

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3年度
成果報告書

令和4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総合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・システム研究機構が実施した令和3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。

グラフィア

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

球面版 ETAS モデルの実装

従来の時空間 ETAS モデル（平面近似）による推定バイアスを解消するために、全世界球面版の時空間 ETAS モデルを作成した。この新しいモデルで、南極・北極付近などの高緯度地域の地震活動や、全球的な地震活動の解析に補正・近似なしに計算することができ、直接的に地球規模の背景地震活動を推定し、巨大地震からの日本国内の地震活動への遠隔地からのトリガー効果などを研究できる。詳細は 2-(2)-(c)-1) テーマ A 参照。

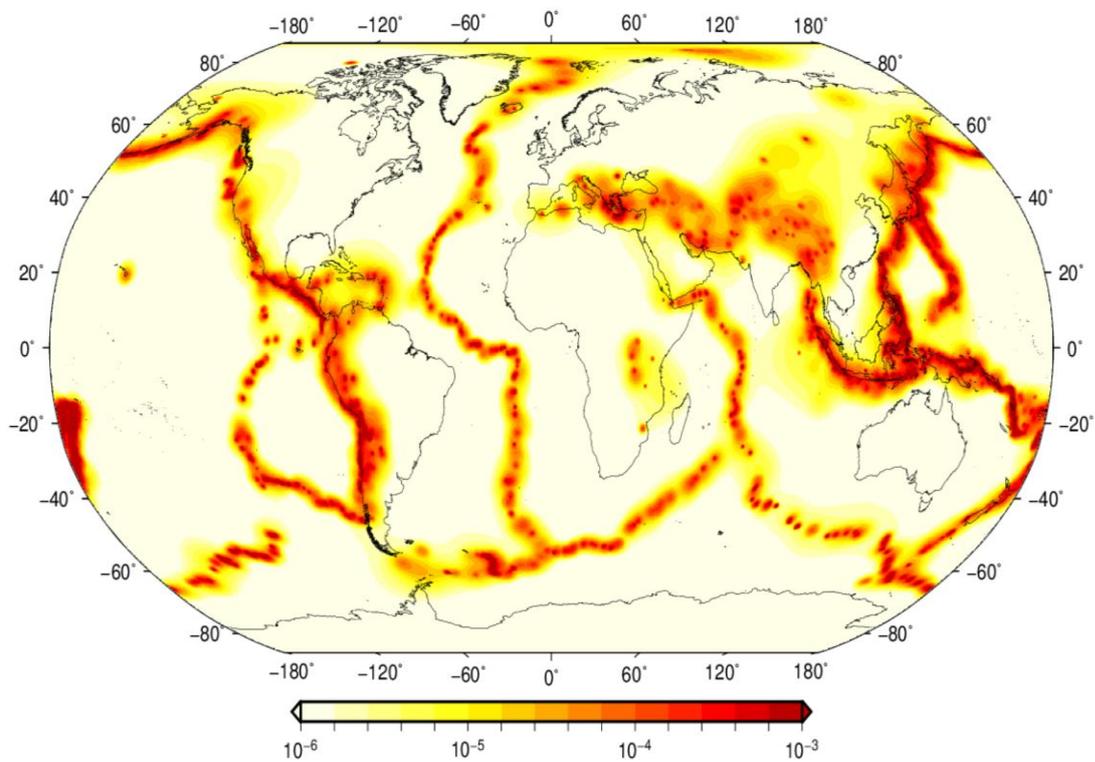


図 1 全球時空間 ETAS モデルで推定された $M_w \geq 5.2$ の背景地震活動率（イベント/日/deg²）の空間変化。

テーマ B：地震活動の予測システムの構築

内陸部の直下型大地震の長期確率予報とその結果

階層的時空間 ETAS (HIST-ETAS) モデルを日本内陸部の 1885 年から現在までの一世紀以上にわたる震源データ (宇津歴史被害カタログ及び気象庁一元化震源カタログ) を用いて推定し、日本の内陸地震 $M \geq 4$ の常時地震活動度 (上記着色図) を求めた。これらをもって全国一律に Gutenberg-Richter (G-R) 分布 ($b=0.9$) を仮定して各地の永年確率に換算し、数年～数十年の一定期間の長期予測を計算することを提案した。結果、左図のように直下型大地震の長期確率予報の有望性を示唆し、右図のように歴史被害地震の位置分布をよく説明することが見られた。詳細は 2-(2)-(c)-2) テーマ B 参照。

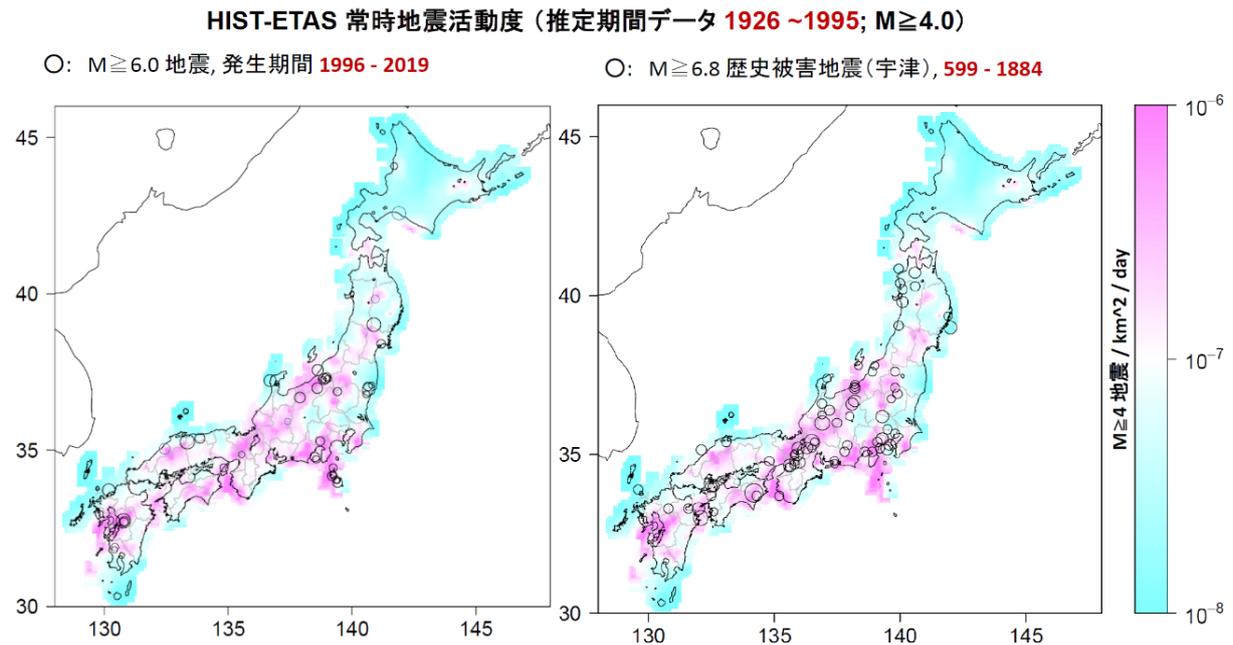


図 2 階層的時空間 ETAS (HIST-ETAS) モデルを日本内陸部の 1885 年から現在までの一世紀以上にわたる震源データ (宇津歴史被害カタログ及び気象庁一元化震源カタログ) を用いて推定した、日本の内陸地震 $M \geq 4$ の常時地震活動度

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

ゆっくり滑りの自動検出法と情報量規準の振る舞いによる観測点選択

STAR-E プロジェクト東北大学採択課題「データ同化断層すべりモニタリングに向けた測地データ解析の革新」との共同研究により数日から数週間という継続時間をもつ短期のゆっくり滑りを Global Navigation Satellite System (GNSS) から自動検出する手法を開発した。開発手法を四国西部の GNSS データに適用し未知の 12 個の SSE 候補を発見した。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観測点選択について議論した。詳細は 2-(2)-(c)-3) テーマ C 参照。

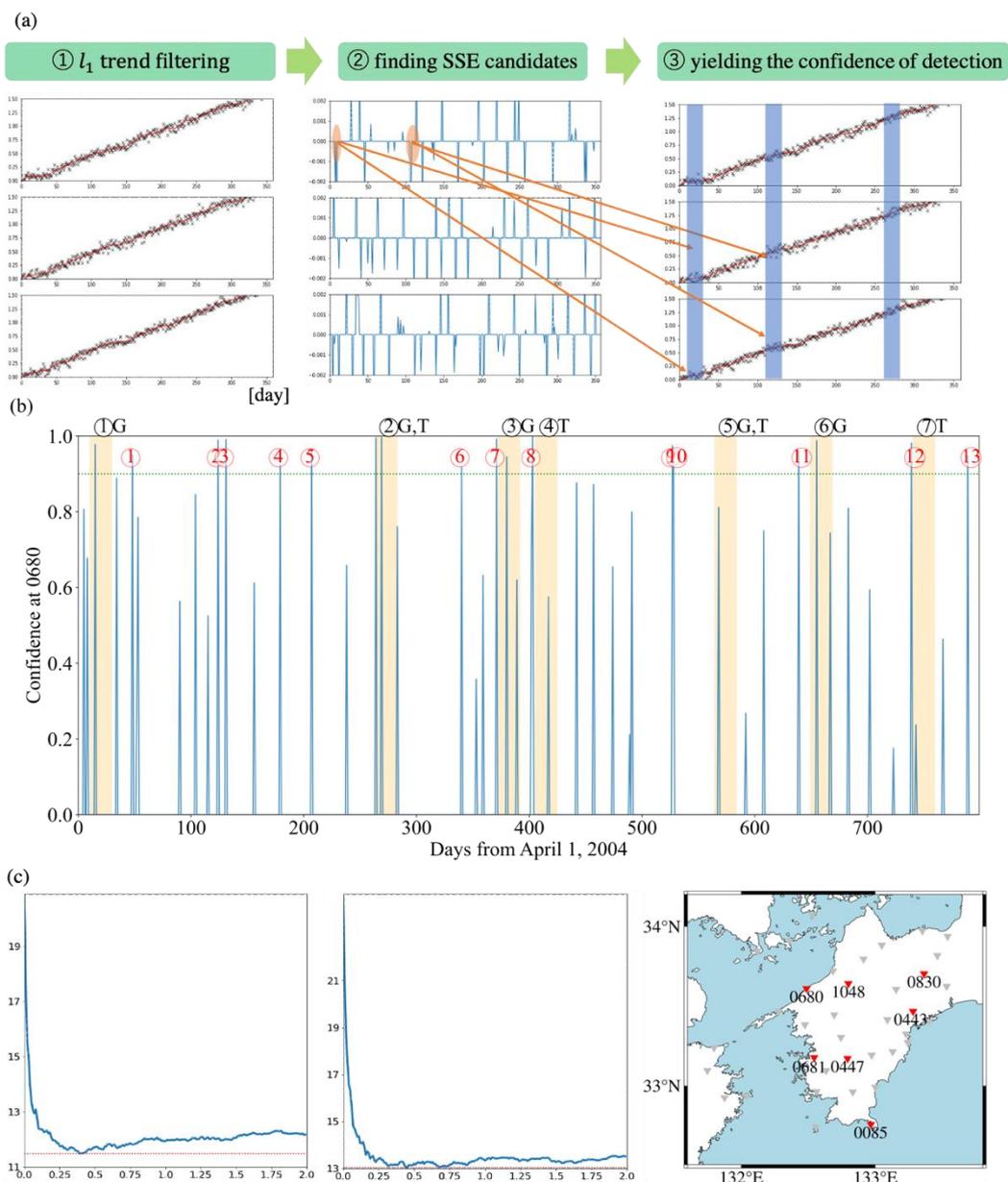


図 3 ゆっくり滑りの自動検出法と観測点選択。(a) 開発手法の概念図。(b) 四国西部 GNSS データへの適用における検出の例。新しく検知した SSE の発生日に赤色の番号をつけ、既知の SSE の発生日に黒色の番号をつけている。オレンジ色の影は既知の SSE の前後 10 日を表す。G は GNSS を用いて検知された既知の SSE を、T は傾斜計を用いて検知さ

れた既知の SSE を表す。(c)C_p 規準の振る舞いの例(左・中央)と振る舞いによる観測点選択(赤逆三角)。

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

事前情報に基づく即時地震動予測

既存の IPFx 法を改良して、地震波ノイズが震源決定にかかわらないように工夫した。その結果、一か月間に震度 4 以上を記録した 129 の地震のうち、105 個のイベントを検知し、うち 103 個は震源決定の誤差が 30 km 以下と精度よく決められることが分かった。詳細は 2-(2)-(c)-4)テーマ D 参照。

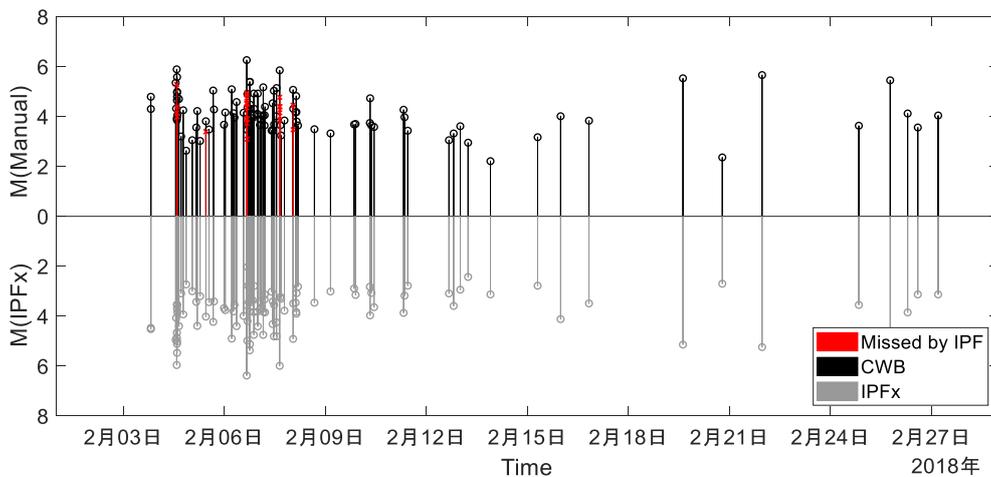


図 4 緊急地震速報の手法(IPFx 法)を台湾の地震波形記録に適用した例。2018 年台湾花蓮で発生した地震の台湾中央気象局カタログのマグニチュード(上)と IPFx 法で検知したマグニチュード(下)。図の上下の対称性は改良後の IPFx 法が正確に地震を検知したことを示している。検知に失敗したケースは赤色で示されている。ターゲットとする地震の 9 割以上を精度よく検知できた。

