

測地データを用いた 地殻内地震の長期予測

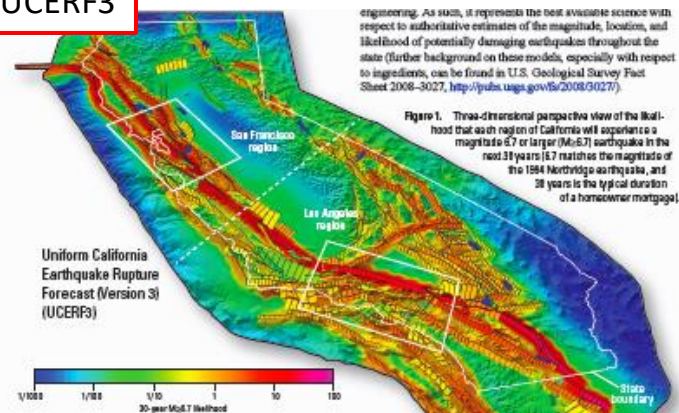
京都大学 防災研究所 地震災害研究センター
西村 卓也

謝辞：本研究は文部科学省による「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（第2次）」の支援を受けました。国土地理院GEONETデータ，気象庁一元化地震カタログ，宇津地震カタログ (<http://iisee.kenken.go.jp/utsu/index.html>) を利用しました。尾形良彦博士に提供いただいた背景地震活動のデータを利用しています。また，東日本の解析に用いたGNSS速度場は，上田拓博士の計算によるものです。また，地殻内地震発生確率評価手法検討WGでの議論は有益でした。ここに記して感謝いたします。

第3回内陸で発生する地震の調査観測に関する検討WG

地震長期予測とは

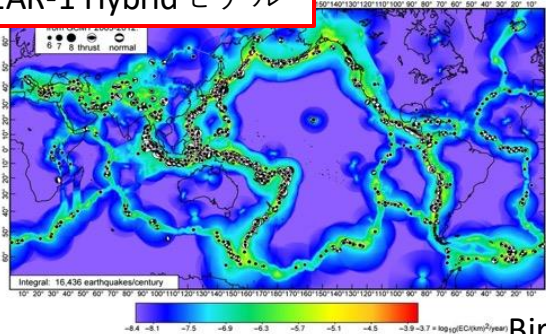
UCERF3



Faults are shown by the rectangles outlined in black. The entire colored area represents greater California, and the white line across the middle defines northern versus southern California. Results do not include earthquakes on the Cascade Subduction Zone, a 758-mile offshore fault that extends about 150 miles into California from Oregon and Washington to the north.

Field et al.(2014)

GEAR-1 Hybridモデル



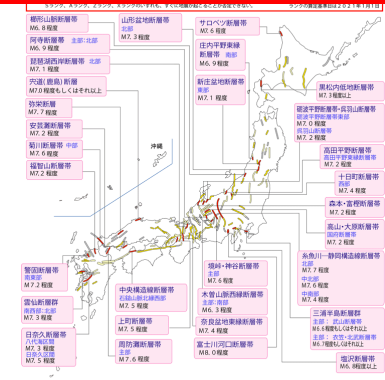
Bird and Kreemer (2015)

- 地震長期予測は、地震学の知見を防災に役立てるアウトプットの1つ
- 海外の地震長期予測モデルでよく使われるデータは、地震・活断層・測地の3つ
 - 米国カリフォルニア州のモデル(UCERF3)
 - 測地データは、活断層のすべり速度の推定や震源を特定しにくい地震の評価のために積極的に利用
- 異なるデータを組み合わせたモデルの方が単一のデータのモデルよりも実際の地震活動をより良く説明できることもある(Rhoades et al., 2017; Strader et al., 2018).

日本での内陸地震長期予測（現状）

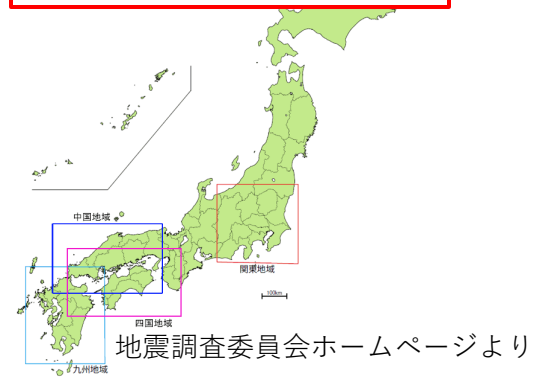
- 内陸（地殻内）地震の長期予測は、地震本部における主要活断層帯の長期評価として、**活断層**調査のみに基づいている。
 - M7以上の地震を起こす主要活断層が対象
 - 固有地震以外の地震は評価されていない。
- M6.8以上を対象にした活断層の地域評価では、**地震**データも併用した評価が行われている。
 - 活断層評価では、研究者の判断が評価に大きく影響する。
 - テクトニクスに基づいた地域分割に基づく評価
 - 発生確率は地域の面積にも依存するので、等間隔グリッドを用いた予測の方が使いやすいのでは？
 - M6.8未満の地震でも2018年大阪府北部地震(M6.1)のように大きな被害が生じる。
- **測地**（GNSS）データを用いた予測モデルに関する研究（Triyoso and Shimazaki, 2012; 高橋・篠原, 2015; 鷺谷, 2015）は少数。

