

首都圏の地震カタログの統合へ向けた品質評価

楠城一嘉^{1)*}・鶴岡 弘¹⁾・笠原敬司¹⁾・酒井慎一¹⁾・平田 直¹⁾・小原一成²⁾

¹⁾ 東京大学地震研究所・²⁾ 独立行政法人防災科学技術研究所

Toward Unifying Available Earthquake Catalogs for the Tokyo Metropolitan Area: Quality Characterization

Kazuyoshi Z. Nanjo^{1)*}, Hiroshi Tsuruoka¹⁾, Keiji Kasahara¹⁾, Shin'ichi Sakai¹⁾, Naoshi Hirata¹⁾ and Kazushige Obara²⁾

¹⁾ Earthquake Research Institute, University of Tokyo, ²⁾ National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

Abstract

Under the “Special Project for Earthquake Disaster Mitigation in the Tokyo Metropolitan Area”, an investigation of the detailed structure of plates converging beneath the Tokyo Metropolitan area is underway. This investigation will improve information needed for seismic hazards from inter-plate mega-thrust earthquakes and intra-slab earthquakes for the Kanto region. Unification of earthquake datasets, if available, would contribute to creating a database that is devoted to in-depth research on the regional plate structure. Currently available datasets for the Kanto region are three regional and nationwide catalogs: (a) NIED catalog: earthquake catalog based on the Kanto-Tokai Observational Network maintained by National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention; (b) ERI catalog: catalog including micro-earthquakes detected mainly by the seismic network maintained by Earthquake Research Institute, University of Tokyo with special focus on the Kanto area; (c) JMA catalog: catalog including nationwide seismicity monitored by Japan Meteorological Agency. Before starting to unify the catalogs it is necessary to get a better understanding of the statistical properties of earthquakes for each catalog. Here, we report the results of statistical analyses to characterize data quality for individual catalogs. Our approach is based on the frequency-magnitude distribution of earthquakes, daily variations of earthquake frequency, and completeness magnitude study. Reported statistical characteristics will allow us to move toward unifying earthquake catalogs.

Key words: Earthquake, seismicity, statistics, Tokyo metropolitan area, data quality

1. はじめに

“首都直下地震防災・減災特別プロジェクト”では、首都圏で起きるマグニチュード (M) 7クラスの地震の場所、規模、発生頻度、揺れ方等の地震像を解明することが目的である(平田・他, 2009)。そのサブプロジェクトの一つ“首都圏周辺でのプレート構造調査、震源断層モデル等の構築等”では、地震計を用いて観測された自然地震によりプレート構造を調査することが研究課題として挙げられている。本調査に資する中感度地震観測網の

整備が進行中であり、稠密観測を目指している(笠原・他, 2009; 酒井・平田, 2009)。

地震活動の特徴等を調査する場合には過去にさかのぼった長期間の観測データが必須であり、稠密観測網整備以前の地震観測情報を精査・整理して、当構造調査に使用可能かどうかを検討する必要がある。そのような地震のデータ源として以下が存在する: (a) 防災科学技術研究所の「関東・東海地域の過去の地震活動データカタログ(岡田・他, 2000)」(NIEDカタログと呼ぶ); (b)

* e-mail: nanjo@eri.u-tokyo.ac.jp (〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1; Fax: +81-(0) 3-5689-7234; Tel: +81-(0) 3-5841-0667)

東京大学地震研究所が関東の微小地震観測を目的として展開した観測網に基づくカタログ「地震研究所関東カタログ (1971/06-1980/09) (Matsu'ura *et al.*, 1988a, b)」(ERI カタログと呼ぶ); (c) 日本全土をカバーし、気象庁により決定されている気象庁震源カタログ (JMA カタログと呼ぶ)。なお、(a, b) のカタログの更新は現在なされていない。しかし、もしこれらを統合・活用出来るならば、上記構造調査に資するデータベース構築に貢献する可能性がある。そこで本稿では、地震統計に基づき、これらのカタログに収められたデータの品質を評価した予察的研究の成果報告をする。今後はさらに詳細な品質評価を行い、精査・統合・整理して、首都圏周辺のプレート構造調査に資するデータベース構築に貢献したいと考えている。

2. 手 法

本研究では、地震の統計的性質を利用する3つの手法を用いて品質評価を行った。当評価のために、地震活動解析ソフトウェア“ZMAP” (Wiemer, 2001) を用いた。

最も初歩的な評価手法は、規模別に地震の頻度をプロットすることである。これにより、大きな地震ほど数が少なく、小さい地震は多いという一般的な地震の統計的性質を調べることが出来る。さらに、規模別頻度分布が Gutenberg-Richter (GR) 則と調和的であるかも調べることが出来る。この GR 則とは次のように表される: $\log N = A - bm$ 。ここで、 N は $M \geq m$ の地震の頻度、 A は定数、 b は一般に1に近い値である。様々な研究領域で成り立つ GR 則は、かなり普遍的な法則であることが示唆されている (例えば、宇津, 1999)。本稿では、どのカタログにおいても、大きいマグニチュードの範囲で GR 則が成り立つことを確認する。

