

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4年度
成果報告書

令和5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4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

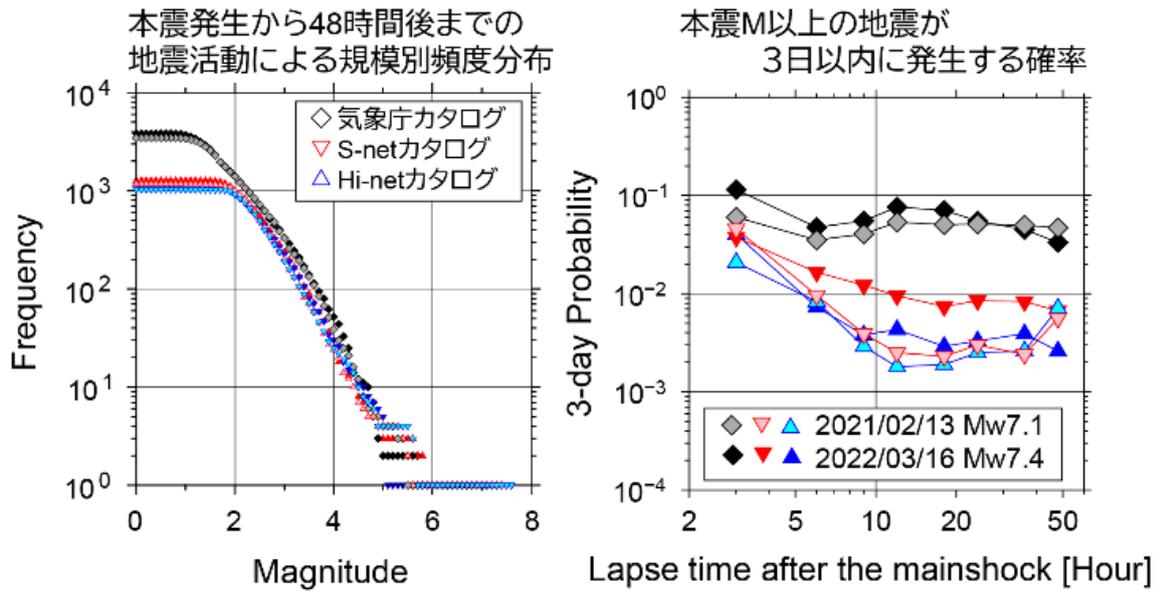


図1 2021年2月および2022年3月に福島県沖で発生したスラブ内地震に対する余震の規模別頻度分布図（左）および本研究課題で検証を進めている余震予測アルゴリズムによる余震発生確率（右）

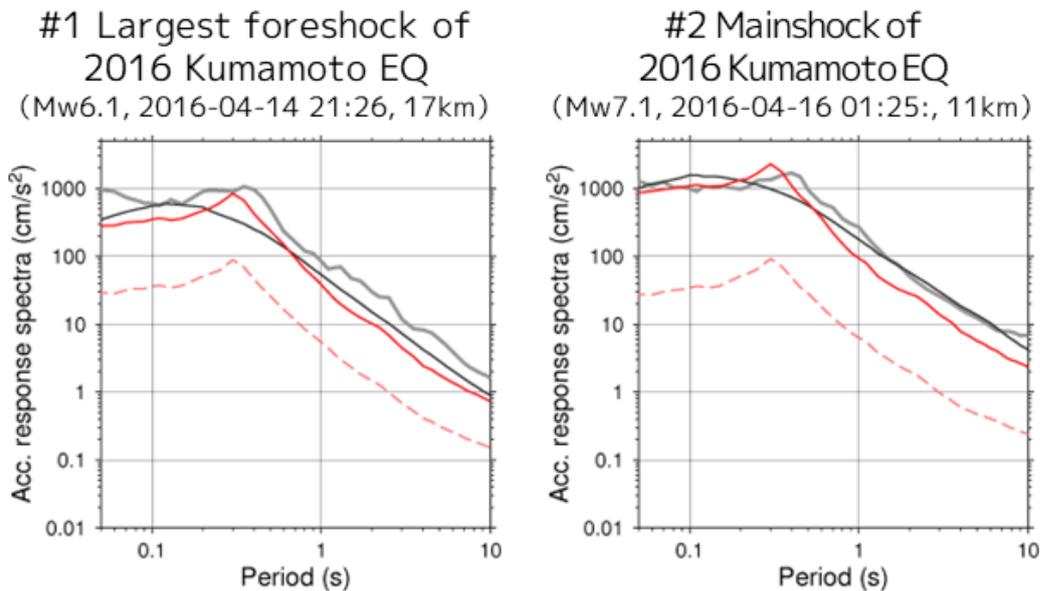


図2 2016年熊本地震の最大前震（左）および本震（右）におけるK-NET 砒用での加速度応答スペクトルの観測値（灰色）、機械学習のみを用いたSite specificな地震動予測モデルの予測値（赤破線）、ハイブリッド予測アプローチに基づくSite specificな地震動予測モデルの予測値（赤実線）、複数地点の記録を基づく地震動予測モデルの予測値（黒線）の比較

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4年度の成果	7
3. まとめ	27
4. 活動報告	28
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	R4. 4. 1 ～ R5. 3. 31	14, 500, 393 円	4, 350, 117 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	R4. 4. 1 ～ R5. 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	澤崎 郁	R4. 4. 1 ～ R5. 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	R4. 4. 1 ～ R5. 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	R4. 4. 1 ～ R5. 3. 31	3, 979, 608 円	1, 193, 882 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う。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を活用した任意地点での揺れ予測への拡張に着手する。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する。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。

4) 令和 6 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開発を進めるとともに、地震発生の時空間予測に向け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、空間方向への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4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」

プレート境界やスラブ内で発生する地震について、海域を対象とした地震カタログを用いた場合等における、既往システムの予測性能検証を継続する。過去の地震活動に最適な地震活動モデルの探索と予測結果の影響評価に着手する。

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」

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い、同手法の高度化を図る。また機械学習を活用した予測手法の検討を行う。

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を進める。距離減衰式のモデル構造をガウス過程回帰モデルに導入することにより、位置座標だけでなく震源情報を説明変数に加えた回帰モデルを構築し、その精度を検証する。

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」

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、物理モデルに基づく地震動予測式との組み合わせによって地震動予測モデルの高度化を図る。また地震波形に関する Site specific な地震動予測モデルの開発に向けて基礎的検討を行う。

(2) 令和 4 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

防災科研が試験運用を行っている余震予測システムと同じアルゴリズムを海域の地震活動データに適用し、その予測性能ならびに結果の地震カタログ依存性の確認を行った。福島県沖のスラブ内地震活動に対して、自動検測によるカタログと手動検測によるカタログ間で余震活動予測結果に有意な差が見られた一方、宮城県沖のプレート間地震においては、カタログ依存性はほとんど見られなかった。福島県沖の地震における予測結果の差違は、Gutenberg-Richter 則 (G-R 則) で評価対象とするマグニチュード (M) の下限に依存している可能性を示した。また、海域で発生する地震の発生場所や発震機構解を高精度に推定することを目的とした S-net データを含むセントロイドモーメントテンソル (CMT) 解析の実現に向け、観測波形と理論波形との比較検討に着手し、アウターライズ型地震の解析において海底地震波形記録を使用することの有効性を明らかにした。

(b) 業務の成果

1) 海域で発生する地震を対象とした余震予測システムの検証と地震活動モデル検討

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) は、陸域観測点のみを用いた防災科研 Hi-net 自動処理震源カタログ (以下、Hi-net カタログ) を対象としている。一方、気象庁一元化震源カタログ (以下、気象庁カタログ) 等、海域観測データを処理に含めたカタログも整備されつつあり、海域で発生する地震の検出率や震源決定精度が従来よりも高精度化することが期待される。今年度は海域のプレート間やスラブ内で発生する地震に対し、余震予測システムと同じアルゴリズムで海域地震観測データを含めた複数の震源カタログを解析し、予測性能ならびに結果のカタログ依存性の確認を行った。

