

日奈久断層帯周辺と警固断層帯北西部周辺における 2023 年までの b 値の時空間分布

Spatiotemporal Variation of b values around the Hinagu Fault Zone and Northwestern Part of the Kego Fault Zone until 2023

高橋 冬樹¹, 葭本 崇成², 新原 俊樹³

Fuyuki TAKAHASHI¹, Takanari YOSHIMOTO², and Toshiki SHIMBARU³

(Received March 6, 2024; Accepted January 20, 2025)

1 はじめに

「大きな地震ほど発生頻度が低くなる」という地震の規模別頻度分布の特徴はグーテンベルク・リヒター (G-R) 則 (Gutenberg and Richter, 1944) として知られる。この経験則は、ある時空間内で発生した地震の規模 M (マグニチュード) とその規模以上の地震の総数 $N(M)$ を用いた以下の (1) 式で表される。この式の M の係数である b 値は多くの場合で 0.7~1.1 程度である (宇津, 2001)。 b 値が小さな時空間内では規模の大きな地震の発生頻度が相対的に高いことを意味する。

$$\log_{10} N(M) = a - bM \quad (1)$$

岩石破壊実験 (Scholz, 1968) によれば、岩石試料に加える差応力が上昇すると、試料が発する微小破壊音の振幅別発生頻度分布の b 値が低下したことが確認されている。近年の大規模な地震を対象とした研究では、「平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震」と 2004 年のスマトラ沖の地震の事例 (Nanjo et al., 2012) や、「平成 28 年 (2016 年) 熊本地震」(以下、「熊本地震」) の事例 (Nanjo et al., 2016) において、前震 (4/14 の M 6.5) や本震 (4/16 の M 7.3) の破壊開始点の付近で、前震が発生する直前までの地震から求めた b 値が低下していたことが確認された。また、新原・吉田 (2021)

は、過去に日本の内陸の地殻内で発生した M 6 以上の地震 30 事例を対象として網羅的な調査を行った。その結果、精度良く b 値を推定できた全 9 事例 (いずれも余震活動を伴った本震) において、先行する地震活動に伴い本震の震央となる位置の付近で b 値が低下するとともに、周辺よりも低い値となり、本震後の余震活動では一転して回復したことを報告している。これらの結果は b 値の低下が将来の大規模地震の発生位置を特定する上で有用な情報になり得ることを示唆するものである。最近では Gulia and Wiemer (2019) や Nanjo (2020) により、 b 値の空間分布の実況監視に基づく大地震の予測の試みもなされている。

九州地方においては、熊本地震の余震活動に基づく解析から、日奈久断層帯に沿った領域の一部で b 値の低下が報告されている (Nanjo et al., 2019)。また、2005/03/20 に福岡県西方沖 (現在の震央地名は「福岡県北西沖」) で発生した M 7.0 の地震の余震活動から、警固断層帯北西部の周辺で低 b 値の領域が確認されている (Chiba, 2021)。

そこで、本稿では、これら 2 つの領域に注目し、 b 値のその後の推移について明らかにするため、2023/12/31 までの地震活動に基づく調査結果について報告する。

¹ 福岡管区気象台地震火山課, Seismology and Volcanology Division, Fukuoka Regional Headquarters, JMA

*現所属: 気象庁地震火山部火山監視課, Volcanic Observation Division, Seismology and Volcanology Department, JMA

² 福岡管区気象台地震火山課, Seismology and Volcanology Division, Fukuoka Regional Headquarters, JMA

*現所属: 大阪管区気象台地震火山課, Seismology and Volcanology Division, Osaka Regional Headquarters, JMA

³ 西南学院大学情報処理センター, Information Processing Center, Seinan Gakuin University

2 日奈久断層帯周辺

2.1 地震活動の概況

日奈久断層帯周辺の地震活動を図 1 に示す。図 1(a) は 2016/01/01~2023/12/31 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である。地震の位置・規模・発生時刻の情報は気象庁地震カタログ(気象庁, 2024) から取得した。図 1(b) のとおり, ここでは

