

地震災害予測のための b 値の空間分布マッピングと 時系列変化

井筒 潤¹⁾・長尾 年恭²⁾*

b -Value Mapping and Time Series Analysis for Earthquake Prediction

Jun Izutsu¹⁾ and Toshiyasu Nagao²⁾*

Abstract

Including the case of 2011 Tohoku Earthquake, there are many reports that b -value near the focal region decreased before earthquakes. To predict and prevent earthquake disaster, we built b -value monitoring system which calculate b -value every day and provide b -value map around Japan by kml file. We also studied about time-series fluctuation of b -value near the focal region of 2014 Nagano Kamishiro Fault Earthquake. The decrease of b -value was only shown in the case of using earthquakes just only near the fault.

緒 言

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震(東日本大震災)による甚大な被害は広範にわたり、エネルギー問題をはじめとした社会の持続可能性まで影響を及ぼした。中部大学および東海大学が位置する東海地方・中部地方は、百年単位で繰り返し発生している南海トラフの地震およびそれに伴う

津波の被害を受けることが強く懸念されている。津波の到来時間の余裕がほとんど無いことから被害想定も、最悪の場合で33万人と東日本大震災の10倍以上の規模が想定されている。地震後適切な避難などにより被害は8割近く軽減できるとされているが、逆説的に言うと、2割の人はすぐ避難行動をとっても逃げられない状況に追い込まれている。一人でも多くの人命を守るには地震の予測情報は防

1) 中部大学国際GISセンター 〒487-8501 愛知県春日井市松本町1200

International Digital Earth Applied Science Research Center, Chubu University,
1200 Matsumoto-cho, Kasugai, Aichi 487-8501, JAPAN

2) 東海大学海洋研究所地震予知研究センター 〒424-8610 静岡県静岡市清水区折戸3-20-1

Earthquake Prediction Research Center, Institute of Ocean Research Development, Tokai University, 3-20-1 Orido, Shimizu-ku, Shizuoka 424-8610, JAPAN

* Corresponding author : Toshiyasu NAGAO (nagao@scc.u-tokai.ac.jp)

(2016年1月4日受付/2016年2月3日受理)

災・減災という観点から欠くことのできない重大な情報である。

現在、地震の予測は非常に困難であると考えられているが、日本国内では様々な地球物理的観測が世界でも類を見ないほど稠密に行われており、2011年東北地方太平洋沖地震でも前兆である可能性がある様々な現象がその観測網でとらえられていた (Nagao et al., 2014). これらの現象を中部大学のデジタルアースサーバ上で常時モニタリングするサービスを開発し、南海トラフを含む日本列島全域での地下の様子を知り、地震発生の危険性を把握し、その危険性を地域で共有することが本研究の目的である。本報告では地震活動の指標として日本全国の b 値を毎日自動的に計算し、その時空間変動をモニタリングするシステムの作成を行った。また、中部大学国際 GIS センター発足後に発生した中で最も大きな内陸地震である長野県神城断層地震 (2014年11月22日22時8分, M6.7) について b 値の時系列変化を調査し、地震災害予測のためにはどのような解析パラメータを用いるべきかを議論した。

マグニチュードと地震の発生度数はマグニチュードとともに指数関数的に減少しており、その経験式はグーテンベルグ・リヒターの式と呼ばれている (Gutenberg and Richter, 1944).

$$\log n(M) = a - bM \quad (1)$$

この式は一定の地域、一定の期間で発生したマグニチュード M から $M+dM$ までの地震の度数を $n(M)dM$ とするとき、 $n(M)$ と M の関係を示す式である。また、ここでマグニチュード M 以上の地震の総数を $N(M)$ とすると、

$$N(M) = \int_M^{\infty} n(M) dM \quad (2)$$

であるので、(1) 式は

$$\log N(M) = A - bM \quad (3)$$

と示すことができる。ここで、 $A = a - \log(b \ln 10)$ である。Fig. 1 は 2014年1月1日から12月31日までに日本周辺で発生した地震活動に関して、マグニチュードを 0.1 刻みで分類し、その度数分布を片対数グラフで示したものである。データは気象庁一元化震源データを使用している。図中の白丸は $n(M)$ であり、黒丸は $N(M)$ である。片対数グラフ

