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６年度
成果報告書

令和７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：

震源メカニズムを組み込んだ高次元時空間 ETAS モデルによる世界地震活動の解析

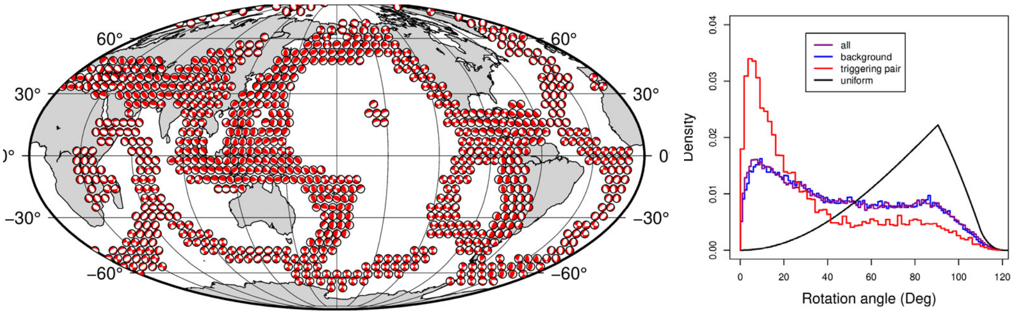



図 1. （左の図）世界中で起きた多くの地震について、震源球を用いて各地域の「震源メカニズム」の平均を示す。震源メカニズムとは、地震のときに断層がどのように動いたか、つまり地面がどの方向に押されたり引かれたりしたかを表すものであり、震源球という図でその特徴を見やすく表現できる。（右の図）震源球を使って、ある基準となる震源メカニズムから実際の地震の震源メカニズムがどれくらい異なっているかを「回転角（角度の差)」で表し、その角度の分布（どの角度が多いか）をグラフで示す。ここでは地震を、「背景地震」と「クラスター地震」の 2 種類に分けて考える。背景地震は日常的にばらばらに発生する地震で、その地域の平均的な震源メカニズムを基準に比較する。一方、クラスター地震は短時間・狭い範囲に集中して発生する地震で、最初に起きた「親地震」の震源メカニズムを基準にして比較する。

引き続き異常現象の相関性の評価及び地震発生予測の検証

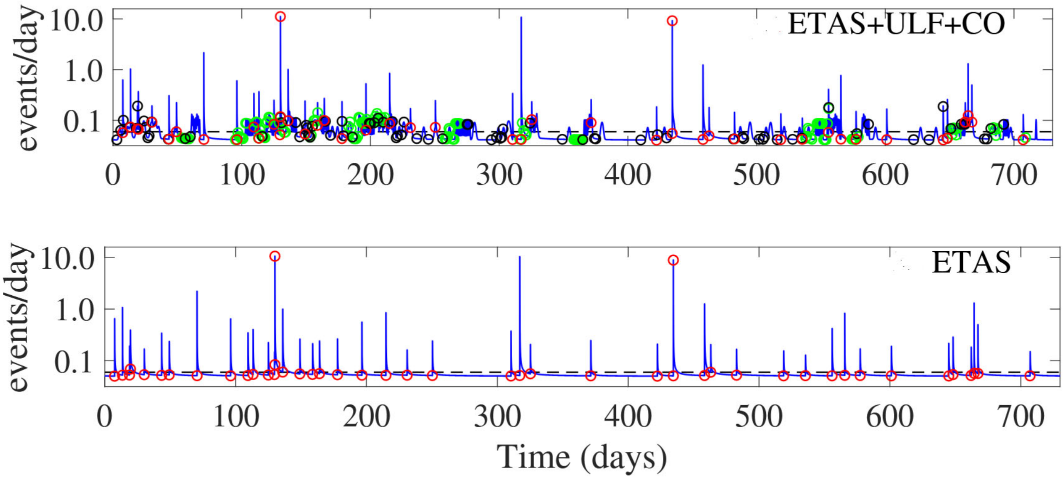
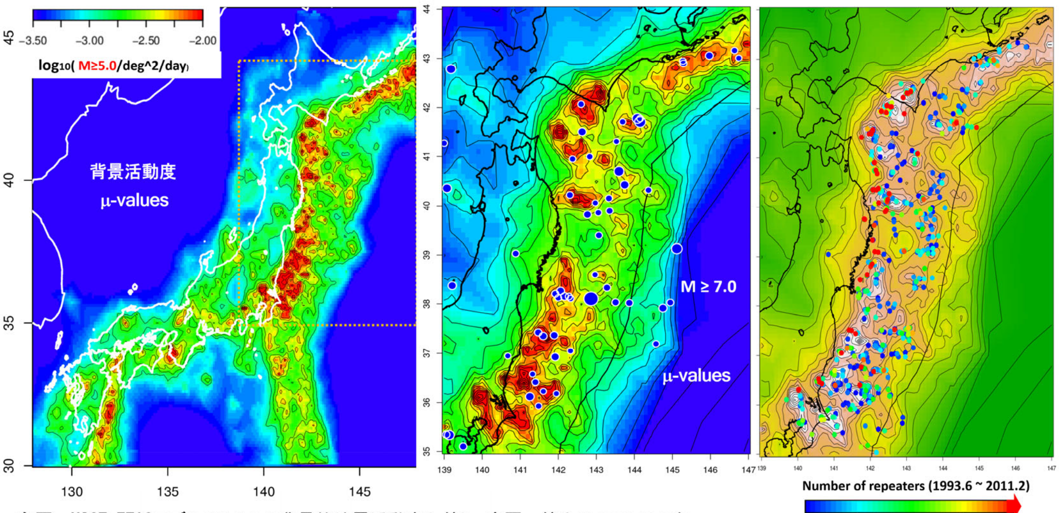



図 2. 2001 年から 2010 年にかけて茨城県柿岡周辺で発生したマグニチュード 4.0 以上の地震について、標準的 ETAS モデル（下図）および ULF 地磁気の変化と一酸化炭素（CO）濃度の変化を外部励起要因として加えた拡張 ETAS モデル（上図）により解析を行い、条件付き強度を推定（表示期間：2003 年初め～2004 年末)。横軸は 2003 年 1 月 1 日からの日数を示す

テーマＢ：
HIST-ETAS モデルによる背景地震活動の研究




左図：HIST-ETASモデルのM≥5の背景的地震活動率（μ値）。中図：μ値上の1923-2018年M≥7.0の分布（青円盤）。右図：小繰り返し相似地震の発生位置と繰返し回数（円盤の色）。

図 3. 過去の地震活動を分析し、背景地震活動を推定することで、大規模地震や繰り返し発生する小規模地震がどのような影響を受けるかを調査している。背景地震活動が活発な地域では、大規模地震の発生確率が高まる傾向がある。また、小規模な繰り返し地震は、地殻のストレス変化の影響を受け易く、地震の発生頻度に関係すると考えられる。

日本全域の時空間検出率のモデル化による HIST-ETAS モデルの発生率の補正

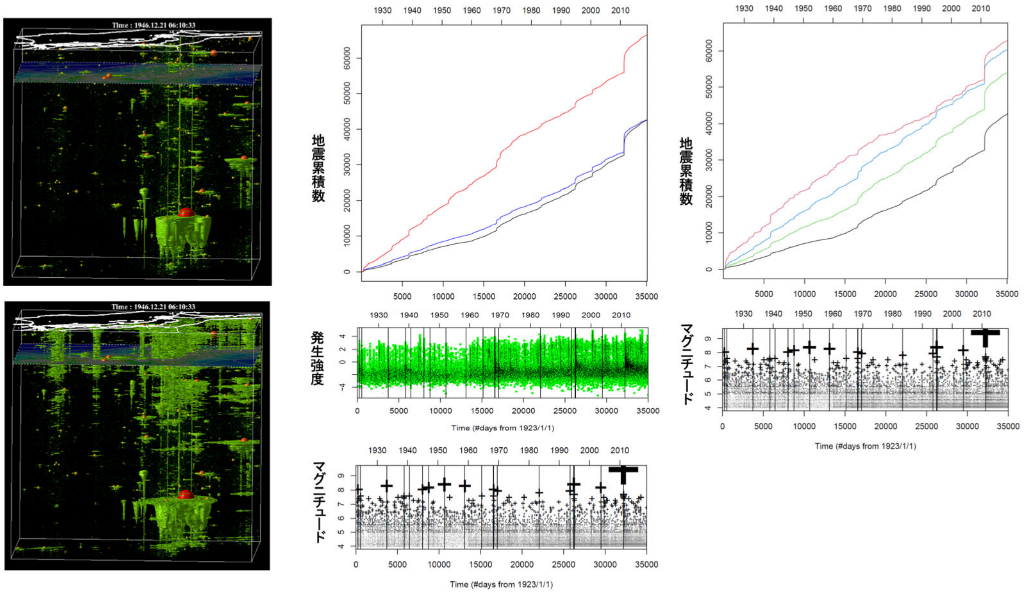



図 4. HIST-ETAS モデルは地震の発生パターンを予測する。しかし、下限のマグニチュード値が小さいと、地震記録には見落としがあり、そのままでは正確な分析が難しい。そこで、地震の検出率を考慮して活動度を補正して、より精度の高い地震発生率を求めることができる。詳細は本文参照。

テーマＣ：

GNSS 速度ベクトルに基づく観測点の客観的グルーピング法

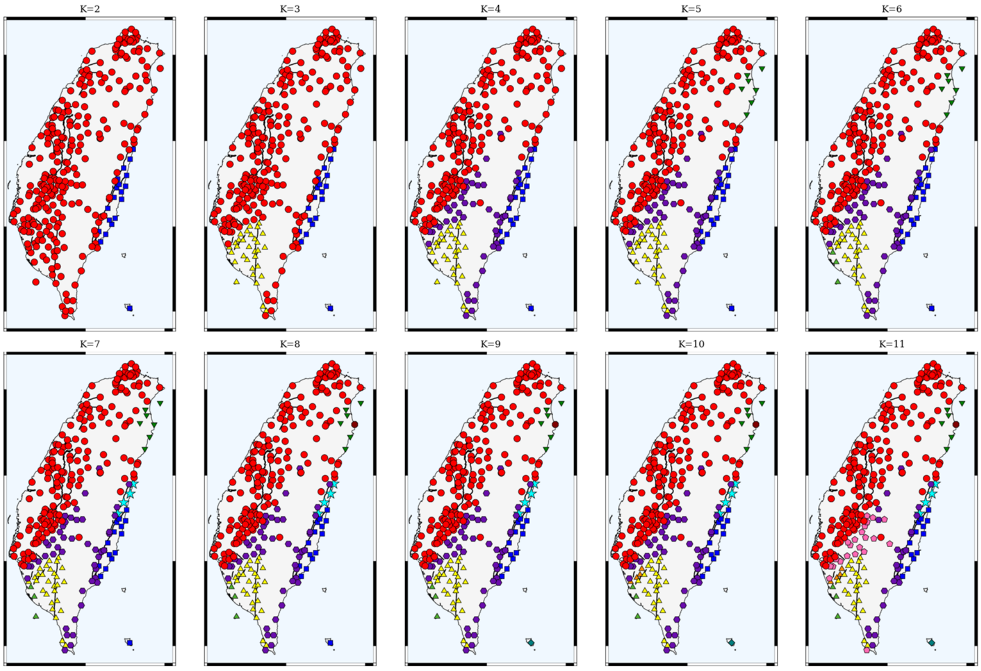



図 5. 地球の丸い形（球面）を考慮して、GNSS（全地球航法衛星システム）によって観測された地面の動きをもとに、観測点を自動的にグループ分けする方法を紹介する。この手法では、「多様体論」という数学的な枠組みを使って、各観測点の地面の動く速さと方向（速度ベクトル）だけから、グループを作成する。

この方法を台湾の GNSS データに適用し、得られたグルーピングの結果を図に示す。速度ベクトルの情報だけを用いるにもかかわらず、地質の境目——たとえば断層や地質構造の区切り——にうまく対応したグループ分けが得られることを確認する。

つまり、地下構造の詳細な情報を使わずに、地表の動きから地質的な特徴をとらえることが可能であることを示す。(Takahashi, Yano, Kano, 2025)

テーマＤ：

ETAS 予測を拡張 IPF 法の事前情報に活用

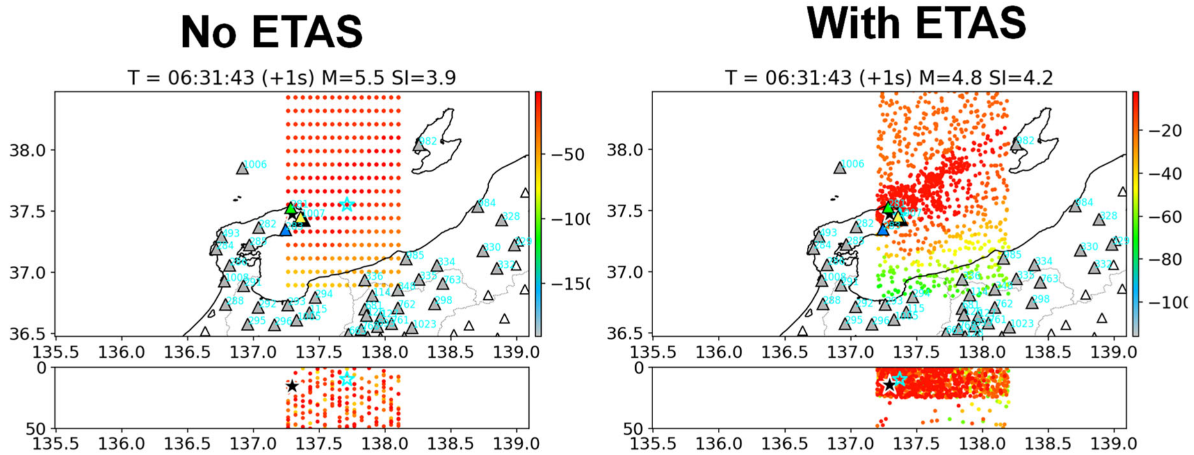



図 6. 2024 年 6 月 3 日に発生した能登半島地震について、「拡張 IPF 法」と呼ばれる方法を使って震源の位置を予測した例を示す。このとき、「ETAS モデル」による地震発生の予測を組み込むことで、震源の予測精度を高めることができた。

ETAS モデルとは、「ある地震が起きると、その周囲でしばらく地震が起きやすくなる」という性質をもとに、次にどこで地震が起きそうかを予測する統計モデルである。過去の地震の発生場所や時刻をもとに、地震の起こりやすさを計算する。拡張 IPF 法とは、多くの観測データから、地震の震源の位置を推定するための計算手法であり、地震直後の限られたデータからでも震源をできるだけ正確に推定することを目的とする。左の図は、ETAS 予測を使わずに震源を予測した結果を示す。右の図は、ETAS 予測を組み込んだ場合の結果を示す。ETAS 予測を組み込むことにより、地震発生直後の段階でも、より正確に震源の位置を推定することができることがわかる。

## 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 6 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 ........ ２８
　(1)　業務の内容 ........ ２８
　(2)　令和 6 年度の成果 ........ ２９
　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 ........ ４４
　(1)　業務の内容 ........ ４４
　(2)　令和 6 年度の成果 ........ ４５
　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 ........ ５３
　(1)　業務の内容 ........ ５３
　(2)　令和 6 年度の成果 ........ ５４
３．まとめ ........ ６１
４．活動報告 ........ ６２
５．むすび ........ ６５

## 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エアの開発、および即時地震動予測精度の可視化ソフトウエアの提供。

## 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<br>統計基盤数理研究系<br>教授 | 庄　建倉 | R6.4.1<br>～<br>R7.3.31 | 26,995,386 円 | 8,098,614 円 |
| 県立広島大学<br>大学教育実践センター<br>准教授 | 岩田　貴樹 | R6.4.1<br>～<br>R7.3.31 | 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

引き続き GNSS 異常現象による地震活動解析に取り組む。研究者が使用できるように、ETAS モデルの標準的バージョンをスタンドアローンの実行可能プログラムとともに統合することにより、再コード化可能なライブラリを開発する。

(d) 令和６年度の業務の目的

1) A-1 高次元 ETAS モデル

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（令和５年度リリース）を用いて、F-net 地震カタログデータおよびグローバル GCMT カタログデータを解析し地震発生予測の数値実験を行う。さらに、地震発生予測を行ううえで、短期余震欠測の考慮が必要なため、令和６年度には、ETAS モデルに関して、短期的余震欠測データの推定を考慮して解析を行うための、モンテカルロ法を用いたモデルを開発する。

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

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ることにより、背景応力場と背景地震活動の推定手法の精密化を計る。併せて処理された GNSS などの地殻変動データから得られる歪みデータを入力とした地震活動モデルの構築も行う。

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５年度に背景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、「重み付き尤度に基づく非ベイズカーネル型モデル」を実装した。令和６年度は「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を比較評価する。

4) A-4 異常現象の因果性の評価と外部変数入力

地震確率予測のための機械学習や AI に基づく点過程モデルを開発し、異常現象の要因を付加した解析モデル開発し、検証を行う。可能であれば、標準的 ETAS モデルとの予測結果を比較評価する。

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

通常の地震活動の相対的静穏化・活発化や群発活動などの、モデルの非適合度などで、統計的異常現象を抽出し、ゆっくりすべりなどに起因する応力変化などの物理的解釈のもとで、スロー地震と微震活動との関連性のモデリングを検討する。

## (2) 令和6年度の成果

### (a) 業務の要約

1) A-1 高次元 ETAS モデル

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、グローバル GCMT カタログデータを解析した。また、欠測データの推定を行うために、モンテカルロ法を用いた GP-ETAS モデルを開発した。

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

摩擦構成則に基づく地震活動モデル（Dieterich モデル）による背景地震活動および背景応力場推定に向けて、時空間 ETAS モデルの背景地震活動をスプライン関数で表現することで客観的な平滑化重みによる推定を行った。また、Dieterich モデルを地震活動のクラスター成分の表現に用いることも考え、同モデルの時空間化の際、応力の空間的拡がりを表現する関数に工夫を施した。

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

令和 6 年度は「重み付き尤度に基づく非ベイズカーネル型モデル」を能登半島地域の地震活動に適用した。点過程における Janossy 密度理論に基づき、予測性能を比較するための周辺スコア（Marginal score）および条件付きスコア（Conditional score）評価法を開発した。

4) A-4 異常現象の因果性の評価と外部変数入力

地震確率予測のための機械学習に基づく点過程モデルを開発し、標準的 ETAS モデルとの予測結果を比較した。また、複数の種類の非地震性の地球物理学的および地球化学的異常と地震活動との相関性を解析した。

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

非定常 ETAS モデルを使用して、イタリアと日本における SSE（ゆっくりすべり）や流体誘発などの外部励起要因を検証した。このような外部励起要因は重力観測結果とも矛盾しない。SSE の点過程モデリングと、それが地震活動に与える影響の解析を試みた。

(b) 業務の成果

1) A-1 高次元 ETAS モデル

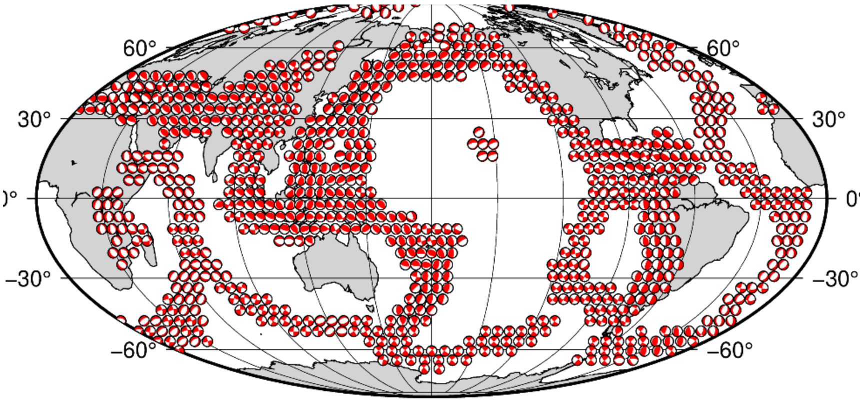
a) 震源メカニズムを組み込んだ高次元時空間 ETAS モデルによる世界地震活動の解析

3D 震源メカニズムを組み込んだ球面 ETAS モデルを以下のように提案した。

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

上式において$\phi$は震源メカニズムを表し、$\Delta(\phi_1,\ \phi_2)$はメカニズム$\phi_2$から$\phi_1$への回転角度を表し、$\phi_0(x,y,z)$は位置$(x,y,z)$での基準震源メカニズムである。背景地震と誘発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回転角密度で表すことができる。なお、背景地震の基準メカニズムは背景地震の地域平均メカニズムであり、誘発地震の基準機構は本震メカニズムであるという違いがある。各領域の平均震源メカニズムとし、誘発地震では本震のメカニズムを採用したモデルを実装した。計算の実装では、局所平均局所震源機構を得るために Kagan & Jackson (2014)によって提案された平滑化アルゴリズムとベータ分布に基づくカーネル関数を使用し、確率的再構築法を使用して$\zeta$と$\xi$をノンパラメトリックに推定された。

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 モデルを GCMT 地震カタログに適用した。その結果、新しいモデルではデータの適合度が改善され、予測尤度が向上した。



