

12 - 8 測地データを用いた内陸地震の長期予測

Long-term forecast of crustal earthquakes in Japan using geodetic data

西村 卓也 (京都大学防災研究所)

Takuya NISHIMURA (Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univ.)

1. はじめに

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つであり、様々な観測データに基づく予測モデルが開発されてきた。海外の地震長期予測モデルでは、地震活動、活断層、測地の3種類のデータがよく使われている。米国カリフォルニア州の公的な長期予測モデルであるUCERF3¹⁾でも上記の3つのデータがともに用いられており、測地データは活断層のすべり速度や既知の活断層帯以外のあらかじめ震源を特定しにくい地震を評価するために、積極的に利用されている。我が国における内陸地震の長期予測は、地震調査研究推進本部（以下、地震本部）が活断層の長期評価として実施しているが、これはM7.0以上の地震を起こす主要活断層で発生する地震を、地形学、地質学的手法を用いて評価するものであり、震源の特定しにくい地震やM7.0未満の地震は評価されていない。地震本部では、主要活断層帯の評価に加えて、新たにM6.8以上の地震を対象とした活断層の地域評価を開始し、活断層データだけでなく、地震活動データも併用した評価を行なっているが、日本全国の評価は未だに終了していない。また、2018年大阪府北部の地震(M6.1)のように、M6前半の地震であっても発生地域によっては大きな被害を生じる可能性があり、これらの地震も対象とした地震の長期予測モデルがあることが望ましい。そこで、本稿ではGNSSデータに基づくひずみ速度場を用いて、西日本と北海道を対象にM6以上の内陸地震の30年間の発生確率の試算を行った結果について報告する。

2. GNSS データを用いた地震発生確率の計算方法

測地データに基づいて地震の長期予測を行う前提には、測地学的手法によって観測される地震間のひずみ速度が長期的には地震によって解放されるひずみ速度と比例関係にあるとの仮定が用いられている。地震の弾性反発説に基づく、地震間に蓄積されるひずみを解消するのが地震であるから、地震の再来間隔よりもはるかに長い時間をとれば、そのような仮定が成り立つと考えられる。

GNSSなどによって観測されるひずみ速度をその地域で発生する地震のモーメント速度 \dot{M}_0 に変換する式はいくつか提案されており、西南日本の歴史地震の分布との整合性からSavage and Simpson(1997)²⁾によって提案された以下のような式を用いて確率計算を行った。

$$\dot{M}_0 = 2\beta\mu H_s A \text{Max}(|\epsilon_{h1}^i|, |\epsilon_{h2}^i|, |\epsilon_{h1}^i + \epsilon_{h2}^i|) \quad (1)$$

ここで、 μ は剛性率、 H_s は地震発生層の厚さ、 A は面積、 ϵ_{h1}^i と ϵ_{h2}^i は水平方向の主ひずみ速度である。 β は、本研究において新たに加えた係数で、観測されたひずみのうち、地震として解消されるひずみの割合を表すものである。 β は、(1)式から計算されるモーメント速度と西日本で過去435年間に発生した地震のモーメント解放速度の比から計算し、0.12程度となった。なお、ここで用いたひずみ速度は、南海トラフから沈み込むプレート間固着による弾性変形は南海トラフでの海溝型地震により解放されるため内陸地震の震源断層への載荷源ではないと考えて、プレート間固着モデルを用いて補正したものをを用いている。ひずみ速度は、2005年4月から2009年12月までの平均速度からOkazaki et al.(2020)³⁾の手法で計算したものをを用いた。地震発生層の厚さと剛性率については、

領域全体で一様としたモデルと空間変化を考慮した 2 つのモデルを用い、一様としたモデルでは 12km と 30GPa、空間変化を考慮したモデルでは、Omuralieva et al.(2012)⁴⁾ の浅い方から 90% の地震の発生した深さである D90 を補間したものと J-SHIS 深部地盤構造モデル⁵⁾ における D90 の深さまでの平均剛性率を用いた。なお、計算は 0.2 度グリッド毎に行っている。

