

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 5 年度
成果報告書

令和 6 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5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。

グラフィック

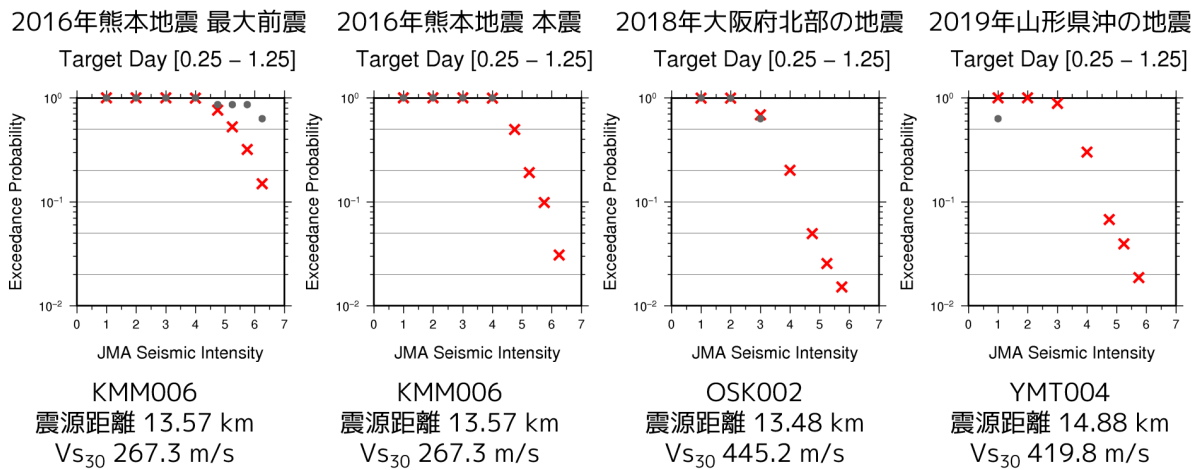


図1 2016年熊本地震の最大前震および本震、2018年大阪府北部の地震、2019年山形県沖の地震における、地震発生から6時間時点でのその後1日間の地震動予測超過確率。×で震度階級ごとの予測超過確率を示す。また実観測に基づく観測震度の超過確率を●で示す。

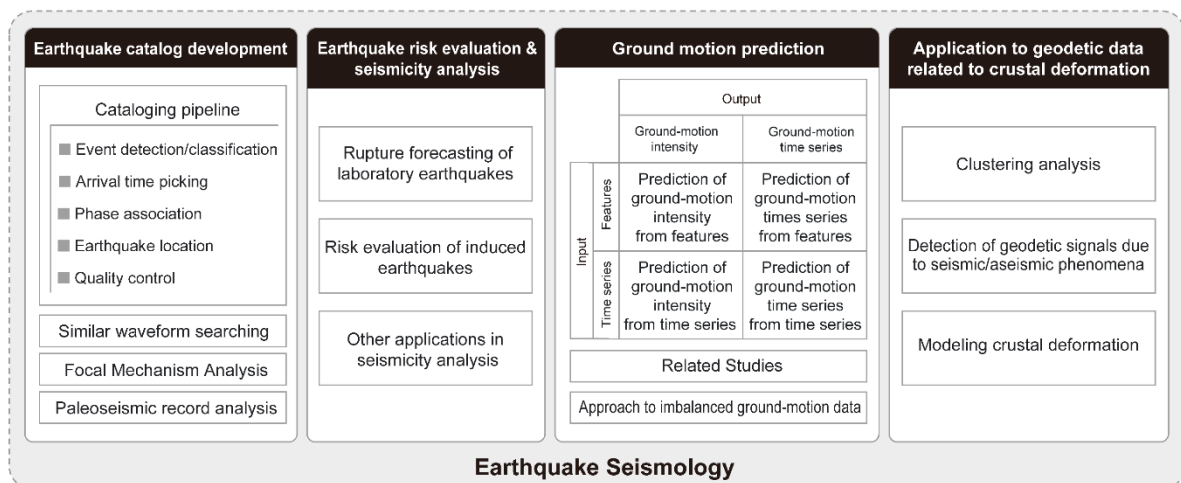


図2 Kubo et al. (2024)におけるレビュートピックの概要図。同論文では近年の地震学における機械学習の適用事例に関してレビューしている。

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、複雑な自然現象に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5年度の成果	7
3. まとめ	26
4. 活動報告	27
5. むすび	29

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発生震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 地震津波火山ネットワーク センター 主任研究員	久保 久彦	R5. 4. 1 ～ R6. 3. 31	14, 393, 587 円	4, 318, 076 円
国立研究開発法人防災 科学技術研究所 地震津波防災研究部門 副部門長	汐見 勝彦	R5. 4. 1 ～ R6. 3. 31		
国立研究開発法人防災 科学技術研究所 地震津波火山ネットワーク センター 主任専門研究員	澤崎 郁	R5. 4. 1 ～ R6. 3. 31		
国立研究開発法人防災 科学技術研究所 地震津波火山ネットワーク センター 特別研究員	山谷 里奈	R5. 4. 1 ～ R6. 3. 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	R5. 4. 1 ～ R6. 3. 31	4, 085, 861 円	1, 225, 758 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²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³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する。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。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。

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、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5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う。

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」

前年度に引き続き極値統計解析手法の高度化を図る。また 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」

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」

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する。

(2) 令和 5 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

大地震発生直後の余震発生確率情報に確率論的地震動予測アプローチを組み合わせることで地震動超過確率を評価するスキームを構築し、2016 年熊本地震や 2018 年大阪府北部の地震等に適用した。推定した震度階級の超過確率は、実際に観測された震度の傾向を大まかに再現していることを確認した一方、地震活動の空間的な広がりやを考慮する必要があることが分かった。さらに、地震活動の時空間的特徴把握の高精度化に向けた取り組みを進めた。高精度な地震諸元に基づいた海域地震活動評価に資するため、3 次元地下構造モデルと海域観測網を用いたセントロイド・モーメントテンソル (CMT) 解析を行った。得られた発震機構解は従来の解よりも高精度な推定が可能となっていることを確認した。この他、カタログに登録された発震機構解情報を次元削減により可視化することで地震活動の時空間変化を直感的かつ客観的に理解する方法の検討を行うとともに、G-R 式から逸脱する地震の規模別頻度分布を説明する地震活動モデルの特徴評価を進めた。

(b) 業務の成果

1) 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

防災科研では、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) を防災科研 Hi-net の自動震源カタログに適用し、近い将来を対象とした余震発生確率を自動的に予測するシステムの試験稼働を行っている (Omi et al., 2019)。今年度は、同システムによるマグニチュード (M) ごとの地震発生確率情報に基づき、大地震発生直後の地震動超過確率を予測するための手法開発に着手した。ここでの予測対象は震度階級とする。大地震発生後に活発化する地震活動の発生域は有限な広がりを持つが、今年度は問題を単純化するため、大地震後に発生する地震は最初の大地震と同じ場所で発生すると仮定した。その上で、予測地点における計測震度を、緊急地震速報における「震源と M による震度予測手法」の「予測震度の算出」(気象庁, 2020) に基づいて M ごとに算出した。同手法では、宇津 (1975) に基づく形で地震の有限性を考慮しつつ、司・翠川 (1999) の地震動予測式および翠川ほか (1999) の変換式によって予測地点での震度を算出する。その際、地表から深さ 30m までの平均 S 波速度 (AVS30) から求められる地盤増幅率を用いて、予測地点における地盤増幅を考慮している。こうして得られた M ごとの地震発生確率および予測震度から、確率論的地震動予測アプローチ (例えば、藤原・他, 2005) に基づき震度階級ごとの超過確率の予測を行った。