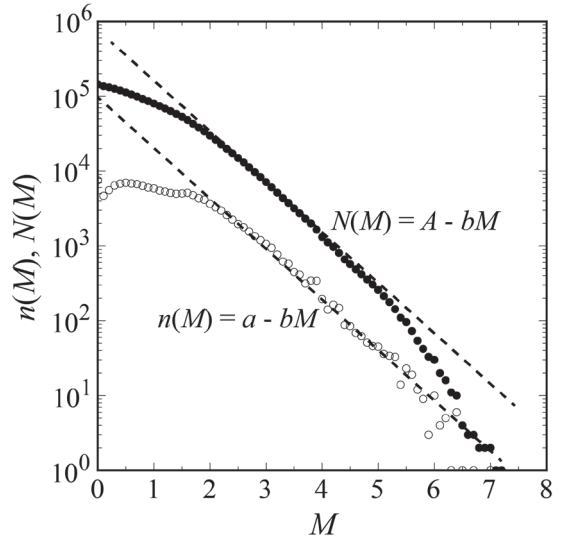


Fig. 1 Gutenberg-Richter law and b -value.

で示すことにより、グラフの各点は直線状に並んでいることが確認できる。図中の点線で示したグラフの傾きが b 値である。

グーテンベルグ・リヒター式は世界中の大地震から局所的な小地震や微小地震に至るまでほぼ成り立っていると考えられている。 b 値は通常 1 前後の値をとることが多く、これはマグニチュードが 1 大きくなると地震の発生数はおよそ 10 分の 1 になることを意味する。 b 値は地震集団の性質を示す重要なパラメータであり、その大きさは一般に中央海嶺で大きく、島弧・トランスフォーム断層などは普通、大陸内部の地震は小さいなどの傾向が見られ、火山性地震などでは b 値が大きくなることが知られている (宇津, 2001)。また、地震の前には b 値が小さくなることが指摘されており、室内岩石破壊実験でも破壊核形成過程で誘起される AE 活動の b 値が臨界時刻に近づくにつれ低下することが示されている (大中・松浦, 2002)。Fig. 2 は 1945 年に発生した三河地震 (M6.8) における前震と余震のそれぞれで b 値を求めたものである (Utsu, 1974)。余震の b 値が 0.75 に対して、前震の b 値は 0.35 と有意に小さいといえる。また、Fig. 3 は東日本大震災を引き起こした 2011 年東北地方太平洋沖地震の前に震源領域において b 値が徐々に低下している様子を示している (Nanjo et al., 2012)。Fig. 3A は b 値の空間分布と 2011 年東北地方太平洋沖地震の震源

(星印) およびコンターで本震のすべり分布を示す。 b 値は 2006 年以降 (Fig. 3B 内の A で示す期間) の地震活動を使用して求めている。 b 値の低下している領域と、本震時に大きく変動した領域に相関が見られる。Fig. 3B は、Fig. 3A の震源周辺の四角で囲った領域で発生した地震活動だけを用いた b 値の時

間変動を示しており、 b 値が時間とともに低下したことが明らかである。Fig. 3B 中に挿入された図は、時系列の赤点と緑点におけるマグニチュード別頻度分布がそれぞれゲーテンベルグ・リヒターの式に良く従うことを示している。他にも 2004 年スマトラ地震においても同様な b 値の低下が報告されている (Nanjo et al., 2012)。

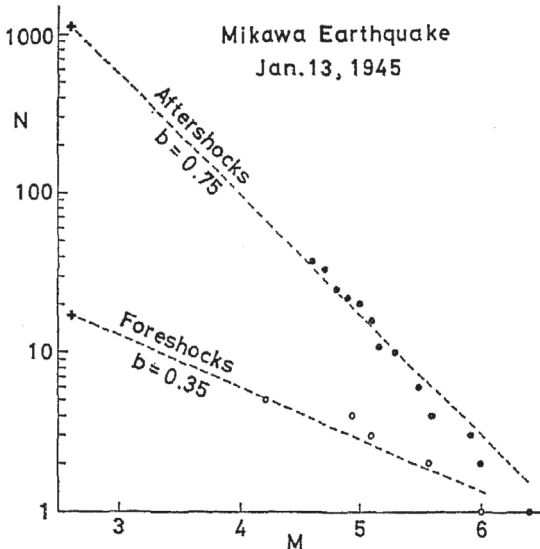


Fig. 2 b -values before and after Mikawa Earthquake (Utsu, 1974).