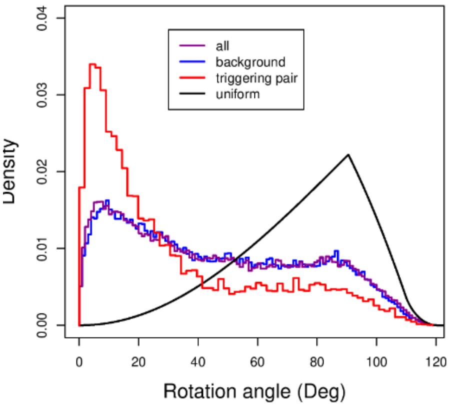




図 1. （左）全球的な背景地震活動における平均震源メカニズム。（右）基準となる震源メカニズムから、全球的な背景地震およびクラスター化した地震活動における震源メカニズムへの回転角の確率密度関数。背景地震については、基準として平均震源メカニズムを、クラスター地震については親地震の震源メカニズムをそれぞれ用いる。

b） ベイズ型モンテカルロ推論：GP-ETAS モデル

GP-ETAS モデルは、地震の発生と予測を行うために統計的地震学で広く用いられている、従来の ETAS モデルの拡張版である。従来の ETAS モデルでは、背景地震活動度（すなわち、他の地震によって誘発されない自然発生的な地震の発生率）は一定、もしくは比較的単純な関数によって表現されていたのに対し、GP-ETAS モデルでは、ガウス過程（Gaussian Process）を用いてこの背景活動度を非パラメトリックにモデル化する。

GP-ETAS モデルにおける条件付き強度関数は以下のように定義される。

$$\lambda(t, \boldsymbol{x}, m) = \mu(\boldsymbol{x}) + \sum_{i:t_i<t} \varphi(t - t_i, \boldsymbol{x} - \boldsymbol{x}_i, m_i),$$

ここで、背景地震活動度$\mu(x)$には、シグモイド関数をリンク関数としたガウス過程事前分布（Gaussian Process prior）が与えられている：

$$\mu(\boldsymbol{x}) = \frac{\bar{\lambda}}{1 + \exp\big(-f(\boldsymbol{x})\big)}$$

関数 $f(x)$は平均ゼロ、共分散関数がガウスカーネルであるガウス過程として定義されている。統計的推論を構成するために、以下の 3 段階の尤度拡張（Likelihood Augmentations）が用いられる。

拡張 1. 潜在的な分岐構造：Zhuang ら（2002）による確率的デクラスタリング法を用いて、各地震イベントが背景地震か誘発地震かの確率を推定する。

拡張 2. ポリャ-ガンマ乱数変数（Pólya-Gamma random variables）：シグモイド関数をポリャ-ガンマ分布に基づく無限スケールのガウス混合として表現し、ベイズ的ロジスティック回帰問題と同様に扱う（Polson ら，2013）。

拡張 3. マーク付きポアソン過程（Marked Poisson process）による積分処理：最終ステップにおいて現れる積分は、マーク付きポアソン過程からの多数のサンプルによって数値積分される。

Gibbs サンプリングによる推論アルゴリズムを図 2 に示す。

**Gibbs sampling algorithm**

Initialise $\bar{\lambda}^{(0)}$, $\boldsymbol{f}^{(0)}$, $\boldsymbol{\theta}_\varphi^{(0)}$ from the prior densities;
**for** $k = 1$ **to** $K$ **do**
- **Inference of the latent branching structure:**
- Sample the branching structure $Z^{(k)} \,|\, \mathcal{D}, (\mu(\boldsymbol{x}))^{(k-1)}, \boldsymbol{\theta}_\varphi^{(k-1)}$ ;
- **Inference of the triggering parameters: MH**
- **Inference of the background intensity:**
- Sample the latent Poisson process $\Pi_{\hat{\mathcal{X}}}^{(k)} \,|\, \bar{\lambda}^{(k-1)}, \boldsymbol{f}^{(k-1)}$ ;
- Sample Pólya–Gamma random variable $\omega_i^{(k)}$ for $\forall i : z_i = 0$, $\omega_i^{(k)} \,|\, \mathcal{D}, \boldsymbol{f}_i^{(k-1)}, Z^{(k)}$ ;
- Sample upper bound $\bar{\lambda}^{(k)} \,|\, Z^{(k)}, \Pi_{\hat{\mathcal{X}}}^{(k)}$;
- Sample Gaussian process at inducing points $\boldsymbol{f}_{\text{ind}}^{(k)} \,|\, \mathcal{D}, Z^{(k)}, \boldsymbol{\omega}_{\mathcal{D}}^{(k)}, \boldsymbol{\omega}_{\Pi_{\hat{\mathcal{X}}}}^{(k)}$ ;
- Gaussian process prediction $(\boldsymbol{f}^*)^{(k)} \,|\, \boldsymbol{f}_{\text{ind}}^{(k)}$;
- Sample hyperparameters using MH step ;
- Update the background intensity $(\mu(\boldsymbol{x}))^{(k)}$ ;

**end**

図 2. Gibbs サンプリングによる GP-ETAS の推論アルゴリズム

計算の複雑さを軽減するために、誘導点（inducing point）手法を導入する。

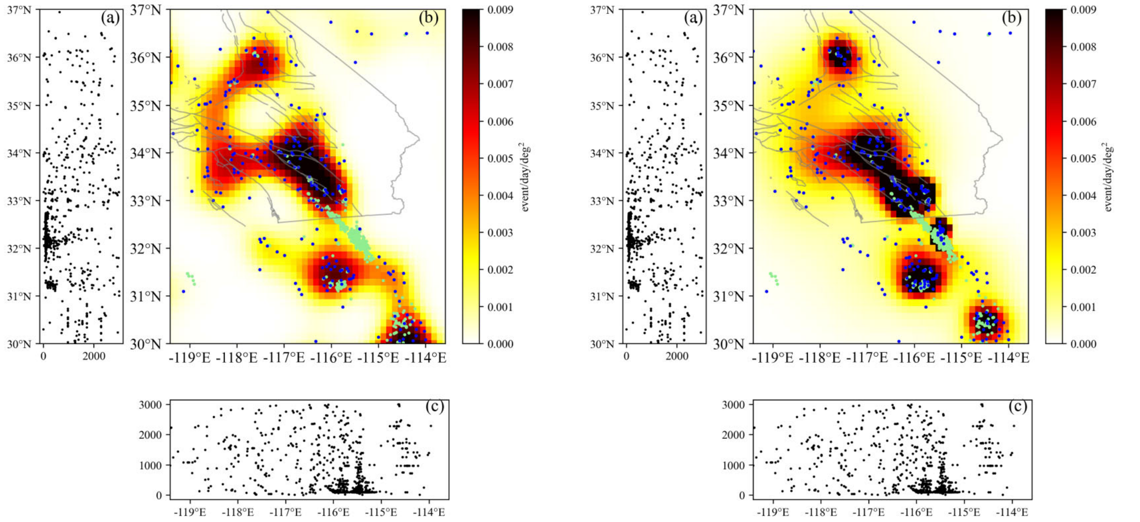



図 3.（左） カリフォルニア地域の実データを用いた実験では、ベイズ法によって得られた結果からクラスター中心が明確に捉えられ、その内部のイベントは誘発地震であると推定された。（右）一方、最尤推定法（MLE）による結果では、このような特徴は見られなかった。

これは、背景活動度に特定の関数形を仮定せず、データからパターンを柔軟に学習し、かつ不確実性を定量化できるという特徴を持つ。推定には MCMC（マルコフ連鎖モンテカルロ法）に基づくベイズアプローチを採用しており、複雑に変動する地域においても、背景地震活動をより柔軟かつ高精度にモデル化でき、地震発生直後に余震カタログが一時的に不完全となる短期的欠測データの問題に対しても、有効な推定手段として応用可能である。

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

ETAS モデルを改良するものとして「摩擦構成則」に基づく Dieterich モデルの導入に引き続き取り組んだ。令和 5 年度までの研究において、ETAS モデルは地震活動を「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」とに分解して地震活動のモデリングを行い、トレンド成分が Dieterich モデルで表し得るものとして時空間版 ETAS モデルを拡張し、より現実的なモデリングを試みた。この際、Dieterich モデルを支配する応力レートは（ある程度）滑らかに変動とする平滑化条件を課すが、非線形性が強いという Dieterich モデルの性質ゆえに推定の際モンテカルロ的な手法を用いているため、平滑化拘束の強さを客観的に求めることが困難であるという問題を抱えていた。これに対応するために、一旦トレンド成分を Dieterich モデルに換えてスプライン関数で表現することにより、まず客観的に平滑化拘束の強さとそれに対応したトレンドを求め、それに合うよう改めて

Dieterich モデルに基づくトレンド（と対応する応力レート）を求めることを考えた。それに向け、トレンド成分をスプライン関数で表現したモデル計算の実装を行った。

同様のことは、時間 ETAS モデルに対して既に行われており、「非定常 ETAS モデル」と呼ばれているが、同モデルを拡張して時空間 ETAS に対して「非定常化」を行った。実装されたモデルを 2018 年胆振東部地震後に発生した群発的な活動に適用したところ、このモデルによるトレンド変化を捉えることが出来た。

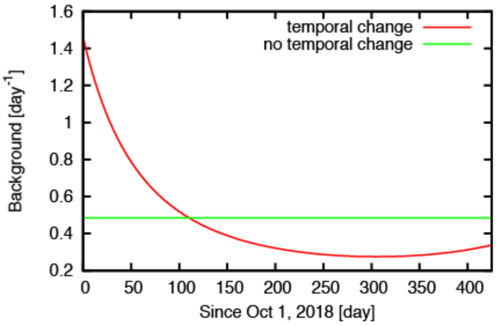



図 4. 2018 年北海道胆振東部地震後に生じた群発地震的な活動に対して、非定常化した時空間 ETAS モデルによりトレンド成分を求めた結果（赤線）。緑線はトレンド成分に時間変化を入れなかった場合。

また、現在は Dieterich モデルを「トレンド成分」にのみ適用しているが、ETAS モデルと共に「クラスター成分」を表すのに用いることも考えられる。この準備のため、Dieterich モデルそのものの時空間化への拡張も行った。ある地震による応力の空間的な拡がりを表現する関数（カーネル関数）の型を、これまで用いられている指数型からべき型に換えるといった工夫を行い、従来よりも実際の地震活動への適合性がよりよいモデルを構成することが出来た。

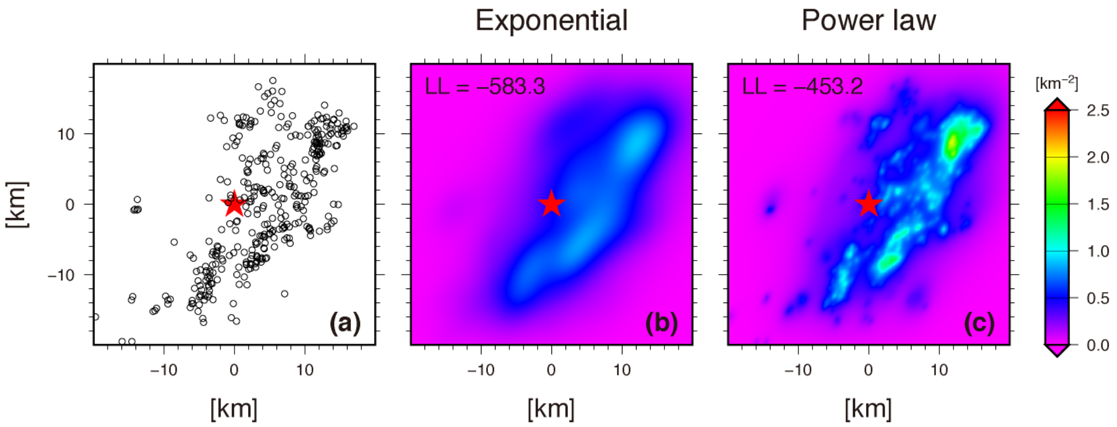



図 5. 2004 年新潟県中越地震の余震（黒丸、図 a）に対して、時空間版の Dieterich モデルから得た余震の空間分布。従来研究で用いられている指数型の空間カーネル（図 b）と今回導入したベキ型（図 c）との比較。左上の数字は対数尤度（LL）の値を、赤星は本震震央をそれぞれ示す。

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

a） 能登地域地震活動の解析予測

条件付き強度のマルチンゲール特性に基づいて、以下の時空間点過程に対する加重尤度を設計し、「重み付き尤度に基づく非ベイズカーネル型モデル」ソフトウエアをリリースした。

$$\log LL\,(x,y) = \sum_i \hbar(x_i - x, y_i - y)\log\lambda\,(t_i, x_i, y_i) - \int_0^T \iint_S \hbar(\xi - x, \zeta - y)\lambda(u,\xi,\zeta)d\xi d\zeta\, du$$

ここでλは条件付き強度、h は重み関数であり、通常カーネル関数の形をとる。図 6 に示すような気象庁カタログの地震データを用いて、最大重み付き尤度法により推定された能登地域における ETAS パラメータの空間変動を計算した。解析結果から、点過程に対する重み付き尤度推定量は、モデルが空間的、時間的、時空間的にどのように変化するかを探索する、すなわち、ETAS の各パラメータの最大重み付き尤度推定の空間的な変動は、地域によって異なる特徴を示した。

HIST-ETAS モデルと重み付き尤度推定（WLE）の違いは、誘発応答率において、HIST-ETAS がターゲットの位置に基づくモデルであるのに対し、WLE はソースの位置に基づくモデルであるという点にある。このようなアプローチにより、ETAS パラメータの空間的変動が明らかとなり、地域地震動に対する高分解能の確率予測が可能となった。さらに、WLE モデルの予測スコアは、パラメータ推定時に用いるカーネル関数の選択によって大きく変動する。そのため、最適なカーネル関数およびバンド幅を選定するには、慎重かつ多大な調整が求められる。

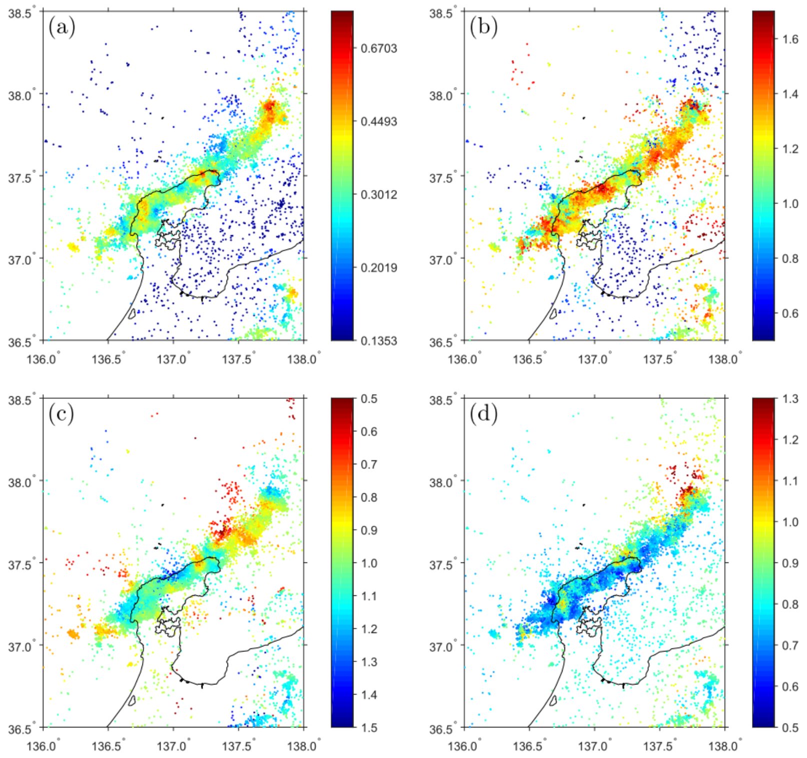
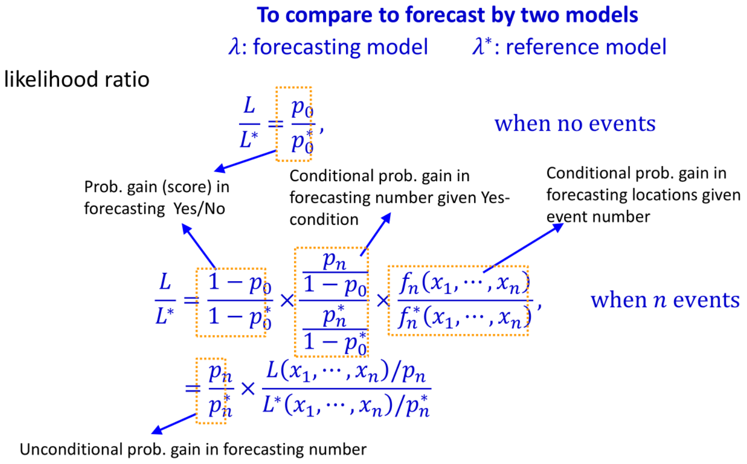



図 6. 気象庁カタログの地震データを用いて、最大重み付き尤度法により推定された能登地域における ETAS パラメータの空間分布：（a） $A$；（b） $\alpha$；（c） $p$；（d） $b$.

b） 尤度ベースの周辺・条件付きスコアによる地震予測可能性と予測評価

点過程モデルによる地震予測の性能評価において、情報（尤度）ベースのスコアリングが有効であることを示したが、地震予知可能性共同研究（CSEP）テストセンターにおいては、地震数（N）、マグニチュード（M）、空間的分布（S）、条件付き尤度（CL）、Student’ｓｔ検定（T）などの指標が用いられている、本研究ではそれらに加えて、点過程の尤度関数（Janossy 密度）に基づく厳密な情報利得の分解とスコアリング手法を提案する。

新たな評価手法の有効性を示した。とくに、ETAS のように内部履歴に依存するモデルに対しては、イベント数、発生時刻、空間位置、マグニチュード、相関構造といった各要素を統一的に、特に異なるグリッド間の相関を予測する性能の評価にも対応可能であり、将来的には地震予測モデルの標準的な評価枠組みとしての活用が期待される。



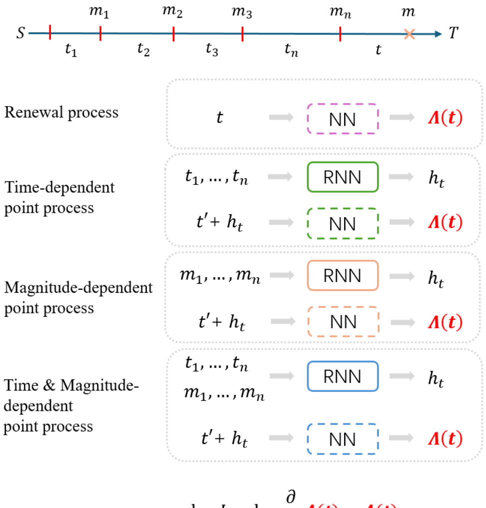

$$\frac{L}{L^*} = \frac{p_0}{p_0^*},$$

$$\frac{L}{L^*} = \frac{1-p_0}{1-p_0^*} \times \frac{\frac{p_n}{1-p_0}}{\frac{p_n^*}{1-p_0^*}} \times \frac{f_n(x_1,\cdots,x_n)}{f_n^*(x_1,\cdots,x_n)}, = \frac{p_n}{p_n^*} \times \frac{L(x_1,\cdots,x_n)/p_n}{L^*(x_1,\cdots,x_n)/p_n^*}$$

図 7. 点過程尤度の構成要素の解析

4） A-4 異常現象の因果性の評価と外部変数入力

a） 地震予測のための深層学習に基づく点過程モデルの開発




$$\log L = \log \frac{\partial}{\partial t} \Lambda(t) - \Lambda(t)$$

図 8. ディープニューラルネットワーク点過程モデルの設計の概略図

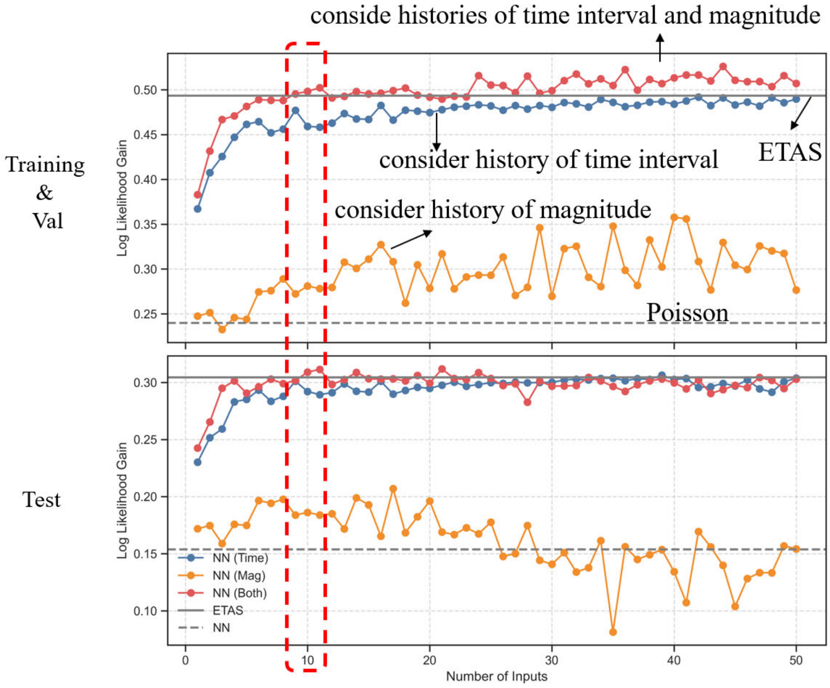



図 9. モデル間の情報利得（予測対数尤度比）の比較

地震活動の時空間的な予測には、従来より、ETAS モデルが広く用いられており、その基盤となる Hawkes 過程は余震の発生メカニズムを記述するのに有効である。しかし、ETAS モデルは精度の高いフィッティングに大量の歴史的地震データを必要とし、計算コストも高いという課題がある。