2016 年熊本地震の最大前震および本震、2018 年大阪府北部の地震、2019 年山形県沖の地震に対し、地震発生から 6 時間の自動震源情報に提案手法を適用した。震源距離 13 ~ 15km の観測点における地震発生 6 時間後から 1 日間の地震動超過確率の予測結果を図 3 に示す。なお地震ごとに予測対象とした観測点が異なるため、予測地点の地盤状況 (AVS30) が異なる。対象とした 4 イベントの中では、2016 年熊本地震の最大前震が最

も余震活動が活発である一方、2018 年大阪府北部の地震や 2019 年山形県沖の地震では余震活動が低調であった。この余震活動の活発さに関する地震間の違いは、図 1 中に表示気象庁地震月報（カタログ編）の震度情報に基づいて算出した観測震度の超過確率にも反映されているが、提案手法による予測はこの傾向を大局的に再現していることが分かる。

2016 年熊本地震の本震発生 6 時間後から 1 日間の地震動超過確率の空間分布を図 4 に示す。震源を中心とした地震動の距離減衰と各地の地盤状況に対応した地震動増幅が組み合わさった分布となっている。同地震の余震域は北東-南西方向に数十 km に広がり、また熊本地方だけでなく阿蘇地方・大分地方でも地震活動が活発化した（例えば、Yano and Matsubara, 2017）。提案手法では、大地震後に発生する地震は最初の大地震と同じ場所で発生すると仮定したため、実際の余震活動の空間的な広がりに対応できず、震央付近では過大評価、震央から北東および南西の領域や阿蘇地方、大分地方では過小評価となる。今後は余震活動の広がりも考慮した予測に向けた高度化を進めていく。

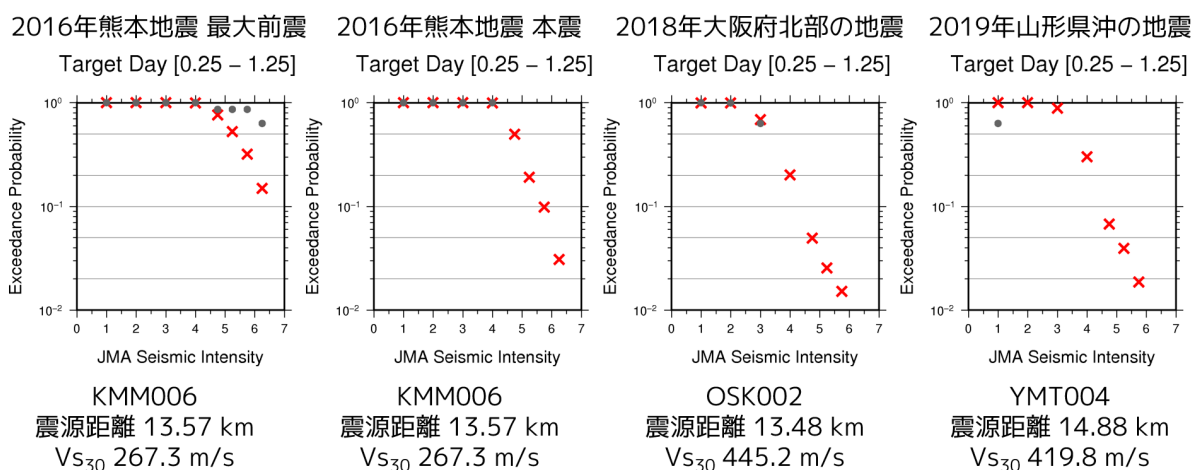


図 3 2016 年熊本地震の最大前震および本震、2018 年大阪府北部の地震、2019 年山形県沖の地震における、地震発生から 6 時間時点でのその後 1 日間の地震動予測超過確率。×で震度階級ごとの予測超過確率を示す。また実観測に基づく観測震度の超過確率を●で示す。

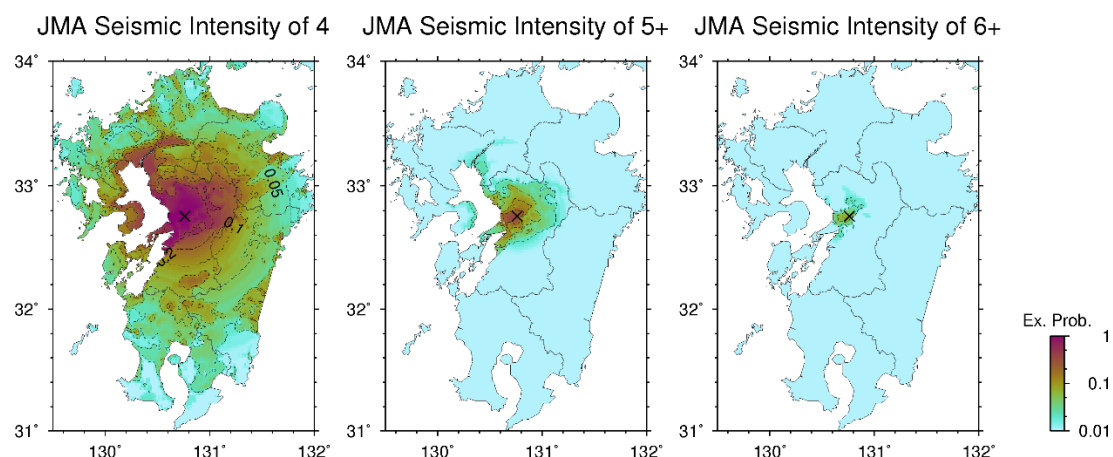


図 4 2016 年熊本地震の本震発生から 6 時間経過時点での、その後 1 日間の震度階級 4・5 強・6 強の地震動予測超過確率分布。2016 年熊本地震の本震の震央位置を×で示す。

2) 海底地震計記録を用いた海域地震カタログの高解像度化

地震の発生機構の理解には CMT 解が広く使われている。地震活動の特徴を表す Gutenberg-Richter 式 (G-R 式) の b 値は地震の発震機構に依存するという報告があるが (例えば、Schorlemmer et al., 2005)、陸域の観測網を主に使用している現状の地震カタログでは、海域で発生する地震に対する解の網羅性や決定精度が不十分な場合がある。海域で発生する地震の発生場所やメカニズム解の諸元を高精度に推定するためには、海底地震波形記録を活用した CMT 解析の実施が不可欠である。

今年度は、2017 年 4 月 1 日から 2021 年 3 月 31 日までに東北地方太平洋沖で発生した $M_w 5.3-7.0$ の 71 個の地震に対して、日本海溝海底地震津波観測網 S-net で得られた観測波形を用いた CMT 解推定を行った。グリーン関数の計算には、地震波伝播シミュレーションコードである OpenSWPC (Maeda et al., 2017) を使用した。3 次元地下構造モデルとしては、全国 1 次地下構造モデル (Koketsu et al., 2012) を基本とし、固体領域の最小 S 波速度を 1.0 km/s とした構造を用いた。得られた CMT 解の空間分布を図 5 に示す。F-net MT 解カタログや S-net を使用しない解析結果と比較、検討した結果、S-net を用いることで、従来の解よりも地震波形の再現性が高く、不確定性の小さい CMT 解推定に成功したことを確認した。得られた CMT 解カタログについて、低角逆断層型として求まったほぼ全ての地震は、そのセントロイド深さや節面の傾斜角から陸側プレートと太平洋プレートの境界部で発生した地震と評価可能であった。また、海溝軸外側で発生した正断層型の地震は、沈み込む海洋プレートが曲がるに伴う引張応力場を反映したアウターライズ型地震であると分類した。

