

本稿は、以下のプレプリントの翻訳版である。

Shimbaru T (2024) Spatiotemporal Distribution of b Value Estimated from Seismic Activity in the Northern Part of Tokushima Prefecture: A Report as of April 2024 in Tokushima City and Surrounding Municipalities. Jxiv 713:1-9. <https://doi.org/10.51094/jxiv.713>

徳島県北部の地震活動から推定した b 値の時空間分布

—徳島市と周辺市町における 2024 年 4 月時点の報告—

新原 俊樹^{1*}

1 西南学院大学情報処理センター

〒814-8511 福岡県福岡市早良区西新 6-2-92

E-mail: shimbaru@seinan-gu.ac.jp

* 責任著者

要旨

近年の研究において、大規模な地震の発生前に、本震となる場所の近傍で b 値が低下した事例が複数報告されている。これにより、将来に大規模な地震が発生するおそれがある場所を特定するうえで有用な情報になり得るとして、各地の地震活動の特徴を表す b 値が注目されている。筆者らはこれまで、日本の内陸の浅い場所における b 値の空間分布を観測し、 b 値が低い領域について調査を続けている。今回の調査は、徳島県の北部に注目し、2024 年 4 月 1 日までの地震活動から最新の b 値の空間分布を観察した。その結果、特に、徳島市とその周辺市町における深さ 10 km 前後の場所で低 b 値領域が確認された。 ΔAIC による評価の結果、この領域における b 値の有意な時間変化は認められなかったが、直近の b 値の値は 0.63 と低い状態であった。今後発生する地震の規模によっては、 b 値に有意な低下が認められる可能性もあるため、今後の地震活動について引き続き注視していく必要がある。

キーワード

b 値, 時空間分布, 地震活動, 上浦—西月ノ宮断層, 徳島県北部, 徳島市

1. はじめに

ゲーテンベルク・リヒター則 (G-R 則) (Gutenberg and Richter 1944) は、ある時空間内で発生した地震の規模別頻度分布に関する経験則であり、地震の規模 M (マグニチュード) とその規模以上の地震の総数 $N(M)$ を用いて、以下の(1)式で表される。通常、(1)式の M の係数である b 値は 0.7~1.1 程度であるが (宇津 2001), 規模の大きな地震の発生頻度が相対的に高い時空間内では、 b 値は小さな値を示す。

$$\log_{10} N(M) = a - bM$$

先行研究 (Nanjo *et al.* 2012, Nanjo *et al.* 2016, 新原・吉田 2021) から、近年発生した大規模な地震の発生前に、本震となる場所の近傍で b 値が低下していたことが報告されている。これらの結果は、将来の大規模地震の発生位置を特定するうえで、 b 値が有用な情報となる可能性を示唆するものであり、 b 値の時空間分布をリアルタイムで監視することで大規模地震の予測に繋げようとする試みもなされている (Gulia and Wiemer 2019, Nanjo 2020) 。筆者らはこれまで、日本の内陸の浅い場所における b 値の空間分布を観測し、警固断層北西部 (新原 2023) など、 b 値が低い領域について調査してきた。今回の報告では、徳島県北部の徳島市付近で観測されている低 b 値領域について、2024 年 4 月 1 日の時点の実況を報告する。

2. 対象領域の地震活動

Fig. 1 は本報告が対象とした領域である。1997 年 10 月~2024 年 3 月末の期間に深さ 0~20 km の浅い場所で発生した $M0$ 以上の地震の震央分布を Fig. 1(a) に、地震活動の推移を Fig. 1(b) に示す。これらの地震の位置・規模・発生時刻の情報は、気象庁地震カタログから取得した。Fig. 1(a) の範囲内で目立った地震活動はみられないが、さらに過去に遡ると、1947 年 1 月 16 日に $M 5.6$ (最大震度 4) の地震が発生している。Fig. 1(a) の北側には中央構造線断層帯の讃岐山脈南縁東部区間がある。政府の長期評価 (地震調査研究推進本部 2017a) によると、この区間では $M 7.7$ 程度の地震が発生する可能性が指摘されている。また、南側には上浦-西月ノ宮断層が知られており、この断層で想定されている地震の規模は $M 6.5$ 程度である (地震調査研究推進本部 2017b)。Fig. 1(a) 内で発生した地震の規模別頻度分布を Fig. 1(c) に示す。この図から、すべての地震が漏れなく検知できていると考えられる規模の下限を $M 0.5$ と判断し、 b 値の推定には $M 0.5$ 以上の地震を用いることにした。