主要活断層帯の長期評価



○ランク分けに関わらず、日本ではどの場所においても、地震による強い揺れに懸念されるおそれがあります。

地域評価が行われた地域



災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（第2次）での取り組み

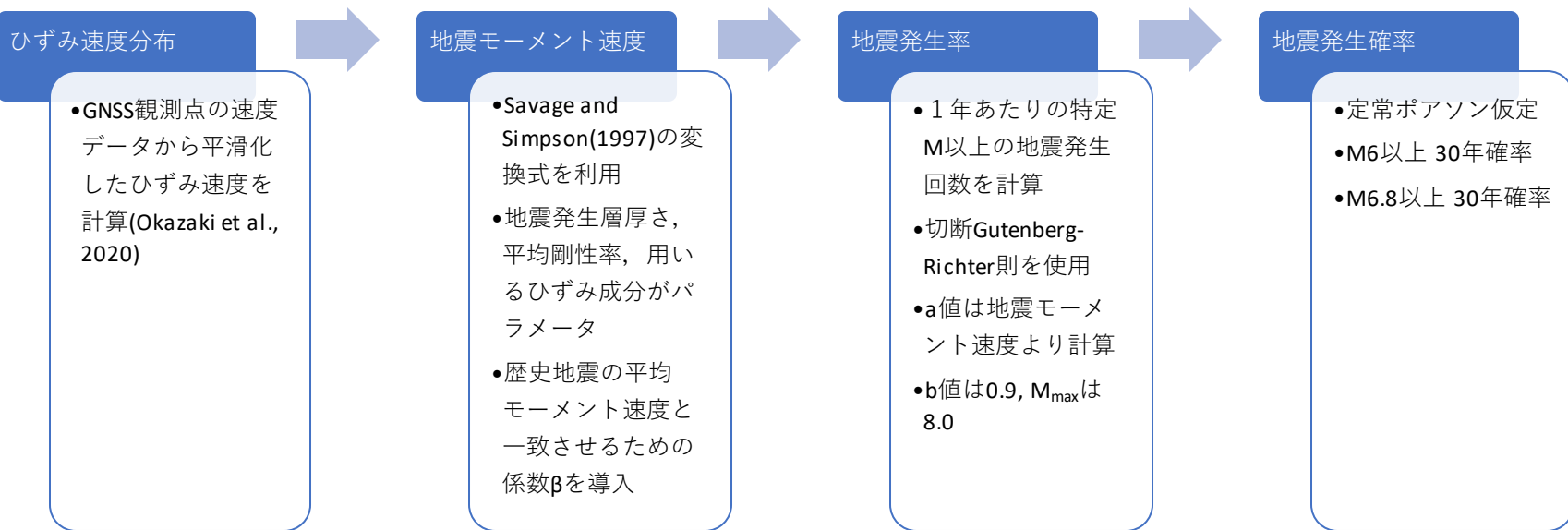
- 建議課題「測地観測データに基づく内陸地震長期評価手法の開発」を実施
 - GNSSデータを用いた地震活動の長期予測
 - 地震活動を用いた長期予測手法の高度化
 - 多様な測地データを用いた詳細ひずみ速度分布推定手法の検討
 - 参加メンバー：西村卓也（京大防災研），高橋浩晃（北大），高田陽一郎（北大），福島洋（東北大），遠田晋次（東北大），青木陽介（東大地震研），尾形良彦（統数研），野村俊一（早大），伊藤武男（名大）
- 地殻内地震発生確率評価手法検討ワーキンググループでの検討
 - 2021年2月から計8回の検討会を実施.
 - 参加メンバー
 - 地震（長期予測）部会：西村卓也（京大防災研；部会長）・宍倉正展（産総研；副部会長）・尾形良彦（統数研）・近藤久雄（産総研）・安藤亮輔（東大理）
 - 企画部戦略室：加納靖之（東大地震研）・石川直史（海保）・加藤愛太郎（東大地震研）