方法と使用したデータ

今回は地震活動データとして、気象庁一元化震源カタログを使用した。気象庁一元化震源カタログは東京大学地震研究所の FTP サイト (ftp.eriu.tokyo.ac.jp) にミラーリングされており、これを一日一回ダウンロードし全国の b 値の計算を行っている。解析結果は KML フォーマットに変換され、Google Earth 上で閲覧できるようにした。また、あわせて震源カタログも CSV ファイルおよび KML ファイルに変換し、各種 GIS ソフト等で相互利用が容易に行えるように整備を行った。 b 値の計算には宇津 (1964) で提唱された最尤法を用いた。ある領域、ある期間において、マグニチュード M_c 以上の地震はもれなく観測されているとすると、マグニチュード M の平均値を \bar{M} とすると、 b 値の最尤推

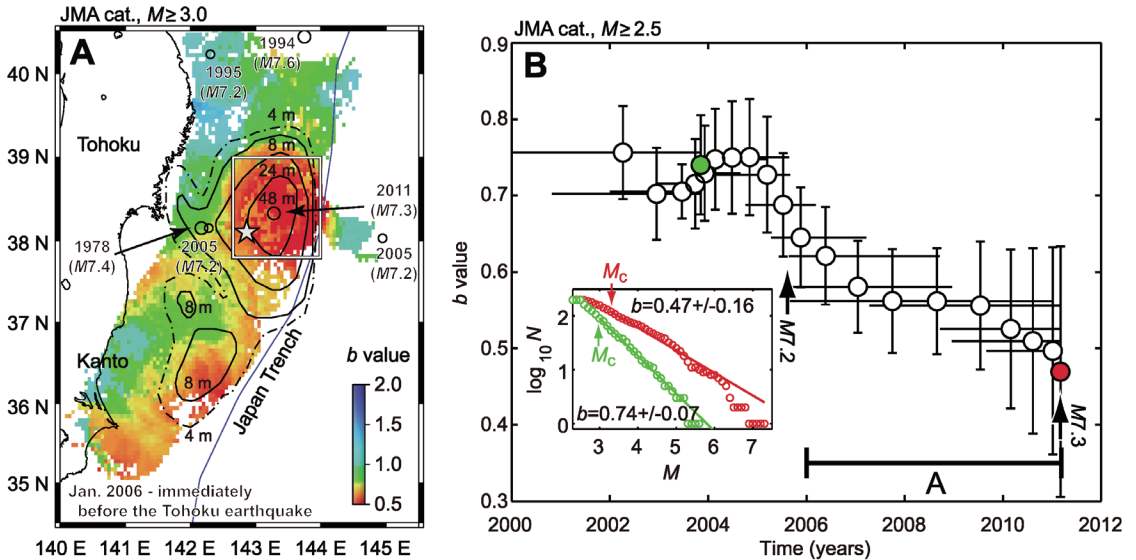


Fig. 3 Spatio-temporal variation of b -value (Nanjo et al., 2012). (A) distribution of b -value (color) and co-seismic slip (contours). (B) temporal change of b -value at focal region.

定値は

$$b = \frac{\log e}{\overline{M} - M_c} \quad (4)$$

となる。緯度経度 0.04 度ごとに格子点を考え、各格子点からそれぞれ半径 150 km 以内、深さ 100 km 以浅の領域で 1 年以内に発生した地震を対象として式 (4) を用いて計算し、全国の b 値の空間分布を算出した。今回の計算では M_c は全国一律で M2.5 として計算している。気象庁一元化震源カタログのマグニチュードは 0.1 刻みで記録されており、M2.5 は正確には M2.45 から M2.55 を意味しているので式 (4) の M_c には 2.45 を代入している。