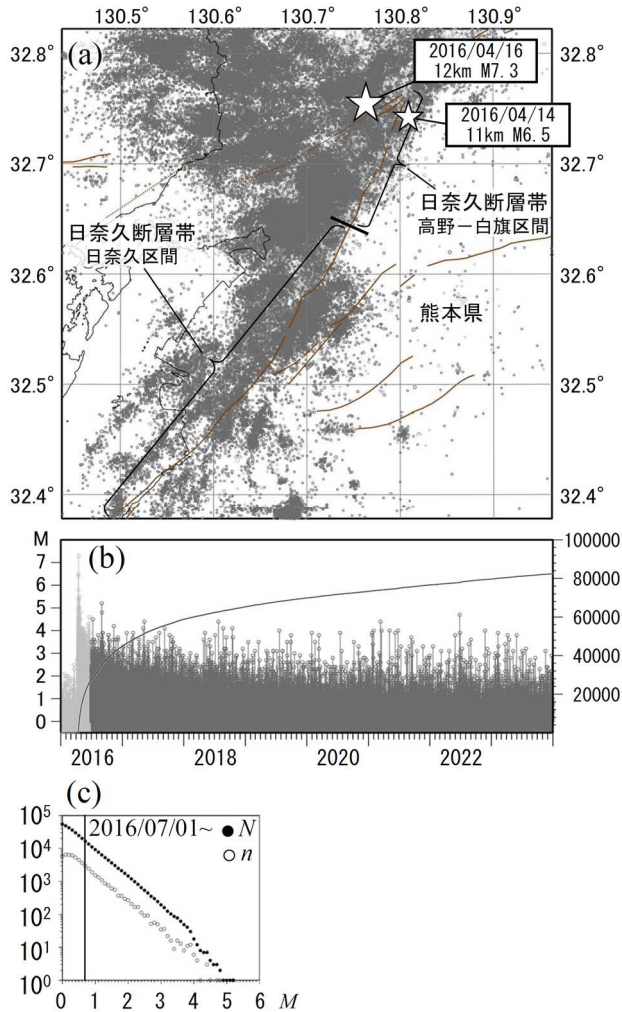


図 1 日奈久断層帯周辺の地震活動。(a)震央分布図(2016/01/01~2023/12/31, 深さ 0~20 km, $M0$ 以上)。 b 値の推定に用いた 2016/07/01 以降の活動を濃く表示。図中の茶色の線は地震調査研究推進本部の長期評価による活断層を示す。(b)地震活動経過図と回数積算図。(c)2016/07/01 以降の地震の規模別頻度分布。 n は当該 M における地震数, N は当該 M 以上の累積地震数を示す。 $M0.7$ (図中の縦線) を下回る規模で (1) 式の G-R 則との乖離がみられる。

2016/04/14 から熊本地震の活動が継続している。特に, 4/14 に前震 ($M6.5$), 4/16 に本震 ($M7.3$) が発生した直後から活発な地震活動が続き, 規模が小さな地震が検知できていないことから, b 値の推定には 2016/07/01 以降の活動 (図 1(a), (b) に濃く表示) を用いた。また, 図 1(a) 内で 2016/07/01 以降に発生した地震の規模別頻度分布を図 1(c) に示す。この規模別頻度分布を見ると, $M0.7$ を下回る規模で (1) 式の G-R 則との乖離がみられる。 b 値の推定には, 漏れなく検知された地震のデータセットが必要になることから, 図 1 の範囲の解析には $M0.7$ 以上の地震を用いることとした。

2.2 解析手法

ある期間に発生した地震に基づく b 値の空間分布の描画手法は先行研究(新原, 2021; 新原, 2023)に倣った。まず, 緯度・経度方向に 0.5 分(約 1 km)間隔, 深さ方向に 1 km 間隔で配置した格子点周辺の空間(半径 4 km の球状の空間)ごとに, 期間の終点から過去に遡って $M0.7$ 以上の 200 個の地震(期間の始点まで遡っても 200 個に満たない場合は, 期間中のすべての地震)のデータセットを確保した。 b 値は, 特定の時空間内で漏れなく検知できている地震の規模の下限 M_c (Magnitude of completeness) を推定できれば, M_c の値と M_c 以上の地震の規模の平均 $\bar{M}$ を用いて, 最尤法(宇津, 1965)により以下の (2a) 式から求められる。ただし, 実際には M の $\Delta M (=0.1)$ 単位の等級化によるバイアスを考慮した (2b) 式を用いている (Sandri and Marzocchi, 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 M_c を一律に $M0.7$ とした場合, 局所的に地震の検知力が低い場所(海域など)や, 地震活動の活発化に伴い一時的に検知力が低下した期間の b 値が低く推定されるおそれがある。そこで, 格子点ごとに, 各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 とする手法 (Wiemer and Wyss, 2000) を用いた。ただし, データセットの規模別頻度分布が $R \geq 90$ 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 を求める場合は, Shi and Bolt (1982) による以下の (3) 式を用いた。

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

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。

2.3 b 値の空間分布と時間変化

図 2(a)は、図 1(a)の範囲の b 値の空間分布である。上から、2016/07/01~2017/12/31 (1 段目)、2016/07/01~2019/12/31 (2 段目)、2016/07/01~2021/12/31 (3 段目)、2016/07/01~2023/12/31 (4 段目) の各期間の地震を基に

描画した。また、 b 値を採用した深さを図 2(b)に、 b 値とともに推定した M_c を図 2(c)に示す。さらに、日奈久断層帯の高野ー白旗区間の一部から日奈久区間(地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2013)にかけての A-B の線(図 2(a)に図示)に沿った断面(以下、「A-B 断面」)上の b 値の空間分布を図 2(d)に示す。両区間の断層の傾斜が高角(地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2013)であることを踏まえ、A-B 断面の傾斜は垂直とした。この図 2(d)は、あらためて A-B 断面上の水平方向に 1 km 間隔、深さ方向に 1 km 間隔で格子点を再配置し、各格子点から半径 4 km の空間内の地震を用いて b 値を推定し直したものである。また、いずれの図も、 b 値が不明だった格子点は灰色で表示した。

