3.7 異なるデータに基づく長期予測モデルの統合手法検討（サブテーマ 4.1）

(1) 業務の内容

(a) 業務題目　異なるデータに基づく長期予測モデルの統合手法検討

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
国立大学法人京都大学防災研究所附属地震災害研究センター	教授	西村　卓也
国立大学法人京都大学防災研究所附属地震災害研究センター	特定研究員	Dhanya Thomas
国立大学法人京都大学防災研究所附属地震災害研究センター	非常勤研究員	西山　昭仁
国立大学法人東京大学地震研究所附属地震予知研究センター	教授	加藤　愛太郎
国立研究開発法人防災科学技術研究所巨大地変災害研究領域地震津波防災研究部門	主任研究員	久保　久彦
国立研究開発法人防災科学技術研究所巨大地変災害研究領域地震津波防災研究部門	特別研究員	上田　拓

(c) 業務の目的

地震活動データや測地観測データに基づく内陸地震の長期予測モデルと活断層の長期評価を比較することで、データ毎の特徴やその共通点等について地球科学的解釈を行うとともに、複数の予測モデルを統合する手法について検討を行う。

(d) 3 か年の年次実施業務の要約

1) 令和 7 年度：

異なるデータを用いた複数の地震発生予測モデルの統合手法について、海外の地震長期予測モデルの報告書や論文等の文献調査により、その手法の特徴や簡便性等の特徴を整理した。

2) 令和 8 年度：

前年度に引き続き、先行研究で行われている各種データを用いた予測モデルの統合手法の特徴を検討するとともに、日本列島を対象とした各種モデルの比較と統合モデルの試算を開始する。

3) 令和 9 年度：

各サブテーマの成果から試算された地震発生確率の比較を行うとともに、活断層に基づく長期評価とも統合した地震発生確率の試算を行う。

(2) 令和 7 年度の成果

(a) 業務の要約

米国及びニュージーランドの最新地震動予測モデルにおけるデータ統合と不確実性評価の手法を概説する。両モデルは「グランド・インバージョン」を用い、地質・測地・地震学的な多岐にわたるデータを統合している。特に、分散地震活動モデルでは、ひずみ速度などの「共変量（補助的な空間データ）」を統計的に最適化することで予測精度を高めている。また、ロジックツリーの重み付けには、専門家への「校正質問」を通じて回答の信頼性を数値化する「構造化された専門家の意見集約」過程を導入し、主観的バイアスの排除と客観的な不確実性の定量化を実現している。

(b) 業務の成果

近年、諸外国において確率論的地震動予測（PSHA）の更新が相次いで行われている。特に、米国の全国地震ハザードモデル（以下「NSHM」という。）2023 年版とニュージーランドの NSHM 2022 年版の更新は、科学的データの統合手法に画期的な進歩をもたらしている。今年度、本サブテーマでは、引用文献リストに列挙された文献を収集し、生成 AI（Google 社の NotebookLM）を用いて、米国（NSHM 2023; Petersen et al., 2023）及びニュージーランド（NSHM 2022; Gerstenberger et al., 2024）における最新の確率論的地震動予測（PSHA）モデルを対象に、地震学、測地学、地質学データの統合手法とその意義について調査し、成果の要約と表現の整理を行った。最終的な内容の妥当性は、担当者が確認している。

これらの全国地震ハザードモデルでは、従来の地質学的な断層データに加えて、測地学的な地殻変動データや統計学的な地震活動情報を高度に統合する手法が用いられている。特に、米国カリフォルニア州の UCERF3（統一カリフォルニア地震発生予測第 3 版）モデルで開発された「グランド・インバージョン」レシピ（Page et al., 2014）は、その技術的基盤として重要な役割を果たした。この手法は、断層のすべり速度、過去の地震発生履歴、古地震学データ、及び地震カタログに基づくマグニチュード・頻度分布といった複数の独立した科学制約条件を、一つの統計的モデルの中で同時に満足させるように調整する逆解析手法である。また、ニュージーランドの 2022 年版モデル（図 1）では、震源が特定されない未知の断層による地震活動を評価する背景地震活動モデル（DSM）において、「共変量（Covariates）」を用いたハイブリッド手法が採用された。ここで「共変量」とは、主目的である地震発生率の予測を補助するために用いられる、空間的に分布・独立したデータセットを指す。具体的には、空間的に平滑化された過去の地震活動データ（Gerstenberger et al., 2024）に加え、地殻の物理的な変形を示す測地学的なひずみ速度（Maurer et al., 2023）、あるいは既知の断層やプレート境界からの距離といった複数の空間データが変量として扱われる。これらの共変量を乗算的に組み合わせ、統計的に最適化することで、歴史的な記録が乏しい地域における将来のリスク予測精度を向上させている。

また、これら最新モデルの重要な特徴は、認識論的不確実性の明示的な定量化であり、これは複数の科学的仮説やデータ解釈を「ロジックツリー」の各枝として扱うことで実現されている。ロジックツリーの各枝に割り当てられる「重み（信頼度）」の決定には、客観性を担保するために「構造化された専門家意見集約（Structured Expert Elicitation）」とい