地殻内地震発生確率の計算手順

前提条件

- 測地によって計測される地震間のひずみ速度 \propto 地震によって解放されるひずみ速度

Nishimura(2022)



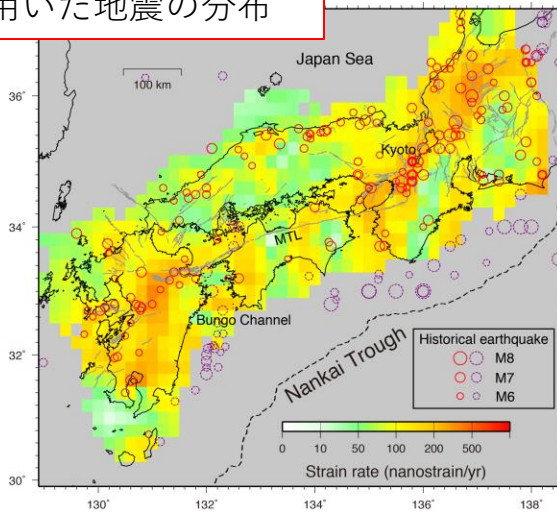
プレート間固着による弾性変形を除去

cf. Savage and Simpson(1997), Bird and Liu(2007), Triyoso and Shimazaki (2012)

検証に用いる地震活動（西日本）

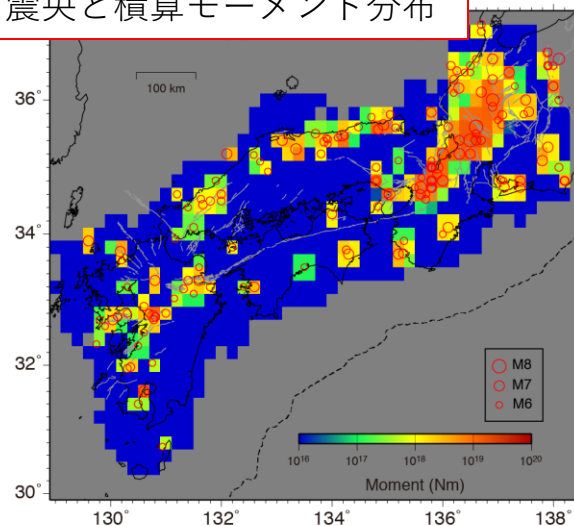
- 地震カタログ M6以上の1421年間の地殻内地震を対象、海溝型地震とやや深発地震を地震調査委員会の長期評価などを参考に除外。
 - 590-1918年 宇津カタログ 深さ不明、Shallow、VeryShallow
 - 1919-2020年 気象庁カタログ 深さ20km以浅
- 震央だけでなく、地震の震源域を直径 L の円で近似した積算地震モーメント分布でも評価
 $\log L = 0.6M - 2.97$. (武村, 1998)

