

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5年度  
成果報告書

令和6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5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 :

### 地震活動クラスタリングでのマグニチュード独立性の検証

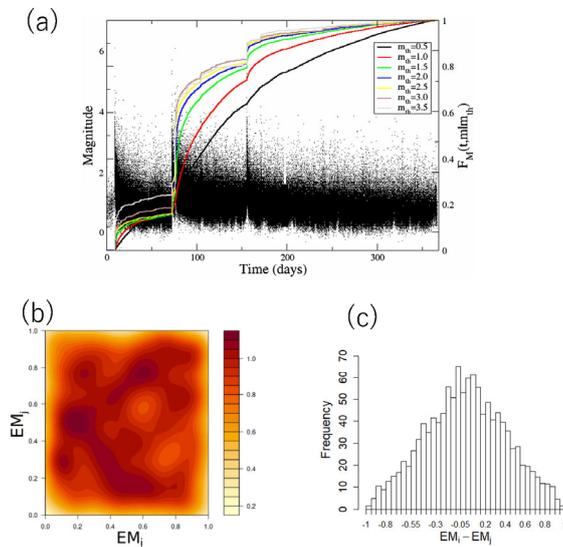


図 1. (a) マグニチュード-時間プロットとマグニチュード閾値を変更した場合の標準化累積頻度曲線 (b) マグニチュード 3 以上のイベントにおけるマグニチュード対のバイ・スケール経験変換 (BEPIT) ; ここでは、ポイントは単位正方形内にランダムに分布しており、パターンは認識できない (c) バイ・スケール経験変換 (BEPIT) したマグニチュード対の差のヒストグラム

### 地震クラスタリングでの深度依存性の検証

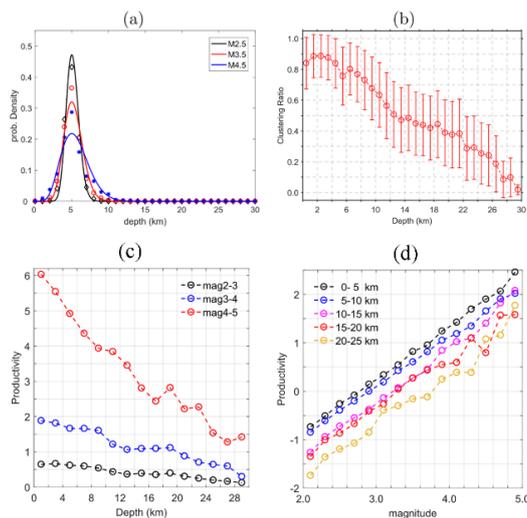


図 2. (a) 深度応答カーネルは地震マグニチュードに依存: 再構築した ANSS カタログにおける余震深度の確率密度分布 (本震の震源深度が 5km の場合) (b) 深さ毎の誘発地震の割合 (c) 深さの関数として、再構築したマグニチュード毎の余震生産性 (d) マグニチュードの関数として、再構築した深さ毎の余震生産性

テーマ B :

能登半島地震 M7.6 地震直後の余震の検出率と真の ETAS 発生率

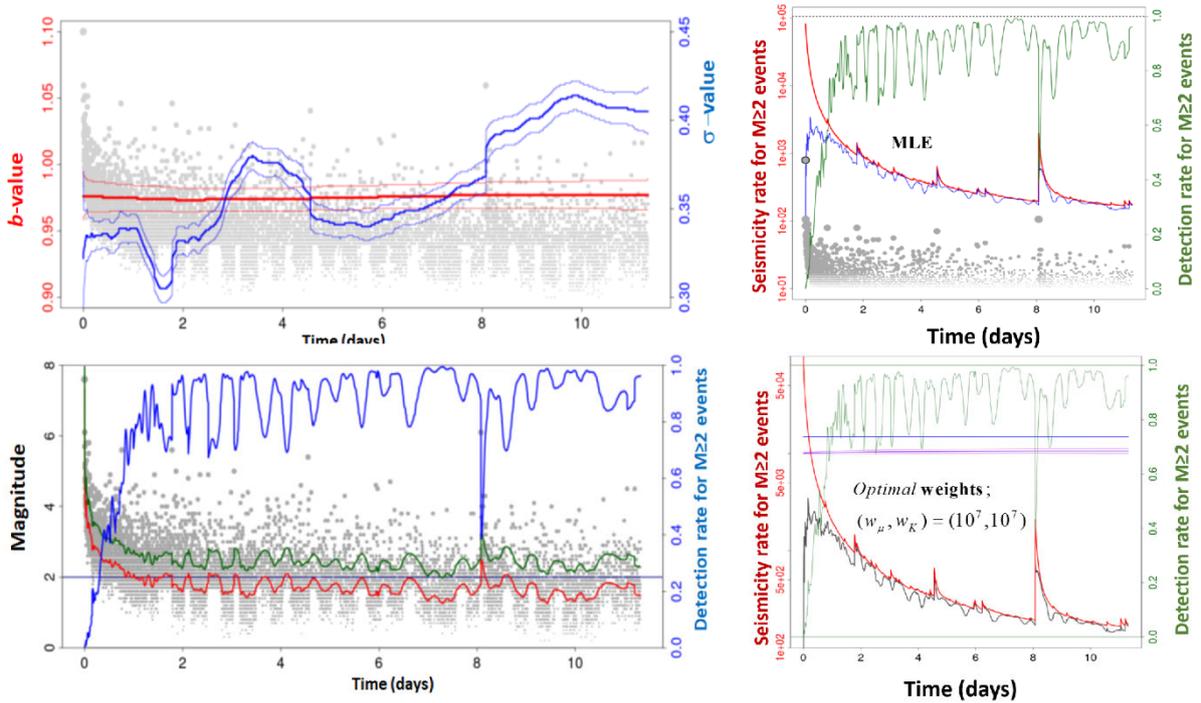


図 3. 左上パネルの赤曲線は  $b$  値が一定、青曲線は  $\sigma$  値の変化（能登半島周辺の観測網に比して余震域の広さが反映している）。左下のパネルの赤曲線は 50% 検出率のマグニチュードで、緑の曲線は 97.5% の検出率、青線は  $M \geq 2$  の余震の検出確率で、いずれも昼夜の変化を捉えている。右側パネルの赤い曲線は ETAS モデルの真の強度 ( $M \geq 2$ ) で、上段は MLE 解で下段は最適 ABIC ベイズ MAP 解。細かく変動している青曲線（上段）と灰色曲線（下段）は観測検出された余震列の発生率変化、緑曲線は  $M \geq 2$  余震の検出確率、青い水平線は ETAS の背景活動率、紫の水平線は余震強度  $K$  値である。

テーマC:

緊急地震速報の精度及び計算速度向上に資するベイズ感度公式を利用した観測点選択手法

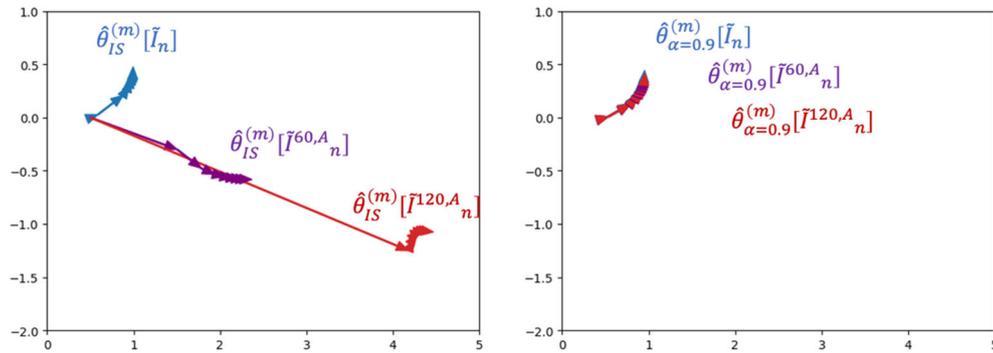


図4. ノイズスペクトル推定の最適化の軌跡。左図が既存法(Whittle 尤度法)によるもので右図が提案法によるもの。最適化の軌跡が周波数領域の外れ値に頑健であることが確認できる。

ノイズスペクトルのロバスト手法の開発及びGNSS観測点の選択に資するGNSS観測点の特性

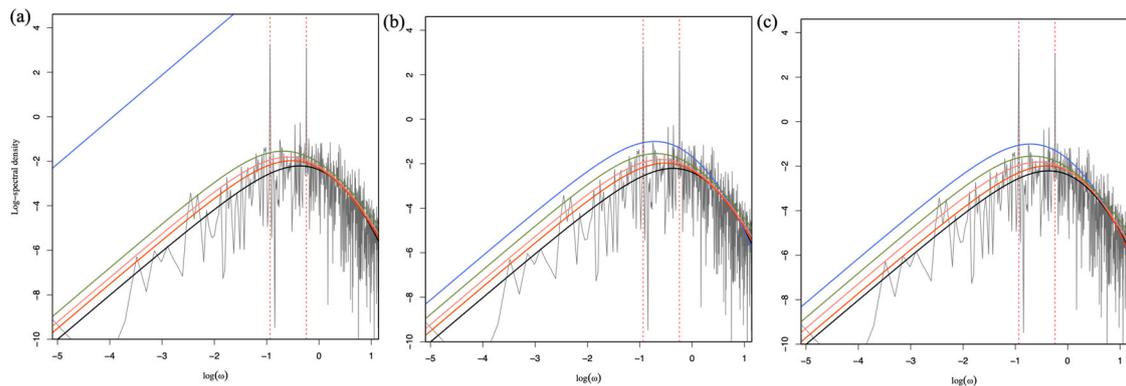


図5. Bruneのスペクトルモデルを用いた速度波形スペクトルのフィッティング結果。青が既存手法(Whittle 尤度法)によるもので赤・オレンジ・緑が提案手法によるフィッティング結果。(a), (b), (c)は最適化を行う際の初期値による結果の変化。(a)コーナー周波数と呼ばれるスペクトルの変化点を示すパラメータの初期値がシミュレーションの真値の0.1倍の場合。(b)初期値が真値と同じ場合。(c)初期値が真値の2倍の場合。いずれの場合においても提案手法がより精度良くフィッティングできていることが分かる。

テーマD:

ETAS 予測を拡張 IPF 法の事前情報に活用

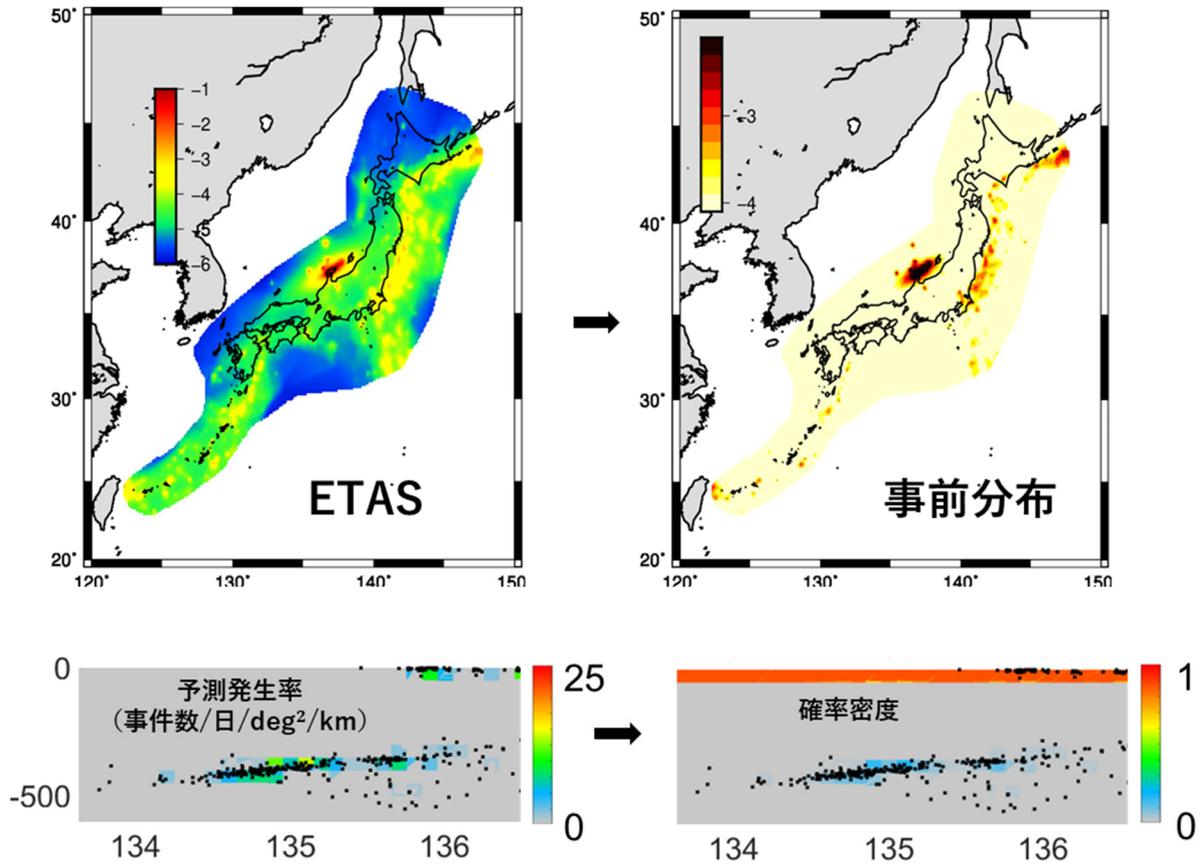


図 6. 左上: ETAS モデルによる能登半島地震後の予想地震発生率。右上: 左上の予想地震発生率から計算した将来の震源位置の事前確率密度。左下と右下: 北緯 37 度における上パネルの断面 (経度と深さ)。

## 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5年度の成果 .....	3
2. 2 テーマB：地震活動の予測システムの構築 .....	30
(1) 業務の内容 .....	30
(2) 令和5年度の成果 .....	32
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 .....	48
(1) 業務の内容 .....	48
(2) 令和5年度の成果 .....	49
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 .....	56
(1) 業務の内容 .....	56
(2) 令和5年度の成果 .....	57
3. まとめ .....	63
4. 活動報告 .....	64
5. むすび .....	67

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

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

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

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

以上、研究目的は以下のように列挙される。

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

## 2. 研究成果の説明

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

A-1 高次元 ETAS モデル

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

A-3 時空間的非定常・非一様性を調査する階層モデリング

A-4 地殻変動異常現象の因果性の評価

A-5 地震活動の ETAS モデルからの乖離の異常と物理的解釈

#### (1) 業務の内容

##### (a) 業務の目的

多様な高次元・大容量データの解析に資するためマーク付き点過程をはじめとする統計地震学や多変量時系列解析の最新の計算方法を活用して、地震発生の長期・中期・短期予測と即時把握とそれらの応用可能性を追求する。多様で複雑な地震活動のもと、連発大地震発生の可能性を考慮した高度化時空間 ETAS モデルなどによるオンラインの短期確率予測モデルの開発・展開につながることを目的とする。まず、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	R5. 4. 1 ～ R6. 3. 31	28, 292, 308 円	8, 487, 692 円
県立広島大学 大学教育実践センター 准教授	岩田 貴樹	R5. 4. 1 ～ R6. 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

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

5) 令和 7 年度

引き続き GNSS 異常現象による地震活動因果解析に取り組む。

(d) 令和 5 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 モデルのソフトウェアを使用し、F-net 地震カタログデータを使った解析・予測を試みる。

大地震の破壊域形状や震源メカニズムなどから余震配置への影響を考慮し、余震群の位置座標から断層形状を再構築して求める手法を日本の地震活動に適用し、オンラインで解析する予測試験を行う。

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

摩擦構成則に基づく応力と地震活動との定量的関係を用いることにより、背景地震活動と背景応力場の推定および時空間モデルへの発展を目指す。

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

背景地震活動度の解析と短期予測に活用されている時間および時空間的非定常・非一様性を表現する、「ベイズ的 ETAS モデル」及び「重み付き尤度に基づく非ベイズカーネル型モデル」の、2つの異なったアプローチの予測性能を比較評価する。

4) A-4 地殻変動異常現象の因果性の評価

異常現象の因果性の評価及び外部変数入力的一端として、観測データに対し異常値診断法を適用し、地震発生予測において有意かどうかの検証を試みる。検証では、外部情報によって影響される予測モデルを作成するとともに、異常からの切迫性を示す応答関数を抽出する。

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を試みる。

(2) 令和 5 年度の成果

(a) 業務の要約

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 モデルのソフトウェアを作成した。ETAS モデルと再構成手法を用いて、母地震と子地震のマグニチュード相関および地震クラスタリングの深度依存性を調べた。地震活動クラ

スタリングでは、マグニチュード独立性の帰無仮説は棄却できない。欠測した余震を補正し、将来の地震活動への影響を評価することは、地震予測技術を開発する上で極めて重要な課題である。地震クラスタリングは深度依存性を示し、深度が深くなるほどクラスタリング効果が減少することが明らかになった。

- 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

実際の背景応力（歪み）を入力とした地震活動モデルについて、地震発生時刻における応力変動レートのステップ的な変化がなるべく小さくなるような平滑化拘束を課した上で、このモデルを実際の余震活動に適用した結果、摩擦構成則に基づく地震活動モデルを用いることで、大森・宇津公式で示される余震活動の時間的なべき減衰を再現することが出来ることが示された。

- 3) A-3 時空間的非定常・非一様性を調査する階層モデリング

「重み付き尤度に基づく非ベイズカーネル型モデル」ソフトウェアをリリースし、日本地域の地震活動に適用した。「重み付き尤度に基づく非ベイズカーネル型モデル」により、日本地域の地震特性の空間変動が明らかになった。

- 4) A-4 地殻変動異常現象の因果性の評価

2013年に中国の廬山で発生したM7.3の地震の前後における重力場の変化を発見した。このような変化は、地殻とマントルの間の深部での物質移動、主に流体の移動によってよく解釈され、小規模な地震の震度の移動をよく説明できる。日本のGNSS観測速度の変化と、ひずみエネルギーなどの物理変数との間に正の相関関係があることが分かった。これは、カリフォルニア州の断層沿いの地震活動とクリープ速度の相関についても確認された。

- 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

球面ETASモデルによって、地球規模の大地震と地震活動の関係を調べ、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。世界の背景地震は過去20年間で時間的に安定していることが分かった。2011年の東北地方太平洋沖地震と2007年のスマトラ島沖地震の影響を受けて、全地震数とクラスター数が変化した。地域によって大地震の影響を受ける度合いが異なる。地震を誘発することもあれば、地震の発生を抑制することもあることが明らかになった。

## (b) 業務の成果

- 1) A-1 高次元ETASモデル

- a) 地震活動クラスタリングでのマグニチュードの依存性

地震予測性の問題には地震誘発におけるマグニチュード依存性の有無が深く関わっており、依存性が物理的なものなのか、あるいは余震の短期的な欠落に起因するものなのか、激しい議論が続いている。そこで2種類の地震カタログで依存性の有無について検証した。一方は数値モデルによって実際の地震の統計的特徴を保持しつつ生成した合成カタログを、他方はイタリアの Amatrice-Norcia (2016) シーケンスの高解像度地震カタログを用い、確率的デクラスタリング法を用いて各地震の誘発系列を再構築し、完全マグニチュード以上の地震に限定した。これら両カタログで分析を行ったところ、マグニチュード依存性の仮説は棄却できることが分かった。