はじめに

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

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

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

目次

1. 研究課題の概要	1
1.1 研究概要の説明	1
(1) 研究者別の概要	3
(2) 研究実施日程	4
2. 研究成果の説明	5
(1) 業務の内容	5
(a) 業務題目	5
(b) 担当者	5
(c) 業務の目的	6
(d) 5か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）	7
(e) 令和3年度業務目的	9
(2) 令和3年度の成果	9
(a) 業務の要約	9
(b) 業務の実施方法	10
(c) 業務の成果	11
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	11
2) テーマ B 地震活動の予測システムの構築	15
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	19
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	21
(d) 結論ならびに今後の課題	23
(e) 引用文献	24
(f) 成果の論文発表・口頭発表等	26
1) 学会等における口頭・ポスター発表	26
2) 学会誌・雑誌等における論文掲載	33
(g) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定	35
1) 特許出願	35
2) ソフトウェア開発	35
3) 仕様・標準等の策定	35
3. まとめ	36
4. 活動報告	37
5. むすび	38

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。

1. 1 研究概要の説明

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 モデルを初めとする点過程モデルや多変量時系列解析を含む統計モデルをあてはめるための震源データを初めとする各種ビッグデータの不均質性を克服し高度化し、地殻変動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。観測された地震と予測結果を比較することで、時空間的なモニタリング範囲と精度の不均質性

を評価する。

連続波形データは地震監視ネットワークや空間の相関構造によって解析精度の向上が期待できる。地震・測地ネットワークの空間データに対する交差検定やAICによって緊急時に対応した最適配置(観測点の統合・選択・新規配置探索)を実現する。

連発する大地震発生の可能性を考慮した緊急地震速報の問題の本質は、情報不足の状況での不完全な時空間データから、震源から逆解析で推定した震源の高い不確実性を補う点にある。このため地震活動予測などの事前情報の利用は効率的に震源推定の精度を高める。オンラインの地震活動確率予測の結果に基づく事前確率モデルを構築し、ネットワーク観測点最適化を用いて多変量空間時系列解析などのベイズ推論による震度予測手法を統合する確率モデルを初め、多様な手法の融合による、より高い信頼度の緊急地震速報システムを構築する。

本プロジェクトでは、研究者を4つのテーマ(地震活動のモデリング高度化、予測の実装、地震観測網の最適化、即時地震動予測)に配置し、上記のテーマ間の研究連携で様々な情報科学分野での手法の特長を最大限に活用する。このような独特な仕組みによって地震分野の発展と地震防災の対策に貢献をもたらすことを目指す。

(1) 研究者別の概要

所属機関・部局・職名	氏名	分担した研究項目及び研究成果の概要	研究実施期間	配分を受けた研究費	間接経費
統計数理研究所・モデリング研究系・准教授	庄建倉	<p>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</p> <p>A-1 高次元 ETAS モデル A-1-1 深さと震源メカニズムの両方を組み込んだ高次元 ETAS モデル A-2 背景地震活動推定と長期予測の高度化</p> <p>詳細は 2-(2)-(c)-1)-a)~d) 及び 2-(2)-(c)-1)-f) を参照</p>	2021.8~2022.3	22,500 千円 (統数研配分額)	6,750 千円
県立広島大学 大学教育実践センター 准教授	岩田貴樹	<p>A-1-2 大地震の破壊域形状や震源メカニズムなどによる余震配置への影響を考慮した ETAS モデル</p> <p>詳細は 2-(2)-(c)-1) を参照</p>	2021.8~2022.3	1,000 千円	300 千円
統計数理研究所 名誉教授	尾形良彦	<p>テーマ B : 地震活動の予測システムの構築</p> <p>B-1 ETAS による長期予測 B-2 欠損データの補完</p> <p>詳細は 2-(2)-(c)-2)-a)~e) を参照</p>	2021.8~2022.3	(統数研配分に含まれる)	
静岡県立大学 グローバル地域センター 地震予知部門 総括・特任准教授	楠城一嘉	<p>B-3 前震と b 値</p> <p>詳細は 2-(2)-(c)-2)-f) を参照</p>	2021.8~2022.3	1,000 千円	300 千円
統計数理研究所 数理推論研究系 准教授	矢野恵佑	<p>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</p> <p>C-1 逆解析のための観測点統合・選択法の開発</p> <p>詳細は 2-(2)-(c)-3) を参照</p>	2021.8~2022.3	(統数研配分に含まれる)	
京都大学防災研究所 地震防災部門 助教	山田真澄	<p>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</p> <p>D-1 ETAS 地震予測を事前情報に活用</p> <p>詳細は 2-(2)-(c)-4) を参照</p>	2021.8~2022.3	4,000 千円	1,200 千円
統計数理研究所・モデリング研究系・准教授	ウ・ステファン	<p>詳細は 2-(2)-(c)-4) を参照</p>	2021.8~2022.3	(統数研配分に含まれる)	

(2) 研究実施日程

研究実施内容	実 施 日 程											
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
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-1-1 深さと震源メカニズムの両方を組み込んだ高次元 ETAS モデル												
A-1-2 大地震の破壊域形状や震源メカニズムなどによる余震配置への影響を考慮した ETAS モデル												
A-2 背景地震活動推定と長期予測の高度化												
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 前震と b 値												
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 逆解析のための観測点統合・選択法の開発												
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												

2. 研究成果の説明

(1) 業務の内容

(a) 業務題目

- 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-1-1 深さと震源メカニズムの両方を組み込んだ高次元 ETAS モデル
 - A-1-2 大地震の破壊域形状や震源メカニズムなどによる余震群配置への影響を考慮した ETAS モデル
 - A-2 背景地震活動推定と長期予測の高度化
- 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 前震と b 値
- 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 逆解析のための観測点統合・選択法の開発
- 4) テーマ D：情報科学に基づいた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

(b) 担当者

1) テーマ A

所属機関	役職	氏名
統計数理研究所	チームリーダー	庄建倉
県立広島大学・大学教育実践センター	副チームリーダー	岩田貴樹
統計数理研究所	特任研究員	尾形良彦
統計数理研究所	特任助教	熊子揺
産業技術総合研究所	招聘研究員	村田泰章
東京大学地震研究所	教授	加藤愛太郎
京都大学防災研究所	助教	西川友章

2) テーマ B

所属機関	役職	氏名
統計数理研究所	チームリーダー	尾形良彦
静岡県立大学グローバル地域センター	副チームリーダー	楠城一嘉
統計数理研究所	准教授	庄建倉
早稲田大学	准教授	野村俊一
統計数理研究所	特任助教	熊子揺

東京大学地震研究所	教授	加藤愛太郎
京都大学防災研究所	助教	西川友章

3) テーマ C

所属機関	役職	氏名
統計数理研究所	チームリーダー	矢野恵佑
東北大学理学部	助教	加納将行
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
統計数理研究所	准教授	庄建倉
統計数理研究所	准教授	ウ・ステファン
東京大学地震研究所	教授	加藤愛太郎
県立広島大学・大学教育実践センター	准教授	岩田貴樹

4) テーマ D

所属機関	役職	氏名
京都大学防災研究所	チームリーダー	山田真澄
統計数理研究所	副チームリーダー	ウ・ステファン
統計数理研究所	准教授	庄建倉
統計数理研究所	特任研究員	尾形良彦
統計数理研究所	准教授	矢野恵佑
気象研究所	主任研究官	小寺佑貴
気象研究所	主任研究官	溜瀧功史

(c) 業務の目的

1) テーマ A

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を克服する。

2) テーマ B

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。

3) テーマ C

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。

4) テーマ D

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。

(d) 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：

テーマA. 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。

テーマB. 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。

テーマC. 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。

テーマD. 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 :

テーマ A. 高次元 ETAS モデルの背景地震活動について追求し、他方法と比較を行う。標準地震活動の乖離を探索し、異常現象のモデル化を検討する。

テーマ B. 日本内陸部の長期確率予測とオンライン短期予測を遡及的に実施して、予測の評価を目指す。前震の確率予測のオンライン実装に向けて取り組みを開始する。

テーマ C. 令和 3 年度に検討を開始した逆解析用観測点統合選択法について更に検討を進める。並行して、テーマ D と協調し、緊急地震速報に資する観測点選択法についての検討を開始する。

テーマ D. ETAS 地震予測を事前情報に活用して、既存の IPF 法を拡張する。さらに、最適な観測網情報の導入のためにテーマ C との連携を開始する。

3) 令和 5 年度 :

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

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

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

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

4) 令和 6 年度

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

テーマ B. 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。

テーマ C. 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。

テーマ D. 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

- テーマ A. 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。
- テーマ B. 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。
- テーマ C. 前年度までの研究で開発した手法群を提供する。
- テーマ D. 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。

(e) 令和 3 年度業務目的

1) テーマ A

- ・高次元 ETAS モデルの拡張
- ・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。
- ・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。

2) テーマ B

- ・各種の予測出力（地図、画像、動画）の可視化手段を準備し、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。
- ・時空間 ETAS モデルによるオンライン短期確率予測の実装。

3) テーマ C

- ・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。
- ・新規観測網配置最適化ソフトウェアの開発。

4) テーマ D

- ・事前に考えられるシナリオと時空間 ETAS モデルなどでのオンライン予測に対応した地震動予測や、連発地震のもとでの安定した高速高精度の緊急地震速報システムの実装、および即時地震動予測精度の可視化ソフトウェアの提供。

(2) 令和 3 年度の成果

(a) 業務の要約

テーマ A では時空間 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。テーマ B では、ドロネー平面分割に基づく階層時空間モデル (HIST-PPM) ソフトウェアを公開した。これによって、各種の予測出力の可視化（地図、画像、動画）を準備し、地震活動がリアルタイムに使用可能な近未来状況に備える。内陸地震の長期予測を目的として日本内陸のバックグラウンド地震を評価した。テーマ C では 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。テーマ D

は、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。

(b) 業務の実施方法

1) 各テーマの実施方法

a) 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

- ・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 ETAS モデルを構築する。大地震の破壊域形状や震源メカニズムなどによる余震配置への影響を考慮し、余震群の位置座標から断層形状を再構築して求め、地震のオンライン予測に使えるようにする。
- ・背景地震活動推定と長期予測の高度化： 全地球版 ETAS モデルを実装し、補正・近似無しに、直接的に遠距離の地震の活動解析や地球規模の背景地震活動を推定する。

b) テーマ B：地震活動の予測システムの構築

- ・ETAS による長期予測：階層的時空間 ETAS (HIST-ETAS) モデルによる全日本各地の永年確率を与え一定期間の長期予測を実装する。
- ・欠損データの補完：大地震直後の大量の余震の欠測について、時空間的な補完を行い、欠測がモデルの推定および予測に与える影響を評価する。
- ・前震と b 値：時空間 ETAS モデルやマグニチュード分布 b 値などの変化によるリアルタイムの短期確率予測の可視化を目指す、自動または半手動支援のオンライン予測可視化システムを導入する。

c) 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

- ・逆解析のための観測点統合・選択法の開発：データの質が観測点によって異なる状況を想定した逆解析のための客観的な観測点の重み選択方法の検討を開始する。テストベッドとして、GNSS および稠密地震観測を利用する。

d) 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

- ・ETAS 地震予測を事前情報に活用：現在の緊急地震速報の震源推定には、観測点分布や過去の地震活動から計算される事前情報確率と、リアルタイムで得られる地震波形データから求められる尤度を利用している。事前情報にテーマ A の成果となる ETAS 地震予測を導入することにより、地震発生直後のデータの少ない時点での震源推定精度を改善する。過去の大地震発生直後の余震活動データを利用して、地震動予測精度への影響を検討する。

2) プロジェクトの総合推進

当該年度の戦略的研究計画を以下の様に立案する。計算機環境・基盤を整備し、以下の各研究テーマ（サブプロジェクト）間のコミュニケーション体制を確保、定期セミナーを実施する。

3) 各種予測に関わる技術開発

リアルタイムの短期確率予測の可視化に関わる装備を準備しソフトウェアを開発する。

4) 検討会の実施

全体プロジェクトに関する定期検討会を定期開催し、研究の進捗を議論・共有し、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する。その他に、「統計地震学セミナー」を統計数理研究所（立川市）またはオンラインで定期的を開催する。セミナーにおいては、ポスドクの育成を意識し検討会の司会進行はポスドクが担当しポスドクが議論を主体的に行う。

5) 自発的な研究活動等

自発的な研究活動等に関する実施方針に基づき、所属機関が認めた範囲で自発的な、特に今年度以降の本プロジェクト研究目的に関する研究活動等を推進する。

(c) 業務の成果

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) 高次元 ETAS モデルの拡張

まず、時空間 ETAS モデルの拡張版についてまとめ、その適合性をイタリア、カリフォルニアや日本のデータで評価した。これらの拡張版には、2次元有限震源 ETAS モデル、3次元点震源 ETAS モデル、および3次元の有限震源 ETAS モデルが含まれている。3次元モデルは震源の深さを考慮し、有限震源モデルは巨大地震の地震破壊面の形状の影響を考慮したものである。

この論文は、モデル推定、確率的デクラスタリング¹⁾、および地震シミュレーション²⁾に関連するアルゴリズムを示し、これらのモデルは、日本、イタリア、南カリフォルニアのカタログに適用された。結果は、2次元有限震源および3次元有限震源（3D-Finite Source）モデルが、点震源モデルよりも大きな α 値をもたらすことにより、本震の余震生成密度を増大させることを示している。余震の発生密度（aftershock productivity density）と地震性すべりを比較すると、大きなすべり領域で余震が少なく、断層面上の余震発生密度の空間パターンは、明らかにすべり残しの補償を示していることがわかる^{3, 4, 5)}。特に、3D-FS はデータ適合において2次元モデルより遥かに優れた性能を発揮した。シミュレーションの結果、3D-FS ETAS モデルは、短期余震予測の性能を向上させるという明らかな利点を持つことが判明した。さらに、遅い時期の余震は早い時期の余震よりも後続のイベントの位置と相関があり、余震の危険性を軽減するために余震の移動（migration）が重要であることが示された²⁾。