用いた地震の分布



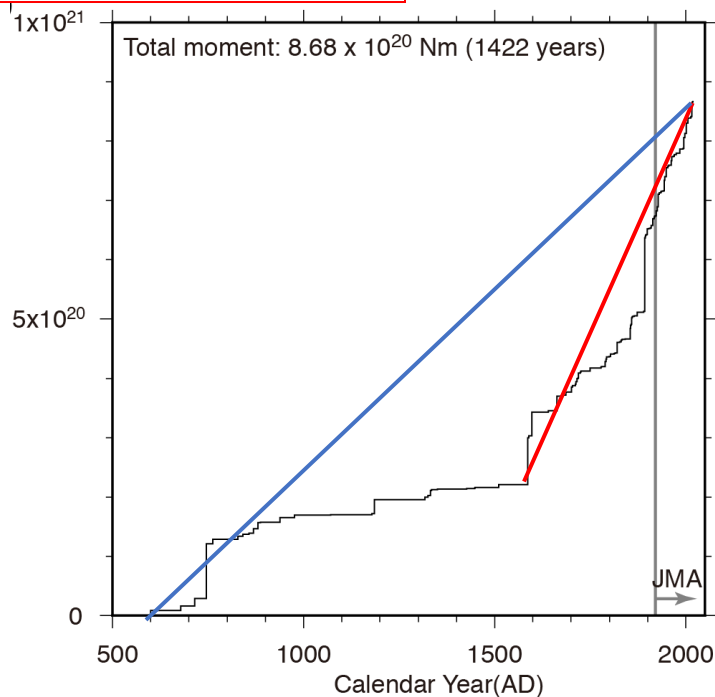
赤丸：地殻内地震、紫：それ以外の地震

震央と積算モーメント分布



測地ひずみと地震で解放されるひずみの割合（西日本）

歴史地震の積算モーメント



β (地震ひずみの割合)=1としたときの測地モーメント速度

$$0.8-1.2 \times 10^{19} \text{ Nm/yr}$$

西日本の歴史地震のモーメント速度

- 全期間

1422年間に $8.7 \times 10^{20} \text{ Nm}$

1年あたり： $6.1 \times 10^{17} \text{ Nm/yr}$

測地の5-8%

- 1586年以降

435年間に $6.5 \times 10^{20} \text{ Nm}$

1年あたり： $1.5 \times 10^{18} \text{ Nm/yr}$

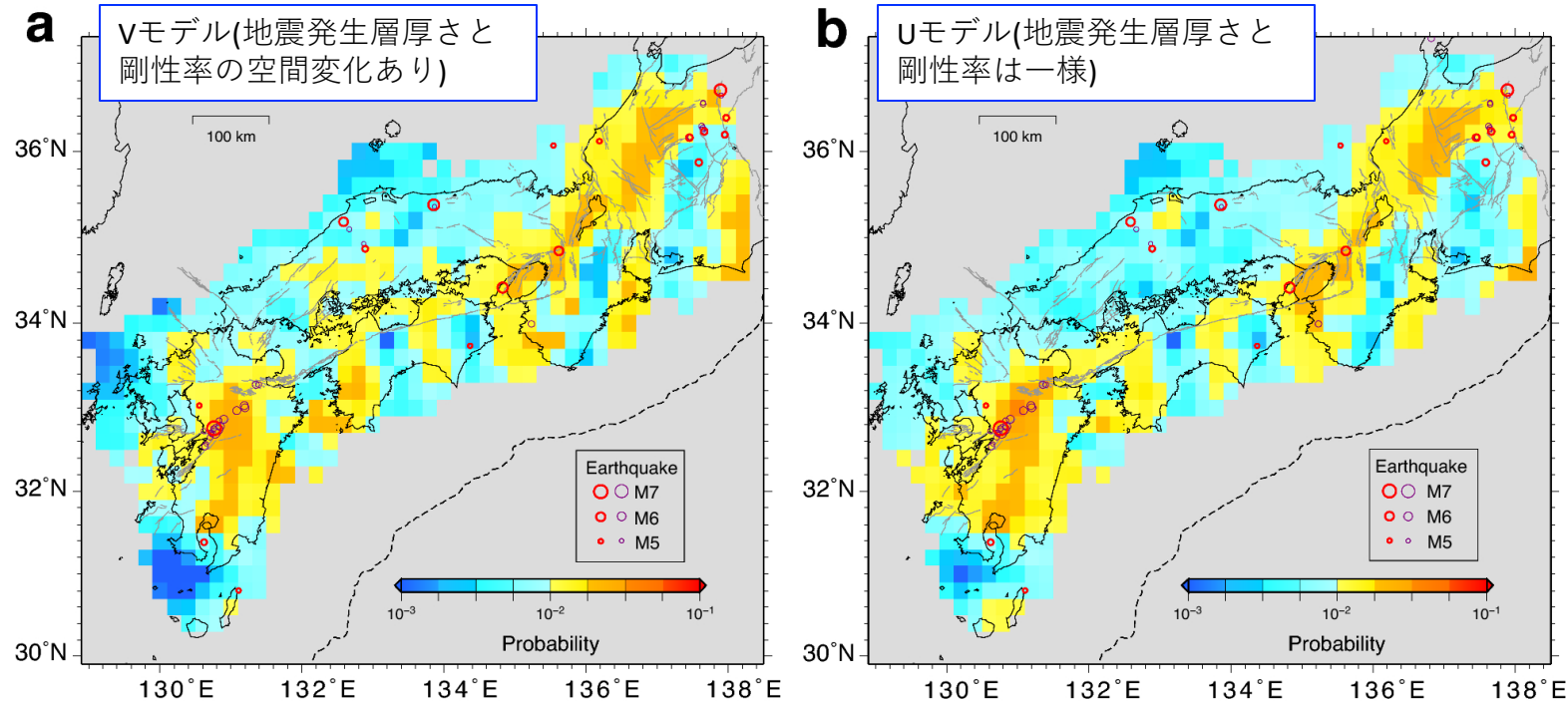
測地の12-20%



1586年以降の地震の平均モーメント速度にあわせて、 β を0.12-0.20とする。

西日本の地震発生確率分布

30年間にM6以上の地震が発生する確率



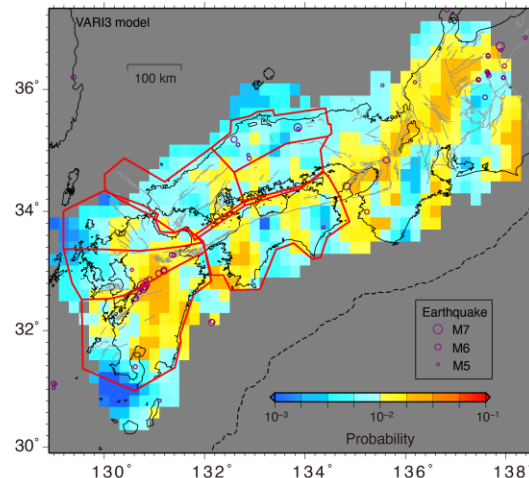
1%を超える場所（黄色）半分を超える。
新潟-神戸ひずみ集中帯，九州中部での確率が特に高い。最大で2.9-3.7%