地震の規模別頻度分布は切断グーテンベルグ・リヒター則に従うとし、最大マグニチュードは 8.0、 b 値は 0.9 とした。これにより、測地データから計算した地震モーメント速度を任意のマグニチュードの地震発生個数に変換できる。最後に、地震の発生時期はランダムであるとするポアソン過程を仮定することにより地震発生確率に変換し、M6 以上の地震の 30 年間での地震発生確率を計算する。ポアソン過程を用いているので、この予測値は、時間変化しない定常的な発生確率を表すものだと言える。

3. 西日本の地震発生確率の試算と歴史地震との整合性

第 1 図に西日本で試算した結果を示す。地震発生層の厚さと剛性率が異なる 2 つのモデルの両方とも地震発生確率の高い地域は、新潟—神戸ひずみ集中帯や九州中央部などのひずみ集中帯として知られているところである。30 年発生確率が 1% を超えるグリッドは、全体の半分程度であり、最大で 3.7% のグリッドがあった。岡山県から広島県にかけては、地震発生層などを空間変化させたモデルの方が確率は高いが、これはこの地域の地震発生層が厚くなっている影響である。次に、これらの発生確率と M6 以上の過去 1422 年間に発生した内陸地震を比較して、どの程度整合しているかを確認した。地震あたりの対数尤度や Molchan ダイアグラムを用いて比較した結果、この地域で空間的に一様に内陸地震が発生しているというモデルより、今回試算したモデルの方が過去の大地震の分布と整合していることが明らかになった。なお、地震発生層などを空間変化させたモデルと一様モデルについても比較を行ったが、どちらも過去の地震分布とは同程度の整合性であった。また、用いた測地データよりも後の期間に発生した M5 以上の地震との整合性も確認し、試算したモデルの整合性を確認することができた。

4. 北海道の地震発生確率の試算

第 2 図に北海道で試算した結果を示す。なお、北海道の太平洋側においては、Omuralieva et al.(2012) の D90 が 40 km 以上と非常に深く、海溝型地震との分離ができていない可能性がある。そのため、地震発生層の厚さと剛性率の積の最大値を 900 GPa km と定め、それ以上の大きな値を持つグリッドでは、この値に固定した。地震発生層の厚さと剛性率が異なるモデルの発生確率は(第 2 図 a)、太平洋側の地震発生確率が高くなっているが、その原因はひずみ速度の大小よりも地震発生層の厚さと剛性率の積がこの地域で大きくなっているためである。一方、地震発生層の厚さと剛性率を一様としたモデル(第 2 図 a)では、北海道東部の内陸部や石狩平野の東縁、北海道北部の日本海沿岸などのひずみ速度の高い場所で発生確率が高くなっている。この中で発生確率の最大値は阿寒湖、屈斜路湖周辺における 3.2% となっており、過去に M6 クラスの地震が発生した地域に対応している。次に、北海道では、江戸時代以前の歴史地震の記録がないため、気象庁による観測が始まった 1919 年から 2020 年までの M5 以上の地震との整合性を比較した。その結果、空間一様モデルよりは、北海道でも西日本同様、試算した測地データに基づくモデルの方が過去の地震分布と整合的であることが示された。一方、モデルに基づく地震モーメント速度や年間地震発生数を過去の地震活動と比較すると、モデルの方が地震モーメント速度で 9.9 倍、地震数でも 2.2 倍と過大

な予測となっている。その原因としては、本試算では西日本で求めた $\beta(=0.12)$ をそのまま北海道に適用しており、 β の地域依存性を無視していることと、最近 102 年間の地震が長期間の平均とは限らず、北海道ではこの期間に大きな内陸地震が発生しなかったため最近の地震数や地震モーメントが長期間の平均よりも小さくなっているという 2 つの可能性が挙げられる。

