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)
地震データの不完全性に対応した地震活動およびそれに伴う揺れの準リアルタイム時空間予測に関する研究開発

令和６年度

成果報告書

令和７年５月

文　部　科　学　省　研　究　開　発　局

国立研究開発法人　防災科学技術研究所

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、国立研究開発法人防災科学技術研究所が実施した令和６年度科学技術試験研究委託事業「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)「地震データの不完全性に対応した地震活動およびそれに伴う揺れの準リアルタイム時空間予測に関する研究開発」」成果を取りまとめたものです。

グラビア

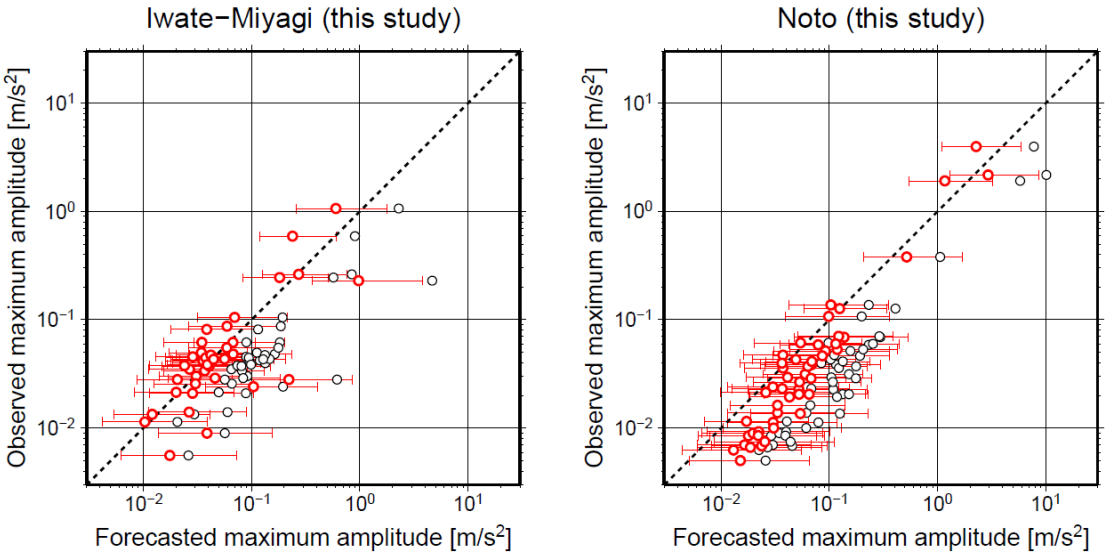


図１　地震計記録に基づき将来発生しうる揺れの強さを予測する手法により予測した最大振幅（横軸）と観測された最大振幅（縦軸）の比較（左：2008 年岩手・宮城内陸地震、右：2024 年能登半島地震）。令和５年提案手法による予測（白丸）で見られた最大振幅の過大評価が、高度化を図った令和６年度提案手法（赤丸）では大きく改善された。

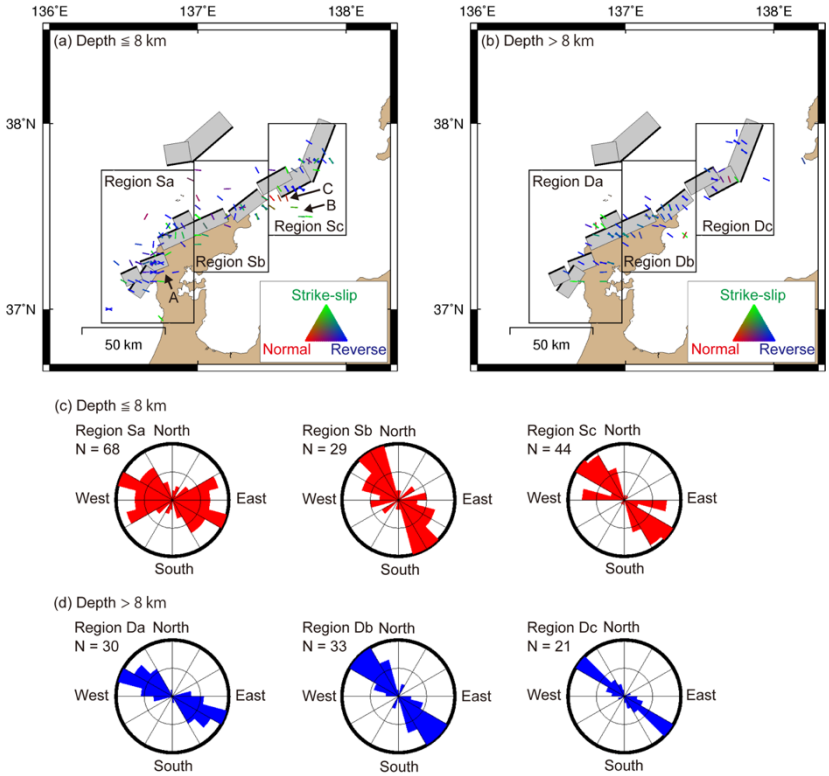


図２　地震の発生位置や断層面・断層運動の方向などを示すセントロイド・モーメントテンソル解（CMT 解）を３次元地下構造モデルに基づき高精度に推定する手法を、2024 年能登半島地震の余震に適用した結果。推定された CMT 解や圧縮軸の空間分布から、空間的に複雑に変化する地震活動および地殻内応力の分布が示唆された。

はじめに

近年、IoT、ビッグデータ、AI といった情報科学分野の科学技術が著しく進展しており、国内外で地震分野への情報科学分野の技術の導入や連携が始まっている。また、令和元年５月に政府の地震調査研究推進本部で策定された、「地震調査研究の推進について―地震に関する観測、測量、調査及び研究の推進についての総合的かつ基本的な施策（第３期）―」においても、我が国の地震調査研究が今後、新たな科学技術も活用しながら、防災・減災の観点から社会に対する更なる貢献をしていくことへの期待が示された。このような背景を踏まえ、文部科学省では、情報科学の知見を採り入れた新たな地震調査研究を推進するため、令和３年度より、「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※、以下「STAR-E プロジェクト」）」を開始した。STAR-E プロジェクトでは、複数の研究課題を進めることによって、革新的創造的な研究成果の創出を目指すのみならず、情報科学と地震学の両分野の研究者が参加する研究フォーラムの開催、情報交換プラットフォームの運営など、両分野の連携を促進する取組により、次世代を担う若手研究者の育成も含めた、「情報科学×地震学」分野全体の発展を目指す。

本研究課題「地震データの不完全性に対応した地震活動およびそれに伴う揺れの準リアルタイム時空間予測に関する研究開発」は、STAR-E プロジェクトが進める研究課題の一つである。これまでに膨大な地震データが観測・蓄積されてきたが、複雑な自然現象を限られた資源で観測している以上、地震データは本質的に不完全であり、それに基づく予測には限界が生じる。本研究課題では、地震データの不完全性を打破する形での大地震直後の地震活動およびそれに伴う揺れの準リアルタイム時空間予測の実現を目指し、情報科学の知見を地震観測データおよび地震学・地震工学のドメイン知と組み合わせ、各種要素技術の研究開発およびそれらをつなげた予測アプローチの確立を図る。

目　次

１．研究課題の概要 …… 1

２．研究成果の説明 …… 3
(1)業務の内容 …… 3
(2)令和６年度の成果 …… 7

３．まとめ …… 28

４．活動報告 …… 30

５．むすび …… 31

１．研究課題の概要

地震データの不完全性を打破する形での大地震直後の地震活動およびそれに伴う揺れの準リアルタイム時空間予測の実現を目指し、情報科学の知見を地震観測データおよび地震学・地震工学のドメイン知と組み合わせ、各種要素技術の研究開発およびそれらをつなげた予測アプローチの確立を図る。

このうち、大地震直後の地震カタログの不完全性に対応した地震活動の準リアルタイム予測に向け、サブテーマ 1-A では不完全性を予め考慮した上での地震カタログを用いた予測に関する研究開発を、サブテーマ 1-B では地震動データそのものを用いた将来に発生しうる揺れの強さの予測に関する研究開発を実施する。また観測データの機械学習に基づく新たな地震動予測アプローチの実現に向け、サブテーマ 2-A ではガウス過程回帰に基づくデータ同化による地震動の空間補間に関する研究開発を、サブテーマ 2-B では Site specific な地震動予測モデルによる地震動生成に関する研究開発を実施する。それぞれの詳細は以下の通り。

サブテーマ 1-A「不完全性を予め考慮した上での地震カタログを用いた予測に関する研究開発」

地震カタログの不完全性を考慮する予測手法（e.g., Omi et al. 2013）について、ETAS や切断 G-R など、これまで十分に検証されていなかった地震活動モデルへの拡張可能性とその妥当性を検討するとともに、地震の空間分布情報を用いることで地震発生の時空間予測へ拡張するための手法を検討する。また従来法で考慮されていなかった 2 次余震の予測にも取り組む。さらに地震活動の予測をサブテーマ 2-A および 2-B に基づくアプローチや距離減衰式などを用いた地震動予測へとつなげることも行う。これらを過去に発生した余震活動を伴う地震活動データに適用し、性能を検証する。

サブテーマ 1-B「地震動データそのものを用いた将来に発生しうる揺れの強さの予測に関する研究開発」

連続地震動記録の区間最大値（一定時間区間ごとの最大振幅や最大計測震度などの地震動指標）に極値統計解析を施し、これらの指標の超過確率予測を行うとともに、閾値以上の揺れ（例えば有感地震相当）が生じる回数の時間予測を行う。また 2 次余震に伴う揺れも考慮した最大値予測、閾値超過数予測に関する研究を行う。大地震時のみならず、平穏時の連続地震動記録にも同様の解析を施し、閾値以上の揺れの確率や回数が「普段の何倍か」という情報を付加することを目指す。さらには観測地点での揺れの将来予測だけでなく、サブテーマ 2-A で取り組む地震動の空間補間技術も活用し、観測点の無い任意の地点（領域全体）での揺れの将来予測に拡張する技術を開発する。