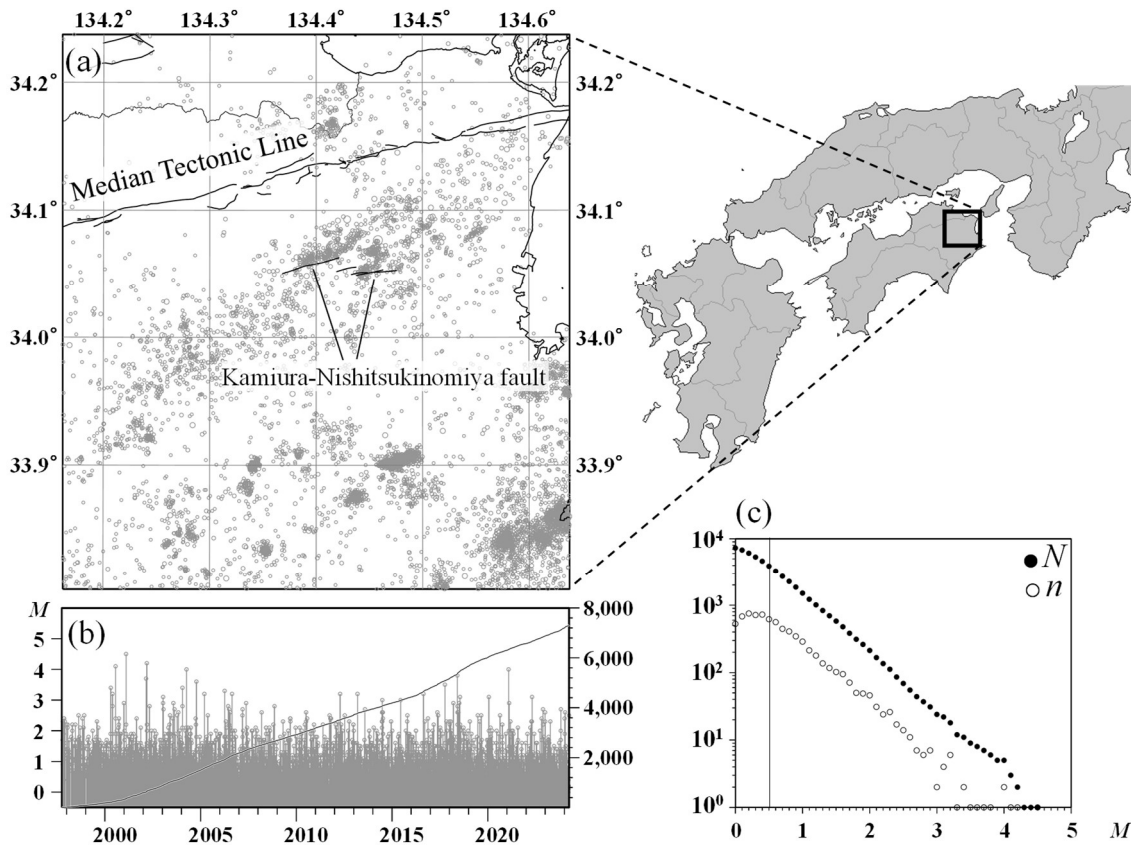


Fig. 1. (a) 1997年10月~2024年3月の地震の震央分布図 ($M \geq 0$ 、深さ 20 km 以浅). 実線は活断層を示す. (b) 領域内の地震活動経過図と回数積算図. (c) 領域内の地震の規模別頻度分布. \circ は規模別の頻度, \bullet は累積の頻度を示す. すべての地震が漏れなく検知できていると考えられる規模の下限を $M 0.5$ と判断した.