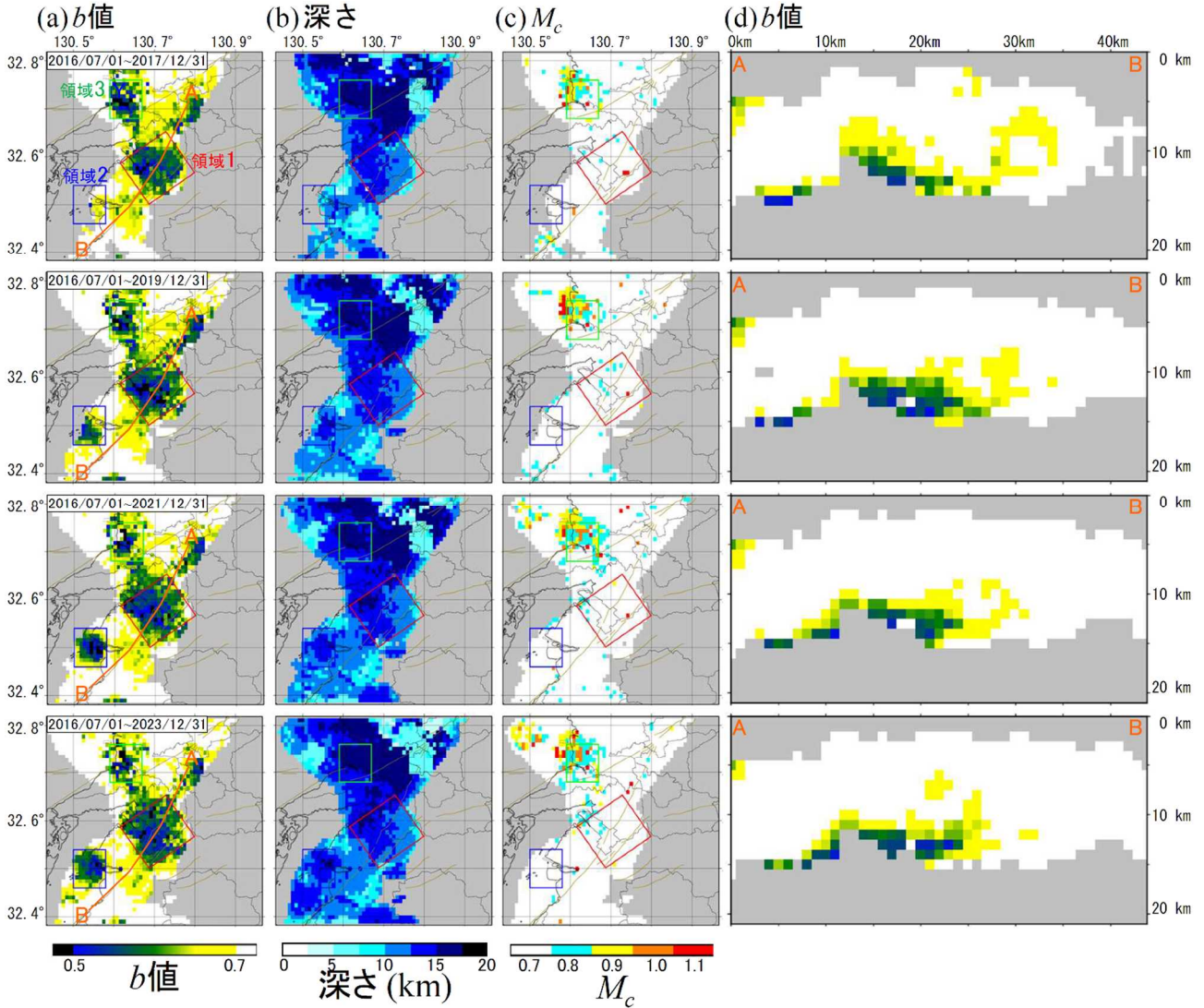


図 2 (a)日奈久断層帯周辺における各期間の地震に基づく b 値の空間分布。0.7 以上を白色、0.5 未満を黒色で表示。(b) b 値を採用した深さ。(c) b 値とともに推定した M_c 。(d) A-B 断面上の b 値の空間分布。いずれの図も、 b 値が不明だった格子点は灰色で示した。

断層近傍の余震活動が継続している場所では、 b 値の算出に用いる地震が 200 個揃う格子点が多く、地震のデータセットの期間も 2~4 年程度と比較的短い。一方、周辺の地震活動が低調な場所では、データセットの期間も 2016/07/01 まで延び、確保できた地震の数も 50~100 個程度にとどまる格子点が多い。さらに外側では、 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。

図 2(a)の中で、周辺よりも b 値が低かった 3 か所に注目し、それぞれを囲むように領域 1~3 を設定した。領域 1 内の低 b 値は Nanjo et al. (2019) でも言及されているが、2023/12/31 までの地震に基づく 4 段目の空間分布図でも確認することができる。図 2(b)と図 2(d)を見ると、いずれの図でも深さ 10~15 km で b 値が最も低くなっている。また、図 2(c)より、 b 値とともに推定した M_c は 0.7 からほぼ変化がなく、安定的に b 値が得られていることがわかる。領域 2 でも、図 2(a)の上段から下段に進むにつれて低 b 値領域が徐々に拡大しているように見える。ここでも深さ 10~15 km で b 値が最も低くなっている。このほか、領域 3 にも b 値が低い場所があるが、こちらは図 2(a)の下段に進むにつれて縮小傾向にあるように見える。ただし、領域 3 の b 値の空間分布を見ると、隣接する格子点の間で値が異なっているほか、 M_c も 0.8~1.0 の間で安定していない。また、領域 1 の各格子点の b 値の推定誤差 σ が 0.03~0.06 程度であるのに対し、領域 3 の σ は 0.04~0.08 程度とやや高く、得られた値の信頼性は高くない。領域 3 においては、データセットに用いる地震の規模の下限を M 1.0 程度に引き上げた上で、 b 値が推定できるほどの地震が蓄積されてから再度検証したい。