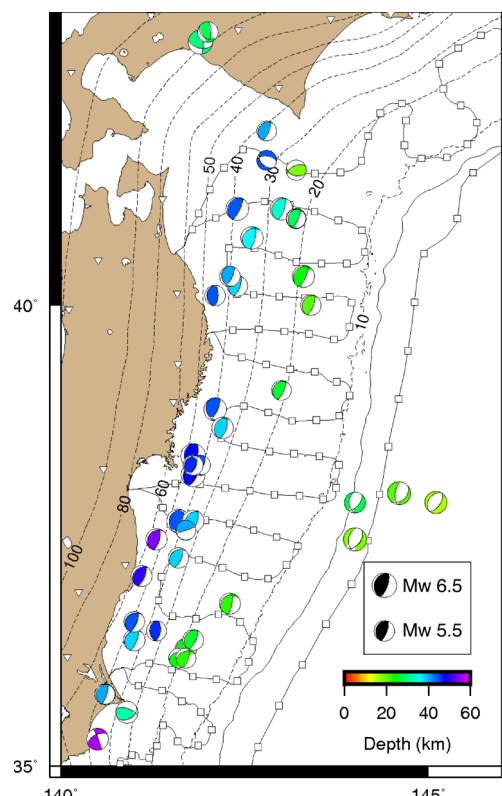


図 5 S-net 観測波形を取り入れて推定した CMT 解の空間分布。

3) 次元削減手法によるモーメントテンソル (MT) 解カタログデータの可視化

前述の通り、G-R 式の b 値は発震機構解に依存する傾向があるため、地震活動度の変化を定量化するためには、発震機構に基づく地震活動の分類が重要な要素となる。地震発生メカニズムの地域特性の直感的かつ客観的な理解に向け、次元削減を用いた可視化を防災科研 F-net の MT 解カタログに適用した。次元削減手法にはグラフベースの非線形次元削減手法の一つである UMAP (McInnes et al., 2018) を用い、F-net MT 解カタログの震源パラメータのうち地震の空間位置および source-mechanism diagram 情報を、2 次元空間に埋め込んだ。グラフベースの非線形次元削減手法は、データの局所的な構

造や非線形性を保持しながら高次元データを低次元空間に写像することができ、この低次元空間を詳しく調べることで元データの基本構造を理解することにつながる。

2次元埋め込みマップ上では、東日本と西日本の地震が別々の空間に分布したほか、各地域の特徴的な断層運動メカニズムや震源深さを反映して地震が埋め込まれた。このことから、次元削減を用いたデータ可視化が地震メカニズムの地域特性を直感的かつ客観的に理解するために有用であることが示された。また埋め込みマップは、地域の地震活動の時間変化の可視化や過去イベントとの類似検索にも利用できることも確認した。

4) 様々な地震活動モデルと適用可能性の検討

防災科研が試験稼働を行っている余震予測システム (Omi et al., 2019) では、改良大森公式ならびに G-R 式に基づいて、余震活動の確率予測を行っている。一方、昨年度までに実施した過去の解析結果の検証において、余震活動の規模別頻度分布が G-R 式を満たさず、上に凸の分布となる事例が複数確認された。このような場合では、M の検知下限の設定方法に b 値が大きく依存するため、地震活動の予測結果も不安定となることが危惧される。今年度は、G-R 式とは異なる式として、極値で G-R 式や切断 G-R 式等の様々なモデルに収束する清野・他 (1989) の式を取り上げ、2021 年 3 月および 5 月に宮城県沖で発生した地震の余震活動を対象として検討を進めた。G-R 式よりもパラメータ数が多い分、データとの残差が減少したが、上限となる M が設定されるため、一定規模以上の地震の発生可能性を議論出来ないという課題を有する。今後は、二区間 G-R 式 (例えば、Gutenberg, 1956) 等、M に上限が無い式も検討するとともに、余震活動だけではなく、当該地域の過去の地震活動を説明する表現式を検討することで、地震発生場の特徴把握を進め、予測精度の向上に努める必要がある。

(c) 結論ならびに今後の課題

防災科研が試験運用を行っている余震予測システムによる M ごとの地震発生確率情報に基づき、大地震発生直後の地震動超過確率を予測する手法開発を進めた。今年度は、後発する地震は最初の大地震と同じ場所で発生すると仮定して推定を行ったところ、提案手法は観測された震度の傾向を大まかに予測可能であることを確認した。一方、地震動超過確率の空間分布については、地域によって過大あるいは過小の傾向が明瞭に見られた。今後は、実際の余震域の空間的な広がりを考慮した予測を進める必要がある。

地震活動の時空間的特徴把握の高精度化に向けた取り組みを進めた。海域で発生する地震の諸元を高精度で推定するため、3次元地下構造モデルと海域観測網を用いた CMT 解析を行った結果、従来の解よりも高精度な解が得られたことを確認した。また、地震の規模別頻度分布に対し、G-R 式以外の式の適用についての検討を進めた。今後は、高精度な CMT カタログ整備を行うとともに、次元削減によるカタログデータの可視化ならびに活動域ごとに最適な地震活動モデルの探索により、より高精度な地震活動の特徴把握を目指す。

(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8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
Centroid moment tensor analysis of waveform data from ocean bottom seismometers by using 3-D seismic velocity structure (口頭発表)	Lina Yamaya	日本地球惑星科学連合2023年大会（主催：日本地球惑星科学連合）	2023年5月23日	国内	○
Centroid moment tensor analysis for M6-class offshore earthquakes using long-period seismograms of the Seafloor Observation Network for Earthquakes and Tsunamis along the Japan Trench (S-net) (ポスター発表)	Lina Yamaya, Hisahiko Kubo, Katsuhiko Shiomi, Shunsuke Takemura	International joint workshop on Slow-to-Fast earthquakes	2023年9月13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の試み (ポスター発表)	久保久彦, 汐見勝彦	日本地震学会2023年度秋季大会（主催：日本地震学会）	2023年11月1日	国内	○
S-net観測波形を用いたM6クラス地震のセントロイド・モーメントテンソル解析 (口頭発表)	山谷 里奈, 久保 久彦, 汐見 勝彦, 武村 俊介	日本地震学会2023年度秋季大会	2023年11月2日	国内	○
Visualization of Temporal Changes in Seismic Activity around Japan by	Hisahiko Kubo, Takeshi Kimura,	2023 AGU Fall Meeting（主催：American Geophysical	2023年12月13日	国外	○

Applying Graph-Based Dimensionality Reduction to the Regional Moment Tensor Catalog (ポスター発表)	Katsuhiko Shiomi	Union)			
Centroid moment tensor inversion for M6-class offshore earthquakes including data from the Seafloor Observation Network for Earthquakes and Tsunamis along the Japan Trench (ポスター発表)	Lina Yamaya, Hisahiko Kubo, Katsuhiko Shiomi, Shunsuke Takemura	2023 AGU Fall Meeting (主催: American Geophysical Union)	2023年12月15日	国外	○
海洋性レイリー波を用いた海域地震の高解像度な CMT 解析の展望 (ポスター発表)	山谷 里奈, 武村 俊介, 久保 久彦, 齊藤 竜彦, 汐見 勝彦	2023 年度 東京大学地震研究所 共同利用研究集会「地震波形解剖学 3.0」	2023年12月18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	2023年度 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」	2024年1月23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
Exploratory Data Analysis of Earthquake Moment Tensor Catalog in	Hisahiko Kubo, Takeshi Kimura,	Pure and Applied Geophysics	2023 年 6 月 7 日	国外	○

Japan using Non-linear Graph-based Dimensionality Reduction	Katsuhiko Shiomi				
---	------------------	--	--	--	--

(e) 特許出願、ソフトウェア開発、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

本年度は、地震計記録の区間最大振幅を計算する時間幅を従来通り 60 秒に固定した場合と、本震からの経過時間に比例して変化させた場合について、非定常 Frechet 分布のパラメータ推定結果を比較検討した。その結果、周囲の余震活動が不活発な観測点では、時間幅を 60 秒に固定した場合に本震から時間が経つにつれて区間最大振幅に雑微動の影響が入り、不自然なパラメータ値を推定しやすくなるが、時間幅を経過時間に比例させて可変とすることでその影響が軽減され、安定したパラメータ推定ができることを明らかにした。また、2016 年熊本地震本震 ($M_J7.3$) や 2024 年能登半島地震 ($M_J7.6$) などの、本震の震央から離れた場所で大規模な余震活動が誘発されたイベントについて、観測点近傍の地震活動を反映した揺れ予測が可能であることを確認し、面的な揺れ予測に向けた下地を得ることができた。