サブテーマ 2-A「ガウス過程回帰に基づくデータ同化による地震動の空間補間に関する研究開発」

近傍観測点での観測データを空間補間することで波動場の再構築を行い、任意の対象地点における地震動指標の生成、および任意地点における時刻歴地震動波形そのものの

生成に挑戦する。距離減衰式などの物理モデルに基づく予測値を事前情報として、地震動指標値に関するガウス過程回帰モデルを構築し、地震時に得られた観測データに対するモデルフィッティングと内挿を行うことで、物理的手法と情報学的手法を統合した地震動指標のデータ同化手法を確立する。また、地震動の時刻歴波形生成においても、地震動波形記録のウェーブレット係数値に対して同様のアプローチによる空間内挿を行い、得られた時間周波数成分に対してウェーブレット逆変換を行うことによって、任意地点における地震動の時刻歴波形を得る手法を開発する。

サブテーマ 2-B「Site specific な地震動予測モデルによる地震動生成に関する研究開発」

個別地点における過去記録を機械学習した地震動予測モデルを用いて、その地点に特化した形でスペクトル情報および地震波形そのものを生成する Site specific な地震動生成技術の開発を行う。さらに近接する複数の観測点での情報を用いて、地震情報とサイト情報の両方をインプットとすることで、より汎用性の高いモデルを試作する。

２．研究成果の説明

(1)業務の内容

(a) 業務の目的

地震データの不完全性を打破する形での大地震直後の地震活動およびそれに伴う揺れの準リアルタイム時空間予測の実現を目指し、情報科学の知見を地震観測データおよび地震学・地震工学のドメイン知と組み合わせ、各種要素技術の研究開発およびそれらをつなげた予測アプローチの確立を図る。

このうち、大地震直後の地震カタログの不完全性に対応した地震活動の準リアルタイム予測に向け、サブテーマ 1-A では不完全性を予め考慮した上での地震カタログを用いた予測に関する研究開発を、サブテーマ 1-B では地震動データそのものを用いた将来に発生しうる揺れの強さの予測に関する研究開発を実施する。また観測データの機械学習に基づく新たな地震動予測アプローチの実現に向け、サブテーマ 2-A ではガウス過程回帰に基づくデータ同化による地震動の空間補間に関する研究開発を、サブテーマ 2-B では Site specific な地震動予測モデルによる地震動生成に関する研究開発を実施する。各サブテーマにおいては、大地震発生後の地震活動の時空間的な発生確率を準リアルタイムに予測するための枠組みの確立（サブテーマ 1-A)、任意地点での揺れの発生確率を大地震発生後に準リアルタイムで予測するための枠組みの確立（サブテーマ 1-B)、地震動指標や地震波形などの時系列データの空間補間を目的としたデータ同化手法の確立（サブテーマ 2-A)、スペクトル情報や地震波形などの時系列データの生成を目的とした Site specific な地震動予測技術の確立（サブテーマ 2-B）を目指す。

また研究課題全体としては、サブテーマ間で連携し、

- 地震カタログに基づいた大地震発生後の地震活動およびその揺れに関する見通し情報の予測
- 地震動そのものに基づいた任意地点での揺れの見通し情報の予測

という二つの予測スキームの確立を図り、実記録での検証を行う。

(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
国立研究開発法人防災科学技術研究所 地震津波複合災害研究部門 主任研究員	久保 久彦	R6.4.1 ～ R7.3.31	14,203,388 円	4,261,016 円
国立研究開発法人防災科学技術研究所 地震津波発生基礎研究部門 部門長	汐見 勝彦	R6.4.1 ～ R7.3.31		
国立研究開発法人防災科学技術研究所 地震津波複合災害研究部門 主任専門研究員	澤﨑 郁	R6.4.1 ～ R7.3.31		
国立研究開発法人防災科学技術研究所 地震津波複合災害研究部門 特別研究員	山谷 里奈	R6.4.1 ～ R7.1.31		
国立大学法人山梨大学 工学部土木環境工学科 准教授	宮本 崇	R6.4.1 ～ R7.3.31	4,276,538 円	1,282,961 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：

1-A においては、既存の地震活動予測システムの過去５年間の稼働状況を調査し、その予測結果の検証に着手した。1-B においては、既存の極値統計解析手法を過去データに適用し、その予測性能の検証に着手した。2-A においては、地震動指標の空間補間を目的とした、ガウス過程回帰に基づくデータ同化手法の開発に着手した。2-B においては、スペクトル情報に関する Site specific な地震動予測モデルの構築に着手した。

2) 令和４年度：

1-A においては、前年度に引き続き既存の地震活動予測システムの予測性能を検証するとともに、様々な地震活動モデルの適用とその適用の妥当性評価に着手した。1-B においては、前年度に引き続き既存の極値統計解析手法の予測性能を検証するとともに、極値統計解析手法に通常時の地震活動の影響を反映させ、さらにパラメータの

事前分布を組み込んだ定式化を行うことで、同手法の高度化を行った。2-A においては、前年度に引き続き地震動指標の空間補間手法の高度化を進めた。2-B においては、スペクトル情報に関するSite specificな地震動予測モデルの構築を進めるとともに、地震波形などの時系列データに関する Site specific な地震動予測モデルの開発に向けた基礎的検討を行った。

3) 令和５年度：

1-A においては、前年度に引き続き様々な地震活動モデルの適用とその適用の妥当性評価を進めるとともに、地震活動予測を地震動予測と結びつけた予測アプローチに関して検討を行った。1-B においては、前年度に引き続き極値統計解析手法の高度化を図るとともに、2-A の地震動空間補間技術等を活用した任意地点での揺れ予測への拡張に着手した。2-A においては、地震波形などの時系列データの空間補間手法の開発を行うとともに、2-B と組み合わせた地震動予測アプローチの開発に着手した。2-B においては、前年度に引き続き地震波形などの時系列データに関する Site specific な地震動予測モデルの開発を進めるとともに、2-A と組み合わせた地震動予測アプローチの開発に着手した。

4) 令和６年度：

1-A においては、前年度に引き続き高解像度な地震カタログ構築方法の検討および地震活動予測を地震動予測と結びつけた予測アプローチの開発を進めるとともに、地震活動の時空間的特徴を踏まえた予測手法の拡張に着手した。1-B においては、前年度に引き続き任意地点での揺れ予測への拡張を進めるとともに、２次余震に伴う揺れも考慮した予測手法の拡張に着手した。2-A においては、前年度に引き続き、地震波形などの時系列データの空間補間手法の高度化を進め、2-B と組み合わせた地震動予測アプローチの開発を進めた。2-B においては、前年度に引き続き、地震波形などの時系列データに関する Site specific な地震動予測モデルの高度化を行い、2-A と組み合わせた地震動予測アプローチの開発を進めるとともに、汎用的な地震動生成の技術開発に向けた基礎的検討を行った。

5) 令和７年度：

1-A においては、前年度に引き続き、地震活動予測を地震動予測と結びつけた予測アプローチの予測性能の評価を行い、地震活動の時空間的特徴を踏まえた地震活動予測手法の拡張を進める。1-B においては、前年度に引き続き、任意地点での揺れ予測への拡張を行い、２次余震に伴う揺れや最大振幅の飽和も考慮した予測手法の拡張を進める。2-A においては、前年度に引き続き、地震波形などの時系列データの空間補間手法の高度化を行い、2-B と組み合わせた地震動予測アプローチの高度化を進める。2-B においては、前年度に引き続き、地震波形などの時系列データに関する Site specific な地震動予測モデルの高度化を行うとともに、2-A と組み合わせた地震動予測アプローチの高度化を行い、汎用的な地震動生成の技術開発を進める。

(d) 令和６年度の業務の目的

サブテーマ 1-A「不完全性を予め考慮した上での地震カタログを用いた予測に関する研究開発」

前年度に引き続き、高解像度な地震カタログ構築方法の検討及び地震活動予測を地震動予測と結びつけた予測アプローチの開発を進めるとともに、地震活動の時空間的特徴を踏まえた予測手法の拡張に着手する。

サブテーマ 1-B「地震動データそのものを用いた将来に発生しうる揺れの強さの予測に関する研究開発」

前年度に引き続き任意地点での揺れ予測への拡張を進めるとともに、２次余震に伴う揺れも考慮した予測手法の拡張に着手する。

サブテーマ 2-A「ガウス過程回帰に基づくデータ同化による地震動の空間補間に関する研究開発」

前年度に引き続き、地震波形などの時系列データの空間補間手法の高度化を進め、2-B と組み合わせた地震動予測アプローチの開発を進める。

サブテーマ 2-B「Site specific な地震動予測モデルによる地震動生成に関する研究開発」

前年度に引き続き、地震波形などの時系列データに関する Site specific な地震動予測モデルの高度化を行い、2-A と組み合わせた地震動予測アプローチの開発を進めるとともに、汎用的な地震動生成の技術開発に向けた基礎的検討を行う。

(2)令和６年度の成果

(2-1)サブテーマ 1-A「不完全性を予め考慮した上での地震カタログを用いた予測に関する研究開発」

(a) 業務の要約

令和５年度に開発した大地震直後の余震地震動ハザード評価手法の高度化を行うとともに、過去に発生した実地震での性能検証を進めた。また、同手法に余震活動の空間的な広がりを取り込むために､質および量が低下した大地震発生直後の地震カタログからでも、余震活動の空間的な広がりをカーネル密度推定によって安定的に推定する手法を新たに開発した。東北地方太平洋沖で発生したマグニチュード（M）5.2 以上の地震に関して、3 次元地下構造モデルを用いた解析により、高精度なセントロイド・モーメントテンソル解のカタログを構築した。2024 年能登半島地震の余震活動に対しても同様の解析を行い、複雑な余震活動の空間的な特徴の変化を捉えた。

(b) 業務の成果

1) 予測地震カタログデータに基づく余震地震動ハザード評価手法の高度化と検証

サブテーマ 1-A では、サブテーマ 2-B との連携のもと、大地震発生直後に多発する余震による地震動ハザードを地震カタログデータに基づいて評価する手法の開発を進めている。令和５年度には、大地震発生直後の地震カタログの不完全性に対応した地震発生確率予測手法(Omi et al. 2013, 2016)によって推定される余震発生確率情報に、確率論的地震動予測アプローチおよび緊急地震速報の地震動予測手法を組み合わせ、余震地震動ハザードを評価するスキームを構築した。令和６年度は、同手法について地震動予測の不確定性の取り込みや予測超過期待値（ある基準震度以上の揺れが予測地点において予測期間中に何回発生するかを表した値）の算出などの高度化を図るとともに、実際に過去に発生した地震データを用いた性能検証を進めた。