5. おわりに

本稿では、測地データから西日本と北海道の内陸地震の発生確率を試算し、過去の地震活動と比較することで、測地データを用いた長期予測の有効性が明らかにした。測地データから地震によって解放されるモーメント速度に変換する際のパラメータの地域依存性やプレート間固着による弾性変形の補正などに課題は残っているが、現在行われている活断層に基づく地震の長期評価を補完・補強する手法として測地データを用いた内陸地震の長期予測は有効であると考えられる。なお、本稿では計算手法等の詳細を割愛したが、Nishimura(2022)の論文⁶⁾に示してあるので、興味のある方は参照していただきたい。

(京都大学防災研究所 西村 卓也)

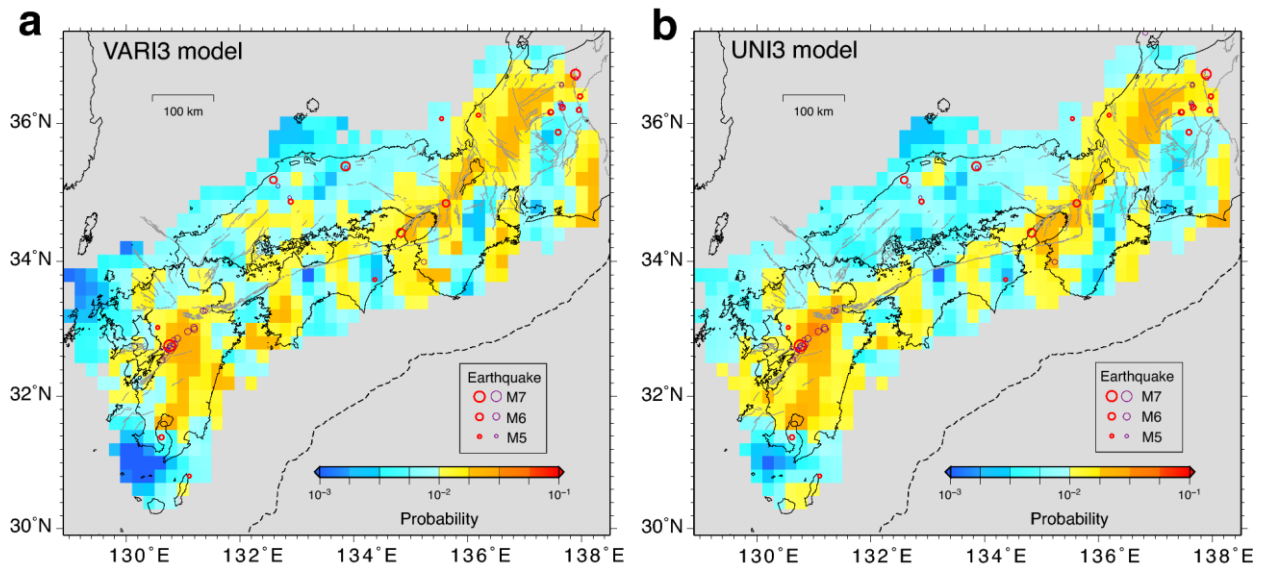
NISHIMURA Takuya

謝辞

東大地震研・加藤愛太郎博士及び統計数理研究所尾形良彦博士との議論は大変参考になりました。ここに記して感謝いたします。

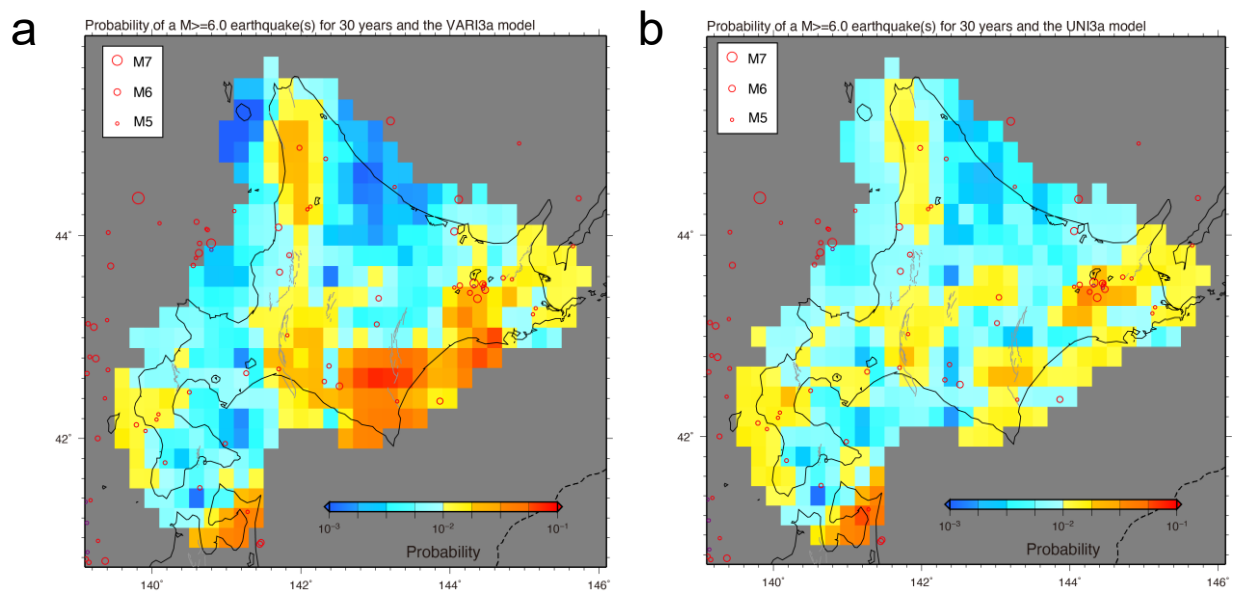
参考文献

- 1) Field EH *et al.* (2015), Long - Term Time - Dependent Probabilities for the Third Uniform California Earthquake Rupture Forecast (UCERF3). *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **105**, 511–543. <https://doi.org/10.1785/0120140093>
- 2) Savage JC, Simpson RW (1997), Surface strain accumulation and the seismic moment tensor. *Bull. Seismol Soc Am.*, **87**, 1345–1353
- 3) Okazaki T *et al.* (2021) Consistent estimation of strain-rate fields from GNSS velocity data using basis function expansion with ABIC. *Earth Planets Space*, **73**, 153, <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01474-5>
- 4) Omuralieva A *et al.* (2012) Lateral variation of the cutoff depth of shallow earthquakes beneath the Japan Islands and its implications for seismogenesis. *Tectonophysics*, **518–521**, 93–105, <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.11.013>