う厳格なプロセスが導入された（Christophersen and Gerstenberger, 2024）。このプロセスでは、モデル開発に携わった専門家グループに対し、まず既知の正解がある「校正質問（Calibration questions）」を課すことで、各専門家の知識の正確さと不確実性の見積もりの妥当性を定量的に評価する。このスコアに基づき、専門家個人の評価結果に重み付けを行う「クック法（Cooke method）」などの手法を用いることで、個人の主観的な偏りを排した、科学的に妥当なロジックツリーの重みが算出されている。加えて、インバージョン断層モデル（IFM）においては、計算された解が観測データにどの程度適合しているかを示す「適合度（Goodness of fit）」も重み付けの補助的な要因として考慮され、物理的に矛盾の多いパラメータの組み合わせには低い重みが与えられる仕組みとなっている。こうした高度なデータ統合と不確実性の評価の結果、ニュージーランドでは全土でハザード推定値が大幅に増加するなど、建築基準や防災政策に直結する重要な知見が得られている。

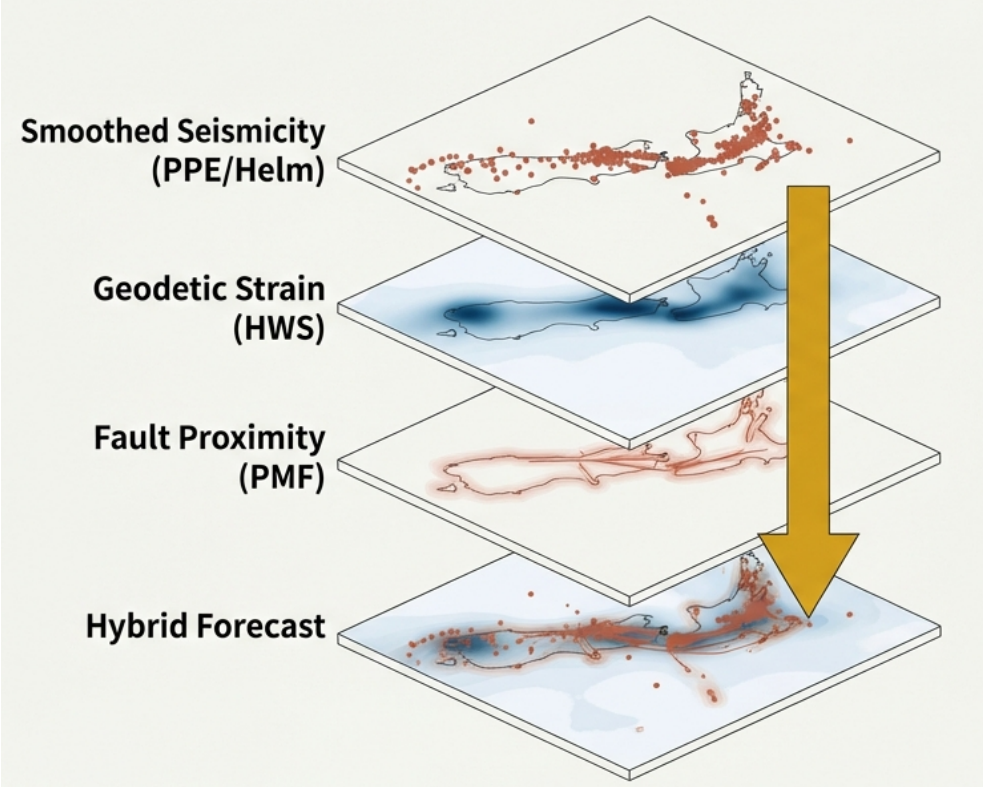


図 1　ニュージーランドの全国地震ハザードモデル（NSHM）2022 年版の背景地震活動モデルにおける種類の異なるデータの統合イメージ。ここでは，3 種類のデータ統合を行ってハイブリッド予測モデル(Hybrid Forecast)を作成している。Smoothed Seismicity とは過去の小地震分布を平滑化したもの。Geodetic Strain は、GNSS による測地学的せん断ひずみ速度。PMF は、断層の滑り速度を考慮した断層からの近接度。Notebook LM を用いて作成。

(c) 結論並びに今後の課題

米国とニュージーランドの地震ハザードモデルでは、地震学、測地学、地質学データを「グランド・インバージョン」により統合するとともに、認識論的不確実性をロジックツ

リーの各枝として適切に重み付けがなされている。これらの手法は、本研究で実施する日本国内の複数データを用いた内陸地震の長期予測モデルの統合においても、可能なものは取り入れることが望ましい。

（d）引用文献

Christophersen, A., and M. Gerstenberger, Expert Judgment in the 2022 Aotearoa New Zealand National Seismic Hazard Model. Seismological Research Letters, 95(1), 113-124, 2024.

Gerstenberger, M. C. et al., The Seismicity Rate Model for the 2022 Aotearoa New Zealand National Seismic Hazard Model. Bulletin of the Seismological Society of America, 114, 182-216, 2024.

Maurer, J., K. Johnson, L. M. Wallace, I. Hamling, C. A. Williams, C. Rollins, M. Gerstenberger, and R. Van Dissen, Geodetic Strain Rates for the 2022 Update of the New Zealand National Seismic Hazard Model, Bulletin of the Seismological Society of America, 114(1), 57-77, doi:10.1785/0120230145, 2023.

Page, M. T., E. H. Field, K. R. Milner, and P. M. Powers, The UCERF3 Grand Inversion: Solving for the Long-Term Rate of Ruptures in a Fault System, Bulletin of the Seismological Society of America, 104(3), 1181-1204, doi:10.1785/0120130180, 2014.

Petersen, M. D., *et al.,* The 2023 U.S. 50-State National Seismic Hazard Model: Overview and implications. Earthquake Spectra, 40(1), 5-88, 2023.