(b) 業務の成果

1) 区間最大振幅を計算する時間幅の検討

以下の 2 つのケースについて、2018 年大阪府北部の地震 ($M_J6.1$) 後の Hi-net N.OSKH 観測点の記録を用いてパラメータ推定値の比較を行った。

ケース 1 (従来の手法): 本震からの経過時間によらず時間幅 T を 60 秒に固定する。

ケース 2 (新手法): 本震から 6 時間後までは T を 60 秒に固定。7 時間後以降は、本震からの経過時間を T_1 (時間) として、 $T = 10 \times T_1$ (秒) に従い設定する。

図 6 に、ケース 1 とケース 2 の区間最大振幅の違いを示す。ケース 1 では区間最大振幅の下端に社会活動に起因する 1 日周期の変動がみられるが、ケース 2 ではそのような変動は見られない。図 7 に推定したパラメータ A 、 m 、 p の時間変化を示す。 A 値は地震活動の活発さや震源距離、地盤増幅率などを、 m 値は最大振幅の規模別頻度分布を、 p 値は地震活動の時間減衰の早さを、それぞれ反映するパラメータである。最初の 1 日程度は両ケースで推定値に大きな違いは見られないが、その後はケース 1 の場合のみ、 A 値と p 値は減少した後にほぼ一定値をとり、 m 値は増加し続ける。これらはいずれも区間最大振幅に背景ノイズの影響が頻繁に含まれるために生じる。 A 値と p 値の減少は、区間最大振幅がノイズレベル以下の値をとれないため、揺れ頻度の時間減衰が見かけ上弱くなることから生じる。 m 値の増加は、ノイズ振幅が正規分布などの「裾野が狭い」分布に従うことから生じると考えられる。このような不自然な時間変化はケース 2 では確認されないことから、揺れ予測においてはケース 2 を採用することが妥当であることが明らかとなった。

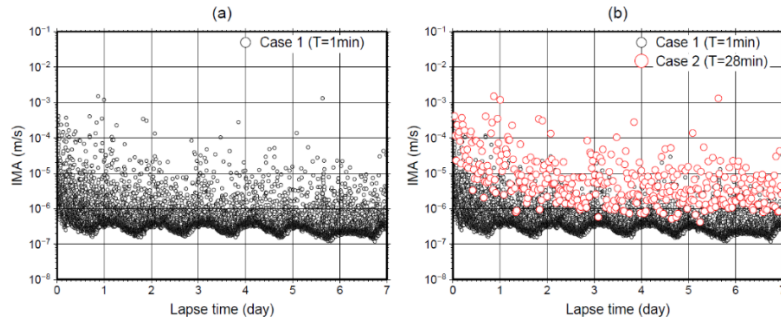


図6 大阪府北部の地震後の N. OSKH 観測点における、(a) ケース 1、(b) ケース 2 の場合の 7 日間の区間最大振幅。(b) ではケース 1 の場合（黒丸）にケース 2 の場合（赤丸）を重ねて示す。

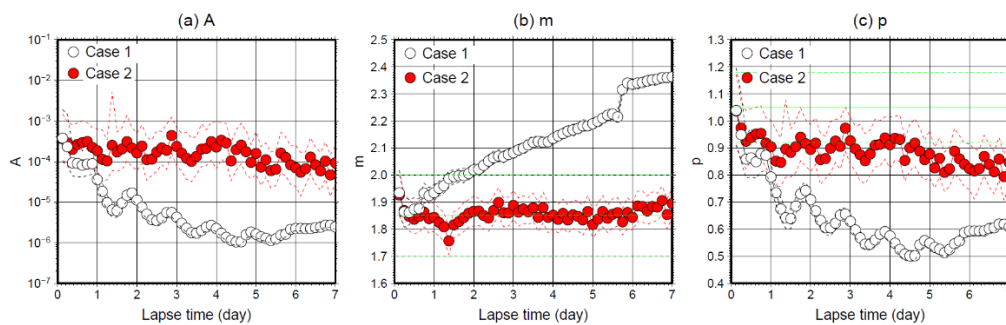


図7 大阪府北部の地震後の N. OSKH 観測点において推定したパラメータ (a) A、(b) m、(c) p の時間変化。ケース 1 を白丸、ケース 2 を赤丸で示す（いずれも推定の中央値）。点線は推定の 10% と 90% パーセンタイル値を示す。緑の実線と点線は事前分布の中央値と標準偏差。

2) 本震震央から離れた場所で生じた余震活動が予測に及ぼす影響の検証

地震動データそのものを用いた揺れ予測では、理論上、観測点近傍で生じた地震活動の影響を直接予測に反映させることができる。これを検証するため、本震の震央から離れた場所でも余震活動が活発であった 2016 年熊本地震本震と 2024 年能登半島地震を対象に、揺れの予測数と実測数の空間分布を調査した。

図 8 に熊本地震本震の 1 時間後時点における、予測時点から 7 日後までの 0.02cm/s 以上の揺れの予測数と観測数の比較を示す。本震の震央から北東側に 80km にわたり余震や誘発地震活動が見られる。これらを反映して、揺れの予測数は本震震央の周囲だけではなく北東側の観測点でも多い。この北東側に広がるパターンは実際の観測数でも確認できる。図 9 は、図 8 と同じ図を能登半島地震について示したものである。ただし、余震活動が非常に活発であったため、揺れの閾値は 0.065cm/s に引き上げている。予測数、観測数共に、本震震央のほぼ真上にある N. SUZH 観測点よりも、余震域の南西端に位置する N. TGIH 観測点の方が多い。これは、本震断層の南西端付近の浅部で活発化した余震活動を反映していると考えられる。これらの結果は、本震震央からの距離のみでは表現しきれない揺れ回数の面的分布を、本手法により早期に予測できることを示すものである。

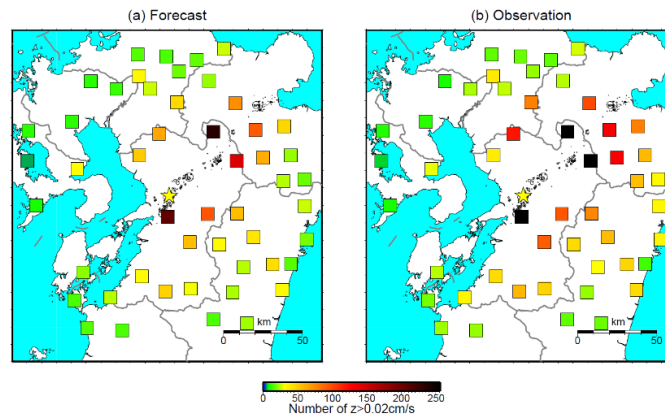


図8 熊本地震本震の1時間後時点における、予測時点から7日後までの 0.02cm/s 以上の揺れの (a) 予測数と (b) 実際の観測数。星印は本震の震央、黒丸は本震の1時間後までに検出された地震の震央を示す。

