

マグニチュード改訂に伴う余震パラメタ標準値の再決定

細野耕司*

New Standard Parameters of Aftershocks in Japan

Kohji HOSONO

(Received May 30, 2005 : Accepted November 21, 2005)

1. はじめに

米国地質調査所 (USGS) の Reasenberg と Jones は、大きな地震が発生したとき、その後の余震活動を改良大森公式と Gutengerg-Richter のマグニチュード別頻度分布から確率的に予測する手法を開発した (Reasenberg and Jones, 1989)。その手法に基づいて 1989 年 10 月 17 日に米国 California 州 San Francisco 近郊で発生した Loma Prieta 地震に際して、USGS は余震活動の実況とその後の推移の予測を 23 回にわたって発表した。そのような成果に鑑みて、細野・吉田(1992)は、日本における地震の場合に USGS の手法を応用することを試みた。その際に 1969 年から 1990 年までに発生した 47 個の地震の余震系列に関してそれぞれに改良大森公式のパラメタを求め、その標準値を示した。

細野・吉田(1992)が改良大森公式の 3 つのパラメタを算出するに際して、最小二乗法を用いたのに対して、松浦 (1993) は最尤法に基づき $a=-2.19$, $c=0.0356$ 日, $p=1.14$, $b=1.03$ という値を提示した。ここで、 a 値は、改良大森公式の K 値、マグニチュード別頻度分布の b 値、本震のマグニチュード M_m 、余震マグニチュードの閾値 M_{th} によって $a=\log K-b(M_m-M_{th})$ と表される。

1998 年に政府の地震調査研究推進本部の地震調査委員会は、余震の確率評価手法の報告書を取りまとめた。その報告に基づき気象庁では余震に関する情報を充実させることになった。本震発生直後ではデータ処理が追いつかず、余震のパラメタが算出できないので、上記の松浦の標準パラメタを用いて余震の発生確率を

予測することになった。その意味で余震の標準パラメタを算出しておくことは重要であり、同時に余震の活動様式が標準的なのか特異的なのかの判断を行う上でも不可欠である。

1997 年 10 月から防災科学技術研究所・大学などの諸機関の地震データが気象庁にテレメータにより送信され、データ処理も一元的に行われるようになった。そのために検知能力や震源決定精度は飛躍的に向上したが、それと同時に従来からあった気象庁マグニチュードの問題点が顕在化するようになった。その問題を解決すべくマグニチュード検討委員会が設置され、新規のデータを含めてより適切な地震マグニチュードを算出するための努力が重ねられた。その結果 2003 年 9 月 25 日から新たな気象庁マグニチュードが適用されるようになった。この新たな気象庁マグニチュードに関しては、験震時報第 67 巻 (2004 年) に特集されているので、マグニチュードに関する詳細はそちらのほうを参照されたい。

この改訂に伴い、新しい気象庁マグニチュードを用いた場合の余震の標準パラメタを再度計算する必要がある。暫定的に未報告の値を使用してきたが、今回、最新のデータも追加し、日本全土を陸域と海域のふたつの領域に分けるだけでなく、本震のメカニズムの違いも考慮して余震パラメタの標準値を計算し直したのでここに報告する。

*地震火山部地震予知情報課

2. データ

余震の標準パラメタを再計算するにあたり、気象庁で 76 型電磁式地震計が運用されはじめた 1976 年以降のデータを用いることにした。干場ほか (1993) に基づいて日本全域を陸域と海域に分け、100km 以浅でマグニチュード (M) 5 以上の地震のうち、1 ヶ月以内に 20 個以上の余震を伴う事象 (本震) を選び出した。その中でも実際にパラメタを求めて、データに不備があると思われるものや極端な値を得たものは除外した。余震パラメタの計算は Ogata (1983) による最尤法に基づいて行った。ただし、1993 年 1 月 15 日の釧路沖の地震 (M7.5) は深さが 101km であるが、選択範囲に近いので例外的に計算対象とした。