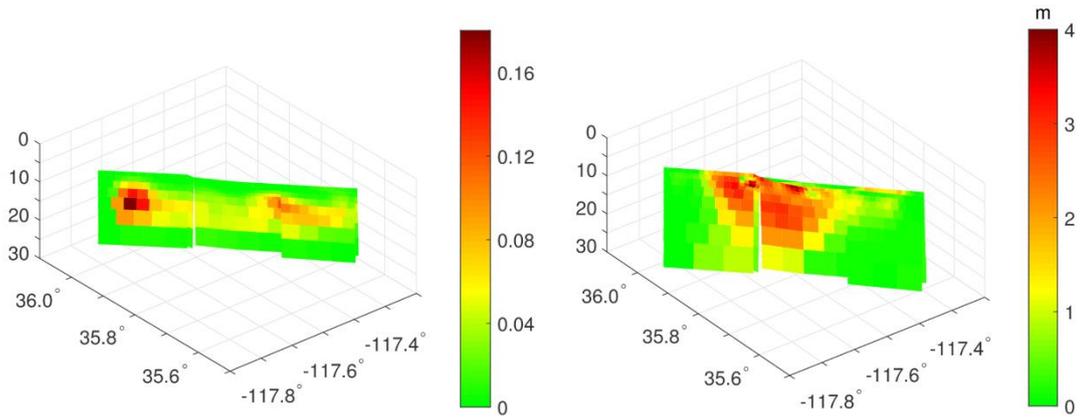


図 1 Finite Source ETAS モデルによる推測 1 次余震発生密度⁴⁾と破壊領域の地震すべりのパターン⁵⁾の比較：リッジレスト地震性すべり（左パネル）と余震発生密度分布（右パネル）。

b) 地震のマグニチュードのモデリングと推定

マグニチュード-頻度分布の空間的なばらつきは、様々な時間スケールでの地震予測能力の改善にとって重要である。そこで、完全に検出される地震の下限マグニチュードが時間的に変化する地震カタログに対しても対応できるように新しく提案した重み付き尤度関数の最尤推定に基づく空間的アプローチにより、ゲーテンベルグ・リヒター則の b 値パラメータとその不確実性を求めるためのモデルを考慮した。これによって 1960 年から 2019 年までのイタリアの地震カタログにこの手順を適用し、地域的な b 値の空間変動の調査結果を得た⁶⁾。

また最大マグニチュードに対する議論のために、テーパ状の拡張ゲーテンベルグ・リヒター分布を使用し、G CMT カタログを用いて、大西洋リッジ周辺部の地震活動を解析した。例えば、正断層と横ずれ断層を分類してみると、両者は大きく異なる十分に制約されたコーナーマグニチュードを持っている^{7, 8)}。

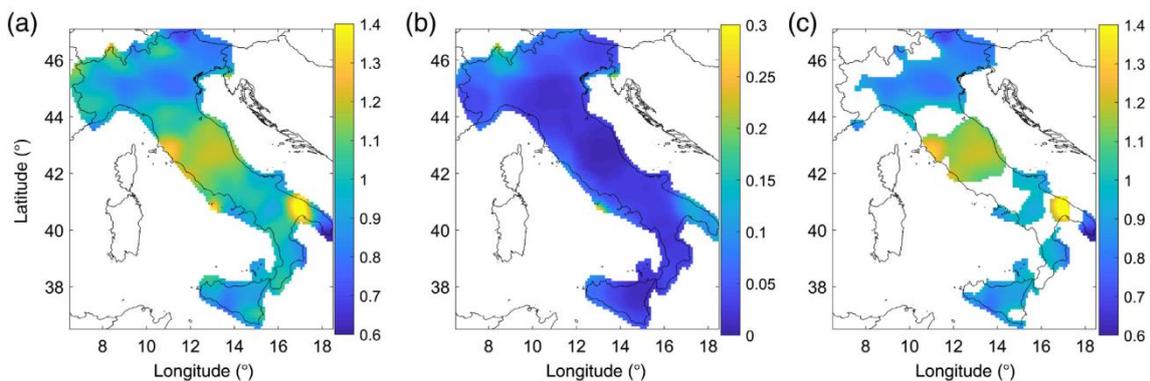


図 2 (a) イタリア地域の b 値マップ、(b) 標準偏差マップ、(c) カタログ全体と有意に異なる b 値マップ。

c) 震源メカニズムを組み込んだ ETAS モデルへの拡張

F-net データの解析により、日本のバックグラウンド地震活動と地震クラスターにおける夫々の震源メカニズムの確率分布を求めようとするものである。確率分布を記述するために、各震源メカニズムは基準震源メカニズムを起点として特定の極を中心に回転した結果として分解される。本研究では、ダブルカップル対称性、すなわち、どちらの節面も断層面になりうる、断層面の両側が区別可能であることを考慮する。バックグラウンド地震とクラスタリング地震を分離するために、F-net カタログの 1997 年から 2017 年までの M4.2 以上の地震に時空間 ETAS モデルをあてはめ、確率的デクラスタリング法¹⁾により、各イベントがバックグラウンド事象である確率と各イベントが他のイベントによってトリガーされた確率を推定する。バックグラウンド事象については、Kagan and Jackson⁸⁾の手法で算出した各領域の平均震源機構を参照震源機構とする。背景事象と (x, y) における平均焦点メカニズムの間の回転角は、各地震と局所平均焦点メカニズムの間の回転角のヒストグラムを、ETAS モデルから推定した背景確率で重み付けして再構成したものである。トリガーイベントの場合、参照焦点メカニズムは当然トリガーとなったイベントの焦点メカニズムの値をとる。親イベントとその直接の子イベント間の回転角も、各トリガーペア間の回転角のヒストグラムによって再構成され、2 番目のイベントがペア内の最初のイベントによってトリガーされる確率によって重み付けされる。また、回転極はほぼ一様に分布していることが分かった⁹⁾。

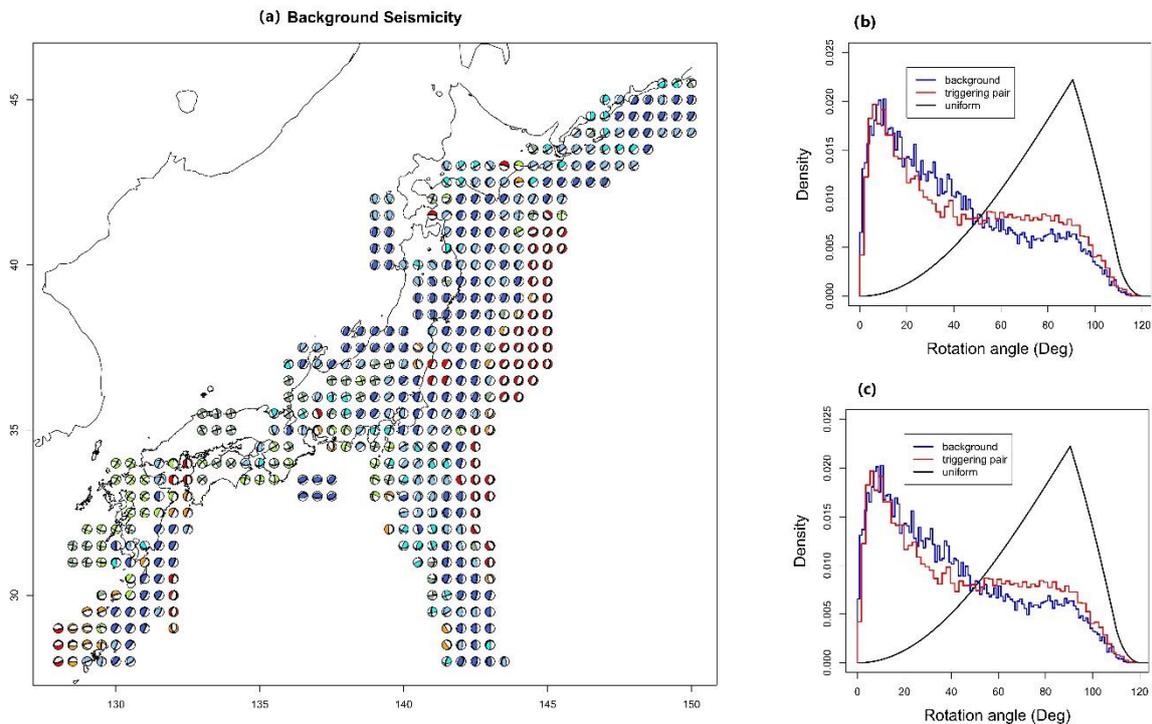


図 3 (a)は日本の背景地震の平均震源機構の分布、(b)は背景地震動とトリガー地震動における震源機構の回転角の再構成された確率密度関数、(c)は(b)の pdf に対応する累積分布関数を示している。

d) 異常現象の検出

長期的なスロースリップ現象 (SSE) のようなプレート沈み込み帯での「ゆっくりすべり」は、地震発生率の変化を引き起こし、部分的に群発地震として反映される。時間的に非定常なバックグラウンド率を持つ時空間 ETAS モデルを用いて、南海トラフ沈み込み帯の地震異常を検出し、さらにこれらの地震過渡現象と長期的な SSE の相関を調べた。その結果、群発地震と余震の異常が検出され、その多くは南海トラフ西部に位置し、群発地震は南部で、余震は北部で多く発生した。このような違いは、プレート境界の地震間固着度に関連している可能性があり、より大きな地震がより多くの余震を発生させるため、結合比の高い地域に分布している可能性が高い。また、バックグラウンド地震発生率の増減は、長期的な SSE の移動と整合的であることがわかった。これらの結果は、地震活動量の変化をモニタリングすることが、沈み込み帯の応力解放過程を理解する上で重要であることを示唆している¹⁰⁾。

e) 粒子フィルタを用いた地震検知率の時間変化推定

(逐次) データ同化的な手法を用いた準備的な解析として、余震活動における地震検知率の時間変化をデータ同化的な手法の 1 つである状態空間モデルを用いて推定することを試みた。

余震データにおいて地震検知率が変化する「従来モデル¹¹⁾」に比べて、急激な変化に対応するために非線形な状態空間モデル(「拡張モデル」)に対して用いられる粒子フィルタを導入し自己組織化状態空間モデル¹²⁾に基づく推定を行うことで対処した。

近年の日本で起きた複数の大地震の余震活動に適用し、対数尤度に基づいて比較したが、「拡張モデル」の方が数十～数百程度、対数尤度が大きかった。粒子フィルタによる推定は乱数に基づくため、得られた対数尤度の値も乱数による影響(誤差)を受ける。しかし、対数尤度の差はかなり大きく、乱数の影響を考慮しても「拡張モデル」が「従来モデル」に比べて有意に良いことが分かる。

f) 全地球の背景地震動率と球面版 ETAS モデルの実装

オリジナルの ETAS モデルの平面近似によるモデル推定のバイアスを軽減するために、小さな空間スケールでは平面 ETAS モデルと等価な球面版 ETAS モデルを実装した^{13, 14)}。この新しいモデルは、南極などの高緯度地域の地震活動や、全球的な地震活動に補正・近似なしに計算することができる。今後は、このモデルを用いて、地球規模の巨大地震から日本国内の地震活動への遠隔トリガー効果を研究する予定である。

平面版 ETAS モデルの条件付き強度は

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

である。ここで、 (x, y) は地震発生位置の経度・緯度の座標近似値で、 $\mu(x, y)$ は背景地震発生率で、 $\kappa(m)$ はマグニチュード m の地震から誘発される地震の期待数目で、 $g(\cdot)$ は確率密度関数形式の大森・宇津式で、空間的広がりに関して

$$f(x, y; m) = \frac{q-1}{\pi De^{\gamma m}} \left(1 + \frac{x^2 + y^2}{De^{\gamma m}} \right)^{-q}$$

はマグニチュード m の地震から誘発される地震の相対的位置の確率密度関数である。

このモデルに対して球面版 ETAS モデルは以下のように表現される。

$$\lambda(t, \xi, \eta) = \mu(\xi, \eta) + \sum_{i: t_i < t} \kappa(m_i) g(t - t_i) f(\Delta(\xi, \eta; \xi_i, \eta_i); m_i)$$

ここで、 (ξ, η) は地震発生位置の経度・緯度で、誘発された地震の相対的位置の確率密度関数

$$f(\delta; m) = \frac{q-1}{4\pi} \frac{(De^{\gamma(m-m_c)})^{-q}}{(De^{\gamma(m-m_c)})^{1-q} - (1 + De^{\gamma(m-m_c)})^{1-q}} \left(1 + \frac{\text{hav } \delta}{De^{\gamma(m-m_c)}} \right)^{-q}$$

$$\left(\text{hav } \delta = \sin^2 \frac{\delta}{2} = \frac{1 - \cos \delta}{2} \right)$$