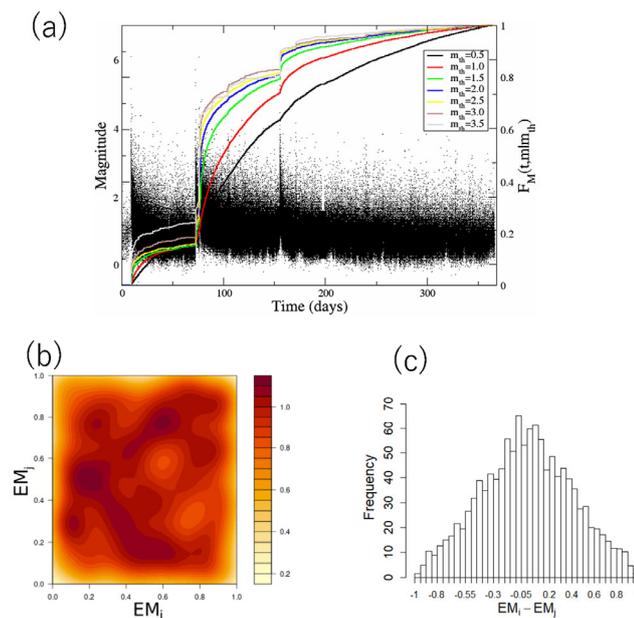


図1 (a) マグニチュード-時間プロットとマグニチュード閾値を変更した場合の標準化累積頻度曲線 (b) マグニチュード 3 以上のイベントにおけるマグニチュード対のバイ・スケール経験変換 (BEPIT) ; ここでは、ポイントは単位正方形内にランダムに分布しており、パターンは認識できない (c) バイ・スケール経験変換 (BEPIT) したマグニチュード対の差のヒストグラム

#### b) 地震クラスタリングでの深度依存性

3次元 ETAS モデルをカリフォルニアの地震カタログに適用し、新たに本震マグニチュードのスケール効果を組み込んだ深さカーネルをモデルに導入した。その結果、新しいモデルではデータのフィッティングが改善され、かつ深度の増加に伴い余震の生産性が減少することが、確率的に再構築されたカタログによって分かった。これは、深さとともに断層結合が減少していること、あるいは地殻上部の地震断層がより活発であることが原因であると考えられる。

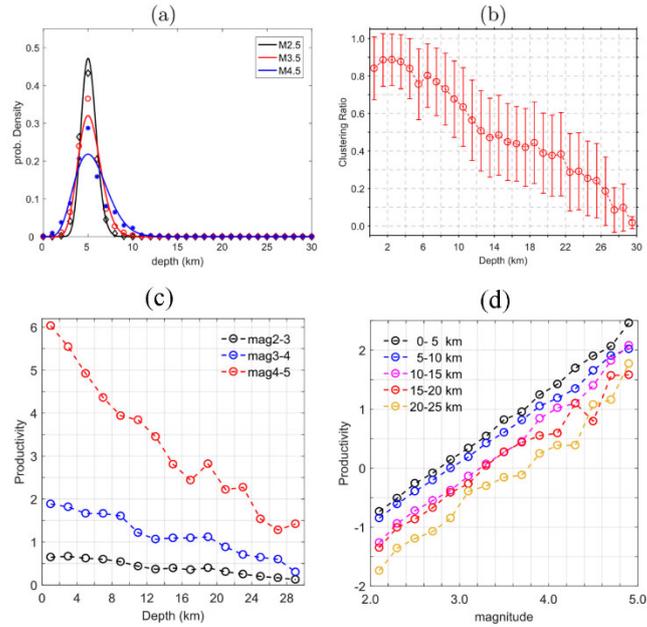


図2 (a) 深度応答カーネルは地震マグニチュードに依存: 再構築した ANSS カタログにおける余震深度の確率密度分布 (本震の震源深度が 5km の場合) (b) 深さ毎の誘発地震の割合 (c) 深さの関数として、再構築したマグニチュード毎の余震生産性 (d) マグニチュードの関数として、再構築した深さ毎の余震生産性。

c) 震源メカニズムを組み込んだ ETAS モデルの実装

令和 4 年度は震源メカニズムを組み込んだ ETAS モデルを以下のように提案した。

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

上式において  $\phi$  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、 $\phi_0(x, y)$  は位置  $(x, y)$  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を使用し、確率的再構築法を使用し、 $\kappa$  と  $\xi$  をノンパラメトリックに推定された。

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

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。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

を行っているが、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 モデルへと拡張し、より現実的なモデリングを試みた。トレンド成分を支配する背景応力場の応力レート（単位時間あたりの応力変化）は2つの地震発生間においては一定とし、地震発生時にステップ状に変化し得るものとした。但し、応力レートは（ある程度）滑らかに変動とする平滑化条件を課す。そして、平滑化の強さについては先験的にいくつかの値を与えて応力レートの時間変動と ETAS モデルおよび Dieterich モデルのパラメータ推定を行った。推定アルゴリズムにはマルコフ連鎖モンテカルロ法を用い、この推定手法を1995年兵庫県南部地震や2004年新潟県中越地震の余震データに適用した。その結果、平滑化の強さに依らず、図3に示すような余震活動の時間減衰などから想定されている対数的な応力の時間変化が得られた。

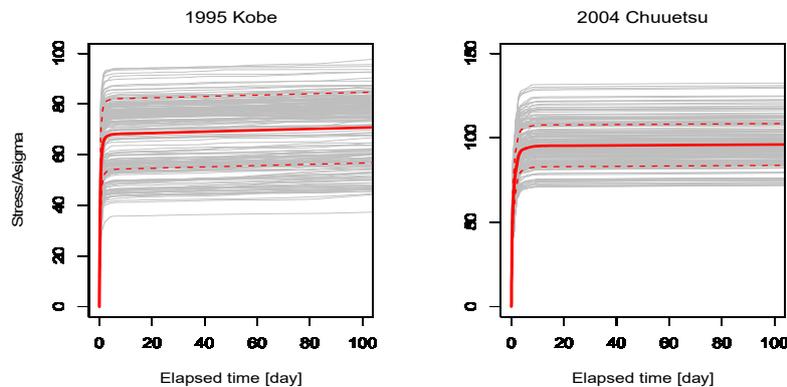


図3 1995年兵庫県南部地震（左）、2004年新潟県中越地震（右）に対する背景応力の時間変化推定。ベイズ的な推定を行っており、赤線が事後分布平均（点線は誤差）、灰色線はランダムサンプリングした200例を示す。

### 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

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」ソフトウェアをリリースした。

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

ここで  $\lambda$  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4(a)に示すような多角形リングのステップワイズカーネル関数を用いて、日本地域の地震活動に対する 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、テクトニクス地域によって異なる特徴を示した。例えば、火山帯においては  $p$  パラメータが低いこと、ユーラシアプレート、フィリピンプレート、太平洋プレートの収束は、 $\alpha$  パラメータが低く、 $A$  パラメータおよ

び $p$ パラメータが高いことが特徴である。ETAS パラメータの空間変動が明らかになり、地域地震動の高分解能確率予測が可能となった。

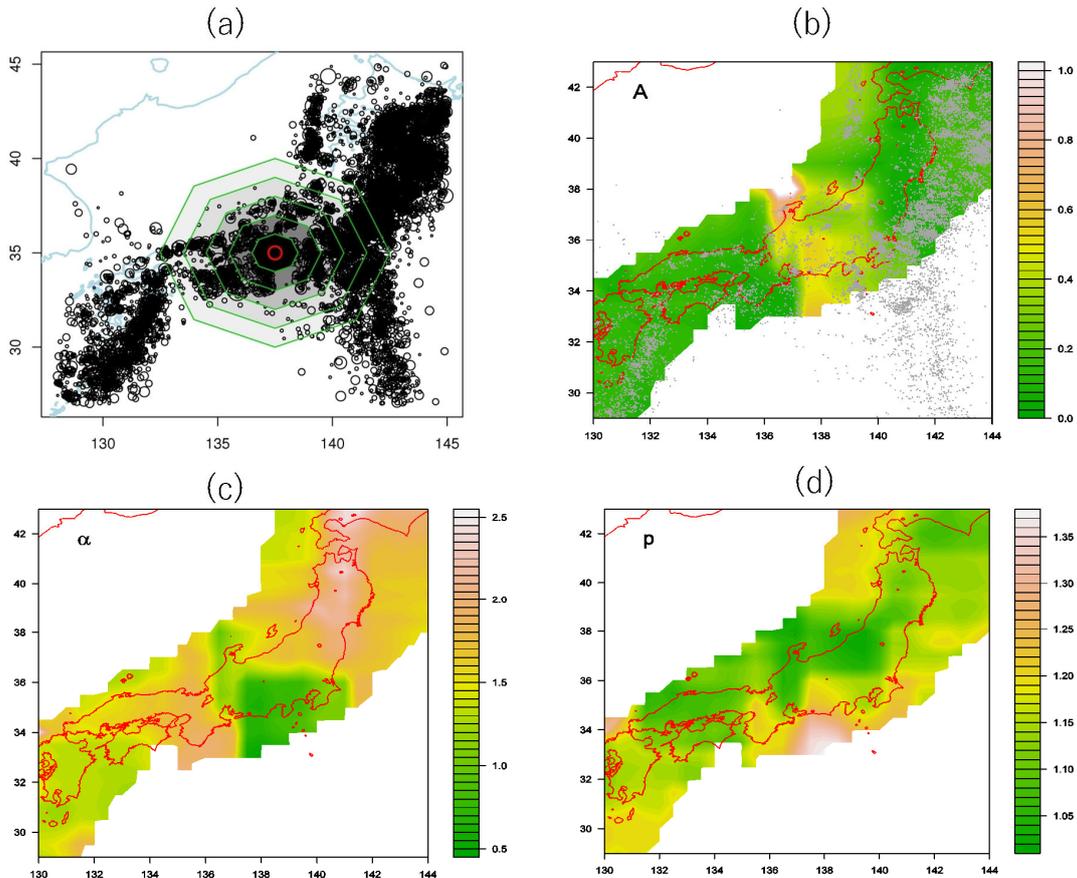


図 4 (a) 気象庁カタログの地震位置と解析に使用したカーネル関数。最大重み付き尤度法を用いて推定された ETAS パラメータの空間変動：(b)  $A$ ；(c)  $\alpha$ ；(d)  $p$

#### 4) A-4 地殻変動異常現象の因果性の評価

##### a) 2013 年の廬山地震の前後における重力場の変化によって明らかになった深部での物質移動

2013 年中国四川省芦山地震は、龍門山断層帯南部のブラインドスラスト断層で発生した。地上ハイブリッド繰り返し重力観測により、地表と深部の質量の再分布を調べることができる。ここでは、地震の約 2 年前に重力場の過渡的な上昇を、本震後に下降を発見した。見かけ密度の変化を抽出するために、時空間平滑性を持つベイズインバージョン法を採用した。震源域の南側での見かけ密度の増加は、地殻の物質移動に関係していると仮定する。この仮説に対処するため、密度が均一な円盤状の等価震源モデルを導入し、マルコフ連鎖モンテカルロシミュレーションによりモデルパラメータを推定した。その結果、この領域では流体拡散の足跡が見られ、その拡散速度は  $10 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  であったことから、このような地殻深部の物質移動は流体拡散に起因する可能性がある」と結論した。

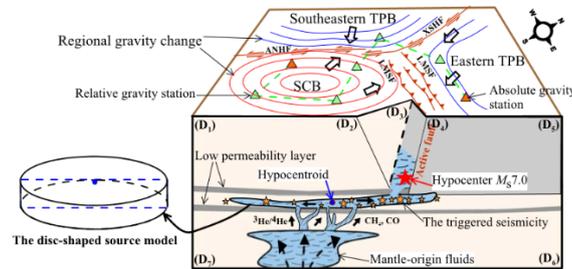
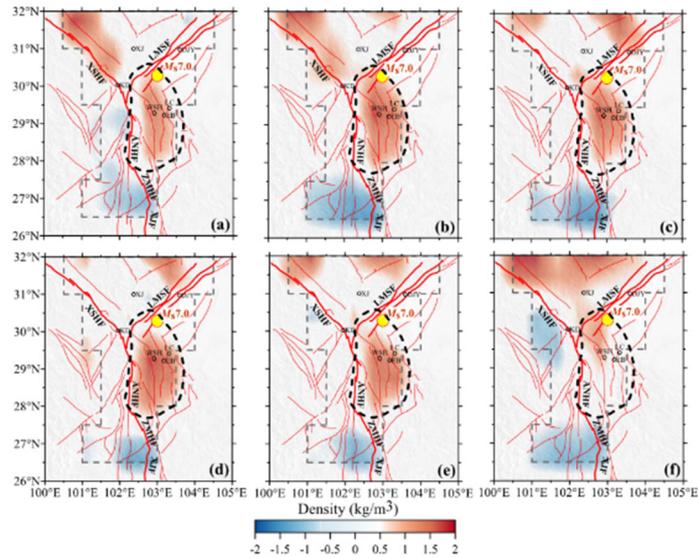


図5 上段：BADI法による中国芦山MS7.0地震前後の深部震源見かけ密度の累積変化。地震前：a 2010.08-2011.03, b 2010.08-2011.10, c 2010.08-2012.05, d 2010.08-2012.10；地震後：e 2010.08-2013.05, f 2010.08-2013.09；灰色の点線は、見かけ密度がより正確に反転できる領域を示す。黒の点線は、見かけ密度が安定した変化傾向を示す領域を示す。下段：MS7.0芦山地震前の円盤型震源モデルと深部物質移動過程の模式図。

b) 背景地震活動と断層クリープ率の空間的相関関係の検証

3次元ETASモデルをカリフォルニアの地震活動に当てはめた後、新しいモデルから得られた背景地震活動率と調査地域の断層の長期すべり率を比較した。その結果、地震活動によって断層に蓄積されたひずみが部分的に解放されていることが示唆された。さらに、特にSan Andreas断層(SAF)の中部に沿った断層結合の遷移帯において、背景地震率と比較的高いクリープ率を示す断層セグメントとの間の相関が有意であった。以上の結果は、背景地震は中程度の結合比を持つ地域で多く発生していることを示唆する。

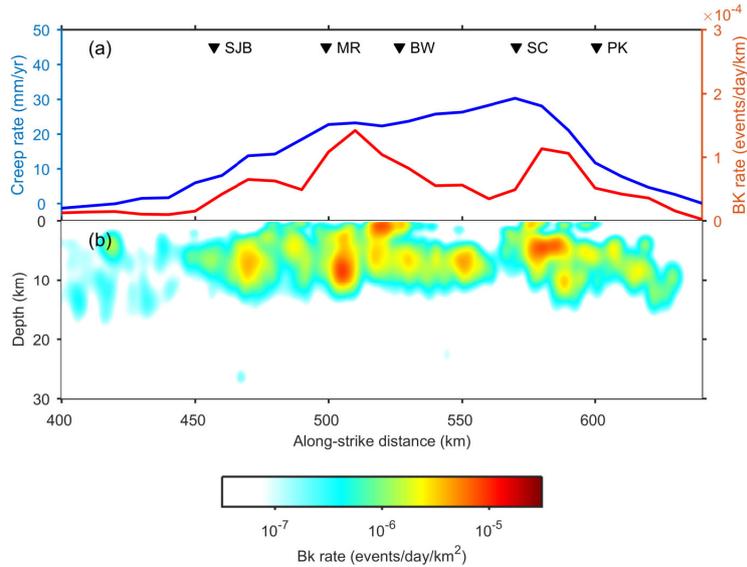


図6 (a) SAF 中部におけるクリープ率と背景地震率の関係。青と赤の曲線はそれぞれクリープ率と背景地震率を示す。クリープ率と背景地震率の値は20kmの移動窓で推定した。逆三角形は基準位置を示す。(b) SAF 中部に沿った背景地震率の分布。図の縦横比を調整するためにy軸を3倍に拡大した。表面クリープ率はJohnson et al. (2022)を参照し、背景地震率はイベント/日/ $\text{km}^2$ 単位である。基準点はSAF北端とした。SJB: San Juan Bautista; MR: Melendy Ranch; BW: Bitterwater; SC: Slack Canyon; PK: Parkfield.

c) 地殻変動から推定されるせん断ひずみエネルギー変化と地震活動との空間的相関性の研究

Kreemer & Young (2022)によって、カリフォルニア地域における地震活動とひずみ速度の正の空間相関の存在が確立された。今回、日本内陸部のひずみ速度場として、最大せん断ひずみ速度、水平ひずみ速度の第2不変量、最大主水平ひずみ速度を推定した。せん断ひずみエネルギー密度変化率は(Saito et al., 2018)で提案された方法で評価することができる。その結果、最大せん断ひずみ率と背景地震数の空間的な相関は約0.19であることが分かった。対数スケールで確認すると、地震数とせん断ひずみエネルギーは非線形関係にある可能性がある。その結果、同じせん断ひずみエネルギーであっても地震発生回数に大きなばらつきがあること、地殻流体の影響を受けている可能性のある断層強度の空間的なばらつきがあることが分かった。

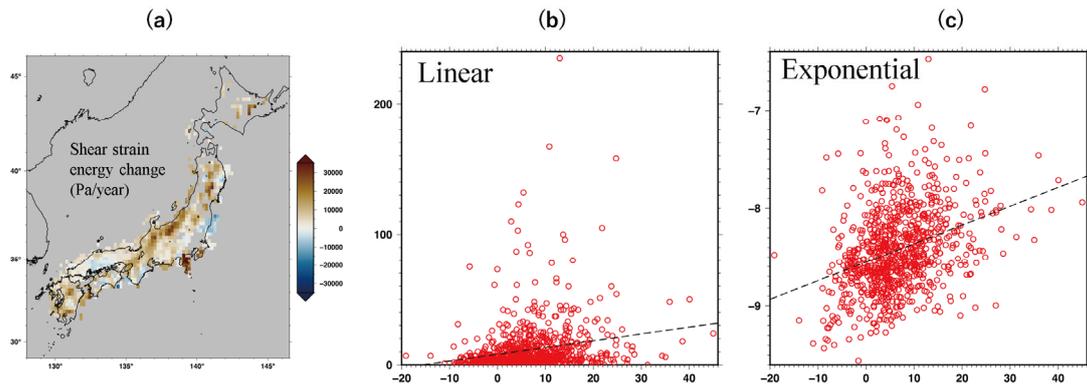


図7 (a)せん断ひずみエネルギー密度変化率(kPa/yr)、(b)せん断ひずみエネルギー密度変化率と背景地震量の直線関係、(c)せん断ひずみエネルギー密度変化率と背景地震量の指数関係。(b)と(c)の中に、横軸はせん断ひずみエネルギー密度変化率(kPa/yr)を表す。

## 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) 2024 年能登半島 M7.6 前後の地震の静穏活発化

2024 年 1 月 1 日に発生した「令和 6 年能登半島地震」(M7.6) では甚大な被害が発生した。震源域のほぼ中央部に相当する能登半島北部では、2020 年 12 月頃から地殻変動を伴う群発地震が継続的に発生し、2023 年 5 月 5 日には M6.5 地震が発生していた。この M6.5 地震の余震のデトレンド時空間分布から、余震活動の周辺部での拡散や M7.6 地震の直前で相対的な静穏化の部分が確認できる。本震直後の余震データの欠測を考慮して、カタログの地震の検出率をモデル化し推定して、能登半島 M7.6 や M6.5 地震などの余震(+群発地震) のインバージョン結果を導いた。前者は定常 ETAS モデル、後者は非定常 ETAS モデルが適合し、後者の背景確率は流体の貫入変化を示唆している。