3. 解析手法

本報告における b 値の空間分布の描画手法は新原 (2021) に基づく. まず, 緯度・経度方向に 0.5 分 (約 1 km) 間隔, 深さ方向に 1 km 間隔で格子点を配置した. これらの格子点ごとに半径 4 km の球状の空間を設定し, その中で発生した直近 200 個の地震をデータセットとした. このとき, 1997 年 10 月まで遡っても 200 個の地震を確保できない場合は, それまでの数とした. 次に, 各データセットについて, 漏れなく検知できる地震の規模の下限 M_c (Magnitude of completeness) を推定した. 具体的には, Wiemer and Wyss (2000) の手法に倣い, データセットの規模別頻度分布が G-R 則に従うものと仮定し, 理論的な G-R 則との適合度合いを示す R 値が 90 % 以上となる最小の規模を M_c とした. この M_c が推定できれば, b 値は最尤法 (宇津 1965) により以下の(2a)式から求めることができる. この式の \bar{M} は, 地震のデータセットのうち M_c 以上の地震の規模の平均を表す. 実際には, M は $\Delta M (=0.1)$ 単位で等級化されているため, このバイアスを考慮した (2b)式を用いる (Marzocchi and Sandri 2003).

$$b = \log_{10} e / (\bar{M} - M_c) \quad (2a)$$

$$b = \log_{10} e / \{\bar{M} - (M_c - \Delta M/2)\} \quad (2b)$$

この計算の過程で、 R 値が 90% を満たさない場合や、 M_c 以上の地震が 50 個に満たない場合は、 b 値の推定精度が低いと判断して不明とした。なお、 M_c 以上の N 個の地震から得た b 値の推定誤差 σ は、以下の(3)式 (Shi and Bolt 1982) から求めた。

$$\sigma = 2.30 \times b^2 \times \sqrt{\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2 / N(N-1)} \quad (3)$$

また、各格子点で求めた b 値を平面分布として観察するに当たり、本報告では b 値が低い場所の検知を目的としていることから、同一の緯度・経度における異なる深さの b 値の中から最小値を表示することとした。

4. 結果と考察

調査対象領域における 2014 年 4 月と 2024 年 4 月の b 値の空間分布と、期間中の各時点における、2014 年 4 月を基準とした b 値の変化量 (Δb) を Fig. 2(a) に示す。また、 b 値を採用した深さを Fig. 2(b) に、 b 値とともに推定した M_c を Fig. 2(c) に示す。Fig. 2(a)内の A-B 断面は、上浦一西月ノ宮断層の周辺の地震活動の分布に重ねて引いたもので、その傾斜は垂直とした。この A-B 断面上の b 値の空間分布を Fig. 2(d) に示す。この図では、A-B 断面上の水平方向、深さ方向にそれぞれ 1 km 間隔で格子点が配置されている。 b 値は、各格子点から半径 4 km の空間内の地震を用いて計算され、不明な場所は灰色で示されている。地震が少ない場所では、データセットの期間も 1997 年 10 月まで延び、 b 値の推定に使われた地震の数も 100 個程度にとどまる格子点が多い。さらに周辺の格子点では、 M_c 以上の地震が 50 個に満たず、多くの格子点で b 値は不明となっている。Fig. 2(a)内で、周辺より b 値が低くなっている場所を囲むように領域 1 を設定した。この領域 1 内では、期間を通じて b 値が徐々に低下しているように見える。この間の Fig. 2(b)と Fig. 2(d)を見ると、深さ 10 km 前後で b 値が最も低くなっている。この間、Fig. 2(c)の M_c は 0.5 からほとんど変化がなく、安定的に b 値が得られている。例として、2024 年 4 月 1 日時点の領域 1 内のある格子点 (Fig. 2(a)中に示す e 点) において、 b 値の算出に用いた地震の規模別頻度分布を Fig. 2(e) に示す。理論的な G-R 則から逸脱しない範囲で、最小の M_c が推定されていることがわかる。