次に、領域 1,2 の深さ 10~20 km の地震から b 値の時間変化を求めた。図 3 に、両領域の M 0.7 以上の地震活動経過図を示すとともに、200 個の地震を確保する窓を 2016/07/01 から 40 個ずつ未来の方向にずらし、各窓のデータセットから b 値を推定した結果を示す。ただし、領域 2 で発生した地震は 200 個に満たなかったため、期間中に発生した 172 個すべての地震から b 値を 1 つ推定した。地震活動経過図において、 b 値の推定に用いた 2016/07/01 以降の地震を濃く表示している。図 3 の各点から伸びる横線はデータセットの期間を、縦線は推定誤差 σ を示す。また、図 3 中①~⑦の各期間のデータセットから求めた b 値と M_c 、 b 値の推定に用いた地震数 N 、推定誤差 σ を表 1 に整理した。 M_c はいずれも 0.7 であり、 b 値が安定して得られている。

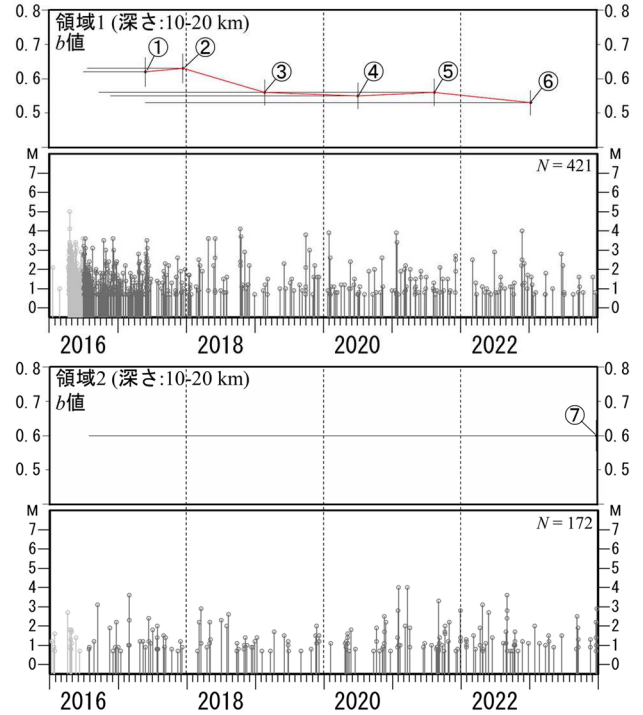


図 3 領域 1,2 の b 値の時間変化と地震活動経過図。

200 個の地震を確保する窓を 2016/07/01 から 40 個ずつ未来の方向にずらし、各窓のデータセットから b 値を推定した。ただし、領域 2 は期間中に発生した 172 個すべての地震から b 値を 1 つ推定した。 b 値の各点から伸びる横線は地震のデータセットの期間を、縦線は推定誤差 σ を示す。地震活動経過図においては、 b 値の推定に用いた 2016/07/01 以降の地震を濃く表示した。

表 1 期間①~⑦の b 値と M_c 、地震数 N 、標準誤差 σ

	期間	b 値	M_c	N	σ	ΔAIC
①	2016/07/02~2017/06/01	0.62	0.7	200	0.042	—
②	2016/07/26~2017/12/17	0.63	0.7	200	0.042	—
③	2016/09/26~2019/02/25	0.56	0.7	200	0.037	—
④	2016/11/27~2020/07/06	0.55	0.7	200	0.038	—
⑤	2017/02/02~2021/08/19	0.56	0.7	200	0.039	—
⑥	2017/06/01~2023/01/14	0.53	0.7	200	0.036	0.46 (①→⑥)
⑦	2016/07/29~2023/12/25	0.60	0.7	172	0.045	—

領域 2 は活動が低調なため b 値の時間変化を確認できないが、領域 1 では b 値が徐々に低下しているように見える。この変化の有意性を判定するため、Utsu (1999) の (4) 式から得られる ΔAIC を用いた。(4) 式の N_1 と N_2 は、比較する 2 つのデータセットの数、 b_1 と b_2 は各データセットから求めた b 値を示し、 ΔAIC が 2 より大きい場合、 b 値の差が有意だと判断する。

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

基準とした期間①の b 値 (0.62) とデータセットが重複しない期間⑥の b 値 (0.53) から得られた ΔAIC は 0.46 であり、期間①と期間⑥の b 値に有意な差は認められなかった。ただし、領域 1 の期間⑥、領域 2 の期間⑦の b 値はいずれも一般的な 0.7~1.1 の範囲 (宇津, 2001) よりも低い。特に、領域 1 は熊本地震の活動がみられた日奈久断層帯の高野-白旗区間に隣接する日奈久区間に当たる場所であり、今後の活動に伴う b 値の変化に引き続き注目したい。