- 5) 防災科学技術研究所 (2005) J-SHIS 地震ハザードステーション, <https://doi.org/10.17598/nied.0010>.
- 6) Nishimura, T. (2022), Time-independent forecast model for large crustal earthquakes in southwest Japan using GNSS data. *Earth Planets Space*, **74**, 58, <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01622-5>.



第 1 図 GNSS データに基づく西日本における M6 以上の地震の 30 年間の発生確率 (Nishimura et al., 2022). 赤と紫の丸は、2010-2020 年の深さ 20km 以浅で M5 以上の地震の震央で、赤はデクラスタリング後のもの。(a) 地震発生層の厚さと剛性率の地域変化を考慮したモデル。(b) 地震発生層の厚さと剛性率を一様としたモデル。

Fig. 1 Probability of $M \geq 6$ crustal earthquakes based on GNSS data over 30 years in western Japan (Nishimura et al., 2022). Both red and purple circles indicate epicenters of $M \geq 5$ earthquakes with a depth of ≤ 20 km for 2010–2020 and red ones indicate those of declustered earthquakes.



第 2 図 GNSS データに基づく北海道における M6 以上の地震の 30 年間の発生確率。赤と紫の丸は、1919-2020 年の深さ 20km 以浅で M5 以上の地震の震央で、赤はデクラスタリング後のもの。(a) 地震発生層の厚さと剛性率の地域変化を考慮したモデル。(b) 地震発生層の厚さと剛性率を一様としたモデル。

Fig. 2 Probability of $M \geq 6$ crustal earthquakes based on GNSS data over 30 years in Hokkaido. Both red and purple circles indicate epicenters of $M \geq 5$ earthquakes with a depth of ≤ 20 km for 1919–2020 and red ones indicate those of declustered earthquakes.