図３に、2016 年熊本地震の最大前震（M6.5）および本震（M7.1）後における震度観測点での揺れについて、それぞれの地震発生６時間後から１日間の予測超過期待値と観測超過頻度を示す。ここでの予測値はそれぞれの地震発生から６時間の Hi-net 自動震源カタログから推定された余震発生確率情報に基づいて算出している。両地震において、予測超過期待値が高いほど、その揺れに実際に遭遇した頻度が高くなっており、評価手法の妥当性が示された。最大前震は本震よりもマグニチュードが 0.6 小さいにも関わらず、より高い超過期待値が予測されており、観測とも整合している。比較として、Omi et al. (2016)による汎用モデル（generic model）の値を地震活動モデルのパラメータに用いた場合の予測結果も図中に示すが、その予測は最大前震において大幅な過小評価となっており、また本震においても過小評価の傾向が見られる。汎用モデルは観測データが十分でない場合に用いられることが多いが、余震地震動ハザードを精度よく評価するためには、今回開発した手法のように実際の地震活動に基づいた評価を行う必要があることを示す。

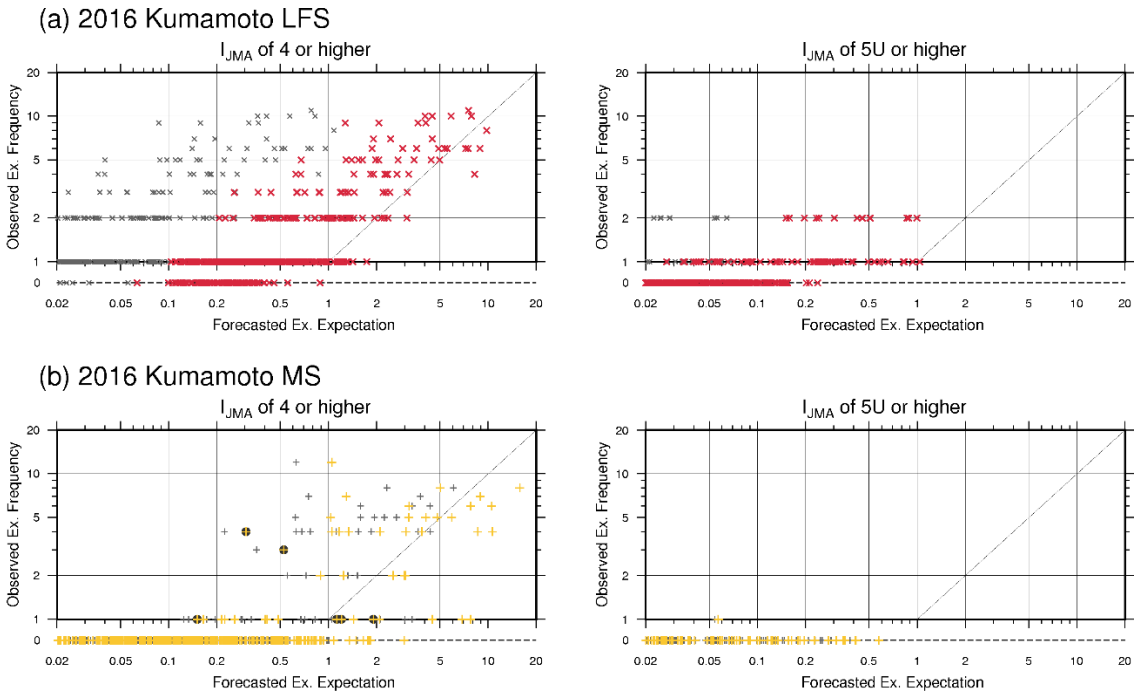


図３ 2016 年熊本地震の最大前震（LFS, M6.5）および本震（MS, M7.1）後における、震度観測点での揺れに関する予測超過期待値（最初の地震発生６時間後から１日間）と観測超過頻度を示す。左図が震度４以上の揺れに、右図が震度５強以上の揺れに対応する。色付きシンボルは最初の地震発生から６時間後までの Hi-net 自動震源カタログから Omi et al. (2013, 2016)に基づき推定された地震活動モデルのパラメータに用いた場合の予測結果を、灰色シンボルは Omi et al. (2016)による汎用モデルの値を地震活動モデルのパラメータに用いた場合の予測結果を示す。

2) 大地震発生直後の地震カタログデータに基づく余震域推定手法の開発

令和５年度に開発した大地震直後の余震地震動ハザード評価手法は、実際の余震活動の空間的な広がりを反映できていないという課題があった。この課題に対応するためには、質および量が低下した大地震発生直後の地震カタログからでも、余震域を安定的に推定する手法を開発する必要がある。そこで令和６年度はカーネル密度推定を用いた余震域推定手法を開発した。図４に 2024 年能登半島地震の余震に適用した例を示す。地震カタログの震源分布を２次元点群分布と見なし、これにカーネル密度推定を適用することで、２次元の確率密度分布をノンパラメトリックに推定し、確率密度 0.5 以上の範囲を余震域として抽出した。これで得られる確率密度分布は複雑な空間分布にも対応できる高い柔軟性を有している。一方、推定結果の頑健性には難があるケースが見られた。そのため、カーネル密度推定で得られた２次元確率密度分布に回転を有する２次元ガウス分布をあてはめた上で、この２次元ガウス分布の確率密度 0.5 以上の範囲を余震域として抽出する方法も検討した。本手法を、2024 年能登半島地震をはじめとする実地震データに適用したところ、大地震発生後３～６時間の地震カタログデータでも安定して余震域を推定できること、またカーネル密度推定で得られた確率密度分布は余震活動の空間的な濃淡に関する情報を有していることを確認できた。

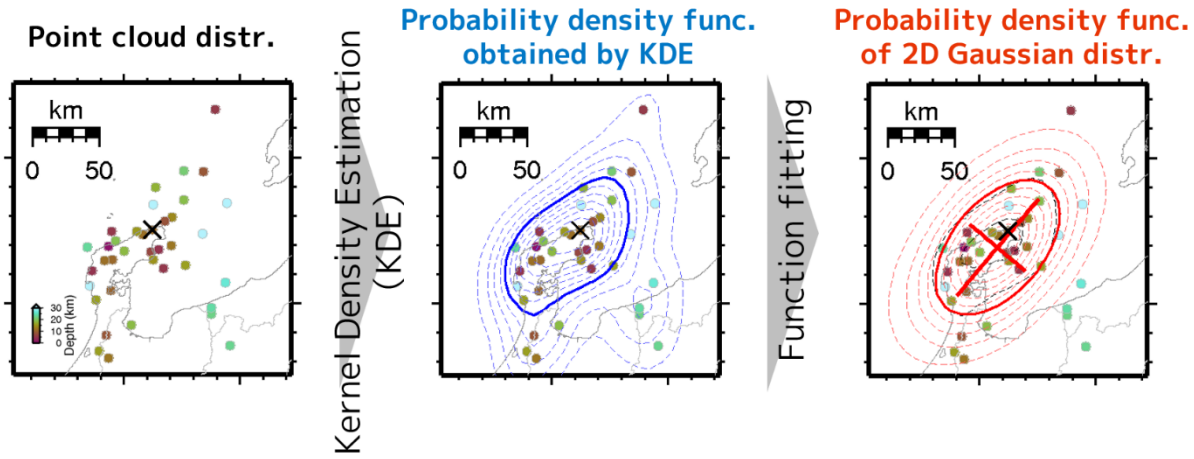


図４　カタログデータに基づく大地震直後の余震域推定手法の模式図。例として、2024 年能登半島地震発生から３時間の震源カタログデータにおける適用事例を示している。

3) 海域で発生する地震を対象としたセントロイド・モーメントテンソル解析の高度化

地震の発生位置や断層面・断層運動の方向などを示すセントロイド・モーメントテンソル解（CMT 解）は、地震の発生機構の理解に広く使われている。地震の規模別発生頻度などの地震活動は地震の発震機構に依存するという報告がある一方で（Schorlemmer et al., 2005)、海域で発生する地震などに対しては解の決定精度が不十分な場合がある。本課題では、東北地方太平洋沖で発生した M5.2 以上の地震を対象とし、３次元地下構造モデルに基づき計算したグリーン関数を使用して S-net から得られた波形を解析することにより、従来法よりも高精度な CMT 解が推定可能であることを確認した。この結果を踏まえ、同地域を対象とした高精度な CMT 解カタログの構築を進め、公開した。

2024 年１月に発生した能登半島地震の余震域は海陸の境界部に広がっている。この地域の複雑な地下構造は、余震分布の適確な把握を困難にする大きな要素となっている。そこで、M3.2 以上の能登半島地震の余震に関して、東北地方太平洋沖と同様に３次元地下構造モデルを使用した CMT 解析を行い、地震活動の特徴の把握に取り組んだ。解析には陸域に設置された観測網のデータのみを使用したにもかかわらず、海域で発生した余震の震源深さの分布は、海底地震計の臨時観測網を使用した結果と調和的であった。推定した CMT 解や圧縮軸の空間分布から、空間的に複雑に変化する地震活動および地殻内応力の分布が示唆される結果となった（図５）。

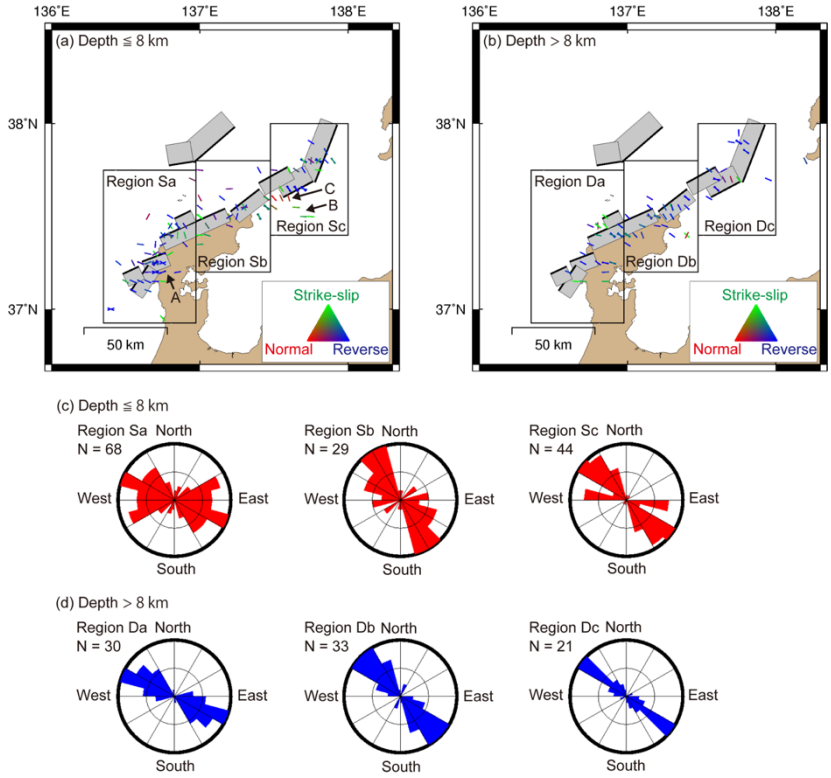


図５　2024 年能登半島地震の余震の CMT 解から得られた圧縮軸の空間分布

(c) 結論ならびに今後の課題

大地震直後の余震地震動ハザード評価手法の高度化および実地震での性能検証を行うとともに、大地震発生直後の地震カタログから余震活動の空間的な広がりをカーネル密度推定によって安定的に推定する手法を開発した。今後は、これらの手法を組み合わせ、余震活動の空間的な広がりを考慮した大地震直後の余震地震動ハザード評価手法の開発を進めていく。