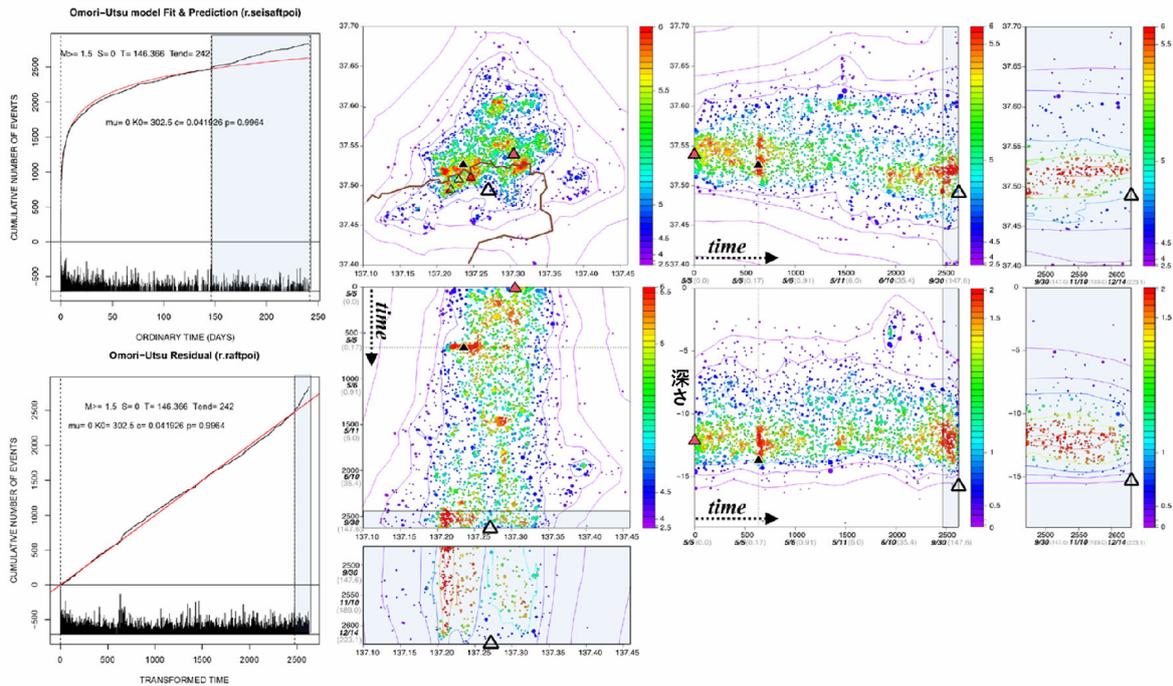


図8 2023年M6.5地震(▲)から2023年9月までのデトレンドをM7.6地震(△)まで延長した時空間図。延長部シャドウは相対的に活発した部分で、その時間帯について拡大したものが右側パネルと下側パネル。M7.6地震(△)の直前に静穏化している。

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。

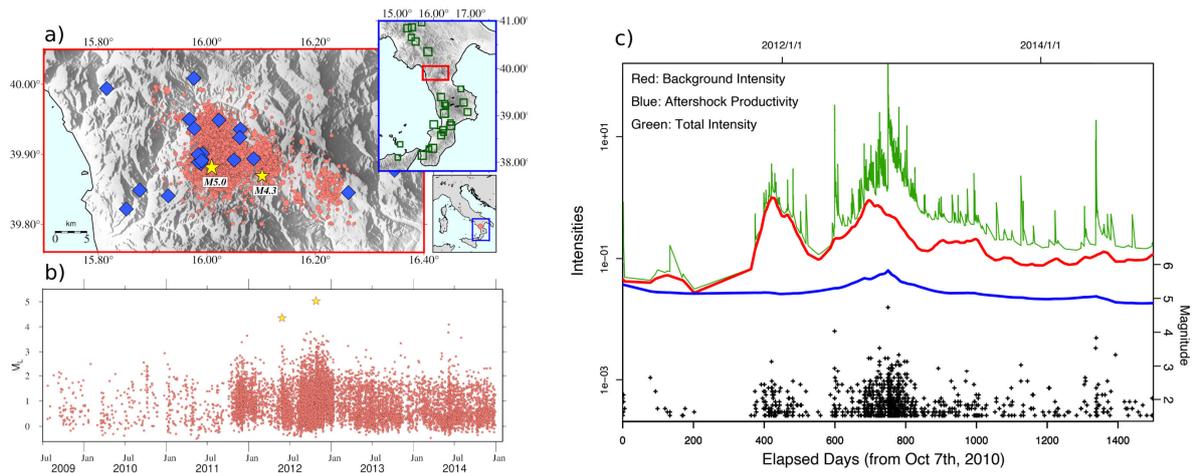


図 9. a) 2010-2014 年 Pollino 地震列のテンプレートマッチング(TM)カタログ。使用された地震観測点 (青い菱形) と、2 つの主要な地震 ML4.3 (西側クラスター)、ML5.0 (東側クラスター)、ポリーノ山地域は赤い四角で示す。b) テンプレートマッチング (TM) カタログにおける時間の関数としてのマグニチュード。c) 全領域における推定された非定常 ETAS モデル。

#### c) 地球規模の相対的静穏化や活発化などの異常現象

地震活動モデリングに関する多くの研究が局所的な領域に焦点をあてている。地球規模あるいは高緯度地域の地震発生を解析・予測するために、特に世界規模の遠隔地震相互作用に関連して、時空間 ETAS モデルを平面型から球面型に改編し、FORTRAN ソフトウェアパッケージ 3D-SETAS を実装し、公表した。3D-SETAS (球面 ETAS, Xiong Z et al, 2023) モデルを世界規模の地震イベント (GMT カタログ Mw5.15 以上) に当てはめることにより、背景地震動と世界規模の大地震によって誘発される地震群を分離した。その結果、マグニチュード 5.15 以上の地震の約 1/3 がトリガー地震であり、世界の背景地震量は過去 20 年間定常的であることが分かった。しかし、局所的には巨大地震によって背景地震動が調整されている。

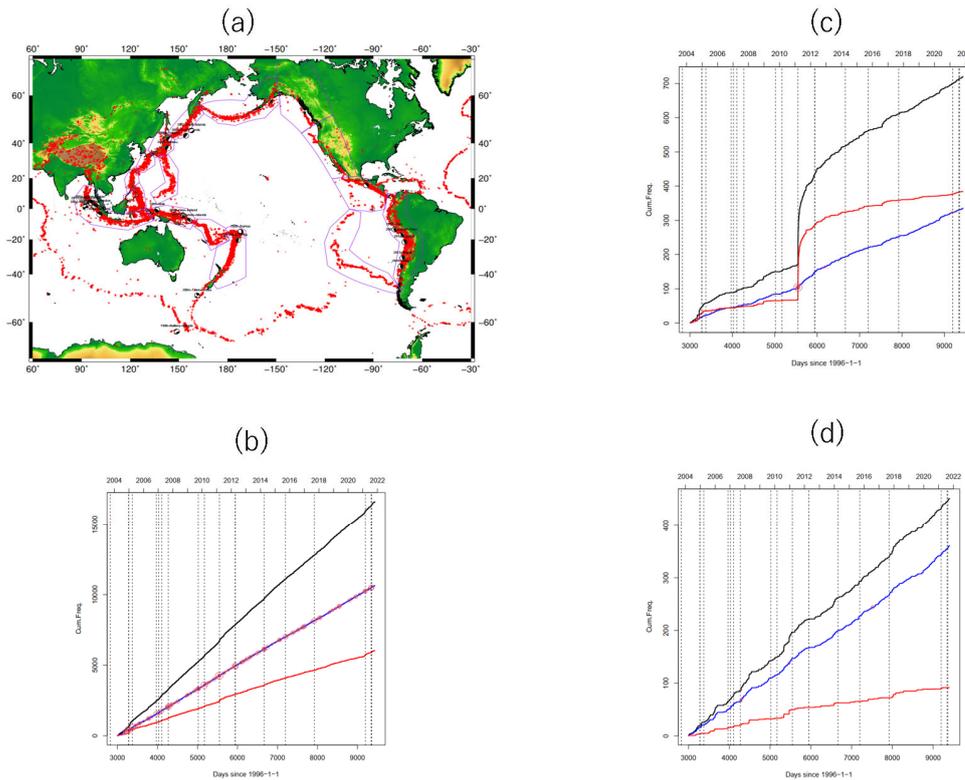


図 10 (a) 世界的な地震活動。(b) 全球時空間 ETAS モデルで推定された  $M_w > 5.2$  の背景地震活動 (イベント) の累積時間変化 (右、中間の丸付き青線)。最上の黒線は全活動、最下の赤線はトリガー効果の地震の累積時間変化。(c) 日本および (d) 伊豆-小笠原-マイクロネシア地域における全地震 (黒線)、背景地震 (青線)、群発地震 (赤線) の累積頻度。伊豆-小笠原-マイクロネシア地域の地震活動は 2011 年東北地方太平洋沖地震の影響を受けている。

#### 引用文献

- Xiong Z, Zhuang J (2023) *SETAS: a spherical version of the space-time ETAS model*. **Seismological Research Letters**. doi:10.1785/0220220198
- Kagan Y, Jackson D (2014) *Statistical earthquake focal mechanism forecasts*. **Geophysical Journal International**. 197:620-629. doi:10.1093/gji/ggu015
- Kreemer, C., Z. M. Young (2022). *Crustal Strain Rates in the Western United States and Their Relationship with Earthquake Rates*. *Seismol. Res. Lett.* 93, 2990-3008, doi: 10.1785/0220220153
- Saito, T., Noda, A., Yoshida, K., & Tanaka, S. (2018). *Shear strain energy change caused by the interplate coupling along the Nankai Trough: An integration analysis using stress tensor inversion and slip-deficit inversion*. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, 123, 5975-5986. <https://doi.org/10.1029/2018JB015839>

(c) 結論ならびに今後の課題

1) A-1 高次元 ETAS モデル

地震活動クラスタリングでは、マグニチュード独立性の帰無仮説は棄却できない。欠測した余震を補正し、将来の地震活動への影響を評価することは、地震予測技術を開発する上で極めて重要な課題である。地震クラスタリングは深度依存性を示し、深度が深くなるほどクラスタリング効果は減少する。

今後の課題としては、欠測した余震を補正し、将来の地震活動への影響を評価することは、地震予測技術を開発する上で極めて重要な課題である。欠測余震の統計的推論を開発し、将来の地震発生確率への影響も評価したい。

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

背景地震活動と背景応力場の推定

摩擦構成則に基づく地震活動モデルを用いることで、大森・宇津公式で示される余震活動の時間的なベキ減衰を再現できることが分かった。後の課題としては、Dieterich モデルが持つ非線形性のため、周辺化尤度を計算することが困難である点を解決することである。

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

「重み付き尤度に基づく非ベイズカーネル型モデル」により、日本地域の地震特性の空間変動が明らかになった。今後の課題としては、「ベイズ的 ETAS モデル」との適用結果および予測性能を比較評価したいと考えている。

4) A-4 地殻変動異常現象の因果性の評価

重力観測にせよ GNSS 観測にせよ、地震活動と地殻物質の移動との相関は明確に検証されており、それは流体の侵入の結果であるという仮説である。GNSS データおよび重力データによる地殻変動異常に対して異常診断し、地震発生予測の共変量として有意かどうかを検討した。背景地震活動の異常の検証において、非定常 ETAS モデルは決定的に重要なツールとして使用された。ETAS モデルの背景地震発生率項に GNSS データや重力データをどのように組み込むかが次の課題である。

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

精度の高い逆解析を実装するため気象庁が作成したカタログの殆ど全ての地震を使用するため、先ずカタログの地震検出率をモデル化して推定する。欠測データがモデル推定および予測に与える影響を考慮し、真の地震発生率を計算する方法を開発した。実際の実装については、予測対象地域を限定して時間領域の非定常 ETAS モデルなどで、欠測地震カタログの克服による、能登半島 M7.6 や M6.8 地震などの本震直後の予測法や群発地震のインバージョン解析結果を導いた。

今後の課題としては、海域を含む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、時空間 ETAS モデルの実装を目指したい。

(d) 成果の論文発表・口頭発表等

1) 学会等における口頭・ポスター発表 : 計 62 件、うち海外計 18 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
Explaining both foreshock and the Bath Law using the ETAS model (Oral)	Zhuang, J.	第13回統計地震学国際ワークショップ (StatSei13), 南方科技大学 (Southern University of Science and Technology), 深圳, 中国	2024年 3月17日	国外	○
Recent progress in ETAS models of heterogeneous seismic activity (Invited)	Ogata, Y.	第13回統計地震学国際ワークショップ (StatSei13), 南方科技大学 (Southern University of Science and Technology), 深圳, 中国	2024年 3月17日	国外	
Spatial correlation of the shear strain energy change and the number of declustered crustal earthquakes in Japan (Oral)	Ueda, T.	第13回統計地震学国際ワークショップ (StatSei13), 南方科技大学 (Southern University of Science and Technology), 深圳, 中国	2024年 3月17日	国外	○

A study of changes in global background and clustering seismicity over the last two decades (Poster)	Xiong, Z.	第13回統計地震学国際ワークショップ (StatSei13), 南方科技大学 (Southern University of Science and Technology), 深圳, 中国	2024年 3月17日 - 20日	国外	○
Magnitude correlation in earthquake triggering: Artifact or reality? (Invited)	Petrillo, G.* and Zhuang, J.	第13回統計地震学国際ワークショップ (StatSei13), 南方科技大学 (Southern University of Science and Technology), 深圳, 中国	2024年 3月17日	国外	○
Statistical modeling of 3D Seismicity and its correlation with fault slips along Major Faults in California (Invited)	Guo, Y.*, Zhuang, J. and Zhang, H.	第13回統計地震学国際ワークショップ (StatSei13), 南方科技大学 (Southern University of Science and Technology), 深圳, 中国	2024年 3月17日	国外	○
Aftershock forecasts based on incomplete records of early aftershocks: Example of the 2023 SE Türkiye earthquake sequence (Oral)	Hainzl, S.*, Kumazawa, T. and Ogata, Y.	第13回統計地震学国際ワークショップ (StatSei13), 南方科技大学 (Southern University of Science and Technology), 深	2024年 3月18日	国外	

		圳, 中国			
Bayesian nonparametric inference for the Epidemic Type Aftershock Sequence (ETAS) model (Poster)	Niu, Y.	第13回統計地震学国際ワークショップ (StatSei13), 南方科技大学 (Southern University of Science and Technology), 深圳, 中国	2024年 3月17日 - 20日	国外	○
Changes of global background and clustering seismicity during past twenty years (Poster)	Zhuang, J.* and Xiong, Z.	AGU Annual Meeting 2023, Moscone Center (San Francisco, CA)	2023年 12月14日	国外	○
Unveiling the Enigma of Earthquake Triggering: Debunking Magnitude Correlation Debates (Oral)	Petrillo, G.* and Zhuang, J.	AGU Annual Meeting 2023, Moscone Center (San Francisco, CA)	2023年 12月15日	国外	○
Aftershock forecasts based on incomplete earthquake catalogs: ETASI model application to the 2023 SE Türkiye earthquake sequence (Poster)	Hainzl, S.*, Kumazawa, T. and Ogata, Y.	AGU Annual Meeting 2023, Moscone Center (San Francisco, CA)	2023年 12月14日	国外	
Space-time evolution of the aftershocks following the 2023 Earthquake Sequence in Southern Türkiye, (Poster)	Kato, A.*, Shiomi, K., Yamamoto, Y. and Nakagawa, S.	AGU Annual Meeting 2023, Moscone Center (San Francisco, CA)	2023年 12月14日	国外	○

Comparison of statistical seismicity models of low-frequency earthquakes (LFEs) and its implications for the mechanisms governing LFE activity (Invited)	Nishikawa, T.	AGU Annual Meeting 2023, Moscone Center (San Francisco, CA)	2023年 12月12日	国外	○
状態空間モデルを用いた時系列解析（招待講演）	野村 俊一	応用統計シンポジウム2023, オンライン開催	2023年 11月15日	国内	○
Detection of changes in global background and clustering seismicity（口頭発表）	庄 建倉*, 熊 子瑤	日本地震学会 2023年度秋季大会, パシフィコ横浜アネックスホール	2023年 11月2日	国内	○
A hypocentral version of the spherical space-time ETAS model（口頭発表）	Yongbo Li*, Jiancang Zhuang, Shi Chen	日本地震学会 2023年度秋季大会, パシフィコ横浜アネックスホール	2023年 11月2日	国内	○
データ駆動型アプローチによる地震理解の可能性：他の情報学アプリケーションから学ぶ（招待講演）	ウ ステファン	日本地震学会 2023年度秋季大会, パシフィコ横浜アネックスホール	2023年 11月2日	国内	
摩擦構成則に基づく背景応力場の時間変動推定（ポスター発表）	岩田 貴樹	日本地震学会 2023年度秋季大会, パシフィコ横浜アネックスホール	2023年 11月1日	国内	○
DONETの地震検知能力に関する研究（ポスター発表）	楠城 一嘉*, 山本 揚二郎, 有吉 慶介, 堀川 博紀, 矢田 修一郎, 高橋 成実	日本地震学会 2023年度秋季大会, パシフィコ横浜アネックスホール	2023年 11月1日	国内	

静岡県伊東沖の地震活動の解析（口頭発表）	楠城 一嘉*, 行竹 洋平, 熊澤 貴雄	日本地震学会 2023年度秋季大会, パシフィコ横浜アネックス ホール	2023年 11月2日	国内	
2023年能登半島北東部M6.5の地震直後の地震活動について: 断層バルブモデルとの関連（口頭発表）	加藤 愛太郎	日本地震学会 2023年度秋季大会, パシフィコ横浜アネックス ホール	2023年 10月31日	国内	○
低周波地震活動統計モデルの比較－低周波地震活動の発生メカニズムへの示唆－（口頭発表）	西川 友章	日本地震学会 2023年度秋季大会, パシフィコ横浜アネックス ホール	2023年 11月2日	国内	○
ETASモデルとAICを用いた群発地震検出手法の開発の試み（序報）（口頭発表）	吉村 嶺*, 西川 友章, 西村 卓也	日本地震学会 2023年度秋季大会, パシフィコ横浜アネックス ホール	2023年 11月2日	国内	○
日本列島下の地殻内「内部摩擦係数」の分布推定（口頭発表）	三井 雄太	日本地震学会 2023年度秋季大会, パシフィコ横浜アネックス ホール	2023年 11月1日	国内	○
ハイレートGNSSデータのノイズ解析に基づくプレートマッチングおよび相対力指数の数値実験（口頭発表）	新井 璃子, 三井 雄太	日本地震学会 2023年度秋季大会, パシフィコ横浜アネックス ホール	2023年 10月31日	国内	○
日本の地殻内地震における断層破壊伝播方向の特性（ポスター発表）	柴田 律也*, 麻生 尚文	日本地震学会 2023年度秋季大会, パシフィコ横浜アネックス ホール	2023年 10月31日	国内	○