である。

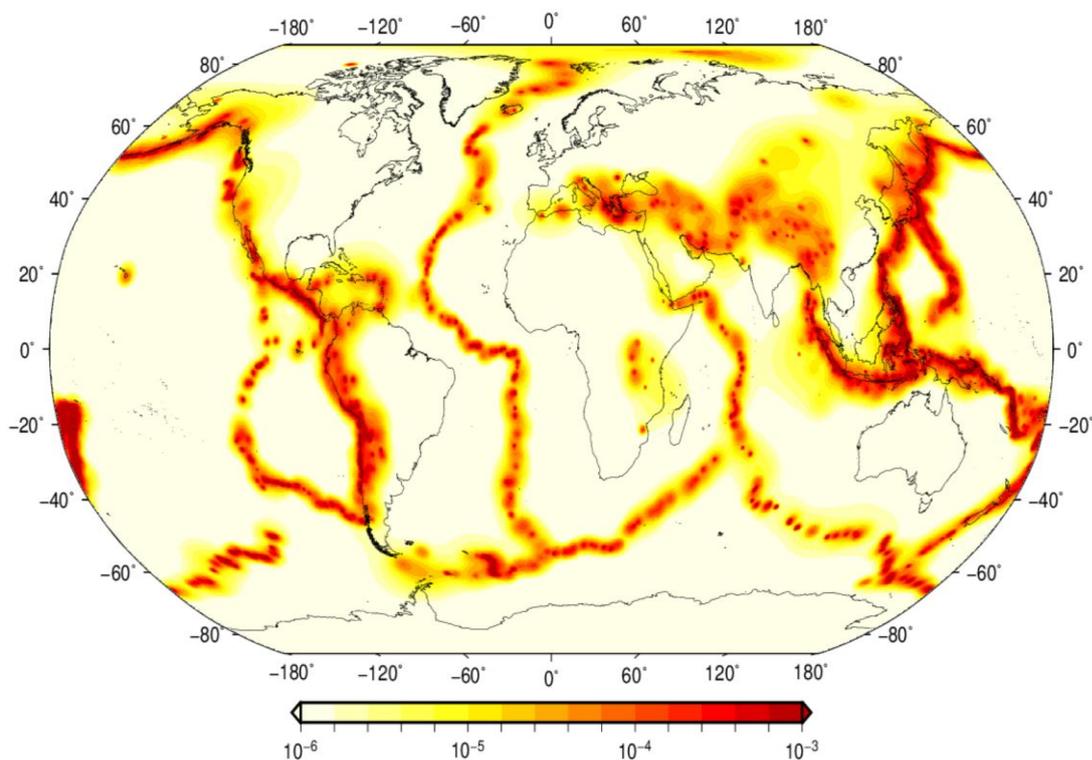


図 4 球面版時空間 ETAS モデルによる $M_w \geq 5.2$ の背景地震動率 (イベント/日/deg²) の空間変化。

2) テーマ B 地震活動の予測システムの構築

a) ソフトウェア HIST-PPM の公開

広域の多様な地震活動に適合するように、時空間の階層的な時空間点過程モデル (HIST-ETAS モデル、非一様時空間ポアソンモデル、及びマグニチュード分布 b 値) のパラメータをベイズ的事後分布の最大解 (MAP) を求めると同時に、予測及びシミュレーションするソフトウェア (HIST-PPM) とそれらの実践的マニュアルを統計数理研究所の発行物¹⁵⁾ で公開

した。

b) オンライン計算の結果公表の試行

ソフトウェア HIST-PPM に基づいて、HIST-ETAS モデル、非一様時空間ポアソン過程のパラメータ変化、及びマグニチュードの空間 b 値の変化を定期的に計算し、それらの結果を日本地図上に表示して、Twitter に投稿する仕組みの素案を作成した。



図 5 2022 年 3 月 11 日の計算結果がタイムラインの画面に表示された時のスクリーンショット。ここで、ソフトウェア HIST-PPM により 11 種類の計算結果が得られるので、11 枚の地図が表示されている。

c) 地震検出率の時空間推定

大地震直後に懸念されるカタログの中小余震の欠測問題について、G-R 分布の b 値変化と検出率分布の時空間モデルを構成し調べた。その結果 $M \geq 4$ の地震の欠測がモデルの推定及び予測に与える影響は内陸部では凡そ問題無いことを確認し発表した^{16, 17)}。

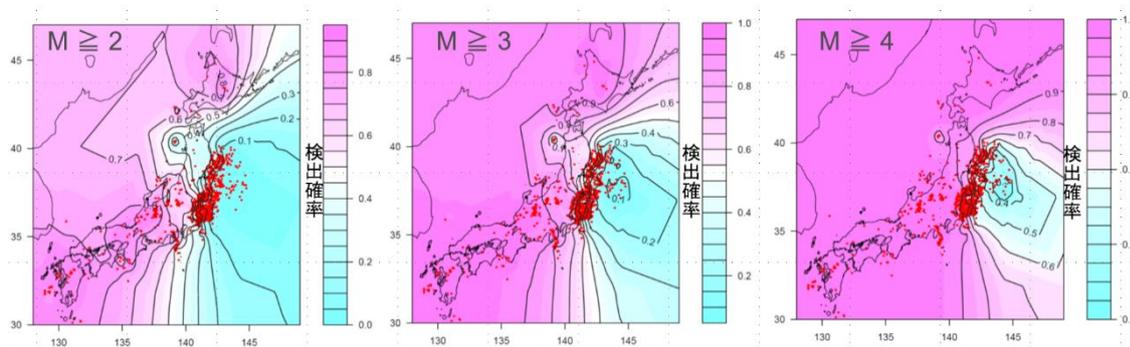
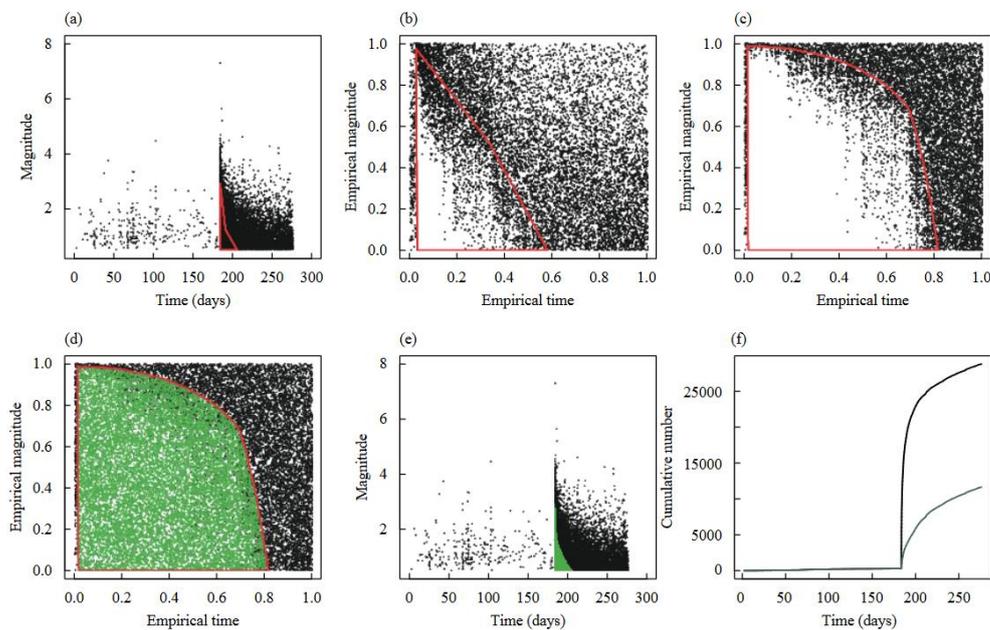


図 6 2011 年 M9 東北地方太平洋沖地震直後の 1 日の間に気象庁ネットワークで検出された各マグニチュード以上の余震の 97.5% 検出率。確率の等高線間隔は 10%。

d) データ欠測の補完

日本内陸で発生した中規模の地震に関連する5つの地震列について、確率的補充法¹⁸⁾を用いて余震の欠測問題に系統的に対処する。この方法は、時間に依存しないマーク（例えば、マグニチュード）を持つ点過程（例えば、地震列）が完全に観測された場合、バイスケールの経験変換により均質なポアソン過程に変換できるという考えに基づいている。気象庁の地震カタログを用いて余震データを選択し、各余震列の後の完全な部分を用いて欠落した初期事象を補充する。各シーケンスの時間窓は本震の6ヶ月前から3ヶ月後までである。半自動空間選択では、地震の震源地選択にはクラスタリング法を用いている。本震から時間経過に伴う余震の減衰を特徴付ける大森・宇津の法則のパラメータ推定において、欠落した初期余震が引き起こす可能性のあるバイアスを知るために、気象庁カタログ記載データと補充したデータセットについて得られた結果を比較する。また、同じ本震後の2つのデータセットについて、大森・宇津則パラメータの推定値を比較した。最初のデータセットは補充されたシーケンスで、2番目のデータセットは気象庁のカタログに記載されていない初期の余震を検出するために波形の解析で得られたものである。その結果、補充されたデータセットで推定された大森・宇津則のパラメータは、解析データセットで使用された閾値の大きさに対してロバストであることが示された。また、3日程度の短い余震の時間窓を使用した場合でも、補充されたデータセットから安定した大森・宇津則のパラメータが推定された。また、すべての系列でp値は約1.1、c値は元のデータセットと比較して大幅に小さくなっている。この結果は、欠損余震問題に対して、補充法が高速で信頼性の高いアプローチであることを証明するものである。



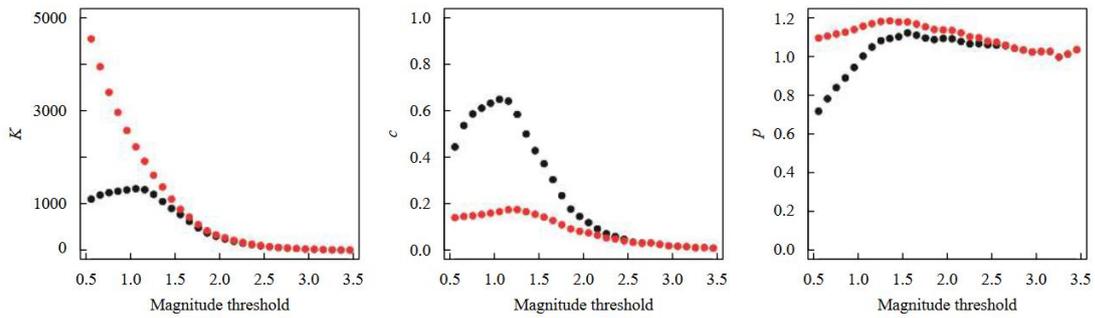


図7 (上の6つのパネル) 鳥取地震余震系列に対する確率的補充アルゴリズム適用例。(3つの)元のデータ(黒い点)と補充されたデータ(赤い点)から得られた大森・宇津パラメータ

e) 内陸部の直下型大地震の長期確率予報

階層的時空間 ETAS (HIST-ETAS) モデルの簡素版(HIST-ETAS- $\cdot K$)と詳細版(HIST-ETAS-5pa)を日本内陸部の1885年から現在までの一世紀以上にわたる震源データ(宇津歴史被害カタログ及び気象庁一元化震源カタログ)を用いて推定し、日本内陸地震 $M \geq 4$ の常時地震活動度を求めた。これらをもって全国一律に Gutenberg-Richter (G-R) 分布

($b=0.9$)を仮定して各地の永年確率に換算し、数年~数十年の一定期間の長期予測を計算することを提案した。結果、直下型大地震の長期確率予報の有望性を示唆し、歴史被害地震の位置分布をよく説明することが見られた¹⁹⁾。それゆえ今後は量的な確証を追求する。この結果は2022年3月9日付日経電子版

<https://www.nikkei.com/article/DGXZQOCD027YN0S2A300C2000000/> に紹介された。

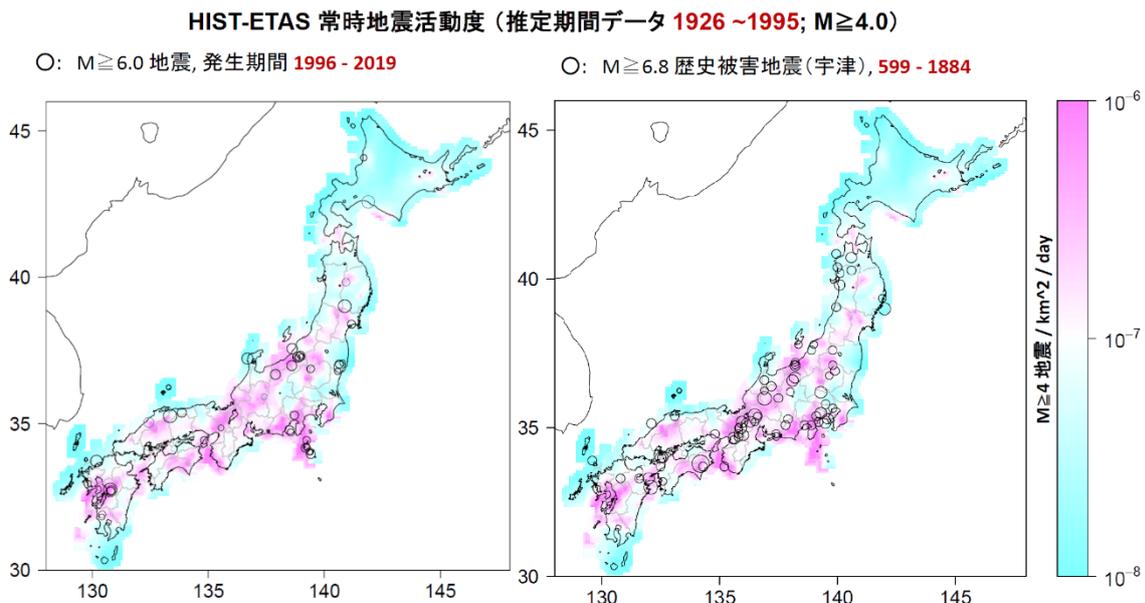


図8 左側図の丸印は1996~2019年の $M6$ 以上の内陸の浅い地震。右側図の丸印は599-1884

年の期間における M6.8 以上の歴史的被害地震。両図の配色は同一で、1926-1995 年の期間における HIST-ETAS-5pa モデルの背景地震活動度 (μ 値分布) の最適 MAP 解 (カラーテーブルは $M \geq 4$ 地震発生数/km²/日)。

f) 前震確率予測

小規模地震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き、より大きな地震が発生する確率を計算するモデルの候補の一つについて検討を開始した。それは G-R 則の b 値に基づくモデルであり、このモデルを検討するための事例として、2016 年の熊本地震と 2021 年の宮城県の沖合で起きた地震を用いた^{20, 21)}。検討した結果、本モデルを使用することで、実際にどのように確率が推移したかを客観的に評価できる可能性が見えてきた。今後、この可能性を追求しつつ、小標本のため予測方式も多種多様であること及びマグニチュード系列が非定常・非独立であることを考慮してモデルの高度化も検討する。M ≥ 4 の各地震群について、先行地震同士の時・空間・マグニチュードパターンの統計的識別に基づいてモデル化された、群内での現時点の最大地震よりさらに大きな地震 (マグニチュード差が 0.5 以上) が一ヵ月以内に起きる確率の (前震) 予測をオンラインで実施できる仕組みを構築した。