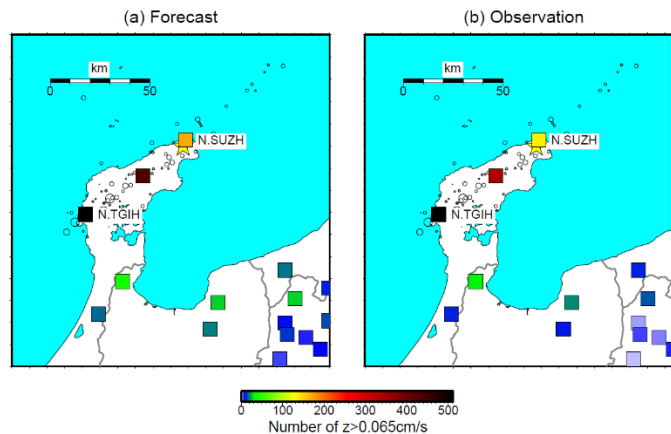


図9 能登半島地震の1時間後時点における、予測時点から7日後までの 0.065cm/s 以上の揺れの (a) 予測数と (b) 実際の観測数。星印は本震の震央、黒丸は本震の1時間後までに検出された地震の震央を示す。

(c) 結論ならびに今後の課題

区間最大振幅を計算する時間幅を本震からの経過時間に比例するように設定することで、区間最大振幅に雑微動の影響が含まれることを防ぎ、不自然なパラメータ推定値が生じることを防ぐことができた。また、本震震央からの距離だけでは説明できない複雑な地震活動分布を反映した面的な揺れ予測が可能であることを検証できた。これらの結果を踏まえて、今後は、面的な揺れ予測法（内挿補完）の開発、震度などの様々な揺れ指標への拡張、顕著な2次余震活動を伴う場合への対応といった本手法のさらなる高度化と、実データを用いた検証を進める予定である。

(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4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
事前分布の導入による本震直後における最大振幅予測性能の改善（口頭発表）	澤崎郁	日本地球惑星科学連合2023年大会（主催：日本地球惑星科学連合）	2023年5月21日	国内	○
Forecast of maximum amplitude immediately after a large earthquake through the extreme value analysis of continuous seismogram（ポスター発表）	澤崎郁	IUGG General Assembly 2023（主催：国際測地学地球物理学連合）	2023年7月18日	国外	○
地震計記録の区間最大値をとる時間幅が極値統計解析に及ぼす影響について（ポスター発表）	澤崎郁	日本地震学会2023年度秋季大会（主催：日本地震学会）	2023年11月1日	国内	○
極値統計学を用いた大地震直後からの揺れ予測の試み（口頭発表、招待講演）	澤崎郁	日本応用地質学会先端技術ワークショップ（主催：日本応用地質学会）	2024年2月9日	国内	○

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載

なし

(e) 特許出願、ソフトウェア開発、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

新たに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着手した。地震動波形のウェーブレット変換を通じて時刻歴データの内挿をウェーブレット係数の内挿に置き換えること、およびウェーブレット係数の内挿にはガウス過程回帰モデルを利用することの2つのアイデアに基づき、ガウス過程回帰モデルから得られるウェーブレット係数の予測値を逆変換することで任意の地点の波形を得る方法を提案した。熊本地震の観測記録を用いた検証からは、内挿範囲において波形の時系列特性やスペクトル特性を概ね再現できることを確認した。同時に、工学的に重要である一方で観測点の存在が期待できない震源ごく近傍などの外挿範囲においては推定精度を向上させる必要があることや、現在は1次元振動データの内挿として定式化を行っているため多次元データの内挿として手法を拡張する必要があることが課題として明らかになった。

(b) 業務の成果

震度や SI 値などのスカラー指標値と異なり、地震動波形のような振動データは回帰モデル構築の際に必要なデータ間の加算処理などが難しいことから、本業務では地震動波形のウェーブレット変換を通じて時刻歴データの内挿問題を、以下に示すようにウェーブレット係数の内挿問題に置き換えることとした。

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。

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

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 $\mathbf{C}_{a,b} = \{c_{a,b}^1, \dots, c_{a,b}^N\}$ と各観測地点の位置座標 $\mathbf{X} = \{\mathbf{x}^1, \dots, \mathbf{x}^N\}$ から、 $c_{a,b}$ に関するガウス過程回帰モデル $R_{a,b}(\mathbf{x})$ を構築する。

$$R_{a,b}(\mathbf{x}) = GP(0, k(\mathbf{x}, \mathbf{x}'); \mathbf{C}_{a,b}, \mathbf{X})$$

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 $R_{a,b}(\mathbf{x})$ 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というのが提案手法の骨子である。

以上のような提案手法の有効性を検証するために、実地震時の観測記録に対して提案手法を適用し、推定された波形と ground truth としての観測記録を比較する数値実験を行った。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操作を 13 地点全てに対して実施した。検討に用いた KiK-net 観測点 13 地点と震源位置を図 10 に示す。

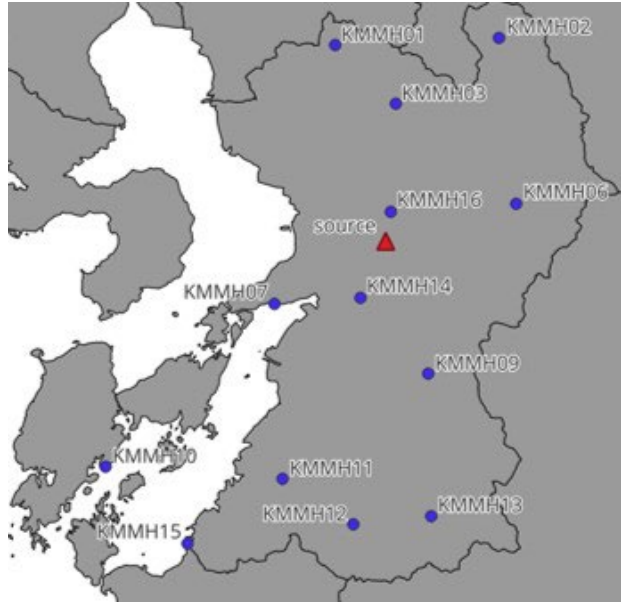


図 10 データ観測地点（熊本県内 Kik-net 観測点）と震源位置

図 11 に、地震動波形の推定を行った 13 地点のうち 3 地点について、推定結果と観測データの比較を行ったものを例として示す。ここでは時刻歴波形 (EW 成分) の比較に加えて、構造物に与える影響の再現性を評価する観点から応答スペクトルの比較も行っている。震源から遠方にある観測点 KMMH02 や震源近傍にある KMMH14 においては、震源との位置関係や距離によらず、地震動波形の経時特性や応答スペクトルの強度トレンドが概ね再現できる結果を得た。一方で、最も震源近傍にあり加速度最大値の大きな観測データが得られている KMMH16 では、そのような大きな強度の時刻歴波形やスペクトルの再現には至っていない。これは、震源距離を説明変数とみなした際に KMMH16 は他の地点からの内挿の範囲外にあり、提案手法がそのような外挿に対応できなかったためと考えられる。