現在の地殻変動から推定される日本でのせん断ひずみエネルギーの変化と地殻内地震活動との空間的相関関係（口頭発表）	上田 拓*, 西村 卓也	日本地震学会 2023年度秋季大会, パシフィコ横浜アネックス ホール	2023年 11月2日	国内	○
点過程モデルから見える能登半島群発地震活動の時空間変動について（口頭発表）	熊澤 貴雄*, 尾形 良彦	日本地震学会 2023年度秋季大会, パシフィコ横浜アネックス ホール	2023年 11月2日	国内	
No Evidence of Magnitude Dependence in Earthquake Triggering（口頭発表）	Giuseppe Petrillo*, Jiancang Zhuang	日本地震学会 2023年度秋季大会, パシフィコ横浜アネックス ホール	2023年 11月1日	国内	○
地震識別手法の高度化に基づく地震動即時予測の改善と特異な地震活動の解明（招待講演）	溜渕 功史	日本地震学会 2023年度秋季大会, パシフィコ横浜アネックス ホール	2023年 10月31日	国内	
2011年東北地方太平洋沖地震後の内陸地震活動と地殻変動の関係（ポスター発表）	溜渕 功史*, 木村 久夫, 弘瀬 冬樹, 山本 剛靖	日本地震学会 2023年度秋季大会, パシフィコ横浜アネックス ホール	2023年 11月1日	国内	○
Constructing an empirical envelope function of seismic waveforms for the evaluation of EEW in Japan（口頭発表）	Hong Peng*, Stephen Wu, Masumi Yamada	日本地震学会 2023年度秋季大会, パシフィコ横浜アネックス ホール	2023年 11月1日	国内	○
十年前に相対的静穏化が検出された北海道南東沖の地震活動度の現在の状態（口頭発表）	松浦 律子*, 石辺 岳男	日本地震学会 2023年度秋季大会, パシフィコ横浜アネックス ホール	2023年 11月2日	国内	○

2011 年東北地方太平洋沖地震前の時期における様々なハイレートGNSSデータのノイズ（ポスター発表）	三井 雄太, 新井 璃子	日本測地学会第140回講演会, 仙台市福祉プラザ	2023年 10月11-13日	国内	○
ハイレートGNSSデータのノイズ解析に基づくテンプレートマッチング数値実験（口頭発表）	新井 璃子, 三井 雄太	日本測地学会第140回講演会, 仙台市福祉プラザ	2023年 10月13日	国内	○
駿河トラフ浅部におけるやや長期的なスロースリップイベントの検討（口頭発表）	菊地 祐次, 三井 雄太, 加納 将行	日本測地学会第140回講演会, 仙台市福祉プラザ	2023年 10月11日	国内	○
現在の地殻変動から推定される日本でのせん断ひずみエネルギーの変化と地殻内地震活動との空間的相関関係（口頭発表）	上田 拓, 西村 卓也	日本測地学会第140回講演会, 仙台市福祉プラザ	2023年 10月12日	国内	○
更新Hawkes過程のフィルタリングとその統計推論手法（口頭発表）	庄 建倉	2023年度統計関連学会連合大会, 京都大学	2023年 9月6日	国内	○
直下型大地震の確率予測について（口頭発表）	尾形 良彦	2023年度統計関連学会連合大会, 京都大学	2023年 9月6日	国内	
スロー地震活動を組み込んだ地震活動統計モデルの構築：ニュージーランド・ヒクラング沈み込み帯への適用（企画セッション）	西川 友章*, 西村 卓也	2023年度統計関連学会連合大会, 京都大学	2023年 9月6日	国内	
能登半島群発地震の時空間的活動推移の統計的特徴（一般講演）	熊澤 貴雄*, 尾形 良彦	2023年度統計関連学会連合大会, 京都大学	2023年 9月4日	国内	
A Bayesian non-parametric method of estimating the background intensity of ETAS model（一般講演）	牛 源源*, 庄 建倉	2023年度統計関連学会連合大会, 京都大学	2023年 9月6日	国内	

On extending the ETAS model (招待講演)	Zhuang, J.	10th International Workshop on Applied Probability (IWAP 2023), Porto Palace Hotel, テッサロニキ, ギリシャ	2023年 6月8日	国外	○
Second-order smoothness prior over the Delaunay Tessellation in Bayesian geophysical inversion (口頭発表)	Niu, Y.	10th International Workshop on Applied Probability (IWAP 2023), Porto Palace Hotel, テッサロニキ, ギリシャ	2023年 6月9日	国外	
Evaluating earthquake forecasting models with likelihood based marginal and conditional scores (招待講演)	庄 建倉	第7回 国際ワークショップ「地震準備プロセス」: 観測、検証、モデリング、予測 (IWEP7), 千葉大学	2023年 5月24日	国内	○
Including stress relaxation in point-process model for seismic occurrence (口頭発表)	Petrillo, G.	ISTerre seminar, Institut des Sciences de la Terre (ISTerre) グルノーブル, フランス (ハイブリッド)	2023年 5月25日	国外	○
Evaluating earthquake forecasting models with likelihood based marginal and conditional scores (口頭発表)	庄 建倉	日本地球惑星科学連合2023年大会, 幕張メッセ (ハイブリッド開催)	2023年 5月23日	国内	○

時空間ETAS予測との比較による地震活動の多様な特性（口頭発表）	尾形 良彦	日本地球惑星科学連合2023年大会，幕張メッセ（ハイブリッド開催）	2023年 5月22日	国内	
空間分解能向上のための応力空間パターン推定手法の改良（ポスター発表）	岩田 貴樹	日本地球惑星科学連合2023年大会，幕張メッセ（ハイブリッド開催）	2023年 5月25日	国内	○
Spatial variability of the response of the Nagano seismicity to the 2011 Tohoku-oki earthquake, in Japan（口頭発表）	楠城 一嘉*， 井筒 潤， 鴨川 仁， 堀 高峰， 尾池 和夫	日本地球惑星科学連合2023年大会，幕張メッセ（ハイブリッド開催）	2023年 5月22日	国内	
Preliminary analysis of earthquake detection probabilities and completeness levels for the Dense Oceanfloor Network system for Earthquakes and Tsunamis (DONET)（ポスター発表）	楠城 一嘉*， 有吉 慶介， 山本 揚二朗， 堀川 博紀， 矢田 修一郎， 高橋 成実	日本地球惑星科学連合2023年大会，幕張メッセ（ハイブリッド開催）	2023年 5月23日	国内	
Hierarchical Space-Time ETAS (HIST-ETAS) モデルを用いたオンライン地震活動評価の実証実験：序報（ポスター発表）	楠城 一嘉	日本地球惑星科学連合2023年大会，幕張メッセ（ハイブリッド開催）	2023年 5月23日	国内	
A preliminary analysis of seismic activity off the coast of Ito, Shizuoka（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2023年大会，幕張メッセ（ハイブリッド開催）	2023年 5月26日	国内	

A comprehensive earthquake catalog for the 2020 seismic swarm in the central Japan (口頭発表)	加藤 愛太郎*, 中川 茂樹, 藤田 航平, 市村 強, 長尾 大道	日本地球惑星科学連合2023年大会, 幕張メッセ (ハイブリッド開催)	2023年 5月25日	国内	○
Comparison and improvement of statistical models for activity of low-frequency earthquakes (口頭発表)	西川 友章	日本地球惑星科学連合2023年大会, 幕張メッセ (ハイブリッド開催)	2023年 5月24日	国内	○
能登半島群発地震の時空間的活動推移の統計的特徴 (ポスター発表)	熊澤 貴雄*, 尾形 良彦	日本地球惑星科学連合2023年大会, 幕張メッセ (ハイブリッド開催)	2023年 5月23日	国内	
Global background earthquakes have shown a steady trend over the past twenty years (口頭発表)	熊 子瑤*, 庄 建倉	日本地球惑星科学連合2023年大会, 幕張メッセ (ハイブリッド開催)	2023年 5月22日	国内	○
地震・スロースリップ・スティックスリップの面積-変位(A-D)関係 (ポスター発表)	三井 雄太*, 大庭 伸一, 直井 誠, 山田 卓司	日本地球惑星科学連合2023年大会, 幕張メッセ (ハイブリッド開催)	2023年 5月22日	国内	○
Deep Mechanics along the San Andreas Fault through Focal Mechanisms of Low-Frequency Earthquakes near Parkfield (口頭発表)	麻生 尚文*, 麻生 未季, Shelly David, 井出 哲	日本地球惑星科学連合2023年大会, 幕張メッセ (ハイブリッド開催)	2023年 5月24日	国内	○
日本のひずみ集中帯とその周辺域での背景地震活動度とひずみ速度の関係性 (ポスター発表)	上田 拓*, 西村 卓也	日本地球惑星科学連合2023年大会, 幕張メッセ (ハイブリッド開催)	2023年 5月23日	国内	○

Second-order smoothness prior over the Delaunay Tessellation and its application to gravity Bayesian inversion (口頭発表)	牛 源源*, 庄 建倉	日本地球惑星科学連合2023年大会, 幕張メッセ (ハイブリッド開催)	2023年 5月24日	国内	
Is the stress relaxation relevant for long term forecasting? (口頭発表)	Petrillo, G.*, Zhuang, J., and Lippiello, E.	EGU General Assembly 2023, ウィーン, オーストリア	2023年 4月26日	国外	○
Volcanism of Mount Fuji activated by the 2011 Japanese large earthquakes (ポスター発表)	Nanjo, K.*, Yukutake, Y. and Kumazawa, T.	EGU General Assembly 2023, ウィーン, オーストリア	2023年 4月27日	国外	

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

掲載した論文(発表題目)	発表者氏名	発表した場所 (学会誌・雑誌等名)	発表した 時期	国内 ・外 の別	主たる 成果
Adaptive estimation of the Gutenberg-Richter b value using a state space model and particle filtering	Iwata, D. and Nanjo, K.Z.	<i>Sci Rep</i>	2024年 3月5日	国外	
A 3D Spherical ETAS Model: A Case Study in the Alaska - Aleutian Region	Li, Y., Zhuang, J., Shi C., Guo, Y. and Xiong, Z.	<i>Seismological Research Letters</i>	2024年 2月28日	国外	○
Residual Analysis-Based Model Improvement for State Space Models with Nonlinear Responses	Shen, X. and Zhuang, J.	<i>IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence</i>	2024年 1月29日	国外	○

Aftershock forecasts based on incomplete earthquake catalogs: ETASI model application to the 2023 SE Türkiye earthquake sequence	Hainzl, S., Kumazawa, T. and Ogata, Y.	<i>Geophysical Journal International</i>	2024年 1月5日	国外	
Including stress relaxation in point-process model for seismic occurrence	Petrillo, G., Lippiello, E. and Zhuang, J.	<i>Geophysical Journal International</i>	2023年 12月20日	国外	○
Evaluating the incompleteness magnitude using an unbiased estimate of the b value	Godano, C., Petrillo, G. and Lippiello, E.	<i>Geophysical Journal International,</i>	2023年 12月8日	国外	○
Finding the number of latent states in hidden Markov models using information criteria	Buckby, J., Wang, T., Fletcher, D. et al.	<i>Environ Ecol Stat</i>	2023年 11月22日	国外	○
Bayesian inversion for modeling 3D density structures in the eastern margin of Bayan Har block and its tectonic implications	Li, H., Chen, S., Zhang, B., Li, Y. and Zhuang, J.	<i>Geophysical Journal International,</i>	2023年 11月20日	国外	○
Verifying the Magnitude Dependence in Earthquake Occurrence	Petrillo, G. and Zhuang, J.	<i>Physical Review Letters</i>	2023年 10月12日	国外	○
Detection of hidden earthquakes after the 2011 Tohoku earthquake by automatic hypocenter determination combined with machine learning	Tamaribuchi, K., Kudo, S., Shimojo, K. and Hirose, F.	<i>Earth Planets Space</i>	2023年 10月10日	国外	

Activated volcanism of Mount Fuji by the 2011 Japanese large earthquakes	Nanjo, K. Z., Yukutake, Y. and Kumazawa, T.	<i>Scientific Reports</i>	2023年 6月29日	国外	
Gravity field changes reveal deep mass transfer before and after the 2013 Lushan earthquake	Wang, L., Chen, S., Zhuang, J. Zhang B., Shi, W., Yang J. and Hu W.	<i>Communications Earth &amp; Environment</i>	2023年 5月31日	国外	○
Incorporating Foreshocks in an Epidemic-like Description of Seismic Occurrence in Italy	Petrillo, G. and Lippiello, E.	<i>Applied Sciences</i>	2023年 4月13日	国外	○
Cluster-based foreshock discrimination model with flexible time horizon and mainshock magnitudes	Nomura, S. and Ogata, Y.	<i>Progress in Earth and Planetary Science</i>	2023年 4月12日	国外	
Second-order smoothness prior over the Delaunay Tessellation in Bayesian geophysical inversion	Niu, Y., Zhuang, J. and Xiong, Z.	<i>Spatial Statistics</i>	2023年 4月	国外	

(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

名称	機能
3D-SETAS	3D 球面版 ETAS モデルによるデータフィッティングおよび地震カタログの確率的除群法 ( <a href="http://star-e.ism.ac.jp/zhuang/software/3D-SETAS-main.zip">http://star-e.ism.ac.jp/zhuang/software/3D-SETAS-main.zip</a> )
ETAS-8pl	ETAS モデルの最大重み付き尤度推定 ( <a href="http://star-e.ism.ac.jp/zhuang/software/etas8pl.tar.gz">http://star-e.ism.ac.jp/zhuang/software/etas8pl.tar.gz</a> )

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 による日本内陸部の短期予測の評価

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-5 前震と b 値

### (1) 業務の内容

#### (a) 業務の目的

連発大地震発生の可能性を考慮した時空間 ETAS モデルなどによるオンラインの短期確率予測モデルの開発・展開・実装を目的とする。地震発生 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、以下のように、緊急地震速報の事前シナリオの想定尤度に活用するとともに、システムの信頼性を向上させるための事前情報として使用できるようにする。

#### (b) 研究者の所属、氏名、研究実施期間、研究費等

所属機関・部局・職名	氏名	研究実施期間	配分を受けた研究費	間接経費
統計数理研究所・ 名誉教授	尾形 良彦	R5. 4. 1 ～ R6. 3. 31	テーマ A (統数 研配分) の額に 含まれる	同左
静岡県立大学 グローバル地域センター 特任准教授	楠城 一嘉	R5. 4. 1 ～ R6. 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]

ドロー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

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

5) 令和 7 年度

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

(d) 令和 5 年度の業務の目的

1) B-1 ETAS による日本内陸部の短期予測の評価

標準の時空間 ETAS モデルと階層ベイズの時空間 ETAS (HIST-ETAS) モデルに基づき、日本内陸部の短期予測確率を算出する。その予測性能を情報利得（対数尤度）で評価する。

2) B-2 欠損データの補完

狭い空間的領域における本震直後の余震活動や活発な群発地震のデータ欠測率を考慮した非定常 ETAS モデルを作成し推定する。これを考慮して、計算プログラムを作成し、地震活動の発生要素に関わる逆解析を達成する。

3) B-3 ETAS による短期・リアルタイム予測と可視化

緊急地震速報における事前情報提供のために、続発する地震発生率を時間領域に限定した定常 ETAS モデルで大地震直後の余震欠測を考慮した短期予測を行う。これを日本内陸部において可視化することによって、自動または半自動のオンライン予測システムの導入を目指す。

4) B-5 前震と b 値

中小地震の地震群で群内における先行地震同士の時空間パターンの統計的識別に基づいて格段に大きな地震が将来起こる確率予測の素案を提案したが、拡張案として、オンラインで事後少しでも大きなマグニチュードの地震が発生する確率を予測するモデルを作成する。そして、実際に起きた地震マグニチュード列の有意性を評価する。

なお、マグニチュード時系列は、通常 G-R 則に依り、定常かつ独立であるが、実際に非定常・非独立であるマグニチュード頻度モデルの高度化を検討する。G-R 則の b 値や前震の統計的識別を通して非定常・非独立性を導入した事前予測可能性を追求し、評価を試みる。

## (2) 令和 5 年度の成果

### (a) 業務の要約

#### 1) B-1 ETAS による日本内陸部の短期予測の評価

標準の時空間 ETAS モデルと階層ベイズ的時空間 ETAS (HIST-ETAS) モデルに基づき、日本内陸部の短期予測確率の予測性能を情報利得（対数尤度）で、リアルタイムで地震データが追加されるごとに、各モデルを時間ないし空間的に評価・比較した。

#### 2) B-2 欠損データの補完

狭い空間的領域における本震直後の余震活動や活発な群発地震のデータ欠測率を考慮した非定常 ETAS モデルを作成し推定した。これを考慮して、計算プログラムを作成し、地震活動の発生要素に関わる逆解析を達成した。

#### 3) B-3 ETAS による短期・リアルタイム予測と可視化

緊急地震速報における事前情報提供のために、HIST-ETAS モデルを用いて、続発する地震発生率を準リアルタイムで空間的予測をする仕組みを作成した。これを全国的に可視化し、自動でオンライン予測するシステムの導入を目指した(図 1, 2)。具体的には(図 1 上段)、Hi-net 自動処理震源リストと気象庁の一元化震源リストをもとに 1973 年以降から今日までの地震を含んだ統合震源リスト(入力データ)のファイルを作成する(図 1 上段の左の箱)。次に、入力データを HIST-ETAS モデル(Ogata, 2011)に入力して明日の地震発生率を算出した。

また、定常・非定常 ETAS モデルの時間領域解析として、今年度に発生した、M6.5 および M7.6 能登半島の余震活動を含む群発地震活動、トカラ列島および鳥島近海の群発地震活動など、データの複雑な不完全性を克服した結果を導いた。

#### 4) B-5 前震と b 値

中小地震の地震群で群内における先行地震同士の時空間パターンの統計的識別に基づいて格段に大きな地震が将来起こる確率予測の素案を提案したが、拡張案として、オンラインで事後少しでも大きなマグニチュードの地震が発生する確率を予測するモデルを作成した。そして、最近までの M4 以上の地震カタログによる予測実験から、日本全域で進行中の地震活動について、少しでも大きな地震が起きる予測確率を、想定マグニチュードや 30 日以内の切迫性ごとにオンラインで計算した。これによって地震クラスター内のマグニチュード列の確率予測が ETAS モデルの予測に有用に働くかの可能性を試せる。

### (b) 業務の成果

#### 1) B-1 ETAS による日本内陸部の短期予測の評価

標準の時空間 ETAS モデルと階層ベイズ的時空間 ETAS (HIST-ETAS) モデルに基づき、日本内陸部の短期予測確率の予測性能を情報利得（対数尤度）で、リアルタイムで地震データが追加されるごとに、各モデルを時間ないし空間的に評価・比較した。階層ベイズ的時空間 ETAS (HIST-ETAS) モデルに基づき、ここ 5 年間の日本内陸部データに関して、(1) 時空間 ETAS モデル、(2) HIST-ETAS-mK モデル、および (3) HIST-ETAS-5pa モデルの時空間短期予測を実施した。これらの予測について評価を実施し精度を比較したところ、地域性を最も多く特徴づけた HIST-ETAS-5 parameter モデルが概ね最も良い予測を与えた。