結果と考察

長野県神城断層地震の前日である 2014 年 11 月 21 日時点での b 値の空間分布を Google Earth 上で表現した解析結果を Fig. 4 に示す。図のカラーバーは b 値の値を示している。

b 値の空間分布に着目すると内陸部などの b 値は 1 前後に近く、海域は b 値が低く計算されている。

これは現在の観測網が海域にあまり地震計が多くないため、マグニチュードの小さな地震の検知数が少なく、比較的大きな地震のみが気象庁一元化震源カタログに記載されるため、Fig. 1 で示す傾き (b 値) が小さくなる傾向がある。今回は式 (4) における M_c を全国すべての領域において M2.45 として計算を行っているが、このような海域では M2.5 以上の地震をすべて漏れなく観測できてはいないと考えられる。震源カタログに漏れなく記録されるマグニチュードの下限 M_c はコンプリートネスマグニチュードと呼ばれ、式 (4) における重要なパラメータであり、領域ごとに異なる M_c を適用する必要があると考えられる。また、式 (4) で求められる b 値は、地震活動分布がグーテンベルグ・リヒターの式に従わないような場合でもマグニチュードが異なる地震が 2 つ以上あれば計算でき、値が求まってしまう。現在は 1 年間分の震源データを用いているが、地震数の少ない領域では各格子点からより広い領域、より長い期間の地震を計算対象にする必要があると考えられる。

また、Fig. 4 は 2014 年 11 月 22 日 22 時 8 分に発

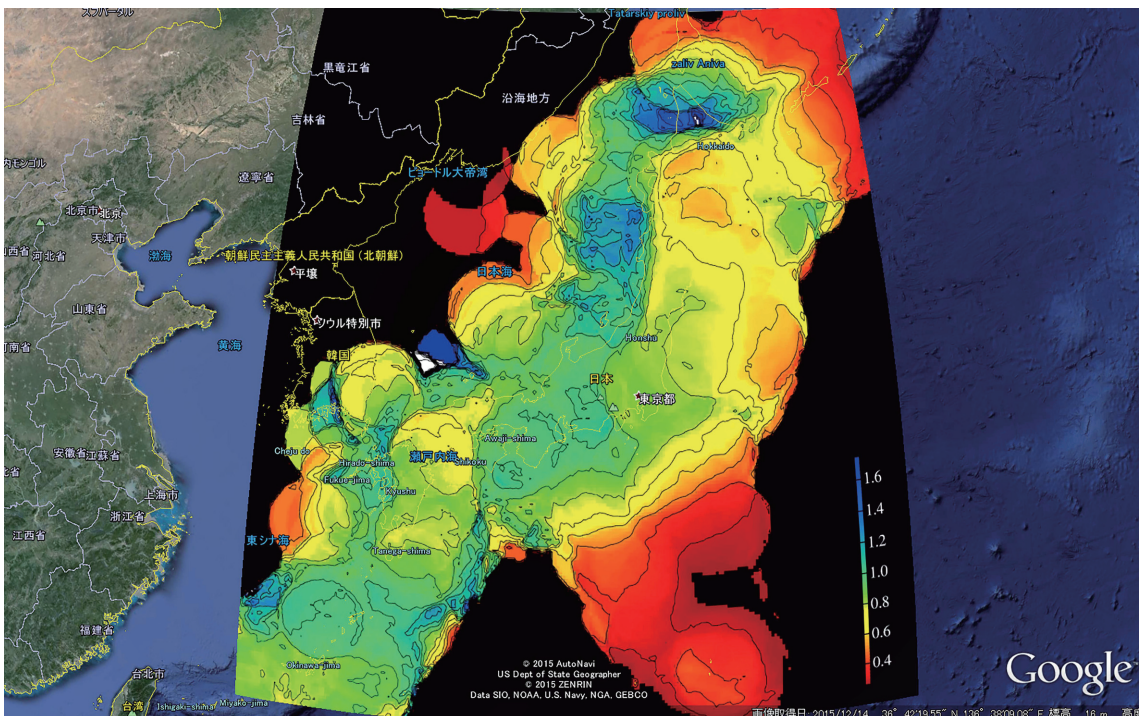


Fig. 4 Distribution of b -value on 2014/11/21.