東北地方太平洋沖で発生した地震に関しては、３次元地下構造モデルを使用して S-net から得られた波形を解析することで、高精度な CMT 解カタログを構築した。2024 年能登半島地震の余震活動に関しては、３次元地下構造モデルを使用することで複雑な余震活動の特徴を捉えることに成功した。地震の発生規模の頻度分布の範囲を広げ、余震発生予測の精度向上へ貢献するために、引き続き上記の解析を発展させ、特に東北地方太平洋沖における M5.2 未満の地震に対しても高解像度な CMT 解カタログの構築を目指す。

(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９件、うち海外計１件

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別	主たる成果
機械学習による地震学の牽引（口頭発表）	久保 久彦, 直井 誠, 加納 将行	日本地球惑星科学連合2024年大会（主催：日本地球惑星科学連合）	2024年5月26日	国内	
High-resolution CMT inversion for shallow offshore earthquake utilizing ocean-influenced Rayleigh wave thanks to thick seawater layer（口頭発表）	Lina Yamaya, Shunsuke Takemura, Hisahiko Kubo, Tatsuhiko Saito, Katsuhiko Shiomi	日本地球惑星科学連合2024年大会（主催：日本地球惑星科学連合）	2024年5月27日	国内	○
カーネル密度推定を用いた大地震直後の余震域推定の試み―2024年能登半島地震への適用―（ポスター発表）	久保 久彦, 汐見 勝彦	日本地球惑星科学連合2024年大会（主催：日本地球惑星科学連合）	2024年5月28日	国内	○
3次元地震波速度構造モデルを用いた令和６年能登半島地震（Mw7.5）の余震のセントロイド・モーメントテンソル解析（ポスター発表）	山谷 里奈, 久保 久彦, 汐見 勝彦, 木村 武志	日本地球惑星科学連合2024年大会（主催：日本地球惑星科学連合）	2024年5月28日	国内	○
大地震発生後の短期的な地震発生確率情報に基づく地震動超過確率予測スキームの提案（口頭発表）	久保 久彦, 汐見 勝彦	2024年度統計関連学会連合大会（主催：統計関連学会連合ほか）	2024年9月4日	国内	○
Centroid moment tensor inversion for	Lina Yamaya,	International joint workshop	2024年9月17日	国内	○

aftershocks of the 2024 Noto Peninsula earthquake (Mw7.5) based on a 3-D seismic velocity structure model(ポスター発表)	Hisahiko Kubo, Katsuhiko Shiomi, Takeshi Kimura	on Slow-to-Fast earthquakes（主催:「Slow-to-Fast地震学」）			
海域で発生した地震のCMT解析の高精度化における ocean-influenced Rayleigh waveの活用（口頭発表）	山谷 里奈, 久保 久彦, 齊藤 竜彦, 武村 俊介, 汐見 勝彦	日本地震学会2024年度秋季大会（主催:日本地震学会）	2024年10月23日	国内	○
Advances in Centroid Moment Tensor Inversion for Shallow Offshore Earthquakes Using Ocean-influenced Rayleigh Wave(口頭発表)	Lina Yamaya, Shunsuke Takemura, Hisahiko Kubo, Tatsuhiko Saito, Katsuhiko Shiomi	AGU24（主催:American Geophysical Union)	2024年12月11日	国外	○
カーネル密度推定に基づく大地震直後の余震域推定（口頭発表）	久保 久彦, 汐見 勝彦	東京大学地震研究所共同利用研究集会2024「次世代のリアルタイム監視予測システムの探求：固体地球科学における即時解析・即時予測・情報利活用」(主催:東京大学地震研究所)	2025年1月10日	国内	○

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載　：計１件、うち国外計１件

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所（学会誌・雑誌等名）	発表した時期	国内・外の別	主たる成果
Impact of the Offshore Seismograph Network and 3‐D Seismic Velocity Structure Model on Centroid Moment Tensor Analysis for Offshore Earthquakes: Application to the Japan Trench Subduction Zone	Lina Yamaya, Hisahiko Kubo, Katsuhiko Shiomi, Shunsuke Takemura	Journal of Geophysical Research: Solid Earth	2024年11月8日	国外	○

(e) 特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定

なし

(2-2)サブテーマ 1-B「地震動データそのものを用いた将来に発生しうる揺れの強さの予測に関する研究開発」

(a) 業務の要約

令和５年度までに構築した地震計記録に基づく最大振幅予測法においては、余震活動が活発な場合に予測を過大評価する傾向が見られた。その原因としては、予測手法の中で用いている、「マグニチュードが対数最大振幅に比例する」という仮定が成り立たないことが考えられた。そこで今年度は、地震の規模を正しく反映するモーメントマグニチュード M_W と最大振幅の関係を適切に記述する関係式を導入した上で、M_W がグーテンベルク―リヒター（G-R）則に従うとの仮定の下で最大振幅の予測を行った。その結果、最大振幅の過大評価が大きく改善された。一方で、大森―宇津公式の p 値の事前分布の幅を狭くすることで２次余震の影響が顕著な観測点における予測の改善を試みたものの、顕著な改善は見られなかった。

(b) 業務の成果

1) 最大振幅の過大評価の改善

図６は、2008 年岩手・宮城内陸地震と 2024 年能登半島地震において、横軸に本震から１時間後時点での 7 日後までの最大振幅の予測を、縦軸に実際に 7 日後までに発生した最大振幅を示したものである。両方のイベント共に、最大振幅の強さによらず予測が過大評価されている。

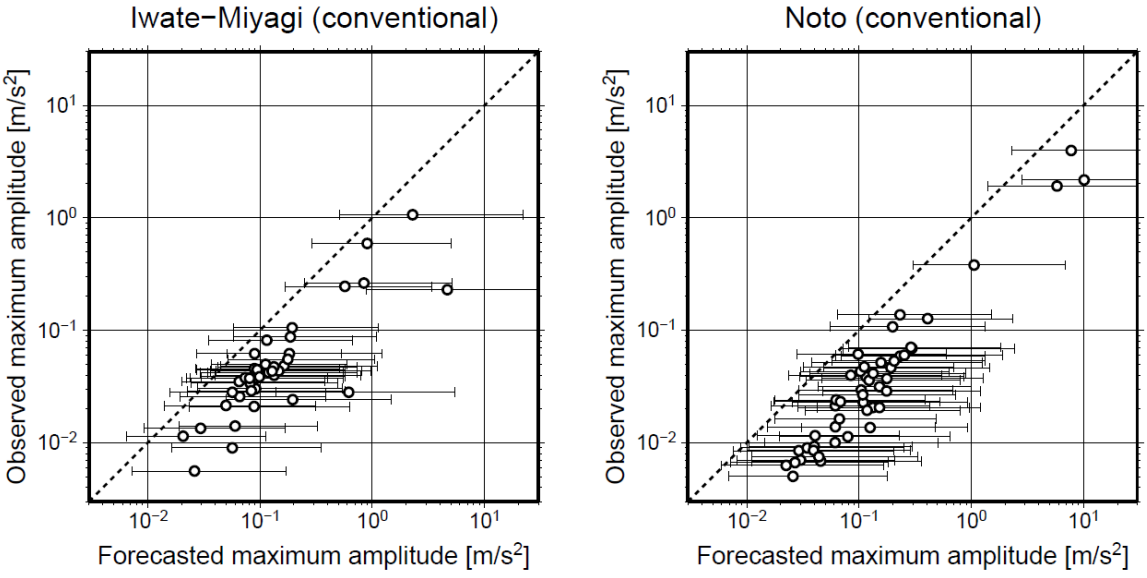


図６　（左）2008 年岩手・宮城内陸地震と（右）2024 年能登半島地震における、従来式による各観測点での予測最大振幅（白丸：中央値、エラーバー：10－90 パーセンタイル範囲）と観測値の比較。

令和５年度までに開発した予測手法においては、ローカルマグニチュード M_L が G-R 則に従い、M_L が最大振幅 x に対し以下の関係式で決められることを仮定していた。

$$M_L = c\log_{10} x + f \qquad (1)$$

しかし、この比例関係は地震の規模を正確に表す M_W については成り立たないことが知られている。その原因としては、有限断層長の効果が無視できない場合に生じる最大振幅の飽和と、振動記録のデジタイズの際にカットされる高周波成分の影響が考えられる。

本研究では、前者の原因に対しては Morikawa and Fujiwara (2013)の地震動予測式（以下、MF 式）

$$\log_{10} x = 0.55M_W - 0.0045r + 0.46 - \log_{10}(r + 0.0069 \times 10^{0.5M_W}) \qquad (2)$$

を、後者の原因に対しては Uchide and Imanishi（2018）による M_J－M_W 関係式（以下、UI 式）

$$M_W = 0.053M_J^2 + 0.33M_J + 1.68 \qquad (3)$$

による補正が適用できると考え、両式を満たすように

$$M_W = c\log_{10}\left[x\left(1 + \frac{x}{x_c}\right)^q\right] + f' \qquad (4)$$

という関係式を提案した。以下これを提案式と呼ぶ。提案式で新規に採用されたパラメータは、試行錯誤により x_c=10cm/s²、q=2.0 と設定した。

図 7 は、(4)式を(2)式（$5.5 \leqq M_W \leqq 8.1$ で成立）および(1)、(3)式（$1.9 \leqq M_W \leqq 5.5$ で成立。$M_L = M_J$ を仮定）を組み合わせた式と比較したものである。ここでは M_W5.5 において(2)式と(1)、(3)式が接続するように、震源距離ごとに f の値を調整している。提案式は、$1.9 \leqq M_W \leqq 8.1$ において、震源距離 10km から 100km の範囲で概ね MF 式と UI 式を満たすように構築されている。