赤・紫丸：
2010-2020年の
震央分布(20km
以浅)
紫丸：デクラス
タリング処理
で除外されるもの

地震本部地域評価との比較

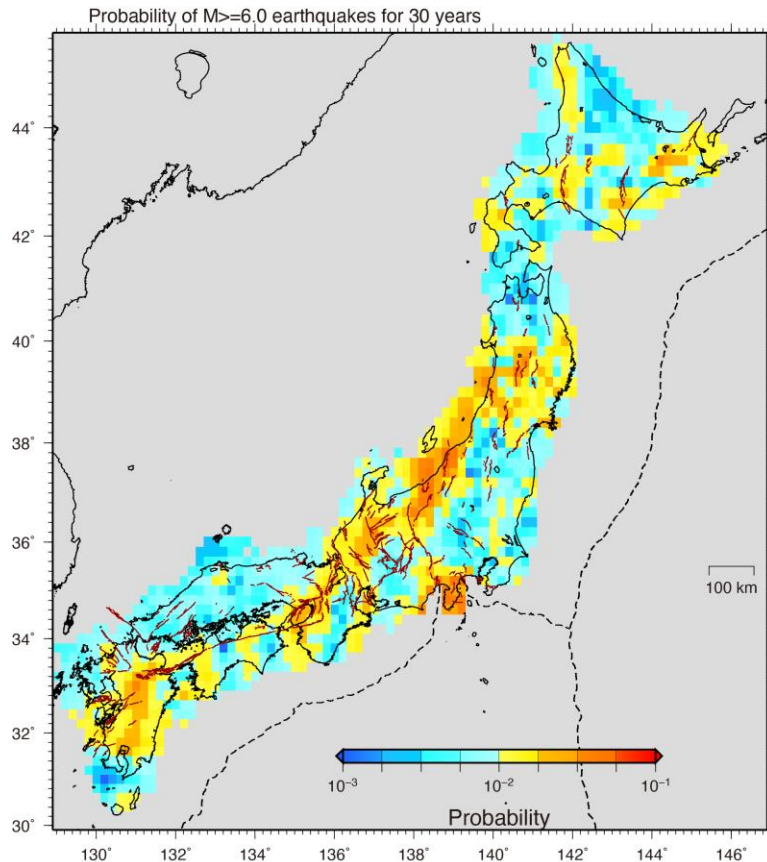
倍半分程度で整合している。

M6.8以上の地震の30年発生確率



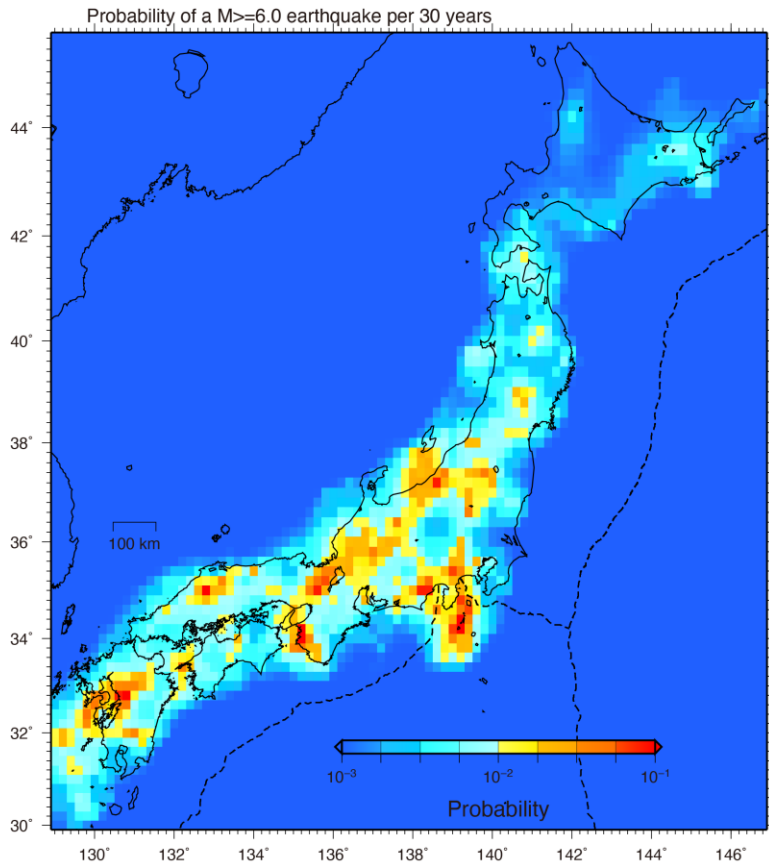
	活断層より (中央値)	地震活動より	Vモデル (本研究)	Uモデル (本研究)
九州北部	9%	8%	5.3%	6.5%
九州中部	21%	11%	6.6%	8.2%
九州南部	8%	19%	16.2%	17.3%
中国地域北部	5%	40%	3.8%	4.1%
中国地域東部	2%	0.3%	4.7%	2.9%
中国地域西部	17%	6%	7.3%	5.6%
四国地域	10%	10%	13.0%	11.8%

