

12 - 9 b 値にもとづく大地震発生予測のモデルのレビューA review of earthquake forecast modeling based on b -value

楠城 一嘉 (静岡県立大学)

NANJO Kazuyoshi (University of Shizuoka)

地震の頻度分布は、一般に、グーテンベルグ・リヒター則に従う。 $\text{Log}N = a - bM$ (M はマグニチュード, N は M 以上のマグニチュードの地震数, a と b は定数). b は 1 付近の値をとるが, 時間や場所によつてばらつき, 又, 大地震の発生に伴って変動する. そのため, b 値は, 大地震のメカニズムや予測と関係すると議論されてきた¹⁾. 本報告では, この視点から最近の研究を中心にレビューした.

はじめに, 地震発生前の数年から数十年の間, 震源付近で b 値が小さい, 又は, b 値が減少した事例を報告した. 例として, 米国の 2004 年パークフィールド地震²⁾ と 2019 年リッジクレスト地震 (第 1 図)³⁾ に加えて, 2011 年東北地方太平洋沖地震 (以下, 東北沖地震)⁴⁾, 2016 年熊本地震⁵⁾, そして, 2014 年のチリのイキケ地震⁶⁾ を挙げた. 岩石破壊実験等から, b 値と差応力の間逆相関が知られているので^{7,8)}, これらの地震の震源付近では差応力が大きかった事が示唆される. 尚, 東北沖地震については後続研究も紹介した⁹⁾. その論文では, 東北沖地震直後に増加した b 値が減少に転じており, 地震前の b 値の様子に似ている事から, 別の大地震が起きやすくなりつつあると言う. しかし, 同地震の物理モデルによれば, 現在歪が溜まっておらず, 大地震の兆候は考えられないとする反論がある¹⁰⁾.

次に, 大地震後の b 値が, 平時の b 値 (大地震前の b 値) より大きければ, それは余震の b 値であり, 大地震の続発の可能性が低いとするモデルを報告した¹¹⁾. このモデルがどの地震にも当てはまれば, リスク評価に役立つ可能性があり, 論文では, 信号機モデルと呼ばれている¹¹⁾. つまり, 余震の b 値は今後大地震の可能性が低いので, 安全の意味の青信号, 前震の b 値と判断した場合 (b 値が平時より小さい場合), 大地震の可能性が高いので, 危険の意味の赤信号, そして, 前震とも余震とも言えない b 値 (b 値が平時と同程度) の場合, 大地震の可能性は否定できないので, 注意の意味の黄信号で表現される. モデル適用の代表例として熊本地震を挙げ, 先発の $M6.5$ 地震と後発の $M7.3$ 地震の間の b 値は増加しつつも, 平時より大きくならなかったため, 黄信号であったと言う.

しかしながら, 本報告では, 信号機モデルを熊本地震には単純に適用できないと問題提起をした. 先発の $M6.5$ 地震後の b 値を南北で分けて解析した結果 (第 2 図)¹²⁾, 北側は青信号であり, 南側は黄信号であった. 北側は $M7.3$ 地震がこれから起きる布田川断層を含む領域であり, 南側は既に $M6.5$ 地震が起きた日奈久断層を含む領域である. 北側の b 値が平時より高かったのは, $M7.3$ の地震に先行してゆっくり滑りが布田川断層で起き, 応力が緩和して, b 値が上昇したためと考えられている.

次に, 現在の b 値から, 将来の地震像を推定するモデルを紹介した. 事例として, 熊本地域¹³⁾, 南海トラフ¹⁴⁾, リッジクレスト地域³⁾ の解析結果を挙げた. 現在の布田川・日奈久断層沿いの b 値は熊本地震前より概ね高いが, 日奈久断層の中部だけ b 値は小さい (第 3 図)¹³⁾. 又, 地殻変動から, そこは, 熊本地震の余効滑りが起きている領域と, 起きていない領域の境界であり, 歪が集中しつつあると推定される^{15,16)}. 熊本地震の様に, 低 b 値の領域が将来の地震発生の場所となる可能性がある. そして, もし地震が起きれば, 未破壊の日奈久断層の南部へ破壊が進展する可能性もある. 地震活動の推移を見守る必要があり, 日奈久断層の監視の重要性を本報告で指摘した.

南海トラフの現在の b 値は, 昭和東南海・南海地震の大滑り域で小さい¹⁴⁾. 大滑り域は, 海底地殻

変動から固着が強いと推定される地域でもあり¹⁷⁾, b 値と固着の相関がある. さらに固着の強い領域だけに注目して, 南海トラフの東西の b 値を解析すると, 東側の b 値が西側より小さい. 固着の強い領域が東側で狭く, 西側で広い事により, 応力蓄積レートが東側で大きく, 西側で小さいため, それを反映して b 値に東西で差があると解釈される. 繰り返す南海トラフ地震は, 東側から破壊が開始する傾向があり, 今回の解析結果はその傾向と矛盾しないと考えられる.