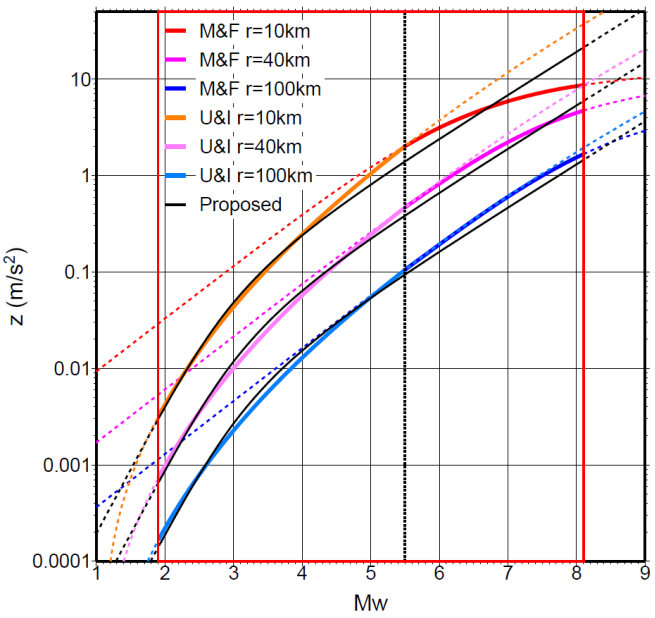


図 7　提案式（黒線）と、MF 式および UI 式による M_W－最大振幅関係の比較。震源距離 r が 10km、40km、100km の場合について示す。点線は MF 式および UI 式を適用可能範囲外まで外挿したものを表す。

図８に、この提案式に基づく最大振幅の予測値と観測値の比較を示す。図６に見られた予測の過大評価は、岩手・宮城内陸地震、能登半島地震共に大きく改善された。最大振幅の予測中央値に対する実際の観測値の比の観測点平均は、従来式（1 式）では岩手・宮城内陸地震で 0.34、能登半島地震で 0.26 であったが、提案式（4 式）ではそれぞれ 0.91、0.58 まで改善された。しかし、今回の方法では大きい揺れに対する過大評価を強く抑制することができた一方で、小さい揺れに対する改善の効果は小さいという結果となった。

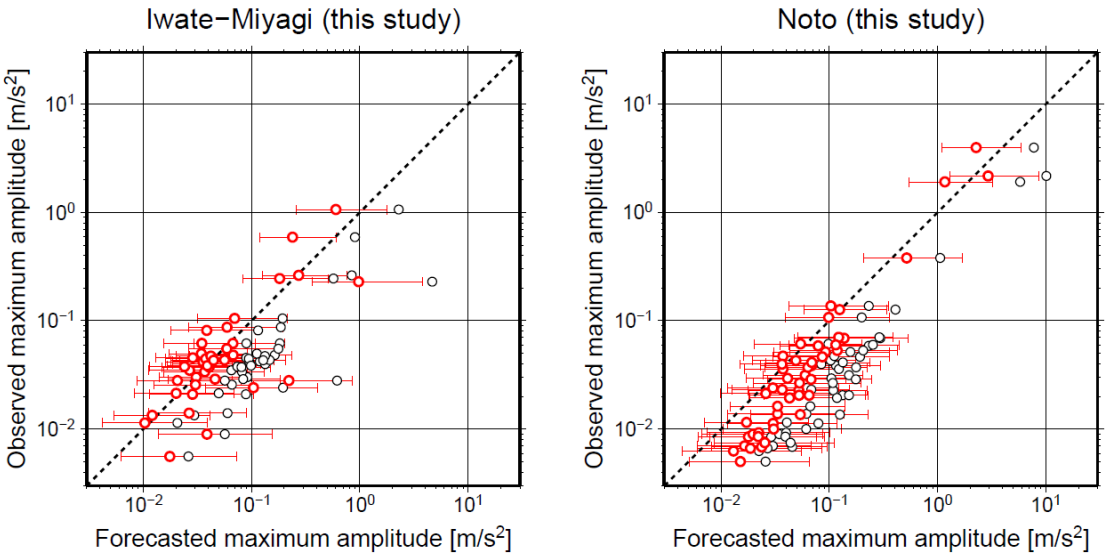


図８　（左）2008 年岩手・宮城内陸地震と（右）2024 年能登半島地震における、提案式による各観測点での予測最大振幅（赤丸：中央値、エラーバー：10－90 パーセンタイル範囲）と観測値の比較。白丸は図６での予測中央値を表す。

2）２次余震が顕著な観測点における予測性能の現状

2016 年熊本地震の震源の北西側の大分・別府地域における観測点では、本震後に誘発された大規模な余震とその後に続く２次余震により、区間最大振幅が通常の大森―宇津公式では説明できない推移を示した。これらの観測点において、p 値の事前分布の幅を狭くすることによりパラメータの推定および予測の安定化を図ったものの、劇的な改善は見られなかった。その理由としては、２つ以上の本震―余震系列が重なったデータを１つの大森―宇津公式のみで説明することの限界が考えられる。この点については次年度以降に再検討する予定である。

(c) 結論ならびに今後の課題

最大振幅の予測における過大評価の改善により、極端な地震動が生じる確率を現実的な値の範囲で評価することが可能となった。ただし、小さい揺れについての過大評価があまり改善されていない点については、さらなる手法の改善が必要である。サブテーマ 1-A で行っている余震カタログに基づく面的な揺れ予測法においては、地震動予測式を用いて揺れの評価を行っているが、今後これを本課題の手法と融合させるためには、本課題におい

ても同じ地震動予測式を用いるべきである。本研究によってそのための下地を構築できたといえる。一方で、２次余震の影響が強い観測点については、p 値の事前分布を調整するだけでは予測の改善に至らなかったため、今後より現実的なモデルを試みる必要がある。

(d) 成果の論文発表・口頭発表等

1) 学会等における口頭・ポスター発表　：計５件、うち海外計１件

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別	主たる成果
地震計記録と極値統計学に基づく確率論的地震動予測法の開発と性能検証（口頭発表）	澤崎 郁	日本地球惑星科学連合2024年大会（主催：日本地球惑星科学連合）	2024年5月28日	国内	○
2024年能登半島地震の余震による揺れの早期予測（ポスター発表）	澤崎 郁	日本地球惑星科学連合2024年大会（主催：日本地球惑星科学連合）	2024年5月27日	国内	○
Early Forecast of Aftershock Shaking: a New Scheme Based on Extreme Value Statistics and Bayesian Estimation（ポスター発表）	Kaoru Sawazaki	Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 2024 Annual Meeting（主催：Asia Oceania Geosciences Society)	2024年6月27日	国外	○
最大振幅の飽和の影響を考慮した余震による揺れ予測性能の改善（口頭発表）	澤崎 郁	日本地震学会2024年度秋季大会（主催：日本地震学会）	2024年10月23日	国内	○
極値統計解析およびベイズ推定法に基づく余震による揺れ予測法の開発（口頭発表）	澤崎 郁	東京大学地震研究所共同利用研究集会2024「次世代のリアルタイム監視予測システムの探求：固体地球科学における即時解析・即時予測・情報利活用」	2025年1月10日	国内	○

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載　：計１件、うち海外計１件

発表した成果（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
Integration of extreme value statistics and Bayesian estimation for early forecasting of aftershock shaking: application to main shock-aftershock sequences in inland Japan	Kaoru Sawazaki	Geophysical Journal International	2025 年 3 月25日	国外	○

(e) 特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定

なし

(2-3)サブテーマ 2-A「ガウス過程回帰に基づくデータ同化による地震動の空間補間に関する研究開発」

(a) 業務の要約

地震動の時刻歴波形を空間的に内挿補間する統計的手法の検討において、前年度の課題であった震源ごく近傍などの外挿範囲での推定精度の向上に取り組んだ。地震動波形のウェーブレット係数をガウス過程回帰モデルで内挿するという枠組みの中に、ウェーブレット係数の距離減衰式を採り入れた手法を新たに提案し、実用上重要である震源近傍地点での時系列特性やスペクトル特性の推定精度の大幅な向上に成功した。計算時間の観点からも、提案手法は通常のワークステーションを用いて 1 分程度の時間で被災域の任意の地点の時刻歴評価が可能であることを確認し、提案手法の利活用目的の 1 つである震災後の即時被害推定への適用性を検証した。

(b) 業務の成果

一般に、地震動波形のような振動データは位相成分に由来してデータ間の加算処理による統計処理が難しいことから、時刻歴データの内挿問題を、本業務では地震動波形のウェーブレット変換を通じてウェーブレット係数の内挿問題、すなわちスカラー値の内挿問題に置き換えた手法を提案している。令和 6 年度は、令和 5 年度に開発した基本的な枠組みの中に、外挿領域における推定精度を向上させるために、距離減衰式を組み合わせた以下の定式化を行った。

ある地震動波形$f(t)$を、次式から算出されるウェーブレット係数$c_{a,b}$へと変換する。

$$c_{a,b} = \int |a|^{-\frac{1}{2}} f(t) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \mathrm{dt}$$

ここで、a, bはそれぞれスケール、シフトと呼ばれるパラメータであり、$\Psi(t)$はマザーウェーブレットである。$c_{a,b}$は、時間周波数領域においてaに応じた周波数帯、bに応じた時刻帯での$f(t)$の強度を示したスカラー値と解釈できる。そこで、今N地点の観測地震動波形が得られている場合に、対応するN個のウェーブレット係数$\boldsymbol{C}_{a,b} = \{c_{a,b}^1, \ldots, c_{a,b}^N\}$と各観測地点の位置座標$\boldsymbol{X} = \{\boldsymbol{x}^1, \ldots, \boldsymbol{x}^N\}$から、$c_{a,b}$に関する距離減衰式$\mu(d(x))$とガウス過程回帰モデル$R_{a,b}(\boldsymbol{x})$を構築する。

$$R_{a,b}(\boldsymbol{x}) = GP(\mu(d(\boldsymbol{x})), k(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{x}'); \boldsymbol{C}_{a,b}, \boldsymbol{X})$$