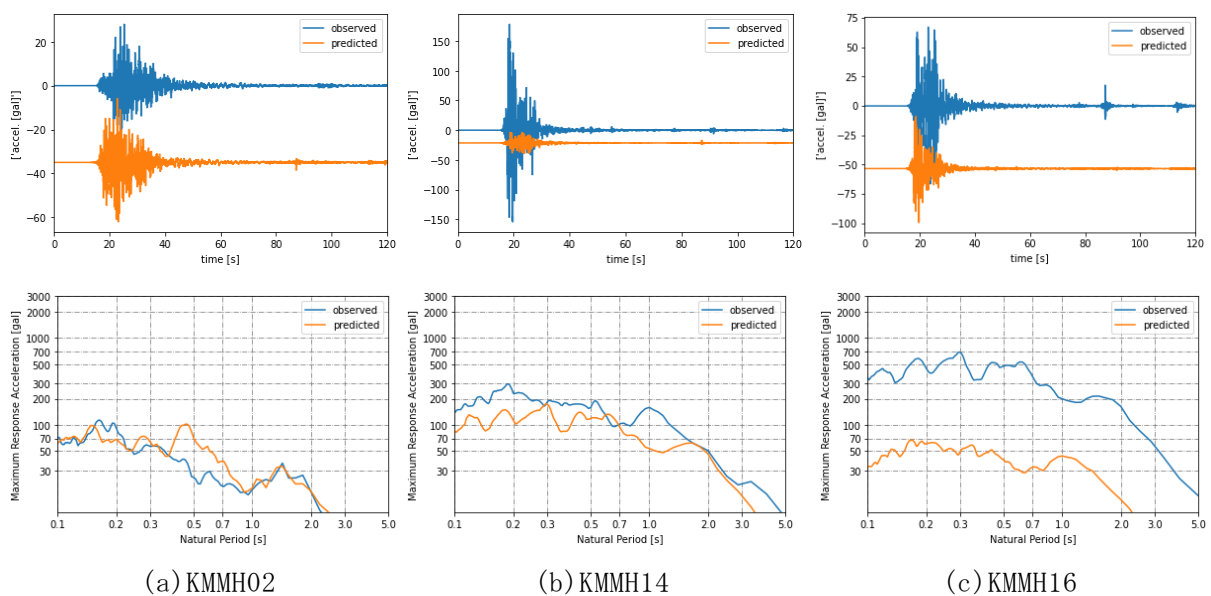


図 11 推定波形と観測データの比較（上：時刻歴波形（EW 成分），下：応答スペクトル）

(c) 結論ならびに今後の課題

観測地震動波形のウェーブレット係数に対するガウス過程回帰モデルを構築し、モデルから得られるウェーブレット係数の予測値を逆変換することで任意の地点の波形を得る方法を提案した。熊本地震の観測記録を用いた検証から内挿範囲において波形の時系列特性やスペクトル特性を概ね再現することのできる結果を確認できたが、今後の課題として外挿範囲でも推定精度を向上させるための改良や、現在は1次元振動データの内挿として行っている定式化の多次元データの内挿としての拡張が挙げられる。

(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1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
ガウス過程回帰を用いたサイト固有型地震動予測の試み スモールデータ観測点への適用（口頭発表）	久保久彦, 宮本崇	2023年度日本建築学会大会学術講演会（主催：日本建築学会）	2023年9月15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
機械学習による科学的方法論の拡張と地盤工学	宮本崇	地盤工学会誌	2023年6月	国内	○

(e) 特許出願、ソフトウェア開発、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

リアルタイム震度時系列に関する Site specific な地震動予測を目的として、グラフベースの非線形次元圧縮とランダムフォレスト回帰を組み合わせた手法を開発し、実記録の適用を通じて同手法の有効性の検証を行った。また地震動予測など近年の地震学における機械学習の適用事例に関するレビュー論文を共同執筆し、Earth, Planets and Space の Frontier Letter として出版された。機械学習を用いた関数同定アルゴリズムを地震動予測式の構築に適用し、その有効性の検証を行った。地震観測データに付与されたデータ DOI の引用情報を解析し、地震観測データの利活用状況を調べた。

(b) 業務の成果

1) 時系列データに関する Site specific な地震動予測モデルの開発に向けた検討

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 年度は時系列データに対する Site specific な地震動予測に関する研究開発を進めた。予測対象の時系列は 1 秒ごとの計測震度に相当する指標であるリアルタイム震度である（岡刀・他, 2008, 2013）。

図 12 に手法の模式図を示す。ここでは単独観測点におけるリアルタイム震度時系列を震源情報に基づいて予測することを考える。訓練時には、まずリアルタイム震度時系列のデータセットを非線形次元圧縮手法 UMAP によって次元圧縮し、過去記録の特徴を抽出した 2 次元埋め込みマップを作成する (①)。ここで得られる 2 次元埋め込みマップ上では、同じようなリアルタイム震度時系列であったイベントが近くに埋め込まれている。次に、震源情報を説明変数とし、2 次元埋め込みマップ上の座標を予測変数としたランダムフォレスト回帰の学習を行う (②)。震源情報は、地震の緯度・経度・深さ・モーメントマグニチュード M_w ・震源距離・方位角の正弦 (sin)・方位角の余弦 (cos) とした。ここまでの①と②の訓練ステップを経て、予測に移る。予測時には、まず予測対象とする地震の震源情報を 2 次元埋め込みマップの座標に変換する (③)。これには②で学習したランダムフォレスト回帰モデルを用いる。そして、①で学習済みの UMAP モデルによって、2 次元埋め込みマップの座標をリアルタイム震度時系列に逆変換をする (④)。

この予測手法を実記録に適用した。ここでは防災科学技術研究所が整備・運用を行っている強震観測網 K-NET, KiK-net の観測点の一つである K-NET つくば (IBR011) における予測を行った。1997 年から 2015 年までの記録を訓練データ、2016 年から 2021 年までの記録をテストデータにした。構築した Site specific な地震動予測モデルを実記録に適用したところ、リアルタイム震度の成長を予測することには成功したが、最終値の予測を苦手とする傾向が見られ、その結果揺れが大きい場合に過小な予測となるケースが多く見られた。

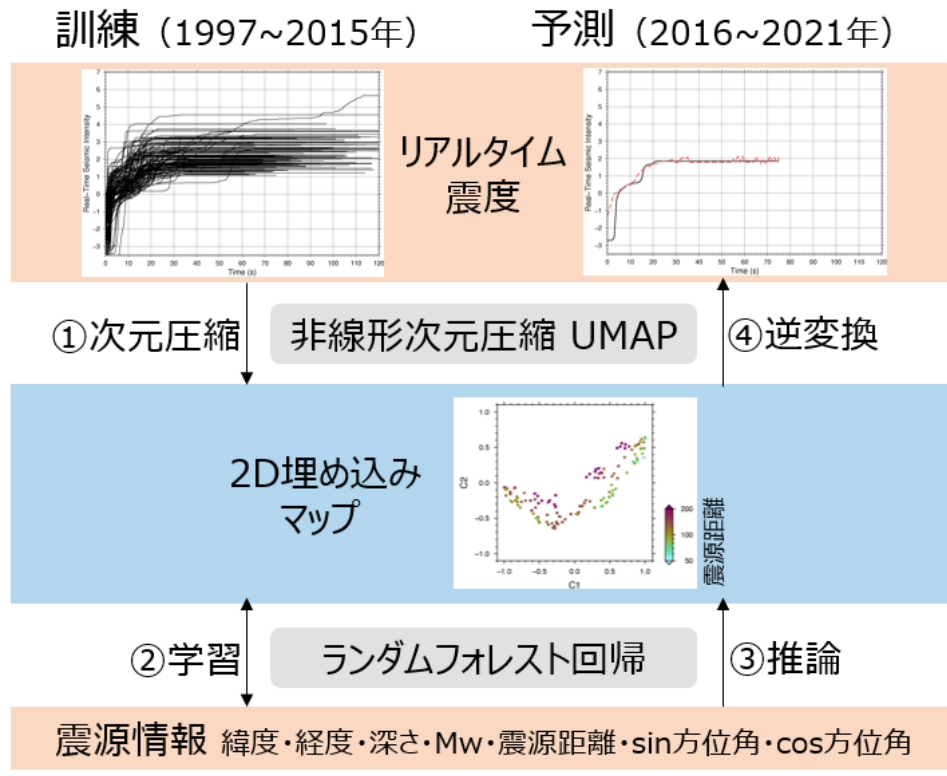


図 12 リアルタイム震度時系列に対する Site specific な地震予測手法の模式図

2) 地震学における機械学習の適用事例に関するレビュー論文の執筆

近年の地震学における機械学習の適用事例に関するレビュー論文を共同執筆し、Earth, Planets and Space の Frontier Letter として出版された (Kubo et al., 2024)。同論文では、地震カタログ作成や地震動予測、地殻変動に関連する測地データなどにおける機械学習の活用事例の詳細を多数示すとともに、機械学習の有効性や課題、それへの対応などをまとめている。図 13 に同論文におけるレビュートピックの概要図を示す。

