静岡県東部地震（2011年3月15日、 M_j 6.4）による 富士山周辺域の G-R 則の b 値の空間分布への影響

村 越 匠* 宮 下 智 成*+

Spatial Variations of b -value around Mount Fuji Influenced by the M_j 6.4 Eastern Shizuoka Earthquake of 15 March 2011

Takumi MURAKOSHI* and Tomonari MIYASHITA*+

[Received 9 May, 2018; Accepted 7 October, 2018]

Abstract

The M_j 6.4 Eastern Shizuoka earthquake occurred on March 15, 2011, which was 4 days after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (M_w 9.0). The hypocenter of the earthquake was approximately 6 km southwest of Mount Fuji's peak at a subsurface depth of about 15 km. There had not been an earthquake with a magnitude of 6 or higher in the region for the last 80 years, and many experts were concerned that the Eastern Shizuoka earthquake increased the probability of a Mount Fuji eruption. Estimating spatial variations of the b -value of the Gutenberg-Richter relation is important in examining time and spatial changes of volcanic and seismic activity after large earthquakes. Changes in seismic activity after the 2011 Eastern Shizuoka earthquake are evaluated using spatial variations of the b -value. Hypocentral data from July 2001 to December 2017 were obtained from the JMA catalog. Only data for earthquakes with focal depths of 25 km or less were selected for the investigation. As a result, the b -values for earthquakes around Mount Fuji were significantly smaller during the period after the 2011 Eastern Shizuoka earthquake than during the period from July 2001 through February 2011, and continued to gradually recover after the Eastern Shizuoka earthquake. Furthermore, in the source region of the northeastern part of Mount Fuji, the b -value increases from the southwest toward the northeast, and the spatial variations of the b -values may coincide with the density distribution of volcanic fluid.

Key words : b -value, GR law, Mount Fuji, 2011 Eastern Shizuoka Earthquake, 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

キーワード : b 値, GR 則, 富士山, 2011 年静岡県東部地震, 2011 年東北地方太平洋沖地震

I. はじめに

2011 年 3 月 15 日 22 時 31 分頃に富士山山頂
から南西に約 6 km の深さ 15 km 付近において

M_j 6.4 の 2011 年静岡県東部地震が発生した (図 1
星印)。この地震では静岡県富士宮市で最大震度
6 強が観測された。富士山周辺での M 6 以上の
地震は 1931 年 9 月 16 日の M_j 6.3 の地震以降な

* 防衛大学校地球海洋学科

+ 現所属 : 航空自衛隊防府北基地

* Department of Earth and Ocean Sciences, National Defense Academy, Kanagawa, 239-8686, Japan

+ Present address: JASDF Hofu-kita Air Base, Yamaguchi, 747-8567, Japan

かったため、2011 年静岡県東部地震は約 80 年ぶりの $M 6$ 以上の地震であった。また、2011 年静岡県東部地震は 2011 年東北地方太平洋沖地震 (2011 年 3 月 11 日, $M 9.0$) の 4 日後に起きており、その影響により誘発されて発生した可能性があると考えられている (例えば、田村・宮澤, 2017)。

富士山周辺の地震活動については、2011 年静岡県東部地震以降については棚田ほか (2013)、2011 年東北地方太平洋沖地震による誘発過程については田村・宮澤 (2017) などの報告がある。2011 年静岡県東部地震より前では、富士山周辺での低周波地震 (原田ほか, 2010; 鶴川, 2011) や地下構造 (鍵山, 2011; 中道, 2011; Nakamichi *et al.*, 2007) について調べられている。例えば、中道 (2011) では、富士山北東麓の深さ 11 km から 16 km の低周波地震の存在と地震波速度構造の低速度領域との関連について考察している。また、2011 年東北地方太平洋沖地震による富士山の地下への影響については、Fujita *et al.* (2013, 2014) は最大主応力分布を用いて解析している。