ここで、$d(\boldsymbol{x})$は位置座標$\boldsymbol{x}$の震源距離である。上式は、ある時間周波数領域における地震動波形の強度をまず距離減衰式によって平均的に評価した後、近傍の観測点データを用いて実測値とこの平均的な評価値との差分を補正する処理を意味している。このように決定された各a, bに対するガウス過程回帰モデル$R_{a,b}(\boldsymbol{x})$を用いて得られる、任意の座標におけるウェーブレット係数を逆変換することによってその座標地点における地震動を求める。

以上のような提案手法の有効性を検証するために、2016 年熊本地震最大前震（4 月 14 日）時における熊本県内 KiK-net 観測点 13 地点の地中観測記録を利用して、これら 13 地点のうち 12 地点の観測記録から残る 1 地点の地震動波形を提案手法によって推定し、実際の観測記録と比較する leave-one-out 法による精度評価を行った。検討に用いた KiK-

net 観測点 13 地点と震源位置を図９に示す。

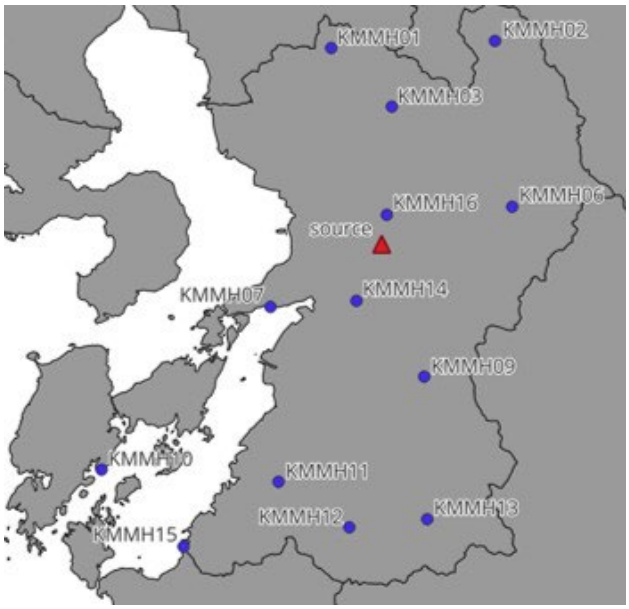
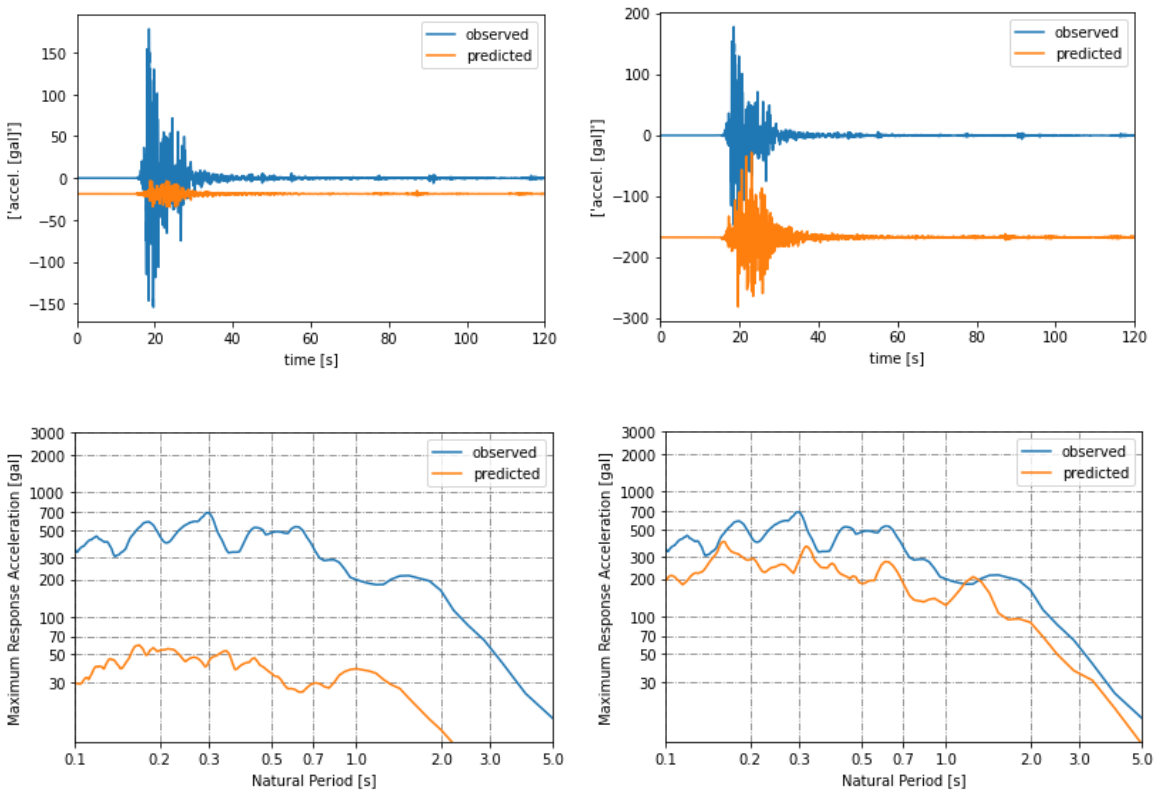


図９　データ観測地点（熊本県内 Kik-net 観測点）と震源位置

図 10 に、地震動波形の推定結果のうち最も震源近傍に位置する KMMH16 における結果を、距離減衰式の導入前後で比較したものを示す。最も震源近傍にあり他の地点からは外挿領域に当たる KMMH16 では、これまでの手法では大きな強度の時刻歴波形やスペクトルを他の観測点の波形から推定するには至っていなかった。これに対し、距離減衰式を導入した令和６年度の業務成果では、時刻歴波形の強度、応答スペクトル強度のともに大幅に改善されていることが分かる。距離減衰式は、地震波動場が波面の広がりとともに強度が減衰する物理的効果を表すものであり、そのような事前知見の導入が統計的予測モデルの精度向上に繋がった結果と考えられる。

なお、本手法は通常のワークステーション（2.40GHz，1 プロセスを使用）を用いて 1 分程度の時間で被災域の任意の地点の時刻歴評価が可能であることを確認した。このことから、本手法の利活用目的の１つとして想定している震災後の即時被害推定へも、計算時間の観点からも適用可能であると考えられる。



(a) 距離減衰式導入前　　(b) 距離減衰式導入後

図 10 距離減衰式の導入前後における波形推定精度の比較（上：時刻歴波形（EW 成分），下：応答スペクトル）

(c) 結論ならびに今後の課題

ウェーブレット係数のガウス過程回帰による地震動波形の内挿推定手法に対し、ウェーブレット係数の距離減衰式を統合することにより、推定精度の向上に成功した。特に、学習データよりも震源近傍にある外挿領域における高い強度の波形の推定精度が大幅に向上する、期待された結果が得られた。今後は様々な地震に対する有効性を検証すると共に、より一層の精度向上を図る。

(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 2 件、うち海外計 0 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
ウェーブレット係数のガウス過程回帰に基づく地震動波形の空間内挿（口頭発表）	宮本 崇, 久保 久彦	2024年度人工知能学会全国大会（主催：人工知能学会）	2024 年 5 月30日	国内	○
Reconstruction of Seismic Wave Fields in Surface Ground Using Gaussian Process Regression of Wavelet Coefficients（ポスター発表）	Takashi Miyamoto and Hisahiko Kubo	AGU24（主催：American Geophysical Union）	2024年12月9日	国外	○

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載　：計 1 件、うち海外計 0 件

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所（学会誌・雑誌等名）	発表した時期	国内・外の別	主たる成果
ウェーブレット係数のガウス過程回帰に基づく地震動波形の空間内挿	宮本 崇, 久保 久彦	人工知能学会全国大会梗概集	2024 年 6 月11日	国内	○

(e) 特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定

なし

(2-4)サブテーマ 2-B「Site specific な地震動予測モデルによる地震動生成に関する研究開発」

(a) 業務の要約

令和５年度に開発したリアルタイム震度時系列に関する Site specific な地震動予測手法の高度化を進めた。リアルタイム震度の最大値を別途予測することによって、強い揺れにおける過小評価が軽減され、予測精度の向上が確認された。また 2024 年能登半島地震において観測された長周期地震動の特徴を詳細に調べた。さらに、各 STAR-E 課題の関係者と連携し、地震研究における大規模言語モデルの活用可能性を探るハッカソンを実施した。

(b) 業務の成果

1) 時系列データに関する Site specific な地震動予測手法の高度化

サブテーマ 2-B では、単独観測点の地震動記録に機械学習を適用し、その地点での予測に特化した Site specific な地震動予測モデルの作成を試みている。令和５年度はリアルタイム震度に対する Site specific な地震動予測に関する研究開発を行ったが、大きな観測値に対して予測が過小評価となる傾向が見られた。その原因としては、時系列形状と最大値の両方を同時に予測しようとしたことが考えられる。そこで令和６年度は、時系列形状と最大値を別々に予測するアプローチを採用することで、この過小評価の解決を図った。

時系列形状の予測については、非線形次元圧縮手法 UMAP（Mclnnes et al. 2018）による時系列データの次元圧縮と、次元圧縮して得られる２次元座標を入力の震源情報から推定するランダムフォレスト回帰を組み合わせることで行った。最大値の予測には、Morikawa and Fujiwara (2013)による地震動予測式とガウス過程回帰を用いたハイブリッド予測（Kubo et al. 2020; 久保・宮本 2023）を採用した。震源情報（震源距離・深さ・Mw・地震の緯度および経度）を入力としてリアルタイム震度の時系列形状と最大値を別々に予測した上で、それらを統合することで最終的なリアルタイム震度時系列を得る。

提案手法を防災科学技術研究所の強震観測網 K-NET のつくば観測点における 1997 年から 2015 年までの観測記録を適用した上で、その予測性能を 2016 年から 2021 年までの観測記録を用いて評価した。その結果、2021 年 2 月 13 日 23 時 8 分に発生した福島県沖の地震（Mw 7.1　深さ 53km）において、令和５年度手法では大幅な過小評価となった一方で、令和６年度手法は観測値により近い最大値を予測した（図 11)。全体としても大振幅時の過小評価が改善される傾向が見られた。