解析対象として、気象庁カタログに S-net データが採用された 2020 年 9 月以降に東北地方太平洋沖で発生した Mw5.5 以上かつ気象庁 M6.0 以上の 9 地震を抽出した。解析には、気象庁カタログのほか、防災科研が試験的に実施している S-net データを加えた自動処理震源カタログ (以下、S-net カタログ) および Hi-net カタログを使用し、余震予測に用いる各パラメータの予測状況を確認した。余震発生確率については、評価対象とした地震およびカタログによって本震の M が異なることから、評価時点から 3 日以内に「本震と同等サイズの地震」が後発地震として発生する確率を比較検討した。抽出した 9 地震のうち、それぞれ近接した場所で発生した地震の結果を一例として図 3 および図 4 に示す。

福島県沖では、2021 年 2 月 13 日に Mw7.1、2022 年 3 月 16 日に Mw7.4 のスラブ内地震が発生した (図 3)。自動震源決定処理に基づく S-net カタログおよび Hi-net カタログは、両地震に対して類似したパラメータ推定ならびに後発地震発生確率を示す傾向にあったのに対し、気象庁カタログでは b 値が他のカタログよりも 0.2 程度小さく、後発地震の発生確率も 10 倍以上高くなる結果となった。一方、地震発生から 48 時間後までに

発生した余震の規模別頻度分布は、気象庁カタログでやや上に凸になる傾向が見られるものの、カタログ依存性は明瞭ではない。気象庁カタログはオペレータによる目視確認ならびに必要に応じて再検測が実施されたカタログであるため、地震の検知率が Hi-net カタログや S-net カタログよりも改善している。そのため、G-R 則における b 値推定に用いる最小 M が自動処理カタログよりも小さくなる。最尤法で b 値を求める場合、小さな M の分布の影響を受けやすく、規模別頻度分布が上に凸の形状を示す例では b 値が小さめに推定される。小さな b 値から本震と同等の規模の地震の発生確率を評価したため、気象庁カタログでは大きな予測確率となったと考えられる。

宮城県沖では、2021 年 3 月 20 日に Mw7.0、同年 5 月 1 日に Mw6.7 のプレート間地震が発生した（図 4）。これらの地震活動においてはカタログ間の違いはほとんど見られない一方、時空間的に近接する両地震で b 値が大きく異なる結果となった。この活動においては、5 月の活動時の方が大きい b 値を示すが、K 値は 3 月の活動に対して数十分の 1 と小さいため、余震発生確率が 3 月よりも小さくなったと考えられる。規模別頻度分布は、いずれの活動においても M3.5 前後で折れ曲がりが見える。今後は、地震活動の地域的傾向の有無ならびに適切な地震活動モデルの選択方法について検討する必要がある。

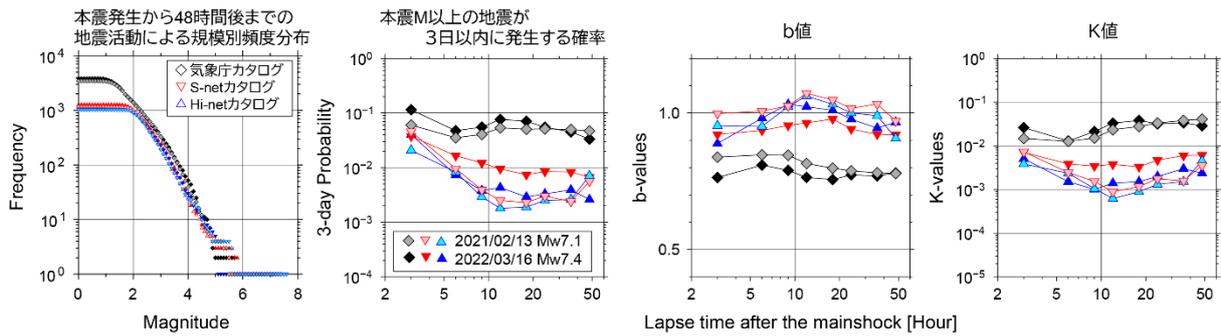


図 3 2021 年 2 月および 2022 年 3 月に福島県沖で発生したスラブ内地震に対する余震の規模別頻度分布図、余震発生確率ならびに確率評価に用いたパラメータの推定値

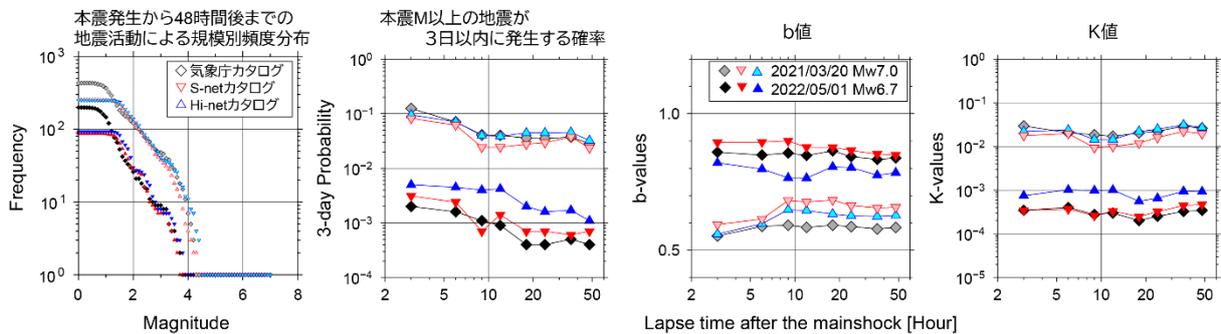


図 4 2021 年 3 月および同年 5 月に宮城県沖で発生したプレート間地震に対する余震の規模別頻度分布図、余震発生確率ならびに確率評価に用いたパラメータの推定値

2) 海域で発生する地震を対象とした海底地震計記録に基づくセントロイドモーメントテンソル解析に向けた検討

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 b 値は地震の発震機構に依存するという報告もあるが (Schorlemmer et al., 2005)、震源から遠く観測点カバレッジの悪い陸域の観測網を使用している現状の解析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。2022 年度は、S-net 観測波形と F-net モーメントテンソル (MT) 解および 3 次元地下速度構造モデルを仮定した地震波伝播シミュレーションで計算された理論波形の比較から、F-net MT 解の妥当性の検証を行った。地震波伝播シミュレーションには OpenSWPC (Maeda et al., 2017) を使用し、0.02-0.05 Hz の加速度波形で比較した。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) を用い、固体領域の最小 S 波速度を 1.0 km/s とした。図 5 に観測波形と理論波形の比較例を示す。プレート境界型地震の場合、S-net 観測波形を大まかには再現できているが、観測波形の振幅を十分に説明できていない部分も確認された。アウターライズ型地震の場合、陸側と比較して海側での観測点の波形の位相がずれるという傾向が見られた。

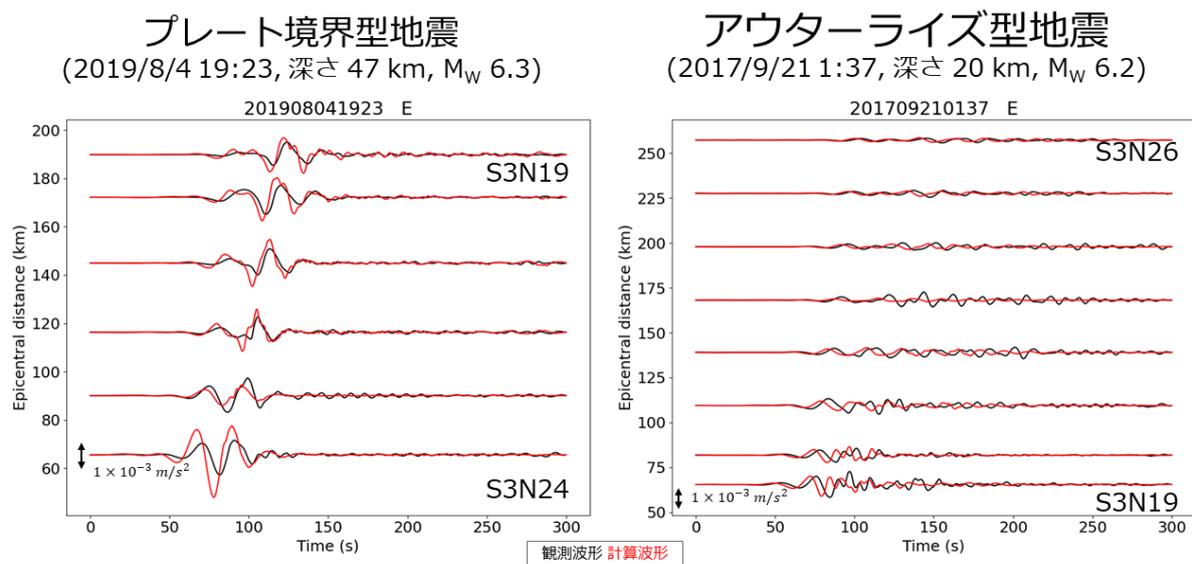


図 5 プレート境界型地震 (左) とアウターライズ型地震 (右) における S-net 観測波形 (黒色、東西成分) と F-net MT 解および 3 次元地下速度構造モデルを仮定した地震波伝播シミュレーションで計算された理論波形 (赤色、東西成分) の比較。