日本全国の地震発生確率



- 北海道，東日本でも西日本と同様の計算手法により地震発生確率を計算し，3地域のUモデルを結合．ただし
 - 北海道と東日本のモデルではUモデルの方が過去の地震活動に整合
 - GNSS観測データ期間
 - 北海道 2019/10-2022/9
 - 東日本 2006/1-2009/12
 - 西日本 2005/4-2009/12
- 地震発生確率（30年間，M6以上）の高い場所
 - 新潟-神戸ひずみ集中帯
 - 伊豆半島
 - 九州中央部
 - 東北脊梁山地

背景地震活動(Ogata, 2022)に基づく確率



- 地震カタログ(1923-2018年のM4以上に余震の準備期間として1885-1922年に階層性時空間ETASモデルを適用して計算した背景地震活動度(Ogata, 2022)から, b値(0.9)とポアソン過程を仮定して, M6以上の30年発生確率を計算.

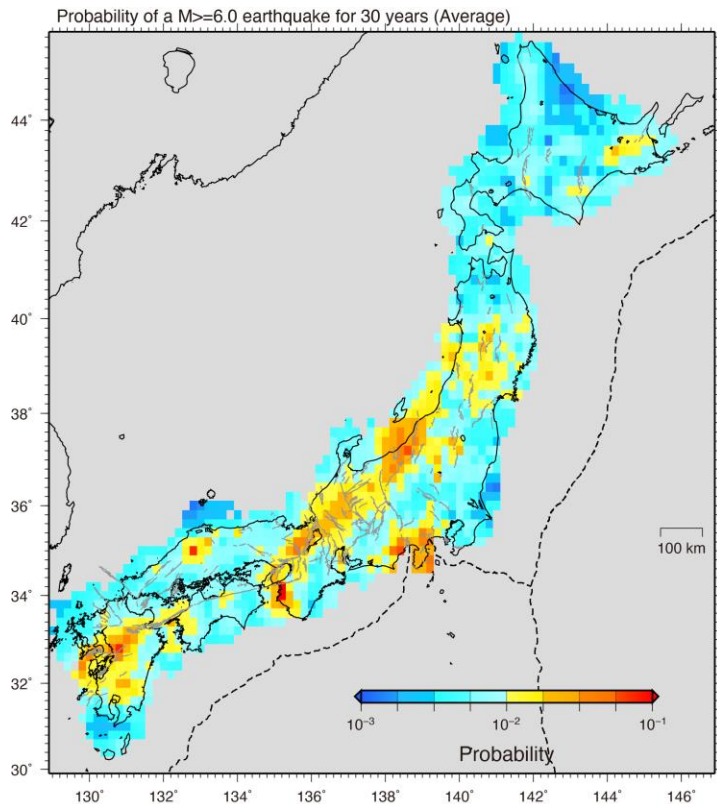
$$\lambda_{\theta}(t, x, y | H_t) = \underbrace{\mu(x, y)}_{\text{背景地震活動密度}} + \sum_{i; t < t_i} \frac{K(\bar{x}_i, \bar{y}_i)}{(t - t_i + c)^p (\bar{x}_i, \bar{y}_i)} \times \left[\frac{(x - \bar{x}_i, y - \bar{y}_i) S_i^{-1} (x - \bar{x}_i, y - \bar{y}_i)^t}{e^{\alpha(\bar{x}_i, \bar{y}_i) (M_i - 4.0)}} + d \right]^{-q(\bar{x}_i, \bar{y}_i)}$$