地震活動の特徴を表す指標として b 値と呼ばれるパラメータがある。経験則として地震の規模とその頻度の関係は式 (1) で表される。

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

ここで M は地震のマグニチュード、 $N(M)$ はマグニチュード M 以上の地震の総数、 a と b は係数である。式 (1) はグーテンベルク・リヒター則 (以下、G-R 則)、式 (1) の係数 b は G-R 則の b 値 (以下、 b 値) と呼ばれている。 b 値は 1 に近い値をとることが多いが (宇津ほか, 2001)、地下構造の不均質性などより地域性があり、地下の地震発生場の温度や応力状態によっても変化することが知られている。そのため、 b 値の空間分布を使った解析は、火山地域のマグマだまりなどの地下の不均質性や地震活動の地域性とその時間変化などについて調べるために多く用いられている。例えば、荒川ほか (2001) では非火山性の地域であるが丹波地域における地下の流体の存在による b 値の変化の可能性について指摘している。火

山地域における b 値を用いた解析としては、伊東沖の海底火山 (Wyss *et al.*, 1997) や三宅島・神津島・新島付近 (高山・吉田, 2002)、箱根火山 (原田ほか, 2013)、新燃岳 (Chiba and Shimizu, 2018)、エトナ山 (Murru *et al.*, 2007)、イエローストーン・カルデラ (Farrell *et al.*, 2009)、エル・イエロ島 (Roberts *et al.*, 2016)、エチオピア地溝帯 (Wilks *et al.*, 2017) など多くの報告がある。火山の活発化に伴う地震活動と b 値の変化との関係については、活動の活発化によって b 値が大きくなる傾向にあることが指摘されている (例えば、Roberts *et al.*, 2015)。また、青木 (2015) では本州内陸部について 2011 年東北地方太平洋沖地震の前後での b 値の時間的な変動について調べ、東北地方を中心に変化が明瞭な地域があったことを指摘している。富士山周辺域については、原田ほか (2010) が 2001 年から 2009 年までの期間の b 値の経年変化を解析し、富士山直下の低周波地震活動の活発化に伴い 2006 年末以降で b 値が小さくなったことを報告している。しかし、富士山周辺域における 2011 年静岡県東部地震の前後の影響については調べられていない。

そこで、本研究では気象庁一元化震源データを用いた b 値の解析により、2011 年静岡県東部地震が発生したことによる富士山周辺域の地下での b 値の空間分布への影響について解析を試みた。その結果について報告する。

II. 観測データ・解析手法

本研究では、 b 値の解析に 2001 年 7 月から 2017 年 12 月までの期間の気象庁一元化震源データを用いた。解析対象とした地震には低周波地震も含めている。図 1 は富士山周辺域として b 値の空間分布を解析する領域 (北緯 35.25 度から 35.5 度、東経 138.65 度から 138.8 度、深さ 0 km から 25 km) と、この期間の地震活動を表している。図 1a, b, c はそれぞれ震央分布図と震源分布図の東西断面図と南北断面図である。マグニチュードを丸の大きさで、震源の深さを色で表現している。星は 2011 年静岡県東部地震の震源である。図 1d は図 1c の南北断面における地震の

図 1 富士山周辺域の地震の (a) 震央分布図, (b) 震源分布図の東西断面図, (c) 南北断面図, (d) 南北断面の時空間変化, (e) M-T ダイアグラム. 三角形は富士山山頂の位置を示す.

Fig. 1 Seismic activity around Mount Fuji. (a) Epicentral map. (b) Cross section of hypocenters in the east-west direction. (c) Cross section of hypocenters in the north-south direction. (d) Space-time distribution of earthquakes. (e) Magnitude-Time diagram of earthquakes. Triangle shows summit of Mt. Fuji.