第二の手法は、地震の頻度を一時間ごとにプロットして、その頻度分布を利用する方法である。自然地震は昼夜依存せずに発生するはずである。つまり、ある時空間内に発生する地震の発生頻度は24時間常時一定という仮説からの逸脱は、人為的原因に由来することが示唆される。本稿で議論される結果は、土地開発や人間活動に伴う日中の雑微動の増加や、採石・採鉱・土木工事等のための発破による人工地震と関連づけられる。従って、地震頻度の日変化を調べる手法は、人為的原因という観点からのデータセットの均質性を評価する方法とみなされる。

三つ目は M が小さい地震ほど観測網で検出されづらく、ある閾値以上の M を持つ地震は漏れなく観測されるという仮定に基づく。その閾値となる M は下限マグ

ニチュード (Completeness Magnitude: M_c) と呼ばれる。これは、データセットの完全性という観点から、カタログの品質評価の指標と考えられる。しばしば用いられる手法は、GR 則にもとづくものである。作業仮定は、もしデータが GR 則で近似されるならば、地震は漏れなく観測されたことを示すというものである。言い換えるならば、データが GR 則に対して下方へ乖離することは、観測漏れを意味するという仮定に基づく。従って、与えられた地震群の規模別頻度分布を GR 則で最良近似し、GR 則から下方乖離するデータの中で最大のマグニチュードを M_c と定義して、その値を求める。GR 則を用いて M_c を計算する手法は多数提案されてきたが (レビューは、Wiemer and Wyss (2000) を参照)、本研究では Woessner and Wiemer (2005) の手法を用いる。本研究で解析される全てのカタログについて、時空間的に M_c は大きく変動することが分かった。

3. データ

使用したデータ源は、第一章で触れた3つの地震カタログである。(a) の NIED カタログには、主に関東・東海地域とその周辺で起きた地震が収録されている。(b) の ERI カタログは首都圏とその近郊地域に特化した観測網に基づく。そのため、地震の分布の空間的広がり、他のカタログと比べてかなり小さい。(c) の JMA カタログは全国展開する地震観測網に基づく。そのため、カタログには日本全土とその周辺で起きた地震が収められている。ここで、JMA カタログに人工地震のフラグがあったイベントがあることが知られている。しかし、その個数が少ないので解析処理に人工地震も含んだ。

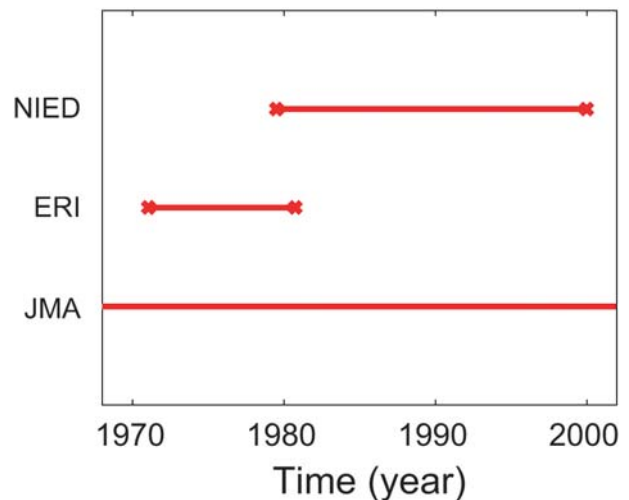


Fig. 1. Periods covered by the three catalogs. The JMA catalog includes data from 1920s to the present.

Fig. 1 はカタログがカバーする時期を示す図である。これは、カタログに収録されている最初と最後の地震を基に作成された。ただし (c) の JMA カタログは 1920 年代前半から現在までのデータを含んでいることに注意されたい。そこで、JMA カタログについては、1970 年から 1999 年に起きた地震を解析対象とした。1980 年前後が 3 つのカタログがカバーする唯一の時期であることが分かる。

研究領域の決定には、地震の分布の空間的広がりか最も小さい (b) ERI カタログを考慮する必要がある。Matsu'ura *et al.* (1988a, b) に掲載されている地震の空間分布図を参考にして、首都圏を含む $138.5\text{--}141.5\text{ E}^\circ$ 、 $34.5\text{--}37.0\text{ N}^\circ$ によって囲まれた地域を本研究領域とした。水平方向に比べて深さ方向について地震の位置決定精度はそれほど良くない。そのため、本報告では深さ方向を考慮しないことにする。

第 4.3 章と第 4.4 章の M_c の結果は、地震観測点の密度に関連すると考えられる。その密度の一指標である、研究領域内の観測点数を知ることは、事前情報として有用であろう。そこで、本研究領域で稼動する観測点の数を簡単に調べる。しかし、地震観測網は時間的に変遷する可能性があり、また個々の観測点の稼動開始時期・終了時期が明確でないことがしばしばある。そこで、3 つのカタログがカバーする 1980 年 1 月時点で稼動する観測点の数だけをここでは考える。(a-c) における観測点数はそれぞれ、14, 9, 21 である。文献は、(a) 岡田・他 (2000), (b) Matsu'ura *et al.* (1988a), (c) 地震月報 昭和 55 年 1 月 (気象庁, 1980) である。この結果から、10 程度かそれより若干多い程度の観測点が設置されている領域を本研究で使用することになる。