本研究では、ディープニューラルネットワーク点過程モデルを用いて、少数の短期的履歴情報のみから、ETAS モデルに匹敵する地震予測性能を実現できるかを検証する。対象地域は中国の四川省および雲南省であり、緯度 22° N～32° N、経度 96° E～108° E の範囲を対象とした。期間は 2008 年 1 月 1 日から 2023 年 12 月 31 日までで、M≧3.0 の地震 8,943 件を使用した。地震カタログは中国地震局（CEA）から取得し、訓練・検証・テスト用にそれぞれデータを分割した。2 種類のモデルを設計した。1 つ目は地震発生率（強度）λ(t)が現在の待機時間 t のみに依存するモデルである。2 つ目は λ(t|h_t) が現在の待機時間 t および履歴情報 h_t に依存するモデルである。履歴情報の入力方法として、(1)過去イベントの時間間隔、(2)マグニチュード、(3)その両方の 3 パターンを考慮した。

最もシンプルな「直近の 10 回分の時間間隔」だけを入力とするモデルでも、ETAS とほぼ同等の確率利得を達成した。履歴情報としては、「マグニチュードのみ」よりも「時間間隔のみ」の方が有効であり、両者を併用することで最も高い性能が得られた。累積強度と待機時間の関係曲線においても、NPP モデルは ETAS と非常に類似した挙動を再現できた。

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つつある。例えば、超低周波（ULF）帯の地磁気変動や、大気中の二酸化炭素（CO）濃度異常などは、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（例：Han et al., 2014; Zhang et al., 2023)。しかしながら、これらの前兆現象は、必ずしも一貫した時空間的特性を示すわけではなく、地震予測への応用可能性を評価するためには、より体系的かつ統計的な解析が求められる。

本研究では、ETAS モデルに非地震性の外因的な励起要因（external excitation）として組み込むモデルを開発し、それら各モデルの地震発生予測結果を定量的に比較することを目的とする。ULF 地磁気データには、日本の柿岡観測所（KAK、北緯 36.232 度、東経 140.186 度）で観測されたデータを用い、全球的な地磁気擾乱の影響を除去するため、鹿屋観測所（KNY、北緯 31.42 度、東経 130.88 度）のデータを参照局として用いる。ULF 磁気異常は、KAK で観測された実測値と、KNY のデータから推定される KAK の予測エネルギー（Z*）との比率 P を算出し、P が「中央値＋1.5×四分位範囲（IQR)」を超える場合に異常と定義する（Han et al., 2017)。一酸化炭素（CO）データには、NASA の MERRA-2 データセットを用い、マルチチャネル特異スペクトル解析（MSSA）により、複数地点に共通する長周期成分を除去したうえで解析を行う。CO 異常は、背景成分を除去した後、平均＋2σ を超える値が 7 日間のスライディングウィンドウ内に 2 回以上出現する場合に異常と定義する（Zhang et al., 2024)。解析対象とする地震は、2001 年から 2010 年の期間に、柿岡測磁所を中心とした半径 100km 以内で発生した Mj≧4.0、深さ 60km 未満の地震であり、イベント数は計 218 件とする。同期間・同範囲において検出される ULF 磁気異常は 410 件、CO 異常は 542 件である。

提案する ETAS+ULF+CO モデルは、従来の ETAS モデルに加えて、異常の出現タイミングに基づく外因性励起項（Gaussian kernel による時系列応答関数）を導入したものである。このモデルを最大尤度推定によりフィッティングすることで、異常出現時の地震発生確率の上昇傾向や、予測に対する各因子の寄与率を評価可能とした。

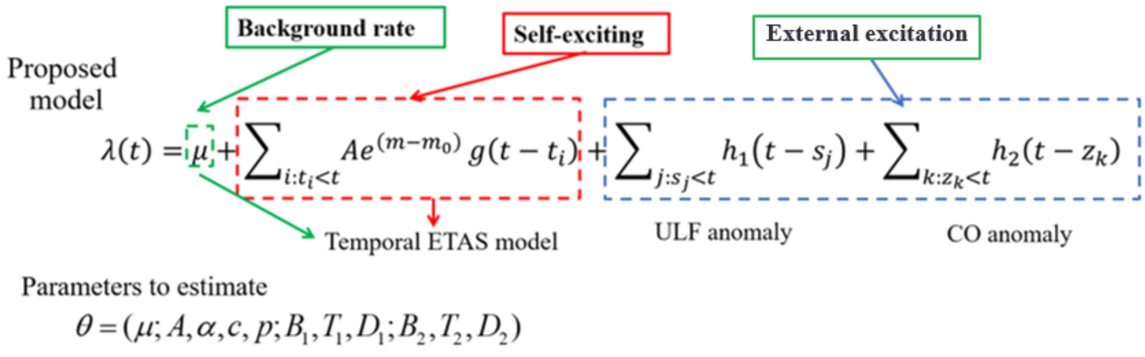



図 10. 新しいモデルの条件付き強度関数の定式化

解析の結果、標準的なETASモデルと比較して、ULFおよびCO異常を組み込んだモデルは対数尤度が向上し、赤池情報量規準（AIC）でも最も低い値を示した。時間的ETASモデルを用いた場合、背景地震は全体の81%を占めているが、ETAS+ULF+COモデルを適用した結果では、その割合が65.8%にまで減少している。標準的なETASモデルと比較して、ETAS+ULF+COモデルは総情報利得において10.246の向上を示した。

$$\ln L(\theta) = \sum_{0 \le t_i \le T} \ln \lambda(t_i;\theta) - \int_0^T \lambda(t;\theta)dt \qquad AIC = -2\ln L(\theta) + 2k_p \qquad \Delta G = \sum_{t_i} \ln \frac{\lambda_i(t)}{\lambda_0}$$

| | Poisson | ETAS | ETAS+ULF | ETAS+CO | Combine (ETAS +ULF+CO) |
|---|---|---|---|---|---|
| ln(L) | -832.441 | -786.053 | -782.179 | -781.943 | -777.931 |
| AIC | 1666.881 | 1582.106 | 1580.358 | 1579.885 | 1577.861 |
| ΔG | 0 | 51.666 | 56.246 | 53.628 | 61.912 |

表 1. 4つのモデルによる柿岡周辺地震活動の適合度（尤度）の比較

本研究により、非地震性前兆信号を統計地震発生モデルに組み込むことで、短期地震予測の精度が向上する可能性が示された。特に、複数種類の外部励起要因指標を同時に用いることで、それぞれの励起要因がもたらす情報を相補的に活用し、主震に相当するイベントの予測改善に寄与することが示唆された。今後は、より多地点・多励起要因観測網との統合により、本手法の汎用性と予測精度の検証が求められる。

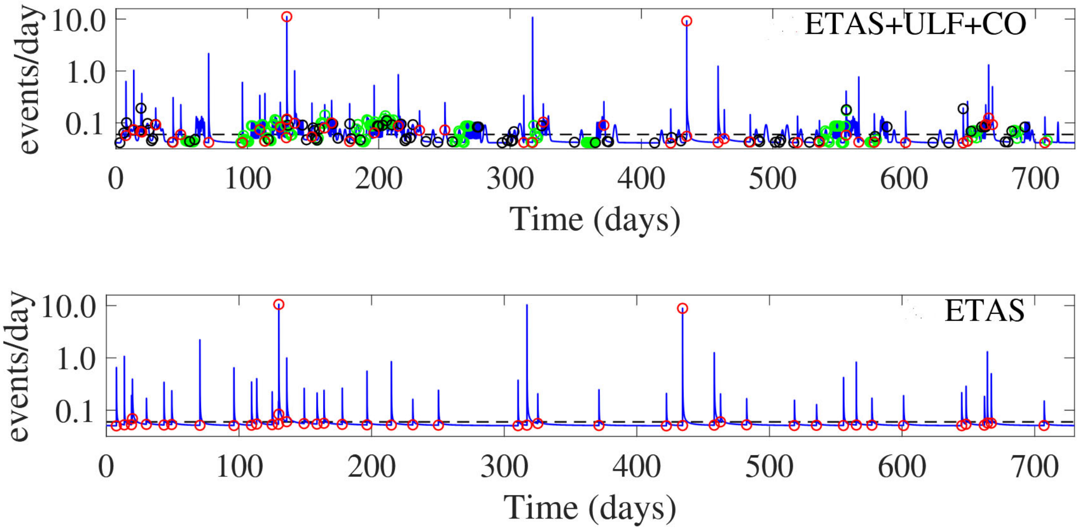



図 11. 新しいモデル（上段）および標準的ETASモデル（下段）をデータに適合させて得られた部分条件付き強度（期間：2003年初め～2004年末)。横軸は2003年1月1日からの日数を示す

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

a） 非定常 ETAS モデルによる外因的な励起要因の検出

地震活動はしばしば複雑に進展する為、いわゆる本震-余震型の誘発の連鎖から逸脱する発生パターンを視覚的に捉えることは難しい。しかし、非定常 ETAS モデルのような点過程モデルを用い、地震活動の時間変化の特徴を検出することで、スロースリップや地下流体の移動、或いは地殻応力の変化といった地球物理的過程を間接的に捉えることができる。このモデルは、定常の ETAS モデルにパラメータの時間変化を導入し、ベイズ的逆解析（ABIC）によって外部データを取り入れながら解析を行うことで、大地震後の余震活動の典型的な発生パターンから逸脱するようなケースにおいても、その動態を客観的に再現する手法となる。

その一例として、能登半島北部における地震活動について解析を行った。2020 年末から始まった群発地震は四つの集中的発生領域に分かれて活動が高まり、2023 年 5 月の M6.5 地震、そして 2024 年元日の M7.6 地震へと連鎖した。この一連の活動に対して、非定常 ETAS モデルを各発生領域に適用し、背景地震活動の時間変化を推定した。そして、GNSS 観測点間の斜距離や高度差の時間変化、震源の時空間分布との対応関係に基づき、一連の地震活動の各段階でスロースリップや地下流体の移動が地震の発生を駆動したと解釈した。

一般的にこのような外部励起要因の影響は地震カタログのみから予測することは難しいが、GNSS や歪み計などの測地データを ETAS モデルに取り入れることで短期予測の可能性を高め、更には地震発生メカニズムの理解を深めることができる。

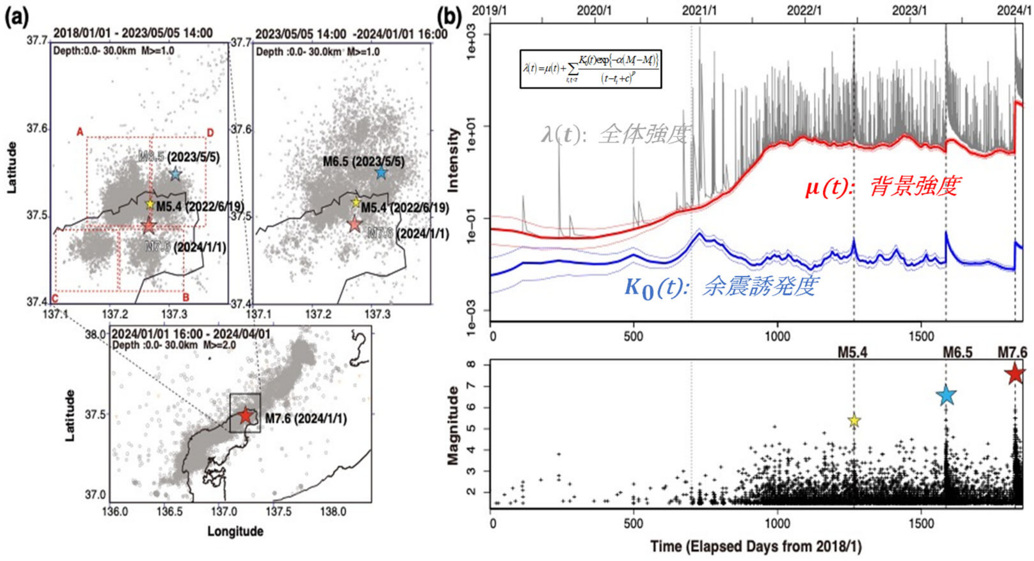



図 12. 能登半島における地震活動：(a,左上) 2018 年から 2023 年 5 月 5 日の M6.5 地震までの M≧1.0 の地震活動。赤い破線の長方形（r1～r4）は、M6.5 発生以前の集中的発生領域を示す。(a,右上) M6.5 から 2024 年 1 月の M7.6 までの M≧1.0 の地震活動。(a,下) M7.6 以降、4 月 1 日までの M≧2.0 の余震。星印はそれぞれ、2022 年 6 月 19 日の M5.4

（黄色）、M6.5（青）、M7.6（赤）の震央を示す。解析対象期間以降に発生した地震は淡色で表示した。（b）M≧1.5 に対する非定常 ETAS モデルの推定結果。

2020 年末に始まった能登半島での群発地震活動を非定常 ETAS モデルと GNSS データを用いて分析した結果、以下のような地球物理学的知見が得られた。

1. 群発地震が始まった領域の深部では、背景地震活動度μ(t)が急上昇すると共に地震の震央が応力場に沿って分布し、同時に GNSS 観測点の隆起や斜距離の変化が確認された。これらはスロースリップや地下流体の移動と矛盾しない。
2. 群発地震開始領域の周囲でもμ(t)の上昇が観測され、領域間の時間差は空間的な距離と対応していた。
3. M6.5 地震の発生直前にはその震源付近で前震活動が集中して発生しており、該当領域では b 値が高く推定された。これらの発生パターンはスロースリップや地下流体の影響と考えて矛盾しない。
4. M6.5 地震の発生後、各領域でμ(t)は一斉に増加・減少・再上昇する傾向を示した。
5. M7.6 地震の余震活動は時間的に安定しており、主断層の静的応力変化による誘発効果が主な発生要因と考えられる。

これらの結果は、一連の地震活動の誘発要因がスロースリップや地下流体の移動によって時間的に不均質に誘発される非定常過程である可能性を示している。

b) 非定常 ETAS モデルによって検出された Pollino 山（イタリア）の流体によって誘発された群発地震

クーロン破壊応力（CFS）の変動は、地震活動の増減に重要な役割を果たしている。標準的な ETAS モデルが地震活動データに適切に適合しない場合、経験則からの乖離の可能性が検討される。このような乖離は、群発タイプの地震活動異常のような過渡的な地震現象から伝達される応力変化から生じる可能性がある。時間依存のバックグラウンド地震率は、CFS の変化や過渡的な地震強制の存在を検出するための指標となっている。イタリア・Pollino 山地震発生域における地震異常について検討した。この地震スワームの主要なプロセスはまだ議論中であるが、新しいテンプレート・マッチングの高分解能カタログに非定常 ETAS モデルを適用した結果、背景地震度の異常によって示された断層内の流体上昇流がこのプロセスを引き起こしたという仮説を支持した。2 つの主要なイベントが発生した最も激しい局面では、地震性すべりと流体の相互作用がシーケンスを駆動した。

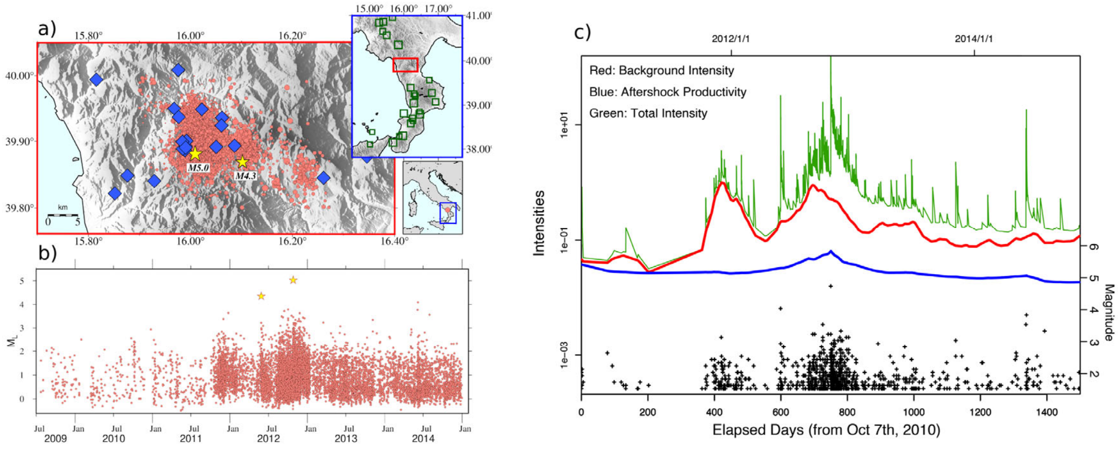



図 13. a) 2010-2014 年 Pollino 地震列のテンプレート・マッチング(TM)カタログ。使用された地震観測点（青い菱形）と、2 つの主要な地震 $M_L$4.3（西側クラスター）、$M_L$5.0（東側クラスター）、Pollino 山地域は赤い四角で示す。b) テンプレート・マッチング(TM)カタログにおける時間の関数としてのマグニチュード。c) 全領域における推定された非定常 ETAS モデル。

c) 2021 年中国漾濞（Yangbi）MS6.4 地震前、流体誘発による外因的な励起要因を重力観測で検出

　現地での繰り返し重力観測に基づき、深部地殻流体の質量移動に伴う重力変化を検出・解析できる。2021 年に発生した中国・漾濞（Yangbi）Ms6.4 地震の約 3 年前、震源の北東および南東に位置する 2 地域において顕著な重力増加が観測されていたことが明らかとなった。重力変化のモデル化には、複数の円盤形等価震源モデルと、マルコフ連鎖モンテカルロ法（MCMC）に基づく逆解析手法を導入した。合成データによる検証により、本手法はノイズ下でも円盤の深さ・厚さ・半径を同時に推定可能であることを確認した。

　漾濞地震に先行する観測データの解析により、200 km 以上にわたる構造帯内で年変化率 3～13 μGal/年の重力増加が 2 地点で検出された。地表水や地殻変動による影響（-3.7～1.2 μGal/年）では説明困難であり、深部質量移動が主因と考えられる。残差重力データから構築した 2 つの円盤モデル（ディスク 1 および 2）では、半径・深さ・厚さはそれぞれおよそ 71.6 km、16.1 km、1.3 km（ディスク 1）および 82.3 km、18.2 km、1.5 km（ディスク 2）と推定された。これらの中心から震源に向けた背景地震（ML≧3.0 および 2.8）の移動も確認され、流体拡散速度は約 5 $m^2$/s および 2.5 $m^2$/s と見積もられた。さらに、これらの震源モデルと地震活動は、震源直下の高 VP/VS 領域の上部に位置し、モデル交差部における高体積ひずみや 3He/4He 比の異常放出とも整合的である。これらの知見は、深部流体の流入・閉じ込め・放出過程を示唆するものである。

提案手法は、離散的な重力観測データの解釈および年スケールの深部地殻質量移動のモニタリングに有効であり、漾濞地震震源域の北西および南東で確認された重力増加は、深部における大規模流体移動と強く関係している可能性が高い。

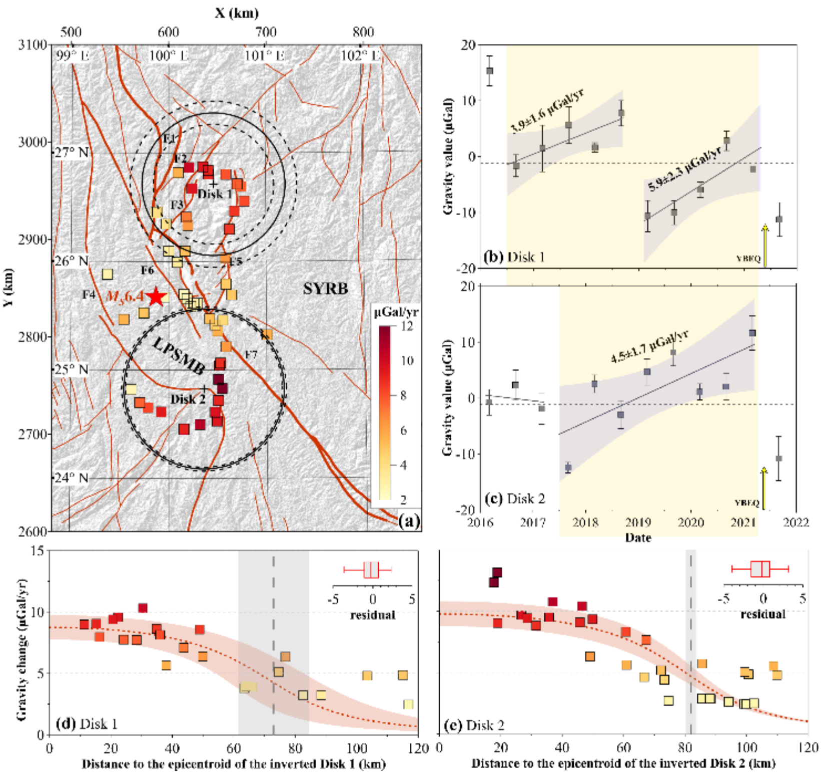


図 14. 重力観測点における残差変化率および 2 つの逆解析ディスクモデルの結果。(a) 年間の重力変化率、および逆解析によって得られた 2 つのディスクモデルとその不確実性；(b) および（c）は、それぞれディスク 1 およびディスク 2 内の重力値の時系列を示す；(d)-(e) は、ディスク 1 およびディスク 2 モデルによる理論的変化曲線と実測重力変化の比較を示す。2 つのボックスプロットは逆解析の残差を表している。

d) 低周波地震活動に関する 3 つの統計モデルの比較

スロー地震とは、ゆっくりとした断層すべりによって生じる地震である。スロー地震の活動特性を定量化し、継続的に監視することは重要であり、それは大地震の前に変化する可能性があるからである。地震活動の特性を定量化するためには統計的モデルが有効であるが、スロー地震活動に関する標準的な統計モデルはこれまで存在していなかった。

本研究では、2004 年 4 月から 2015 年 8 月までの南海トラフにおけるスロー地震の一種である低周波地震（LFE）の高品質カタログを用い、既存の統計的 LFE 活動モデルを比較し、どのモデルが LFE 活動をよりよく記述できるかを初めて検証した。その結果に基づき、既存モデルの特徴を統合した新たなハイブリッドモデルを提案している。

この新モデルは、標準的 ETAS（感染型余震系列）モデルに類似した方法で LFE 活動の履歴を考慮しつつ、通常の地震における大森・宇津の余震則のように、少数の

パラメータで LFE の余震発生率（後続の LFE 発生率）を表現する。解析の結果、提案されたモデルは他の既存モデルよりも優れた適合性を示した。

しかしこの新モデルは、LFE 活動の特徴のひとつである「強い LFE バーストの急激な停止」を再現できなかった。これは、モデルが複数の余震活動を重ね合わせることで、LFE バースト中およびその直後に極めて高い地震活動率を予測してしまうためである。強い LFE バーストの急停止を再現し、正確に予測することは、統計的 LFE 活動モデルをさらに改善する上で重要であると考えられる。

加えて、本研究で得られた LFE 余震率に関する経験式は、今後の LFE 活動の統計モデルや物理モデルの構築に役立つ可能性がある。

Aftershock rate of low-frequency earthquakes (LFEs) $g_H(t)$ :

$$g_H(t) = \frac{f_H(t)}{1 - F_H(t)}$$

$$f_H(t) = \frac{\phi_{1H}}{\sqrt{2\pi}\sigma_{1H}t} \exp\left\{-\frac{(\log(t)-\log(\mu_{1H}))^2}{2\sigma_{1H}^2}\right\} + \frac{\phi_{2H}}{\sqrt{2\pi}\sigma_{2H}t} \exp\left\{-\frac{(\log(t)-\log(\mu_{2H}))^2}{2\sigma_{2H}^2}\right\}$$

$$F_H(t) = \int_0^t f_H(t')\,dt'$$

$\mu_{1H}, \mu_{2H}, \sigma_{1H}, \sigma_{2H}, \phi_{1H}$, and $\phi_{2H}$ are parameters.