時間変化, 図 1e は図 1a の領域全体における地震の時間変化を表している。b 値の空間分布の解析領域 (図 1a, b, c) は, Murru *et al.* (2007) の手法を参考にして, 緯度方向 0.005 度, 経度方向 0.005 度, 深さ方向 1 km のグリッドに分割した。

図 2 にこの期間の日別の地震発生数と地震の積算個数を示す。図 2a は 2001 年 7 月から 2017 年 12 月までの全体の解析期間で, 図 2b は 2011 年静岡県東部地震を含む 1 年間分を拡大した図

である。縦棒は日別の地震発生数で, 赤線は地震の積算個数としている。b 値の空間的な変化に加え時間的な変化も解析するため, 図 2 の T1 から T6 の区間のように全期間を 6 つに分割した。T1 は 2011 年静岡県東部地震より前の区間, T2 から T5 は 2011 年静岡県東部地震直後の地震発生数が大きく変化する期間, T6 は地震発生数がほぼ一定となってきている期間としている。各期間の年月日および地震発生数は表 1 に示している。これらの区間は, 図 2 の地震の積算個数 (赤線)

図 2 日別の地震発生数と地震の積算個数。(a) 期間：2001 年 7 月 1 日から 2017 年 12 月 31 日，(b) 期間：2011 年 1 月 1 日から 2011 年 12 月 31 日。

Fig. 2 Daily number and cumulative number of earthquakes. (a) July 1, 2001 through December 31, 2017. (b) January 1, 2011 through December 31, 2011.

の傾きで示される地震発生レートが一定とみなせる範囲ごとに分けることを基本している。ただし，T2 から T5 の期間については，地震発生レートの変化が急激なために区間ごとの期間が短くなり地震の数も少なくなってしまう。b 値の解析にはある程度の地震の数が必要となるため，T2 から T5 の期間については地震の積算個数の傾きだけではなく，区間ごとの図 1a の範囲の地震の総数（少なくとも 300 個以上）も考慮して期間を決めた。そのため，T2 から T5 の期間の解析領域全体の地震の総数は，それぞれ 368 個，305 個，347 個，389 個とした（表 1）。

b 値の推定には地震活動の解析ツール MapSeis (Eberhard, 2014) を利用した。b 値の推定の前

表 1 解析する期間の区分と地震の数。

Table 1 Specified time and number of earthquakes in each period.

No.	Period	Number of EQ
T1	2001/07/01-2011/03/14	1146
T2	2011/03/15-2011/03/16	368
T3	2011/03/17-2011/03/26	305
T4	2011/03/27-2011/04/30	347
T5	2011/05/01-2011/12/31	389
T6	2012/01/01-2017/12/31	1594

処理として，分割した期間とグリッドごとに近傍の地震を 100 個利用して地震が漏れなく検出できる下限のマグニチュード M_c を推定した。 M_c を用いると式(1)の G-R 則は

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

と表すことができる。各グリッドでの M_c は Wiemer and Wyss (2000) の手法で推定した。この方法では、マグニチュードの頻度分布が G-R 則となることを利用し、マグニチュード別の地震数の積算グラフが直線からずれる程度 (M_c の適合度 R) によって M_c を推定する (太田ほか, 2002)。 M_c を大きくすると各グリッドのマグニチュード別の頻度分布と G-R 則の直線との適合度は高くなるが、 M_c 以上となる地震の個数が少なくなりすぎる場合がある。また、 M_c をどのようににしても適合度 R が大きくならない場合や推定ができない場合は、そのグリッドでの地震の頻度分布が G-R 則となっていないことを表している。本研究では、Murru *et al.* (2007) を参考に M_c の適合度 R を 90% として、各グリッドでの地震の頻度分布が G-R 則となるような M_c を推定した。その際、 M_c が推定できない場合と、マグニチュードが M_c 以上の地震の個数が 50 個未満となるグリッドは b 値の推定の対象外とした。最後に、分割した期間とグリッドごとに M_c 以上となる地震だけを用いて、宇津 (1965) の最尤法により b 値を算出した。