その結果、陸域の余震系列では 47 個、海域では 49 個のデータセットが得られた。余震のパラメタを計算した本震の震央を、海域の場合を Figure 1 に、陸域の場合を Figure 2 に示す。それぞれの領域における本震の震源要素は、Table 1 と Table 2 に示した。山梨県東部におけるフィリピン海プレートと陸のプレートの衝突による地震は海域に分類し、伊豆諸島の火山フロントに沿う地震は陸域の地震とした。

Table 1, Table 2 において、fault type の S, R, N はそれぞれ横ずれ断層、逆断層、正断層型のメカニズムを表している。UK はメカニズム解が求められていない場合である。この場合メカニズムは、気象庁の初動解、CMT 解その他、ハーバード解などいずれの方法であってもカタログ上で登録されているメカニズムに準拠した。

Classification における OS, IL はそれぞれ海域、内陸の分類を示し、さらに TP, RP はプレート間、プレート内の地震であることを示している。明らかに内陸の地殻内の地震と考えられる場合には、プレート内とは標記していない。スラブの地震でメカニズムが横ずれ断層、正断層型となっている場合にプレート内、逆断層となっている場合にはプレート間の地震と分類した。ただし、例外もあり、1993 年 1 月 15 日の根室半島沖の地震 M7.3 (深さ 101km) や 2003 年 5 月 26 日の宮城県北部の地震 M7.1 (深さ 72km) は余震分布からスラブを割った地震であると判断できるので、逆断層であってもプレート内地震とした。

また海域の地震では、2000 年 6 月 7 日の福井県沖の地震 M6.2 (深さ 21km) は逆断層ではあるが、その付

近にプレート境界は認められていないので、プレート (地殻) 内の地震とした。2004 年 7 月 17 日の房総半島南東沖の地震 M5.5 (深さ 69km) はフィリピン海プレートと太平洋プレートの境界付近の地震であるが、横ずれ断層型とも逆断層型とも取れるので分類は不明 (UK) にした。2005 年 3 月 18 日の北海道北西沖の地震 M5.0 (深さ 0km) は逆断層型でユーラシア・プレート北米プレートの境界の地震かもしれないが、その境界はまだ明確でないので不明と分類にした。

3. 計算結果

Table 1, Table 2 は、それぞれ陸域、海域で発生した本震の震源要素 (発生日時、深さ、マグニチュード、震央地名、メカニズムのタイプ) と陸域・海域の識別とプレート間かプレート内かの識別、各余震系列のモデリングの開始と終了の日時分、改良大森公式のパラメタ K, c, p 、それとマグニチュード別頻度分布の b 値とその閾値 M_{th} 、パラメタの計算に用いた余震数 N を示している。

Table 1, Table 2 の右端に示した ABCDE 欄の○印は以下の基準従って採用した余震パラメタであることを示している。A は陸域・海域の余震系列で余震数が、100 以上の余震系列を示している。余震パラメタを計算する場合、モデリングの期間によってかなりパラメタが変動するが、余震数が多ければ、モデリングの期間にはあまり影響を受けずに安定した値が得られる。この A 欄で示したパラメタは比較的信頼できる値と考えられる。

B 欄はプレート間の地震を示し、陸域ではプレート境界の逆断層型、海域では逆断層型であることで採用した。C 欄はプレート内地震を示し、陸域ではプレート境界の正断層型と横ずれ断層型、海域では正断層型と横ずれ断層型であることで判断した。D 欄では内陸の逆断層型、E では内陸の横ずれ断層型を示している。Table 1, Table 2 に示した各余震系列のパラメタから、先に述べた A, B, C, D, E の場合の集計を行った。その結果を Table 3 に示す。ここでは平均値と中間値を示しているが、データの個数が少なく、かつ結果が連続的な分布をしていないので、余震パラメタの標準値としては、Utsu(1970)に従い中間値を用いるのが適切である。