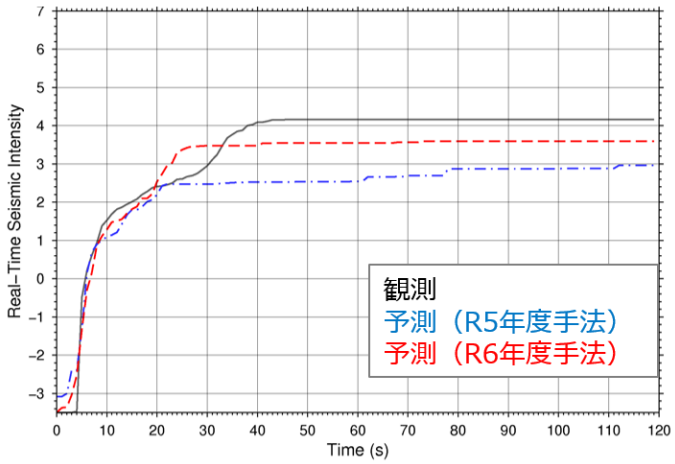


図 11　2021 年 2 月 13 日 23 時 8 分に発生した福島県沖の地震（Mw 7.1 深さ 53km）における K-NET つくばでのリアルタイム震度の観測記録および提案手法による予測結果の比較

2）2024 年能登半島地震の長周期地震動の解析

2024 年能登半島地震では、震源域近傍の石川県能登地方だけでなく、北陸地域の広域において顕著な長周期地震動が観測された。この長周期地震動の詳細を明らかにするために、防災科学技術研究所の強震観測網 K-NET・KiK-net で観測された強震記録を解析した（図 12）。その結果、震源域近傍の石川県能登地方に位置する多くの観測点では周期１－３秒にピークを持つ疑似速度応答スペクトルが観測されていたことが分かった。また新潟県の越後平野および富山県の富山平野に位置する観測点では周期 4 秒以上において震源域近傍の記録に匹敵する値の疑似速度応答スペクトルが観測されていた。

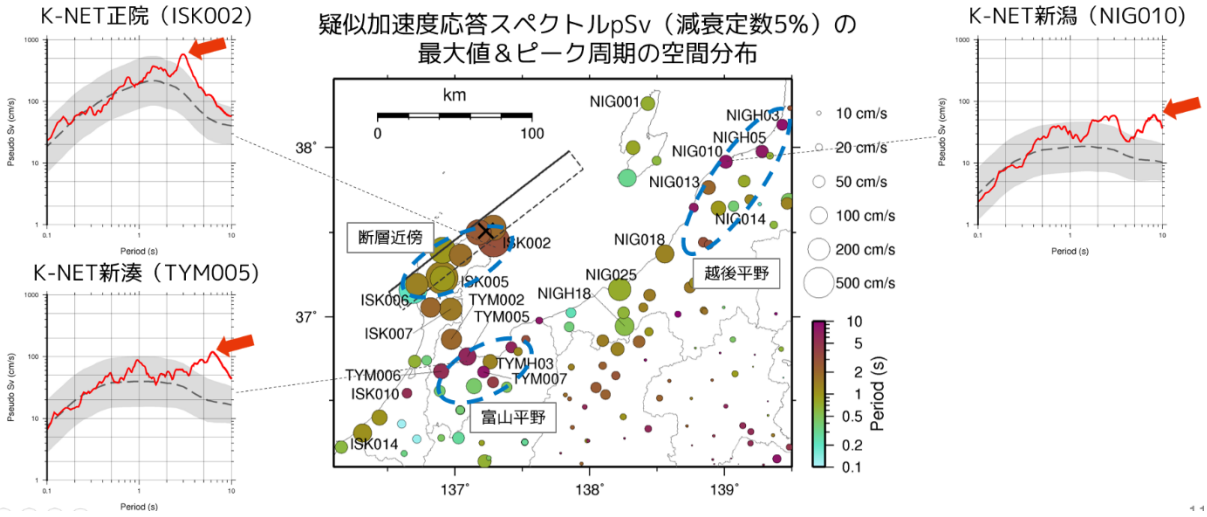


図 12　2024 年能登半島地震における疑似加速度応答スペクトル（減衰定数 5%）の最大値およびピーク周期の空間分布と各地で観測された特徴的な疑似加速度応答スペクトル。赤線は観測記録、灰色破線および灰色領域は Morikawa and Fujiwara (2013)の地震動予測式による理論値およびその標準偏差の範囲を示す。

3）2-A との連携および汎用的な地震動生成手法の検討

2-B の Site specific な地震動予測と 2-A の地震動空間補間を組み合わせた地震動予測アプローチの開発に向けて、サブテーマ間での議論を深めた。また汎用的な地震動生成の技術開発に向けた基礎的検討も実施した。

4) 地震研究における大規模言語モデルハッカソンの実施

地震研究における大規模言語モデルの活用可能性を探るため、各 STAR-E 課題関係者との連携のもとハッカソンを実施した。世話人は久保久彦・Stephen Wu・加納将行・加藤慎也（いずれも STAR-E 関係者）で、STAR-E 関係者を含めて計 17 名が参加した。このハッカソンの成果に関しては日本地震学会 2024 年度秋季大会にて報告した。

5) その他

研究データに付与されたデータ DOI の引用情報に基づき、防災科学技術研究所の地震・津波・火山の観測データの利活用状況を調べた研究が地震 2 より出版された（久保・汐見, 2024)。また Earth, Planets and Space の Frontier Letter として出版した Kubo *et al.* (2024)が高い評価を受け、Earth, Planets and Space における 2024 年の Highlighted Article に選出された。

(c) 結論ならびに今後の課題

リアルタイム震度時系列に関する Site specific な地震動予測手法において、リアルタイム震度の時系列形状と最大値を別々に予測するアプローチを導入することで、強い揺れの過小評価の軽減に一定の成果が得られた。しかし過小評価は完全には解消されておらず、また時系列形状の予測についても観測との乖離が一部で見られた。これは学習データが少量であることが影響していると考えられ、経験式ベースのリアルタイム震度時系列の予測手法（久保・功刀 2022）とのハイブリッドを今後検討していく。あわせて 2-A および 2-B を組み合わせた地震動予測アプローチの開発、および汎用的な地震動生成手法の開発を進めていく。

(d) 成果の論文発表・口頭発表等

1) 学会等における口頭・ポスター発表　：計 7 件、うち海外計 0 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
機械学習による地震学の牽引（口頭発表）	久保 久彦, 直井 誠, 加納 将行	日本地球惑星科学連合2024年大会（主催：日本地球惑星科学連合）	2024年5月26日	国内	○
2024年能登半島地震による長周期地震動の空間特性 （ポスター発表）	久保 久彦, 山谷 里奈	日本地球惑星科学連合2024年大会（主催：日本地球惑星科学連合）	2024年5月28日	国内	○
データDOI引用情報に基づく日本の地震津波火山観測データの利用状況の分析（口頭発表）	久保 久彦, 汐見 勝彦	日本地球惑星科学連合2024年大会（主催：日本地球惑星科学連合）	2024年5月28日	国内	○
グラフベース非線形次元圧縮とランダムフォレスト回帰を用いたリアルタイム震度時系列の予測の試み（口頭発表）	久保 久彦, 宮本 崇	2024年度人工知能学会全国大会（第38回）（主催：人工知能学会）	2024年5月30日	国内	○
大地震発生後の短期的な地震発生確率情報に基づく地震動超過確率予測スキームの提案（口頭発表）	久保 久彦, 汐見 勝彦	2024年度統計関連学会連合大会（主催：統計関連学会連合ほか）	2024年9月4日	国内	
大規模言語モデル×地震研究をテーマとしたハッカソンの実施（ポスター発表）	久保 久彦, Wu Stephen, 加納 将行, 加藤 慎也, 小穴 温子, 岡崎 智久, 岡田 望海,	日本地震学会2024年度秋季大会（主催：日本地震学会）	2024 年 10 月 21 日	国内	○

	亀 伸樹, 小寺 祐貴, 佐藤 大祐, 下條 賢梧, 溜渕 功史, 直井 誠, 西山 竜一, 平原 和朗, 宮本 崇, 山田 真澄				
令和6年能登半島地震における長周期地震動の特徴（口頭発表）	久保 久彦, 山谷 里奈	日本地震工学会・大会－2024（主催：日本地震工学会）	2024 年 12月5日	国内	○

2）学会誌・雑誌等における論文掲載　：計 2 件、うち海外計 0 件

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所（学会誌・雑誌等名）	発表した時期	国内・外の別	主たる成果
グラフベース非線形次元圧縮とランダムフォレスト回帰を用いたリアルタイム震度時系列の予測の試み	久保 久彦, 宮本 崇	人工知能学会全国大会論文集	2024 年 6 月11	国内	○
データDOIの引用情報に基づく防災科研MOWLASデータの利活用状況把握の試み	久保 久彦, 汐見 勝彦	地震 第2輯	2024年10月17日	国内	○

(e) 特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定

なし

３．まとめ

令和６年度は研究計画に沿った研究を着実に進め、大地震直後の余震地震動ハザード評価手法の高度化、大地震直後の余震活動域の推定方法の開発、３次元地下構造モデルを用いた解析による高精度なセントロイド・モーメントテンソル解カタログの構築、極値統計解析を用いた地震計記録に基づく最大振幅予測法の高度化、時系列波形の空間補間アルゴリズムの高度化、リアルタイム震度に関する Site specific な地震動予測手法の高度化等を行った。以下に各サブテーマの成果の概要を示す。

サブテーマ 1-A「不完全性を予め考慮した上での地震カタログを用いた予測に関する研究開発」

大地震直後の余震地震動ハザード評価手法の高度化を行うとともに、過去に発生した実地震での性能検証を進めた。また、同手法に余震活動の空間的な広がりを取り込むために、質および量が低下した大地震発生直後の地震カタログからでも、余震活動の空間的な広がりをカーネル密度推定によって安定的に推定する手法を開発した。東北地方太平洋沖の地震および 2024 年能登半島地震の余震活動に対して、３次元地下構造モデルを用いた解析を行い、高精度なセントロイド・モーメントテンソル解のカタログを構築した。

サブテーマ 1-B「地震動データそのものを用いた将来に発生しうる揺れの強さの予測に関する研究開発」

地震計記録に基づく最大振幅予測法について、モーメントマグニチュード M_W と最大振幅の関係式を導入し、M_W がグーテンベルク―リヒター則に従うとの仮定の下で最大振幅の予測を行うという形で高度化を図った結果、最大振幅の過大評価が大きく改善された。