III. 結果および考察

2001 年 7 月から 2017 年 12 月までの期間について T1 から T6 の 6 区間に分け (図 2, 表 1), グリッドごとの b 値を計算した。求めた b 値を使って深さごとの断面図と測線ごとの鉛直断面図を作成した。

図 3 と図 4 に 2011 年静岡県東部地震以前の期間 T1 と以降の期間 T6 の b 値の深さ別の空間分布図を示す。解析は深さ 0 km から 25 km まで 1 km 刻みで行ったが、グリッドごとの地震の個数が少ないために b 値の推定がまったくできない深さもあるので、 b 値の推定ができた深さ 10 km から 18 km について 1 km ごとに表示している。図 3 と図 4 のすべての b 値の空間分布図において、 b 値のカラーバーは共通 (b 値 0.4 から 2.6) としている。図 3 と図 4 の各図において色がつ

いていない箇所は b 値が推定できていないグリッドである。また、図 3 と図 4 の各図の小さい点は各深さで起きた地震の位置を表している。図 3 と図 4 とともに a から i と深くなるにつれて b 値が大きくなり、各深さにおいては南西から北東方向に b 値が大きくなる傾向となった。図 3 と図 4 において、各図の a から e の b 値が推定できた範囲での b 値を平均すると、それぞれ約 1.8 と約 1.5 となった。図 4a から f の南西側については、2011 年静岡県東部地震とその余震域となっているために地震の数が多く b 値が求められている点が期間 T1 の図 3 と大きく異なっている。その領域の b 値については、同じ深さで見ると b 値が北東側の領域の b 値より全体的に小さくなる傾向となっている。例えば、深さ 14 km の図 4e では南西側の領域では b 値は 0.9 から 1.2 程度に対して、北東側では 1.0 から 2.1 程度となっている。

2011 年静岡県東部地震の前後での b 値の変化を見るために、深さ 12 km と深さ 15 km における期間 T1 から T6 での b 値の空間分布図を図 5 および図 6 に示す。カラーバーと図中の点については図 3 と同様にしている。図 6c については全グリッドで b 値が推定できなかったため、すべて白色となっている。2011 年静岡県東部地震の直後では本震および余震域において b 値が 0.4 から 0.7 程度と低いが、時間の経過とともに少しずつ大きくなる傾向となったことが、図 5 と図 6 の期間 T1 から T6 での変化からわかった。期間 T1 の図 5a で b 値が推定されている領域が図 5b から e においては白色となっているが、この領域の地震の数が 2011 年静岡県東部地震の余震域での地震発生数に対して少なかったために b 値が推定できなかった。期間 T1 と T6 を比べると、2011 年静岡県東部地震以前は b 値が推定できた領域全体の b 値の平均は約 1.8 前後なのに対して、2012 年以降では北東側の領域では約 1.5 程度、南西側では 1.2 程度と相対的に小さい値となっていた。深さ 10 km から 18 km における他の深さの b 値の空間分布の時間変化についても図 5, 図 6 と同様の特徴となった。

b 値の鉛直断面図を図 7 に示す。図 7 の a と

図 3 b 値の深さ別の空間分布図 (期間 T1). (a) から (i) は、それぞれ深さ 10 km から 18 km の水平断面を示す.

Fig. 3 Horizontal cross sections of b-value in the period T1 at depths of 10 km to 18 km are shown in (a) to (i), respectively.

図 4 b 値の深さ別の空間分布図 (期間 T6). (a) から (i) は, それぞれ深さ 10 km から 18 km の水平断面を示す.

Fig. 4 Horizontal cross sections of b-value in the period T6 at depths of 10 km to 18 km are shown in (a) to (i), respectively.