4. 結果と議論

4.1. 地震の規模別頻度分布

Fig. 2 は規模別頻度分布を示す。縦軸に頻度の Log を取り、横軸にはマグニチュードを取る。(a-c) はそれぞれ、NIED カタログ、ERI カタログ、JMA カタログに収録されているデータを基にしている。特徴は、全てのケースで上に凸の分布が見られることである。大きいマグニチュードの範囲では、マグニチュードが大きくなるにつれて地震数が小さくなるという性質が確認出来る。さらに、頻度と M の間に、傾きがほぼ 1 の直線性が見える。これはどのケースでも GR 則に従うことを示している。また小さいマグニチュードの範囲では、 M が小さくなるほど頻度は低くなる。これは、マグニチュードが小さい地震ほど観測網で検出されづらいことを反映していると解釈される。

もう一つの特徴は、(a) でおよそ $M=2.3$ と $M=1.3$ で頻度にピークが見られることである。4.2 章で議論するが、後者のピークは採石場等で見られる発破の影響を含むことが示唆される。

4.2. 地震頻度の日変化

Figs. 3-5 はそれぞれ、NIED カタログ、ERI カタログ、JMA カタログに収められているデータを基に作成された、地震の頻度の日変化を示している。(a-c) はそれぞれ、マグニチュード $M \geq 1, 2, 3$ の地震データを基にして作成された。Fig. 3 (a) では、正午直前ぐらいに頻度のピークが見られる。その頻度は他の時間のそれと比べて、約二倍である。さらに、およそ 15 時から 17 時にもピークが見られる。このような特徴は、採石、採鉱、土木工事等のための発破による人工地震によるものと考えられる (宇津, 1999)。これらの規模は一般に小さくなく、記録波形は自然地震のそれとかなり似ており数も多いの

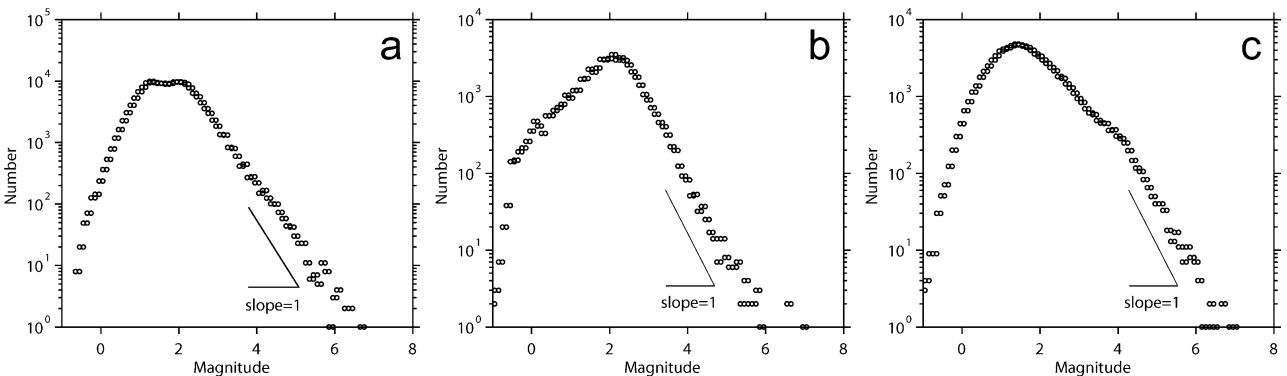


Fig. 2. Logarithmic number of earthquakes as a function of magnitude. All earthquakes that occurred in the study region ($138.5\text{--}141.5\text{ E}^\circ$, $34.5\text{--}37.0\text{ N}^\circ$) are used for (a) “NIED” catalog, (b) “ERI” catalog, and (c) “JMA” catalog. For case (c), earthquakes that occurred during the period 1970 to 1999 were used for our analysis.