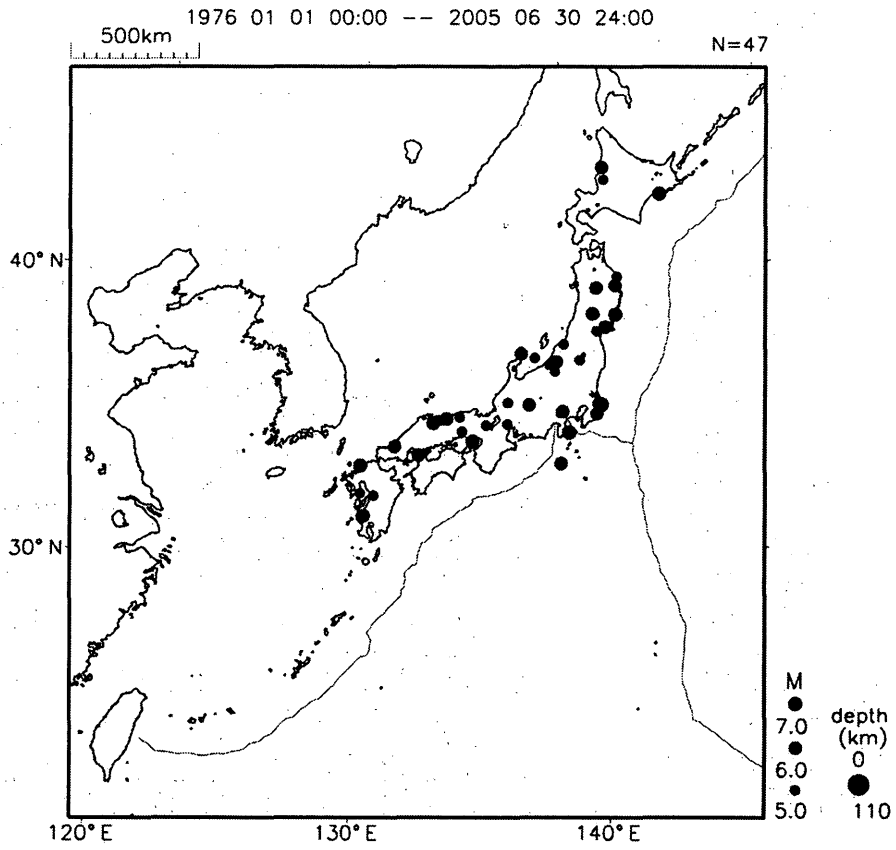


Figure 1 この調査で対象とした陸域の地震

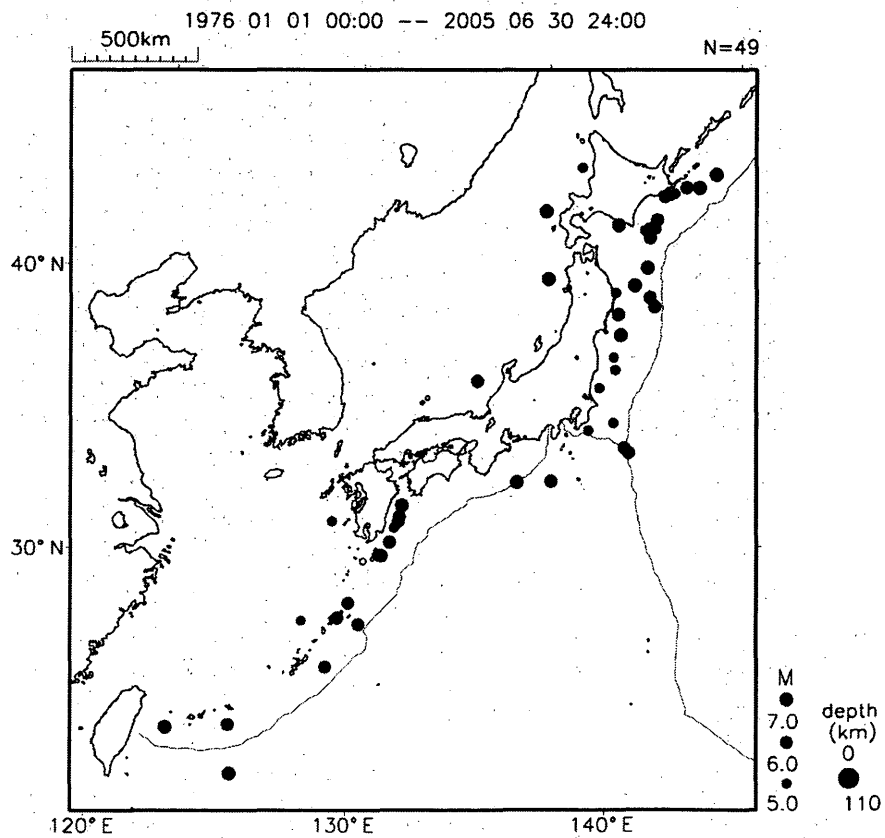


Figure 2 この調査で対象とした海域の地震

Table 3 改訂 M の地震カタログに関して
求められた余震の標準値 b,c,p,a

No Data Selection

Inland Region (number of samples :47)

b	0.8392 +/- 0.1875	median	0.8300
c	0.0794 +/- 0.1305	median	0.0324
p	1.0735 +/- 0.2437	median	1.0330
a	-2.0510 +/- 0.8476	median	-2.0589

Offshore Region (sample number :49)

b	0.7716 +/- 0.2014	median	0.7300
c	0.1069 +/- 0.1892	median	0.0200
p	1.0038 +/- 0.1956	median	0.9670
a	-1.9578 +/- 0.9597	median	-1.7522

Whole Region (sample number :96)

b	0.7833 +/- 0.1927	median	0.7800
c	0.0935 +/- 0.1629	median	0.0304
p	1.0379 +/- 0.2221	median	0.9850
a	-2.0034 +/- 0.9034	median	-1.8530

Data Selection A (100 and more aftershocks)

Inland Region (number of samples :26)

b	0.8350 +/- 0.1722	median	0.8250
c	0.0997 +/- 0.1587	median	0.0386
p	0.9960 +/- 0.1713	median	0.9600
a	-1.9476 +/- 0.8640	median	-1.9208