図 5 深さ 12 km での b 値の空間分布図の期間 T1 から T6 の比較。(a) から (f) は、それぞれ期間 T1 から T6 を示す。

Fig. 5 Horizontal cross sections of b-value at a depth of 12 km in the period T1 to T6 are shown in (a) to (f), respectively.

b, c と d, e と f は、それぞれ期間 T1 と期間 T6 での図 1a の点線 A-A' 測線 (北緯 35.385 度)、B-B' 測線 (東経 138.715 度) および C-C' 測線 (東経 138.75 度) における東西方向の鉛直断面の b 値の空間分布図である。カラーバーは図 3 と同様になっている。図 7 を見ると、A-A' 測線 (図 7a, b) と C-C' 測線 (図 7e, f) の直下においては深さ 10 km から 20 km まで地震活動があり b 値が推定できているが、B-B' 測線 (図 7c, d)

については地震活動の深さの領域が異なり、b 値が推定できている深さは 7 km から 17 km となっている。図 7a と図 7e を見ると、b 値が推定できている領域の上端と下端で高くなる傾向が見られた。この領域は富士山の北東側の図 1a の A-A' と C-C' の交点付近を中心とした南北約 4 km、東西約 3 km の範囲の深さ 10 km から 20 km 付近までの地震群の震源域である。そのため、図 1a の A-A' と C-C' 測線の上下端で見える特徴は、

図 6 深さ 15 km での b 値の空間分布図の期間 T1 から T6 の比較. (a) から (f) は、それぞれ期間 T1 から T6 を示す.

Fig. 6 Horizontal cross sections of b -value at a depth of 15 km in the period T1 to T6 are shown in (a) to (f), respectively.

これらの測線を含む富士山の北東側の震源域において、上下端で b 値が高くなっている可能性を示唆する。また、2011 年静岡県東部地震の前後において b 値が小さくなる傾向となる特徴は、深さ別の空間分布図（図 4，図 5）と同様に図 7 の鉛直断面図からも捉えることができる。

2011 年静岡県東部地震の震源域である富士山の南西側では、2011 年静岡県東部地震以前にはほとんど地震活動がなかったため b 値の推定がな

く地震前後での比較はできないが、地震直後から 2017 年末までの時間変化を見ると b 値が 0.4 から 0.7 程度の非常に小さな値から徐々に 1.0 前後の通常の状態に戻ってきていることがわかった。これは青木（2015）での 2011 年東北地方太平洋沖地震の前後での奥羽山脈中央部や日光などの火山地域での b 値の減少と似た特徴となっている。ただし、変化の原因についてはまだ情報が少なく今後の課題となる。

図 7 図 1a の A-A' 測線、B-B' 測線、C-C' 測線の b 値の鉛直断面の空間分布図。(a) A-A' 測線の期間 T1。(b) A-A' 測線の期間 T6。(c) B-B' 測線の期間 T1。(d) B-B' 測線の期間 T6。(e) C-C' 測線の期間 T1。(f) C-C' 測線の期間 T6。

Fig. 7 Vertical cross sections of b-value along lines A-A', B-B', and C-C' in Fig. 1a. (a) line A-A' in the period T1. (b) line A-A' in the period T6. (c) line B-B' in the period T1. (d) line B-B' in the period T6. (e) line C-C' in the period T1. (f) line C-C' in the period T6.

2011 年静岡県東部地震の前から地震活動があった富士山の北東側については、2011 年静岡県東部地震の前後において、b 値が推定できた範囲の形状や広さについてはほとんど変化がなかった(図 3、図 4)。2011 年静岡県東部地震の前後の期間 T1 と T6 の b 値を比較すると、どの深さ

においても期間 T6 の b 値は期間 T1 と比べて 0.3 程度小さくなる傾向となった(図 5a と f, 図 6a と f, 図 7a と b, 図 7e と f)。この領域の期間 T2 から T5 の各グリッドでの b 値は推定できていないが、富士山の南西側の期間 T1 から T6 での変化や領域全体での平均的な b 値の変化を考慮する