(c) 結論ならびに今後の課題

複数の震源カタログに対し、防災科研が試験運用を行っている余震予測システムと同じアルゴリズムにより海域で発生した地震に伴う余震活動を解析し、その予測性能ならびに結果のカタログ依存性を確認した結果、一部の地震で明瞭なカタログ間の依存性が

認められた。また、一部の地震活動の規模別頻度分布において、上に凸の形状を示す、一定以上の規模の地震活動が低調になるなど、直線性を前提とする G-R 則で説明し難い事例も確認出来た。今後、このような事例を精査し、より適切な地震活動モデルの評価方法の検討を進める必要がある。

アウターライズ型地震に対して、F-net MT 解を仮定した地震波伝播シミュレーションで計算された理論波形と S-net 観測波形で有意な違いが生じることを確認した。このことは、S-net 波形記録の活用により海域で発生する地震の CMT 解カタログが高精度化されうることを意味する。今後はこの取り組みをさらに進め、海域で発生する地震の諸元決定精度の向上および地震発生場所ごとの地震活動把握を目指す。

(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 6 件、うち国外計 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
リアルタイム余震活動予測システム：最近5年間の予測実績と検証（ポスター発表）	汐見勝彦 近江崇宏 尾形良彦 澤崎 郁	日本地球惑星科学連合 2022 年大会（主催：日本地球惑星科学連合）	2022 年 6 月 2 日	国内	○
S-net 海底地震計を用いた日本海溝で発生した地震のセントロイド・モーメントテンソルインバージョン（ポスター発表）	山谷里奈 久保久彦 汐見勝彦 武村俊介	日本地震学会 2022 年度秋季大会（主催：日本地震学会）	2022 年 10 月 26 日	国内	○
教師無し機械学習を通じた地震の時空間分布に関するデータ構造把握の試み（ポスター発表）	久保久彦 木村武志 汐見勝彦	第 25 回情報論的学習理論ワークショップ IBIS2022（主催：電子情報通信学会 情報論的学習理論と機械学習研究会）	2022 年 11 月 21 日	国内	○
Aftershock activity of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake and the 2011 off Ibaraki earthquake revealed by CMT	Lina Yamaya Kimihiro Mochizuki Takeshi Akuhara Shunsuke	2022 AGU Fall Meeting（主催：American Geophysical Union）	2022 年 12 月 14 日	国外	○

inversion using dense short period OBS array (ポスター発表)	Takemura Masanao Shinohara Tomoaki Yamada				
S-net 海底地震計を用いた CMT 解析に向けて (口頭発表)	山谷里奈 久保久彦 汐見勝彦 武村俊介	2022年度 東京大学地震研究所 共同利用研究集会 「陸海両域での超高密度観測時代の観測・解析手法と地震波伝播理論の新展開」	2022年12月20日	国内	○
S-netの地震波形記録を用いたセントロイドモーメントテンソルインバージョンに向けた諸検討 (口頭発表)	久保久彦 山谷里奈 汐見勝彦 武村俊介	2022年度 東京大学地震研究所 共同利用研究集会 「地震動をはじめとする地球科学データの即時解析・即時予測・情報利活用」	2023年1月12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
CMT inversion for small-to-moderate earthquakes applying to dense short-period OBS array at off Ibaraki region	Lina Yamaya Kimihiro Mochizuki Takeshi Akuhara Shunsuke Takemura Masanao Shinohara Tomoaki Yamada	Earth, Planets and Space	2022年11月8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

(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、本震直後等の使用できるデータ数が少ない状況における予測を安定させるために、非定常 Frechet 分布のパラメータが持つ先験的情報を事前分布として予測法に反映させた。さらに、マルコフ連鎖モンテカルロ (MCMC) 法を用いて、パラメータの事後分布を推定するベイズ予測法を考案した。この手法を 2008 年岩手・宮城内陸地震など、4 地震 12 観測点の連続地震動記録に適用した結果、多くの観測点で、本震の 1 時間後時点での予測性能が大幅に向上した。また、首都圏に展開されている MeSO-net におけるリアルタイム震度時系列記録の特徴を調べ、機械学習を用いた予測の適用可能性の検討を行った。

(b) 業務の成果

1) 事前分布を用いた余震予測の安定化

連続地震動記録の区間最大振幅は、非定常 Frechet 分布 (Non-stationary Frechet Distribution, NFD) と呼ばれる極値分布の一種に従う (Sawazaki, 2021)。NFD を規定するパラメータは、地震活動の活発さや震源距離などを反映する A 、地震活動の時間減衰を反映する p, c (大森・宇津公式の p, c 値)、最大振幅の規模別頻度分布を表す m (Gutenberg-Richter 式の b 値と関係する値)、および区間最大振幅の下限を表す x_{\min} の 5 個である。

区間最大振幅からこれらのパラメータを推定するにあたり、大地震直後のデータ数が足りない時間帯において、推定が安定しないという問題があった。そこで、5 個のパラメータのうち p, c, m, x_{\min} について事前分布 $P_{pri}(\theta)$ を導入し、事後分布

$$P_{pos}(\theta) = L(\theta)P_{pri}(\theta)$$

に対して MCMC 法を用いたサンプリングを行い、1000 個のパラメータセットの抽出を行った。ここで L はデータから求められる尤度関数を表す。事前分布は、 p と m についてはそのまま、 c と x_{\min} についてはそれぞれ $c' = \ln(c - 1.0s)$ と $x'_{\min} = \ln\left(\frac{x_{\min}}{z_{\min} - x_{\min}}\right)$ という変数変換を施したうえで、正規分布を仮定して与えた。ここで z_{\min} は観測された区間最大振幅の最小値である。正規分布の平均と標準偏差は Omi et al. (2015)などを参考に表 1 のように与えた。

図 6 に、 m 値についての事前分布と、1000 回のサンプリングから得られた尤度関数および事後分布の例を示す。本震から 1 時間後時点では、区間最大振幅のデータ数が少ないため推定値が大きくばらつくが、事前分布を掛け合わせるにより事後分布の広がりや抑制され、極端な値が推定されにくくなっている。一方、3 時間後時点では、データ数が増えるため、事前分布の有無によらず推定値は概ね安定している。

図 7 は、2008 年岩手・宮城内陸地震の際の N. ICEH 観測点において、0.1 cm/s 以上の最大振幅発生回数の推移予測と実際の推移との比較を示す。本震の 1 時間後時点では、事前分布を用いない場合の推移予測が著しく過小評価されているのに対し、事前分布を用いた場合は実際の推移と概ね合っている。6 時間後になると、事前分布の有無による推移予測の違いはほとんど見られなくなる。これらの結果から、本震の 1 時間後時点での予測を安

定させるためには事前分布の導入が有効であることが確認できた。

図8は、岩手・宮城内陸地震（気象庁マグニチュード $M_J7.2$ 、4観測点）、2018年大阪府北部の地震（ $M_J6.1$ 、4観測点）、2016年熊本地震の最大前震と本震（ $M_J6.5$ と $M_J7.3$ 、それぞれ2観測点）における、地震発生の1時間後から24時間後までの、 0.1 cm/s 以上の最大振幅発生回数の予測値と実測値を示す。ほぼ全ての観測点で、実測値は予測値の5-95パーセンタイルの範囲にあり、実測値は予測中央値の倍半分の範囲に収まる。熊本地震の最大前震の規模は岩手・宮城内陸地震や熊本地震の本震よりもかなり小さいが、それらと同程度の発生数を予測して、実際にそれだけの数が起こっている。このことは、地震ごとの sequence specific な予測が1時間後時点である程度可能であることを示す。