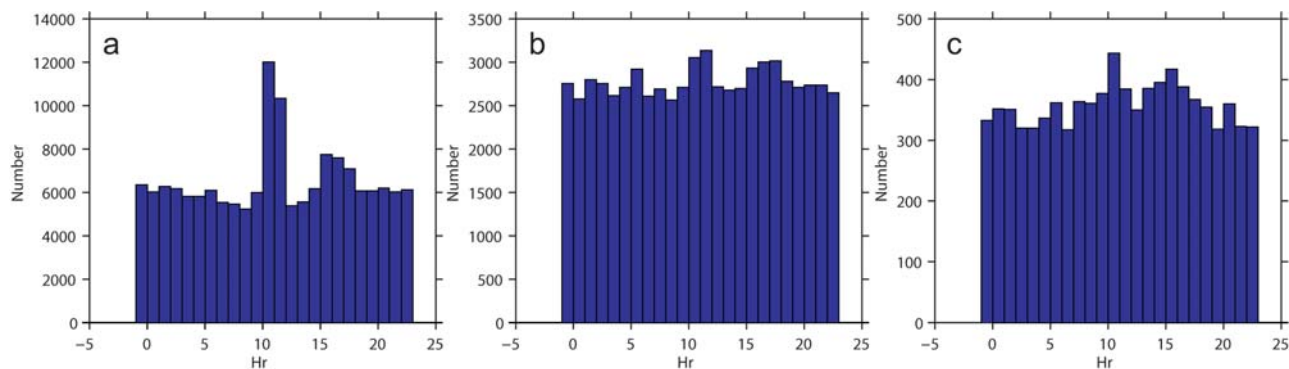


Fig. 3. Number of earthquakes as a function of hour (Hr) for event occurrence times in the “NIED” catalog. We used earthquakes that occurred in the study region ($138.5\text{--}141.5^\circ\text{E}$, $34.5\text{--}37.0^\circ\text{N}$) for several magnitude thresholds: (a) $M \geq 1$, (b) $M \geq 2$, and (c) $M \geq 3$.

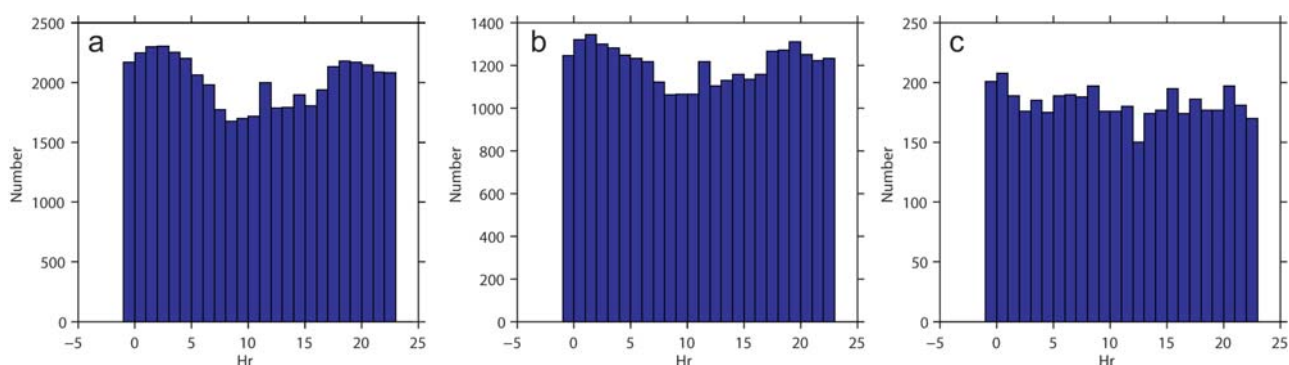


Fig. 4. The same as Fig. 3 for the “ERI” catalog.

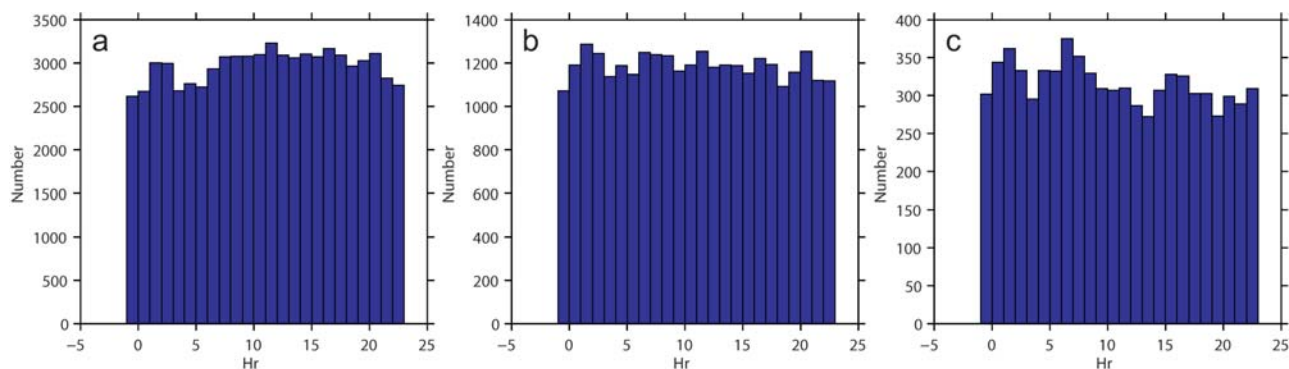


Fig. 5. The same as Fig. 3 for the “JMA” catalog.

で、識別して削除することが難しい。また、一般に発破は決まった時刻に行われる。例えば、正午前後や日暮れ前に行われることが多い。従って、これらのピークは発破による人工地震の影響を反映していると考えられる。二つのピークが見られるという本結果は、NIEDカタログにおいて人工地震の影響を調べた先行研究(岡田, 1996)と矛盾しない。一方 M の閾値が高いケース (b, c) では、それほど顕著ではない。この結果を考えると、

Fig. 2aに見られる $M=1.3$ 付近での頻度のピークは、このような発破による人工地震の影響を反映したものと考えられる。ここで Fig. 2a だけではこの影響を議論することが難しく、頻度の日変化を調べてはじめて可能となることに注意されたい。

Fig. 3a のもう一つの特徴は、夜間における地震の頻度が、正午直前と日暮れ前を除いた日中の頻度に比べて概ね高いことである。これは、地震観測点周辺の日中の

土地開発や人間活動に伴う雑微動の増加等による人為的原因で生じていることを示している(宇津, 1999). このような昼夜における頻度の違いは, M の閾値が上がるにつれて((a) から (c) に向けて) 小さくなる傾向がある.