と、2011 年静岡県東部地震の直後に大きく下がり徐々に地震前の b 値に回復していく過程にあると推測できる (図 5, 図 6)。富士山の北東側の震源域内での b 値の空間パターンについては、2011 年静岡県東部地震の前後での共通の特徴としてこの領域内で南西から北東方向に b 値が大きくなる空間パターンがあることがわかった。この領域は中道 (2011) で地震波速度構造の低速度領域の存在が指摘されている領域と重なっており、領域内において南西から北東方向に b 値が大きくなる空間パターンがこの領域にある火山性流体の密度分布などの状態に対応している可能性が考えられる。

Mc の推定に用いる地震の個数は、Roberts *et al.* (2015) が先行研究による 13 個の火山の 34 事例について調べたところ、10 個から 300 個とばらつきがあった。Roberts *et al.* (2015) では、エル・イエロ島とエトナ山での地震の個数と Mc および b 値の誤差の関係についても解析し、火山における b 値の時空間変化の解析の場合、各グリッドでの Mc の推定には 200 個以上の地震を用いるのが適していると考えられている。本研究で各グリッドでの Mc の推定に用いた地震の数は、期間が短い T2 から T5 の解析領域全体での地震の数 (表 1) と Mc および b 値が推定できるグリッドの数を考慮して、T1 から T6 のすべての期間において 100 個とした。ただし、期間 T1 と T6 については地震の数が十分にあるので、T2 から T5 とは条件を変更して Roberts *et al.* (2015) のように 200 個の地震を用いることで誤差の小さい Mc および b 値の推定が可能と考えられる。

IV. 結 論

2011 年 3 月 15 日の静岡県東部地震 (M_j 6.4) が発生したことによる富士山周辺域の地震活動への影響を調べるために、 b 値の空間分布とその変化について解析した。その結果、2011 年静岡県東部地震の直後で b 値が大きく下がり、徐々にもとの b 値の値に戻ってきている傾向にあることがわかった。富士山の北東側の震源域についても 2011 年静岡県東部地震の前後における変化は

少なかったが、2011 年静岡県東部地震の前後での共通の特徴としてこの領域内で南西から北東方向に b 値が大きくなる空間パターンがあり、火山性流体の密度分布などの状態に対応している可能性が示唆された。今後は低周波地震だけに注目した解析や、震源の再決定による精度の高い震源データを使った解析が課題となる。

謝 辞

震源情報は気象庁一元化震源データを使用しました。 b 値の解析には MapSeis (Eberhard, 2014) を利用しました。一部の図の作成には GMT (Wessel and Smith, 1998) を使用しました。麻生尚文氏と匿名の査読者、編集委員の本多 了氏には有益なコメントおよび改善点をご指摘いただきました。記して感謝致します。

文 献

- 青木治三 (2015): b 値: モデルと観測の比較. 東濃地震科学研究所報告, **34**, 89-96. [Aoki, H. (2015): b -value: Comparison of model with observation. *Report of Tono Research Institute of Earthquake Science*, **34**, 89-96. (in Japanese)*]
- 荒川浩樹・平松良浩・片尾 浩 (2001): 丹波地域における b 値の空間分布. 京都大学防災研究所年報 B, **44**, 263-271. [Arakawa, H., Hiramatsu, Y. and Katao, H. (2001): Spatial distribution of b -value in the Tamba region. *Disaster Prevention Research Institute Annuals B*, **44**, 263-271. (in Japanese with English abstract)]
- Chiba, K. and Shimizu, H. (2018): Spatial and temporal distributions of b -value in and around Shinmoe-dake, Kirishima volcano, Japan. *Earth, Planets and Space*, **70**, 122, doi:10.1186/s40623-018-0892-7.
- Eberhard, D.a.J. (2014): *Multiscale Seismicity Analysis and Forecasting. Examples from the Western Pacific and Iceland*. PhD Thesis, ETH Zurich, doi: 10.3929/ethz-a-010443403.
- Farrell, J., Husen, S. and Smith, R.B. (2009): Earthquake swarm and b -value characterization of the Yellowstone volcano-tectonic system. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **188**, 260-276, doi:10.1016/j.jvolgeores.2009.08.008.
- Fujita, E., Kozono, T., Ueda, H., Kohno, Y., Yoshioka, S., Toda, N., Kikuchi, A. and Ida, Y. (2013): Stress field change around the Mount Fuji volcano magma system caused by the Tohoku megathrust earthquake, Japan. *Bulletin of Volcanology*, **75**, 679, doi: 10.1007/s00445-012-0679-9.
- Fujita, E., Kozono, T. and Toda, N. (2014): Quasi-static stress change around Mount Fuji region due to Tohoku mega-thrust earthquake. *Journal of Di-*