生じた長野県神城断層地震（北緯 36.6928 度，東経 137.8910 度，深さ 4.5 km, M_j 6.7）の直前として，2013 年 11 月 21 日から 2014 年 11 月 21 日の 1 年間の地震を使用して b 値を計算した解析結果であるが，震源周辺域には b 値の低下は特に見られない。そこで 1 か月ずつ解析期間をずらしながら 1 年分の地震（Fig. 5 に示している震央から 150 km の範囲の地震を使用）を用いて， b 値を M_c ごとに計算し， b 値の時間的な変化を Fig. 6 に示す。左端のプロット点は 2005 年 1 月 21 日から 2006 年 1 月 21 日の地震を用いて計算した 2006 年 1 月 21 日での b 値を示しており，各月 21 日段階での b 値を示している。 M_c を 2.0 や 1.5 として b 値を計算した場合には，中越沖地震や東北地方太平洋沖地震などの影響による地震の多寡により 1 年間のオフセット的な変動が見

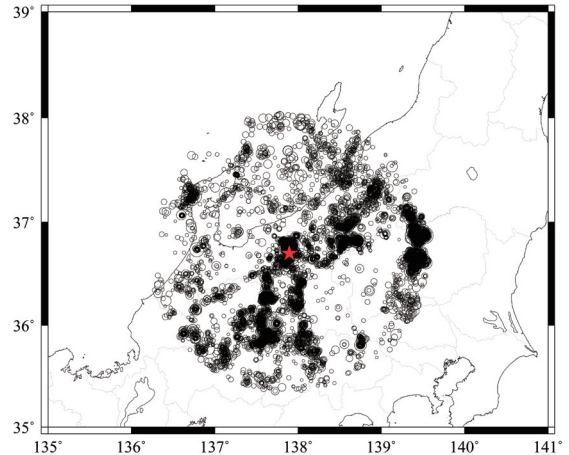


Fig. 5 Epicenter of 2014 Nagano Earthquake (occurred on 2014/11/22) and distribution of earthquakes occurred within 150 km.

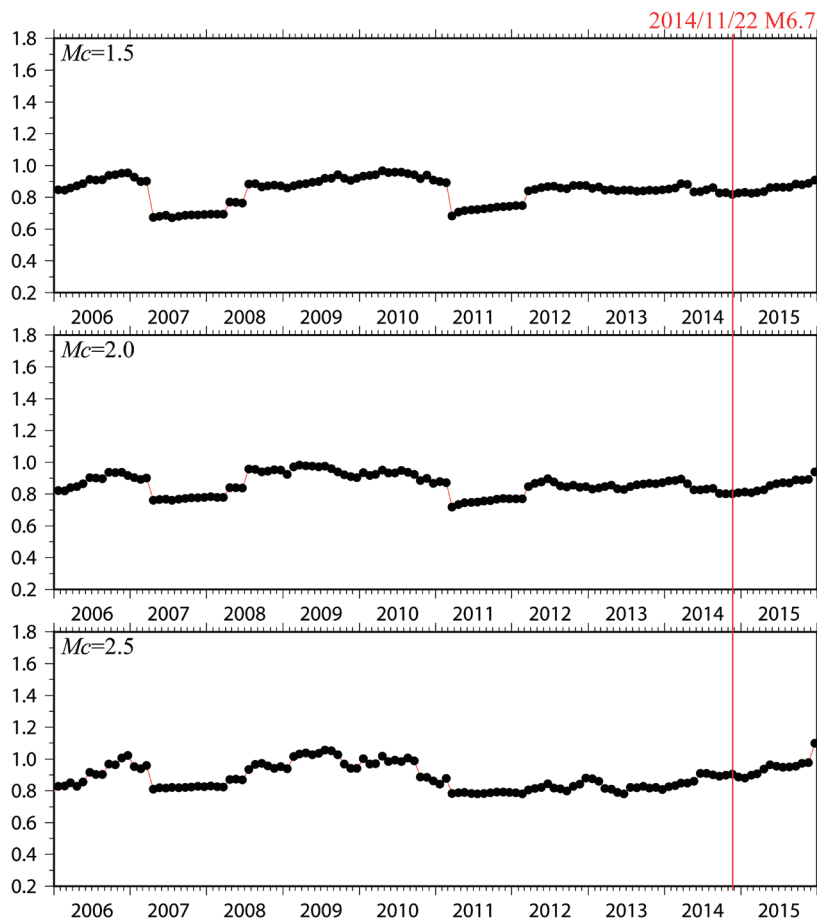


Fig. 6 Temporal fluctuations of b -value at epicenter of the 2014 Nagano Earthquake. Red vertical line shows the occurrence time.