現在のリッジレスト地域の b 値は, ガーロック断層の近くで比較的小さい (第 1 図)³⁾. その値はリッジレスト地震の直前ほど小さくはないが, b 値の時間変化は減少傾向を示す. 低 b 値の領域は, リッジレスト地震のクーロン応力変化により, 将来の地震の発生が促進される領域でもある. b 値が更に減少すれば, そこで地震活動が活発になり, ガーロック断層に影響を与える可能性がある. 地質調査は, その断層で大地震が何度も起きた痕跡を見つけており, 将来の大地震が危惧されていた. 熊本地域と同様に, リッジレスト地域の低 b 値の領域を中心とした監視体制の強化が望まれる.

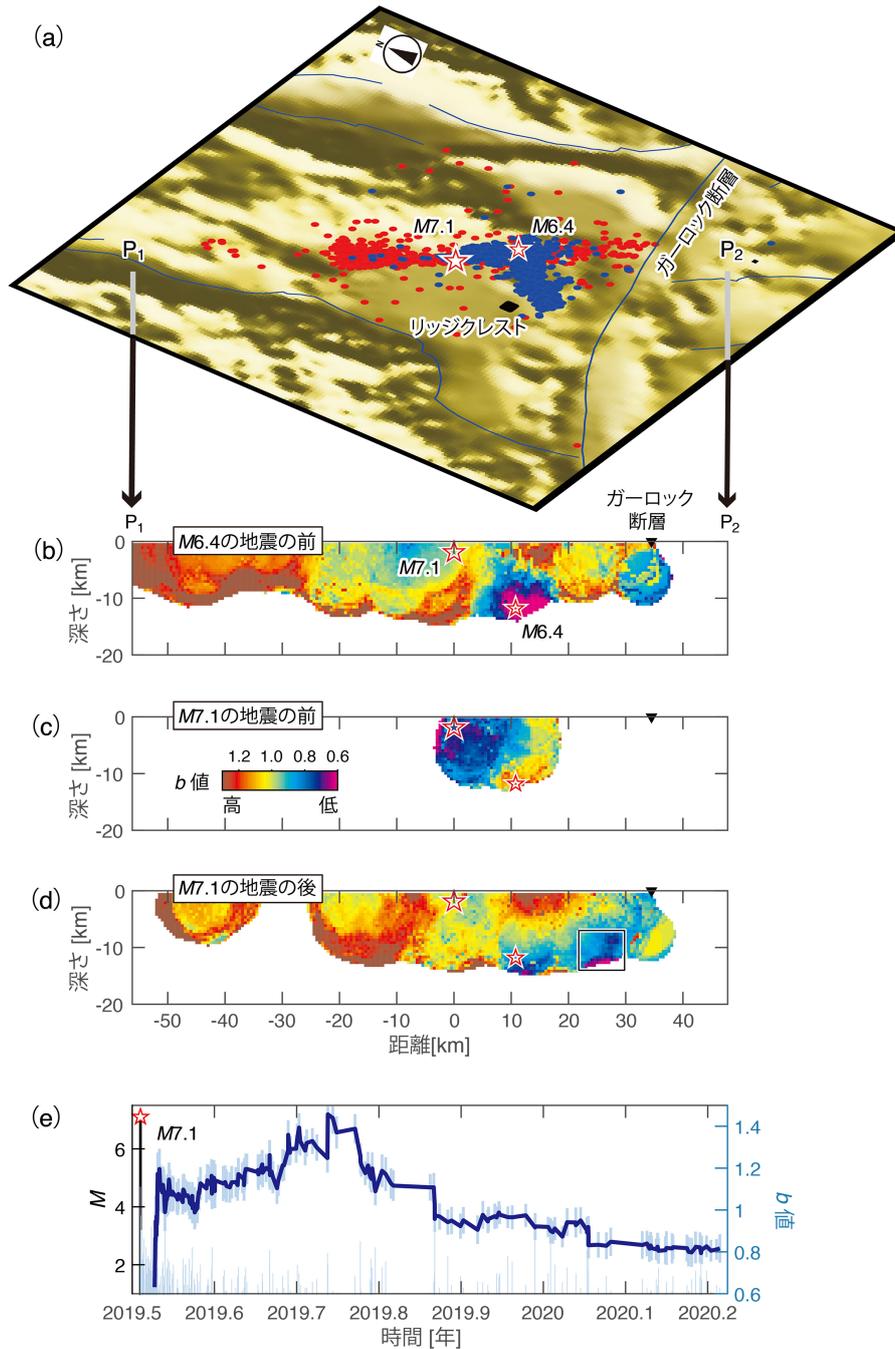
最後に, 大地震前にしばしば観測される低 b 値や b 値の減少が, 先行現象であるかの検証について議論した. 検証方法の一つとして, それらを先行現象とみなし, 地震予測モデルを作って, 予測の精度が, ランダム予測ではほとんど到達出来ない事を示す事である. そのモデルの一つが, 地震予知連絡会で報告されており¹⁸⁾, その検証が課題である. ただし, モデルの予測精度は未学習の地震に対して評価されなければいけない. 学習したデータに対する評価結果は, 過学習の賜物だからである. 過学習問題を回避する機械学習分野の技術を援用して, この課題に取り組む予定である.