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

本年度は数日から数週間という継続時間をもつ短期のゆっくり滑り (S-SSE) を Global Navigation Satellite System (GNSS) から自動検知する手法を開発した。本開発は STAR-E プロジェクト東北大学採択課題「データ同化断層すべりモニタリングに向けた測地データ解析の革新」との共同研究である。さらに、開発検知法において SSE を検知しやすい観測点が必要となるが、その選択法について議論した。

開発手法は ℓ_1 トレンドフィルタリング²²⁾ と呼ばれるスパース推定を利用する。 ℓ_1 トレンドフィルタリングは一次元の観測時系列 $X(t)$ に対して、

$$\sum_t (X(t) - Z(t))^2 + \lambda \sum_t |Z(t) - 2Z(t-1) + Z(t-2)|$$

を最小にする $Z(t)$ によってフィルタリングを行い観測時系列に区分線形関数を適合させる。この推定法にはハイパーパラメータ λ が存在するが、Mallows の C_p 規準²³⁾ を用いてデータから選択することができる。 ℓ_1 トレンドフィルタリングによって得られた区分及び区分の長さから SSE の開始時点及び継続時間の推定値を得ることができる。この推定値に基づいて複数観測点で変化があったかどうかの検定を行い、検定の p 値を統合し、統合した $(1-p)$ の値を検知確からしさと定義する。

図 9 は開発手法を四国西部における GNSS 実観測データに適用した結果を示している。ここでは国土地理院による GNSS 観測網 GEONET (図 9a) で得られた 2004 年 4 月 1 日から 800 日間の観測データを用いた。図 9(c) に開発手法による検知の全体像及び (d) に特定の観測点における検知結果を示す。開発手法は GNSS データ²⁴⁾ あるいは傾斜計²⁵⁾ を用いてこれまでに見つかっている既知の 7 個の SSE を捉えている他、これまでに発見されていなかった

た 12 個の SSE の候補を発見した。

開発手法において利用した C_p 規準の振る舞いによって観測点を選択することができる。図 9(b) は C_p 規準が ℓ_1 トレンドフィルタリングのハイパーパラメータ λ に対してどのように変化するかを示す。この観測点においては C_p 規準が下に凸の形をしていることから、実際に使う λ を C_p 規準最小点として一意に決めることができ、区分線形関数がよく適合していることを示している。このような C_p 規準の振る舞いによる観測点選択は、ノイズレベルが低くシグナルをよく検知しやすい観測点を選ぶことができるため、逆解析や検知の精度の向上のための観測点選択法の一つのプロトタイプになりうると考えられる。次年度以降この点について議論を進めていく。

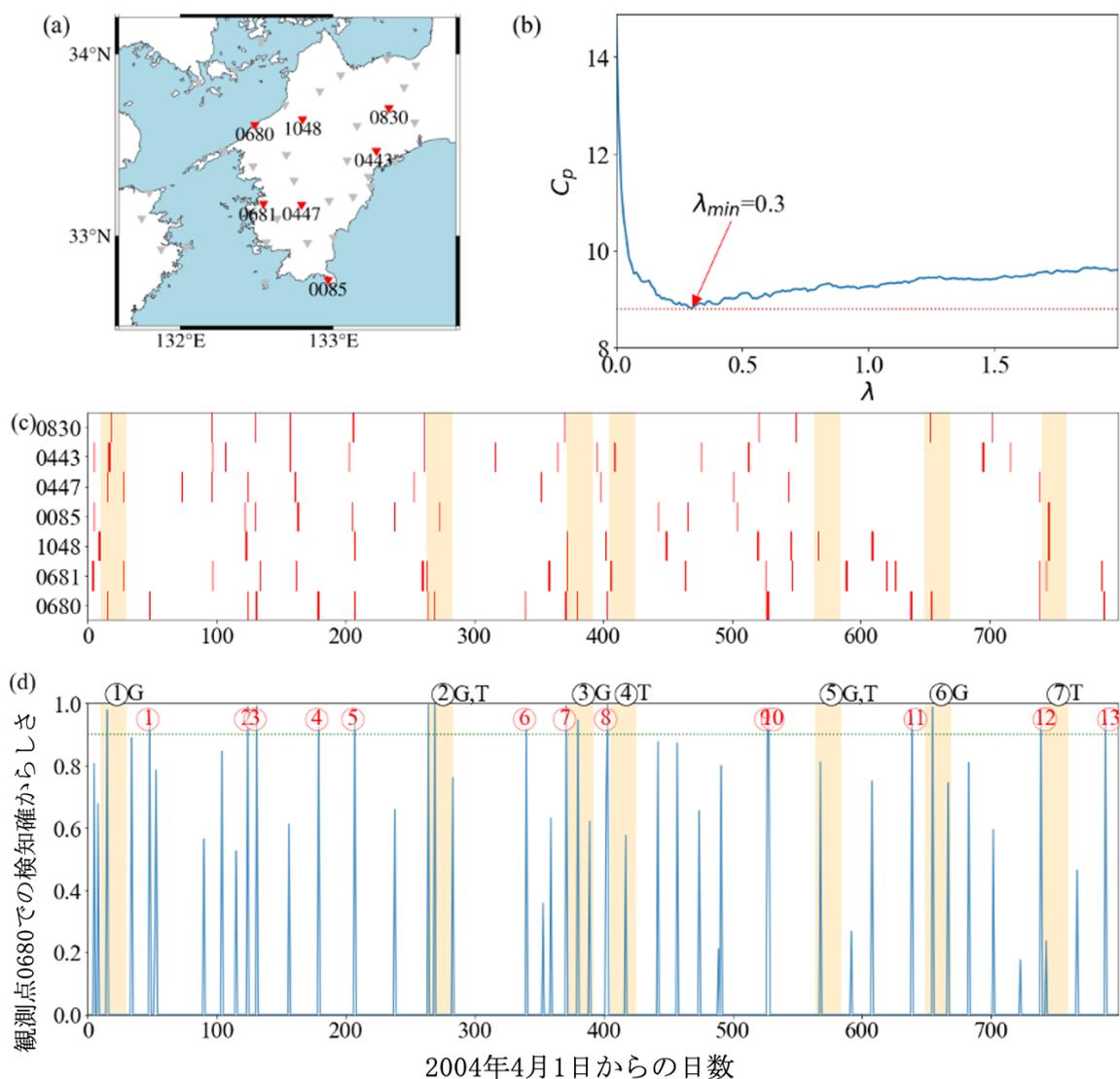


図 9 開発手法の四国西部 GNSS データへの適用。(a)利用した四国西部の GNSS 観測点(灰色の逆三角)と区分線形関数がよく適合した観測点(赤色の逆三角)。(b)Mallows の C_p 規準の振る舞いの例とその最小値の値。(c)全体の検知結果。各観測点における検知確からしさが 90%以上の日を赤線で示す。オレンジ色の影は既知の SSE の発生日の前後 10 日を表す。(d)観測点 0680 における検知の例。赤色の番号をつけた箇所が新しく検知した SSE の発生日、黒色の番号をつけた箇所は既知の SSE の発生日。オレンジ色の影はその前後 10 日

を表す。G は GNSS を用いて検知された既知の SSE²⁴⁾ を、T は傾斜計を用いて検知された既知の SSE²³⁾ を表す。

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

より高精度の地震動モニタリングを行うため、既存の震源決定手法 (IPFx 法^{26, 27)} の改良を行った。今年度は ETAS 地震予測を事前情報に活用する予定であったが、リアルタイムでの ETAS 予測が得られていないため、代わりに過去の震源分布から地震の発生しやすさをグリッド毎に計算し、事前情報として組み込むこととした。

地震多発時 (大地震直後の余震多発時や群発地震の発生時) における IPFx 法および予測される地震動の精度を向上させるため、2018 年に台湾で発生した群発地震 (花蓮地震) のデータを利用して、IPFx 法の適用を試みた。台湾のデータは、日本のデータよりも観測点密度が高く、またノイズレベルが高いという特徴がある²⁸⁾。特に 2018 年の群発地震の際には多数の地震が連続的に発生したため震源決定が困難な状況で、IPFx 法を改良するためのテストデータとして使用した。本研究は、台湾中央気象局との共同研究で行い、2018 年 2 月一か月間の台湾全土の観測点の連続記録を提供してもらった。

既存の IPFx 法をそのまま 2018 年 2 月から 1 か月間の連続データに適用すると、多くの誤決定イベントが発生し、うまく震源決定できなかった。これは、台湾のデータが日本の地震観測網よりもノイズレベルが高いことによると考えられる。そこで、ノイズの影響を受けにくくするため、震源決定に加わるデータのフィルタを調整して、ノイズが震源決定に参加しないように工夫した。その結果、一か月間に震度 4 以上を記録した 129 の地震のうち、105 個のイベントを検知し、うち 103 個は震源決定の誤差が 30 km 以下と精度よく決められることが分かった。本研究結果は論文誌に投稿中である。

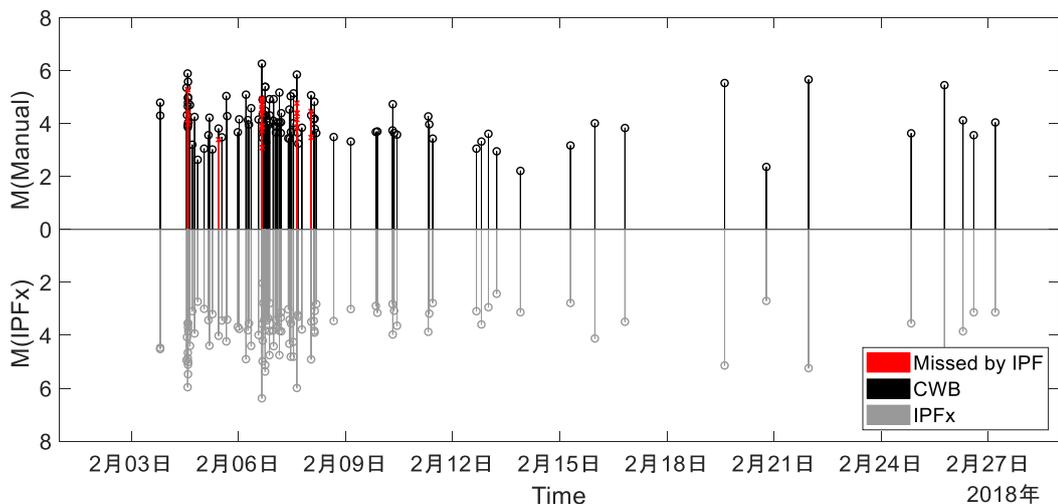


図 10 2018 年台湾花蓮で発生した群発地震のカタログ (上) と IPFx 法で検知したマグニチュード。図の上下の対称性が鮮明に見える地震は改良後の IPFx 法が正確に群発地

震の検知を成功したと示している。検知失敗のケースは密度高い群発地震のみで少しある。

(d) 結論ならびに今後の課題

1) テーマ A

ETAS モデルは、地震群発現象の一次近似モデルとして証明され、地震発生仮説の検証において、定常ポアソンモデルに代わる現実的な帰無モデルとして世界的に地震工学などで使用されるようになった。このプロジェクトの成果は、ETAS モデルを以下のようないくつかの方向へ拡張することに成功した、1) 震源深度（都市直下型地震）の組み込み、2) 発震メカニズム、3) 地震断層破壊面の形状など。これらはすべて、ETAS モデルにおける予測可能要素の向上に有用な情報を含んでいる。今後は、提案にあるように、物理学的な観測結果を利用した背景地震活動率の補強など、より有用な情報を盛り込んでいく予定である。また、地震活動異常の検出技術の開発や、現在の ETAS モデルには含まれていないような地震活動異常の特徴を検出することも不可欠である。

2) テーマ B

M4 以上の内陸の地震活動ではソフトウェア HIST-ETAS モデルの短期予測のオンライン計算の結果の試行ができ随時予測結果の視覚的確認が可能になった。これを近未来のオンライン予測発生確率変化の視覚化につなげる必要がある。

連発大地震発生の場合の検出率の時空間推定法が可能になった。しかし、下限マグニチュードを下げた場合や、海域における地震の欠測率が甚だしいため HIST-ETAS モデルによる大地震直後の予測バイアスを避ける推定法や予測が今後の計画で渴望される。

HIST-ETAS モデルの常時地震活動度による内陸直下型被害地震の長期予測が他の予測より、どのくらい優れているかを定量的に実証する必要がある。

前震の予測のための複数のアルゴリズムが提案されているが、多様なシナリオによる予測の立場からの確率評価法を確立して比較する必要がある。

3) テーマ C

本年度は数日から数週間という継続時間をもつ短期のゆっくり滑り (S-SSE) を Global Navigation Satellite System (GNSS) から自動検知する手法を東北大学採択課題「データ同化断層すべりモニタリングに向けた測地データ解析の革新」との共同で開発した。開発手法を四国西部の GNSS データに適用し、これまでに見つかっている既知の 7 個の SSE を捉えている他、これまでに発見されていなかった 12 個の SSE の候補を発見した。さらに、開発検知法において SSE を検知しやすい観測点が必要となるが、その選択法について議論した。選択法は l_1 トレンドフィルタリングのハイパーパラメータを決定するための C_p 規準の振る舞いに基づくものである。 C_p 規準が下に凸の形をしている観測点を選択すると、ノイズレベルが低くシグナルをよく検知しやすい観測点を選ぶことができるため、逆解析や検知の精度の向上のための観測点選択法の一つのプロトタイプになりうると考えられる。次年度以降この点について議論を進めていく。

4) テーマ D

本グループの開発した震源決定手法（IPF_x法）は特定の観測点ネットワークではなく、様々な観測点密度とノイズレベルの一般のネットワークにも適用できることを確認したが、アルゴリズムのパラメータ調整の必要性がわかった。今後最適な観測網情報に基づく拡張 IPF 法を開発する際には有用な情報になった。さらに ETAS モデルによる地震活動予測を事前情報として IPF_x 法に導入する際にもパラメータ調整の必要性があると推測した。次年度は緊急地震速報の最適なパフォーマンスを発揮するため、テーマ C と連携して観測点の情報量を評価し、リアルタイムで地震動波形を利用した観測点選択システムの開発を行う。

(e) 引用文献

- 1) Zhuang J., Ogata Y. and Vere-Jones D. (2002). Stochastic declustering of space-time earthquake occurrences. *Journal of the American Statistical Association*, 97: 369-380.
- 2) Zhuang J., Ogata Y. and Vere-Jones D. (2004). Analyzing earthquake clustering features by using stochastic reconstruction. *J. Geophys. Res.*, 109, No. B5, B05301, doi:10.1029/2003JB002879.
- 3) 郭 一村, 庄 建倉 (2021) 時空間 ETAS モデルの拡張バージョンとその応用, *統計数理*, 69(2), 223-237.
- 4) Guo, Y., J. Zhuang, H. Zhang (2021) Heterogeneity of aftershock productivity along the mainshock ruptures and its advantage in improving short-term aftershock forecast. *J. Geophys. Res. : Solid Earth*, 126:e202JB020494. doi:10.102/202JB020494.
- 5) Jin, Z., Y. Fialko, (2020). Finite slip models of the 2019 Ridgecrest earthquake sequence constrained by space geodetic data and aftershock locations. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 110(4), 1660-1679. <https://doi.org/10.1785/012020006>
- 6) Taroni, M., J. Zhuang, and W. Marzocchi (2021). High-Definition Mapping of the Gutenberg-Richter b-Value and Its Relevance: A Case Study in Italy, *Seismol. Res. Lett.* 92, 3778-3784, doi: 10.1785/0220210017.
- 7) Taroni, M., J. Selva, J. Zhuang (2021) Estimation of the tapered Gutenberg-Richter distribution parameters for catalogs with variable completeness: An application to the Atlantic ridge seismicity. *Applied Sciences*, 11, 12166. doi:10.3390/app112412166
- 8) Kagan, Y. and D. Jackson (2014) Statistical earthquake focal mechanism forecasts, *Geophys. J. Int.*, 197, <https://doi.org/10.1093/gji/ggu015>
- 9) Maita E. and J. Zhuang (2021) Extended ETAS model by incorporating focal mechanisms, *2021 Fall Meeting of the American Geophysical Union (AGU)*, Online.