表1 事前分布（正規分布）の平均と標準偏差

パラメータ	平均	標準偏差
p	1.05	0.13
m	1.85	0.15
c'	7.35 (1556s)	1.42
x'_{\min}	0	1.0

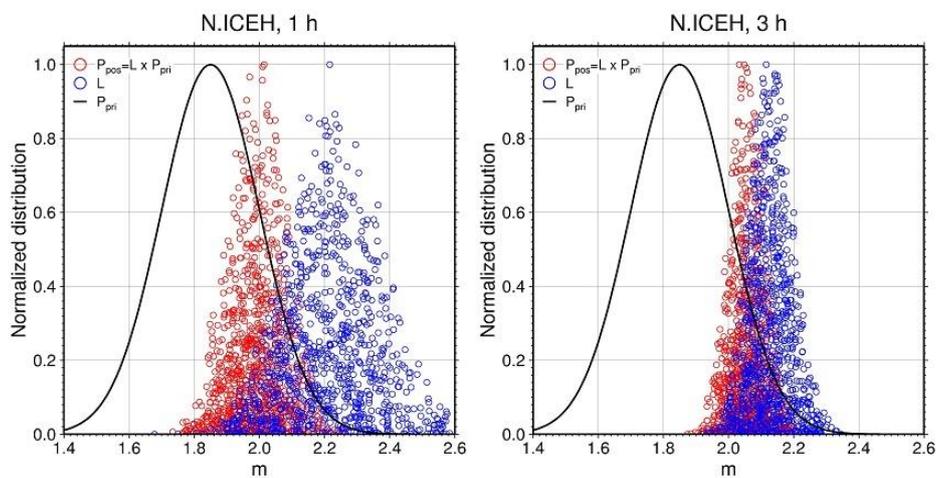


図6 岩手・宮城内陸地震時の N.ICEH 観測点における、 m 値の事前分布（黒線）、区間最大振幅データから計算した尤度関数（青丸）および事後分布（赤丸）。本震の1時間後（左図）と3時間後（右図）時点での分布を示す。

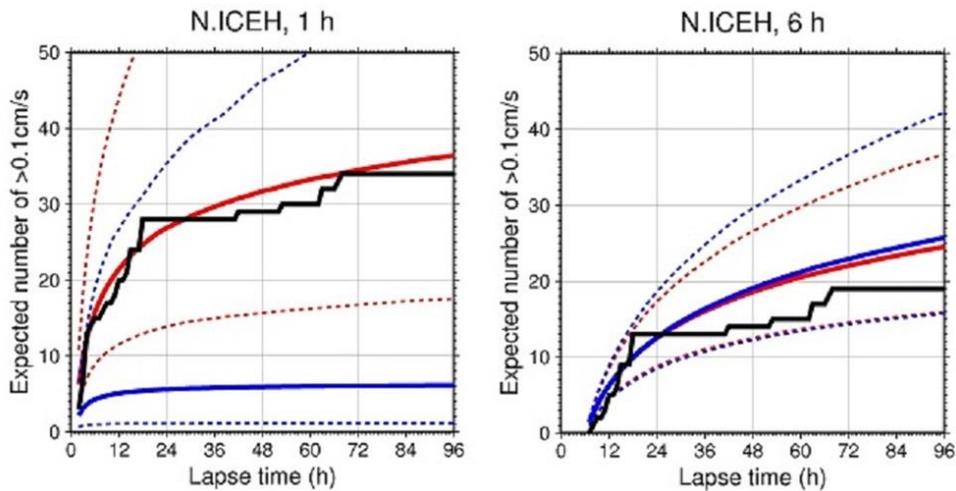


図7 岩手・宮城内陸地震時の N. ICEH 観測点における、0.1 cm/s 以上の振幅の積算発生数の推移予測（色付き実線：中央値、点線：5%および 95%パーセンタイル、黒実線：実際の推移）。赤および青線はそれぞれ事前分布を導入した場合としない場合の予測を示す。

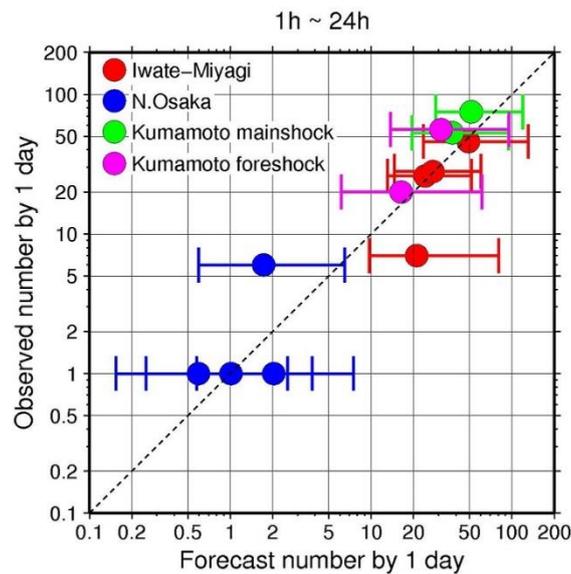


図8 地震発生の1時間後時点における、1時間後～24時間後までの0.1 cm/s以上振幅発生数の予測値と実測値の比較。予測値の丸の位置とエラーバーの範囲は、それぞれ中央値と5-95%パーセンタイル範囲。

2) 地震動そのものを用いた揺れの予測への機械学習の適用に向けた検討

地震動そのものを用いた揺れの予測への機械学習の適用可能性を検討すべく、首都圏地震観測網 MeS0-net におけるリアルタイム震度時系列記録の特徴を調べた。MeS0-net の連続波形記録からリアルタイム震度を計算し、1時間ごとの最大値および中央値を複数年分得た。図9に E.ICEM（東京都江戸川区一之江）での2011年と2012年の時系列を示す。それぞれの時系列において日変動および週変動、休日の振動レベル低下の傾向が見られた。1-B の課題に機械学習を適用するには、最大値時系列において大地震後の振動レベルの増

加およびその減衰の傾向を有する事例が多数必要である。そのような事例は 2011 年東北地震の後に明瞭に見られたが、他の期間では確認できず、地震による擾乱の多くは突発的な増加として見られた。機械学習の適用には一定量のデータセットを確保する必要があるが、MeSO-net ではそれが難しいと考えられる。

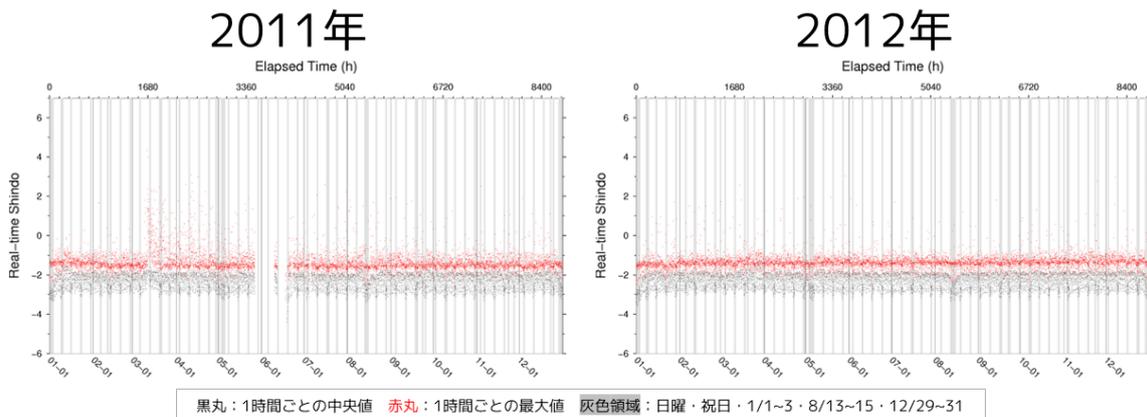


図9 2011年（左）と2012年（右）におけるMeSO-net E. ICEM（東京都江戸川区一之江）でのリアルタイム震度時系列（黒丸：1時間ごとの中央値、赤丸：1時間ごとの最大値）

(c) 結論ならびに今後の課題

極値統計学に基づく余震による揺れの予測法に事前分布を取り入れ、さらにMCMC法を用いたベイズ推定を行うことにより、本震の1時間後時点で、高精度かつ高正確度の予測が可能となった。このことは、発災後に迅速かつ正確な余震情報を伝えるための素地ができたという点で、大きな前進といえる。今後は事前分布の取り入れ方を改良し、さらに面的な地震動分布の予測、2次余震を考慮した手法の開発など、より様々なニーズに対応した予測手法の開発に取り組んでいく。