図 15. LEF 活動の新しいモデルの数学的定式化

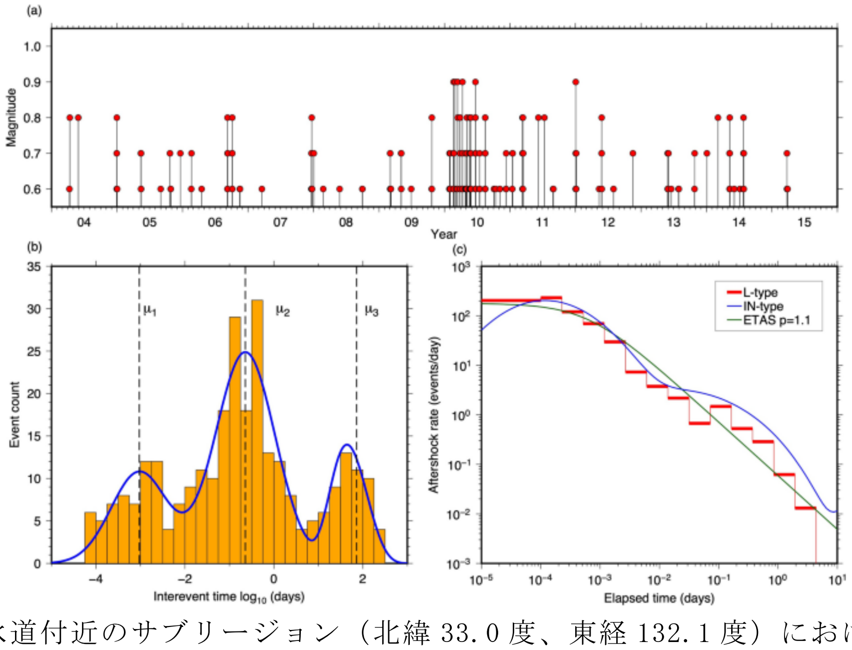



図 16. 豊後水道付近のサブリージョン（北緯 33.0 度、東経 132.1 度）における LFE 活動 a）LFE のマグニチュードと時間の関係を示す図。b）発生間隔時間のヒストグラム（オレンジの棒グラフ）。青い曲線は IN 型モデルによる発生間隔時間の分布を示す。縦の破線は、IN 型モデルにおける 3 つの特徴的な時間定数（$\tau_1$、$\tau_2$、$\tau_3$）を示す。c）1 つの LFE 発生後の余震発生率（LFE 発生率）を、L 型モデル（赤線）、IN 型モデル（青線）、ETAS モデル（緑線）によって予測した結果。ETAS モデルの最尤推定による p 値は 1.1 である。

引用文献


・ 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
・ Kumazawa, T. and Ogata, Y. (2024). Spatial and temporal variations of the 3-year earthquake swarm activities leading up to the M7.6 Noto Peninsula earthquake and interpretations of their activities. Earth Planets Space, 76:164. doi.org/10.1186/s40623-024-02112-6. (Published: 18 December 2024)
・ Kumazawa, T. and Ogata, Y. (2024). Non–Stationary ETAS Model: How It Works for External Forcing. Seismological Research Letters 2024; doi.org/10.1785/0220240166.(Published: 29 August 2024)Nishikawa, T. (2024). Comparison of statistical low-frequency earthquake activity models, Earth Planets Space 76, 59. https://doi.org/10.1186/s40623-024-02007-6. (Published: 17 April 2024)
・ Petrillo, G., Kumazawa, T., Napolitano, F., Capuano, P. and Zhuang, J. (2024). Fluids–Triggered Swarm Sequence Supported by a Nonstationary Epidemic–Like Description of Seismicity. Seismological Research Letters 2024, https://doi.org/10.1785/0220240056. (Published: 27 June 2024)
・ Zhang, Y., Zhu, K., Marchetti, D., Zhang, D., Fan, M., Wang, T., . . . Cheng, Y. (2024). Carbon monoxide anomalies for the 2013 Mw =6.7 Lushan earthquake using MSSA-RST approach. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 62, 1-20. doi: 10.1109/TGRS.2024.3492254


(c) 結論ならびに今後の課題

1) A-1 高次元 ETAS モデル

深さと震源メカニズムを組み込んだ高次元 ETAS モデルを GCMT カタログに適用した結果、データ適合度と予測尤度の向上が確認された。また、GP-ETAS モデルにより背景活動度を柔軟かつ高精度に推定でき、短期的な欠測にも対応可能であることが示された。今後は、他地域への適用、リアルタイム予測への応用、計算効率の向上に加え、GP-ETAS モデルによる短期的欠測への対応精度のさらなる検証が課題である。

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

時空間 ETAS モデルの背景地震活動（トレンド）をスプライン関数で表現することで客観的な平滑化重みによる推定を行った。この結果を参照にして、摩擦構成則に基づく地震活動モデル（Dieterich モデル）に基づくトレンド（と対応する応力レート）を求める際に用いている平滑化拘束の重みを（ある程度）客観的に求

めることが可能となった。また、時空間版の Dieterich モデルにおいて、応力の空間的拡がりを表現する関数を従来の指数型からべき型に変えた方がより良いことが示された。但し、これでも ETAS モデルを上回るものではなく、さらなる改善が課題である。

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

ベイズ HIST-ETAS モデルと重み付き対数尤度 ETAS モデルは、空間的および時間的なパラメータ変動を探索することができる。新たに開発されたスコアリング手法により、連続的な時空間領域における 2 つのモデルの対数尤度比と、全領域をセルに離散化した場合の対数尤度比の間で失われる情報利得が、グリッド間の相関スコアによって明らかにされた。

4) A-4 異常現象の因果性の評価と外部変数入力

現在、地震カタログを用いる場合、AI モデルが ETAS モデルを超える性能を発揮することは難しい。ただし、データ欠損なとの人工的な問題がある場合、AI は ETAS モデルより良い予測を行うが、それはカタログの予測に限られる。非地震活動性異常の観測は重要であり、ビッグデータや AI、研究者の知見を活用して、段階的に地震予測を改善すべきである。今後の課題としては、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。

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

外部誘発要因は、情報技術に基づくモデリングとデータ処理手法により、地震観測や他の物理学的観測によって検出することができる。今後の課題としては、このようなグローバルな影響の物理的な原因を特定し、地域地震モデルに外部変数として組み込み、モデリングとデータ処理手法による新しい情報技術の開発が必要とある。

(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 30 件、うち海外計 11 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 |
|---|---|---|---|---|---|
| How to Improve earthquake forecasts: from the viewpoint of earthquake predictability quantification（口頭発表） | Zhuang, J. | International Conference for Coupling of Earth's Spheres (ICES), 成都, 中国 | 2025年3月3日 | 国外 | ○ |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Multiple Aftershock Mechanisms of 2014 Kangding Doublet, Eastern Tibet based on AI Technique（口頭発表） | Wu, J.*, Gao, X., Zhuang, J., Yao, D., Wei, M. and Song, J. | AGU Annual Meeting 2024, ワシントンD.C., 米国 | 2024年12月13日 | 国外 | ○ |
| A challenging application of NESTORE Machine Learning Algorithm to Japan seismicity（ポスター発表） | Gentili, S.*, Chiapetta, G.D., Petrillo, G., Brondi, P. and Zhuang, J. | AGU Annual Meeting 2024, ワシントンD.C., 米国 | 2024年12月12日 | 国外 | ○ |
| When and Where Will the Next Big Quake Strike? Insights from Physical Modeling（ポスター発表） | Lippiello, E.*, Marzocchi, W., Petrillo, G., Rosso, A. and Zhuang, J. | AGU Annual Meeting 2024, ワシントンD.C., 米国 | 2024年12月11日 | 国外 | ○ |
| Statistical Characterization of the BMKG Seismic Catalog for Enhanced Seismic Risk Monitoring in the Indonesian Region（ポスター発表） | Petrillo, G.* and and Zilio, L.D. | AGU Annual Meeting 2024, ワシントンD.C., 米国 | 2024年12月10日 | 国外 | ○ |
| Quantification of Fast-Earthquake Activation Following Tectonic Tremors in the Iwate-Oki Region of the Japan Trench（口頭発表） | Ito, Y.*, Nishikawa, T., Ito, Y. and Ohyanagi, S. | AGU Annual Meeting 2024, ワシントンD.C., 米国 | 2024年12月12日 | 国外 | ○ |
| Earthquake Swarm Detection in the Middle America Subduction Zone: Implications for the Relationship between Seismicity and Slow Slip Events（口頭発表） | Nishikawa, T.*, Kostoglodov V. and Nishimura, T. | AGU Annual Meeting 2024, ワシントンD.C., 米国 | 2024年12月12日 | 国外 | ○ |
| 地震予測可能性の定量化およびエントロピーに基づく地震予測評価スコアの精緻化（口頭発表） | 庄 建倉 | 日本地震学会2024年秋季大会, 朱鷺メッセ 新潟コンベンションセンター | 2024年10月23日 | 国内 | ○ |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| ETASモデルによる非一様な地震データの逆解析（口頭発表） | 尾形 良彦 | 日本地震学会2024年秋季大会，朱鷺メッセ 新潟コンベンションセンター | 2024年10月22日 | 国内 | |
| 2016年鳥取県中部地震余震域における空間応力パターン推定（ポスター発表） | 岩田 貴樹*,<br>飯尾 能久 | 日本地震学会2024年秋季大会，朱鷺メッセ 新潟コンベンションセンター | 2024年10月21日 | 国内 | ○ |
| 伊豆東部の地震活動と地殻変動の解析について（ポスター発表） | 楠城 一嘉*,<br>行竹 洋平,<br>熊澤 貴雄 | 日本地震学会2024年秋季大会，朱鷺メッセ 新潟コンベンションセンター | 2024年10月21日 | 国内 | |
| 房総半島沖における群発地震検出と小規模なスロースリップとの関連の調査（口頭発表） | 吉村 嶺*,<br>西川 友章,<br>西村 卓也 | 日本地震学会2024年秋季大会，朱鷺メッセ 新潟コンベンションセンター | 2024年10月22日 | 国内 | |
| Bayesian non-parametric inference for the ETAS model（口頭発表） | 牛 源源*,<br>庄 建倉 | 日本地震学会2024年秋季大会，朱鷺メッセ 新潟コンベンションセンター | 2024年10月22日 | 国内 | ○ |
| 沈み込み帯における地震とスロー地震の活動に関する統計地震学的研究（招待講演） | 西川 友章 | 日本地震学会2024年秋季大会，朱鷺メッセ 新潟コンベンションセンター | 2024年10月21日 | 国内 | ○ |
| 中米沈み込み帯における群発地震検出：地震活動とスロースリップイベントの関係に関する示唆（口頭発表） | 西川 友章*,<br>Kostoglodov Vladimir,<br>西村 卓也 | 日本地震学会2024年秋季大会，朱鷺メッセ 新潟コンベンションセンター | 2024年10月22日 | 国内 | ○ |
| 修正ETASモデルによる四国西部における低周波地震の群発性解析（ポスター発表） | 下村 海渡*,<br>麻生 尚文 | 日本地震学会2024年秋季大会，朱鷺メッセ 新潟コンベンションセンター | 2024年10月21日 | 国内 | ○ |
| ETASパラメータのマグニチュード依存性（ポスター発表） | 石川 大智*,<br>麻生 尚文 | 日本地震学会2024年秋季大会，朱鷺メッセ 新潟コンベンションセンター | 2024年10月21日 | 国内 | ○ |
| 点過程モデルを用いた異常地震活動の研究：M7.6能登半島地震に至る群発地震活動の時空間変動と異常活動の解釈について（招待講演） | 熊澤 貴雄*,<br>尾形 良彦 | 科研費シンポジウム，石川県政記念しいのき迎賓館 | 2024年9月23日 | 国内 | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Probabilistic Earthquake Forecasting: How to Live Better Between Complete Randomness and Complete Predictability (招待講演) | 庄 建倉 | 科研費シンポジウム，石川県政記念しいのき迎賓館 | 2024年9月23日 | 国内 | ○ |
| NESTORE Machine Learning Algorithm applied to forecast Strong Subsequent Earthquakes in Japan (口頭発表) | Gentili, S.*, Ciappetta, G.D., Petrillo, G., Brondi, P., Zhuang, J., Giovambattista, R. D. | 39th General Assembly (GA) of the European Seismological Commission, Corfu, Greece | 2024年9月26日 | 国外 | ○ |
| Cluster identification and fluid migration: the case of the 2018 Molise (Italy) sequence (口頭発表) | Gentili, S.*, Brondi, P., Sugan, M., Rossi, G., Petrillo, G., Zhuang, J., Campanella, S. | 39th General Assembly (GA) of the European Seismological Commission, Corfu, Greece | 2024年9月26日 | 国外 | ○ |
| Estimation of background stress changes based on the rate- and state-friction seismicity model and the space-time ETAS model (ポスター発表) | Iwata, T. | 39th General Assembly (GA) of the European Seismological Commission, Corfu, Greece | 2024年9月26日 | 国外 | ○ |
| Quantification of earthquake Predictability and detailing of entropy-based scores for evaluating earthquake forecast (ポスター発表) | 庄 建倉 | 2024 Statewide California Earthquake Center (SCEC) Annual Meeting, Hilton Palm Springs | 2024年9月8日 | 国外 | ○ |
| 2024年M7.6能登半島地震前後の地震活動の統計的特徴 (口頭発表) | 熊澤 貴雄*, 尾形 良彦 | 2024年度統計関連学会連合大会，東京理科大学神楽坂キャンパス | 2024年9月4日 | 国内 | |
| 能登半島での一連の地震活動の推移とM7.6前発生前期間における異常活動の解釈 (口頭発表) | 熊澤 貴雄*, 尾形 良彦 | 日本地球惑星科学連合(JpGU)2024年大会，幕張メッセ (ハイブリッド開催) | 2024年5月26日 | 国内 | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 日本の地殻内地震発生数とせん断ひずみエネルギー密度変化の空間的相関関係（口頭発表） | 上田 拓*,<br>西村 卓也 | 日本地球惑星科学連合(JpGU)2024年大会，幕張メッセ（ハイブリッド開催） | 2024年<br>5月26日 | 国内 | ○ |
| ETASモデルは前震とBåth則の両方を説明できる（口頭発表） | 庄 建倉 | 日本地球惑星科学連合(JpGU)2024年大会，幕張メッセ（ハイブリッド開催） | 2024年<br>5月26日 | 国内 | ○ |
| 応力回転を用いた2000年鳥取県西部地震余震域の背景応力場推定（ポスター発表） | 岩田 貴樹 | 日本地球惑星科学連合(JpGU)2024年大会，幕張メッセ（ハイブリッド開催） | 2024年<br>5月30日 | 国内 | ○ |
| ETASモデルとAICを用いた群発地震検出手法の開発と房総半島沖への適用（口頭発表） | 吉村 嶺*,<br>西川 友章,<br>西村 卓也 | 日本地球惑星科学連合(JpGU)2024年大会，幕張メッセ（ハイブリッド開催） | 2024年<br>5月26日 | 国内 | ○ |
| Bayesian non-parametric inference for the ETAS model（口頭発表） | 牛 源源*,<br>庄 建倉 | 日本地球惑星科学連合(JpGU)2024年大会，幕張メッセ（ハイブリッド開催） | 2024年<br>5月27日 | 国内 | ○ |

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載 : 計 14 件、うち海外計 14 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 |
|---|---|---|---|---|---|
| On solar-terrestrial interactions: Correlation between intense geomagnetic storms and global strong earthquakes. | Chen H.,<br>Han P.,<br>Zhuang J.,<br>Hattori K.,<br>Miao M.,<br>Hu K. and<br>Tao T. | *Geophysical Research Letters* | 2025年<br>3月10日 | 国外 | ○ |
| Statistical characteristics of strong earthquake sequence in northeastern Tibetan plateau. | Wang Y.,<br>Wang R.,<br>Han P.,<br>Zhao T.,<br>Miao M.,<br>Su L.,<br>Jin Z., and<br>Zhuang J. | *Entropy* | 2025年<br>2月6日 | 国外 | ○ |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Spatial and temporal variations of the 3-year earthquake swarm activities leading up to the M7.6 Noto Peninsula earthquake and interpretations of their activities. | Kumazawa, T. and Ogata, Y. | *Earth Planets Space* | 2024年12月18日 | 国外 | |
| Seismic clusters and fluids diffusion: a lesson from the 2018 Molise (Southern Italy) earthquake sequence | Gentili S., Brondi P., Rossi G., Sugan M., Petrillo G., Zhuang J. and Campanella S. | *Earth Planets Space* | 2024年12月4日 | 国外 | ○ |
| Preface to the focus section on statistical seismology, devoted to the memory of the late Yan Kagan, Dave Jackson, and Ilya Zaliapin | Schoenberg F., Werner W., Rong Y., Marsan D. and Zhuang J. | *Seismological Research Letters* | 2024年10月17日 | 国外 | ○ |
| Earthquake Predictability and Forecast Evaluation Using Likelihood‐Based Marginal and Conditional Scores | Zhuang, J. | *Seismological Research Letters* | 2024年10月8日 | 国外 | ○ |
| Spatio-Temporal Hawkes Point Processes: A Review | Bernabeu, A., Zhuang, J. and Mateu, J. | *Journal of Agricultural, Biological and Environmental Statistics* | 2024年9月19日 | 国外 | ○ |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Developing, Testing, and Communicating Earthquake Forecasts: Current Practices and Future Directions | Mizrahi L., Dallo I., van der Elst N. J., Christophersen A., Spassiani I., Werner M. J., Iturrieta P., Bayona J. A., Iervolino I., Schneider M., Page M. T., Zhuang J., Herrmann M., Michael A. J., Falcone G., Marzocchi W., Rhoades D., Gerstenberger M., Gulia L., Schorlemmer D., Becker J., Han M., Kuratle L., Marti M. and Wiemer S. | *Reviews of Geophysics* | 2024年8月13日 | 国外 | |
| Distribution related to all samples and extreme events in the ETAS cluster | Spassiani, I., Petrillo, G. And Zhuang, J. | *Seismological Research Letters* | 2024年6月27日 | 国外 | ○ |
| Fluids‐Triggered Swarm Sequence Supported by a Nonstationary Epidemic‐Like Description of Seismicity | Petrillo, G., Kumazawa, T., Napolitano, F., Capuano, P. and Zhuang, J. | *Seismological Research Letters* | 2024年6月27日 | 国外 | ○ |
| Background and clustering characteristics of recent seismicity in Southwestern China | Liu, Y., Zhuang, J., Guo, Y., Jiang, C., Tain, Q., Zhang, Y. and Long F. | *Geophysical Journal International* | 2024年6月13日 | 国外 | ○ |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Bayesian earthquake forecasting approach based on the epidemic type aftershock sequence model | Petrillo, G. and Zhuang, J. | *Earth Planets Space* | 2024年5月24日 | 国外 | ○ |
| Statistical modeling of 3D seismicity and its correlation with fault slips along major faults in California | Guo, Y., Zhuang, J. and Zhang, H. | *Earth and Planetary Science Letters* | 2024年5月7日 | 国外 | ○ |
| Comparison of statistical low-frequency earthquake activity models | Nishikawa, T. | *Earth Planets Space* | 2024年4月17日 | 国外 | ○ |