3 警固断層帯北西部周辺

3.1 地震活動の概況

次に、警固断層帯北西部周辺の活動を図 4 に示す。図 4(a)は 2005/01/01~2023/12/31 に深さ 0~20 km で発生した $M0$ 以上の地震の震央分布である。図 4(a)内では警固断層帯南東部や宇美断層が知られていたが、2005/03/20 に $M 7.0$ の地震が発生し、破線で示した北西-南東方向に延びる警固断層帯北西部の存在が明らかになった。この直後の地震が多発した期間を除き、2005/08/01 以降の活動 (図 4(a), (b)に濃く表示) を b 値の推定に用いた。また、図 4(a)内の 2005/08/01 以降の地震の規模別頻度分布を図 4(c)に示す。この規模別頻度分布の $M 0.7$ を下回る規模で G-R 則との乖離がみられることから、 b 値の推定には $M 0.7$ 以上の地震を用いることとした。

3.2 b 値の空間分布と時間変化

警固断層帯北西部周辺の b 値の低下は Chiba (2021) でも報告されている。また、新原 (2023) が本稿と同じ手法で 2022/07/31 までの地震活動をもとに b 値の時間変化を調査していることから、本報告ではその後の変化に着目した。図 5(a)は、図 4(a)の範囲の b 値の空間分布である。2005/08/01 以降、期間の終点をそれぞれ 2013/12/31 (上から 1 段目)、2015/12/31 (2 段目)、2017/12/31 (3 段目)、2019/12/31 (4 段目)、2021/12/31 (5 段目)、2023/12/31 (6 段目) とする各期間の地震に基づき描画した。また、 b 値を採用した深さと M_c を図 5(b),(c)にそれぞれ示す。さらに、警固断層帯北西部 (図 4(a)中の破線) から警固断層帯南東部の一部にかけて

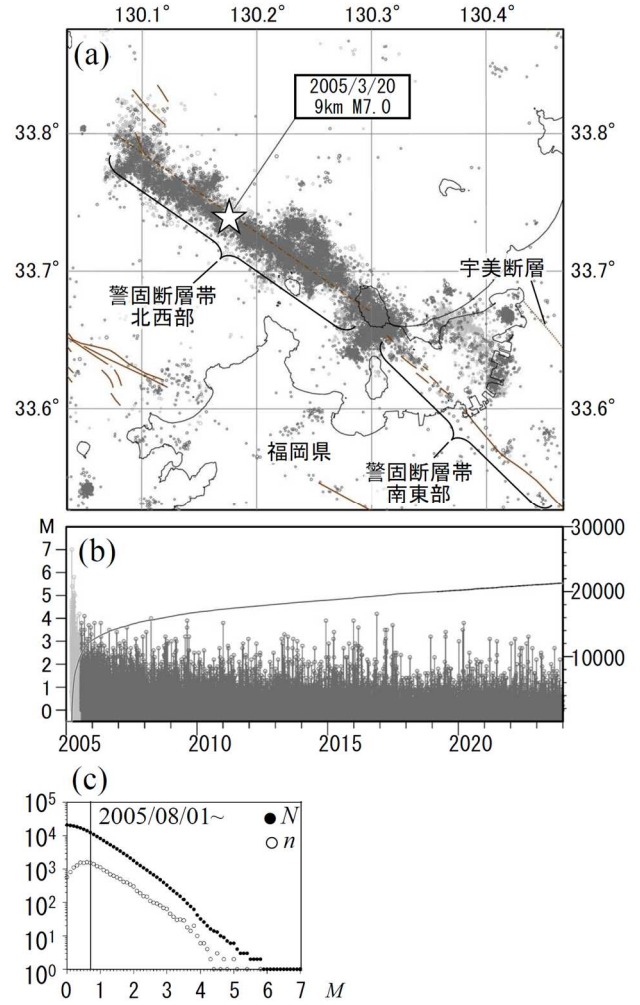


図 4 警固断層帯北西部周辺の地震活動。(a)震央分布図 (2005/01/01~2023/12/31, 深さ 0~20 km, $M 0$ 以上)。 b 値の推定に用いた 2005/08/01 以降の活動を濃く表示。図中の茶色の線は地震調査研究推進本部の長期評価による活断層を示す。(b)地震活動経過図と回数積算図。(c)2005/08/01 以降の地震の規模別頻度分布。 n は当該 M における地震数、 N は当該 M 以上の累積地震数を示す。 $M 0.7$ (図中の縦線) を下回る規模で G-R 則との乖離がみられる。

の C-D の線 (図 5(a)に図示) に沿った断面 (以下、「C-D 断面」) 上の b 値の空間分布を図 5(d) に示す。C-D 断面の傾斜は、地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2007) が推定した警固断層帯北西部と南東部の断層面の傾斜を踏まえて垂直とした。