- 10) Y. Guo, J. Zhuang, H. Zhang (2022) *Characterization of seismicity in Nankai and its association with long-term slow slip events*. Submitted.
- 11) Ogata, Y. and K. Katsura (2006). Immediate and updated forecasting of aftershock hazard, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L10305, doi:10.1029/2006GL025888.
- 12) Kitagawa, G. (1998) A self-organizing state-space model, *J. Am. Stat. Assoc.* **93**(443) 1203-1215.
- 13) Xiong, Z. J. Zhuang (2021) The research of spherical time-space ETAS model, Fall Meeting of the American Geophysical Union (AGU), Online.
- 14) 熊子瑤, 庄建倉, 尾形良彦 (2021) A study on the spherical space-time ETAS model, 2021 年度統計関連学会連合大会, オンライン開催
- 15) Ogata, Y. Y. Ogata, K. Katsura, M. Tanemura, D. Harte and J. Zhuang (2021) Hierarchical Space-Time Point-Process Models (HIST-PPM): Software Documentation, *Computer Science Monographs*, No.35, The Institute of Statistical Mathematics, https://www.ism.ac.jp/editsec/csm/index_j.html の https://www.ism.ac.jp/editsec/csm/pdf/csm_035.pdf 参照.
- 16) 尾形良彦, 桂康一 (2021). 地震カタログの時空間的非均質性のモデルと適用, 日本地球惑星科学連合 2021 年大会, オンライン開催.
- 17) 尾形良彦, 桂康一 (2021). 気象庁地震カタログの時空間的検出率の長期的変遷と大地震直後の欠測率の推定, 2021 年度統計関連学会連合大会, オンライン開催.
- 18) Zheng, Y., B. Enescu, J. Zhuang, and C. Yu (2021). Data replenishment of five moderate earthquake sequences in Japan, with semi-automatic cluster selection. *Earthquake Science*, **34**:310-322. doi: 10.29382/eqs-2021-0030.
- 19) 尾形良彦 (2021) 階層的時空間 ETAS モデルなどによる短期・中期・長期の地震確率予測と検証評価 (招待講演)、第 233 回 地震予知連絡会議 (Web 会議), 2021 年 11 月 26 日.
- 20) K. Z. Nanjo J. Izutsu, Y. Orihara, M. Kamogawa, (2021) Changes in seismicity pattern due to the 2016 Kumamoto earthquake sequence and implications for improving the foreshock traffic-light system, *Tectonophysics*, **822**, 229175, DOI: 10.1016/j.tecto.2021.229175, (日本語解説: <https://www.u-shizuoka-ken.ac.jp/news/20221223-1/>).
- 21) K. Z. Nanjo and A. Yoshida, 2021, Changes in the b value in and around the focal areas of the M6.9 and M6.8 earthquakes off the coast of Miyagi prefecture, Japan, in 2021, *Earth, Planets and Space*, **73**, 176, DOI: 10.1186/s40623-021-01511-3, (日本語解説: <https://www.global-center.jp/media/2021114-133151-692.pdf>).
- 22) Kim, S., K. Koh, S. Boyd, and D. Gorinevsky (2009) ℓ_1 Trend Filtering, *SIAM Review, problems and techniques section*, **51** (2), 339-360.
- 23) Tibshirani, R. and J. Taylor (2012) Degrees of freedom in lasso problems, *Ann. Statist.* **40** (2), 1198-1232.

- 24) Nishimura, T., T. Matsuzawa, and K. Obara (2013) Detection of short-term slow slip events along the Nankai Trough, southwest Japan, using GNSS data, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, **118** (6), 3112–3125.
- 25) Sekine, S., H. Hirose, and K. Obara (2010) Along-strike variations in short-term slow slip events in the southwest Japan subduction zone, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, **115**, B9, B00A2.
- 26) Yamada, M. and J. Mori, 2022: P-wave picking for earthquake early warning: refinement of a Tpd method. *Geophys. J. Int.* **228**(1): 387–395.
- 27) Yamada, M., K. Tamaribuchi, and S. Wu, 2021: The extended integrated particle filter method (IPFx) as a high-performance earthquake early warning system. *Bull. Seismol. Soc. Am.* **111**(3): 1263–1272.
- 28) Chen, D.-Y., T.-L. Lin, H.-C. Hsu, Y.-C. Hsu, and N.-C. Hsiao, 2019: An approach to improve the performance of the earthquake early warning system for the 2018 Hualien earthquake in Taiwan. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.* **30**: 423–433.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

1) 学会等における口頭・ポスター発表

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
Extensions of the spatiotemporal ETAS model and their applications, 口頭講演	Zhuang, J.	東京大学地震研究所 共同利用研究集会 「地震活動の統計モデルと物理的意味」, オンライン開催	2022年3月 8日	国内
自然地震の地震活動解析について, 口頭講演	楠城一嘉	東京大学地震研究所 共同利用研究集会 「地震活動の統計モデルと物理的意味」, オンライン開催	2022年3月 8日	国内
ETASモデルの発展, 口頭講演	尾形良彦	東京大学地震研究所 共同利用研究集会 「地震活動の統計モデルと物理的意味」, オンライン開催	2022年3月 8日	国内
Long-term earthquake forecasts for the Italy and California regions based on the	Zhuang, J.	2021 Fall Meeting of the American Geophysical Union (AGU), Online	2021年12月17日	国外

epidemic-type aftershock sequence (ETAS) model for short-term clustering, ポスター発表				
Extended ETAS model by incorporating focal mechanisms, ポスター発表	Maita, E. J. Zhuang	2021 Fall Meeting of the American Geophysical Union (AGU), Online	2021年12月17日	国外
Hierarchical and structural complexities on the diffuse fault system associated with the 2000 Tottori earthquake revealed by a hyperdense seismic observation 口頭講演	Kato, A.	2021 Fall Meeting of the American Geophysical Union (AGU), Online	2021年12月16日	国外
The research of spherical time-space ETAS model, ポスター発表	Xiong, Z. J. Zhuang	2021 Fall Meeting of the American Geophysical Union (AGU), Online	2021年12月17日	国外
Estimation of near-surface density based on Bayesian method over the Delaunay tessellation with second-order smoothness prior, ポスター発表	Niu, Y. J. Zhuang	2021 Fall Meeting of the American Geophysical Union (AGU), Online	2021年12月15日	国外
Long-term probability earthquake forecasts based on the ETAS model, 口頭講演	庄 建倉	日本地震学会2021年度秋季大会, オンライン開催	2021年10月14日	国内
短周期地震計アレイ観測による深部低周波微動の高速移動現象, 口頭講演	加藤愛太郎 竹尾明子 小原一成	日本地震学会2021年度秋季大会, オンライン開催	2021年10月15日	国内
地殻内地震活動とGNSS変位から推定される表層荷	上田 拓 加藤愛太郎	日本地震学会2021年度秋季大会, オンライン開催	2021年10月14日	国内

重の季節変動性, 口頭講演	C. Johnson 寺川寿子	イン開催		
The research of spherical time-space ETAS model, 口頭講演	熊子瑤, 庄建倉	日本地震学会2021年度秋季大会, オンライン開催	2021年10月14日	国内
スロースリップイベントによる地震活動誘発効果を陽に組み込んだETASモデルの開発, 口頭講演	西川友章 西村卓也	日本地震学会2021年度秋季大会, オンライン開催	2021年10月14日	国内
アジョイント法に基づく2003年十勝沖地震の余効すべりの現状把握と短期推移予測, ポスター発表	加納将行 宮崎真一 石川洋一 平原和朗	日本地震学会2021年度秋季大会, オンライン開催	2021年10月14日	国内
A filtering formula for the renewal Hawkes process, 口頭講演	庄建倉	2021年度統計関連学会連合大会, オンライン開催	2021年9月8日	国内
余震誘発効果を考慮した繰り返し地震の非定常更新過程, 口頭講演	野村俊一 田中昌之	2021年度統計関連学会連合大会, オンライン開催	2021年9月6日	国内
A study on the spherical space-time ETAS model, 口頭講演	熊子瑤 庄建倉 尾形良彦	2021年度統計関連学会連合大会, オンライン開催	2021年9月8日	国内
Second-order smoothness prior over Delaunay tessellation, 口頭講演	牛源源, 庄建倉	2021年度統計関連学会連合大会, オンライン開催	2021年9月7日	国内
階層的時空間ETASモデルなどによる短期・中期・長期の地震確率予測と検証評価 (招待講演)	尾形良彦	2021年度統計関連学会連合大会, オンライン開催	2021年9月	国内
Modified estimation and forecasting of the hierarchical space-time ETAS (HIST-ETAS) model for earthquake catalogs in a wide area possessing long- and short-term incompleteness, ポスタ	Ogata, Y. K. Katsura	2021 SCEC Annual Meeting, Online	2021年9月12-17日	国外

一発表				
時空間的な非一様性を有する広域の地震カタログに対するHIST-ETASモデルの修正推定, 口頭講演	尾形良彦 桂 康一	日本地震学会2021年度秋季大会, オンライン開催	2021年10月15日	国内
点過程モデルが推定する背景地震活動の時間変動から見た長野県中部の群発地震活動の特徴, 口頭講演	熊澤貴雄 尾形良彦	日本地震学会2021年度秋季大会, オンライン開催,	2021年10月14日	国内
余震誘発効果を考慮した繰り返し地震の非定常更新過程, 口頭講演	野村俊一 田中昌之	2021年度統計関連学会連合大会, オンライン開催	2021年9月6日	国内
非定常ETASモデルから見える能登半島群発地震活動の地域的变化, 招待講演	熊澤貴雄 尾形良彦	第233回 地震予知連絡会議	2021年11月26日	国内
地震災害予測のための地球観測データのデジタルアースへの適用 -地震活動度解析の高度化と可視化-, 招待講演	長尾年恭 楠城一嘉 鴨川 仁 井筒 潤	問題複合体を対象とするデジタルアース共同利用・共同研究拠点 2021年度成果報告会, 中部大学中部高等学術研究所国際GISセンター, オンライン,	2022年3月7-8日	国内
The 2016 Kumamoto earthquake sequence implying the possible improvement of the Foreshock Traffic-Light System, 【招待講演】	K. Z. Nanjo J. Izutsu Y. Orihara M. Kamogawa	日本地震予知学会第8回学術講演会, 21-13, ハイブリッド(貸会議室ビズモア東京駅八重洲)	2021年12月25日,	国内
A preliminary study on low-frequency earthquakes at Mt. Fuji, Japan, using the matched filter method, ポスター発表	K. Z. Nanjo Y. Yukutake	AGU Fall Meeting 2021, ハイブリッド (New Orleans, USA)	2021年12月13-17日	国外
統計科学的手法を用いて	楠城一嘉	統計物理と統計科学	2021年10	国内

地震活動を評価する研究，【招待講演】		のセミナー 統計数理研究所，オンライン	月26日	
富士山直下で起きる低周波地震の研究の序報：Matched Filter法を用いた地震カタログの作成とカタログの性能評価，ポスター発表	楠城一嘉 行竹洋平	日本地震学会2021年度秋季大会，オンライン	2021年10月14日	国内
2016年熊本地震前後の地震活動のパターンについて、ポスター発表	楠城一嘉 井筒潤 織原義明 鴨川仁	日本地震学会2021年度秋季大会，オンライン	2021年10月14日	国内
Adjoint-based Uncertainty Quantification of Frictional Inhomogeneity on Slow-slipping Fault (ポスター)	Ito, S. M. Kano H. Nagao	Asia Oceania Geosciences Society 2021	2021年8月	国際
予測分布論の最近の進展 (口頭)	矢野恵佑	日本数学会2021年度秋季総合分科会	2021年9月	国内
擬ベイズ事後分布に基づく予測評価のための情報量規準 (口頭)	矢野恵佑 伊庭幸人	2021年度統計関連学会連合大会	2021年9月	国内
最小情報コンピュータモデルとその拡張 (口頭)	清 智也 矢野恵佑	2021年度統計関連学会連合大会	2021年9月	国内
ノンパラメトリックリンク回帰における漸近分散の共変量依存性 (口頭)	奥野彰文 矢野恵佑	2021年度統計関連学会連合大会	2021年9月	国内
地震波速度不連続面の検出のためのスパース正則化に基づく地震波トモグラフィ (口頭)	倉田澄人 山中遥太 矢野恵佑 駒木文保 椎名高裕 加藤愛太郎	2021年度統計関連学会連合大会	2021年9月	国内
アジョイント法に基づく2003年十勝沖地震の余効すべりの現状把握と短期	加納将行 宮崎真一 石川洋一	日本地震学会2021年度秋季大会	2021年10月	国内