(e) 特許出願、ソフトウエア開発、使用・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウエア開発

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

### (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、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 | R6.4.1 〜 R7.3.31 | 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 | R6.4.1 〜 R7.3.31 | 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）ソフトウエアを公開した。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

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 6 年度の業務の目的

1) B-1 ETAS による長期予測

階層ベイズ時空間 ETAS モデルに基づき、海域を含む日本周辺の大地震の背景活動度を与えて長期予測確率を求め、その予測精度を情報利得（対数尤度）で評価比較する。

2) B-2 欠測データの補充

下限マグニチュードをできるだけ下げて、日本全域の時空間検出率のモデル化を試み、本震・余震型や群発型の地震活動を統計的に識別できるような、時空間 ETAS モデルの拡張を試みる。

3) B-3 ETAS による短期・リアルタイム予測と可視化

階層ベイズ時空間 ETAS モデルに基づき、日本周辺の続発する地震発生を準リアルタイムで空間的短期予測を行う。これを自動または半自動のオンラインで可視化する。またそれらの精度について検証実験を行う。

## (2) 令和 6 年度の成果

(a) 業務の要約

1) B-1 階層ベイズ時空間 ETAS モデルに基づき、海域を含む日本周辺における背景活動度を求めて大規模地震の長期的な危険度の予測を提案し、予測精度を対数尤度で評価比較した。その結果、大規模地震の良好な予測精度を確認した。

2) B-2 下限マグニチュードを可能な限り引き下げて、日本全域の時空間検出率のモデル化を試みた。さらに本震・余震型と群発型の地震活動を統計的に識別できるように、空間 ETAS モデルを用いた動画モニタリングにより、異常現象を可視化した。

3) B-3 階層ベイズ時空間 ETAS モデルに基づき、日本周辺の続発する地震発生を準リアルタイムで短期的に空間予測し、それを自動または半自動のオンライン・システムで可視化した。また、これらの精度は情報利得（対数尤度）を用いて比較・評価を行った。

(b) 業務の成果

1) B-1 海域を含む日本周辺における背景活動度を求めた長期的な危険度の予測

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ことが期待される。$K_0(x,y)$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。

これは任意の位置での主要パラメータの値が、デロネ三角形網の各頂点での値（デロネ係数）によって線形的に補間（区分的線形関数）されるものである。地震の数に比例して係数の数が膨大になるので、適切な推定には区分線形関数に滑らかさの制約を課して、「罰則付き対数尤度」を最大化する逆問題（インバージョン）として、ベイズ最適解（MAP 解）を求める。

階層ベイズ時空間 ETAS モデルを用いて、日本内陸と周辺海域の背景地震活動度を評価し、その結果に基づいた大規模地震（例えば M≥７）の長期的なリスク予測を提案した。その結果、大規模地震の予測精度が高いことが確認された（図１参照）。また背景地震活動度は、プレート境界の準静的すべりの時空間変動と密接な関係にある小繰り返し相似地震（野村ほか, 2013）の配置および頻度に良く対応していることが明らかとなった。

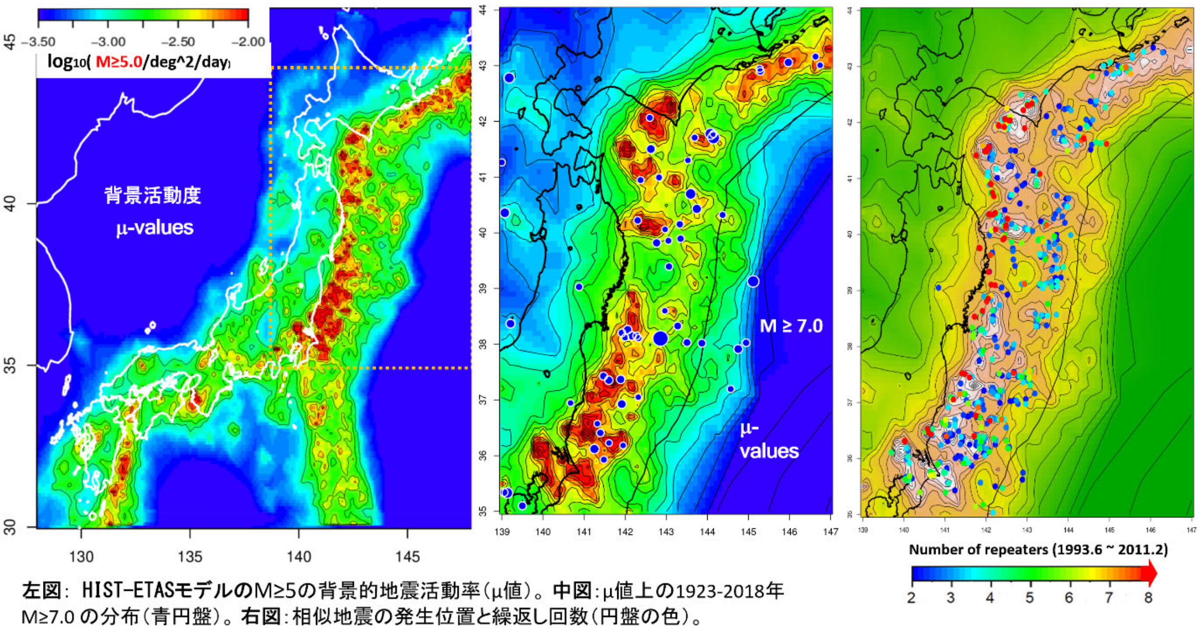



図 1. 日本本土およびプレート境界部の HIST-ETAS モデルの背景地震活動の強度と、北日本沖合部の大規模地震および小繰り返し相似地震の関係

2) B-2 日本全域の時空間的検出率をモデル化し、欠測率を推定し欠損データも考慮した HIST-ETAS モデルの活動率の補完

日本全域の時空間的検出率を 3 次元デロネ関数モデル化し欠測率分布を推定した。震源から作ったデロネ（Delaunay） 4 面体ネット上での時空間検出モデル

$$\xi(t,x,y,M) = 10^{a+b(t,x,y)(M-M_0)} q\{M \mid \mu(t,x,y), \sigma(t,x,y)\}$$

を準備する。ここで $b(t,x,y)$ はマグニチュード分布係数 $b$ 値の時空間変化、$q\{M|\mu,\sigma\}$ は正規分布の累積分布関数で、平均パラメータ $\mu(t,x,y)$ は 50%検出率のマグニチュードに対応し、$\sigma(t,x,y)$ は部分的に検出されるマグニチュードの範囲を示す。これらから例えば任意の時空間点 $(t,x,y)$ で、例えば下限マグニチュード $M_c$ = 4.0 以上の時空間的検出率 $q(M_c \mid t,x,y)$ を全ての点 $(t,x,y)$ で各三角形内で線形に補間できる。

図 2 の下段に示すように、各時間・位置での欠測率分布は 50%検出率のマグニチュード μ 値、その偏差幅 σ 値および G-R 則の b 値で特徴付けられている。この分布から、図 2 上段に示すように、各時間・位置での、例えば 97.5%以上の検出の下限マグニチュード値が定まる。

HIST-ETAS モデルでは、下限マグニチュードを可能な限り低く設定することで、大量の小規模地震を含む地震活動の詳細な異常を捉える仕組みを構築した。下限マグニチュード $M_c$ 以上の、1926 年以降の気象庁カタログをターゲットのデータとして使った対数尤度は、次節で求められる下限マグニチュード $Mc$ 地震検出率関数 $q(t,x,y;M_c)$ を使って、

$$\psi(t,x,y\,|\,H_t) = \lambda(t,x,y\,|\,H_t)\frac{\int_{M_c}^{\infty} 10^{-b(t,x,y)M} q\{M \,|\, \mu(t,x,y),\sigma(t,x,y)\}\, dM}{\int_{M_c}^{\infty} 10^{-b(t,x,y)M}\, dM}$$

を使う。

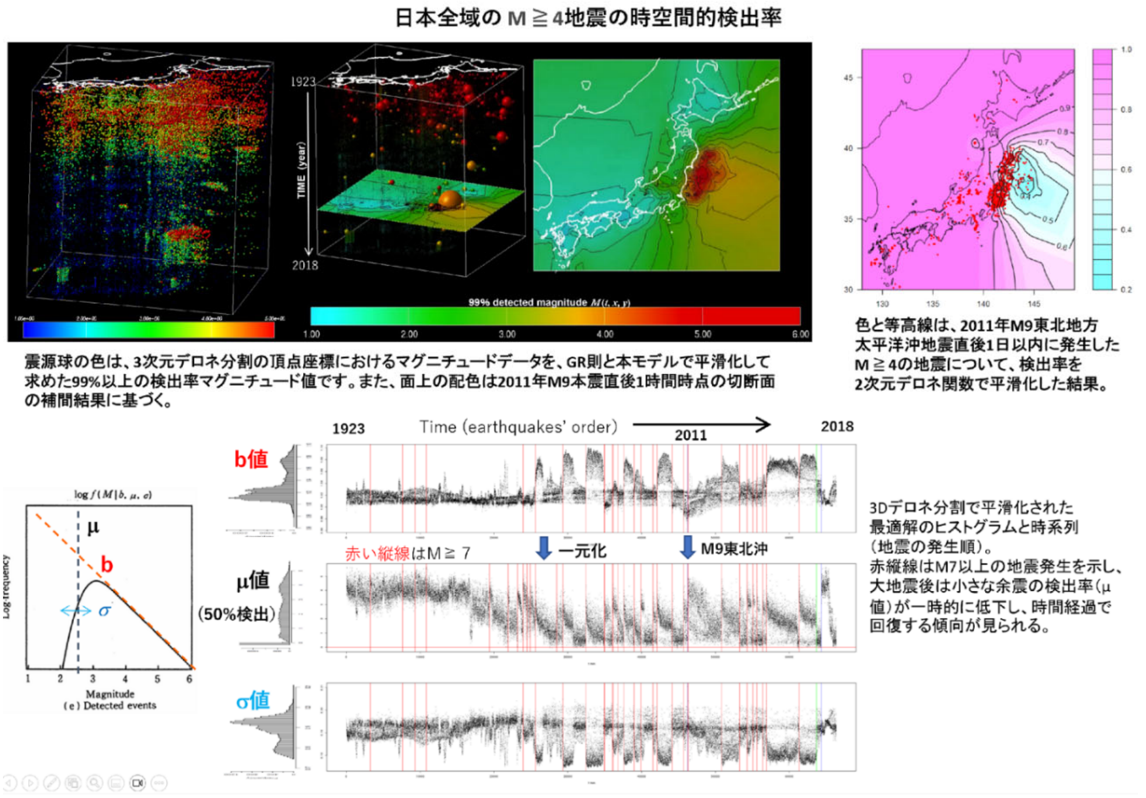



図 2. 時空間地震検出率モデルの解析結果

下記の図 3 は、下限マグニチュードを M4 に設定した場合の補正後の条件付き強度関数と累積曲線（中央パネル）を示している。この結果は、M6 を下限とした場合の経験的累積曲線（右上パネルの赤曲線）と類似しており、長期的活動度において、前半（1970 年以前）の傾きが M9 余震を除く後半部より急であることが確認された。また、1960 年代に見られる急激な変化は、1969 年の M7.8 色丹沖地震の余震欠測を補正することで、大きく回復されたことを示している。

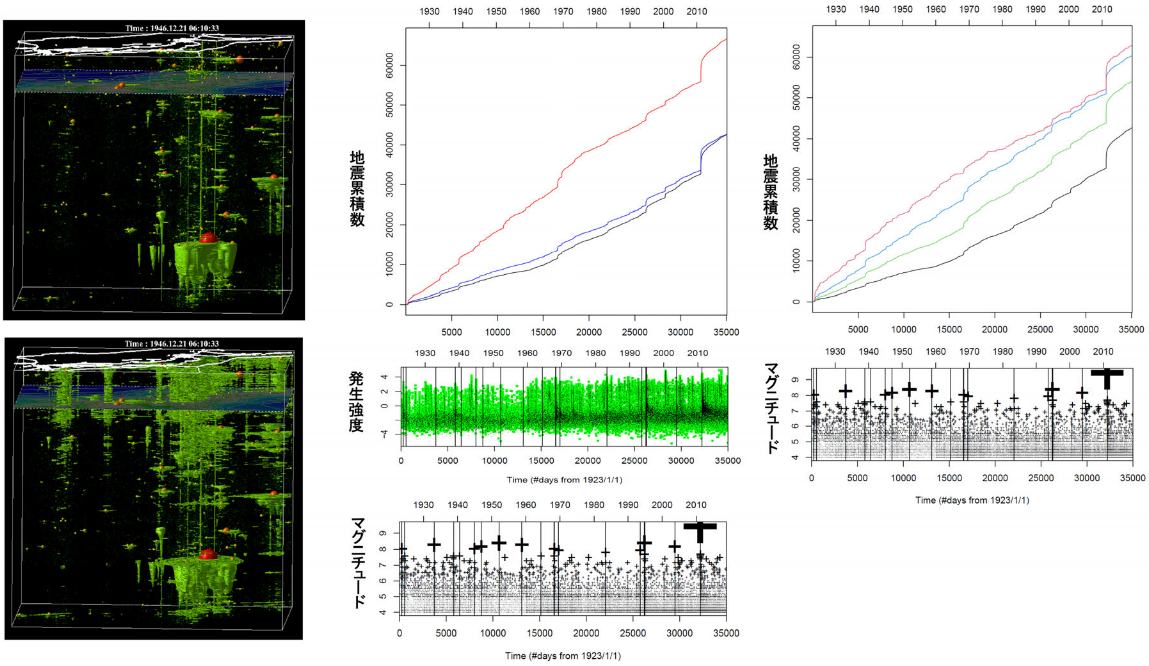



図 3. 補正前と補正後の地震活動度(1923-2020)の推定。左側図は、HIST-ETAS-μK モデルを用いて M≥4 データから算出した推定地震活動度の時空間等高面を示しており、上段が推定結果、下段が補正後結果を表わしている。中央図は、上段に M≥4 検出データの累積曲線（黒)、HIST-ETAS モデルの累積曲線（青)、推定欠測累積曲線（赤）を描き、中段には検出データ由来の推定強度（黒点）と補正強度（緑点)、下段にカタログ M≥4 の M-T 図を示している。右側図は、上段で b=0.9 を仮定し、10^b(M-4)倍した各下限マグニチュード（黒：M≥4、緑：M≥4.5、青：M≥5、赤：M≥6）の累積曲線を描き、下段ではカタログ M≥4 データに基づく M-T 図を示している。

3） B-3 HIST-ETAS モデルによる短期・リアルタイム予測と可視化

予測結果の HIST-ETAS 動画をモニターすることで、群発型地震活動や地震異常現象を遡って解析し、昭和期の南海トラフにおける続発地震の事例を解説した（尾形, 2025)。
全日本で HIST-ETAS モデルを使用して、続発する地震発生率を準リアルタイムで空間的に予測する仕組みを活用し、日本周辺の M ≥ 5 の地震を短期的に空間予測した。その結果を情報利得（対数尤度）を用いて評価・比較したところ、HIST-ETAS モデルはポアソンモデルより優れた成績を示した。ただし、簡易版である HIST-ETAS-μK モデルとフルバージョンである HIST-ETAS-5pa モデルの間の成績には、場所や時間による違いがあるものの、全体的には顕著な差異は認められなかった。図 4 は、これらの評価における時空間的な詳細を示している。

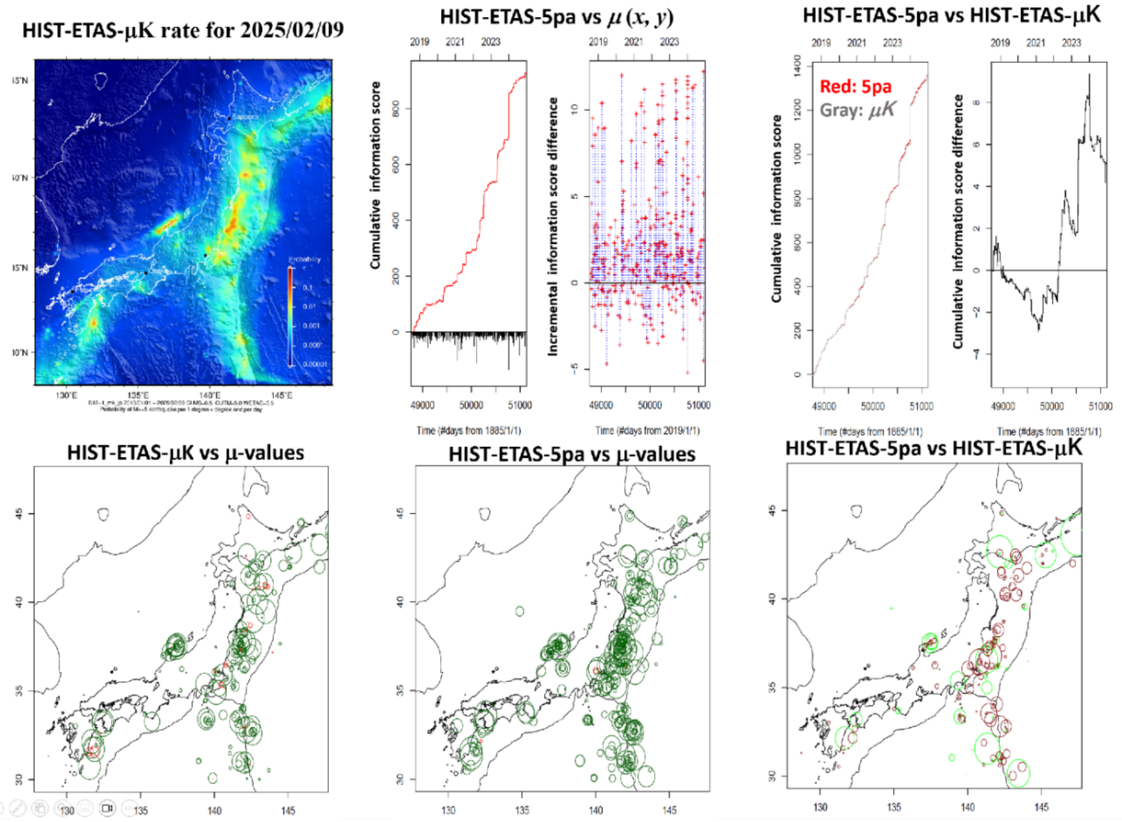



図 4. M≥5 の地震に対する 1 平方度あたり 1 日確率による時空間的なオンライン予測と評価。左上図：HIST-ETAS モデルによる日ごとの地震活動度予測の一例。中央上図：μ(x,y)予測に対する HIST-ETAS-5pa モデル予測の累積情報利得（対数尤度比）の累積値と、時間経過に伴う各地震時の利得差を示す。右上図：HIST-ETAS-5pa モデルと HIST-ETAS-μK モデルの累積利得を比較した結果を示す。左下図および中央下図：常時地震活動度 μ(x,y)値予測に対するそれぞれ HIST-ETAS-μK モデルおよび HIST-ETAS-5pa モデル予測による各地震位置での利得差を示す。緑の丸は正値、赤の丸は負値を示し、円丸の大きさは差の絶対値に比例している。右下図：HIST-ETAS-5pa モデルと HIST-ETAS-μK モデルの利得差を示す。

引用文献


- 野村俊一, 内田直希, 尾形良彦 (2013) 時空間非定常BPTモデルと北日本太平洋沖沈み込み帯小繰り返し地震（1993.7.15 – 2011.3.10 ）の解析例 (1)非定常時空 BPT モデルと、1993年7月15日から 2011年3月11日まで沈み込む太平洋プレートの上面で発生した繰り返し地震の解析,地震予知連絡会報 第90巻(2-2)、pp.49-53
- 尾形良彦 (2024) YouTube https://www.youtube.com/@yosihikoogata784
- 尾形良彦 (2025) 大地震予測の可能性： 昭和の南海トラフ地震前後の活動などをめぐって ― 時空間ETASモデルの可視化で追う活動の回顧的シナリオ, https://star-e.ism.ac.jp/works/Essay_Ogata2025.html

(c) 結論ならびに今後の課題

1) B-1 ETASによる長期予測

階層ベイズ時空間ETAS（HIST-ETAS）モデルを用いてM≧５の背景活動度（μ値）を算出し、GR則に基づき大規模地震の予測を提案した。ただし、HIST-ETAS-5paモデルとHIST-ETAS-μKモデルの背景強度空間分布に違いは見られず、M7クラスの大地震の発生位置と良好な対応結果が得られた。また、北日本の東沖合および南関東海域の背景強度空間分布が、小繰り返し相似地震の配置と非常に良く対応していることが明らかになった。今後の課題は、大地震の多項目確率予測として活用するためのさらなる研究である。

2) B-2 欠損データの補完

下限マグニチュードを可能な限り低く設定し、日本全域の時空間検出率をモデル化することで、各地域における欠測率を推定した。さらに、その推定結果に基づく検出率の変動をYouTube（尾形, 2024）で公開した。これにより、欠測データがHIST-ETASモデルの推定および予測に与える影響を補正し、真の地震発生率を算出する手法を開発した。今後は、本震直後の余震活動や群発型の地震活動を、小地震の欠測を考慮したHIST-ETASモデルでリアルタイムに時空間予測するシステムの実装、さらには時空間活動での活動移動などの異常現象のモニタリングを目指す。