地震動そのものを用いた揺れの予測への機械学習の適用可能性を検討すべく、MeSO-netにおけるリアルタイム震度時系列記録の特徴を調べたところ、機械学習に必須である過去の事例が限られていることが分かった。このことはデータセット確保の観点から機械学習の適用が難しいことを意味し、先に述べた統計的手法の高度化および適用に注力していく。

(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1件、うち国外計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
MeSO-net 観測点におけるリアルタイム震度時系列の特徴（ポスター発表）	久保久彦 澤崎郁 山谷里奈 木村武志	日本地震学会2022年度秋季大会（主催：日本地震学会）	2022年10月24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

前年度に構築した、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、地震時に得られた観測データを条件として地震動指標値の事後分布計算を行うガウス過程回帰モデルについて、国内の複数の地震に対する精度評価を行うと共に、説明変数である入力情報を空間座標のみとする形式から地盤構造などの説明変数を組み込んだ一般形式へと拡張を行いその精度を評価した。国内の複数の地震への検証については、2000年以降に国内で発生し最大震度6弱以上を記録した33地震について交差検証を行った結果、ほぼ全てのケースについて通常の地震動予測式よりも精度が向上する結果を得た。一方で、モデルの説明変数を拡張し一般化したモデルについては、浅部地盤や深部地盤、震源距離の3説明変数を導入したものの有意な精度向上には至らなかったため、今後は説明変数の対数を取るなどの前処理を行うことによるモデルの一層の改良を検討するものとした。

(b) 業務の成果

前年度に開発したガウス過程回帰モデルは、距離減衰式 (Ground Motion Prediction Equation, GMPE) から与えられる予測値と計測震度の残差をガウス過程としてモデル化し、観測点記録から任意の地点におけるその事後分布を計算する回帰モデルである。モデルにおける GMPE は、次式で示される Morikawa and Fujiwara (2013) の式を用いている。

$$\frac{INT}{2} = a(Mw' - Mw)^2 + b_k X + c_k - \log(X + d \cdot 10^{eMw'}) \pm \sigma$$

ここで INT は予測震度、 Mw はモーメントマグニチュード、 X は断層最短距離、 (a, b_k, c_k, d, e) は回帰係数であり、 k は地震種別を表す添字である。また Mw' はモーメントマグニチュードに対する地震動強度の飽和を表現しており、飽和マグニチュード Mw_0 を用いた以下の式によって与えられる。

$$Mw'_1 = \min(Mw, Mw_0)$$

上式によって求められる GMPE による震度予測値 $INT(x)$ と計測震度との残差 $\Delta I(x)$ を、ガウス過程を用いて以下のようにモデル化する。

$$\Delta I(x) = GP(0, k(x, x'))$$

ここで $GP(\mu(x), k(x, x'))$ は平均 $\mu(x)$ 、カーネル関数 $k(x, x')$ を有するガウス過程である。このとき、 N 個の座標 (x_1, \dots, x_n) での計測震度 (I_1, \dots, I_n) と、同座標における GMPE 予測震度との残差 $\Delta I = (I_1 - INT(x_1), \dots, I_n - INT(x_n))$ を用いると、任意の地点 x^* における震度補正值 I^* は次式のように与えられる。

$$I^* = INT(x^*) + N(k_*^T K^{-1} \Delta I, k_{**} - k_*^T K^{-1} k_*)$$

ここで $N(\mu, \sigma)$ は平均 μ 、標準偏差 σ の正規分布であり、 k_*, K, k_{**} はそれぞれ以下のように定義される。

$$k_* = (k(x^*, x_1), \dots, k(x^*, x_n))$$

$$K = [K_{ij}] = [k(x_i, x_j)]$$

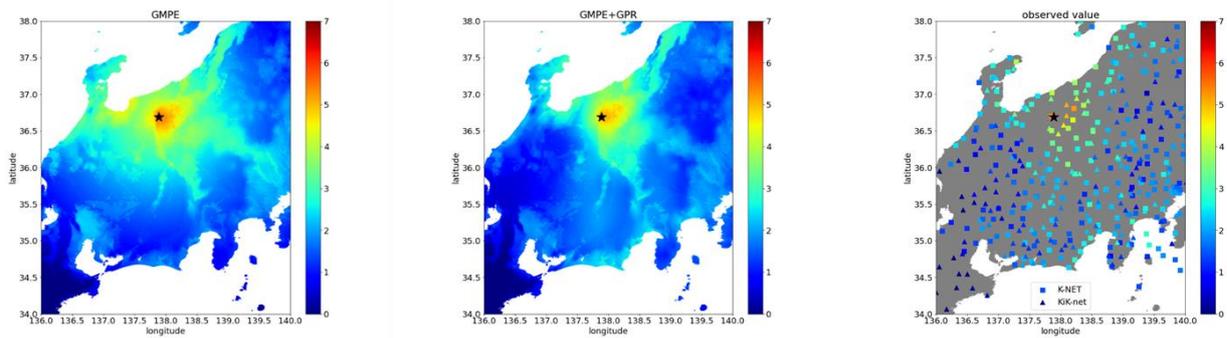
$$k_{**} = k(x^*, x^*)$$

このように定式化される提案モデルについて、本年度は①様々な地震に対する有効性の検証、②説明変数 x を空間座標のみとする形式から地盤構造などの説明変数を組み込んだ一般形式への拡張、という2つの検討を行った。

提案モデルの有効性を検証するために、2000年以降に国内で発生し最大震度6弱以上を記録した33地震について、K-NET観測点データを利用したモデル構築を行い、KiK-net観測点における震度値を未知データとしてモデル予測震度との比較を行う交差検証を実施した。GMPEによる震度予測値と提案手法による補正を行った震度予測値を、観測値を真とした場合に対する決定係数の観点から精度比較を行った検証からは、表2に示すように33地震のうち30地震で精度が向上する結果を得た。個別の地震に対する結果からは、2014年神城断層地震のようにGMPEによる予測が過大評価傾向であった場合(図10)や、逆に2018年北海道胆振東部地震のようにGMPEが過小評価傾向であった場合(図11)など、様々なケースにおいて有効に機能していることが確認できた。

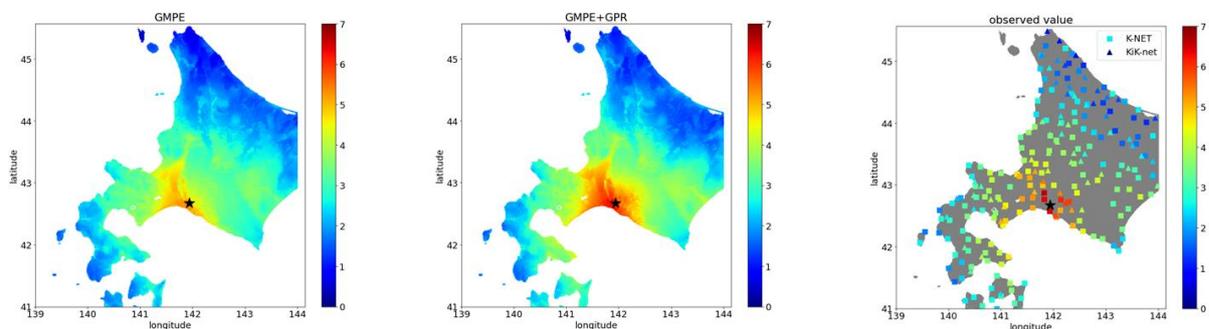
表2 33地震に対する、GMPEによる予測値と提案手法による震度予測値の決定係数

No.	1	2	3	4	5	6	7
決定係数(補正前)	0.84	0.84	0.73	0.66	0.81	0.84	0.78
決定係数(補正後)	0.87	0.86	0.89	0.76	0.88	0.88	0.86
No.	8	9	10	11	12	13	14
決定係数(補正前)	0.75	0.68	0.81	0.85	0.7	0.77	0.73
決定係数(補正後)	0.82	0.81	0.87	0.89	0.89	0.83	0.9
No.	15	16	17	18	19	20	21
決定係数(補正前)	0.71	0.72	0.76	0.76	0.82	0.74	0.8
決定係数(補正後)	0.83	0.81	0.76	0.9	0.8	0.79	0.78
No.	22	23	24	25	26	27	28
決定係数(補正前)	0.66	0.83	0.85	0.86	0.4	0.79	0.75
決定係数(補正後)	0.75	0.76	0.87	0.92	0.53	0.8	0.77
No.	29	30	31	32	33		
決定係数(補正前)	0.73	0.8	0.79	0.68	0.82		
決定係数(補正後)	0.79	0.81	0.87	0.8	0.86		