saster Research, **9**, 365-372.

- 原田昌武・行竹洋平・吉田明夫・細野耕司・小林昭夫 (2010): 富士山及び箱根火山の膨張歪と低周波地震活動. 火山, **55**, 193-199. [Harada, M., Hosono, K., Kobayashi, A., Yukutake, Y. and Yoshida, A. (2010): Extensional strains around Mt. Fuji and Hakone Volcano and low-frequency earthquakes. *Bulletin of the Volcanological Society of Japan*, **55**, 193-199. (in Japanese with English abstract)]
- 原田昌武・行竹洋平・宮岡一樹・本多 亮・板寺一洋・道家涼介・里村幹夫・吉田明夫 (2013): 箱根火山における群発地震活動の分類. 神奈川県温泉地学研究所報告, **45**, 1-8. [Harada, M., Yukutake, Y., Miyaoaka, K., Honda, R., Itadera, K., Doke, R., Satomura, M. and Yoshida, A. (2013): The classification of earthquake swarm activities in Hakone volcano. *Bulletin of the Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture*, **45**, 1-8. (in Japanese with English abstract)]
- 鍵山恒臣 (2011): 富士山の地下構造. 荒牧重雄・藤井敏嗣・中田節也・宮地直道編: 富士火山. 日本火山学会, 137-150. [Kagiya, T. (2011): Structure of Fuji Volcano. in *Fuji Volcano* edited by Aramaki, S., Fujii, T., Nakada, S. and Miyaji, N., Volcanological Society of Japan, 137-150. (in Japanese with English abstract)]
- Murru, M., Console, R., Falcone, G., Montuori, C. and Sgroi, T. (2007): Spatial mapping of the b value at Mount Etna, Italy, using earthquake data recorded from 1999 to 2005. *Journal of Geophysical Research*, **112**, B12303, doi:10.1029/2006JB004791.
- 中道治久 (2011): 富士山と南部フォッサマグナの地震活動と速度構造. 荒牧重雄・藤井敏嗣・中田節也・宮地直道編: 富士火山. 日本火山学会, 151-159. [Nakamichi, H. (2011): Seismicity and velocity structure of Mount Fuji and the South Fossa Magma, Japan. in *Fuji Volcano* edited by Aramaki, S., Fujii, T., Nakada, S. and Miyaji, N., Volcanological Society of Japan, 151-159. (in Japanese with English abstract)]
- Nakamichi, H., Watanabe, H. and Ohminato, T. (2007): Three-dimensional velocity structures of Mount Fuji and the South Fossa Magna, central Japan. *Journal of Geophysical Research*, **112**, B03310, doi: 10.1029/2005JB004161.
- 太田健治・藤原義寿・前田憲二 (2002): 気象庁の地震検知能力の時空間的变化. 震害時報, **65**, 111-122. [Ohta, K., Fujihara, Y. and Maeda, K. (2002): Spatiotemporal variation of minimum magnitude of completeness in The JMA catalog. *Quarterly Journal of Seismology*, **65**, 111-122. (in Japanese with English abstract)]
- Roberts, N.S., Bell, A.F. and Main, I.G. (2015): Are volcanic seismic b -values high, and if so when?. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **308**, 127-141, doi:10.1016/j.jvolgeores.2015.10.021.
- Roberts, N.S., Bell, A.F. and Main, I.G. (2016): Mode switching in volcanic seismicity: El Hierro 2011-2013. *Geophysical Research Letters*, **43**, 4288-4296, doi:10.1002/2016GL068809.