3) B-3 ETASによる短期・リアルタイム予測と可視化

HIST-ETASモデルを用いて、海域を含む日本本土周辺の続発地震活動をオンラインで時空間的に予測し、その画像を内部USLに記録した。また、最近5年間の海域を含む日本本土におけるM≥5データに基づき、時空間予測を実施・可視化し、その結果を動画としてYouTube（尾形, 2024）で公開した。さらに、予測精度を情報利得（対数尤度）で評価比較した結果、HIST-ETAS-5paモデルおよびHIST-ETAS-μKモデルの間に顕著な違いは見られず、いずれも良好な結果を示した。

この成果により余震欠測が甚だしい本震直後の準リアルタイム予測を実装する手がかりを得た。今後の課題は、直後の安定したリアルタイム空間確率予測を実装するため、ロバストな推定方式を確保する方法について実験と検証を行うことである。

(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 38 件、うち海外計 8 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 |
|---|---|---|---|---|---|
| Multiple Aftershock Mechanisms of 2014 Kangding Doublet, Eastern Tibet based on AI Technique（口頭発表） | Wu, J.*, Gao, X., Zhuang, J., Yao, D., Wei, M. and Song, J. | AGU Annual Meeting 2024, ワシントン D.C., 米国 | 2024年12月13日 | 国外 | |
| A challenging application of NESTORE Machine Learning Algorithm to Japan seismicity（ポスター発表） | Gentili, S.*, Chiapetta, G.D., Petrillo, G., Brondi, P. And Zhuang, J. | AGU Annual Meeting 2024, ワシントン D.C., 米国 | 2024年12月12日 | 国外 | |
| When and Where Will the Next Big Quake Strike? Insights from Physical Modeling（ポスター発表） | Lippiello, E.*, Marzocchi, W., Petrillo, G., Rosso, A. And Zhuang, J. | AGU Annual Meeting 2024, ワシントン D.C., 米国 | 2024年12月11日 | 国外 | |
| Statistical Characterization of the BMKG Seismic Catalog for Enhanced Seismic Risk Monitoring in the Indonesian Region（ポスター発表） | Petrillo, G.* and Zilio, L.D. | AGU Annual Meeting 2024, ワシントン D.C., 米国 | 2024年12月10日 | 国外 | |
| Quantification of Fast-Earthquake Activation Following Tectonic Tremors in the Iwate-Oki Region of the Japan Trench（口頭発表） | Ito, Y.*, Nishikawa, T., Ito, Y. and Ohyanagi, S. | AGU Annual Meeting 2024, ワシントン D.C., 米国 | 2024年12月12日 | 国外 | |
| Frequency-magnitude distributions of earthquakes imply likelihood and unlikelihood of megaquake recurrence in Japan（口頭発表） | Nanjo, K.* and Hori, T. | AGU Annual Meeting 2024, Washington D.C., 米国 | 2024年12月12日 | 国外 | ○ |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Global Investigation of Foreshock Acceleration Prior to Large Earthquakes（口頭発表） | Koyama, K.*, Nishikawa, T. and Nishimura, T. | AGU Annual Meeting 2024, ワシントンD.C., 米国 | 2024年12月12日 | 国外 | ○ |
| Development of ETAS models: before its birth to today（招待講演オンライン →YouTube録画（講演・質疑等）） | Ogata, Y. | Scientific Seminars by renowned international experts - INGV 25th Anniversary, INGV Rome - streaming | 2024年11月25日 | 国外 | ○ |
| 地震学的要素を取り入れた測地学研究の新展開（坪井賞記念講演） | 三井 雄太 | 日本測地学会第 142回講演会，大和ミュージアム | 2024年10月31日 | 国内 | ○ |
| 深発地震の余効変動に現れる上部マントル粘性不均質：空間パターンの数値実験（ポスター発表） | 三井 雄太, 溝田 霧斗, 大舘 未来 | 日本測地学会第 142回講演会，大和ミュージアム | 2024年10月31日 | 国内 | ○ |
| 地震予測可能性の定量化およびエントロピーに基づく地震予測評価スコアの精緻化（口頭発表） | 庄 建倉 | 日本地震学会2024年秋季大会，朱鷺メッセ 新潟コンベンションセンター | 2024年10月23日 | 国内 | |
| ETASモデルによる非一様な地震データの逆解析（口頭発表） | 尾形 良彦 | 日本地震学会2024年秋季大会，朱鷺メッセ 新潟コンベンションセンター | 2024年10月22日 | 国内 | ○ |
| 2016年鳥取県中部地震余震域における空間応力パターン推定（ポスター発表） | 岩田 貴樹*, 飯尾 能久 | 日本地震学会2024年秋季大会，朱鷺メッセ 新潟コンベンションセンター | 2024年10月21日 | 国内 | |
| 伊豆東部の地震活動と地殻変動の解析について（ポスター発表） | 楠城 一嘉*, 行竹 洋平, 熊澤 貴雄 | 日本地震学会2024年秋季大会，朱鷺メッセ 新潟コンベンションセンター | 2024年10月21日 | 国内 | ○ |
| 房総半島沖における群発地震検出と小規模なスロースリップとの関連の調査（口頭発表） | 吉村 嶺*, 西川 友章, 西村 卓也 | 日本地震学会2024年秋季大会，朱鷺メッセ 新潟コンベンションセンター | 2024年10月22日 | 国内 | ○ |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 2023年2月6日にトルコで発生したM7.8とM7.5の地震前後の地震活動について（口頭発表） | 楠城 一嘉*,<br>熊澤 貴雄,<br>井筒 潤,<br>堀 高峰,<br>長尾 年恭,<br>尾池 和夫 | 日本地震学会2024年秋季大会，朱鷺メッセ 新潟コンベンションセンター | 2024年10月22日 | 国内 | ○ |
| 地震活動カタログのみから誘発地震活動を定量化するためのモデリング（口頭発表） | 熊澤 貴雄*,<br>尾形 良彦 | 日本地震学会2024年秋季大会，朱鷺メッセ 新潟コンベンションセンター | 2024年10月22日 | 国内 | ○ |
| 群発地震活動と2024年M7.6能登半島地震の発生（口頭発表） | 加藤 愛太郎*,<br>中川 茂樹,<br>蔵下 英司,<br>酒井 慎一,<br>江本 賢太郎,<br>松本 聡 | 日本地震学会2024年秋季大会，朱鷺メッセ 新潟コンベンションセンター | 2024年10月22日 | 国内 | ○ |
| 日本列島周辺で発生したマグニチュード7級地震の余震域拡大速度とb値(b-positive)：プレート境界地震の特性（口頭発表） | 三井 雄太*,<br>宇田川 裕矢,<br>宮本 彩加 | 日本地震学会2024年秋季大会，朱鷺メッセ 新潟コンベンションセンター | 2024年10月22日 | 国内 | ○ |
| 日向灘地域のM7クラス地震が巨大地震を誘発する確率について（ポスター発表） | 福島 洋*,<br>西川 友章 | 日本地震学会2024年秋季大会，朱鷺メッセ 新潟コンベンションセンター | 2024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*,<br>西川 友章,<br>西村 卓也 | 日本地震学会2024年秋季大会，朱鷺メッセ 新潟コンベンションセンター | 2024年10月22日 | 国内 | ○ |
| 真のb値を推定する再帰型ニューラルネットワークの構築（ポスター発表） | 麻生 尚文 | 日本地震学会2024年秋季大会，朱鷺メッセ 新潟コンベンションセンター | 2024年10月21日 | 国内 | ○ |
| 四国西部におけるスロースリップ発生頻度のモデル化（ポスター発表） | 加藤 寛人*,<br>麻生 尚文 | 日本地震学会2024年秋季大会，朱鷺メッセ 新潟コンベンションセンター | 2024年10月21日 | 国内 | ○ |
| プレート運動方向に基づく三重会合点の存在確率の評価（ポスター発表） | 藤沢 宏修*,<br>麻生 尚文 | 日本地震学会2024年秋季大会，朱鷺メッセ 新潟コンベンションセンター | 2024年10月21日 | 国内 | ○ |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 2023年に発生した伊豆大島近海の浅部における火山性群発地震（ポスター発表） | 荒川 日南子*, 麻生 尚文 | 日本地震学会2024年秋季大会，朱鷺メッセ 新潟コンベンションセンター | 2024年10月21日 | 国内 | ○ |
| ビーチボールの模型による可視化（ポスター発表） | 伊倉 真論*, 麻生 尚文 | 日本地震学会2024年秋季大会，朱鷺メッセ 新潟コンベンションセンター | 2024年10月22日 | 国内 | ○ |
| 点過程モデルを用いた異常地震活動の研究：M7.6能登半島地震に至る群発地震活動の時空間変動と異常活動の解釈について（招待講演） | 熊澤 貴雄*, 尾形 良彦 | 科研費シンポジウム，石川県政記念しいのき迎賓館 | 2024年9月23日 | 国内 | ○ |
| 2024年M7.6能登半島地震前後の地震活動の統計的特徴（口頭発表） | 熊澤 貴雄*, 尾形 良彦 | 2024年度統計関連学会連合大会，東京理科大学神楽坂キャンパス | 2024年9月4日 | 国内 | ○ |
| 不均質に記録された地震カタログから真の地震活動率を推定する（口頭発表） | 尾形 良彦 | 2024年度統計関連学会連合大会，東京理科大学神楽坂キャンパス | 2024年9月4日 | 国内 | ○ |
| 能登半島での一連の地震活動の推移とM7.6前発生前期間における異常活動の解釈（口頭発表） | 熊澤 貴雄*, 尾形 良彦 | 日本地球惑星科学連合(JpGU)2024年大会，幕張メッセ（ハイブリッド開催） | 2024年5月26日 | 国内 | ○ |
| 日本の地殻内地震発生数とせん断ひずみエネルギー密度変化の空間的相関関係（口頭発表） | 上田 拓*, 西村 卓也 | 日本地球惑星科学連合(JpGU)2024年大会，幕張メッセ（ハイブリッド開催） | 2024年5月26日 | 国内 | |
| 大地震直後の非均一地震カタログに基づく非定常ETASモデルによる余震活動の逆解析（口頭発表） | 尾形 良彦 | 日本地球惑星科学連合(JpGU)2024年大会，幕張メッセ（ハイブリッド開催） | 2024年5月26日 | 国内 | ○ |
| Space and time changes in stress state and b-value off the coast of Tohoku and Hokkaido districts（口頭発表） | 楠城 一嘉*, 堀 高峰 | 日本地球惑星科学連合(JpGU)2024年大会，幕張メッセ（ハイブリッド開催） | 2024年5月26日 | 国内 | ○ |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Implications of fault-valve behavior illuminated by early aftershock evolutions （招待講演） | 加藤 愛太郎 | 日本地球惑星科学連合(JpGU)2024年大会，幕張メッセ（ハイブリッド開催） | 2024年5月29日 | 国内 | ○ |
| Foreshock sequence prior to the 2024 M7.6 Noto-Hanto earthquake, Japan （口頭発表） | 加藤 愛太郎*,<br>中川 茂樹,<br>蔵下 英司,<br>酒井 慎一 | 日本地球惑星科学連合(JpGU)2024年大会，幕張メッセ（ハイブリッド開催） | 2024年5月28日 | 国内 | ○ |
| B-positive推定の従来法との比較：日本列島周辺におけるマグニチュード７級地震の余震での例（ポスター発表） | 三井 雄太 | 日本地球惑星科学連合(JpGU)2024年大会，幕張メッセ（ハイブリッド開催） | 2024年5月26日 | 国内 | ○ |
| Insights into the Mechanics of the Lower Crust from Focal Mechanisms of Low-Frequency Earthquakes on the San Andreas Fault （ポスター発表） | 麻生 尚文*,<br>麻生 未季,<br>Shelly David,<br>井出 哲 | 日本地球惑星科学連合(JpGU)2024年大会，幕張メッセ（ハイブリッド開催） | 2024年5月28日 | 国内 | ○ |
| 菅原道真の比類無い能力は西暦887年8月仁和地震非南海地震説を補強する（口頭発表） | 松浦 律子 | 日本地球惑星科学連合(JpGU)2024年大会，幕張メッセ（ハイブリッド開催） | 2024年5月26日 | 国内 | ○ |

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載　：計 13 件、うち国外計 12 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 |
|---|---|---|---|---|---|
| Earthquake Forecasting Based on *b* Value and Background Seismicity Rate in Yunnan Province, China. | Zhang, Y., Wang, R., Shi, H., Miao, M., Zhuang, J., Chang, Y., Jiang, C., Meng, L., Li, D., Liu, L., Su, Y., Zhang, Z., and Han, P. | *Entropy* | 2025年2月15日 | 国外 | 〇 |
| Spatial and temporal variations of the 3-year earthquake swarm activities leading up to the M7.6 Noto Peninsula earthquake and interpretations of their activities. | Kumazawa, T. and Ogata, Y. | *Earth Planets Space* | 2024年12月18日 | 国外 | 〇 |
| How the ETAS models were created, used, and evolved -- Personal views and perspectives | Ogata, Y. | *Annals of Geophysics* | 2024年10月31日 | 国外 | 〇 |
| Preface to the focus section on statistical seismology, devoted to the memory of the late Yan Kagan, Dave Jackson, and Ilya Zaliapin | Schoenberg F., Werner W., Rong Y., Marsan D. and Zhuang J. | *Seismological Research Letters* | 2024年10月17日 | 国外 | |
| Earthquake Predictability and Forecast Evaluation Using Likelihood‐Based Marginal and Conditional Scores | Zhuang, J. | *Seismological Research Letters* | 2024年10月8日 | 国外 | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Estimating Real Seismicity Rates from Nonhomogeneously Recorded Earthquake Catalogs | Ogata, Y. | *Seismological Research Letters* | 2024年10月8日 | 国外 | ○ |
| Non‐Stationary ETAS Model: How It Works for External Forcing | Kumazawa, T. and Ogata, Y. | *Seismological Research Letters* | 2024年8月29日 | 国外 | ○ |
| Inverse analysis of seismic activity rate changes for severely incomplete sequences: comparison of aftershock activity patterns immediately following the 2023 M6.5 and 2024 M7.6 Noto Peninsula earthquakes | Ogata, Y. and Kumazawa, T. | *Earth Planets Space* | 2024年8月23日 | 国外 | ○ |
| Developing, Testing, and Communicating Earthquake Forecasts: Current Practices and Future Directions | Mizrahi L., Dallo I., van der Elst N. J., Christophersen A., Spassiani I., Werner M. J., Iturrieta P., Bayona J. A., Iervolino I., Schneider M., Page M. T., Zhuang J., Herrmann M., Michael A. J., Falcone G., Marzocchi W., Rhoades D., Gerstenberger M., Gulia L., Schorlemmer D., Becker J., Han M., Kuratle L., Marti M. and Wiemer S. | *Reviews of Geophysics* | 2024年8月13日 | 国外 | ○ |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Stable estimation of the Gutenberg-Richter b-values by the b-positive method: a case study of aftershock zones for magnitude-7 class earthquakes | Mitsui, Y. | *Earth Planets Space* | 2024年7月4日 | 国外 | ○ |
| Bayesian earthquake forecasting approach based on the epidemic type aftershock sequence model | Petrillo, G. and Zhuang, J. | *Earth Planets Space* | 2024年5月24日 | 国外 | |
| Comparison of statistical low-frequency earthquake activity models | Nishikawa, T. | *Earth Planets Space* | 2024年4月17日 | 国外 | |
| 大きな地震連鎖の確率予測をどう求めるか | 尾形良彦 | *日本地震学会モノグラフ* | 2024年4月 | 国内 | ○ |

(e) 特許出願、ソフトウエア開発、使用・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウエア開発

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<br>統計基盤数理研究系<br>准教授 | 矢野　恵佑 | R6.4.1<br>～<br>R7.3.31 | 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 ℓ1-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、$\ell_1$-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

前年度までの研究で開発した手法群を提供する。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、さらに新規観測点設置法を完成させる。

(d) 令和６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６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論文を改訂した。次に、令和５年度に引き続き、緊急地震速報に資する観測点統合・観測点選択への適用(特に、時間変化する重要度の統合)および現実的な設定でのシミュレーションを行った。そして、ベイズ感度公式のアイデアを新規観測点の設置に利用する検討を開始した。最後に、ノイズと地震波形を識別し、到達時刻および初期Ｐ波の極性を単一の観測点だけから抽出するために、情報理論に基づいたより高精度な方法を開発した。

2) C-2 逆解析のための観測点統合・選択法の開発

逆解析用の観測点情報の統合・選択法の開発を行う。令和５年度に引き続き、国立大学法人東北大学が実施する課題と協同し、ロバストスペクトル解析に基づき衛

星測位観測点の各点のノイズスペクトル情報の整理を行い、論文を投稿した。さらに、観測点の統合に資する情報として衛星測位観測点の速度ベクトルのクラスタリングに着目し、国立大学法人東北大学が実施する課題と協同し、地表形状を考慮した局所〜大域で使える観測点のクラスタリング手法を開発し論文化を行なった。

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

　昨年度に引き続きテーマ D と協同し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を検討した。時間変化する尤度関数に基づくベイズ感度公式に基づく動的観測点選択法(Iba and Yano, 2023,2022)を開発した。ベイズ感度公式に基づく観測点選択法は、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り、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。時間変化する尤度関数を取り込むことで、観測点の重要度の時間変化を追うことができるようになる。今年度は時間変化する尤度関数を現行の緊急地震速報に沿った形で適切にデザインし、その挙動を確認した。

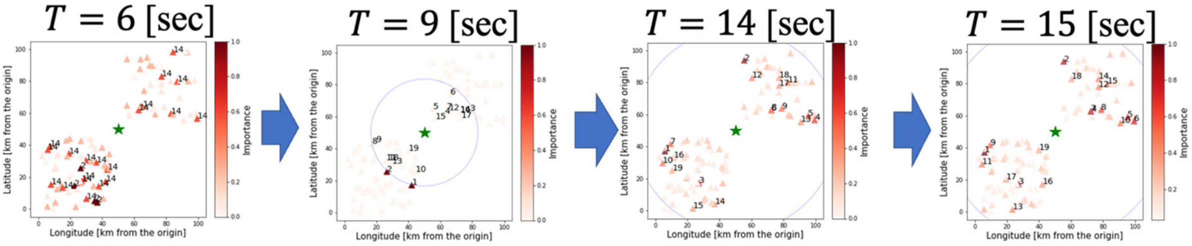



図 1　動的観測点選択：色が濃い観測点ほど重要度が高いことを示す。波面付近の観測点の重要度が上がり、その内側はカバレッジをよくするように分布していることがわかる。尤度関数を更新し、より緊急地震速報に即した形となった。

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。また、GNSS 速度ベクトルに基づく観測点のグルーピング手法を開発した。まず開発したノイズスペクトル推定は二つのスペクトル密度$S$、$\tilde{S}$に対して以下で定義される spectral Rényi divergence に基づきスペクトルパラメータを推定する：

$$D_{\alpha}[\,S:\tilde{S}\,] \coloneqq \frac{1}{2(1-\alpha)}\int\left[\log\{\alpha\tilde{S}(f)+(1-\alpha)S(f)\}-\alpha\log\tilde{S}(f)-(1-\alpha)\log S(f)\right]df.$$

この手法は特に観測スペクトルに周波数領域での外れ値(モデルに考慮していないシャープなスペクトルピーク等)の存在に対して頑健にスペクトルパラメータを推定することができる。理論的に、開発手法が Whittle 尤度法などの従来手法よりも頑健であることを示されている(Takabatake and Yano, 2023)。今年度は東北大課題と連携し 1996 年から 2023 年までの 1000 点近くの GNSS データ(F5 解)に適用し論文のプレプリントを公開した。さらに、GNSS 速度ベクトルに基づく観測点のグルーピング手法 TerraVector-Clust を開発し、全地球の GNSS 観測点のグルーピング及び台湾の GNSS 観測点のグルーピングを行い、似ている観測点群の可視化(観測点統合)に成功した。

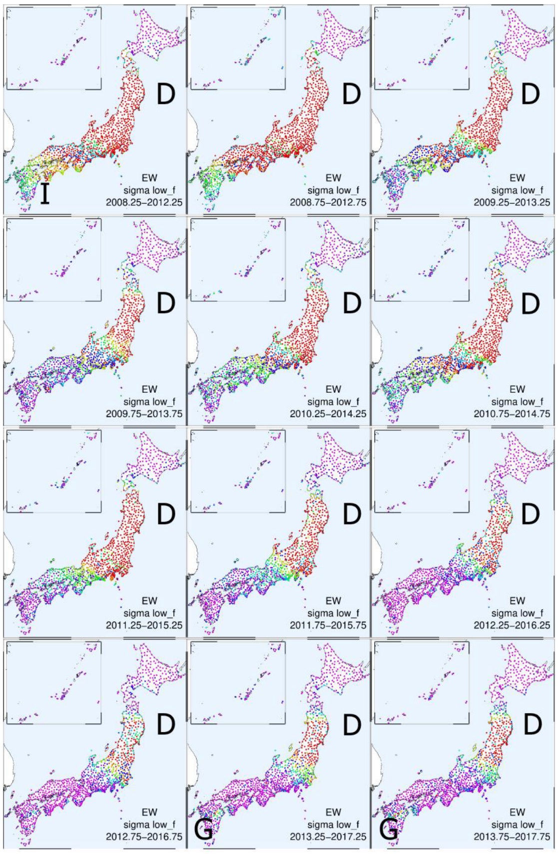



図 C2　ロバストスペクトル推定手法を GEONET (F5 解)に適用した結果。推定したパラメータの時空間変化が 2011 年東北地方太平洋沖地震(D)、2016 年熊本地震(G)、2009 年頃の豊後水道長期スロースリップといった地震・地殻変動現象と対応していることがわかる。(Kano, Yano, et al., 2025)