Offshore Region (sample number :21)

b	0.7862 +/- 0.1789	median	0.8100
c	0.1657 +/- 0.2119	median	0.0902
p	1.0544 +/- 0.2008	median	0.9730
a	-1.6274 +/- 0.9299	median	-1.4851

Whole Region (sample number :47)

b	0.8132 +/- 0.1750	median	0.8200
c	0.1292 +/- 0.1852	median	0.0449
p	1.0221 +/- 0.1853	median	0.9680
a	-1.8045 +/- 0.8986	median	-1.6672

Data Selection B (inter-plate events)

Inland Region (number of samples :5)

b	0.7460 +/- 0.1187	median	0.8000
c	0.0180 +/- 0.0122	median	0.0226
p	1.1086 +/- 0.2146	median	1.0650
a	-2.6203 +/- 0.2907	median	-2.7440

Offshore Region (sample number :35)

b	0.7189 +/- 0.1933	median	0.6800
c	0.1287 +/- 0.2135	median	0.0418
p	1.0119 +/- 0.2045	median	0.9730
a	-1.8067 +/- 0.9756	median	-1.5087

Whole Region (sample number :40)

b	0.7223 +/- 0.1847	median	0.7150
c	0.1149 +/- 0.2028	median	0.0251
p	1.0240 +/- 0.2055	median	0.9780
a	-1.9084 +/- 0.9553	median	-1.6472

Data Selection C (intra-plate events)