図 5(a)の中で、周辺より b 値が低かった 3 か所をそれぞれ囲むように領域 4~6 を設定した。警固断層帯北

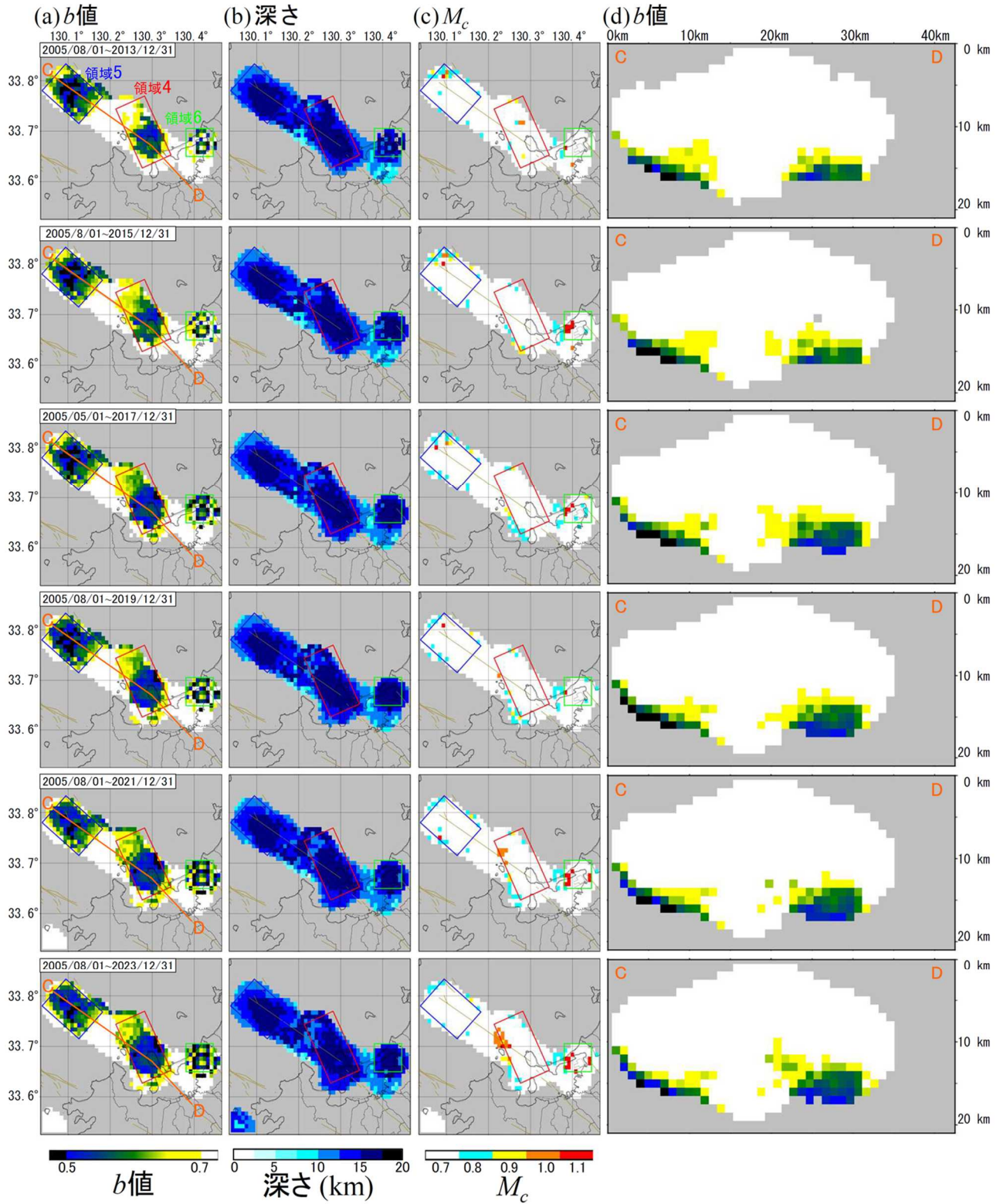


図 5 (a)警固断層帯北西部周辺における各期間の地震に基づく b 値の空間分布．0.7 以上を白色，0.5 未満を黒色で表示．(b) b 値を採用した深さ．(c) b 値とともに推定した M_c ．(d) C-D 断面上の b 値の空間分布．いずれの図も， b 値が不明だった格子点は灰色で示した．

西部の両端に当たる領域 4,5 では、図 5(a)の最上段の図において b 値が周囲より低いことが確認できるが、領域内の一部は、下段に進むにつれて b 値がさらに低下しているように見える。この間の図 5(b)と図 5(d)を見ると、いずれも深さ 15 km 前後で b 値が最も低くなっている。また、図 5(c)より、 b 値とともに推定した M_c は 0.7 から大きな変化はない。宇美断層の北西端と考えられる場所に近い領域 6 でも、図 5(a)のすべての図で b 値が低い格子点がみられるが、こちらは隣接する格子点の間で b 値の値が異なるほか、 M_c が高い格子点も目立つ。また、各格子点の b 値の推定誤差 σ も 0.04~0.08 程度あり、領域 1 や領域 2 (いずれも 0.03~0.06 程度) と比べてやや高く、得られた値の信頼性は高くないと考えられる。領域 6 においても、データセットに用いる地震の規模の下限を引き上げた上で、下限 M 以上の地震が蓄積されてからあらためて検証する必要がある。

次に、領域 4,5 の深さ 10~20 km で発生した地震を用いて b 値の時間変化を求めた。図 6 に、両領域の $M 0.7$ 以上の地震活動経過図を示すとともに、200 個の地震を確保する窓を 2005/08/01 から 40 個ずつ未来の方向にずらし (領域 4 の期間⑮のみ、期間⑭のデータセットから 20 個ずらし)、各窓のデータセットから b 値を推定した結果を示す。

また、図 6 中⑧~⑮の各期間のデータセットから求めた b 値と M_c 、 b 値の推定に用いた地震数 N 、推定誤差 σ を表 2 に整理した。 M_c はいずれも 0.7 であり、 b 値が安定して得られている。