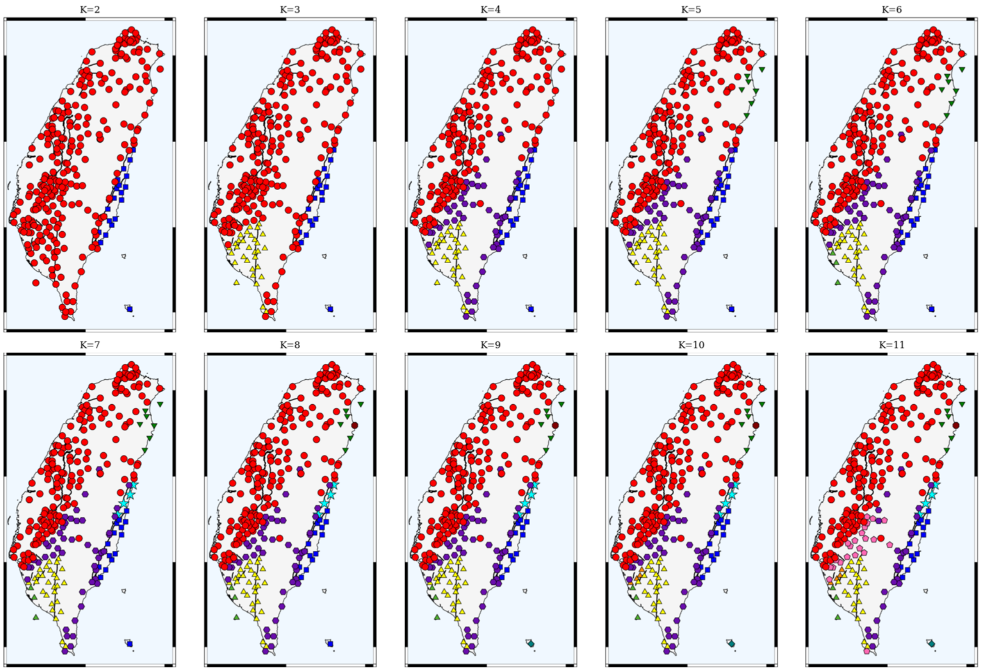



図 C3: 開発手法による台湾の GNSS 観測点のグルーピング結果。地質境界によく対応していることがわかる。(Takahashi, Yano, Kano, 2025)

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., 2004)

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


・ Tabakatake, T. and Yano, K (2023) Towards a robust frequency-domain analysis: Spectral Rényi divergence revisited, arXiv:2310.06902
・ Yano K, Kano M (2022) 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
- Iba Y, Yano K (2023) *Posterior covariance information criterion for weighted inference.* arXiv:2106.13694, accepted at ***Neural Computation.***
- Iba Y, Yano K (2022) Posterior covariance information criterion for arbitrary loss function*s.* ***arXiv***:2206.05887

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) 結論ならびに今後の予定

テーマＤと協同し、ベイズ感度公式に基づく動的な観測点選択手法が現実的な設定において有効であることを確認した。次年度以降はベイズ感度公式のアイデアを活用し、新規観測点の設置に向けた検討を行う。ベイズ感度公式に基づく動的な観測点選択手法が現実的な設定において有効であることを確認した。次年度はこれまで検討した手法の論文化及び事後分布の形状に基づくコスト関数を設計することで新規観測点設置の客観的な提案法を検討する。

(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 18 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 |
|---|---|---|---|---|---|
| Comparison of Priors in Objective Bayesian Inversion for Geophysical Data Analysis（ポスター発表） | Niu, Y.* and Zhuang, J. | AGU Annual Meeting 2024, ワシントン D.C., 米国 | 2024年12月10日 | 国外 | ○ |
| 局所地域から全球スケールに適用可能な地殻ブロックの同定法：台湾のGNSSデータへの適用例（口頭発表） | 矢野 恵佑*, 高橋 温志, 加納 将行 | 日本測地学会第 142 回講演会, 大和ミュージアム | 2024年10月30日 | 国内 | ○ |
| 西南日本のGNSS地殻変動時系列の深層学習によるスロースリップの自動検出（口頭発表） | 田中 優介*, 加納 将行, 矢野 恵佑 | 日本測地学会第 142 回講演会, 大和ミュージアム | 2024年10月30日 | 国内 | ○ |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 深層学習を利用した GNSS変位空間補間器の実装と非地震性断層すべり推定（口頭発表） | 中川 亮*，<br>福島 洋，<br>加納 将行，<br>矢野 恵佑，<br>平原 和朗，<br>田中 優介，<br>岡田 悠太郎 | 日本測地学会第 142回講演会，大和ミュージアム | 2024年10月30日 | 国内 | ○ |
| 駿河トラフにおけるやや長期的な浅部スロースリップイベント：GNSSに基づく検出とすべり分布推定　（口頭発表） | 菊地 祐次*，<br>三井 雄太，<br>加納 将行 | 日本測地学会第 142回講演会，大和ミュージアム | 2024年10月30日 | 国内 | ○ |
| ハイレートGNSSデータを用いたスロースリップイベントの検出と時空間発展の考察：数値実験と房総半島（口頭発表） | 新井 璃子*，<br>三井 雄太 | 日本測地学会第 142回講演会，大和ミュージアム | 2024年10月30日 | 国内 | ○ |
| 2024年能登半島地震の地震後地殻変動における粘弾性緩和と余効すべりの寄与-超稠密GNSS観測網による検証-　（口頭発表） | 大舘 未来*，<br>太田 雄策，<br>三井 雄太 | 日本測地学会第 142回講演会，大和ミュージアム | 2024年10月31日 | 国内 | ○ |
| 2014 年紀伊水道スロースリップイベントの時期におけるGNSS測位解の比較（ポスター発表） | 岡田 望海*，<br>三井 雄太 | 日本測地学会第 142回講演会，大和ミュージアム | 2024年10月31日 | 国内 | ○ |
| 季節調整プログラムPySTELの開発とGNSSデータへの適用（ポスター発表） | 岡田 悠太郎，<br>上田 拓 | 日本測地学会第 142回講演会，大和ミュージアム | 2024年10月31日 | 国内 | ○ |
| 頑健なスペクトル推定に基づくGNSS時系列の時空間特性（口頭発表） | 矢野 恵佑*，<br>加納 将行，<br>髙畠 哲也，<br>田中 優介，<br>太田 雄策 | 日本地震学会2024年秋季大会，朱鷺メッセ 新潟コンベンションセンター | 2024年10月22日 | 国内 | ○ |
| 最小情報従属モデルの地震カタログへの適用（招待講演） | 矢野 恵佑 | 科研費シンポジウム，石川県政記念しいのき迎賓館 | 2024年9月23日 | 国内 | ○ |
| 最小情報従属モデルの密度比推定（口頭発表） | 清 智也*，<br>矢野 恵佑 | 2024年度統計関連学会連合大会，東京理科大学神楽坂キャンパス | 2024年9月4日 | 国内 | ○ |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 事後平均とMAP推定量を漸近的に一致させる事前分布のペア（口頭発表） | 奥戸 道子*,<br>矢野 恵佑 | 2024年度統計関連学会連合大会，東京理科大学神楽坂キャンパス | 2024年<br>9月2日 | 国内 | ○ |
| プラズマ乱流における大規模自由度の縮約手法とダイナミクス解析（口頭発表） | 佐々木 真*,<br>古田原 拓実,<br>矢野 恵佑,<br>奥野 彰文,<br>三分一 史和 | 2024年度統計関連学会連合大会，東京理科大学神楽坂キャンパス | 2024年<br>9月2日 | 国内 | ○ |
| 頑健なスペクトル解析法に基づくGNSS時系列のノイズ特性：（１）ロバストスペクトル推定手法の説明（ポスター発表） | 矢野 恵佑*,<br>加納 将行,<br>高畠 哲也,<br>田中 優介,<br>太田 雄策 | 日本地球惑星科学連合(JpGU)2024年大会，幕張メッセ（ハイブリッド開催） | 2024年<br>5月29日 | 国内 | ○ |
| 頑健なスペクトル解析法に基づくGNSS時系列のノイズ特性：（２）GEONET F5解への適用（ポスター発表） | 加納 将行*,<br>矢野 恵佑,<br>田中 優介,<br>高畠 哲也,<br>太田 雄策 | 日本地球惑星科学連合(JpGU)2024年大会，幕張メッセ（ハイブリッド開催） | 2024年<br>5月29日 | 国内 | ○ |
| Data Assimilation for Fault Slip Monitoring and Short-Term Prediction of Spatio-Temporal Evolution of Slips: Application to the 2010 Long-Term SSE in the Bungo Channel, Japan（ポスター発表） | 加納 将行*,<br>田中 優介,<br>佐藤 大祐,<br>飯沼 卓史,<br>堀 高峰 | 日本地球惑星科学連合(JpGU)2024年大会，幕張メッセ（ハイブリッド開催） | 2024年<br>5月28日 | 国内 | ○ |
| Objective clustering of GNSS velocities based on parallel translation and Euler-vector estimation for the identification of crustal blocks（ポスター発表） | 矢野 恵佑*,<br>高橋 温志,<br>加納 将行 | 日本地球惑星科学連合(JpGU)2024年大会，幕張メッセ（ハイブリッド開催） | 2024年<br>5月27日 | 国内 | ○ |

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載　：計３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 |
|---|---|---|---|---|---|
| Stochastic determination of arrival time and initial polarity of seismic waveform. | Pei, W., Zhuang, J. and Zhou, S. | *Earth Planets Space* | 2025年3月18日 | 国外 | ○ |
| A GNSS-Velocity Clustering Method Applicable at Local to Global Scales | Atsushi Takahashi, Keisuke Yano, Masayuki Kano | *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* | 2025年2月16日 | 国外 | ○ |
| Bayesian Merging of Earthquake Magnitudes Determined by Multiple Seismic Networks | Si, Z., Zhuang, J., Gentili, S., Jiang, C. and Wang, W. | *Seismological Research Letters* | 2024年7月2日 | 国外 | ○ |

(e) 特許出願、ソフトウエア開発、使用・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウエア開発

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。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<br>地震防災部門<br>准教授 | 山田　真澄 | R6.4.1<br>～<br>R7.3.31 | 1,500,000 円 | 450,000 円 |
| 統計数理研究所<br>先端データサイエンス<br>研究系　准教授 | ウ・ステファン | R6.4.1<br>～<br>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ベ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

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 6 年度の業務の目的

1) D-1 ETAS 地震予測を事前情報に活用

昨年度に、テーマ B および国立大学法人東京大学地震研究所の協力を得て、ETAS を一日ごとに計算するサーバーを構築し、試験的に 2011 年東北地方太平洋沖地震の本震データに ETAS を事前情報に入れて震源推定を行った。令和 6 年度は、ETAS を事前情報に統合する手法について検討を行い、緊急地震速報の拡張 IPF 法の震源決定精度に与える影響を評価する。

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を導入して、観測点の情報量を評価する手法を開発したことから、令和 6 年度は、様々な観測点の分布に対する情報量の評価を行う。

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。令和 5 年度までに構築した、地震動のエンベロープ波形を回帰曲線で近似し、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う。

## (2) 令和 6 年度の成果

(a) 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震源決定手法である IPF 法の事前情報として導入することを試みた。導入方法を工夫した結果、観測点分布の悪い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、気象庁震度のエンベロープ関数の予測式を構築し、地震破壊の進行中に各地の震度の変化が推定できるようにした。

(b) 業務の成果

1) D-1 ETAS 地震予測を事前情報に活用

ETAS を事前情報に統合する手法について検討を行い、緊急地震速報の IPF 法の震源決定精度に与える影響を評価した。2024 年 6 月 3 日に発生した能登半島の地震では、観測網の偏りから一様分布の事前情報だと震源決定の誤差が大きくなるが、

ETAS 情報を事前情報に利用した場合は、震源決定の精度が改善された。事前情報、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可能性が示された。

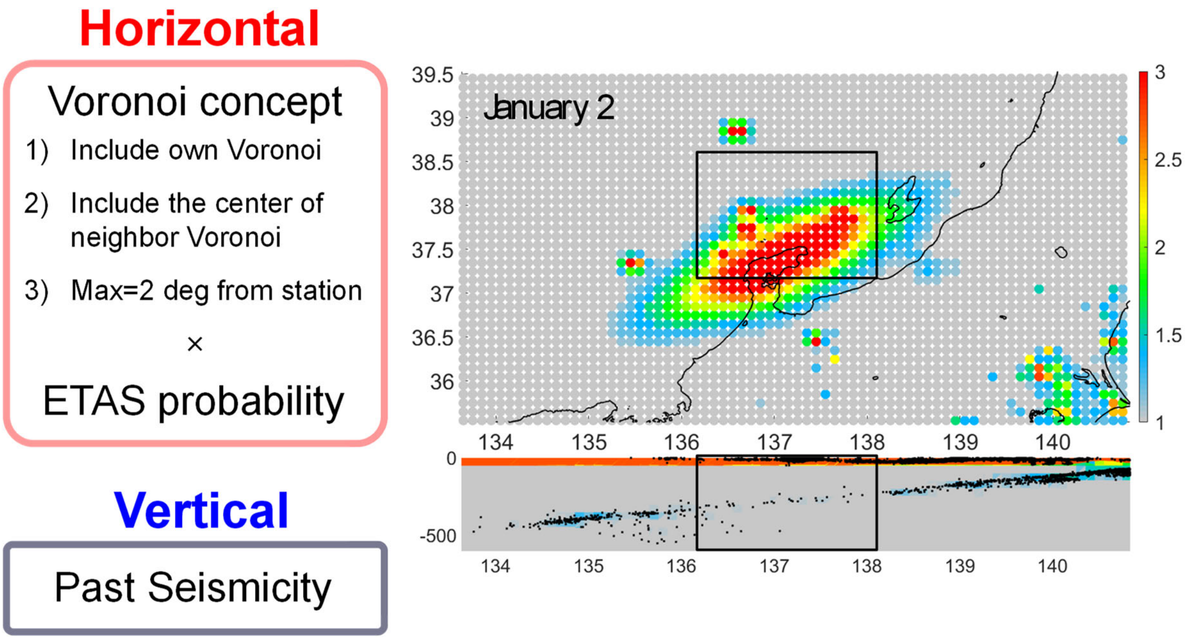



図 1　ETAS 予測を拡張 IPF 法の事前情報に利用する概念図

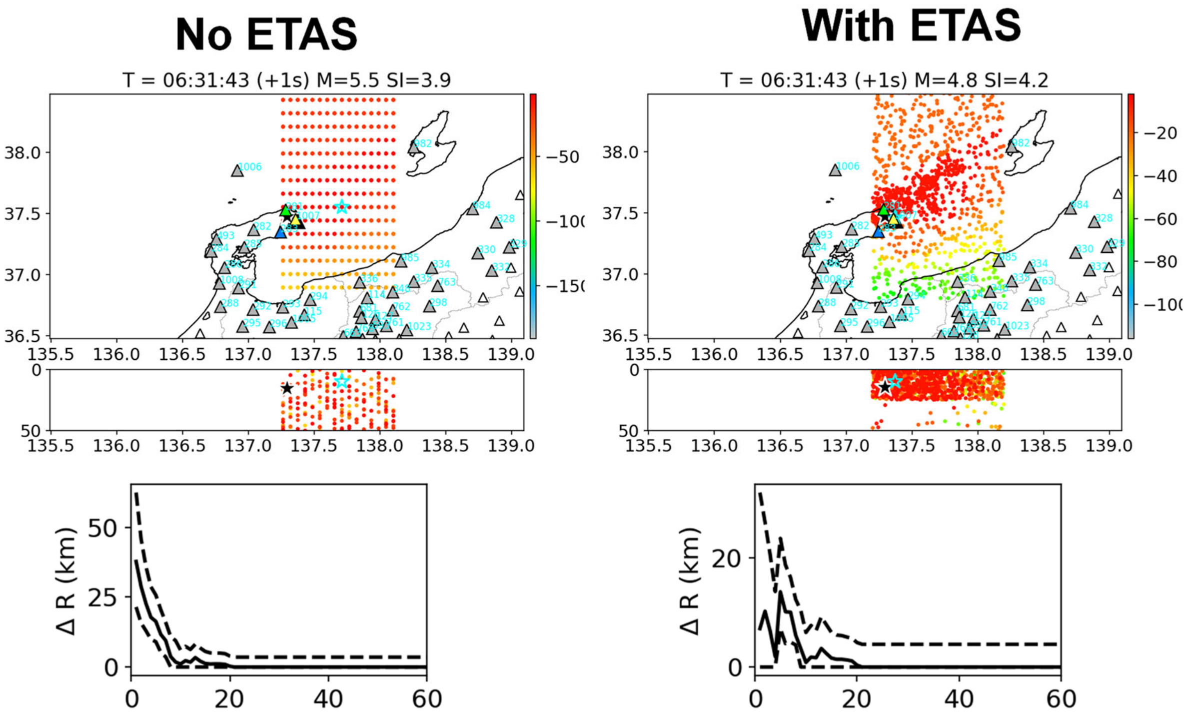



図 2　2024 年 6 月 3 日の能登半島地震の拡張 IPF 法による震源予測に、ETAS 予測を組み込んだ例。ETAS 予測を組み込むことにより、地震発生直後の震源予測精度を向上することができた。左: ETAS 予測なし、右：ETAS 予測あり。

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。昨年度構築した選択方法では、理論 P 波が全観測点で到達していると仮定しており、時間的な変化を評価していなかった。今年度は、時間変化する尤度関数を適用し、時間が経つと情報量が増える、という経験則を評価手法に組み込んだ。その結果、P 波が到達する前(T=6s)では距離に関係なく方位角をカバーするように選択され、P 波が一部の観測点に到達した時(T=9s)には、P 波を検知した観測点から優先的に選択されるようになった。全部の観測点に P 波が到達した時（T=14s）では去年と同じ結果が得られた。時間変化を尤度関数に導入することで、より高度な観測点選択手法を開発した。

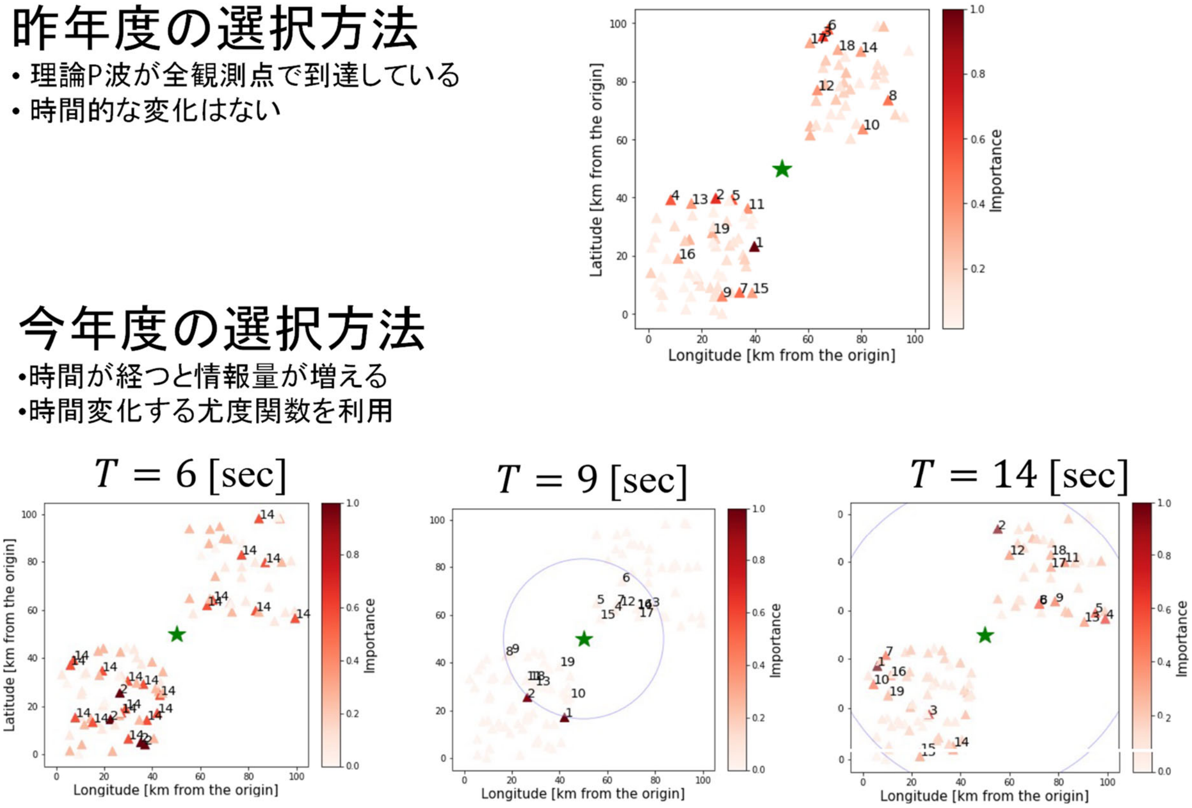



図 3　震源予測に利用する観測点選択方法の改善例。数字が選択された観測点、色が濃い観測点は重要度が高い。大きな丸印が P 波フロントを示す。緑の星印は震源位置を示す。

3） D-3 拡張 IPF 法と PLUM 法のハイブリッド化：
ハイブリッド化のための震度に基づく予測評価手法の開発

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ープをモデル化し、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。地震動の最大値に焦点を当てた従来の地震動予測式とは異なり、本手法では震度曲線全体をモデル化するので、リアルタイムでの地震動予測を向上させることができる。