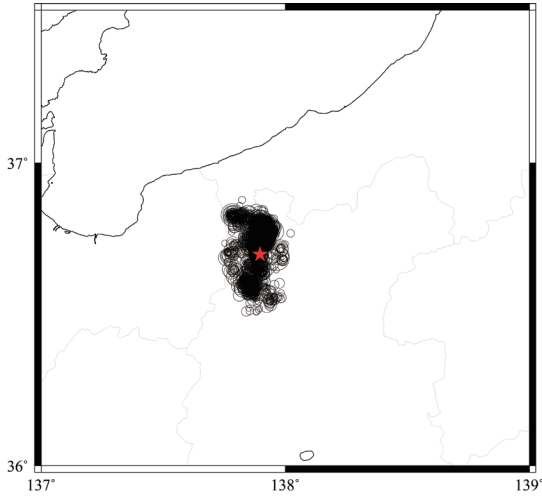


Fig. 7 Epicenter of 2014 Nagano Earthquake and distribution of earthquakes occurred near Kamishiro fault.

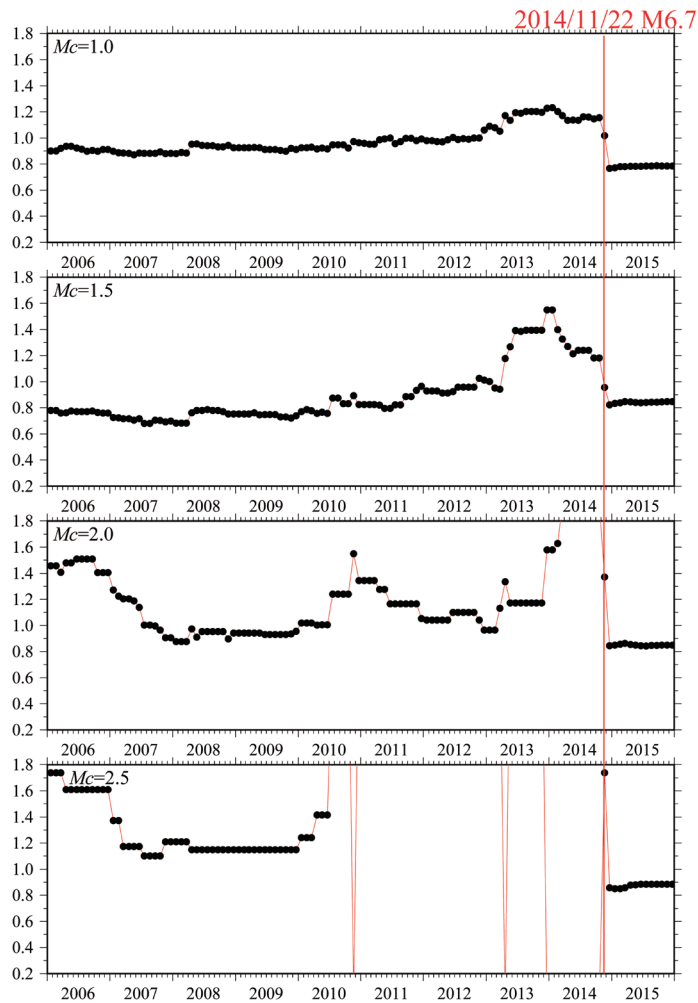


Fig. 8 Temporal fluctuations of b -value at epicenter of the 2014 Nagano Earthquake. Red vertical line shows the occurrence time.

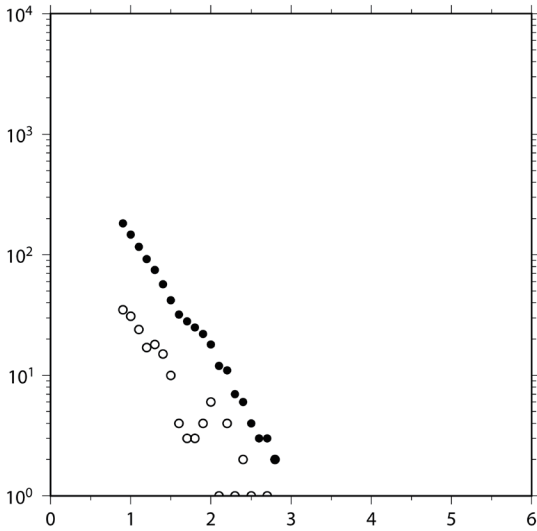


Fig. 9 Histogram of earthquakes shown in Fig.7.