サブテーマ 2-A「ガウス過程回帰に基づくデータ同化による地震動の空間補間に関する研究開発」

地震動時刻歴波形の空間的な内挿補間に関して、地震動波形のウェーブレット係数をガウス過程回帰モデルで内挿するという枠組みの中に、ウェーブレット係数の距離減衰式を採り入れた手法を新たに提案し、震源近傍地点での時系列特性やスペクトル特性の推定精度の大幅な向上に成功した。

サブテーマ 2-B「Site specific な地震動予測モデルによる地震動生成に関する研究開発」

リアルタイム震度時系列に関する Site specific な地震動予測手法について時系列形状と最大値を別々に予測する形で高度化を図ったことで、強い揺れにおける過小評価が軽減され、予測精度の向上が確認された。また 2024 年能登半島地震における長周期地震動の特徴を解析したとともに、各 STAR-E 課題の関係者と連携し、地震研究における大規模言語モデルの活用可能性を探るハッカソンを実施した。

以上のように、令和６年度は、本研究課題の研究目標である大地震直後の地震活動およびそれに伴う揺れの準リアルタイム時空間予測に必要な各種要素技術の研究開発をサブテーマ毎およびサブテーマ連携の上で進め、それぞれで十分な研究成果を得ることができたと考える。

４．活動報告

(1)研究課題内ミーティング

(a)令和６年度第１回ミーティング
日時：令和６年 12 月 19 日 11:00―12:00
会議形式：オンライン
議事：
・情報共有
・各サブテーマの進捗報告

(b)令和６年度第２回ミーティング
日時：令和７年３月 24 日 11:00―12:00
会議形式：オンライン
議事：
・情報共有
・各サブテーマの進捗報告

(2)研究課題内拡大ミーティング

(a) 令和６年度第１回拡大ミーティング
日時：令和７年３月 21 日 13:00―14:00
会議形式：オンライン
議事：
・研究進捗状況説明および質疑応答

(3)STAR-E プロジェクト全体

(a) 地震・測地データ活用　アイデアコンテスト
最終審査会日時：令和６年８月 24 日 13:00―18:00
最終審査会会議形式：ハイブリッド（対面・オンライン）

(b) 研究フォーラム
日時：令和６年 12 月 23 日 15:00―17:35
会議形式：オンライン

(c) 研究進捗会
日時：令和７年２月 10 日 13:00―18:00
会議形式：ハイブリッド（対面・オンライン）

５．むすび

令和３年度から５年計画で開始された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）の研究課題「地震データの不完全性に対応した地震活動およびそれに伴う揺れの準リアルタイム時空間予測に関する研究開発」における令和６年度の取り組みとして、研究計画に沿った研究を着実に進めた。令和７年度は、これまでの研究成果に基づいて各種要素技術の研究開発を進めるとともに、サブテーマ間の連携によって「地震カタログに基づいた大地震発生後の地震活動およびその揺れに関する見通し情報」および「地震動そのものに基づいた任意地点での揺れの見通し情報」、さらには「それらの予測情報を組み合わせた見通し情報」の予測スキームの構築に向けた研究を推進する。

様式第２１

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）「地震データの不完全性に対応した地震活動およびそれに伴う揺れの準リアルタイム時空間予測に関する研究開発」」

機関名　国立研究開発法人防災科学技術研究所

１．学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別
機械学習による地震学の牽引（口頭発表）	久保 久彦, 直井 誠, 加納 将行	日本地球惑星科学連合2024年大会（主催：日本地球惑星科学連合）	2024年5月26日	国内
High-resolution CMT inversion for shallow offshore earthquake utilizing ocean-influenced Rayleigh wave thanks to thick seawater layer（口頭発表）	Lina Yamaya, Shunsuke Takemura, Hisahiko Kubo, Tatsuhiko Saito, Katsuhiko Shiomi	日本地球惑星科学連合2024年大会（主催：日本地球惑星科学連合）	2024年5月27日	国内
2024年能登半島地震の余震による揺れの早期予測（ポスター発表）	澤崎 郁	日本地球惑星科学連合2024年大会（主催：日本地球惑星科学連合）	2024年5月27日	国内
カーネル密度推定を用いた大地震直後の余震域推定の試み―2024年能登半島地震への適用－（ポスター発表）	久保 久彦, 汐見 勝彦	日本地球惑星科学連合2024年大会（主催：日本地球惑星科学連合）	2024年5月28日	国内
2024年能登半島地震による長周期地震動の空間特性 （ポスター発表）	久保 久彦, 山谷 里奈	日本地球惑星科学連合2024年大会（主催：日本地球惑星科学連合）	2024年5月28日	国内
データDOI引用情報に基づく日本の地震津波火山観測データの利用状況の分析（口頭発表）	久保 久彦, 汐見 勝彦	日本地球惑星科学連合2024年大会（主催：日本地球惑星科学連合）	2024年5月28日	国内
地震計記録と極値統計学に基づく確率論的地震動予測法の開発と性能検証（口頭発表）	澤崎 郁	日本地球惑星科学連合2024年大会（主催：日本地球惑星科学連合）	2024年5月28日	国内
3次元地震波速度構造モデルを用いた令和６年能登半島地震（Mw7.5）の余震のセントロイド・モーメントテンソル解析（ポスター発表）	山谷 里奈, 久保 久彦, 汐見 勝彦, 木村 武志	日本地球惑星科学連合2024年大会（主催：日本地球惑星科学連合）	2024年5月28日	国内

グラフベース非線形次元圧縮とランダムフォレスト回帰を用いたリアルタイム震度時系列の予測の試み（口頭発表）	久保 久彦, 宮本 崇	2024年度人工知能学会全国大会（第38回）（主催：人工知能学会）	2024年5月30日	国内
ウェーブレット係数のガウス過程回帰に基づく地震動波形の空間内挿（口頭発表）	宮本 崇、 久保 久彦	2024年度人工知能学会全国大会（主催：人工知能学会）	2024年5月30日	国内
Early Forecast of Aftershock Shaking: a New Scheme Based on Extreme Value Statistics and Bayesian Estimation（ポスター発表）	Kaoru Sawazaki	Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 2024 Annual Meeting（主催：Asia Oceania Geosciences Society)	2024年6月27日	国外
大地震発生後の短期的な地震発生確率情報に基づく地震動超過確率予測スキームの提案（口頭発表）	久保 久彦, 汐見 勝彦	2024年度統計関連学会連合大会（主催：統計関連学会連合ほか）	2024年9月4日	国内
Centroid moment tensor inversion for aftershocks of the 2024 Noto Peninsula earthquake (Mw7.5) based on a 3-D seismic velocity structure model（ポスター発表）	Lina Yamaya, Hisahiko Kubo, Katsuhiko Shiomi, Takeshi Kimura	International joint workshop on Slow-to-Fast earthquakes（主催：「Slow-to-Fast地震学」）	2024年9月17日	国内
大規模言語モデル×地震研究をテーマとしたハッカソンの実施（ポスター発表）	久保 久彦, Wu Stephen, 加納 将行, 加藤 慎也, 小穴 温子, 岡崎 智久, 岡田 望海, 亀 伸樹, 小寺 祐貴, 佐藤 大祐, 下條 賢梧, 溜渕 功史, 直井 誠, 西山 竜一, 平原 和朗, 宮本 崇, 山田 真澄	日本地震学会2024年度秋季大会（主催：日本地震学会）	2024年10月21日	国内
最大振幅の飽和の影響を考慮した余震による揺れ予測性能の改善（口頭発表）	澤崎 郁	日本地震学会2024年度秋季大会（主催：日本地震学会）	2024年10月23日	国内
海域で発生した地震のCMT解析の高精度化における ocean-influenced	山谷 里奈, 久保 久彦, 齊藤 竜彦,	日本地震学会2024年度秋季大会（主催：日本地震学会）	2024年10月23日	国内

Rayleigh waveの活用（口頭発表）	武村 俊介，汐見 勝彦			
令和６年能登半島地震における長周期地震動の特徴（口頭発表）	久保久彦，山谷里奈	日本地震工学会・大会－2024（主催：日本地震工学会）	2024年12月5日	国内
Reconstruction of Seismic Wave Fields in Surface Ground Using Gaussian Process Regression of Wavelet Coefficients（ポスター発表）	Takashi Miyamoto and Hisahiko Kubo	AGU24（主催：American Geophysical Union）	2024年12月9日	海外
Advances in Centroid Moment Tensor Inversion for Shallow Offshore Earthquakes Using Ocean-influenced Rayleigh Wave（口頭発表）	Lina Yamaya, Shunsuke Takemura, Hisahiko Kubo, Tatsuhiko Saito, Katsuhiko Shiomi	AGU24（主催：American Geophysical Union）	2024年12月11日	国外
カーネル密度推定に基づく大地震直後の余震域推定（口頭発表）	久保 久彦，汐見 勝彦	東京大学地震研究所共同利用研究集会2024「次世代のリアルタイム監視予測システムの探求：固体地球科学における即時解析・即時予測・情報利活用」（主催：東京大学地震研究所）	2025年1月10日	国内
極値統計解析およびベイズ推定法に基づく余震による揺れ予測法の開発（口頭発表）	澤崎 郁	東京大学地震研究所共同利用研究集会2024「次世代のリアルタイム監視予測システムの探求：固体地球科学における即時解析・即時予測・情報利活用」（主催：東京大学地震研究所）	2025年1月10日	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
グラフベース非線形次元圧縮とランダムフォレスト回帰を用いたリアルタイム震度時系列の予測の試み	久保 久彦，宮本 崇	人工知能学会全国大会論文集	2024年6月11日	国内

ウェーブレット係数のガウス過程回帰に基づく地震動波形の空間内挿	宮本 崇、久保 久彦	人工知能学会全国大会梗概集	2024年6月11日	国内
データDOIの引用情報に基づく防災科研MOWLASデータの利活用状況把握の試み	久保 久彦, 汐見 勝彦	地震 第2輯	2024年10月17日	国内
Impact of the Offshore Seismograph Network and 3‐D Seismic Velocity Structure Model on Centroid Moment Tensor Analysis for Offshore Earthquakes: Application to the Japan Trench Subduction Zone	Lina Yamaya, Hisahiko Kubo, Katsuhiko Shiomi, Shunsuke Takemura	Journal of Geophysical Research: Solid Earth	2024年11月8日	国外
Integration of extreme value statistics and Bayesian estimation for early forecasting of aftershock shaking: application to main shock-aftershock sequences in inland Japan	Kaoru Sawazaki	Geophysical Journal International	2025年3月25日	国外

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