Fig. 3 と同様の傾向が Figs. 4, 5 でも見られる. ERI カタログを用いたケース (Fig. 4) では, 夜間より日中の地震の頻度は低い傾向が見られる. 特に $M \geq 1$ (a) と $M \geq 2$ (b) ではその傾向が顕著である. JMA カタログを用いたケース (Fig. 5) では, 他 (Figs. 3, 4) と比べて, 上記のような特徴はそれほど明瞭ではない.

4.3. M_c の時間変化

Fig. 6 は M_c の時間変化である. (a-c) はそれぞれ NIED カタログ, ERI カタログ, JMA カタログを用いて得た結果である. 各々の M_c の時間変化を示すために, 研究領域内にある地震の位置を無視して, マグニチュードを持つ地震の時系列と考える. そして 4000 個の地震を用いて M_c 値を見積もるとして, 時間の窓をずらしながら M_c 解析を何度も繰り返す. この作業を時系列の始めから終わりまで行った結果が Fig. 6 である. また, ブートストラップ法を当てはめて, M_c の標準偏差 (δM_c) も求めた. ここで, ブートストラップ法による誤差評価を説明する必要がある. Woessner and Wiemer (2005) によると, 安定した δM_c 値を見積もるために, 最低でも 100 個のブートストラップサンプルが必要である. そこで本解析では, 200 個のブートストラップサンプルに基づき δM_c を見積もることにした. これにより, より信頼性の高い値が得られると期待される.

全てのケース (a-c) でデータにばらつきは見られるが, 時間と共に M_c が小さくなる傾向がある. 特に (c) では, その M_c の減少は顕著である. つまり, 1980 年以前には $M_c = 3.5 \sim 4.0$ であるが, 1990 年代では $M_c = 1.4 \sim 2.0$ である. ここで見られる M_c の減少傾向は, 地震観測網が徐々に改善されたため, 微小地震が観測されやす

くなったことを示す. この結果は, Nanjo *et al.* (2010) と調和的である. 彼らは, 1970 年から現在までの JMA カタログの地震を用いて, 日本全土の M_c の時空間分布を調査した. 関東地方の M_c は, 1970 年代では $M_c = 3.0 \sim 4.5$ であるが, 1990 年では $M_c = 0.5 \sim 2.0$ であった. 現在の観測網の基で, $M_c \leq 0.5$ の地域が日本内陸部に見られることも分かった.

サンプリングに必要な期間の長さ由来する揺らぎの影響を調べる予察的解析を行った. その解析のために, 一つのサンプルを構成する地震の数を 400 個, 1000 個, 5000 個として M_c と δM_c を見積もった. 各々のカタログを解析した結果, M_c の時間変化における一般的な傾向に, 大きな変化は見られなかった. このことから, サンプリング期間の長さ由来する揺らぎを考慮しても, 結果は安定していることが予察的解析から示された. 以上から, 本解析で 4000 個と設定したことが妥当であり, 結論を導くのに十分な解析であることを支持する.

次章では M_c の空間分布を調べる. 上記の M_c の減少を見ると (a, b) は (c) と比べて顕著ではない. そこで, 前者 (a, b) については各々のカタログで 1 つの M_c 地図を作成し, 後者 (c) については M_c 地図の時間変化を示す.

4.4. M_c の空間分布

Fig. 7 (a, b) の M_c 地図はそれぞれ, NIED カタログと ERI カタログを用いて得た結果である. 南北 0.05° 刻みの格子を切り, 格子点の各々について, 最近接 200 個の地震の規模別頻度分布を考え, M_c を見積もった. 一般的な特徴は, M_c が大きくなることである. つまり, 内陸と沿岸地域では M_c が小さく, 沿岸地域から離れると, 大きな M_c が見られる傾向がある. 陸域に展開する地震観測網下では, 比較的小さい地震まで検出されやすいことを示している. 個々のカタログに関する特徴は以下のようにまとめられる. (a) では $M_c < 0.5$ (橙, 赤) の