(a) GMPE (補正前) (b) 提案手法による補正後 (c) 観測値

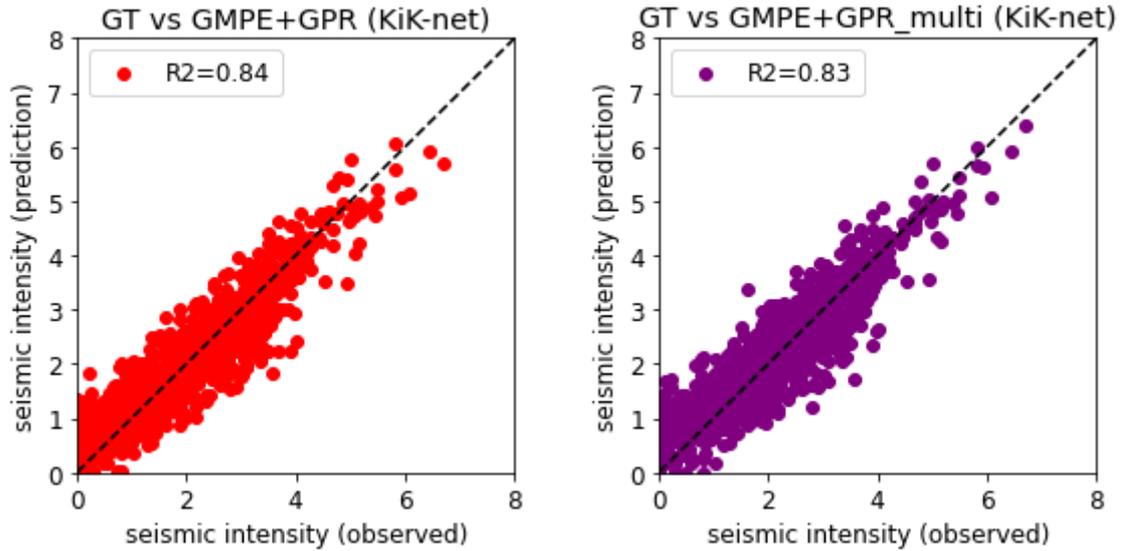
図 10 予測震度分布図の比較：2014 年神城断層地震 (No. 22)



(a) GMPE (補正前) (b) 提案手法による補正後 (c) 観測値

図 11 予測震度分布図の比較：2018 年北海道胆振東部地震 (No. 31)

入力変数を複数用いた一般形式への拡張については、空間座標に加えて GMPE において説明変数に用いられる浅部地盤構造 (AVS30)、深部地盤構造 (D1400)、震源距離の 3 変数を入力変数 x に統合し、同様に交差検証を実施した。検討からは、上述の変数の導入による有意な精度向上は得られず、空間座標のみを用いた場合とほぼ同様の結果となった (図 12)。提案手法は予測量の回帰を行う際の説明変数の誤差バイアスを補正するものであることから、本結果からは空間座標についてはバイアスがある一方で AVS30 や D1400、震源距離といった説明変数が系統的なバイアスを有していないことが示唆される。一方で、現段階ではこれらの説明変数に対して特に前処理を施していなかったものの、震度回帰を行う場合は GMPE と同様に震源距離の対数を取る等、物理的により意味のある値へと変換を行う前処理を行うなどによるモデルの一層の改善を図る余地が残された。



(a) 空間座標のみの場合

(b) 空間座標 + AVS30 + D1400 + 震源距離の場合

合

図 12 説明変数を増やすことによる予測精度の検証

(c) 結論ならびに今後の課題

物理モデルと情報学的手法を組み合わせた地震動指標予測の基礎モデルを、日本国内で生じた過去の様々な地震記録に対して手法を適用することによってその適用性を詳細に検証すると共に、説明変数を拡張した一般化を行った。今後は、拡張した説明変数に対する前処理の導入による一層の精度改善を図ると共に、同手法を時刻歴波形の内挿へと拡張する当初計画へと取り組む予定である。

(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 1 件、うち国外計 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
物理知見を事前情報とした災害事象のデータ駆動モデリング（口頭発表）	宮本 崇	統計数理研究所研究集会「諸科学における統計思考」	2022 年 8 月 5 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

(2-4) 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

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の一環として、物理モデルに基づく地震動予測式と機械学習を組み合わせたハイブリッド予測アプローチの導入を図った。その結果、機械学習だけを用いた場合に比べて、データ数が限られる観測点における予測性能の向上が確認された。またガウス過程回帰を用いた地震動予測モデルの構築を図り、予測の不確定性に関する情報も含めつつ、汎化性能が高い予測ができることを示した。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も行った。

(b) 業務の成果

1) スペクトル情報に関する Site specific な地震動予測モデル構築へのハイブリッド予測アプローチの導入

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 (SS GMM) の作成を試みている。令和 3 年度の研究成果として、観測点ごとに大きく異なるサイト増幅特性を SS GMM は加味することができ、十分なデータが用意できる場合には従来の GMM に比べてよい予測性能を発揮することが分かった。令和 4 年度は、観測データが少ない観測点における SS GMM の予測性能の向上を図るために、既存の地震動予測式と機械学習を組み合わせたハイブリッド予測アプローチ (Kubo et al., 2020) の導入を図った。

観測データが少ない K-NET 砵用 (KMM011) における SS GMM を構築する。3 つの説明変数 (モーメントマグニチュード M_w 、震央距離、震源深さ) を持ち、予測対象は 0.05 秒から 10 秒までの 46 周期における 5% 減衰の加速度応答スペクトルとした。Kubo et al. (2020) に倣い、Morikawa and Fujiwara (2013) による地震動予測式と機械学習手法の一つである Extremely Randomized Trees (ERT) を組み合わせたハイブリッド GMM を作成した。1997 年から 2015 年までの 123 記録を訓練データとし、2016 年から 2021 年までの 128 記録をテストデータとした。西日本の地震活動は低調で、熊本県下益城郡美里町の K-NET 砵用における地震動記録は多くない。ただし 2016 年熊本地震およびそれに伴う活発な地震活動によって、2016 年以降は観測点近傍での内陸地震の地震動記録が多い。つまり K-NET 砵用は訓練データの数が少なく、また訓練データとテストデータの性質が異なるという、機械学習を用いた予測問題としては不利な条件である。

テストデータに含まれる 6 地震における加速度応答スペクトルの観測と各 GMM による予測の比較を図 13 に示す。観測された加速度応答スペクトルには周期 0.3 秒前後でピークが見られており、K-NET 砵用における地震動はこの周期帯で強いサイト増幅を有すると考えられる。複数地点での記録に基づいて作成した General GMM は平均的な観測点のサイト増幅を表現するため、K-NET 砵用特有のサイト増幅特性を再現できていない。機械学習のみを用いた SS GMM による予測は K-NET 砵用特有のサイト増幅特性である周期 0.3 秒前後のピークを表現しようとしているが、訓練データには同様な地震が含まれ

ていなかった観測点近傍での地震（#1 と#2）では過小な予測となった。Kubo et al. (2020)でも指摘されているように、観測記録の少ない観測点近傍で発生した大地震の強い地震動を、データに基づいてノンパラメトリックに学習および予測する機械学習手法で予測することは難しい。ハイブリッド予測アプローチに基づく SS GMM ではこの過小評価が解消されており、機械学習だけを用いた場合に比べてよりよい予測ができています。地震動予測式はこれまでの知見に基づく物理モデルを方程式の形で表現しているため、発生頻度が少ない事象を予測する場合でも、ある程度の予測性能を発揮すると考えられる。そのため地震動予測式を組み込んだハイブリッド予測アプローチを用いることで、外挿領域での予測性能が改善されたと考えられる。なお阿蘇山付近の地震（#3 および#4）はどの予測モデルでも過大評価気味となっており、これは阿蘇山の地下に存在する火山特有の高減衰領域の影響によるものと考えられる。