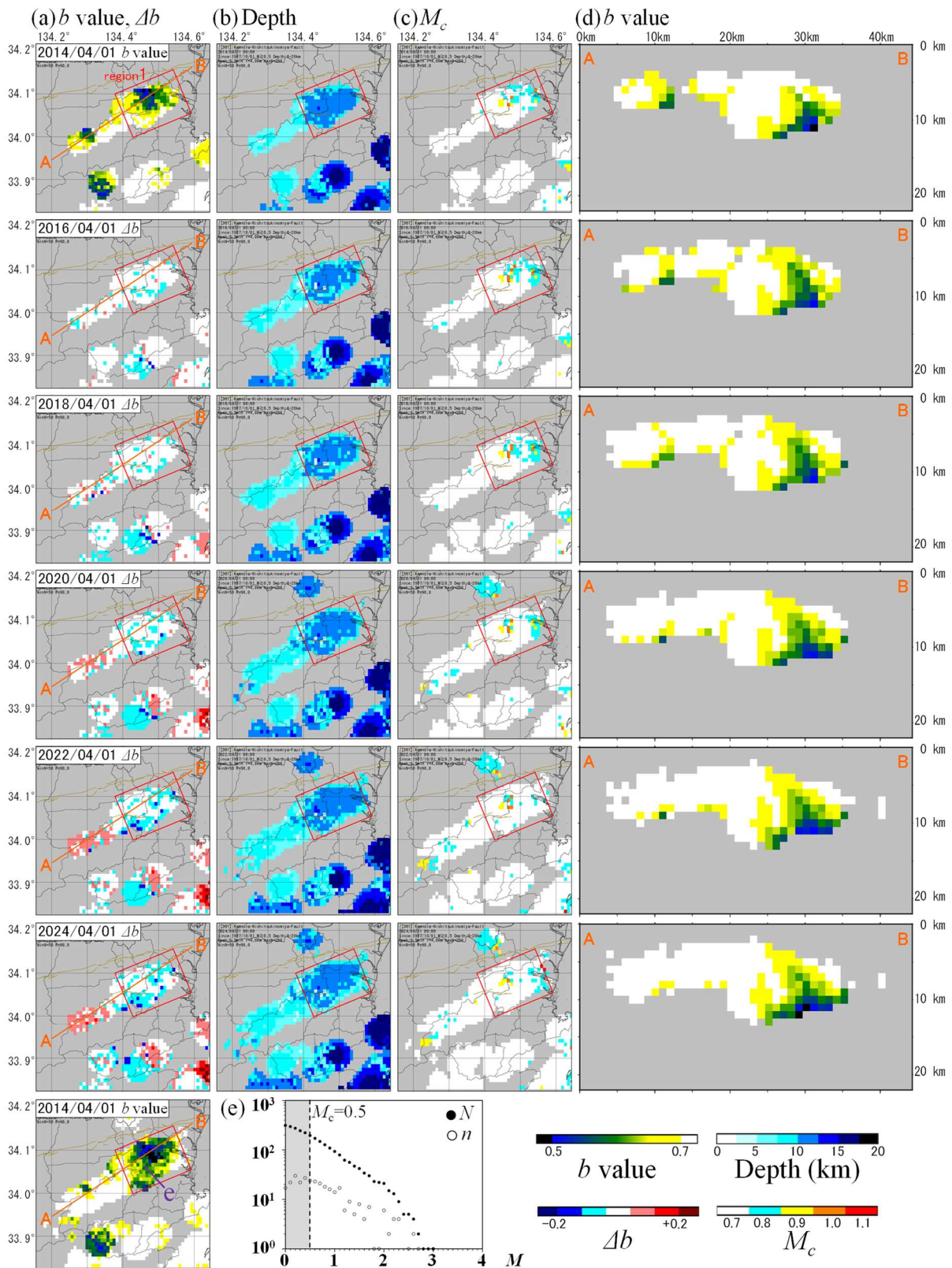


Fig. 2. (a) 2014年4月と2024年4月の b 値の空間分布. 中断は, 期間中の各時点における, 2014年4月を基準とした b 値の変化量 (Δb). (b) b 値を採用した深さ. (c) b 値とともに推定した M_c . (d) A-B 平断面上の b 値の空間分布. (e) 2024年4月1日時点の領域1内のある格子点において, b 値の算出に用いた地震の規模別頻度分布の例.

次に、領域1内の深さ0~20 kmで発生した地震を用いて b 値の時間変化を求めた。この領域内の地震活動の推移と、200個の地震のデータセットを40個ずつ入れ替えながら b 値を繰り返し算出した結果を Fig. 3 に示す。Fig. 3 の各点から伸びる横線は地震のデータセットの期間を示し、縦線は推定誤差 σ を示す。また、Fig. 3 中の (1)~(10) で示した各期間のデータセットから求めた b 値と M_c を Table 1 に整理した。 M_c は (2)~(10) でいずれも 0.5 であり、 b 値は概ね安定して得られている。ここで、 b 値の時間変化の有意性を判定するため、Utsu (1999) による以下の (4)式から得られる ΔAIC を用いた。(4)式の各変数は、比較する2つのデータセットの地震数 (N_1 と N_2)、各データセットから求めた b 値 (b_1 と b_2) を示す。 ΔAIC が 2 より大きい場合、 b 値の差が有意であると判断する。

$$\Delta AIC = -2(N_1 + N_2) \ln(N_1 + N_2) + 2N_1 \ln\left(N_1 + N_2 \frac{b_1}{b_2}\right) + 2N_2 \ln\left(N_1 \frac{b_2}{b_1} + N_2\right) - 2 \quad (4)$$