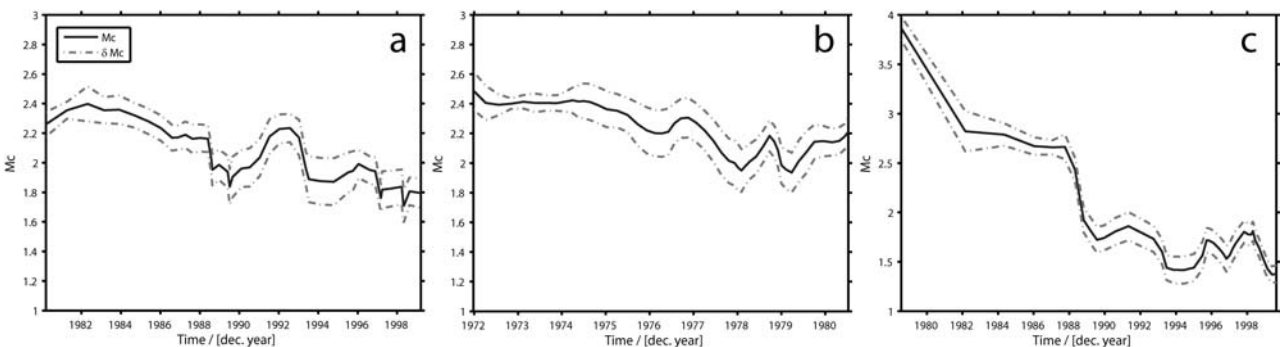


Fig. 6. Completeness magnitude M_c as a function of time for (a) “NIED” catalog, (b) “ERI” catalog, and (c) “JMA” catalog. One standard deviation (δM_c) is also included for uncertainty.

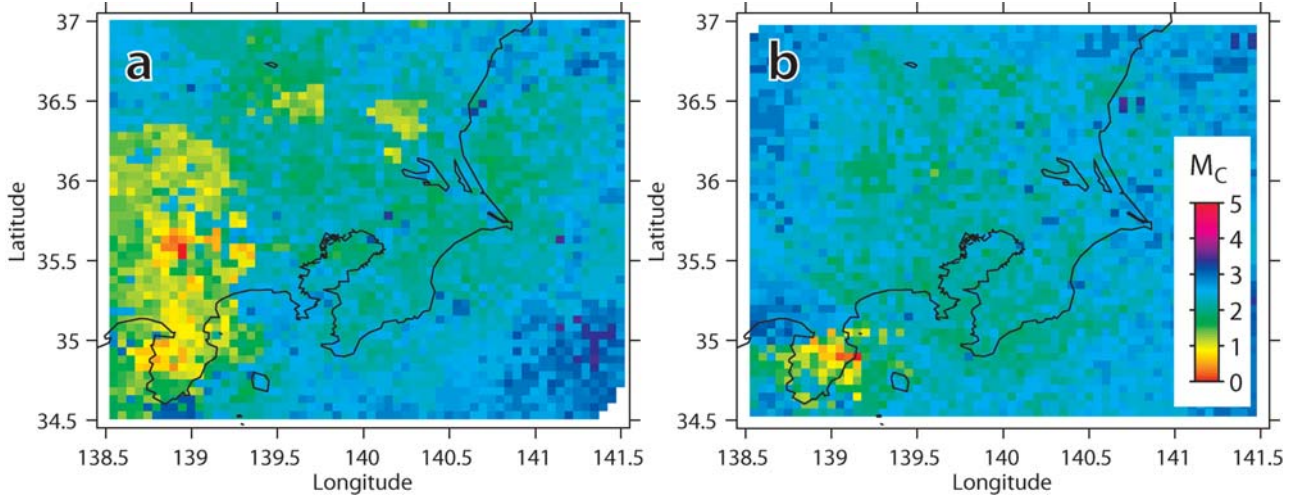


Fig. 7. Spatial variability for M_C . (a) "NIED" catalog and (b) "ERI" catalog. We apply the method of Woessner and Wiemer (2005) to earthquakes that occurred in the study region to map M_C . Our grid node spacing is 0.05° and M_C is computed for each node. Our sample comprises the 200 earthquakes nearest to each node.