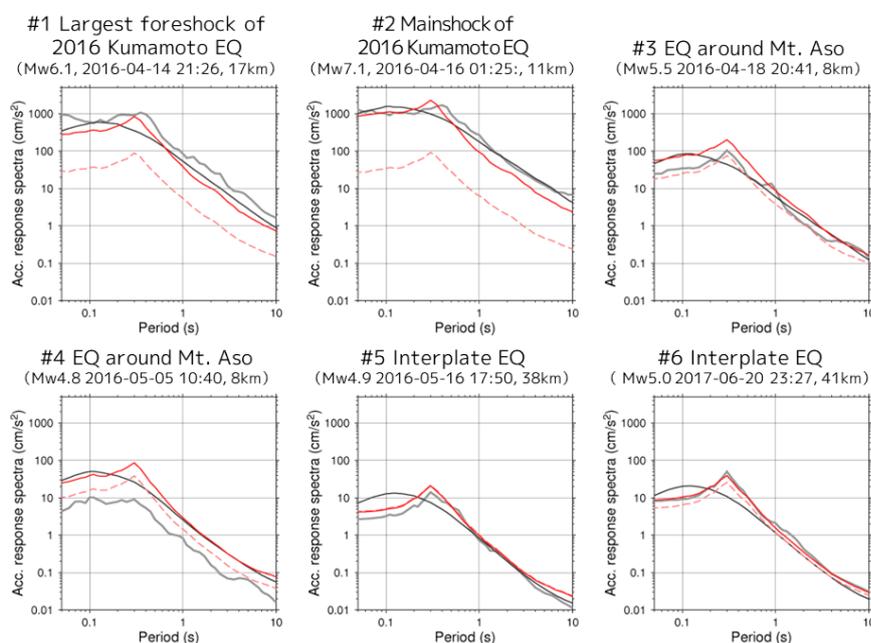


図 13 6 地震における加速度応答スペクトルの観測値（灰色）、機械学習（ERT）のみを用いた SS GMM の予測値（赤破線）、ハイブリッド予測アプローチに基づく SS GMM の予測値（赤実線）、General GMM の予測値（黒線）の比較

2) ガウス過程回帰を用いた地震動予測モデルの構築

地震動予測モデルの作成には様々な機械学習手法が使われているが、ここではガウス過程回帰 GPR の適用を図った。K-NET つくば（IBR011）の観測記録を用いて、同地点における SS GMM を GPR で作成し、ランダムフォレスト回帰 RFR に基づくモデルとの比較を行った。目的変数は PGA の常用対数である。説明変数として、Mw ・ 震央距離の常用対数 ・ 震源深さの常用対数を用いた場合（3p）と、それらに加えて震源緯度 ・ 震源経度を用いた場合（5p）の 2 つの組み合わせを試す。1997 年から 2015 年までの 1048 記録を訓練データとし、2016 年から 2021 年までの 326 記録をテストデータとした。K-NET つくばは国内でも多くの観測記録が取得されている観測点であり、データ数の違いはあっても訓練データとテストデータの性質に格段の違いはない。

説明変数 3 つの GPR (GPR-3p)・説明変数 3 つの RFR (RFR-3p)・説明変数 5 つの GPR (GPR-5p)・説明変数 5 つの RFR (RFR-5p) の計 4 モデルでの結果を比較する。データとの合い具合に関しては、訓練データでは RFR の方がよいが、テストデータでは GPR と RFR は同等もしくは GPR の方がわずかによい。また RFR はオーバーフィッティングの傾向を有するが、GPR ではその傾向は見られない。GPR-3p と RFR-3p による予測を Mw や震央距離、震源深さの組み合わせを変えて調べたところ、訓練データが少ない Mw6.5 の場合もしくは震央距離 10 km 前後において二つのモデルで予測が大きく異なった。RFR-3p による予測が小さな震央距離で頭打ちする一方で、GPR-3p による予測は地震動の距離減衰を定性的には再現できた。また GPR-3p による予測の不確定性はデータ数が少ない領域で大きくなった。図 14 に各モデルの残差の空間分布を示す。説明変数 3 つを用いた GPR-3p や RFR-3p の場合には残差に空間依存性が見られており、この結果は地震の震源位置情報を考慮することによって予測性能の向上が期待されることを意味する。実際に地震の震源位置情報も説明変数に追加した GPR-5p や RFR-5p の場合の結果も同図で示すが、GPR-3p や RFR-3p の場合に比べて残差の空間依存性が低減している。

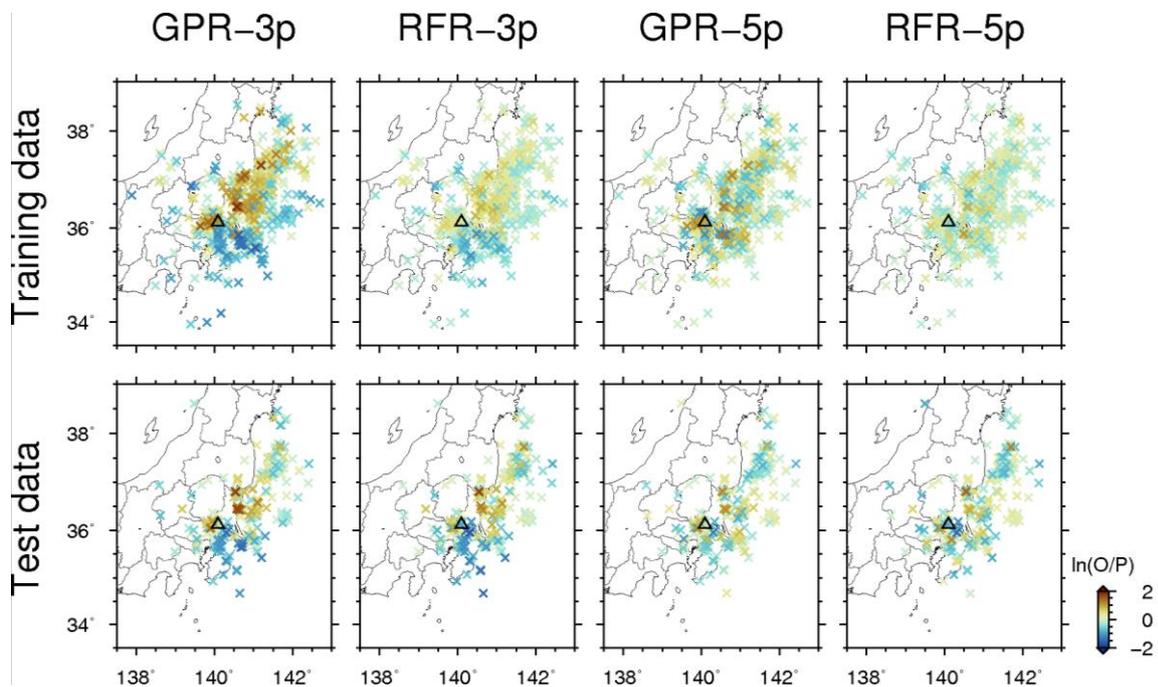


図 14 各予測モデルにおける残差の空間分布。上段が訓練データを、下段がテストデータを示す。

3) 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

地震波形をはじめとする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て、地震学分野での既存研究や情報科学分野での事例に関して情報収集を行いつつ、データセットの準備を進めた。Florez et al. (2022)が提案した Conditional Generative Adversarial Network に基づく地震動生成 AI アルゴリズムの実装を図った。

(c) 結論ならびに今後の課題

Site specific な地震動予測モデルの構築に対して、物理モデルに基づく地震動予測式と機械学習を組み合わせたハイブリッド予測アプローチを適用し、特にデータが限られる場合における同アプローチの有効性を確認した。またガウス過程回帰に基づいて構築した地震動予測モデルは、他の機械学習に基づくものと遜色ない予測性能を持つこと、また過学習の傾向が少なく汎化性能が高い予測であること、その予測の不確定性はデータ密度に応じて変動することが分かった。今後は地震波形を含めた時系列に関する Site specific な地震動予測モデルの開発に注力していく。