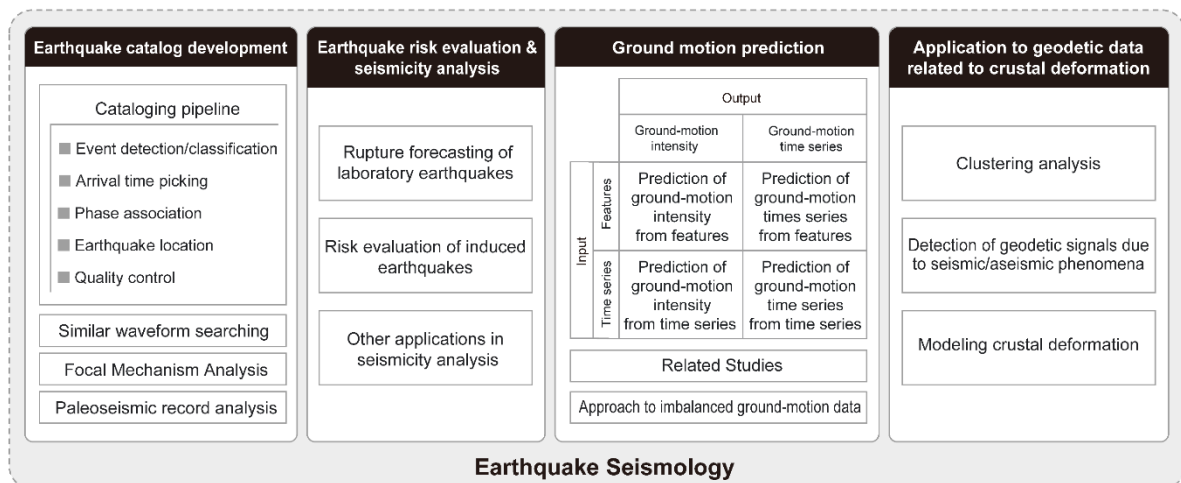


図 13 Kubo et al. (2024)におけるレビュートピックの概要図

3) AI Feynman を用いた地震動予測式の関数同定の試み

設定した地震によって生じる任意地点での揺れの強さの予測（地震動予測）では、地震動予測式と呼ばれる経験式がよく用いられている。地震動予測式は震度などの揺れの強さを予測変数とし、それを地震の規模や地震からの距離などの説明変数と紐づけた上で、過去データに基づいた回帰解析によって導出される。これまでは地震とその揺れに関する単純化した物理モデルを近似しつつ、解析者が経験的・主観的に関係式を決定することが多かった。データをより再現する関係式を構築することができれば、地震動予測の精度向上だけでなく、地震学および地震工学における新たな知見の獲得につながる可能性がある。そこで機械学習技術を活用した関数同定手法である AI Feynman (Udrescu, 2020) による関数同定を地震動予測式の構築に適用することを考え、その有効性の検証を行った。理論テストの結果、ノイズ無しの場合は精度よく関数同定することに成功したが、実観測を模したノイズ有りの場合は関数同定に成功しなかった。観測ノイズのばらつきが大きく、最新の関数同定アルゴリズムである AI Feynman をもってしても関数同定が難しいという結果となった。

4) 2-A との連携

2-B で研究開発を進める Site specific な地震動予測と 2-A で研究開発を進める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および基礎的検討を行った。

5) データ DOI の引用情報に基づく地震観測データの活用状況の把握の試み

研究データへの DOI の付与はオープンサイエンスの推進に向けた取り組みの一つとして地震学をはじめとする様々な分野で進められている。防災科研 MOWLAS を構成する観測網の観測データにもデータ DOI が付与されており、その引用情報に基づき MOWLAS 観測データがどのように利活用されているのかを調べた。

(c) 結論ならびに今後の課題

構築した Site specific な地震動予測モデルを実記録に適用したところ、リアルタイム震度の成長を予測することには成功したが、最終値の予測を苦手とする傾向が見られ、その結果揺れが大きい場合に過小な予測となるケースが見られた。今後は物理モデルに基づく経験式（久保ほか 2022）とのハイブリッド等による提案手法の高度化を進めるとともに、地震波形に関する Site specific な地震動予測モデルの開発を行っていく。また 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を進めていくとともに、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5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
AI Feynmanを用いた地震動予測式の関数同定の試み（口頭発表）	久保久彦	2023年度人工知能学会全国大会（第37回）（主催：人工知能学会）	2023年6月7日	国内	○
ガウス過程回帰を用いたサイト固有型地震動予測の試み：モデルデータ観測点への適用（口頭発表）	久保久彦, 宮本崇	2023年度日本建築学会大会（主催：日本建築学会）	2023年9月15日	国内	○
データDOIの引用情報に基づく防災科研MOWLASデータ活用状況（2019－2022年）把握の試み（口頭発表）	久保久彦, 汐見勝彦	日本地震学会2023年度秋季大会（主催：日本地震学会）	2023年11月3日	国内	○
サイト固有型地震動予測におけるGMPEと機械学習のハイブリッド（口頭発表）	久保久彦, 岩城麻子	第16回日本地震工学シンポジウム（主催：日本地震工学会、地域安全学会、地盤工学会、土木学会、日本活断層学会、日本機械学会、日本建築学会、日本災害情報学会、日本災害復興学会、日本地震学会、日本自然災害学会、日本都市計画学会）	2023年11月24日	国内	○
Analysis of the utilization status of observation data of earthquakes, tsunamis, and volcanoes in Japan	Hisahiko Kubo, Katsuhiko Shiomi	令和5年度 GGOS Japan報告会 データ作業部会ワークショップ（GGOS Japan）	2024年3月12日	国内	○

based on data DOI citation information					
---	--	--	--	--	--

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載 : 計4件、うち海外計1件

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所 （学会誌・雑誌等名）	発表した時期	国内・外の別	主たる成果
AI Feynmanを用いた地震動予測式の関数同定の試み	久保久彦	人工知能学会全国大会論文集	2023年7月10日	国内	○
地震動予測への機械学習技術の適用	久保久彦	地震予知連絡会会報	2023年9月	国内	○
サイト固有型地震動予測におけるGMPEと機械学習のハイブリッド	久保久彦, 岩城麻子	第16回日本地震工学シンポジウム論文集	2023年11月	国内	○
Recent advances in earthquake seismology using machine learning	Hisahiko Kubo, Makoto Naoi, Masayuki Kano	Earth, Planets and Space	2024年2月28日	国外	○

(e) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定
なし

3. まとめ

令和5年度は、ミーティングや研究ディスカッションを行いつつ、研究計画に沿った研究を着実に進め、地震発生確率予測に確率論的地震動予測アプローチを組み合わせた大地震直後の地震動超過確率の評価スキームの開発、海域記録を用いた震源要素推定の実施、区間最大振幅をとる時間幅の再考による極値統計解析手法の安定化、極値統計解析に基づく揺れの面的予測に向けた検討、波形ウェーブレットにガウス過程回帰を適用した時系列波形の空間補間アルゴリズムの開発、リアルタイム震度に関する Site specific な地震動予測モデルの構築等を行った。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」

大地震発生直後の余震発生確率情報に確率論的地震動予測アプローチを組み合わせることで地震動超過確率を予測する手法の開発を行った。また高精度な地震諸元に基づいた海域地震活動評価に資することを目的として3次元地下構造モデルと海域観測網を用いた CMT 解析を行うとともに、G-R 式から逸脱する地震の規模別頻度分布を説明する地震活動モデルの特徴評価を進めた。

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」

極値統計解析手法における区間最大振幅をとる時間幅を見直し、本震からの経過時間に比例させることで予測の安定化を実現した。また本震震央からの距離だけでは説明できない複雑な地震活動であっても、地震活動の空間分布を反映した面的な揺れ予測が極値統計解析手法によって可能であることを実記録に基づき確認した。