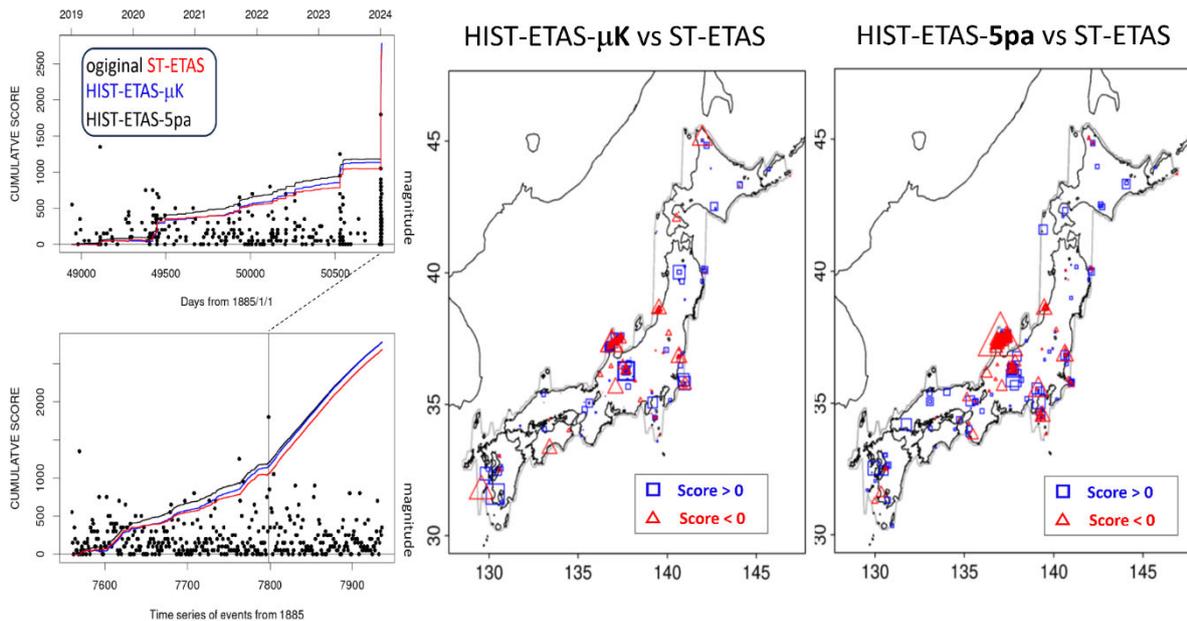


図 1 宇津明治カタログと JMA カタログ 1926～2018 年データで学習した 3 つの時空間 ETAS モデルの評価スコア。最近 5 年間の内陸部データに対する 3 種類の時空間 ETAS モデル (1.Original 時空間 ETAS, 2.HIST-ETAS-mK, 3.HIST-ETAS-5pa) の内陸部一様モデルに対する時空間短期予測結果の情報利得 (左側パネル, 上段は通常時間で累積, 下段は地震の順番で累積) と空間位置におけるモデルの情報利得差 (score) の比較 (中央・右側パネル)。

具体的には、3 つの時空間 ETAS モデルは何れも内陸部で一様ポアソンモデルよりも良い結果となった。3 つの時空間 ETAS モデルの中では、M7.6 能登半島地震まで、地域性が特徴づけられた HIST-ETAS-5pa モデルが概ね全国的に最も良い予測を与えた。しかし、内陸部の限られた地域、特に能登半島地震の余震域に関しては、全国均一の時空間 ETAS モデルの方が優れている。

標準時空間モデルと比べた空間図において、地域的に能登半島、山形県沖、福島県浜通りなどのスコアは赤△でマイナスのスコアになった。この結果から、[1]1923 年以来の能登半島地域での M4 クラス以上の地震活動の記録で、1993 年 M6.6 能登半島沖、2007 年能登半島地震以前は活動が見られていない。[2] 他の地域でも最近ま

で殆ど無かったことに起因すると考えられる。これは  $m$  と  $K$  依存の HIST-ETAS モデルの評価で、能登半島の北端と南端での精度が認められる。

これらから導かれる短期予測についての重要な示唆は、準リアルタイムのパラメータのデータ同化が不可欠である。

## 2) B-2 欠損データの補完

精度の高い逆解析を実装するため気象庁が作成したカタログの殆ど全ての地震を使用するため、先ずカタログの地震検出率をモデル化して、欠測データがモデル推定および予測に与える影響を考慮し、真の地震発生率を計算する方法を開発した。実際の実装については、予測対象地域を限定して時間領域の非定常 ETAS モデルなどで、欠測地震カタログの克服による、能登半島 M7.6 や M6.8 地震などの本震直後の予測法や群発地震のインバージョン解析結果を導いた。

欠測データを考慮して、精度の高い逆解析を実装するため、先ずカタログの地震の検出率をモデル化して推定する。

モデル推定および予測に与える影響を考慮し、真の地震発生率を計算する方法を開発した。

2023 (R5) 年度に発生した、能登半島 M7.6 や M6.8 地震などの、本震直後の余震や群発地震のインバージョン解析結果を導いた。

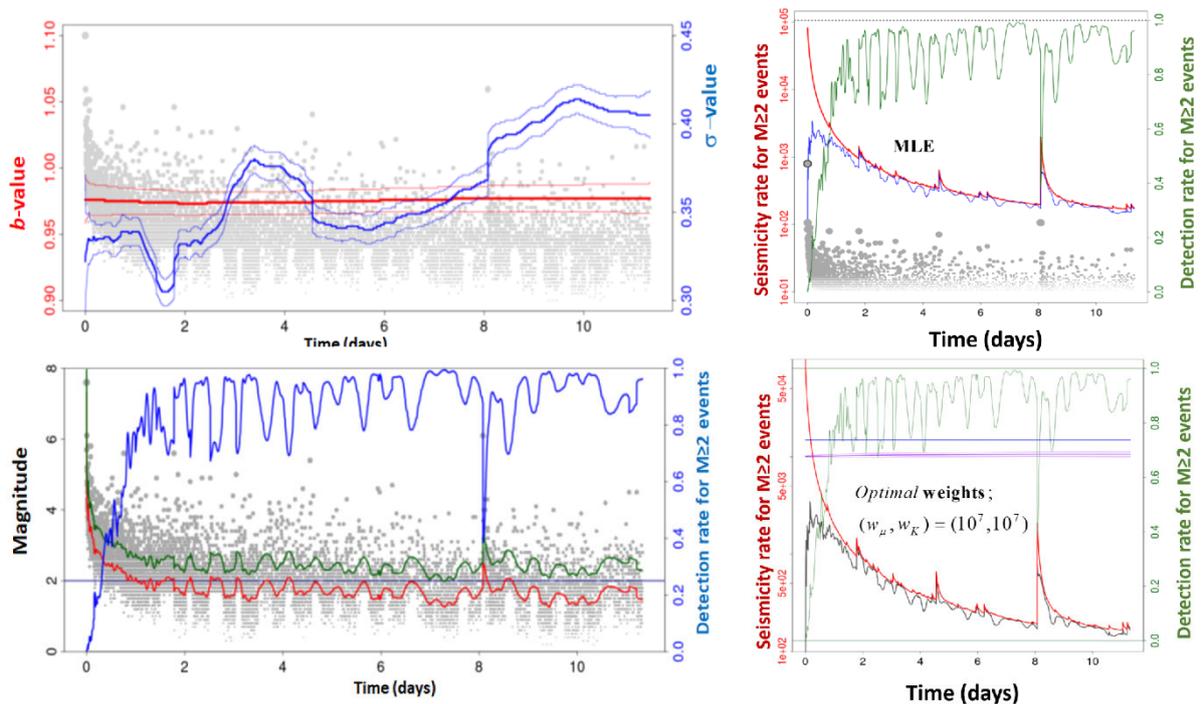


図2 能登半島地震 M7.6 地震の余震活動の検出率と真の ETAS 発生率。左上パネルの赤曲線は  $b$  値が一定、青曲線は  $\sigma$  値の変化（能登半島周辺の観測網に比して余震域の広さが反映している）。左下のパネルの赤曲線は 50% 検出率のマグニチュードで、緑の曲線は 97.5% の検出率、青線は  $M \geq 2$  の余震の検出確率で、いずれも昼夜の変化を捉えている。右側パネルの赤い曲線は ETAS モデルの真の強度 ( $M \geq 2$ ) で、上段は MLE 解で下段は最適

ABIC ベイズ MAP 解。細かく変動している青曲線（上段）と灰色曲線（下段）は観測検出された余震列の発生率変化、緑曲線は  $M \geq 2$  余震の検出確率、青い水平線は ETAS の背景活動率、紫の水平線は余震強度  $K$  値である。

### 3) B-3 ETAS による短期・リアルタイム予測と可視化

地震発生率を緯度経度  $0.1$  度  $\times 0.1$  度の間隔でマグニチュード ( $M$ ) 6 以上の地震が 1 日以内におきる発生率を計算し、緯度、経度、地震発生率のリスト(出力データ)のファイルを作成する(図 3 上段の中の箱)。そして、将来的に予測精度を検証することを念頭において入力と出力のファイルを保存する(図 3 上段の右の箱)。この一連の処理を毎日定時に自動で実行する。同様に、気象庁の速報震源リストと気象庁の一元化震源リストを使用する仕組みを作成した(図 3 下段)。ただし、この仕組みでは出力データをもとに地震発生率を地図化して、地図を X(旧ツイッター)の非公開アカウントに投稿するオプション、パスワード付きホームページに地図をアップロードし閲覧可能にするオプション、緊急地震速報における事前情報提供を念頭に入れて出力データのファイルを外部サーバーにアップロードするオプションを追加した(図 3 下段の右の箱)。図 4 に地震発生率の地図の例と X に投稿された地図が表示されているスマートフォンの画面の例を示す。

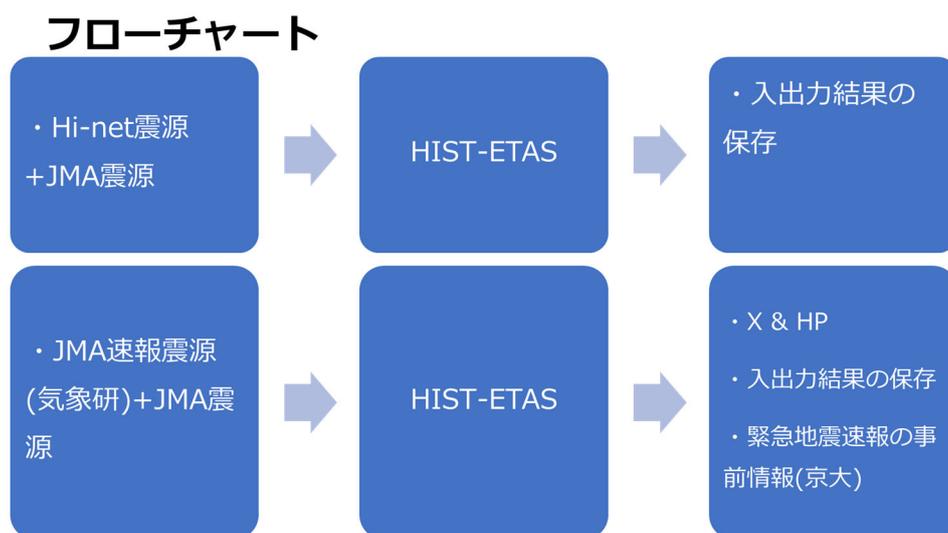


図3 HIST-ETASモデルを用いて準リアルタイムで地震発生率を予測する仕組みを示すフローチャート。

# HIST-ETASモデル

MRI\_S13-1\_mk\_jp 1973/01/01 - 2024/02/09  
CLMS=6.5 XMG0=4.5 WETAS=3.5

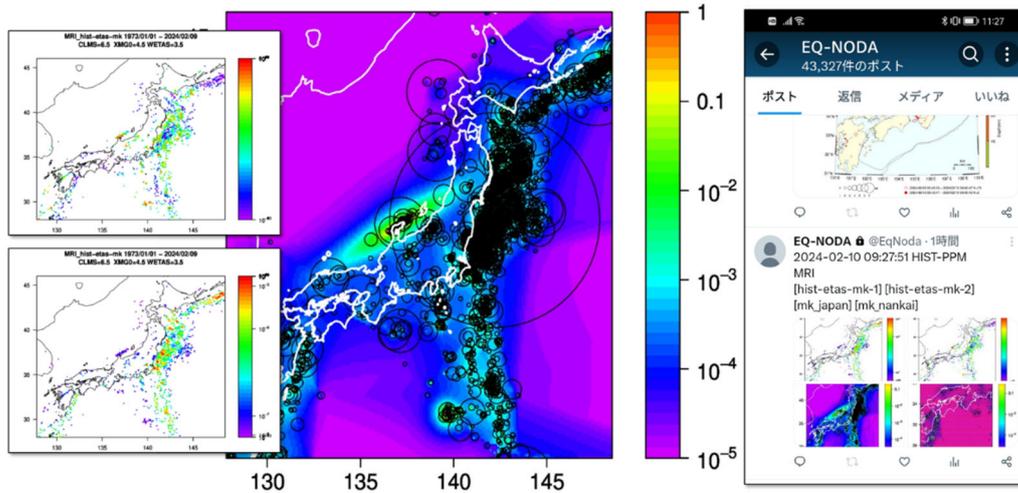


図4 HIST-ETAS モデルを用いて準リアルタイムで地震発生率を予測した結果を示す例。ここでは、1973年から2024年2月9日までのデータに基づき、2024年2月10日の地震発生率を空間的予測する地図(中央の図)及び、Xに投稿された地図が表示されているスマートフォンの画面(右の図)を示す。

#### 4) B-5 前震とb値

中小地震の地震群で群内における先行地震同士の時空間パターンの統計的識別に基づいて格段に大きな地震が将来起こる確率予測の素案を提案したが、拡張案として、オンラインで事後少しでも大きなマグニチュードの地震が発生する確率を予測するモデルを作成した。そして、最近までのM4以上の地震カタログによる予測実験から、日本全域で進行中の地震活動について、少しでも大きな地震が起きる予測確率を、想定マグニチュードや30日以内の切迫性ごとにオンラインで計算した。これによって地震クラスター内のマグニチュード列の確率予測がETASモデルの予測に有用に働くかの可能性を試せる。

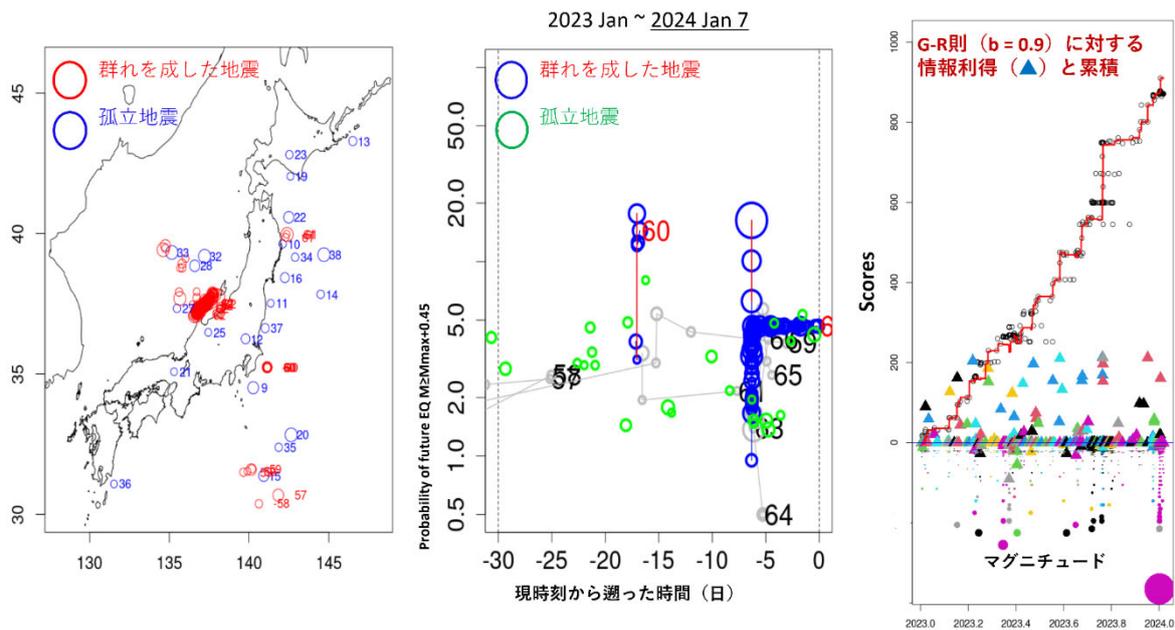


図5 前震型の予測と評価。気象庁カタログ  $M \geq 4$  地震のクラスターの学習モデルを2023年から確率予測（中央パネルは最近一月）した評価（左側パネル）

## 2003年十勝沖地震の東側の**b**値は減少中

十勝沖地震の東側の**b**値は東北沖地震前に見られた値に近づきつつある

1) Nishikawa et al. (2019, Science)

・低**b**値の領域を含む西側では静穏化は継続中

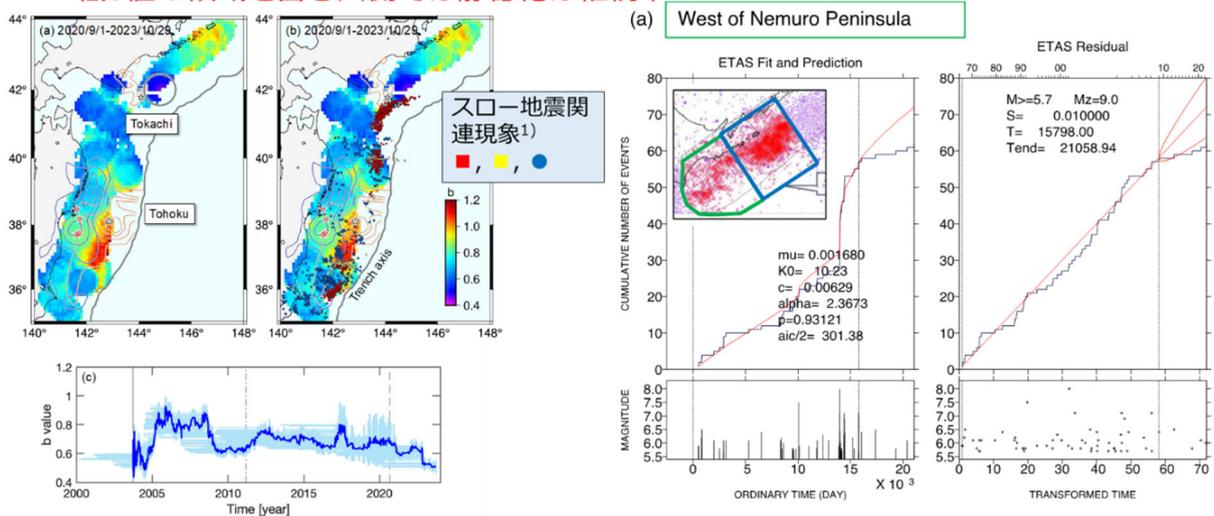


図6 G-R 則の  $b$  値を通して非定常・非独立性を導入した事前予測可能性を追求し、評価を試みた例の1つ目。北海道・東北沖の地震活動に基づく  $b$  値を使用した。低  $b$  値を含む領域は、ETAS モデルから有意に乖離し穏化が起きている領域に含まれる(右図)。2009年頃から北海道東方沖で静穏化が始まったと松浦(2019)は指摘したが、静穏化が未だ終了していないとみる方が妥当であることを本研究の結果は示している。北海道東方沖の丁寧な

