; Han, P. ; Chen, H. ; Zhan, C. ; Niu, Y. ; Zhuang, J. ; Zhu, K.	Geophysical Research Letters	2025年12月16日	海外
統計地震学の現場から：ETASモデルで地震活動を読み解く	尾形良彦	月刊統計	2025年12月	国内
Statistical characteristics of seismicity correlated with crustal fluids in the Noto Region	Guo, Y. ; Zhuang, J. ; Yin, G. ; Zhang, H.	JGR: Solid Earth	2025年09月17日	海外
Modeling Seismic Intensity Envelopes for Earthquake Early Warning Applications	Peng, H. ; Yamada, M. ; Wu, S.	BSSA	2025年08月14日	海外
Identification of Higher-mode Numbers in Dispersion Curves for Rayleigh Wave Inversion	Yang, X.H. ; Han, P. ; Zhuang, J. ; Zhou, Y. ; Bai, G. ; Li, R.	IEEE TGRS	2025年07月14日	海外
Spatio-temporal characteristics in the GEONET F5 solution in the frequency domain estimated based on the robust spectral analysis	Kano, M. ; Yano, K. ; Tanaka, Y. ; 他	Earth Planets Space	2025年07月01日	国内
Revisiting seismicity criticality	Li, J. ; Sornette, D. ; Wu, Z. ; Zhuang, J. ; Jiang, C.	JGR: Solid Earth	2025年06月18日	海外
Bi-segment fault rupture and long-lasting intraslab aftershock activity during the 2017 Mw 8.2 Tehuantepec, Mexico earthquake	Chen, F. ; Wang, D. ; Xu, S. ; Yan, B. ; Zhang, J. ; Guo, Y. ; Yao, D. ; Zhuang, J. ; Suárez, G. ; Shearer, P.	JGR: Solid Earth	2025年06月15日	海外

The Influence of Stress Release on the Spatial and Magnitude Distribution of Subsequent Earthquakes	Petrillo, G. ; Lippiello, E. ; Zhuang, J. ; Marzocchi, W.	Geophysical Journal International	2025年06月09日	海外
Non-randomness of Japan megaquakes implied by stress recovery and accumulation	Nanjo, K. Z. ; Hori, T. ; Iwata, D.	Communications Earth & Environment	2026年02月05日	海外
Changes in seismicity in a volcanically active region of the Izu Peninsula, Japan	Nanjo, K. Z. ; Yukutake, Y. ; Kumazawa, T.	Journal of Volcanology and Geothermal Research	2025年09月1日	海外
What Triggered the 2021 eruption at Nyiragongo volcano (DR Congo)? Unraveling the Complex Interplay between tectonism and magmatism	Bantidi, T. M. ; Nishimura, T. ; Nanjo, K. ; Enescu, B. ; Ishibe, T. ; Tuluka, G. M.	Journal of Volcanology and Geothermal Research	2025年08月14日	海外

(注) 発表者氏名は、連名による発表の場合には、筆頭者を先頭にして全員を記載すること。