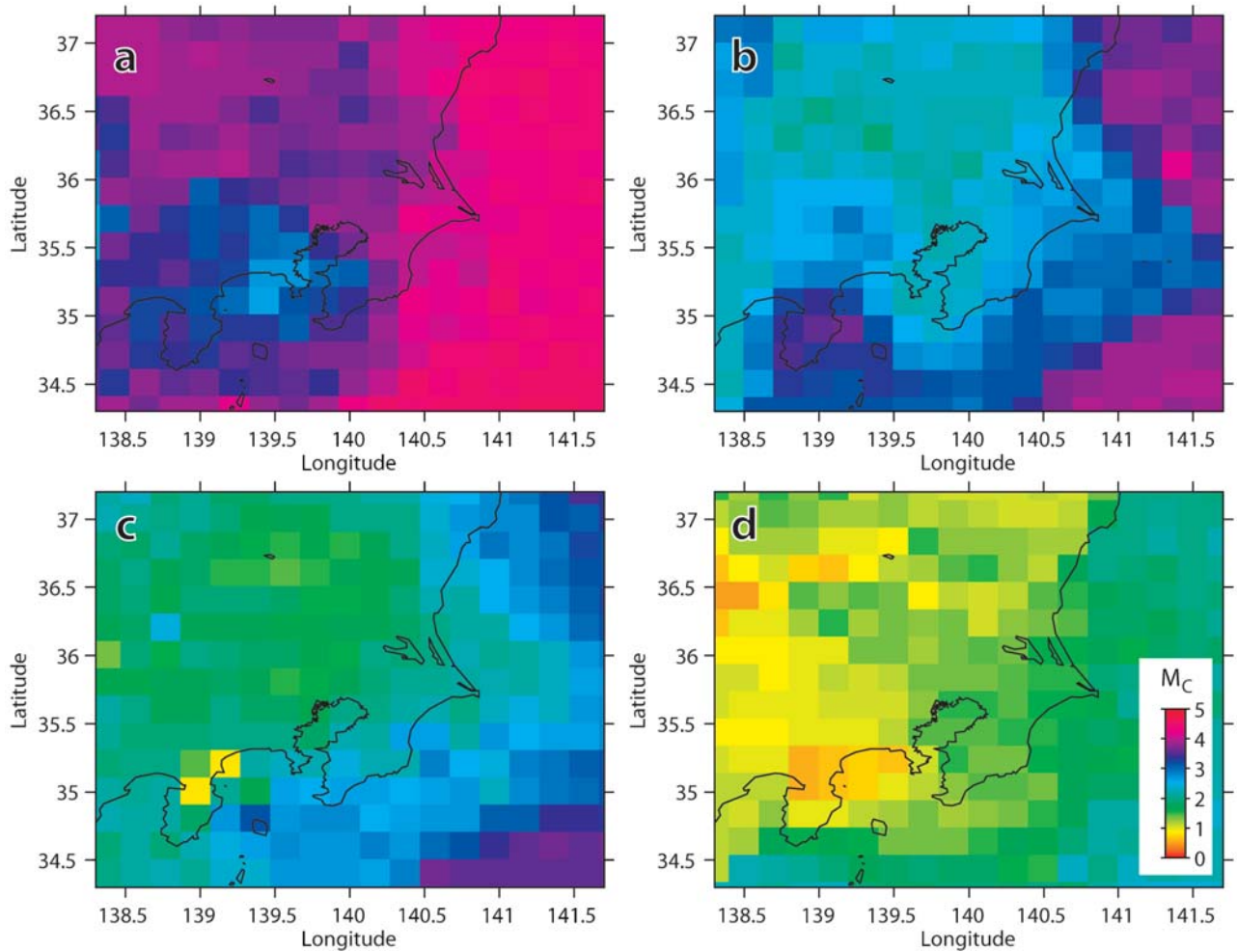


Fig. 8. Spatial variability for M_C for the "JMA" catalog. Earthquakes that occurred in (a) 1970–1979, (b) 1980–1984, (c) 1985–1989, and (d) 1999 are used to map M_C . Our grid node spacing is 0.2° . Sample size to compute M_C for each node is 200 earthquakes.

値が、 139.5° 以西で 36.5° 以南の地域で見られる。これは、関東・東海地殻活動観測網の中心が駿河湾に面する地域（静岡県付近）であるため、その中心部の一部を反映していると考えられる。海域での M_c は、高々 $M_c=3.5$ 程度である。(b)について、伊豆地域では $M_c<0.5$ （橙、赤）と見積もられている。さらに研究領域の中央地域（およそ $139.0-140.5^{\circ}$ 、 $35.0-36.5^{\circ}$ N）では $M_c\sim 2.0$ が見られるが、中央から離れるに従って M_c が大きくなる傾向がある。

Fig. 8はJMAカタログに基づく M_c 地図である。(a)は1970年代のデータを解析した結果である。また、(b-c)はそれぞれ、1980年代前半と後半のデータに基づく。1999年の一年間に起きた地震のデータを解析して得た結果を(d)に示す。南北 0.2° 刻みの格子を切り、格子点の各々について、 M_c を見積もった。その値の計算は、最近接200個の地震の規模別頻度分布に基づいている。(a)での典型値は $M_c=3.0-5.0$ である。徐々に M_c は減少し、(d)での陸域と沿岸域の典型値は $M_c=0.5-1.5$ 、沖合のそれは $M_c=1.5-2.5$ である。このような M_c の減少は、気象庁カタログの作成に使用された地震観測網整備の進展を示している。

地震数を100, 300, 500個と変化させて、同様の解析を行った。この地震数の増加は、格子点からの探索半径を大きくすることに相当する。言い換えれば、この増加は、遠い格子同士で探索される地震がより共有される可能性が高くなることを示す。全カタログについて解析した結果、地震の数を大きくするにつれて M_c の空間パターンはより滑らかになる以外は、地震数の違いによる顕著な変化は見られなかった。従って、検索半径（つまり、格子間隔）の観点から、最近接200個の地震を用いた解析は、結論を導くのに十分なものと考えられる。

5. まとめ

“首都直下地震防災・減災特別プロジェクト”のサブプロジェクトの一つ“首都圏周辺でのプレート構造調査、震源断層モデル等の構築等”の研究課題の一つは首都直下のプレート構造の調査である（平田・他, 2009）。そのためには、過去にさかのぼった長期間の地震観測データが必須であり、その観測情報を精査・整理して、当構造調査に使用可能かどうかを検討する必要がある。そこで、現存するデータ源であるNIEDカタログ、ERIカタログ、JMAカタログについて品質評価を行った。なされた評価は地震の統計的性質を利用する手法に基づく。