ここで、領域 4 では⑧、領域 5 では⑮を基準とし、これらとデータセットが重複しない各期間の b 値との差の有意性を ΔAIC で判定した。領域 4 では、期間⑧の 0.75 と期間⑫の 0.59 ($\Delta AIC=3.74$) の間には有意に差があり、この時期に b 値が低下していたことがわかる。しかし、その後の b 値はやや回復傾向にあり、期間⑬の 0.63 ($\Delta AIC=1.03$) や期間⑭の 0.69 ($\Delta AIC=-1.30$)、期間⑮の 0.68 ($\Delta AIC=-1.04$) との差は有意ではない。領域 5 では、期間⑮の 0.68 と比較すると、期間⑮の 0.70 ($\Delta AIC=-1.91$) との差は有意ではなかった。

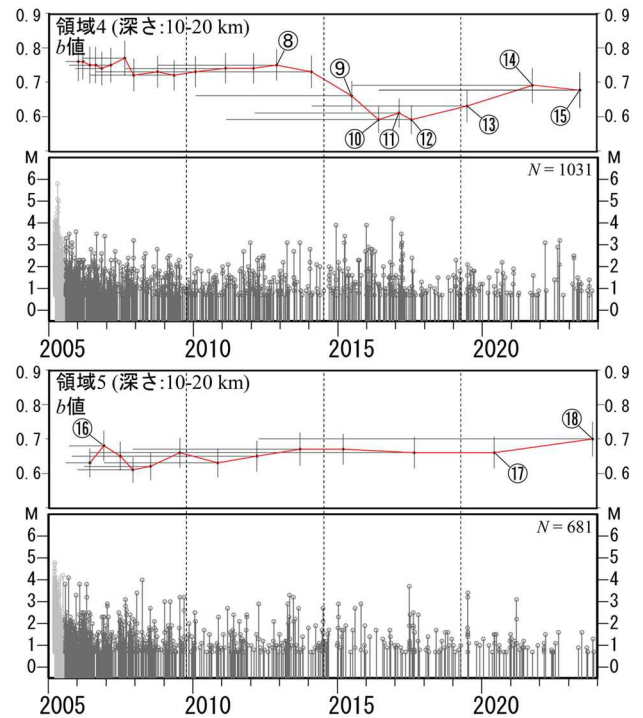


図 6 領域 4,5 の b 値の時間変化と地震活動経過図。

200 個の地震を確保する窓を 2005/08/01 から 40 個ずつ未来の方向にずらし (領域 4 の期間⑮のみ、期間⑭のデータセットから 20 個ずらし)、各窓のデータセットから b 値を推定した。 b 値の各点から伸びる横線は地震のデータセットの期間を、縦線は推定誤差 σ を示す。地震活動経過図においては、 b 値の推定に用いた 2005/08/01 以降の地震を濃く表示した。

表 2 期間⑧~⑮の b 値と M_c 、地震数 N 、標準誤差 σ

	期間	b 値	M_c	N	σ	ΔAIC
⑧	2008/10/05 ~ 2012/11/23	0.75	0.7	200	0.045	—
⑨	2010/01/31 ~ 2015/07/01	0.66	0.7	200	0.043	—
⑩	2011/02/22 ~ 2016/06/05	0.59	0.7	200	0.038	—
⑪	2012/02/20 ~ 2017/02/19	0.61	0.7	200	0.042	—
⑫	2012/11/29 ~ 2017/07/25	0.59	0.7	200	0.041	3.74 (⑧→⑫)
⑬	2014/02/13 ~ 2019/06/29	0.63	0.7	200	0.046	1.03 (⑧→⑬)
⑭	2015/07/13 ~ 2021/10/05	0.69	0.7	200	0.051	-1.30 (⑧→⑭)
⑮	2016/01/07 ~ 2023/06/06	0.68	0.7	200	0.050	-1.04 (⑧→⑮)
⑮	2005/09/13 ~ 2006/11/25	0.68	0.7	200	0.043	—
⑮	2010/11/10 ~ 2020/06/12	0.66	0.7	200	0.045	-1.91 (⑮→⑮)
⑮	2012/04/12 ~ 2023/11/08	0.70	0.7	200	0.050	-1.91 (⑮→⑮)

4 まとめと今後の課題

日奈久断層帯周辺と警固断層帯北西部周辺で報告されている低 b 値領域に注目し、2023/12/31 までの地震活動に基づき、 b 値のその後の推移について調査した。日奈久断層帯日奈久区間に当たる領域 1 では、熊本地震後の活動に伴い b 値が徐々に低下しているように見えるが、この変化はまだ有意ではない。ただし、領域 1 の期間⑥の活動から得られた b 値は 0.53、領域 2 の期間⑦の b 値も 0.60 と、いずれも低い値である。警固断層帯北西部の両端に当たる領域 4, 5 では、2013/12/31 までの活動から得られた b 値が周囲より低くなっていた。領域 4 ではその後さらに有意な低下がみられたが、期間⑮の活動から推定した b 値は 0.68 とやや回復している。領域 5 の b 値に有意な時間変化はみられず、期間⑱の b 値は 0.70 となっている。

熊本地震から 8 年、福岡県西方沖の地震から 19 年が経過したが、これらの地震活動がみられた場所の付近では依然として b 値が低い領域が観測されている。特に、熊本地震の活動域に隣接する領域 1 の b 値が 0.53 と低いこと、また、将来 M 7.2 程度の大規模な地震が予想される警固断層帯南東部に隣接する領域 4 で b 値が有意に低下した時期があったことに留意し、今後の活動に伴う b 値の変化に引き続き注目したい。