- 高山博之・吉田明夫 (2002): 2000 年三宅島・神津島・新島付近の群発地震活動における b 値の空間分布と時間変化. 地震 2, **55**, 295-300. [Takayama, H. and Yoshida, A. (2002): Spatio-temporal variation of the b -value for the 2000 swarm activity near Miyake, Kozu and Nii-jima Islands. *Zisin (Journal of the Seismological Society of Japan)*, **55**, 295-300. (in Japanese with English abstract)]
- 田村理納・宮澤理稔 (2017): 2011 年 3 月 15 日静岡県東部地震 (M_j 6.4) の遅れ誘発過程に関する研究. 地震 2, **69**, 99-111. [Tamura, R. and Miyazawa, M. (2017): Delayed triggering process for the M_j 6.4 Eastern Shizuoka Earthquake of 15 March 2011. *Zisin (Journal of the Seismological Society of Japan)*, **69**, 99-111. (in Japanese with English abstract)]
- 棚田俊收・河野裕希・藤田英輔・上田英樹・小園誠史・長井雅史・鶴川元雄 (2013): 富士山の地震活動・地殻変動. 火山噴火予知連絡会会報, **110**, 50-55. [Tanada, T., Kohno, Y., Fujita, E., Ueda, H., Kozono, T., Nagai, M. and Ukawa, M. (2013): Seismic activity and crustal deformation at Fuji Volcano. *Report of the Coordinating Committee for Prediction of Volcanic Eruptions*, **110**, 50-55. (in Japanese)]
- 鶴川元雄 (2011): 富士山の低周波地震. 荒牧重雄・藤井敏嗣・中田節也・宮地直道編: 富士火山. 日本火山学会, 161-172. [Ukawa, M. (2011): Low frequency earthquakes at Mount Fuji. in *Fuji Volcano* edited by Aramaki, S., Fujii, T., Nakada, S. and Miyaji, N., Volcanological Society of Japan, 161-172. (in Japanese with English abstract)]
- 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. [Utsu, T. (1965): A method for determining the value of b in a formula $\log n = a - bM$ showing the magnitude-frequency relation for earthquakes. *Geophysical Bulletin of the Hokkaido University*, **13**, 99-103. (in Japanese with English abstract)]
- 宇津徳治・嶋 悦三・吉井敏尅・山科健一郎編 (2001): 地震の事典 (第 2 版). 朝倉書店. [Utsu, T., Shima, E., Yoshii, T. and Yamashina, K. ed. (2001): *Encyclopedia of Earthquakes (2nd Edition)*. Asakura Shoten. (in Japanese)]
- Wessel, P. and Smith, W.H.F. (1998): New, improved version of the Generic Mapping Tools released. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, **79**, 579.
- Wiemer, S. and 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**, 859-869.
- Wilks, M., Kendall, J.M., Nowacki, A., Biggs, J., Wookey, J., Birhanu, Y., Ayele, A. and Bedada, T.

(2017): Seismicity associated with magmatism, faulting and hydrothermal circulation at Aluto Volcano, Main Ethiopian Rift. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **340**, 52–67, doi:10.1016/j.jvolgeores.2017.04.003.

Wyss, M., Shimazaki K. and Wiemer, S. (1997): Mapping active magma chambers by b values beneath the off-Ito volcano, Japan. *Journal of Geophysical Research*, **102**, 20413–20422, doi:10.1029/97JB01074.
* Title etc. translated by T.M.