一つ目は、地震の規模別頻度分布を使用する手法である。これは、様々な地域で成り立つことが知られている

GR則に、カタログデータが従うかという初歩的な評価を行うものである。その結果、どのカタログにおいても、大きいマグニチュードの範囲でGR則が成り立つことを確認した。

二つ目は、地震の頻度の日変化を調べ、人為的原因という観点からデータセットの均質性を評価する手法である。自然地震は昼夜依存せずに発生するはずである。従って、もし地震発生頻度は日変化するという特徴があれば、それは、人為的原因に関係すると解釈される。解析結果から、土地開発や人間活動に伴う日中の雑微動の増加や、採石・採鉱・土木工事等のための発破による人工地震と関連づけられる日変化が全てのカタログで見られた。

三つ目は、 M が小さい地震ほど観測網で検出されづらく、ある閾値以上の M を持つ地震は漏れなく観測されるという仮定に基づく手法である。その閾値である下限マグニチュード(M_c)を用いて、データセットの完全性という観点から品質評価を行った。その結果、全てのカタログにおいて、時空間的に M_c は大きく変動することが分かった。特にJMAカタログを用いたケースでは、他のケースと比べて変動が顕著であった。このような結果は、主に地震観測網の空間的広がり依存しており、また観測網の整備・改善を反映していると解釈される。

本稿では、カタログ間の比較よりむしろ、カタログに収録されている地震の統計的性質を把握して、個々のカタログを理解することに注目した。今後は、統合データベース構築に向けたプロセスを明示的に行っていく予定である。特に、地震の震源決定方法がカタログ毎に異なる点、またマグニチュードの決定方法が時間変遷する可能性もある点を考慮して、更なる詳細な品質評価とカタログ間比較を行う予定である。本序報を基にして、精査・統合・整理を行い、最終的には首都圏周辺のプレート構造調査に資するデータベース構築を目指したい。

謝 辞

匿名の差読者からのコメントは小論を改訂するのに大変役立った。また松浦律子博士との議論を基に小論は改良された。本稿の解析では、気象庁、防災科学技術研究所、東京大学地震研究所によりコンパイルされた地震カタログを用いた。また本研究は、文部科学省受託研究「首都直下地震防災・減災特別プロジェクト」サブプロジェクト①「首都圏周辺でのプレート構造調査・震源断層モデル等の構築等」に基づいている。さらに本研究の一部は、東京大学地震研究所共同研究プログラム（特定共同研究(c) 課題番号: 2009-c-02)の援助を受けた。こ

ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 平田 直・酒井慎一・佐藤比呂志・佐竹健治・瀬戸一也,
2009, 「首都直下地震防災・減災特別プロジェクト」サブ
プロジェクト①「首都圏周辺でのプレート構造調査, 震源断
層モデル等の構築等」の概要, 地震研究所彙報, **84**, 41-56.
- 笠原敬司・酒井慎一・森田裕一・平田 直・鶴岡 弘・中川茂
樹・楠城一嘉・小原一成・棚田俊收, 2009, 首都圏地震観
測網 (MeSO-net) の展開, 地震研究所彙報, **84**, 71-88.
- 気象庁, 1980, 地震月報昭和 55 年 1 月, 気象庁.
- Matsu'ura, R., Karakama, I. and Tsumura, K., 1988a, List of
Earthquakes in the Kanto Area and its vicinity, Part 1,
Earthquake Research Institute, 578 pp.
- Matsu'ura, R., Karakama, I. and Tsumura, K., 1988b, List of
Earthquakes in the Kanto Area and its vicinity, Part 2,
Earthquake Research Institute, 562 pp.
- Nanjo, K.Z., Ishibe, T., Tsuruoka, H., Schorlemmer, D., Hirata,
N. and Ishigaki, Y., 2010 submitted, Completeness mag-
nitude and seismograph network densification in Japan,
Geophys. Res. Lett.
- 岡田義光, 1996, 関東・東海地域における人工震源の分布とそ
の時間的変遷, 防災科学技術研究所研究報告, **57**, 33-57.
- 岡田義光・松村正三・野口伸一, 2000, 関東・東海地殻活動観
測網の稼動状況—特別研究「関東・東海地域における地殻
活動に関する研究」観測成果のまとめ (その 1)—, 防災科
学技術研究所研究資料第 208 号, 1-57.
- 酒井慎一・平田 直, 2009, 首都圏地震観測網の設置計画, 地
震研究所彙報, **84**, 57-69.
- 宇津徳治, 1999, 地震活動総説, 東京大学出版会, 876 頁.
- Wiemer, S., 2001, A software package to analyze seismicity:
ZMAP, *Seism. Res. Lett.*, **72** (3), 373-382.
- Wiemer, S. and Wyss, M., 2000, Minimum magnitude of com-
pleteness in earthquake catalogs: Examples from Alaska,
the western United States, and Japan, *Bull. Seism. Soc.
Am.*, **90**, 859-869.
- Woessner, J. and Wiemer, S., 2005, Assessing the quality of
earthquake catalogues: Estimating the magnitude of
completeness and its uncertainty, *Bull. Seism. Soc. Am.*,
95 (2), 684-698.

(Received November 11, 2009)
(Accepted November 30, 2009)