最後に、本研究に係る技術的検討課題について触れておく。 b 値を算出するための時空間幅の設定に当たり、今回は先行研究(新原, 2021; 新原, 2023)に倣い、各格子点から半径 4 km の球状空間をとり、確保する地震の数を 200 個とした。(3)式のとおり、このデータセットの数が多いほど推定誤差 σ は小さくなり、 b 値の有意な変化を捉えやすくなるが、データの確保に必要な期間が長くなる。このため、注目する領域における地震活動の多寡や b 値の変化に注目する際の時間スケールに応じて最適な時空間幅は異なる。今後、 b 値の時空間分布を観察する領域を拡大するに当たり、個別に時空間幅を調整していく必要がある。

謝辞

本調査では、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、2016 年熊本地震合同観測グループのオンライン臨時観測点(河原、熊野座)、2022

年能登半島における合同地震観測グループによるオンライン臨時観測点(よしが浦温泉、飯田小学校)、米国大学間地震学研究連合(IRIS)の観測点(台北、玉峰、寧安橋、玉里、台東)及び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) と地震活動解析プログラム(横山, 1997)を使用しました。また、匿名の査読者の方には本稿を改善するために有益な助言を頂きました。記して感謝いたします。

文献

- 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, doi:10.14943/gbhu.13.99.
- 宇津徳治 (2001): 地震学, 第 3 版, 共立出版, 145-146.
- 気象庁 (2024): 地震月報(カタログ編), <https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/bulletin/index.html>, (参照 2024-09-30).
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2007): 警固(けご)断層帯の長期評価について, https://www.jishin.go.jp/main/chousa/katsudansou_pdf/108_kego.pdf, (参照 2024-03-05).
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2013): 布田川断層帯・日奈久断層帯の評価(一部改訂), https://www.jishin.go.jp/main/chousa/katsudansou_pdf/93_futagawa_hinagu_2.pdf, (参照 2024-03-05).
- 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 2, **74**, 77-86, doi:10.4294/zisin.2020-5.
- 新原俊樹 (2021): b 値の時空間分布の可視化手法, 験震時報, **85**(3), 1-8.
- 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 2, **76**, 1-6, doi:10.4294/zisin.2022-9.
- 横山博文 (1997): X ウインドウシステムを用いた地震活動解析プログラム, 験震時報, **60**, 37-51.
- Chiba, K. (2021): Stress state inferred from b value and focal mechanism distributions in the aftershock area of the 2005 West Off Fukuoka Prefecture Earthquake, Pure and Applied Geophysics, **178**, 1165-1179, doi:10.1007/s00024-021-02691-5.
- Gulia, L. and S. Wiemer (2019): Real-time discrimination of earthquake foreshocks and aftershocks, Nature, **574**, 193-200, doi:10.1038/s41586-019-1606-4.

- Gutenberg, B. and Richter, C. F. (1944): Frequency of earthquakes in California, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **34**(4), 185-188, doi:10.1785/BSSA0340040185.
- Nanjo, K. Z., Hirata, N., Obara, K., and Kasahara, K. (2012): Decade-scale decrease in b value prior to the M9-class 2011 Tohoku and 2004 Sumatra quakes, *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L20304, doi:10.1029/2012GL052997.
- Nanjo, K. Z., Izutsu, J., Orihara, Y., Furuse, N., Togo, S., Nitta, H., Okada, T., Tanaka, R., Kamogawa, M., and Nagao, T. (2016): Seismicity prior to the 2016 Kumamoto earthquakes, *Earth Planets Space*, **68**(1), 187, doi:10.1186/s40623-016-0558-2.
- Nanjo, K. Z., Izutsu, J., Orihara, Y., Kamogawa, M., and Nagao, T. (2019): Changes in seismicity pattern due to the 2016 Kumamoto earthquakes identify a highly stressed area on the Hinagu fault zone, *Geophys. Res. Lett.*, **46**, 9489-9496, doi:10.1029/2019GL083463.
- Nanjo, K. Z. (2020): Were changes in stress state responsible for the 2019 Ridgecrest, California, earthquakes?, *Nature Communications*, **11**, 3082, doi:10.1038/s41467-020-16867-5.
- Sandri, L. and Marzocchi, W. (2003): A review and new insights on the estimation of the b -value and its uncertainty, *Annals of Geophysics*, **46**(6), 1271-1282, doi:10.4401/ag-3472.
- Scholz, C. H. (1968): The frequency-magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **58**, 399-415.
- Shi, Y. and Bolt, B. A. (1982): The standard error of the magnitude-frequency b value, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **72**(5), 1677-1687, doi:10.1785/BSSA0720051677.
- Utsu, T. (1999): Representation and analysis of the earthquake size distribution: A historical review and some new approaches, *Pure Applied Geophysics*, **155**, 509-535.
- Wessel, P. and Smith, W. H. F. (1998): New, improved version of generic mapping tools released, *EOS Trans. AGU*, **79**(47), 579, doi:10.1029/98EO00426.
- Wiemer, S. and Wyss, M. (2000): Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: Examples from Alaska, the Western United States, and Japan, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **90**(4), 859-869, doi:10.1785/0119990114.

(編集担当 尾能耕一、緒方誠)