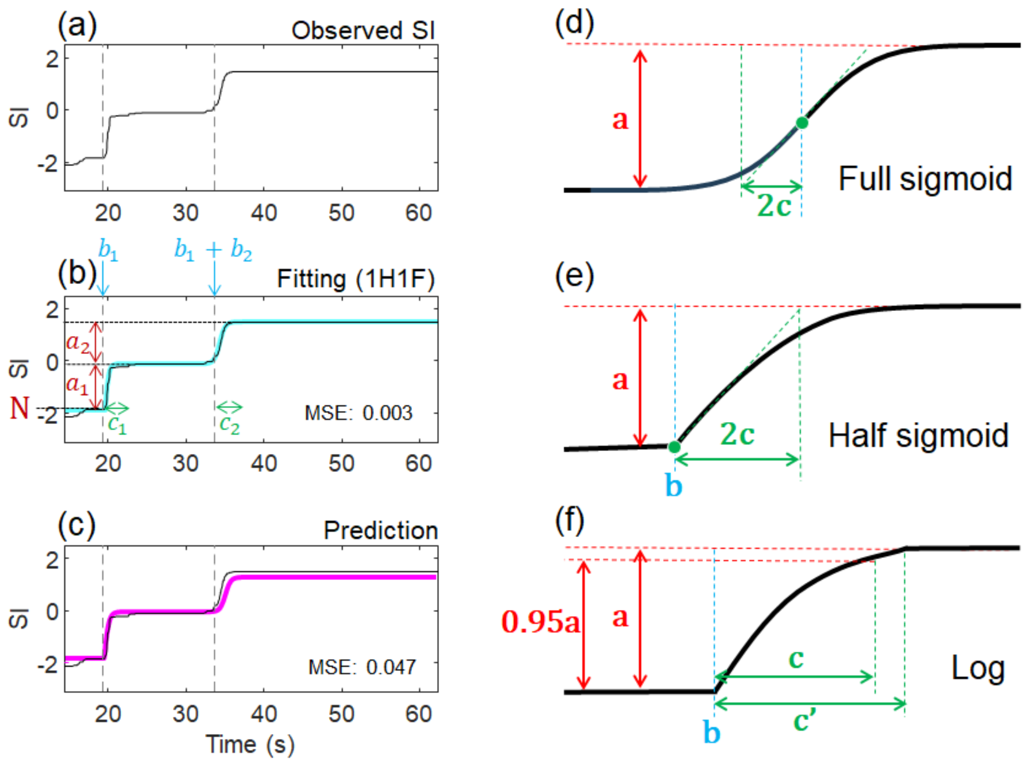



図 4　震度曲線とエンベロープ関数の模式図。(a) 気象庁 E66 観測点における 2010 年 8 月 3 日午前 7 時 31 分の M4.6 イベントの震度曲線の例。(b) 震度曲線に対するエンベロープ関数のフィッティング。(c) 震度曲線に対するエンベロープ GMPE による予測エンベロープ関数。(d)通常のシグモイド関数、(e)ハーフシグモイド関数、(f)対数関数(久保＆功刀, 2022)。

One half and one full sigmoid function:

$$f(x) = \begin{cases} N & (t_B \le x < b_1) \\ \dfrac{2a_1}{1+exp(-\frac{x-b_1}{c_1})} + \dfrac{a_2}{1+exp\left(-\frac{x-(b_1+b_2)}{c_2}\right)} + N - a_1 - \dfrac{a_2}{1+\exp(-\frac{b_2}{c_2})} & (b_1 \le x < t_E) \end{cases}$$

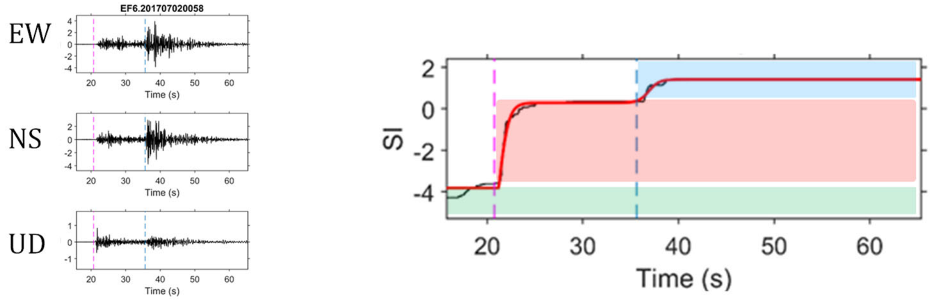



図 5　構築したエンベロープ関数の数式。ノイズ部分（緑色)、P 波部分（赤色)、S 波部分（水色）の３つの形から成る。

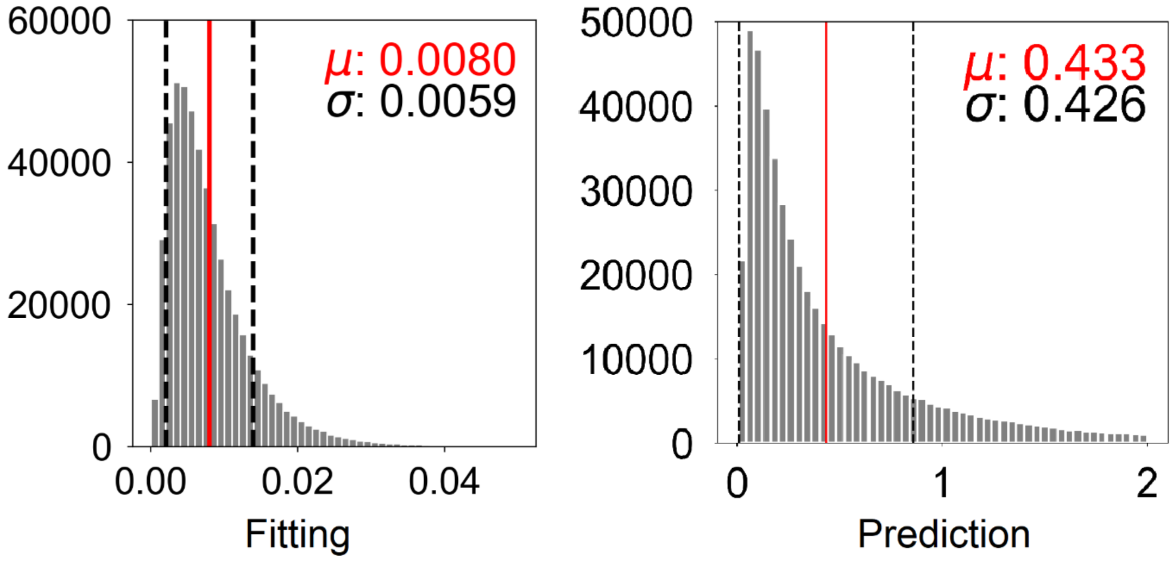



図 6　観測記録とエンベロープ関数との平均二乗誤差。左：波形記録をフィッティングした最適パラメータを使用した場合。右：構築したエンベロープ予測式のパラメータを使用した場合

(c) 結論ならびに今後の予定

本年度は、ETAS 地震予測を緊急地震速報の 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、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可能性が示された。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を構築した。今後は、より多くの地震データを使用して震源決定精度に与える影響を評価する必要がある。

(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 10 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 |
|---|---|---|---|---|---|
| From One Point to Many: Looking at Seismic Hazard Over an Area（ポスター発表，オンライン） | Minson, S.E.*, Wu, S., Au, S.K., Cochran, E.S., Yano, K., Parker, G.A. and Baltay, A. | AGU Annual Meeting 2024, ワシントン D.C., 米国 | 2024年12月9-13日 | 国外 | ○ |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Constructing new empirical envelope function and GMPE for estimating the seismic intensity in combination with IPF method（口頭発表） | Hong Peng*, Masumi Yamada, Stephen Wu | 日本地震学会2024年秋季大会，朱鷺メッセ 新潟コンベンションセンター | 2024年10月23日 | 国内 | ○ |
| 日本列島におけるScS波の走時解析（ポスター発表） | 福重 綜人*, 麻生 尚文 | 日本地震学会2024年秋季大会，朱鷺メッセ 新潟コンベンションセンター | 2024年10月22日 | 国内 | ○ |
| 2023年10月9日鳥島近海の津波の震源メカニズム解析（口頭発表） | 山田 真澄*, 中野 優 | 日本地震学会2024年秋季大会，朱鷺メッセ 新潟コンベンションセンター | 2024年10月21日 | 国内 | ○ |
| 大規模言語モデル×地震研究をテーマとしたハッカソンの実施（ポスター発表） | 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, 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 | 日本地震学会2024年秋季大会，朱鷺メッセ 新潟コンベンションセンター | 2024年10月21日 | 国内 | ○ |
| 2024年能登半島地震の震源過程と緊急地震速報に与えた影響（ポスター発表） | 山田 真澄*, 肖 蛍 | 日本地球惑星科学連合(JpGU)2024年大会，幕張メッセ（ハイブリッド開催） | 2024年5月27日 | 国内 | ○ |
| 地盤工学問題に対する大規模言語モデルの適用調査（口頭発表） | ウ ステファン*, 大竹 雄, 水谷 大二郎，他多数 | 日本地球惑星科学連合(JpGU)2024年大会，幕張メッセ（ハイブリッド開催） | 2024年5月27日 | 国内 | ○ |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 南海トラフ沿いの浅部微動モニタリングと誤検出識別（ポスター発表） | 溜渕 功史 | 日本地球惑星科学連合(JpGU)2024年大会，幕張メッセ（ハイブリッド開催） | 2024年5月27日 | 国内 | ○ |
| P波検出処理をせずにP波を地震動即時予測に活用する：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)2024年大会，幕張メッセ（ハイブリッド開催） | 2024年5月27日 | 国内 | ○ |
| Constructing envelope functions of seismic intensity for the evaluation of EEW in Japan（ポスター発表） | Peng, H.*, Wu, S., Yamada, M. | 日本地球惑星科学連合(JpGU)2024年大会，幕張メッセ（ハイブリッド開催） | 2024年5月27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 |
|---|---|---|---|---|---|
| Performance of the Earthquake Early Warning System for the 2024 Noto Peninsula Earthquake | Yamada, M., Xiao, Y., Hayashimoto, N., and Noguchi, K. | Earth Planets Space | 2025年3月13日 | 国外 | ○ |
| Possibility of the Earthquake Early Warning for the 2023 Turkey-Syria Earthquake | Yamada, M., Y. Xiao, and M. Morinaga | 18th World Conference on Earthquake Engineering | 2024年7月1日 | 国外 | ○ |

(e) 特許出願、ソフトウエア開発、使用・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウエア開発

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６年度は、ETAS モデルの高次元化・非定常化や機械学習の活用などにより、地震活動の予測と理解に関する複数の技術的進展が得られた。ETAS モデルの高度化では、震源メカニズムを考慮した高次元 ETAS モデルおよび欠測補正を可能とする GP-ETAS モデルを構築し、地震活動の予測性能向上に貢献した。摩擦構成則に基づく時空間地震活動モデルの開発では、摩擦構成則を取り入れたモデルと空間カーネルの工夫により、背景応力場推定の精度改善を試みた。ベイズカーネルでは、能登半島の地震活動に対して非ベイズカーネル型モデルを適用し、新たに開発したスコアリング手法によりモデル評価を行った。引き続き異常現象の相関性の評価及び地震発生予測の検証では、地震確率予測にニューラルネットワークに基づく点過程モデルを導入し、従来の ETAS モデルと比較しつつ、非地震性異常との相関関係の分析も進めた。相対的静穏化や活発化の異常現象の抽出では、非定常 ETAS モデルにより、ゆっくりすべりや流体誘発などの外部誘発要因を検出し、地震活動との関連性についての解析を行った。今後は、観測データの欠損補正、背景場の推定精度向上、ニューラルネットワークとビッグデータの統合、外部因子の物理的理解とそのモデルへの統合が課題である。

テーマＢでは、令和６年度は、ベースライン短期予測の原型として、下限マグニチュードが十分大きい地震（例えばM≧５）を対象とする、HIST-ETAS モデルに基づく日本周辺の予測システムを構築した。具体的には、M≧７地震の長期予測とM≧５地震の短期予測およびその評価を実施している。さらに、群発型地震活動や地震異常現象をより精度良く捉えるためには、下限マグニチュードを可能な限り低く設定しデータ量を増やす必要がある。しかし、大規模地震の直後に生じる余震の欠測や、遠隔地域におけるデータの不均質性といった課題も存在する。これらの問題に対処するため、時空間領域での検出率モデルを作成し、その情報を用いて HIST-ETAS モデルの推定結果を補正する手法を実施し、局所的な余震活動の時空間予測に活かしている。なお、連発大地震発生の可能性を踏まえた短期確率予測および即時把握を実現するため、信頼性の高い多項目確率予測をオンライン・システムに実装することが、来年度の重要な課題になる。

テーマＣでは、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論文を改訂した。次に、令和５年度に引き続き、緊急地震速報に資する観測点統合・観測点選択への適用(特に、時間変化する重要度の統合)および現実的な設定でのシミュレーションを行った。そして、ベイズ感度公式のアイデアを新規観測点の設置に利用する検討を開始した。最後に、ノイズと地震波形を識別し、到達時刻および初期Ｐ波の極性を単一の観測点だけから抽出するために、情報理論に基づいたより高精度な方法を開発した。逆解析用の観測点情報の統合・選択法の開発に関して、令和５年度に引き続き、国立大学法人東北大学が

実施する課題と協同し、ロバストスペクトル解析に基づき衛星測位観測点の各点のノイズスペクトル情報の整理を行い、論文を投稿した。さらに、観測点の統合に資する情報として衛星測位観測点の速度ベクトルのクラスタリングに着目し、国立大学法人東北大学が実施する課題と協同し、地表形状を考慮した局所～大域で使える観測点のクラスタリング手法を開発し論文化を行なった。最後に、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。

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、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可能性が示された。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を構築した。

テーマ間の共同成果として、今年度もテーマ間の連携を強化し、共同の成果をあげることができた。具体的にはテーマAとBからはETASのモデリングと予測におけるGNSSデータの利用について、テーマA, BとCからは地震カタログの均質化について、テーマA, BとDからは緊急地震速報のためのETAS事前分布について、テーマCとDからは緊急地震速報の決定ルールについてであった。本プロジェクトでは目標達成に向けて、全メンバーが参加するワークショップを開催し、相互の交流と連携を深めた。これにより、上記の成果を得ると同時に、研究の進捗やアウトプットの価値についても評価を行い、社会実装を見据えた出口戦略を踏まえて、最終年度における円滑な研究の遂行に向けた計画を策定した。

最終年度では、以下の4点を柱とし、研究成果の応用展開を目指す。

(1) 研究者が容易にETASモデルを活用できるよう、標準的モデルをスタンドアローンの実行形式として統合し、再コード化可能なライブラリとして整備する。

(2)長期・中期・短期といった異なる時間スケールに対応した地震予測システムを構築し、実用化可能なオンライン予測基盤の構築を目指す。

(3)ベイズ感度公式に基づく緊急地震速報における最適な観測点選択法を完成させ、新たな観測点配置に関する設置指針を確立する。

(4) ETASモデルによる地震予測を、緊急地震速報で用いられるIPF法の事前情報として統合し、即時的な情報提供の実現を目指す。

## 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94回 2024年4月16日 Koh, Jonathan （Oeschger Centre for Climate Change Research(OCCR), University of Bern, Switzerland ・Post-doctoral researcher/統計数理研究所リスク解析戦略研究センター 地震予測解析プロジェクト・外来研究員）Estimating shared random effects between model components in Bayesian hierarchical frameworks.

第95回 2024年6月10日 Gerstenberger, Matt （GNS Science, New Zealand ・ Seismologist/NSHM Lead）The New Zealand National Seismic Hazard Model：modelling uncertainty and implications for its use

第96回 2024年8月5日 雷 興林（Lei, Xinglin）（国立研究開発法人産業技術総合研究所・上級研究員）Can the extent of fluid involvement be quantified by statistics for fluid-involved or fluid-driven seismicity?

第97回 2024年 8月 26日 郭 一村(Guo, Yicun) （中国科学院大学・助教）Statistical modeling of 3D seismicity and its correlation with fault slips along major faults in California

第98回 2024年10月1日

Wu, Stephen（統計数理研究所 先端データサイエンス研究系 ・准教授） Potential of LLMs in seismology

詹 成祥（Zhan, Chengxiang）（中国地質大学（北京） ・大学院生）Neural Point Process: A Modulated Renewal Model for Temporal Event Modeling

Zhuang, Jiancang （庄 建倉） （統計数理研究所 統計基盤数理研究系・教授） Quantification of earthquake predictability

Clements, Timothy （U.S. Geological Survey’s Earthquake Science Center in Moffett Field, CA, USA・ Postdoctoral fellow）A Ground Motion-based Approach to Earthquake Early Warning and Earthquake Statistics

第99回 2024年10月 31日

Hsieh, Ming-Che（謝 銘哲） （Earthquake Disaster & Risk Evaluation and Management Center (E-DREaM), National Central University, Taoyuan, Taiwan ・Associate Research Fellow）Toward Real-Time Ground-Shaking-Intensity Forecasting Using ETAS and GMM: Insights from the Analysis of Recent Large Earthquake Sequences in Taiwan, and Its Potential Applications

Petrillo, Giuseppe （Nanyang Technological University(NTU, Singapore) ・ Visiting Researcher）The Impact of Stress Redistribution on the Spatial and Magnitude Patterns of Future Earthquakes

第100回 2025年 3月10日 Mirwald, Aron （ETH Zurich, Swiss Seismological Service）Analysis of large earthquake sequences in Japan: Significance of spatial and temporal patterns of the b-value

※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。

(2) STAR-E 勉強会

STAR-E プロジェクトの 5 つの課題の共通勉強会に参加した。2024 年 12 月 27 日に、当プロジェクト当番として、統計数理研究所で 2024 年第 4 回で STAR-E 勉強会を開催し、以下の報告を行った。

・Wu, Stephan（統数研）Progresses on earthquake early warning systems and their applications

・Niu, Yuanyuan（統数研）Bayesian non-parametric inference for the ETAS model

※勉強会の前、各STAR-Eプロジェクト代表者ミーテイングを実施。

(3) 2024 年 12 月 27 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。

・荒川日南子(東京理科大) 2023 年に発生した伊豆大島近海の浅部における火山性群発地震

・Peng, Hong（統数研）A new GMPE for estimating the seismic intensity in combination with IPF Method

・Bañales, Isaías（京大）Inhomogeneous Spatio-Temporal Epidemic-Type Aftershock Sequence Model Incorporating Seismicity-Triggering Slow Slip Events

・麻生尚文(東京理科大)ETAS シミュレーションと RNN による真の b 値推定への取り組み

・岩田貴樹（広島県大）A modification of the space-time ETAS model with the rate-and state-friction seismicity mode

・矢野恵佑（統数研）緊急地震速報におけるベイズ観測点選択

・西川友章（京大防災研）中米沈み込み帯における群発地震検出：地震活動とスロースリップイベントの関係に関する示唆

・熊澤貴雄（統数研）地震活動の外部誘発効果を定量化するためのモデリング

・Zhang, Yiqun（統数研）Assessing the potential improvement in short-term earthquake forecasts from incorporation of ULF Magnetic and CO anomaly

・三井雄太（静岡大）日本列島周辺で発生したマグニチュード 7 級地震の 余震域特性：余震域拡大速度と b 値(等)

・上田拓（京大防災研）ヨーロッパ南東部におけるひずみ速度場推定

・尾形良彦（統数研）多項目予測法の実装のために（For the implementation of multiitem forecasting methods)

(4) 緊急地震速報に関する研究集会

2025 年 1 月 9 日～10 日 東京大学地震研究所 共同利用研究集会「次世代のリアルタイム監視予測システムの探求：固体地球科学における即時解析・即時予測・情報利活用」を開催した。担当：小寺祐貴（気象研究所、研究協力者）山田真澄　（京大防災研）

https://sites.google.com/view/sokuji-yosoku2024

＜アウトリーチ活動＞

- WEB による公開
  活動内容、成果の解説、ソフトウエ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。
- 楠城 一嘉 特任教授（静岡県立大学グローバル地域センター）が講師/コーディネーターを務める防災講座、【オンライン配信】2024 年度第 7 期講座全 2 回「地震と火山と防災～防災とウェルビーイング～」（第 1 回 2 月 7 日（金）・第 2 回 2 月 14 日（金）時間は両日とも 19:30-21:00）が開催されました。
  （https://www.u-shizuoka-ken.ac.jp/events/20250207/）
- 尾形 良彦 特任教授（名誉教授）が、イタリア国立地球物理学火山学研究所（INGV)による「Scientific Seminars by renowned international experts - INGV 25th Anniversary（国際的に著名な専門家による科学セミナー - INGV 25 周年記念)」にて講演を行いました。講演タイトル: Development of ETAS models: before its birth to today
- 三井 雄太 准教授（静岡大学理学部地球科学科）が第 32 回日本測地学会坪井賞を受賞し、記念講演「地震学的要素を取り入れた測地学研究の新展開」を行いました。

＜記事等＞

- 「ETAS モデル」が横断型基幹科学技術研究団体連合の「コトつくり至宝」に登録されました。
- 論文 <西川友章, 井出 哲, 西村卓也: 日本海溝におけるスロー地震に関する総説>が、Progress in Earth and Planetary Science 誌の The Most Downloaded Paper Award 2024 を受賞しました。

## 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 6 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継続した。令和 7 年度では、課題全体として社会実装などの出口戦略を踏まえ、研究成果の応用展開を図る。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、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。