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を目的として、観測地震動波形のウェーブレット係数に対するガウス過程回帰モデルを構築し、モデルから得られるウェーブレット係数の予測値を逆変換することで任意の地点の波形を得る方法を提案した。

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 な地震動予測を目的とし、グラフベースの非線形次元圧縮とランダムフォレスト回帰を組み合わせた予測手法を開発した。また近年の地震学における機械学習の適用事例に関するレビュー論文を執筆した。

以上のように、令和5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5年度第1回ミーティング

日時：令和5年8月7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5年度第2回ミーティング

日時：令和5年12月26日 14:00—15:00

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5年度第1回拡大ミーティング

日時：令和5年10月5日 14:00—15:00

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

(b) 令和5年度第2回拡大ミーティング

日時：令和6年3月25日 13:00—15:00

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) 研究課題内研究ディスカッション

(a) 令和5年度第1回研究ディスカッション

日時：令和5年4月27日 11:00—12:00

会議形式：オンライン

(b) 令和5年度第2回研究ディスカッション

日時：令和5年6月21日 11:00—12:00

会議形式：オンライン

(c) 令和5年度第3回研究ディスカッション

日時：令和5年8月22日 15:00—16:00

会議形式：オンライン

(d) 令和5年度第4回研究ディスカッション

日時：令和5年10月17日 13:30—14:30

会議形式：オンライン

(e) 令和5年度第5回研究ディスカッション

日時：令和5年12月21日 13:30—14:30

会議形式：オンライン

(f) 令和5年度第6回研究ディスカッション

日時：令和6年2月5日 11:00—12:00

会議形式：オンライン

(g) 令和5年度第7回研究ディスカッション

日時：令和6年3月27日 11:00—12:00

会議形式：オンライン

(4)STAR-E プロジェクト全体

(a) 研究者・学生向けイベント

日時：令和5年9月24日 13:00—18:00

会議形式：対面

(b) 研究フォーラム

日時：令和5年2月22日 13:00—15:30

会議形式：オンライン

(c) 研究進捗会

日時：令和6年2月22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5年度の取り組みとして、ミーティングや研究ディスカッションを行いつつ、研究計画に沿った研究を着実に進めた。引き続き令和6年度も、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の予測」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の予測」に関する予測スキームの構築に向けた研究を推進する。

様式第 2 1

学 会 等 発 表 実 績

委託業務題目「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
事前分布の導入による本震直後における最大振幅予測性能の改善	澤崎郁	日本地球惑星科学連合2023年大会（主催：日本地球惑星科学連合）	2023年5月21日	国内
Centroid moment tensor analysis of waveform data from ocean bottom seismometers by using 3-D seismic velocity structure（口頭発表）	Lina Yamaya	日本地球惑星科学連合2023年大会（主催：日本地球惑星科学連合）	2023年5月23日	国内
AI Feynmanを用いた地震動予測式の関数同定の試み（口頭発表）	久保久彦	2023年度人工知能学会全国大会（第37回）（主催：人工知能学会）	2023年6月7日	国内
Forecast of maximum amplitude immediately after a large earthquake through the extreme value analysis of continuous seismogram	澤崎郁	IUGG General Assembly 2023（主催：国際測地学地球物理学連合）	2023年7月18日	国外
Centroid moment tensor analysis for M6-class offshore earthquakes using long-period seismograms of the Seafloor Observation Network for Earthquakes and Tsunamis along the Japan Trench (S-net)（ポスター発表）	Lina Yamaya, Hisahiko Kubo, Katsuhiko Shiomi, Shunsuke Takemura	International joint workshop on Slow-to-Fast earthquakes	2023年9月13日	国内
ガウス過程回帰を用いたサイト固有型地震動予測の試み：スモールデータ観測点への適用（口頭発表）	久保久彦 宮本崇	2023年度日本建築学会大会（主催：日本建築学会）	2023年9月15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の試み（ポスター発表）	久保久彦 汐見勝彦	日本地震学会2023年度秋季大会（主催：日本地震学会）	2023年11月1日	国内
地震計記録の区間最大値をとる時間幅が極値統計解析に及ぼす影響について	澤崎郁	日本地震学会2023年度秋季大会（主催：日本地震学会）	2023年11月1日	国内

S-net観測波形を用いたM6クラス地震のセントロイド・モーメントテンソル解析（口頭発表）	山谷 里奈, 久保 久彦, 汐見 勝彦, 武村 俊介	日本地震学会2023年度秋季大会	2023年11月2日	国内
データDOIの引用情報に基づく防災科研MOWLASデータ活用状況（2019－2022年）把握の試み（口頭発表）	久保久彦 汐見勝彦	日本地震学会2023年度秋季大会（主催：日本地震学会）	2023年11月3日	国内
サイト固有型地震動予測におけるGMPEと機械学習のハイブリッド（口頭発表）	久保久彦 岩城麻子	第16回日本地震工学会シンポジウム（主催：日本地震工学会、地域安全学会、地盤工学会、土木学会、日本活断層学会、日本機械学会、日本建築学会、日本災害情報学会、日本災害復興学会、日本地震学会、日本自然災害学会、日本都市計画学会）	2023年11月24日	国内
Visualization of Temporal Changes in Seismic Activity around Japan by Applying Graph-Based Dimensionality Reduction to the Regional Moment Tensor Catalog（ポスター発表）	Hisahiko Kubo Takeshi Kimura Katsuhiko Shiomi	2023 AGU Fall Meeting（主催：American Geophysical Union）	2023年12月13日	国外
Centroid moment tensor inversion for M6-class offshore earthquakes including data from the Seafloor Observation Network for Earthquakes and Tsunamis along the Japan Trench（ポスター発表）	Lina Yamaya, Hisahiko Kubo, Katsuhiko Shiomi, Shunsuke Takemura	2023 AGU Fall Meeting（主催：American Geophysical Union）	2023年12月15日	国外
海洋性レイリー波を用いた海域地震の高解像度なCMT解析の展望（ポスター発表）	山谷 里奈, 武村 俊介, 久保 久彦, 齊藤 竜彦, 汐見 勝彦	2023 年度 東京大学地震研究所 共同利用研究集会 「地震波形解剖学 3.0」	2023年12月18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	2023年度 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」	2024年1月23日	国内

極値統計学を用いた大地震直後からの揺れ予測の試み (招待講演)	澤崎郁	日本応用地質学会先端技術ワークショップ (主催：日本応用地質学会)	2024年2月9日	国内
Analysis of the utilization status of observation data of earthquakes, tsunamis, and volcanoes in Japan based on data DOI citation information	Hisahiko Kubo Katsuhiko Shiomi	令和5年度 GGOS Japan報告会 データ作業部会ワークショップ (GGOS Japan)	2024年3月12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
機械学習による科学的方法論の拡張と地盤工学	宮本崇	地盤工学会誌, Vol. 71, No. 6, p. 19-23	2023年6月	国内
Exploratory Data Analysis of Earthquake Moment Tensor Catalog in Japan using Non-linear Graph-based Dimensionality Reduction	Hisahiko Kubo Takeshi Kimura Katsuhiko Shiomi	Pure and Applied Geophysics	2023年6月7日	国外
AI Feynmanを用いた地震動予測式の関数同定の試み	久保久彦	人工知能学会全国大会論文集	2023年7月10日	国内
地震動予測への機械学習技術の適用	久保久彦	地震予知連絡会会報	2023年9月	国内
サイト固有型地震動予測におけるGMPEと機械学習のハイブリッド	久保久彦 岩城麻子	第16回日本地震工学シンポジウム論文集	2023年11月	国内
Recent advances in earthquake seismology using machine learning	Hisahiko Kubo Makoto Naoi Masayuki Kano	Earth, Planets and Space	2024年2月28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。