データセットが重複しない期間(5)と期間(10)の間で比較したところ、 ΔAIC は 1.04 であり、両期間の間で有意な変化は確認できなかった。ただし、直近の活動から得られた b 値は 0.63 と低く、今後発生する地震の規模によっては、 b 値に有意な低下が認められる可能性がある。

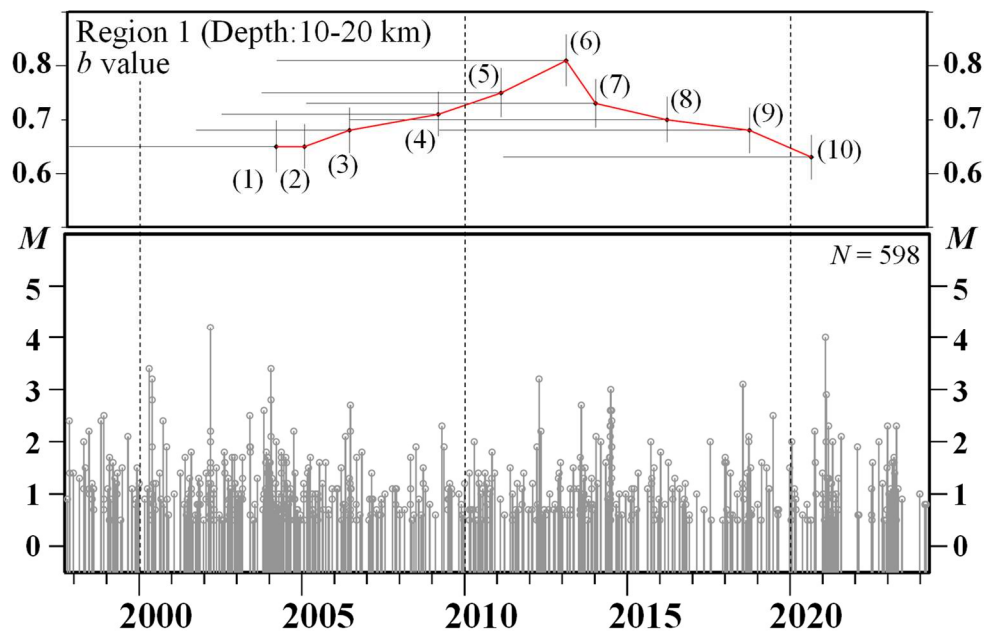


Fig. 3. 領域1における b 値の時間変化（上図）と地震活動経過図（下図）。それぞれの b 値は200個の地震のデータセットから得られた。(1)~(10)で示した b 値の概要を Table 1 に示す。

Table 1. Fig. 3 内の各期間から得られた b 値の概要.

Dataset Period		b value	M_c	ΔAIC
(1)	1997/10/21 ~ 2004/05/16	0.65	0.7	—
(2)	2000/01/03 ~ 2005/04/07	0.65	0.5	—
(3)	2001/11/01 ~ 2006/09/08	0.68	0.5	—
(4)	2002/08/22 ~ 2009/06/30	0.71	0.5	—
(5)	2003/11/29 ~ 2011/07/01	0.75	0.5	—
(6)	2004/05/19 ~ 2013/07/22	0.81	0.5	—
(7)	2005/04/28 ~ 2014/06/30	0.73	0.5	—
(8)	2006/09/09 ~ 2016/10/02	0.70	0.5	—
(9)	2009/07/11 ~ 2019/05/13	0.68	0.5	—
(10)	2011/07/27 ~ 2021/04/29	0.63	0.5	1.04 (5)→(10)

5. 結論

徳島県の北部に注目し、2024年4月1日までの地震活動から最新の b 値の空間分布を観察したところ、特に、徳島市とその周辺市町における深さ 10 km 前後の場所で低 b 値領域が確認された。 ΔAIC による評価の結果、この領域における b 値の有意な時間変化は認められなかったが、直近の b 値の値は 0.63 と低い状態であった。今後発生する地震の規模によっては、 b 値に有意な低下が認められる可能性もあるため、今後の地震活動について、引き続き注視していく必要がある。