推移予測（ポスター）	平原和朗			
ℓ_1 トレンドフィルタリングによる西南日本GNSSアレイからの短期スロースリップ現象の検出（口頭）	矢野恵佑 加納将行	日本地震学会2021年度秋季大会	2021年10月	国内
構造正則化を応用した地震波トモグラフィ法による速度不連続面の検出（口頭）	倉田澄人 山中遥太 矢野恵佑 駒木文保 椎名高裕 加藤愛太郎	日本地震学会2021年度秋季大会	2021年10月	国内
MCMC法を用いた2004年新潟県中越地震震源域周辺の地震波速度分布の推定（ポスター）	椎名高裕 加納将行 倉田澄人 加藤愛太郎	日本地震学会2021年度秋季大会	2021年10月	国内
アジョイント法に基づく2003年十勝沖地震の余効すべりの現状把握と短期推移予測（ポスター）	加納将行 宮崎真一 石川洋一 平原和朗	日本測地学会第136回講演会	2021年11月	国内
ℓ_1 トレンドフィルタリングによる西南日本GNSSアレイからの短期スロースリップ現象の検出（口頭）	矢野恵佑 加納将行	日本測地学会第136回講演会	2021年11月	国内
予測の情報量規準（口頭）	矢野恵佑	情報計測オンラインセミナー	2021年12月	国内
On estimating generalization gaps via the functional variance in overparameterized models	Yano, K.	CMStatistics 2021	2021年12月	国際
地殻変動データを用いた沈み込み帯の断層すべりの現状把握・短期推移予測に資するデータ同化研究（口頭）	加納将行	第31回 AI・データ利活用研究会	2022年3月	国内
機械学習による地震波検	溜瀧功史	研究集会「機械学習	2022年3月	国内

測の実用化に向けた検討 (口頭発表)		時代の地震研究」		
Tpd法を利用した簡便なP 波検知手法 (口頭発表)	山田真澄	研究集会「固体地球 科学的諸現象のリア ルタイム監視予測シ ステムと利活用」	2022年1月	国内
Tpd法を利用した簡便なP 波検知手法 (口頭発表)	山田真澄	研究集会「都市地震 リスク軽減に向けた データ駆動型研究の 最前線」	2022年3月	国内
Good Practices for Designing and Operationalizing an Earthquake Early Warning System (EEWS) (口頭発表)	Yamada, M.	世界銀行ワークショ ップ「Knowledge Exchange on Good Practices for Designing and Operationalizing an EEWS」	2021年12 月	国外
Development of the Empirical Function to Estimate Shaking Amplitude and Duration in Buildings Based on Strong Motion Records (口頭発表)	Yamada, M.	ESG6 (The 6th IASPEI / IAEE International Symposium: Effects of Surface Geology on Seismic Motion)	2021年8月	国外
A Bayesian framework for Earthquake Early Warning (口頭発表)	Stephen Wu	日本地震学会秋季学 会	2021年10 月	国内
Towards a performance- based probabilistic earthquake early warning framework (口 頭発表)	Stephen Wu	研究集会「固体地球 科学的諸現象のリア ルタイム監視予測シ ステムと利活用」	2022年1月	国内
浅部低周波地震モニタリ ングシステムの構築 (口 頭発表)	溜渕功史	研究集会「固体地球 科学的諸現象のリア ルタイム監視予測シ ステムと利活用」	2022年1月	国内

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所（学会誌・雑誌等名）	発表した時期	国内・外の別
Exact simulation of extrinsic stress-release processes	Lee, Y. Laub, P. Taimre, T. Zhao, H. Zhuang, J.	Applied Probability Journals	2022-2-14	国外
Data replenishment of five moderate earthquake sequences in Japan, with semi-automatic cluster selection	Zheng, Y. B. Enescu J. Zhuang C. Yu	Earthquake Science	2021-8-25	国外
Gravity Observations and Apparent Density Changes before the 2017 Jiuzhaigou Ms7.0 Earthquake and Their Precursory Significance	Yang, J. S. Chen B. Zhang J. Zhuang L. Wang H. Lu	Entropy	2021-12-16	国外
Changes in seismicity pattern due to the 2016 Kumamoto earthquake sequence and implications for improving the foreshock traffic-light system	K. Z. Nanjo J. Izutsu Y. Orihara M. Kamogawa	Tectonophysics	2021-12-6	国外
Changes in the b value in and around the focal areas of the M6.9 and M6.8 earthquakes off the coast of Miyagi prefecture, Japan	K. Z. Nanjo A. Yoshida	Earth, Planets and Space	2021-9-14	国外
地震と火山と防災のはなし	楠城一嘉 編著	成山堂書店	2022-3-28	国内
統計地震学における ETAS モデル—その進展とホークス型モデル	庄 建倉 尾形 良彦	統計数理	2021-12	国内

特集 Hawkes 過程の新展開と応用	庄 建倉 小山慎介 野村俊一	統計数理	2021-12	国内
地震学における非線形 Hawkes 過程：摩擦構成則に基づく地震活動モデル	岩田貴樹	統計数理	2021-12	国内
時空間 ETAS モデルの拡張バージョンとその応用	郭 一 庄 建倉	統計数理	2021-12	国内
余震誘発効果を考慮した繰り返し地震の予測	野村俊一 田中昌之	統計数理	2021-12	国内
長野・岐阜・福井県境付近の群発地震活動について	熊澤貴雄 尾形良彦	地震予知連絡会会報 第106巻 (7-2)	2021-9	国内
階層的時空間 ETAS モデルなどによる短・中・長期の地震確率予測と検証評価	尾形良彦	地震予知連絡会会報 107 巻	2022-3	国内
Hierarchical Space-Time Point-Process Models (HIST-PPM): Software Documentation No. 35, The Institute of Statistical Mathematics, https://www.ism.ac.jp/e-ditsec/csm/pdf/csm_035.pdf 参照	Ogata, Y. K. Katsura M. Tanemura D. Harte J. Zhuang	Computer Science Monographs, The Institute of Statistical Mathematics,	2021-10	国内
Potential of megathrust earthquakes along the southern Ryukyu Trench inferred from GNSS data	Kano, M. A. Ikeuchi T. Nishimura S. Miyazaki T. Matsushima	Earth Planets Space	2021-10	国外
A convolutional neural network-based classification of local earthquakes and tectonic tremors in Sanriku-oki, Japan, using S-net data	Takahashi, H. K. Tateiwa K. Yano M. Kano	Earth Planets Space	2021-10	国外
Structured regularization based	Yamanaka, Y.	Earth Planets Space	2022-3	国外

local earthquake tomography for the adaptation to velocity discontinuities	S. Kurata K. Yano F. Komaki T. Shiina, A. Kato	Space		
P-wave picking for earthquake early warning: Refinement of a Tpd method	M. Yamada, J. Mori	Geophys. J. Int.	2021-8	国外
Development of the Empirical Function to Estimate Shaking Amplitude and Duration in Buildings Based on Strong Motion Records	M. Yamada	Proceedings of the ESG6 (The 6th IASPEI / IAEE International Symposium: Effects of Surface Geology on Seismic Motion)	2021-8	国外

(g) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

名称	機能
Hierarchical Space-Time Point-Process Models (HIST-PPM)	広域の多様な地震活動に適合するように、時空間の階層的な時空間点過程モデル (HIST-ETAS モデル、非一樣時空間ポアソンモデル、及びマグニチュード分布 b 値) のパラメータをベイズ的事後分布の最大 (MAP) を求めると同時に、予測及びシミュレーションする
ℓ_1 trend filtering based detection of short-term slow slip events	地殻変動データに対して外れ値処理結果・ ℓ_1 トレンドフィルタリング結果・ C_p 規準値・検知確からしさを出力するプログラムを公開した。(東北大学の課題との共同公開)

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（第1節に記述）の計画を遂行するための計算機環境と組織的な作業の初期化を成功させた。そして以下の様に4テーマとも第一段階の成果を得ることができた。具体的には、

テーマAでは、統計地震学や多変量時系列解析を含む、高次元・大容量データの解析に資する統計科学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信頼度を与えるために先ず、時空間 ETAS モデルを高度化し震源データの不均質性などを克服することを目標にした。結果、本年度では、深さと震源メカニズムの両方を組み込んだ高次元 ETAS モデルを構築した。また大地震の破壊域形状や震源メカニズムなどによる余震配置への影響を考慮し、余震群の位置座標から断層形状を再構築して求め、地震のオンライン予測に使えるようにした。これを3次元断層破壊モデルと比して、その予測能力を実証した。そして地球規模の地震を解析するための全地球版 ETAS モデルを開発した。このモデルで全球的な地震活動の解析を補正・近似なしに計算することができるので、直接的に地球規模の背景地震活動を推定し、巨大地震からの日本国内の地震活動への遠隔地からのトリガー効果などを研究する素地ができた。

テーマBでは、連発大地震発生の可能性を考慮した短期確率予測および即時把握をするため、地殻変動や地震動モニタリングを含む各種予測モデルの開発・展開・実装を目指して、地震発生の長期・中期・短期予測と即時把握とそれらの信頼度を与えることを目的とした。結果、ソフトウェア開発の第一歩として、階層時空間 ETAS モデル、空間 b 値モデル、非一様ポアソンモデルなど、デロネ分割に基づく階層ベイズ (HIST-PPM) ソフトウェアを完成させ公開した。これらに基づき地震活動からの内陸部の地震活動度の短期予測のオンライン出力を可能にした。HIST-ETAS の背景地震活動度に基づく、長期予測についても内陸部の近未来の直下型大地震について良好な確率予測の出力を可能にした。さらに、背景地震活動度が日本の歴史被害地震の地域性について良好な対応が見られた。

テーマCは、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とを目的とし、本年度では 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観測点選択法について議論した。

テーマDは連発大地震発生の可能性を考慮した短期確率予測によって精度の高い被害地震の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・実装を目的とした。手始めに、緊急地震速報の手法をよりロバストにするために、日本以外のデータセットに適用し、手法の改善を行った。IPFx 法を改良して台湾中央気象局の地震観測データに適用し、その有効性を検討した。ターゲットとする地震の9割以上を精度良く検出できることが確認された。

本プロジェクトのコアチームは、研究進捗の効率性、アウトプットの価値を評価し、今後数年間の研究進捗を円滑にするための計画を策定している。

4. 活動報告

統計地震学セミナー

- 第77回 2021年6月24日 オンライン 講演者：山田真澄
Title：IPFx: a new source determination algorithm for earthquake early warning
- 第78回 2021年7月27日 オンライン 講演者：熊子瑶(Xiong, Ziyao)
Title：The Research of Long-Term Earthquake Hazard Estimated from a Modern Catalog
- 第79回 2021年9月21日 オンライン 講演者：王婷(Wang, Ting)
Title：A time series model for forecasting earthquake energy release
- 第80回 2021年10月19日 オンライン 講演者：沈迅(Shen, Xun)
Title：Residual Analysis for State Space Models
- 第81回 2021年11月16日 オンライン 講演者：竹尾明子
Title：Observation, detection, evaluation and interpretation of slow earthquakes: is it episodic or chaotic?
- 第82回 2022年2月1日 オンライン 講演者：矢野恵佑
Title： ℓ_1 trend filtering based detection of slow slip events

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。

記事

- 静岡新聞，熊本「本震」兆候、統計処理で解析 静岡県立大・楠城特任准教授ら，2021.12.24, <https://www.at-s.com/news/article/shizuoka/1004285.html>.
- 静岡新聞，富士山の低周波地震1万回検知 研究グループ「観測体制拡充に」，2021.10.13, <https://www.at-s.com/sp/news/article/shizuoka/971775.html?l=10321>.
- 2021年12月、「統計数理 第69巻第2号 特集号 Hawkes過程の新展開と応用」(Hawkes教授の会見記事を含む)が出版された。編集者：庄建倉、小山慎介、野村俊一
- 2022年3月9日に日本経済新聞（日経電子版）に尾形名誉教授の直下型大地震の長期予測マップが紹介された。
<https://www.nikkei.com/article/DGXZQOCD027YN0S2A300C2000000/>
- 2022年3月18日に本STAR-Eプロジェクト計画が文部科学省の「地震本部ニュース」に掲載された。
<https://www.jishin.go.jp/main/herpnews/2022/spr/herpnews2022spr.pdf>

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。昨年度中、各テーマ間と他の STAR-E プロジェクトの研究課題との連携についても開始した。令和5年度では、課題全体で議論し今後の方針を検討することが重要である。そのためにも、各参加機関および協力機関のより一層の研究推進が必要不可欠であるが、これまでの進捗を見る限り、今後も十分な成果が出るであろうと期待している。

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

様式第 2 1

学 会 等 発 表 実 績

委託業務題目「情報科学を活用した地震調査研究プロジェクト (STAR-Eプロジェクト)

課題：長期から即時までの時空間地震予測とモニタリングの新展開」

機関名 大学共同利用研究法人 情報・システム研究機構

1) 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別
Extensions of the spatiotemporal ETAS model and their applications, 口頭講演	Zhuang, J.	東京大学地震研究所共同利用研究集会「地震活動の統計モデルと物理的意味」, オンライン開催	2022年3月8日	国内
自然地震の地震活動解析について, 口頭講演	楠城一嘉	東京大学地震研究所共同利用研究集会「地震活動の統計モデルと物理的意味」, オンライン開催	2022年3月8日	国内
ETASモデルの発展, 口頭講演	尾形良彦	東京大学地震研究所共同利用研究集会「地震活動の統計モデルと物理的意味」, オンライン開催	2022年3月8日	国内
Long-term earthquake forecasts for the Italy and California regions based on the epidemic-type aftershock sequence (ETAS) model for short-term clustering, ポスター発表	Zhuang, J.	2021 Fall Meeting of the American Geophysical Union (AGU), Online	2021年12月17日	国外
Extended ETAS model by incorporating focal mechanisms, ポスター発表	Maita, E. J. Zhuang	2021 Fall Meeting of the American Geophysical Union (AGU), Online	2021年12月17日	国外
Hierarchical and structural complexities on the diffuse fault system associated with the 2000 Tottori earthquake revealed by a hyperdense seismic observation 口頭講演	Kato, A.	2021 Fall Meeting of the American Geophysical Union (AGU), Online	2021年12月16日	国外
The research of spherical time-space ETAS model, ポスター発表	Xiong, Z. J. Zhuang	2021 Fall Meeting of the American Geophysical Union (AGU), Online	2021年12月17日	国外