(楠城 一嘉)

NANJO Kazuyoshi

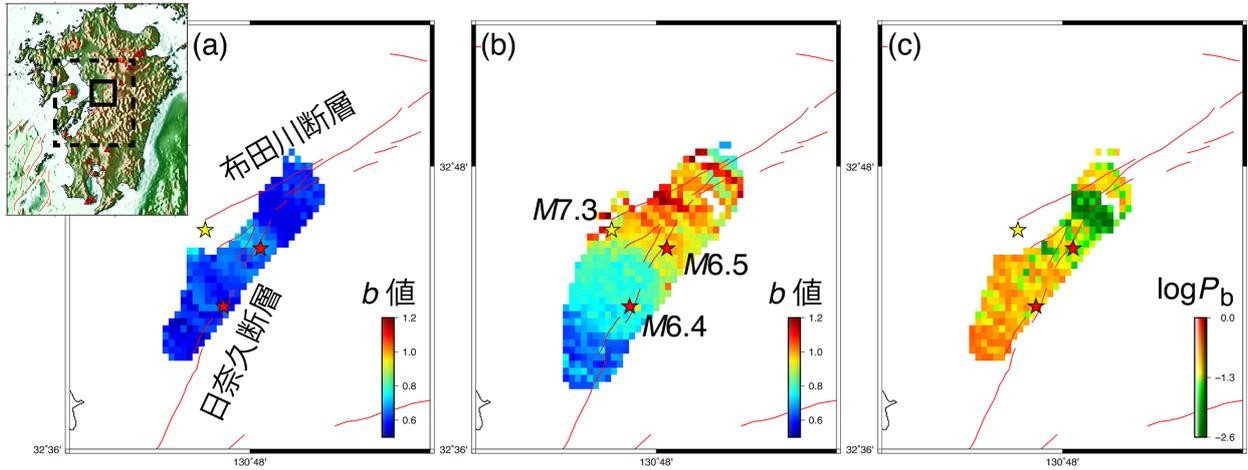
参考文献

- 1) Wiemer & Wyss (2002), *Adv. Geophys.*, **45**, 259-302.
- 2) Schorlemmer & Wiemer (2005) *Nature*, **434**, 1086.
- 3) Nanjo (2020), *Nat. Commun.*, **11**, 3082.
- 4) Nanjo et al. (2012), *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L20304.
- 5) Nanjo et al. (2016) *Earth Planets Space*, **68**, 187.
- 6) Schurr et al. (2014), *Nature*, **512**, 299-302.
- 7) Scholz (1968), *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **58**, 399-415.
- 8) Scholz (2015), *Geophys. Res. Lett.*, **42**, 1399-1402.
- 9) Tormann et al. (2015), *Nat. Geosci.*, **8**, 152-158.
- 10) Bürgmann et al. (2016), *Nature Geosci.*, **9**, 183.
- 11) Gulia & Wiemer (2019), *Nature*, **574**, 193-199.
- 12) Nanjo & Yoshida (2017), *Earth Planets Space*, **69**, 13.
- 13) Nanjo et al. (2019), *Geophys. Res. Lett.*, **46**, 9489-9496.
- 14) Nanjo & Yoshida (2018), *Nat. Commun.*, **9**, 1117.
- 15) Pollitz et al. (2017), *Geophys. Res. Lett.*, **44**, 8795-8803.
- 16) 小林知勝 (2018), 予知連会報, **100**, 405-408.
- 17) Yokota et al. (2016), *Nature*, **534**, 374-377.
- 18) 楠城一嘉 (2018), 予知連会報, **99**, 459-462.