(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4件、うち国外計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
機械学習を用いたサイト固有型地震動モデルの試作（口頭発表）	久保久彦 岩城麻子	日本地球惑星科学連合2022年度連合大会（主催：日本地球惑星科学連合）	2022年5月22日	国内	○
強震動データベースに基づく地震動予測モデルの比較（口頭発表）	岩城麻子 森川信之 藤原広行 岡崎智久 久保久彦 司宏俊 小穴温子 石井透 友澤裕介 引田智樹	日本地震学会2022年度秋季大会（主催：日本地震学会）	2022年10月26日	国内	○
Development of hybrid site-specific ground motion model of response spectra using GMPE and machine learning（ポスター発表）	Hisahiko Kubo Asako Iwaki	2022 AGU Fall Meeting（主催：American Geophysical Union）	2022年12月15日	国外	○
ガウス過程回帰を用いた地震動予測モデル作成の試み（口頭発表）	久保久彦 宮本崇	日本地震工学会・大会－2022（主催：日本地震工学会）	2022年12月16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

3. まとめ

令和4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、地震活動予測システムへの海域を対象とした地震カタログの適用、海域記録を用いた震源要素推定に向けた検討、事前情報を加味する形での極値統計解析手法の高度化、物理モデルを考慮する形でのガウス過程回帰を用いた地震動指標の補正・内挿補間手法の開発、スペクトル情報に関する Site specific な地震動予測モデルへのハイブリッド予測アプローチの導入等を行った。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」

海域で発生した地震に対して、S-net を活用した地震カタログを用いた余震活動予測の検証を実施するとともに、既往カタログによる予測結果との比較検討を行った。また、東北地方太平洋沖で発生する地震の発生場所を高精度で推定することを目的として、S-net の観測波形と理論波形計算から、F-net で求めた MT 解の妥当性の検証に着手した。

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」

大地震直後の限られた質・量の地震動記録を用いて安定した予測を行うために、極値分布のパラメータ推定において事前分布を導入した。その結果、特に大地震発生後数時間以内においてパラメータが極端な値をとることを回避することができ、時間的に安定した予測結果を得ることができた。また MeS0-net におけるリアルタイム震度時系列記録の特徴を調べ、機械学習を用いた予測の適用可能性の検討を行った。

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」

ガウス過程回帰に基づく地震動指標の空間補間手法について、国内の複数の地震に対する精度評価を行うと共に、説明変数である入力情報を空間座標のみとする形式から地盤構造などの説明変数を組み込んだ一般形式へと拡張を行いその精度を評価した。

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」

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の一環として、物理モデルに基づく地震動予測式と機械学習を組み合わせたハイブリッド予測アプローチの導入を図ったところ、データ数が限られる観測点における予測性能の向上が確認された。またガウス過程回帰を用いた地震動予測モデルの構築を図り、予測の不確定性に関する情報も含めつつ、汎化性能が高い予測ができることを示した。

以上のように、令和4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に進め、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4年度第1回ミーティング

日時：令和4年4月20日 15:00—16:30

会議形式：オンライン

議事：

- ・情報共有
- ・研究課題全体の年度計画に関して
- ・各サブテーマの年度計画に関して

(b) 令和4年度第2回ミーティング

日時：令和4年12月28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

(c) 令和4年度第3回ミーティング

日時：令和5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
- ・来年度に向けて

(2) 研究課題内拡大ミーティング

(a) 令和3年度第1回拡大ミーティング

日時：令和4年9月29日 10:00—12:00

会議形式：オンライン

議事：

- ・サブテーマ 2-A の進捗状況説明および質疑応答
- ・サブテーマ 2-B の進捗状況説明および質疑応答

(a) 令和4年度第2回拡大ミーティング

日時：令和5年2月16日 13:00—15:00

会議形式：オンライン

議事：

- ・サブテーマ 1-A の進捗状況説明および質疑応答
- ・サブテーマ 1-B の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4年度第1回研究ディスカッション

日時：令和4年4月22日 10:00—12:00

会議形式：オンライン

(b) 令和4年度第2回研究ディスカッション

日時：令和4年6月1日 10:00—11:00

会議形式：オンライン

(b) 令和4年度第3回研究ディスカッション

日時：令和4年7月8日 13:00—15:00

会議形式：対面・オンライン

(b) 令和4年度第4回研究ディスカッション

日時：令和4年8月25日 13:00—14:00

会議形式：オンライン

(b) 令和4年度第5回研究ディスカッション

日時：令和4年11月1日 10:00—12:00

会議形式：オンライン

(b) 令和4年度第6回研究ディスカッション

日時：令和4年12月7日 10:00—12:00

会議形式：オンライン

(b) 令和4年度第7回研究ディスカッション

日時：令和5年1月18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) 第1回研究者・学生向けイベント

日時：令和4年12月27日 10:00—17:30

会議形式：対面

(b) 第2回研究フォーラム

日時：令和5年1月24日 9:30—12:00

会議形式：オンライン

(c) 研究進捗会

日時：令和5年2月10日 9:30—15:30

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4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5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、サブテーマ間の更なる連携によって「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」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加速する。

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
機械学習を用いたサイト固有型地震動モデルの試作（口頭発表）	久保久彦 岩城麻子	日本地球惑星科学連合2022年度連合大会（主催：日本地球惑星科学連合）	2022年5月22日	国内
リアルタイム余震活動予測システム：最近5年間の予測実績と検証（ポスター発表）	汐見勝彦 近江崇宏 尾形良彦 澤崎 郁	日本地球惑星科学連合2022年大会（主催：日本地球惑星科学連合）	2022年6月2日	国内
物理知見を事前情報とした災害事象のデータ駆動モデリング（口頭発表）	宮本 崇	統計数理研究所研究集会「諸科学における統計思考」	2022年8月5日	国内
MeS0-net観測点におけるリアルタイム震度時系列の特徴（ポスター発表）	久保久彦 澤崎郁 山谷里奈 木村武志	日本地震学会2022年度秋季大会（主催：日本地震学会）	2022年10月24日	国内
S-net海底地震計を用いた日本海溝で発生した地震のセントロイド・モーメントテンソルインバージョン（ポスター発表）	山谷里奈 久保久彦 汐見勝彦 武村俊介	日本地震学会2022年度秋季大会（主催：日本地震学会）	2022年10月26日	国内
強震動データベースに基づく地震動予測モデルの比較（口頭発表）	岩城麻子 森川信之 藤原広行 岡崎智久 久保久彦 司宏俊 小穴温子 石井透 友澤裕介 引田智樹	日本地震学会2022年度秋季大会（主催：日本地震学会）	2022年10月26日	国内
教師無し機械学習を通じた地震の時空間分布に関するデータ構造把握の試み（ポスター発表）	久保久彦 木村武志 汐見勝彦	第25回情報論的学習理論ワークショップIBIS2022（主催：電子情報通信学会 情報論的学習理論と機械学習研究会）	2022年11月21日	国内
Aftershock activity of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake and the 2011 off Ibaraki earthquake	Lina Yamaya Kimihiro Mochizuki Takeshi Akuhara	2022 AGU Fall Meeting（主催：American Geophysical Union）	2022年12月14日	国外

revealed by CMT inversion using dense short period OBS array (ポスター発表)	Shunsuke Takemura Masanao Shinohara Tomoaki Yamada			
Development of hybrid site-specific ground motion model of response spectra using GMPE and machine learning (ポスター発表)	Hi sahiko Kubo Asako Iwaki	2022 AGU Fall Meeting (主催: American Geophysical Union)	2022年12月15日	海外
ガウス過程回帰を用いた地震動予測モデル作成の試み (口頭発表)	久保久彦 宮本崇	日本地震工学会・大会-2022 (主催: 日本地震工学会)	2022年12月16日	国内
S-net 海底地震計を用いた CMT 解析に向けて (口頭発表)	山谷里奈 久保久彦 汐見勝彦 武村俊介	2022年度 東京大学地震研究所 共同利用研究集会 「陸海両域での超高密度観測時代の観測・解析手法と地震波伝播理論の新展開」	2022年12月20日	国内
S-netの地震波形記録を用いたセントロイドモーメントテンソルインバージョンに向けた諸検討 (口頭発表)	久保久彦 山谷里奈 汐見勝彦 武村俊介	2022年度 東京大学地震研究所 共同利用研究集会 「地震動をはじめとする地球科学データの即時解析・即時予測・情報利活用」	2023年1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
CMT inversion for small-to-moderate earthquakes applying to dense short-period OBS array at off Ibaraki region	Lina Yamaya Kimihiro Mochizuki Takeshi Akuhara Shunsuke Takemura Masanao Shinohara Tomoaki Yamada	Earth, Planets and Space	2022年11月8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。