監視が課題であるとする従来の提案(堀, 2019; 松浦, 2019)を改めて支持する結果である。

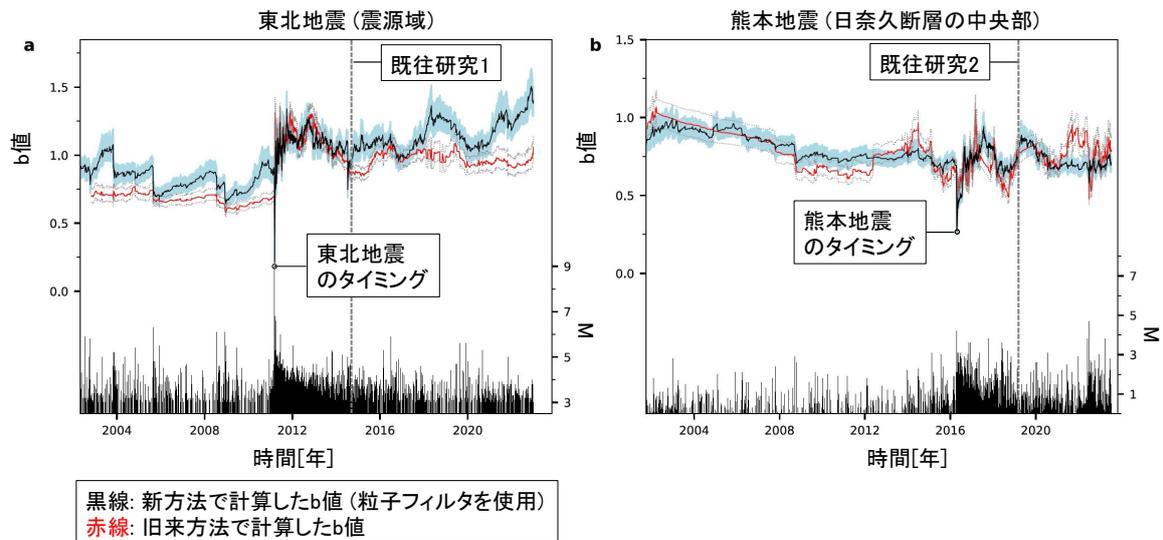


図7 G-R則のb値を通して非定常・非独立性を導入した事前予測可能性を追求し、評価を試みた例の2つ目。東北地震と熊本地震の震源域におけるb値を使用した。東北地震の調査から、震源域で高かった力が地震により解放され、未だ地震前の状態に戻っていないことを発見した(左図)。これは、大～巨大地震が今後いつ再発しても不思議ではないとする先行研究(Tormann et al, 2015)の指摘は当たらないことを示す。一方、熊本地震の調査から、日奈久断層の中央部では力の状態が高いまま維持していることを発見した(右図)。更に高い力がかかる場合、力に耐えきれずに破壊が始まり、未だ活動していない同断層の南部へ破壊が進展する可能性もあり得るので、同断層の監視体制の強化が必要であると提案した既往研究(Nanjo et al., 2019)を支持する。

#### 引用文献

- ・ 楠城一嘉, 北海道・東北沖の地震サイズ分布(b値)の時空間変化, 地震予知連絡会会報, 111, 549-553, 2024.
- ・ 堀高峰, 北海道東方沖の地震活動の相対的静穏化を受けた他の物理量変化の検討, 地震予知連絡会会報, 101, 507-510, 2019.
- ・ D. Iwata, K. Z. Nanjo, Adaptive estimation of the Gutenberg-Richter b value using a state space model and particle filtering, Scientific Reports, 4(1), 4630, 2024.
- ・ 松浦律子, 北海道東方沖の相対的地震活動度の静穏化と現状, 101, 475-483, 2019.
- ・ 楠城一嘉, 北海道・東北沖の地震サイズ分布(b値)の時空間変化, 地震予知連絡会会報, 111, 549-553, 2024.
- ・ Nanjo K. Z, Izutsu J, Orihara Y, Kamogawa M, Nagao Y, Changes in seismicity pattern due to the 2016 Kumamoto earthquakes identify a highly stressed area on the Hinagu fault zone, Geophys Res Lett, 46(16), 9489-9496, 2019.

- T. Nishikawa, T. Matsuzawa, K. Ohta, N. Uchida, T. Nishimura, S. Ide, The slow earthquake spectrum in the Japan Trench illuminated by the S-net seafloor observatories, *Science*, 365, 808-813, 2019.
- Y. Ogata, Significant improvements of the space-time ETAS model for forecasting of accurate baseline seismicity. *Earth Planets and Space*, 63, 217-229, 2011.
- Tormann, T., Enescu, B., Woessner, J. et al. Randomness of megathrust earthquakes implied by rapid stress recovery after the Japan earthquake, *Nature Geoscience*, 8, 152-158, 2015.

(c) 結論ならびに今後の課題

1) B-1 ETAS による日本内陸部の短期予測の評価

地域性を最も多く特徴づけた HIST-ETAS-5 parameter モデルが概ね最も良い予測を与えた。しかし、内陸部の限られた地域、特に能登半島地震の余震域に関しては、全国均一の標準時空間 ETAS モデルが優れている。これは学習期間の同地域での地震活動の記録が最近まで殆どなかったことに起因すると考えられる。

今後の課題としては、海域を含む日本全域の長期および短期予測を実施したい。とくに短期予測については、準リアルタイムの HIST-ETAS モデルのパラメータのデータ同化がほぼ常に繰り返されることが不可欠であるが、たとえば能登半島地震などの事例について、HIST-ETAS モデルの予測精度向上につながるかの検証確認をしたい。

2) B-2 欠損データの補完

精度の高い逆解析を実装するため気象庁が作成したカタログの殆ど全ての地震を使用するため、先ずカタログの地震検出率をモデル化して推定する。欠測データがモデル推定および予測に与える影響を考慮し、真の地震発生率を計算する方法を開発した。実際の実装については、予測対象地域を限定して時間領域の非定常 ETAS モデルなどで、欠測地震カタログの克服による、能登半島 M7.6 や M6.8 地震などの本震直後の予測法や群発地震のインバージョン解析結果を導いた。

今後の課題としては、海域を含む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、時空間 ETAS モデルの実装を目指したい。

3) B-3 ETAS による短期・リアルタイム予測と可視化

余震欠測の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。今後の課題としては、直後で安定したリアルタイム空間確率予測を実装するロバストな推定方式をどのように保障するかの実験が課題である。これを全国的に可視化することによって、自動または半自動のオンライン予測システムの導入を目指す。

今後の課題としては、海域を含む日本全域の時空間即時予測とその評価を実施したい。

4) B-5 前震とb値

通常マグニチュード時系列は、Gutenberg-Richter 則に依り、定常かつ独立であることが仮定されている。従来 ETAS モデルでもこれが仮定されて様々な実験結果が出されているが、地震クラスター内の統計的識別に基づいた前震確率系列のマグニチュード頻度モデルを採用した場合、これによって HIST-ETAS モデルのオンライン予測精度の向上が見られるかを時空間的に検討したい。

(d) 成果の論文発表・口頭発表等

1) 学会等における口頭・ポスター発表 : 計 40 件、うち海外計 4 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
Recent progress in ETAS models of heterogeneous seismic activity (Invited)	Ogata, Y.	第13回統計地震学国際ワークショップ (StatSei13), 南方科技大学 (Southern University of Science and Technology), 深圳, 中国	2024年 3月17日	国外	○
Aftershock forecasts based on incomplete records of early aftershocks: Example of the 2023 SE Türkiye earthquake sequence (Oral)	Hainzl, S.*, Kumazawa, T. and Ogata, Y.	第13回統計地震学国際ワークショップ (StatSei13), 南方科技大学 (Southern University of Science and Technology), 深圳, 中国	2024年 3月18日	国外	○

Aftershock forecasts based on incomplete earthquake catalogs: ETASI model application to the 2023 SE Türkiye earthquake sequence (Poster)	Hainzl, S. *, Kumazawa, T. and Ogata, Y.	AGU Annual Meeting 2023, Moscone Center (San Francisco, CA)	2023年 12月14日	国外	○
状態空間モデルを用いた時系列解析（招待講演）	野村 俊一	応用統計シンポジウム2023, オンライン開催	2023年 11月15日	国内	
Detection of changes in global background and clustering seismicity (口頭発表)	庄 建倉*, 熊 子瑤	日本地震学会 2023年度秋季大会, パシフィコ横浜アネックスホール	2023年 11月2日	国内	
A hypocentral version of the spherical space-time ETAS model (口頭発表)	Yongbo Li*, Jiancang Zhuang, Shi Chen	日本地震学会 2023年度秋季大会, パシフィコ横浜アネックスホール	2023年 11月2日	国内	
系統的な欠測を伴う地震カタログから実際の活動率変化の推定（口頭発表）	尾形 良彦*, 熊澤 貴雄	日本地震学会 2023年度秋季大会, パシフィコ横浜アネックスホール	2023年 11月2日	国内	○
DONETの地震検知能力に関する研究（ポスター発表）	楠城 一嘉*, 山本 揚二朗, 有吉 慶介, 堀川 博紀, 矢田 修一郎, 高橋 成実	日本地震学会 2023年度秋季大会, パシフィコ横浜アネックスホール	2023年 11月1日	国内	○
静岡県伊東沖の地震活動の解析（口頭発表）	楠城 一嘉*, 行竹 洋平, 熊澤 貴雄	日本地震学会 2023年度秋季大会, パシフィコ横浜アネックスホール	2023年 11月2日	国内	○

低周波地震活動統計モデルの比較－低周波地震活動の発生メカニズムへの示唆－（口頭発表）	西川 友章	日本地震学会 2023年度秋季大会，パシフィコ横浜アネックスホール	2023年 11月2日	国内	
ETASモデルとAICを用いた群発地震検出手法の開発の試み（序報）（口頭発表）	吉村 嶺*， 西川 友章， 西村 卓也	日本地震学会 2023年度秋季大会，パシフィコ横浜アネックスホール	2023年 11月2日	国内	
日本列島下の地殻内「内部摩擦係数」の分布推定（口頭発表）	三井 雄太	日本地震学会 2023年度秋季大会，パシフィコ横浜アネックスホール	2023年 11月1日	国内	
ハイレートGNSSデータのノイズ解析に基づくテンプレートマッチングおよび相対力指数の数値実験（口頭発表）	新井 璃子， 三井 雄太	日本地震学会 2023年度秋季大会，パシフィコ横浜アネックスホール	2023年 10月31日	国内	
駿河トラフ浅部におけるやや長期的なスロースリップイベントを網羅的に検出する試み（ポスター発表）	菊地 祐次*， 三井 雄太， 加納 将行	日本地震学会 2023年度秋季大会，パシフィコ横浜アネックスホール	2023年 10月31日	国内	○
日本の地殻内地震における断層破壊伝播方向の特性（ポスター発表）	柴田 律也*， 麻生 尚文	日本地震学会 2023年度秋季大会，パシフィコ横浜アネックスホール	2023年 10月31日	国内	
現在の地殻変動から推定される日本でのせん断ひずみエネルギーの変化と地殻内地震活動との空間的相関関係（口頭発表）	上田 拓*， 西村 卓也	日本地震学会 2023年度秋季大会，パシフィコ横浜アネックスホール	2023年 11月2日	国内	
点過程モデルから見える能登半島群発地震活動の時空間変動について（口頭発表）	熊澤 貴雄*， 尾形 良彦	日本地震学会 2023年度秋季大会，パシフィコ横浜アネックス	2023年 11月2日	国内	○

		ホール			
地震識別手法の高度化に基づく地震動即時予測の改善と特異な地震活動の解明（招待講演）	溜渕 功史	日本地震学会 2023年度秋季大会，パシフィコ横浜アネックスホール	2023年 10月31日，	国内	○
2011年東北地方太平洋沖地震後の内陸地震活動と地殻変動の関係（ポスター発表）	溜渕 功史*， 木村 久夫， 弘瀬 冬樹， 山本 剛靖	日本地震学会 2023年度秋季大会，パシフィコ横浜アネックスホール	2023年 11月1日	国内	
十年前に相対的静穏化が検出された北海道南東沖の地震活動度の現在の状態（口頭発表）	松浦 律子*， 石辺 岳男	日本地震学会 2023年度秋季大会，パシフィコ横浜アネックスホール	2023年 11月2日	国内	
2011年東北地方太平洋沖地震前の時期における様々なハイレートGNSSデータのノイズ（ポスター発表）	三井 雄太， 新井 璃子	日本測地学会第140回講演会，仙台市福祉プラザ	2023年 10月11-13日	国内	
ハイレートGNSSデータのノイズ解析に基づくテンプルプレートマッチング数値実験（口頭発表）	新井 璃子， 三井 雄太	日本測地学会第140回講演会，仙台市福祉プラザ	2023年 10月13日	国内	
駿河トラフ浅部におけるやや長期的なスロースリップイベントの検討（口頭発表）	菊地 祐次， 三井 雄太， 加納 将行	日本測地学会第140回講演会，仙台市福祉プラザ	2023年 10月11日	国内	
現在の地殻変動から推定される日本でのせん断ひずみエネルギーの変化と地殻内地震活動との空間的相関関係（口頭発表）	上田 拓， 西村 卓也	日本測地学会第140回講演会，仙台市福祉プラザ	2023年 10月12日	国内	
直下型大地震の確率予測について（口頭発表）	尾形 良彦	2023年度統計関連学会連合大会，京都大学	2023年 9月6日	国内	○

スロー地震活動を組み込んだ地震活動統計モデルの構築：ニュージーランド・ヒクラング沈み込み帯への適用（企画セッション）	西川 友章*, 西村 卓也	2023年度統計関連学会連合大会, 京都大学	2023年 9月6日	国内	○
能登半島群発地震の時空間的活動推移の統計的特徴（一般講演）	熊澤 貴雄*, 尾形 良彦	2023年度統計関連学会連合大会, 京都大学	2023年 9月4日	国内	○
常時地震活動・余震活動から探る日本列島下の応力状態（企画セッション）	三井 雄太	2023年度統計関連学会連合大会, 京都大学	2023年 9月6日	国内	○
時空間ETAS予測との比較による地震活動の多様な特性（口頭発表）	尾形 良彦	日本地球惑星科学連合2023年大会, 幕張メッセ（ハイブリッド開催）	2023年 5月22日	国内	○
Spatial variability of the response of the Nagano seismicity to the 2011 Tohoku-oki earthquake, in Japan（口頭発表）	楠城 一嘉*, 井筒 潤, 鴨川 仁, 堀 高峰, 尾池 和夫	日本地球惑星科学連合2023年大会, 幕張メッセ（ハイブリッド開催）	2023年 5月22日	国内	○
Preliminary analysis of earthquake detection probabilities and completeness levels for the Dense Ocean floor Network system for Earthquakes and Tsunamis (DONET)（ポスター発表）	楠城 一嘉*, 有吉 慶介, 山本 揚二朗, 堀川 博紀, 矢田 修一郎, 高橋 成実	日本地球惑星科学連合2023年大会, 幕張メッセ（ハイブリッド開催）	2023年 5月23日	国内	○
Hierarchical Space-Time ETAS (HIST-ETAS) モデルを用いたオンライン地震活動評価の実証実験: 序報（ポスター発表）	楠城 一嘉	日本地球惑星科学連合2023年大会, 幕張メッセ（ハイブリッド開催）	2023年 5月23日	国内	○

A preliminary analysis of seismic activity off the coast of Ito, Shizuoka (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2023年大会, 幕張メッセ (ハイブリッド開催)	2023年 5月26日	国内	○
A comprehensive earthquake catalog for the 2020 seismic swarm in the central Japan (口頭発表)	加藤 愛太郎*, 中川 茂樹, 藤田 航平, 市村 強, 長尾 大道	日本地球惑星科学連合2023年大会, 幕張メッセ (ハイブリッド開催)	2023年 5月25日	国内	
Comparison and improvement of statistical models for activity of low-frequency earthquakes (口頭発表)	西川 友章	日本地球惑星科学連合2023年大会, 幕張メッセ (ハイブリッド開催)	2023年 5月24日	国内	
能登半島群発地震の時空間的活動推移の統計的特徴 (ポスター発表)	熊澤 貴雄*, 尾形 良彦	日本地球惑星科学連合2023年大会, 幕張メッセ (ハイブリッド開催)	2023年 5月23日	国内	○
地震・スロースリップ・スティックスリップの面積-変位(A-D)関係 (ポスター発表)	三井 雄太*, 大庭 伸一, 直井 誠, 山田 卓司	日本地球惑星科学連合2023年大会, 幕張メッセ (ハイブリッド開催)	2023年 5月22日	国内	
Deep Mechanics along the San Andreas Fault through Focal Mechanisms of Low-Frequency Earthquakes near Parkfield (口頭発表)	麻生 尚文*, 麻生 未季, Shelly David, 井出 哲	日本地球惑星科学連合2023年大会, 幕張メッセ (ハイブリッド開催)	2023年 5月24日	国内	
日本のひずみ集中帯とその周辺域での背景地震活動度とひずみ速度の関係性 (ポスター発表)	上田 拓*, 西村 卓也	日本地球惑星科学連合2023年大会, 幕張メッセ (ハイブリッド開催)	2023年 5月23日	国内	

Volcanism of Mount Fuji activated by the 2011 Japanese large earthquakes (ポスター発表)	Nanjo, K.*, Yukutake, Y. and Kumazawa, T.	EGU General Assembly 2023, ウィーン, オーストリア	2023年 4月27日	国外	○
---	---	---	----------------	----	---

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載 : 計5件、うち国外計5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
Adaptive estimation of the Gutenberg-Richter b value using a state space model and particle filtering	Iwata, D. and Nanjo, K.Z.	<i>Sci Rep</i>	2024年 3月5日	国外	○
Aftershock forecasts based on incomplete earthquake catalogs: ETASI model application to the 2023 SE Türkiye earthquake sequence	Hainzl, S., Kumazawa, T. and Ogata, Y.	<i>Geophysical Journal International</i>	2024年 1月5日	国外	○
Detection of hidden earthquakes after the 2011 Tohoku earthquake by automatic hypocenter determination combined with machine learning	Tamaribuchi, K., Kudo, S., Shimojo, K. and Hirose, F.	<i>Earth Planets Space</i>	2023年 10月10日	国外	
Activated volcanism of Mount Fuji by the 2011 Japanese large earthquakes	Nanjo, K.Z., Yukutake, Y. and Kumazawa, T.	<i>Scientific Reports</i>	2023年 6月29日	国外	○
Cluster-based foreshock discrimination model with flexible time horizon and mainshock magnitudes	Nomura, S. and Ogata, Y.	Progress in Earth and Planetary Science	2023年 4月12日	国外	○