地震活動密度 背景地震活動密度 余震などの時空間クラスターをなす地震活動密度

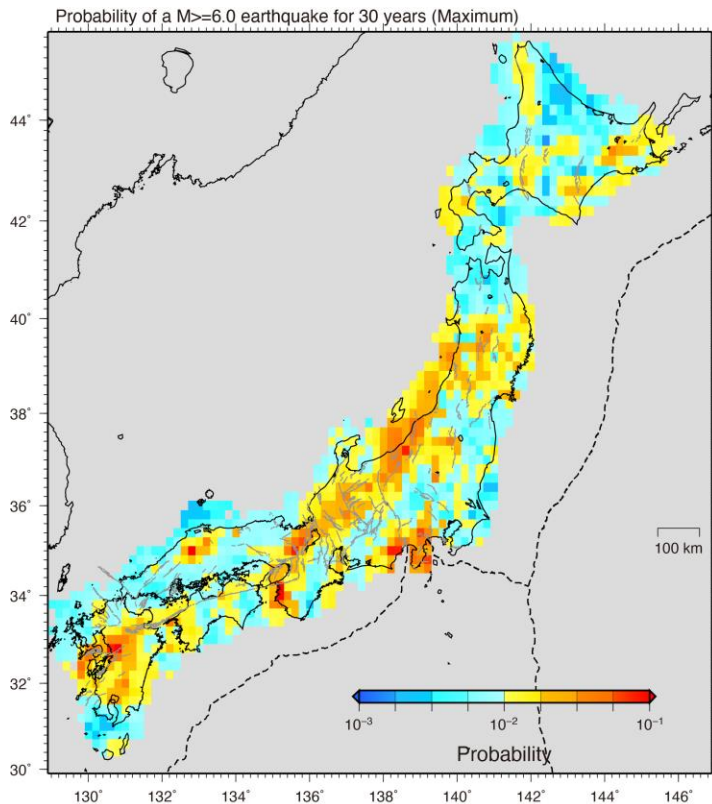
- 測地モデルとの比較
 - 全体的なパターンは似ている。
 - 新潟-神戸, 九州中央部, 伊豆半島周辺などで高い。
 - 東北北部から北海道にかけては 測地モデルの発生確率が高い。
 - 全体的なコントラストが地震モデルの方が高い。

測地・背景地震モデルの統合例

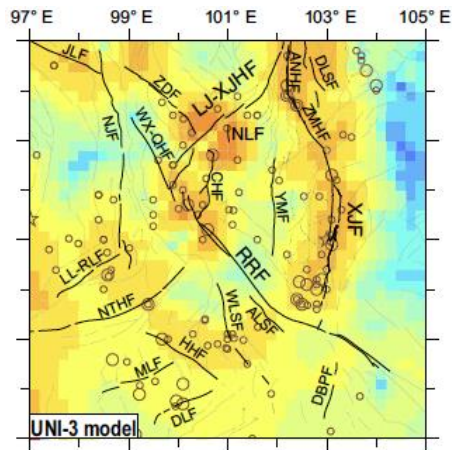
2つのモデルの平均値



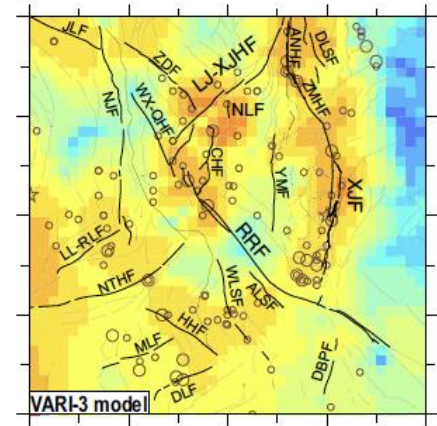
2つのモデルの最大値



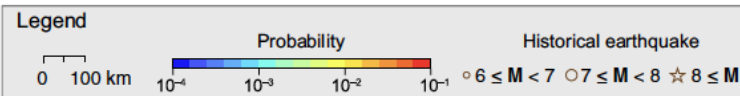
(c)



(f)



Wei et al.(2023)



東南チベットでの解析例

- Wei et al.(2023)は、 Nishimura(2022)と同じ手法で、 東南チベットでのGNSSデータからM6以上の30年地震発生確率を計算。
- 係数 β は、 日本でもチベットでも0.12-0.2程度。

Table 1 Correction coefficient β used to balance the seismic moment calculated from geodetic strain rates to that of past large earthquakes

	$\dot{\gamma}$ (Eq. 1)	$\text{Max}(\dot{\epsilon}_{h1} , \dot{\epsilon}_{h2})$ (Eq. 2)	$\text{Max}(\dot{\epsilon}_{h1} , \dot{\epsilon}_{h2} , \dot{\epsilon}_{h1} + \dot{\epsilon}_{h2})$ (Eq. 3)
UNI model	0.193	0.125	0.121
VARI model	0.198	0.130	0.126