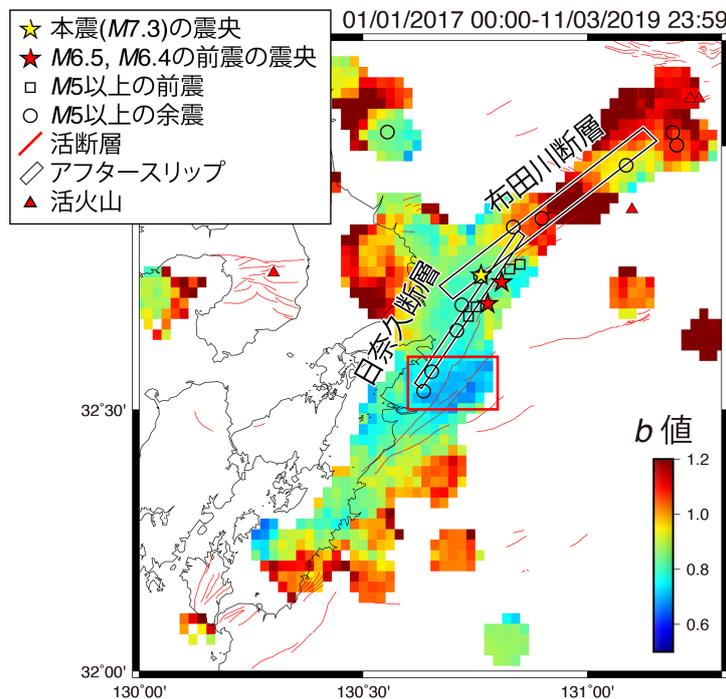
第 1 図 リッジクレスト地震³⁾。(a) 2019 年 7 月 4 日に $M6.4$ 地震が起き、その後の約 34 時間の地震活動は活発で、くの字の様に分布した (青点)。その活動の北端で、 $M7.1$ 地震の破壊が開始した。 $M7.1$ 地震の後の 12 時間に起きた地震から (赤点)、 $M7.1$ 地震でずれた断層は約 50km の長さには達する。 $M7.1$ 地震の断層に沿った断面図を (b)~(d) に示す。ガーロック断層の位置を三角で示す。(b) b 値が低い所で、 $M6.4$ 地震が起きた。(c) その後、 b 値の低い所が変わり、そこで $M7.1$ 地震が起きた。(d) 2 つの地震が起こったことで、四角で囲った別の所で b 値が低くなっている。(e) $M7.1$ 地震の後、(d) の四角で囲った所の b 値が徐々に減少している。

Fig. 1 The Ridgecrest earthquakes³⁾. (a) A $M6.4$ earthquake occurred on July 4, 2019 and this preceded a $M7.1$ earthquake 34 h later. Blue dots indicate seismicity during the period between these events. The hypocenter of the $M7.1$ earthquake is located at the north end of this activity. Red dots are earthquakes in 0.5 days after the $M7.1$ earthquake. (b) b -values for seismicity before the $M6.4$ quake along the fault ruptured by the $M7.1$ quake. Triangle: location of the Garlock fault. (c) Same as (b) for seismicity before the $M7.1$ quake. (d) Same as (b) for seismicity after the $M7.1$ quake. (e) Plot of b as a function of time after the $M7.1$ quake for seismicity within the rectangle in (d).



第 2 図 熊本地震の震源域における b 値の変化¹²⁾. (a) $M7.3$ 地震まで 1.16-0.98 日の b 値. 挿入図は、第 2 図 (実線の四角) と第 3 図 (点線の四角) の地域を示す. (b) $M7.3$ 地震まで 0.98-0 日の b 値. 布田川断層付近の b 値は平時の b 値 ($b = 0.8$, 熊本地震前の b 値¹¹⁾) より高い. (c) (a) と (b) の b 値の有意差を評価する指標 $\log Pb$ から、布田川断層付近の b 値の増加は優位に高い ($\log Pb < -1.3$, 緑色).

Fig. 2 b -value change in the focal area of the Kumamoto earthquakes¹²⁾. (a) b -values in 1.16-0.98 days prior to the $M7.3$ earthquake. The zoomed inset is a map showing the study regions of Fig. 2 (solid-line rectangle) and Fig. 3 (dashed-line rectangle) in the Kyushu district. (b) b -values in 0.98-0 days prior to the $M7.3$ earthquakes. We see that b -values near the Futagawa fault are higher than $b = 0.8$, a background value stated in the reference¹¹⁾. (c) $\log Pb$, the logarithm of the probability that the b -value for 1.16-0.98 days is different from the b -value for 0.98-0 days. The increase in b in part of the northern area is significant ($\log Pb \leq -1.3$: green).



第 3 図 現在の熊本地域の b 値¹³⁾. 布田川・日奈久断層沿いの b 値は、熊本地震前と比較して、概ね高いが、日奈久断層の中部だけ (四角), b 値が低く、又、減少している. そこは、余効滑りの領域の南端に相当する.

Fig. 3 Current b -value map in the Kumamoto region¹³⁾. Comparison with the b -values before the start of the Kumamoto earthquake sequence along the Futagawa and Hinagu faults pinpoints a zone showing low and decreasing b -values in the central section (rectangle) of the Hinagu fault. This includes the south end of an afterslip plane representing the northern section of the Hinagu fault.