Estimation of near-surface density based on Bayesian method over the Delaunay tessellation with second-order smoothness prior, ポスター発表	Niu, Y. J. Zhuang	2021 Fall Meeting of the American Geophysical Union (AGU), Online	2021年12月15日	国外
Long-term probability earthquake forecasts based on the ETAS model, 口頭講演	庄 建倉	日本地震学会2021年度秋季大会, オンライン開催	2021年10月14日	国内
短周期地震計アレイ観測による深部低周波微動の高速移動現象, 口頭講演	加藤愛太郎 竹尾明子 小原一成	日本地震学会2021年度秋季大会, オンライン開催	2021年10月15日	国内
地殻内地震活動とGNSS変位から推定される表層荷重の季節変動性, 口頭講演	上田 拓 加藤愛太郎 C. Johnson 寺川寿子	日本地震学会2021年度秋季大会, オンライン開催	2021年10月14日	国内
The research of spherical time-space ETAS model, 口頭講演	熊 子瑤, 庄 建倉	日本地震学会2021年度秋季大会, オンライン開催	2021年10月14日	国内
スロースリップイベントによる地震活動誘発効果を陽に組み込んだETASモデルの開発, 口頭講演	西川友章 西村卓也	日本地震学会2021年度秋季大会, オンライン開催	2021年10月14日	国内
アジョイント法に基づく2003年十勝沖地震の余効すべりの現状把握と短期推移予測, ポスター発表	加納将行 宮崎真一 石川洋一 平原和朗	日本地震学会2021年度秋季大会, オンライン開催	2021年10月14日	国内
A filtering formula for the renewal Hawkes process, 口頭講演	庄 建倉	2021年度統計関連学会連合大会, オンライン開催	2021年9月8日	国内
余震誘発効果を考慮した繰り返し地震の非定常更新過程, 口頭講演	野村俊一 田中昌之	2021年度統計関連学会連合大会, オンライン開催	2021年9月6日	国内
A study on the spherical space-time ETAS model, 口頭講演	熊 子瑤 庄 建倉 尾形良彦	2021年度統計関連学会連合大会, オンライン開催	2021年9月8日	国内
Second-order smoothness prior over Delaunay tessellation, 口頭講演	牛 源源, 庄 建倉	2021年度統計関連学会連合大会, オンライン開催	2021年9月7日	国内
階層的時空間ETASモデルなどによる短期・中期・長期の地震確率予測と検証評価 (招待講演)	尾形良彦	2021年度統計関連学会連合大会, オンライン開催	2021年9月	国内
Modified estimation and forecasting of the hierarchical space-time ETAS (HIST-ETAS) model	Ogata, Y. K. Katsura	2021 SCEC Annual Meeting, Online	2021年9月12-17日	国外

for earthquake catalogs in a wide area possessing long- and short-term incompleteness, ポスター発表				
時空間的な非一様性を有する広域の地震カタログに対するHIST-ETASモデルの修正推定, 口頭講演	尾形良彦 桂 康一	日本地震学会2021年度秋季大会, オンライン開催	2021年10月15日	国内
点過程モデルが推定する背景地震活動の時間変動から見た長野県中部の群発地震活動の特徴, 口頭講演	熊澤貴雄 尾形良彦	日本地震学会2021年度秋季大会, オンライン開催,	2021年10月14日	国内
余震誘発効果を考慮した繰り返し地震の非定常更新過程, 口頭講演	野村俊一 田中昌之	2021年度統計関連学会連合大会, オンライン開催	2021年9月6日	国内
非定常ETASモデルから見える能登半島群発地震活動の地域的变化, 招待講演	熊澤貴雄 尾形良彦	第233回 地震予知連絡会議	2021年11月26日	国内
地震災害予測のための地球観測データのデジタルアースへの適用 -地震活動度解析の高度化と可視化-, 招待講演	長尾年恭 楠城一嘉 鴨川 仁 井筒 潤	問題複合体を対象とするデジタルアース共同利用・共同研究拠点 2021年度成果報告会, 中部大学中部高等学術研究所国際GISセンター, オンライン,	2022年3月7-8日	国内
The 2016 Kumamoto earthquake sequence implying the possible improvement of the Foreshock Traffic-Light System, 【招待講演】	K. Z. Nanjo J. Izutsu Y. Orihara M. Kamogawa	日本地震予知学会 第8回学術講演会, 21-13, ハイブリッド(貸会議室ビズモア東京駅八重洲)	2021年12月25日,	国内
A preliminary study on low-frequency earthquakes at Mt. Fuji, Japan, using the matched filter method, ポスター発表	K. Z. Nanjo Y. Yukutake	AGU Fall Meeting 2021, ハイブリッド (New Orleans, USA)	2021年12月13-17日	国外
統計科学的手法を用いて地震活動を評価する研究, 【招待講演】	楠城一嘉	統計物理と統計科学のセミナー 統計数理研究所, オンライン	2021年10月26日	国内
富士山直下で起きる低周波地震の研究の序報: Matched Filter法を用いた地震カタログの作成とカタログの性能評価, ポ	楠城一嘉 行竹洋平	日本地震学会2021年度秋季大会, オンライン	2021年10月14日	国内

スター発表				
2016年熊本地震前後の地震活動のパターンについて、ポスター発表	楠城一嘉 井筒潤 織原義明 鴨川仁	日本地震学会2021年度秋季大会, オンライン	2021年10月14日	国内
Adjoint-based Uncertainty Quantification of Frictional Inhomogeneity on Slow-slipping Fault (ポスター)	Ito, S. M. Kano H. Nagao	Asia Oceania Geosciences Society 2021	2021年8月	国際
予測分布論の最近の進展 (口頭)	矢野恵佑	日本数学会2021年度秋季総合分科会	2021年9月	国内
擬ベイズ事後分布に基づく予測評価のための情報量規準 (口頭)	矢野恵佑 伊庭幸人	2021年度統計関連学会連合大会	2021年9月	国内
最小情報コピュラモデルとその拡張 (口頭)	清 智也 矢野恵佑	2021年度統計関連学会連合大会	2021年9月	国内
ノンパラメトリックリンク回帰における漸近分散の共変量依存性 (口頭)	奥野彰文 矢野恵佑	2021年度統計関連学会連合大会	2021年9月	国内
地震波速度不連続面の検出のためのスパース正則化に基づく地震波トモグラフィ (口頭)	倉田澄人 山中遥太 矢野恵佑 駒木文保 椎名高裕 加藤愛太郎	2021年度統計関連学会連合大会	2021年9月	国内
アジョイント法に基づく2003年十勝沖地震の余効すべりの現状把握と短期推移予測 (ポスター)	加納将行 宮崎真一 石川洋一 平原和朗	日本地震学会2021年度秋季大会	2021年10月	国内
ℓ_1 トレンドフィルタリングによる西南日本GNSSアレイからの短期スロースリップ現象の検出 (口頭)	矢野恵佑 加納将行	日本地震学会2021年度秋季大会	2021年10月	国内
構造正則化を応用した地震波トモグラフィ法による速度不連続面の検出 (口頭)	倉田澄人 山中遥太 矢野恵佑 駒木文保 椎名高裕 加藤愛太郎	日本地震学会2021年度秋季大会	2021年10月	国内
MCMC法を用いた2004年新潟県中越地震震源域周辺の地震波速度分布の推定 (ポスター)	椎名高裕 加納将行 倉田澄人 加藤愛太郎	日本地震学会2021年度秋季大会	2021年10月	国内
アジョイント法に基づく2003年十勝沖地震の余効	加納将行 宮崎真一	日本測地学会第136回講演会	2021年11月	国内

すべりの現状把握と短期推移予測（ポスター）	石川洋一 平原和朗			
ℓ_1 トレンドフィルタリングによる西南日本GNSSアレイからの短期スロースリップ現象の検出（口頭）	矢野恵佑 加納将行	日本測地学会第136回講演会	2021年11月	国内
予測の情報量規準（口頭）	矢野恵佑	情報計測オンラインセミナー	2021年12月	国内
On estimating generalization gaps via the functional variance in overparameterized models	Yano, K.	CMStatistics 2021	2021年12月	国際
地殻変動データを用いた沈み込み帯の断層すべりの現状把握・短期推移予測に資するデータ同化研究（口頭）	加納将行	第31回 AI・データ利活用研究会	2022年3月	国内
機械学習による地震波検測の実用化に向けた検討（口頭発表）	溜渕功史	研究集会「機械学習時代の地震研究」	2022年3月	国内
Tpd法を利用した簡便なP波検知手法（口頭発表）	山田真澄	研究集会「固体地球科学的諸現象のリアルタイム監視予測システムと利活用」	2022年1月	国内
Tpd法を利用した簡便なP波検知手法（口頭発表）	山田真澄	研究集会「都市地震リスク軽減に向けたデータ駆動型研究の最前線」	2022年3月	国内
Good Practices for Designing and Operationalizing an Earthquake Early Warning System (EEWS)（口頭発表）	Yamada, M.	世界銀行ワークショップ「Knowledge Exchange on Good Practices for Designing and Operationalizing an EEWS」	2021年12月	国外
Development of the Empirical Function to Estimate Shaking Amplitude and Duration in Buildings Based on Strong Motion Records（口頭発表）	Yamada, M.	ESG6 (The 6th IASPEI / IAEE International Symposium: Effects of Surface Geology on Seismic Motion)	2021年8月	国外
A Bayesian framework for Earthquake Early Warning（口頭発表）	Stephen Wu	日本地震学会秋季学会	2021年10月	国内
Towards a performance-based probabilistic earthquake early	Stephen Wu	研究集会「固体地球科学的諸現象のリアルタイム監視予測シ	2022年1月	国内

warning framework (口頭発表)		システムと利活用」		
浅部低周波地震モニタリングシステムの構築 (口頭発表)	溜瀧功史	研究集会「固体地球科学的諸現象のリアルタイム監視予測システムと利活用」	2022年1月	国内

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文 (発表題目)	発表者氏名	発表した場所 (学会誌・雑誌等名)	発表した時期	国内・外の別
Exact simulation of extrinsic stress-release processes	Lee, Y. Laub, P. Taimre, T. Zhao, H. Zhuang, J.	Applied Probability Journals	2022-2-14	国外
Data replenishment of five moderate earthquake sequences in Japan, with semi-automatic cluster selection	Zheng, Y. B. Enescu J. Zhuang C. Yu	Earthquake Science	2021-8-25	国外
Gravity Observations and Apparent Density Changes before the 2017 Jiuzhaigou Ms7.0 Earthquake and Their Precursory Significance	Yang, J. S. Chen B. Zhang J. Zhuang L. Wang H. Lu	Entropy	2021-12-16	国外
Changes in seismicity pattern due to the 2016 Kumamoto earthquake sequence and implications for improving the foreshock traffic-light system	K. Z. Nanjo J. Izutsu Y. Orihara M. Kamogawa	Tectonophysics	2021-12-6	国外
Changes in the b value in and around the focal areas of the M6.9 and M6.8 earthquakes off the coast of Miyagi prefecture, Japan	K. Z. Nanjo A. Yoshida	Earth, Planets and Space	2021-9-14	国外
地震と火山と防災のはなし	楠城一嘉 編著	成山堂書店	2022-3-28	国内
統計地震学における ETAS モデル—その進展とホークス型モデル	庄 建倉 尾形 良彦	統計数理	2021-12	国内

特集 Hawkes 過程の新展開と応用	庄 建倉 小山慎介 野村俊一	統計数理	2021-12	国内
地震学における非線形 Hawkes 過程：摩擦構成則に基づく地震活動モデル	岩田貴樹	統計数理	2021-12	国内
時空間 ETAS モデルの拡張バージョンとその応用	郭 一 庄 建倉	統計数理	2021-12	国内
余震誘発効果を考慮した繰り返し地震の予測	野村俊一 田中昌之	統計数理	2021-12	国内
長野・岐阜・福井県境付近の群発地震活動について	熊澤貴雄 尾形良彦	地震予知連絡会会報 第106巻 (7-2)	2021-9	国内
階層的時空間 ETAS モデルなどによる短・中・長期の地震確率予測と検証評価	尾形良彦	地震予知連絡会会報 107 巻	2022-3	国内
Hierarchical Space-Time Point-Process Models (HIST-PPM): Software Documentation No. 35, The Institute of Statistical Mathematics, https://www.ism.ac.jp/editsec/csm/pdf/csm_035.pdf 参照	Ogata, Y. K. Katsura M. Tanemura D. Harte J. Zhuang	Computer Science Monographs, The Institute of Statistical Mathematics,	2021-10	国内
Potential of megathrust earthquakes along the southern Ryukyu Trench inferred from GNSS data	Kano, M. A. Ikeuchi T. Nishimura S. Miyazaki T. Matsushima	Earth Planets Space	2021-10	国外
A convolutional neural network-based classification of local earthquakes and tectonic tremors in Sanriku-oki, Japan, using S-net data	Takahashi, H. K. Tateiwa K. Yano M. Kano	Earth Planets Space	2021-10	国外
Structured regularization based local earthquake tomography for the adaptation to velocity discontinuities	Yamanaka, Y. S. Kurata K. Yano F. Komaki T. Shiina, A. Kato	Earth Planets Space	2022-3	国外
P-wave picking for earthquake early warning: Refinement of a Tpd method	M. Yamada, J. Mori	Geophys. J. Int.	2021-8	国外

Development of the Empirical Function to Estimate Shaking Amplitude and Duration in Buildings Based on Strong Motion Records	M. Yamada	Proceedings of the ESG6 (The 6th IASPEI / IAEE International Symposium: Effects of Surface Geology on Seismic Motion)	2021-8	国外
--	-----------	---	--------	----

(注1) 発表者氏名は、連名による発表の場合には、筆頭者を先頭にして全員を記載すること。

(注2) 本様式はexcel形式にて作成し、甲が求める場合は別途電子データを納入すること。