Wei et al.(2023)

Nishimura(2022)

TABLE 2
Empirical Correction Coefficient

Model	UNI-1	UNI-2	UNI-3	VARI-1	VARI-2	VARI-3
	$\dot{\epsilon}_{ij}$	$\text{Max}(\dot{\epsilon}_1 , \dot{\epsilon}_2)$	$\text{Max}(\dot{\epsilon}_1 , \dot{\epsilon}_2 , \dot{\epsilon}_1 + \dot{\epsilon}_2)$	$\dot{\epsilon}_{ij}$	$\text{Max}(\dot{\epsilon}_1 , \dot{\epsilon}_2)$	$\text{Max}(\dot{\epsilon}_1 , \dot{\epsilon}_2 , \dot{\epsilon}_1 + \dot{\epsilon}_2)$
β	0.202	0.153	0.151	0.203	0.155	0.153

β is the specific empirical correction coefficient. $\dot{\epsilon}_{ij}$, $\dot{\epsilon}_1$, and $\dot{\epsilon}_2$ denote maximum engineering shear strain rate, maximum, and minimum principal strain rates in horizontal plane, respectively.

現状の測地モデルの課題

- ひずみ速度を計算するデータ期間については、地震やSSEが少ない比較的短い（数年間）期間をとったが、本来はなるべく長期間のデータを用いた方が良い。ただし、東北日本のようにイベントの前後で大きく歪み速度が異なる場合の解析方法を検討する必要がある。
- プレートの沈み込み帯の固着に伴う弾性変形の補正方法の標準化。
- 過去の大地震の長期間にわたる（主に粘弾性緩和による）地殻変動の補正により、モデルが改善するかどうか検証する必要がある。
- 地震発生層厚さ、剛性率については、地域変化を導入した（Vモデル）が、一様としたモデル（Uモデル）の方が、東日本や北海道では過去の地震活動と整合的であった。前弧側ではD90が深いにもかかわらず、地殻内大地震があまり発生していないことが原因であり、不均質性の取り入れ方を工夫する必要がある。
- 他のパラメータ（ β 値:地震で解放されるひずみの割合、 b 値:切断G-R則、 M_{\max} :切断G-R則）については、日本全国一様な値を仮定した。これらのパラメータについても地域依存性の導入に関する検討が必要。

まとめ

- GNSS観測に基づく測地ひずみ速度を用いて、西日本、東日本、北海道の各地域で地殻内（内陸）地震の時間変化しない長期発生確率を試算した。0.2度グリッドにおけるM6以上の内陸地震の30年発生確率は、半分以上のグリッドで1%を越え、新潟ー神戸ひずみ集中帯や九州中央部で確率が高い。
- 西日本の検討結果において、過去・長期（西暦599-2020年）及び将来・短期(2010年-2020年)に発生した地震のいずれに対しても、試算した予測モデルは地震発生確率が空間一様であるモデルよりも優位なモデルであった。GNSSデータに基づく地震発生長期予測は日本列島においても有効な手法だと言える。
- 測地ひずみ速度から変換したモーメント速度は、1586年以降の地殻内地震のモーメント速度の12-20%であり、測地学的ひずみ速度が地震学的ひずみ速度に比べてかなり大きいという先行研究（例えば、Shen-Tu et al., 1995）と調和的である。
- 地震本部の地域評価（活断層ベース，地震活動ベース）と比較すると、概ね倍半分程度で一致していた。背景地震活動ベースのモデル(Ogata, 2022)と比較すると、全体的にコントラストが小さく、北海道では顕著に確率が高い。

参考文献

Nishimura, T. (2022), Time-independent forecast model for large crustal earthquakes in southwest Japan using GNSS data, *Earth, Planets and Space*, 74(1), doi:10.1186/s40623-022-01622-5.

Ogata, Y. (2022), Prediction and validation of short-to-long-term earthquake probabilities in inland Japan using the hierarchical space–time ETAS and space–time Poisson process models, *Earth, Planets and Space*, 74(1), doi:10.1186/s40623-022-01669-4.

Wei, C.-M., G.-J. Meng, W.-W. Wu, X.-L. Chen, M. Zhang, G.-Q. Zhao, Z.-H. Dong, and Y.-C. Yang (2023), Time-Independent Grid-Based Forecast Model for $M \geq 6.0$ Earthquakes in Southeastern Tibetan Plateau Using GNSS Strain Rates and Seismicity, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, doi:10.1785/0120230152.