られる。

そこで、震源断層である神城断層の走向に沿う形で地震を抜き出して (Fig. 7 に抜き出した地震の範囲を示す) 3 年分の地震を使用して各月ごとに b 値を計算したものを Fig. 8 に示す。Fig. 7 で抜き出した地震を Fig. 1 で示したような地震のマグニチュード別の頻度分布を Fig. 9 に示す。Fig. 9 よりコンプリートネスマグニチュード M_c は 1.0 程度までであることが確認できる。地震数が少なくなるので M_c を大きくすると計算された b 値は安定しなくなっている。 M_c が 1.0 及び 1.5 の場合では約 20 ヶ月前より b 値が上昇し、地震直前に下がり地震発生後はほとんど変動が見られなくなっている。今回の結果の一つの解釈は、将来の震源域で、より小さな地震が数多く発生するようになっていた事を意味するものと考えられる。M6 クラスの地震では、広い領域全体で b 値が変化するというより、将来活動する断層系に極めて近い範囲で、地震活動の変化が生じている可能性も高く、今後は単純なデータの切り出し (たとえば円形や矩形) ではなく、断層系に沿って地震データを抜き出すというような形での b 値の監視を行う必要があるのかもしれない。

繰り返しになるが、内陸部であれば M_c はかなり低くでき、その解析領域を狭くすることができる。 b 値の影響の出る範囲は地震によって異なるこ

とが考えられるため、神城断層以外での活断層でも同様の傾向が見られる可能性があり、今後の解析対象とする予定である。

まとめ

本研究では地震活動の可視化および災害の予測に役立つデジタルアースのコンテンツとして震源分布および b 値の時空間分布を自動的に計算するシステムを構築した。また、長野県神城断層地震に際して b 値の時間変化を調査した結果、解析領域や解析期間、コンプリートネスマグニチュードの取り方によって解析結果が大きく変化しており、他の活断層でも同様の解析を行う必要がある。現在は日本全国の b 値分布の計算パラメータをすべて統一して解析を行っているので、データをもとにパラメータの最適化を行い、今後は地震活動だけでなく国土地理院などが提供する地殻変動データ等も合わせて時空間分布をモニタリングできるようシステムの開発を続けていく。

謝辞

本研究では気象庁一元化震源カタログを使用させていただいた。関係者の皆様に御礼を申し上げます。

また本研究は中部大学「問題複合体を対象とするデジタルアース共同利用・共同研究」IDEAS 201406、東海大学海洋研究所・個別研究プロジェクト「駿河湾周辺・東海地方における地震・火山・津波災害軽減のための総合的研究」および文部科学省による「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」の支援を受け実施されました。

引用文献

- Gutenberg, B., and C. F. Richter, Frequency of earthquakes in California, Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 34, pp. 185-188, 1944.
- Nagao, T., Y. Orihara, and M. Kamogawa, Precursory Phenomena Possibly Related to the 2011 M9.0 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, Journal of Disaster Research, Vol.9 No.3, pp. 303-310, 2014.
- Nanjo, K. Z., N. Hirata, K. Obara, and K. Kasahara, Decade-scale decrease in b value prior to the M9-class 2011 Tohoku and 2004 Sumatra quakes, Geophysical Research Letters, VOL. 39, L20304, doi: 10.1029/2012GL052997, 2012.

大中康譽・松浦充宏, 『地震発生の物理学』, 東京大学出版会, 2002.

宇津徳治, 6. 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, pp. 99-103, 1965.

Utsu, T., Space-Time Pattern of Large Earthquakes occurring Off the Pacific Coast of the Japanese Islands”, *Journal of Physics of the Earth*, Vol. 22, No. 3, pp. 325-342, 1974.

宇津徳治, 『地震学 第3版』, 共立出版, 2001.