(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. 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	R5.4.1 ～ R6.3.31	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  
前年度に引き続き逆解析用観測点統合選択法及び動的観測点統合選択法の開発を進める。加えて、新規最適設計に取り組む。
  - 5) 令和 7 年度  
前年度までの研究で開発した手法群を提供する。
- (d) 令和 5 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 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のベイズ的な推定手法の提案・論文化を行う。

## (2) 令和 5 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  
令和 4 年度に引き続き、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テーマ D と連携し行った。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。
- 2) C-2 逆解析のための観測点統合・選択法の開発  
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 観測点のスペクトル特性の把握を行った。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。

### (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。昨年度に利用を検討したベイズ感度公式に基づく観測点選択法 (Iba and Yano, 2023, 2022) において時間変化する尤度関数を利用することで、動的な観測点選択法に拡張できることに気づき、時間変化する尤度関数を用いたベイズ感度公式の手法の検討を行った。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。

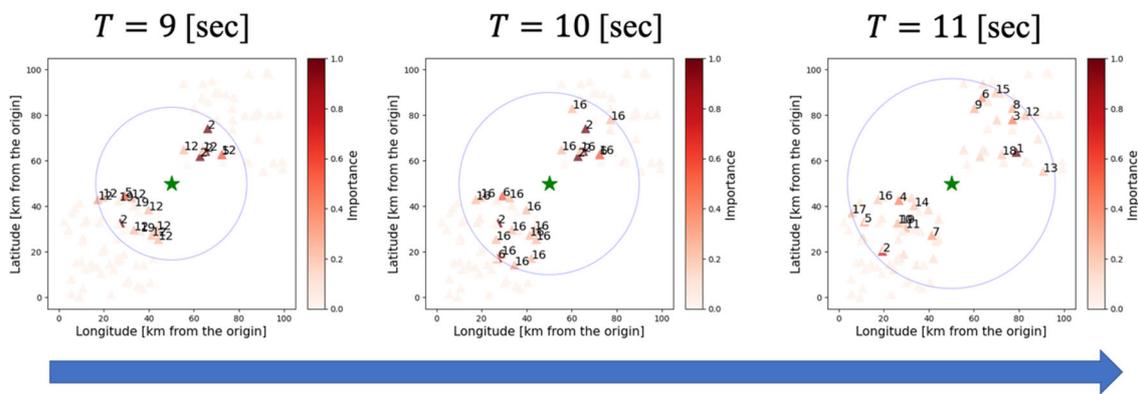


図 1 動的観測点選択：色が濃い観測点ほど重要度が高いことを示す。波面付近の観測点の重要度が上がり、その内側はカバレッジをよくするように分布していることがわかる。

## 2) C-2 逆解析のための観測点統合・選択法の開発

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 観測点のスペクトル特性の把握を行った。開発手法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：

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

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した (Takabatake and Yano, 2023)。さらに、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) に適用した。

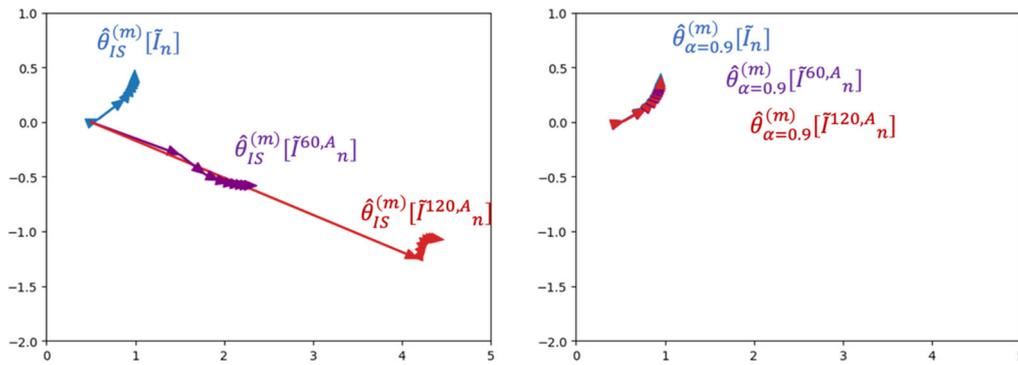


図 2 ノイズスペクトル推定の最適化の軌跡。左図が既存法(Whittle 尤度法)によるもので右図が提案法によるもの。最適化の軌跡が周波数領域の外れ値に頑健であることが確認できる。

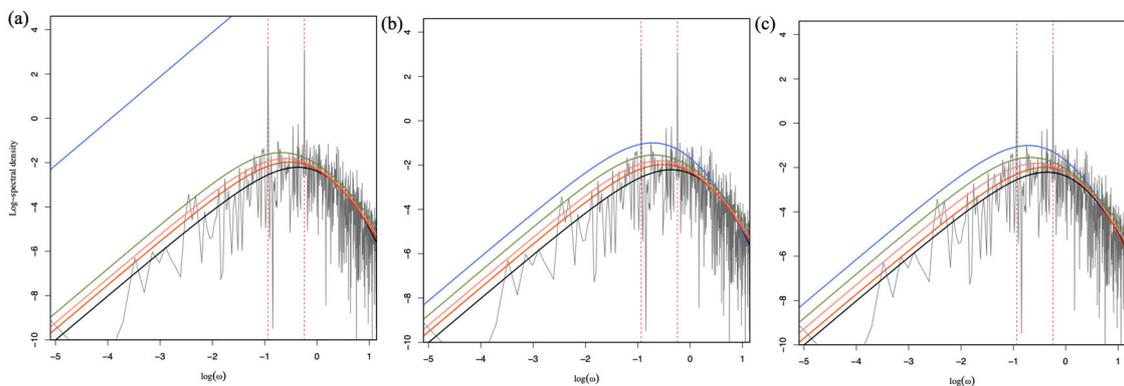


図 3 Brune のスペクトルモデルを用いた速度波形スペクトルのフィッティング結果。青が既存手法(Whittle 尤度法)によるもので赤・オレンジ・緑が提案手法によるフィッティング結果。(a), (b), (c)は最適化を行う際の初期値による結果の変化。(a)コーナー周波数と呼ばれるスペクトルの変化点を示すパラメータの初期値がシミュレーションの真値の 0.1 倍の場合。(b)初期値が真値と同じ場合。(c)初期値が真値の 2 倍の場合。いずれの場合においても提案手法がより精度良くフィッティングできていることが分かる。

### 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、論文投稿を行なった。

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

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

法やその他の地震観測網データを統合することで新たなアプローチとしても活用可能であり、その活用可能性の検討を行った。

#### 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 functions*. arXiv:2206.05887

#### (c) 結論ならびに今後の予定

C-1 においてはテーマ D と共同し引き続き手法開発を行う。その際、動的に提示された観測点の重要度を実用的にどのように使うかの検討を注意深く行う。C-2 においては得られた F5 解のスペクトル特性をもとに逆解析の精度向上に資する観測点選択・統合の検討を行う。C-3 においてはテーマ A 及び B で得られる ETAS による予測情報を統合し手法の改良の検討を行う。

#### (d) 成果の論文発表・口頭発表等

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

発表した成果(発表題目、口頭・ポスター発表の別)	発表者氏名	発表した場所(学会等名)	発表した時期	国内・外の別	主たる成果
Towards Estimating Seismic Hazard Across an Area (Oral)	Minson, S. E. *, Wu, S., Yano, K., Cochran, E. S ., Parker, G. A. and Baltay, A.	AGU Annual Meeting 2023, Moscone Center (San Francisco, CA)	2023年 12月14日	国外	

GNSS速度ベクトルのクラスタリングによる地殻ブロックの同定: 平行移動とオイラーベクトル推定に基づくアプローチ (口頭発表)	矢野 恵佑*, 高橋 温志, 加納 将行	日本地震学会 2023年度秋季大会, パシフィコ横浜アネックス ホール	2023年 11月2日	国内	○
平行移動とオイラーベクトル推定に基づくGNSS速度ベクトルのクラスタリングによる地殻ブロックの同定 (口頭発表)	矢野 恵佑, 高橋 温志, 加納 将行	日本測地学会第 140回講演会, 仙 台市福祉プラザ	2023年 10月12日	国内	○
西南日本のプレート境界すべり・ブロック運動の時空間発展の推定・分離精度評価 (ポスター発表)	田中 優介, 加納 将行, 太田 雄策, 西村 卓也, 矢野 恵佑	日本測地学会第 140回講演会, 仙 台市福祉プラザ	2023年 10月11-13 日	国内	○
スペクトル密度に対するダイバージェンスについて: 確率分布間のダイバージェンスからの新たな視点 (口頭発表)	矢野 恵佑*, 高畠 哲也	2023年度統計関 連学会連合大会, 京都大学	2023年 9月5日	国内	○
非線形回帰および一般化線形モデルへのベイズ拡張推定量の応用 (口頭発表)	奥戸 道子* 矢野 恵佑	2023年度統計関 連学会連合大会, 京都大学	2023年 9月7日	国内	○
データ同化断層すべりモニタリングシステムに向けた測地データ解析の革新 (企画セッション)	加納 将行*, 矢野 恵佑, 田中 優介, 中川 亮, 福嶋 陸斗	2023年度統計関 連学会連合大会, 京都大学	2023年 9月6日	国内	○
A Bayesian non-parametric method of estimating the background intensity of ETAS model (一般講演)	牛 源源*, 庄 建倉	2023年度統計関 連学会連合大会, 京都大学	2023年 9月6日	国内	○

Second-order smoothness prior over the Delaunay Tessellation in Bayesian geophysical inversion (口頭発表)	Niu, Y.	10th International Workshop on Applied Probability (IWAP 2023), Porto Palace Hotel, テッサロニキ, ギリシャ	2023年 6月9日	国外	○
最小情報従属モデルを用いた混合ドメインデータの依存関係の解析：震源深さと初動発震機構解の依存関係解析への適用 (ポスター発表)	矢野 恵佑*, 清 智也	日本地球惑星科学連合2023年大会, 幕張メッセ (ハイブリッド開催)	2023年 5月22日	国内	○
日本のひずみ集中帯とその周辺域での背景地震活動度とひずみ速度の関係性 (ポスター発表)	上田 拓*, 西村 卓也	日本地球惑星科学連合2023年大会, 幕張メッセ (ハイブリッド開催)	2023年 5月23日	国内	
Second-order smoothness prior over the Delaunay Tessellation and its application to gravity Bayesian inversion (口頭発表)	牛 源源*, 庄 建倉	日本地球惑星科学連合2023年大会, 幕張メッセ (ハイブリッド開催)	2023年 5月24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
Detection of hidden earthquakes after the 2011 Tohoku earthquake by automatic hypocenter determination combined with machine learning	Tamaribuchi, K., Kudo, S., Shimojo, K. and Hirose, F.	Earth Planets Space	2023年 10月10日	国外	○

Second-order smoothness prior over the Delaunay Tessellation in Bayesian geophysical inversion	Niu, Y., Zhuang, J. And Xiong, Z.	Spatial Statistics	2023年 4月	国外	○
--	-----------------------------------	--------------------	-------------	----	---

(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	R5. 4. 1 ～ R6. 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	R5. 4. 1 ～ R6. 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

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

5) 令和7年度

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

(d) 令和5年度の業務の目的

1) D-1 ETAS 地震予測を事前情報に活用

震源推定精度改善のため、テーマAとBの成果となるETAS地震活動モデルを緊急地震速報の事前情報として導入する。導入に当たっては、リアルタイムで得られるETAS時空間予測のデータが必要となるため、データの入手方法についての調査を行う。また、ETAS時空間予測データをどのような形で事前情報に統合できるか検討を行い、緊急地震速報の拡張IPF法へのオフラインでの試験導入を行う。

2) D-2 最適な観測網情報に基づく拡張IPF法の開発

緊急地震速報の警報時間を最大化するため、テーマCのベイズ感度解析手法を導入して、できるだけデータ量が少なく、かつ情報量の多い観測点を選択する。

3) D-3 拡張IPF法とPLUM法のハイブリッド化

現在日本で運用されている緊急地震速報には、震源を推定して日本全国の揺れを推定するIPF法と、予測地点周辺の地震計からサイトの揺れを直接予測するPLUM法の2つの結果が使われている。これらの異なる手法を統合するため、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。

(2) 令和5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。

(b) 業務の成果

1) D-1 ETAS 地震予測を事前情報に活用

テーマAとBの成果となるETAS地震活動モデルを緊急地震速報の事前情報として導入できるよう、予備実験を行った。ETAS時空間予測を計算するため、リアルタイムで得られる地震カタログが必要となる。本年度は、気象庁が作成する一元化震源カタログを毎日自動的にダウンロードし、ETAS時空間予測を計算するプログラムをテーマAとテーマB、東京大学地震研究所との共同研究により作成した。

また、ETAS時空間予測データを緊急地震速報の事前情報に統合する手法について検討を行った。ETAS時空間予測データは、翌日にある閾値以上の地震が何個発生するかを予測値として提供する。この予測値を元にして、ベイズ推定のサンプリングを行った。ETAS予測は $0.1 \times 0.1$ 度のグリッド毎に提供される。この予測値のヒス

トグラムを調べたところ、最も大きな値は 0.01~0.5、おおむね 10%のグリッドが 0.0001 以上であることが分かった。そのため、0.0001 以上のグリッドには重みづけを行い、それ以下の場合は一様分布とした。この確率密度関数に従って、震源予測の元となる粒子サンプリングを行った。

2011 年東北地方太平洋沖地震と 2024 年能登半島地震のデータを用いて、オフラインの試験を行った。能登半島地震のデータでは、震源推定開始直後の観測点分布が良く、ETAS 予測を利用してほとんど推定に影響を及ぼさないことが分かった。しかしながら、東北地方太平洋沖地震のように、震源が沖合で観測点分布に偏りがある場合には、ETAS 予測が震源推定の向上に役立つ可能性があることが分かった。

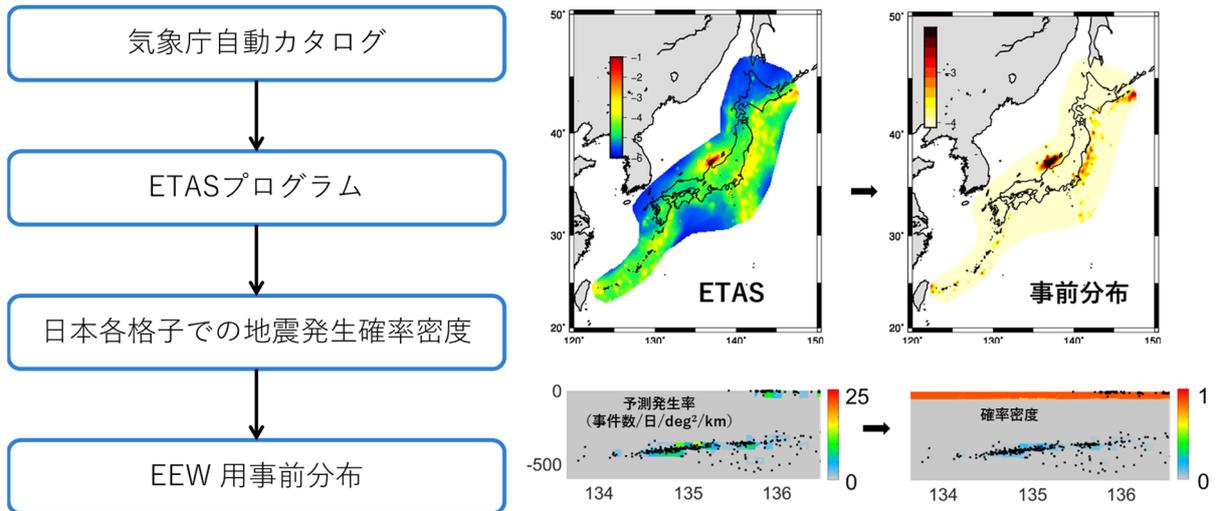
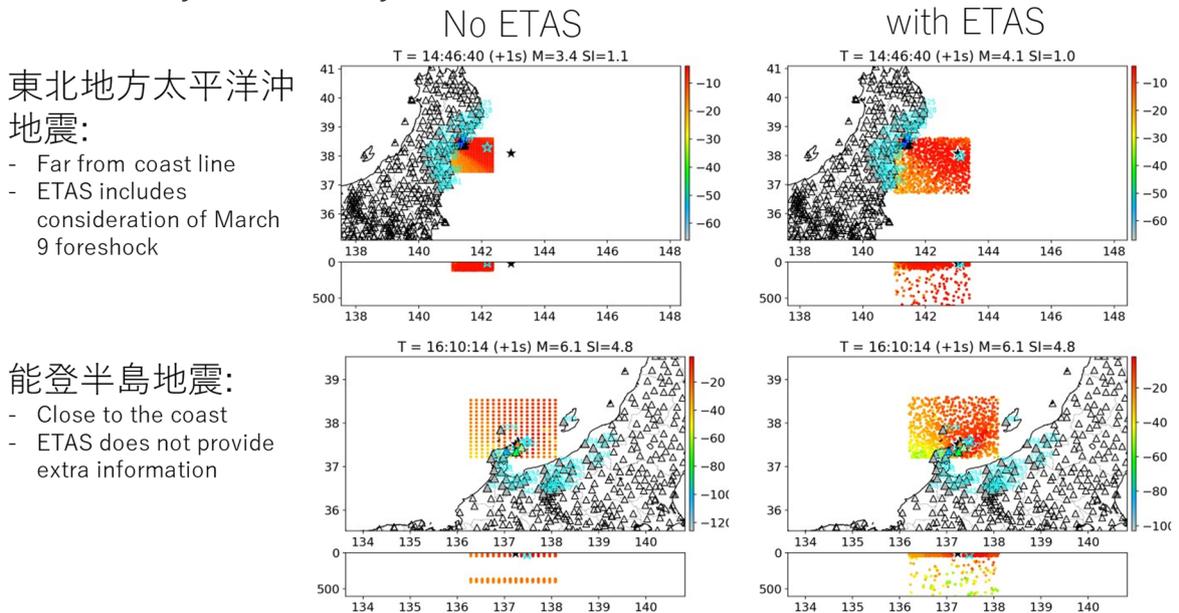


図 1 ETAS 予測を拡張 IPF 法の事前情報に利用する概念図



東北地方太平洋沖地震:

- Far from coast line
- ETAS includes consideration of March 9 foreshock

能登半島地震:

- Close to the coast
- ETAS does not provide extra information

図 2 2011 年東北地方太平洋沖地震と 2024 年能登半島地震について、ETAS 予測の有無による震源予測の比較

2) D-2 最適な観測網情報に基づく拡張 IPF 法の開発

C-1 との共通の成果であるため、[2.3 \(2\)](#) 令和 5 年度の成果の項を参照。

3) D-3 拡張 IPF 法と PLUM 法のハイブリッド化

a) 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

緊急地震速報の予測評価手法を改良するため、リアルタイム震度波形の包絡線の予測式（距離減衰式）の構築を行った。予測式は通常、最大振幅値を推定するが、本研究の特色は震度波形の包絡線を推定する点である。まず、功刀ほか(2013)で提案されたリアルタイム震度フィルタを加速度波形に適用し、リアルタイム震度波形の包絡曲線を求めた。この観測波形に様々な数学的関数を検討し、観測された包絡線を最もよく説明する関数を選択した。予測式から推定される包絡線と観測された包絡線を比較することで、最大振幅の到来を待つことなく、P 波到達後の早い段階で震源パラメータの精度を評価することができる。