謝辞

本報告では、許可を得て、国立研究開発法人防災科学技術研究所、北海道大学、弘前大学、東北大学、東京大学、名古屋大学、京都大学、高知大学、九州大学、鹿児島大学、国立研究開発法人産業技術総合研究所、国土地理院、国立研究開発法人海洋研究開発機構、公益財団法人地震予知総合研究振興会、青森県、東京都、静岡県、神奈川県温泉地学研究所、気象庁のデータを用いた気象庁地震カタログを使用しました。一部の図の作成には GMT (Wessel and Smith 1998) を使用しました。

参考文献

- Gulia L, Wiemer S (2019) Real-time discrimination of earthquake foreshocks and aftershocks. *Nature* 574:193-199. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1606-4>
- Gutenberg B, Richter CF (1944) Frequency of earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological Society of America* 34(4):185-188. <https://doi.org/10.1785/BSSA0340040185>

- Marzocchi W, Sandri L (2003) A review and new insights on the estimation of the b -value and its uncertainty. *Annals of Geophysics* 46(6):1271-1282. <https://doi.org/10.4401/ag-3472>
- Nanjo KZ, Hirata N, Obara K, Kasahara K (2012) Decade-scale decrease in b value prior to the M9-class 2011 Tohoku and 2004 Sumatra quakes. *Geophysical Research Letters* 39(20):L20304. <https://doi.org/10.1029/2012GL052997>
- Nanjo KZ, Izutsu J, Orihara Y, Furuse N, Togo S, Nitta H, Okada T, Tanaka R, Kamogawa M, Nagao T (2016) Seismicity prior to the 2016 Kumamoto earthquakes. *Earth Planets Space* 68:187. <https://doi.org/10.1186/s40623-016-0558-2>
- Nanjo KZ (2020) Were changes in stress state responsible for the 2019 Ridgecrest, California, earthquakes?. *Nature Communications* 11:3082. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16867-5>
- Shi Y, Bolt BA (1982) The standard error of the magnitude-frequency b value. *Bulletin of the Seismological Society of America* 72(5):1677-1687. <https://doi.org/10.1785/BSSA0720051677>
- 地震調査研究推進本部 (2017a) 中央構造線断層帯 (金剛山地東縁ー由布院) の長期評価 (第二版) . https://www.jishin.go.jp/main/chousa/katsudansou_pdf/20171219_mtl.pdf. Accessed 11 Apr 2024
- 地震調査研究推進本部 (2017b) 上浦ー西月ノ宮断層の長期評価. https://www.jishin.go.jp/main/chousa/17dec_chi_shikoku/shikoku_04_kamiura-nishitsukinomiya.pdf. Accessed 11 Apr 2024
- 新原俊樹・吉田明夫 (2021) 内陸で発生した大地震の前後における震央付近の地震活動の b 値. *地震第2輯* 74:77-86. <https://doi.org/10.4294/zisin.2020-5>
- 新原俊樹 (2023) 警固断層帯北西部の周辺における b 値の空間分布の近況. *地震第2輯* 76:1-6. <https://doi.org/10.4294/zisin.2022-9>
- 宇津徳治 (1965) 地震の規模別度数の統計式 $\log n=a-bM$ の係数 b を求める一方法. *北海道大学地球物理学研究報告* 13:99-103. <https://doi.org/10.14943/gbhu.13.99>
- Utsu T (1999) Representation and analysis of the earthquake size distribution: A historical review and some new approaches, *Pure and Applied Geophysics* 155:509-535. <https://doi.org/10.1007/s000240050276>
- 宇津徳治 (2001) 地震のマグニチュードの度数分布. 宇津徳治 (著) *地震学* 第3版. 共立出版, 東京
- Wessel P, Smith WHF (1998) New, improved version of generic mapping tools released. *EOS Trans. AGU* 79(47):579. <https://doi.org/10.1029/98EO00426>
- Wiemer S, Wyss M (2000) Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: Examples from Alaska, the Western United States, and Japan. *Bulletin of the Seismological Society of America* 90(4):859-869. <https://doi.org/10.1785/0119990114>