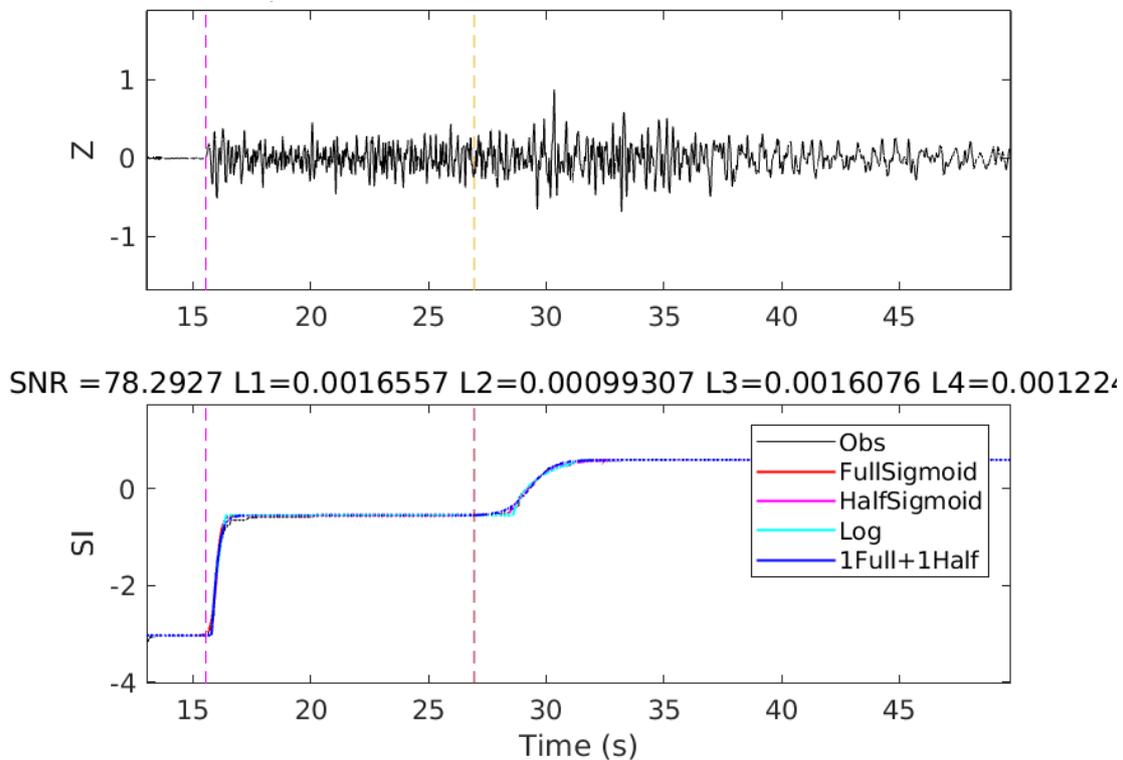


図3 上下動加速度記録（上）と、リアルタイム震度の包絡曲線。4つの数学的関数をフィッティングしている。

b) 新しい速報システムの応用問題：地域の最大地震動の超過確率の計算法

現在の緊急地震速報は、単一の場所で事前設定された閾値を超える最大地面加速度の確率に基づいている。しかし、緊急対応を考える際には、ある一地点ではなく有限な領域内の最大地面加速度を考慮することが重要となる。この問題は統計学のエクスターション確率推定またはレアイベントサンプリング問題として定式化できる。

対象領域  $D$  と領域  $X$  内のランダムフィールド  $f$ （例えば、既知の有限な領域内の最大地面加速度）が与えられた場合、我々は  $f$  が与えられた閾値を超える失敗確率（エクスカッション確率）を計算したいと考えている。ランダムフィールドがガウス過程であると仮定すると、以下の式で失敗確率を書くことができる：

$$P_F(\mu) = \int \mathbb{I}(\max f > \mu) p(f) df, \quad f \sim \text{Gaussian Process}$$

連続空間を扱うことは挑戦的なので、 $X$  を  $n$  個の有限設計点に離散化することもでき、方程式は以下ようになる：

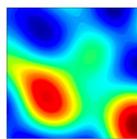
$$P_F(\mu) \approx \tilde{P}_F(\mu | \{x_i\}_n) = \int \mathbb{I} \left( \max_i f(x_i) > \mu \right) p(f(x_1), \dots, f(x_n)) df(x_1) \dots df(x_n)$$

理想的には、離散化された失敗確率は  $n$  が無限になるにつれて連続したものに収束する。

本年度には、米国カリフォルニア州のベイエリアにおけるシンプルなケーススタディを US Geological Survey との共同研究で構築した。我々は、失敗確率の推定に使用できる 4 つの異なるアルゴリズム（モンテカルロサンプリング、重要度サンプリング、サブセットシミュレーション、オイラー近似法）を比較した。それぞれの方法は、失敗確率の異なる範囲において、正確性と計算時間の間で異なるトレードオフを持っている。

## 緊急地震速報の応用

Goal: estimate probability of  $\max(\text{PGA} > X)$  in a region



$$P_F(\mu) = \int \mathbb{I}(\max f > \mu) p(f) df, \quad f \sim \text{Gaussian Process}$$

Progress: found convergence between methods

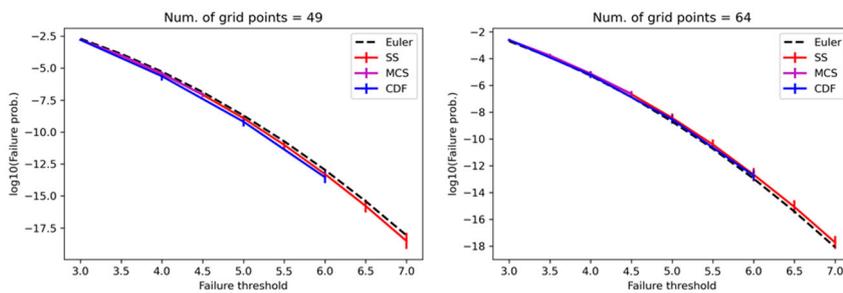


図 4 地域の最大地震動の超過確率の計算法の概念図

### 引用文献

- ・ 切刀 卓, 青井 真, 中村 洋光, 鈴木 亘, 森川 信之, 藤原 広行, 震度のリアルタイム演算に用いられる近似フィルタの改良, **地震** 第2輯, 2012, 65 巻, 3 号, p. 223-230, <https://doi.org/10.4294/zisin.65.223>

(c) 結論ならびに今後の予定

本年度は、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も確立した。

ETAS 予測を緊急地震速報に活用することにより、地震発生時の迅速かつ正確な情報提供が可能になり、災害対策の効果的な実施に寄与することが期待される。一部の事例では基本的な ETAS モデルを用いて緊急地震速報の精度向上を確認したが、次年度は最新の ETAS モデルの導入を検討し、より広い範囲の地震事例で緊急地震速報の精度向上を目指す。さらに、今年度構築した震度の包絡線の数学的関数を震源パラメータで回帰し、震度の包絡線予測モデルを構築する。

地域の最大揺れの超過確率の計算法の改善については、失敗確率の推定に使用できる4つの異なるアルゴリズム（モンテカルロサンプリング、重要度サンプリング、サブセットシミュレーション、オイラー近似法）を組み合わせて最適な計算手法を調査し、実際の地震早期警報システムで実用的に使用できる効率的で正確なアルゴリズムを推定する予定である。

(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8件、うち海外計3件

発表した成果(発表題目、口頭・ポスター発表の別)	発表者氏名	発表した場所(学会等名)	発表した時期	国内・外の別	主たる成果
Towards Estimating Seismic Hazard Across an Area (口頭)	Minson, S. E. + Wu, S., Yano, K., Cochran, E. S., Parker, G. A. and Baltay, A.	AGU Annual Meeting 2023, Moscone Center (San Francisco, CA)	2023年12月14日	国外	○
IPFx: extended integrated particle filter method for earthquake early warning and application to the international networks (ポスター)	Yamada, M. +	AGU Annual Meeting 2023, Moscone Center (San Francisco, CA)	2023年12月12日	国外	○

Constructing an empirical envelope function of seismic waveforms for the evaluation of EEW in Japan (ポスター)	Peng, H. +	AGU Annual Meeting, San Francisco	2023年 12月12日	国外	○
データ駆動型アプローチによる地震理解の可能性：他の情報学アプリケーションから学ぶ	ウステファン	日本地震学会, パシフィコ横浜 アネックス ホール	2023年 11月2日	国内	○
複数地震はどこまで分離可能か (口頭)	山田 真澄	日本地震学会, パシフィコ横浜 アネックス ホール	2023年 11月1日	国内	○
Constructing an empirical envelope function of seismic waveforms for the evaluation of EEW in Japan (ポスター)	Peng, H. +	日本地震学会, パシフィコ横浜 アネックス ホール	2023年 11月1日	国内	○
2023年トルコ・シリア地震の強震記録への緊急地震速報の手法の適用	山田 真澄+	日本地球惑星 科学連合, 幕 張メッセ	2023年 5月23日	国内	○
Constructing an empirical envelope function of seismic waveforms for the evaluation of EEW in Japan	Peng, H. +	日本地球惑星 科学連合, 幕 張メッセ	2023年 5月24日	国内	○

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載 : 計0件、うち国外計0件  
なし

(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

### 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、震源深度と震源機構といった地震カタログの構成要素をより多く取り入れた ETAS モデルの開発を、昨年度に引き続き行った。こうした要素の取り込みは震源物理学の理解において重要である。ETAS の最大加重尤度推定法に関しても継続して議論を行った。取り込むべき地震カタログの構成要素に関する今年度の発見として、以下のような地震度のクラスタリングに関する発見が挙げられる：地震のクラスタリング効果は深さとともに減少し、本震-余震の誘発ペア間のマグニチュード依存性を示す証拠はない。さらに、ETAS モデルを改良する要素として、「摩擦構成則」を導入した非線形 ETAS モデルを提案した。その他にも、非地震性の地球物理観測量については、背景地震活動と地殻ひずみ場の速度との相関を見出した。重力観測・微小地震観測の両方が地下地殻物質の移動を示しており、大地震の準備過程における流体の重要な役割を示唆している。総合すると、本年度は、地震物理学の知見を取り入れた ETAS モデルの改良及び改良に資する構成要素の特定を行った。次年度以降は、これらの改良をもとに、特に AI 学習技術の駆使も検討しつつ、予測およびデータ解析を行う。

テーマBでは、連発大地震発生の可能性を考慮した短期確率予測および即時把握をすするため、確かな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究極の目的としている。今年度ではベースライン短期予測として、下限マグニチュードが十分大きい地震に対する、HIST-ETAS に基づく日本周辺の予測システムの原型案を構成した。さらに、その予測精度の評価について、内陸に限って $M \geq 4$ 地震の短期予測の評価を実施した。前震型の予測が良い成績であったことから、G-R 型予測に替えて、前震型マグニチュードの識別予測を組み込んだ ETAS 予測が、どの程度より良い精度を望めるかは、時空間領域で追求する価値がある。実際には、予測の精度を上げるためには下限マグニチュードを小さく取らなければならない。そのためには大きな地震の直後に生じる余震の欠測問題があるが、時間領域の ETAS モデルではあるが今回の成果でその突破口を作った。局所的な余震活動の予測に活かしていくと伴に、これを時空間領域のモデルでも適用させることが来年度以降の課題になる。

テーマCでは、以下の3つのサブテーマに取り組んだ。まず、令和4年度に引き続き、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テーマDと連携し行った。ベイズ感度公式および時間変化する尤度関数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、Spectral Rényi divergence に基づく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 観測点のスペクトル特性の把握を行った。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理論的に示し、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。

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。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、テーマCとの連携により、効率のよい観測点選択手法の開発を行った。緊急地震速報の警報時間を最大化するため、テーマCのベイズ感度解析手法を導入して、できるだけデータ量が少なく、かつ情報量の多い観測点の選び方を検討した。また、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。

テーマ間の共同成果として、今年度はテーマ間での共同の成果があがった。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ANSSデータの利用について、テーマAとCからは地震カタログの均質化について、テーマBとDからは緊急地震速報のためのETAS事前分布の導入について、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。2024年度もテーマ間の連携を強化することを目標としている。目標達成のために本プロジェクトの全メンバーはワークショップを催して交流を深め、上記の成果をあげるとともに、研究進捗の効率性、アウトプットの価値を評価し、今後数年間の研究進捗を円滑にするための計画を策定した。

#### 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 89 回 2023 年 6 月 16 日 Peng, Zhigang (School of Earth and Atmospheric Sciences, Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA ・教授) What can ‘missing’ events tell us about earthquake statistics and physical mechanism of earthquake triggering?

第 90 回 2023 年 8 月 29 Hsieh, Ming-Che (謝 銘哲) (台湾 国立中央大学 地震災害・リスク評価管理センター(E-DREaM) ・副研究員) Seismic Hazard Assessment for Metropolises and Sciences Parks in Taiwan: Analyzing Ground Motions Using Deterministic and Probabilistic Methods. オンライン

第 91 回 2023 年 10 月 3 日 Guan, Yongtao (Department of Management Science, School of Business Administration, University of Miami, USA ・教授) Group Network Hawkes Process. オンライン

第 92 回 2023 年 11 月 7 日 ※「STAR-E および日伊共同プロジェクトの研究進捗状況に関するワークショップ」との共同開催

李 永波 (Li, Yongbo) (中国地震局地球物理研究所・大学院生) A Three-Dimensional Spherical Epidemic-Type Aftershock Sequence (3D-SETAS) Model and Its Application in the Alaska Region (Li, Y.\*, Zhuang, J. and Chen, S.)

王 志峰 (Wang, Zhifeng) (中国地质大学 (武漢)・大学院生) Bayesian inversion for finite fault earthquake source models and uncertainty analysis (Wang, Z.\*, Zhuang, J. and Wang, D.)

司 政 亜 (Si, Zhengya) (中国地震局地球物理研究所・大学院生) Bayesian merging of earthquake magnitudes determined by multiple seismic networks (Si, Z.\*, Zhuang, J., Gentili, S., Jiang, C. and Wang, W.)

朴 健 (Piao, Jian) (北京大学, 中国・大学院生) On the spatial response kernel in the ETAS model (Piao, J.\*, Zhuang, J. and Zhou, S.)

毛 寧 (Mao, Ning) (中国地震局地球物理研究所・大学院生) Extraction of secular variation signals and estimation of transfer function from geomagnetic stations (Mao, N.\* and Chen, S.)

彭 鴻 (Peng, Hong) (統計数理研究所・特任研究員) Constructing an empirical envelope function of seismic waveforms for the evaluation of EEW in Japan

Petrillo, Giuseppe (統計数理研究所・特任助教) Decoding the Puzzle of Earthquake Magnitude Dependency

Guo, Yicun (郭 一村) (中国科学院大学・助教) Detection and Characterization of Earthquake Swarms in Nankai and Its Association With Slow Slip Events

Gentili, Stefania (イタリア国立海洋学と実験地球物理学研究所・研究員) Aftershock forecasting by the NESTORE machine learning algorithm: applications to Italy, Slovenia, California, Greece and some preliminary results on Japan (Gentili, S.\*, Chiappetta, G., Petrillo, G., Brondi, P., Zhuang, J. and Di Giovambattista, R.)

牛 源源 (Niu, Yuanyuan) (総合研究大学院大学・大学院生) Nonparametric Bayesian inference for ETAS model (Niu, Y.\* and Zhuang, J.)

第 93 回 2024 年 1 月 30 日 上田 拓 (京都大学防災研究所・特定研究員(学振 PD) / 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) Spatial correlation of the shear strain energy change and the number of declustered crustal earthquakes in Japan. オンライン.

第 93 回 2024 年 1 月 30 日 上田 拓 (京都大学防災研究所・特定研究員(学振 PD) / 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) Spatial correlation of the shear strain energy change and the number of declustered crustal earthquakes in Japan. オンライン.

第 93 回 2024 年 1 月 30 日 上田 拓 (京都大学防災研究所・特定研究員(学振 PD) / 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) Spatial correlation of the shear strain energy change and the number of declustered crustal earthquakes in Japan. オンライン.

※セミナー終了後、研究テーマリーダーミーティングを実施。

## (2) 第 13 回 統計地震学国際ワークショップ (StatSei13)

[第 13 回統計地震学国際ワークショップ \(StatSei13\)](#) が 2024 年 3 月 16-20 日、中国・深圳 南方科技大学コンベンションセンターにて開催された。プロジェクトリーダーの庄建倉 教授 (Zhuang, Jiancang; 国際組織委員会成員), 統計数理研究所尾形良彦名誉教授が出席・発表。庄建倉 教授は CORSSA チュートリアル、尾形良彦名誉教授は基調講演

を行った。

### (3) 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。当プロジェクト当番として、以下の報告を行った。

令和 5 年度第 5 回 STAR-E 勉強会 2024 年 2 月 7 日 オンライン

- ・ 西川友章 (京大)

Comparison of statistical low-frequency earthquake activity models

- ・ Giuseppe Petrillo (統数研, 現在 University of Naples)

Does an earthquake tend to trigger earthquakes of similar magnitudes?

※勉強会の前、各STAR-Eプロジェクト代表者ミーティングを実施。

### (4) 緊急地震速報に関するワークショップ

2024 年 1 月 22 日～23 日 東京大学地震研究所 共同利用研究集会「固体地球科学的諸現象の即時解析・即時予測とその利活用：更なる高度化と新たな展開」を開催した。(担当：小寺祐貴 (気象研究所、研究協力者))

<https://wwweic.eri.u-tokyo.ac.jp/viewdoc/SOKUJI-yosoku/2023.html>

### <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 1 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 特任准教授 (静岡県立大学)、熊澤 貴雄 特任准教授 (統計数理研究所)、尾形良彦 特任研究員 (統計数理研究所 名誉教授) が第 241 回地震予知連絡会定例会にて、北海道・東北沖の地震活動と能登半島群発地震に関する招待講演を行った。詳細は【プレスリリース】北海道・東北沖と能登半島の活発な地震活動に関する最新知見 (<https://www.ism.ac.jp/ura/press/ISM2023-08.html>)
- ・ 山田 真澄 准教授 (京都大学防災研究所) が、日本地震学会主催『地震学夏の学校 2023』講師として講演を行った。

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

### <記事等>

- ・ 西川友章氏 (京都大学防災研究所) が地震学会の若手学術奨励賞と論文賞をダブル受賞

- ・ ウ・ステファン准教授が「令和 5 年度 科学技術分野の文部科学大臣表彰 若手科学者賞」を受賞
- ・ 尾形良彦 特任研究員（名誉教授）が日本のベスト数学者 2023 年ランキングで 14 位にランクイン
- ・ 【プレスリリース】 富士山直下地震のデータ処理からマグマ活動を監視する新手法を開発 (<https://www.ism.ac.jp/ura/press/ISM2023-02.html>)

## 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 5 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 6 年度では、課題全体で議論し今後の方針を検討することが重要である。そのためにも、各参加機関および協力機関のより一層の研究推進が必要不可欠であるが、これまでの進捗を見る限り、今後も十分な成果が出るであろうと期待している。

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