Inland Region (number of samples :7)

b	0.6400 +/- 0.2344	median	0.5200
c	-0.0308 +/- 0.0369	median	0.0219
p	1.0759 +/- 0.2243	median	1.0090
a	-1.7829 +/- 0.9306	median	-1.6602

Offshore Region (sample number :6)

b	0.9150 +/- 0.2017	median	0.8850
c	0.0354 +/- 0.0489	median	0.0083
p	0.9717 +/- 0.2316	median	0.9390
a	-2.2212 +/- 0.7105	median	-1.9442

Whole Region (sample number :13)

b	0.7669 +/- 0.2545	median	0.7300
c	0.0329 +/- 0.0410	median	0.0161
p	1.0278 +/- 0.2246	median	0.9670
a	-1.9852 +/- 0.8337	median	-1.7380

Data Selection D

(reverse events in the crust / sample number :17)

b	0.8371 +/- 0.1691	median	0.8300
c	0.0862 +/- 0.1800	median	0.0234
p	1.0618 +/- 0.2595	median	1.0070
a	-2.1392 +/- 0.9916	median	-2.0589

Data Selection E

(strike-slip events in the crust / sample number :17)

b	0.8271 +/- 0.1854	median	0.8100
c	0.0982 +/- 0.0957	median	0.0592
p	1.0666 +/- 0.2487	median	1.0330
a	-1.8931 +/- 0.7536	median	-1.8679

Table 4 改訂前に使われていた松浦(1993)
の標準値

Standard Paramertes by Matsu-ura(1993)

Intra-plate

b	1.05 +/- 0.272	median	1.00
c	0.0514 +/- 0.0871	median	0.0190
p	1.18 +/- 0.280	median	1.12
a	-2.52 +/- 0.698	median	-2.36

Inter-plate

b	1.06 +/- 0.355	median	1.04
c	0.0908 +/- 0.109	median	0.0646
p	1.25 +/- 0.417	median	1.16
a	-2.39 +/- 1.11	median	-2.08

Whole region

b	1.05 +/- 0.317	median	1.03
c	0.0733 +/- 0.101	median	0.0356
p	1.22 +/- 0.361	median	1.14
a	-2.45 +/- 0.946	median	-2.19

余震数でサンプルを選別しない場合 (No Data Selection) と 100 以上の余震数の場合 (Data Selection A) で比較すると、前者の場合、陸域と海域の場合でパラメータ間に違いが見られるが、余震数 100 以上で後者の場合、 b 値と p 値にはそれほど違いは見られない。ただ、 c 値と a 値には幾分違いがあるように見える。双方の地域で b 値が大きく変わらないことからすると、本震のマグニチュード M_m と余震マグニチュードの閾値 M_{th} 差が大きいと海域の余震のほうが K が大きいのだろうか。

データ選別 B の場合、陸域のデータ (サンプル数 5) は、震央は陸域に位置しているが、海洋プレート (スラブ) の境界で発生している地震なので、海域のデータと併せて見るのが正しい。陸域のサンプル数が少ない上に、余震数による制限をかけていないので海域の値との差が大きいように見える。

データ選別 C の場合も同様に海陸の区別をせずに双方を併せた場合の結果を採用する。

データ選別 D と E は地殻内の地震で、逆断層型と横ずれ断層型であるが、双方には a 値に違いがあるように見える。それと、 p 値が他の場合と比べて共に 1 を超えているが、データを選別しない陸域の場合にも p 値は 1 を超えているので、それと同じ理由でそのような結果になったのだろう。

比較のために、M 改訂以前に標準的余震パラメータとして使われていた松浦 (1993) を Table 4 に示す。松浦は本震の発生位置をプレート内とプレート間に分けているが、地殻内の地震もプレート内に入れていたので、今回のデータ選択 A と比べてみる。 b 値が今回の場合において明らかに小さくなっている。このことは、地震予知情報課データ処理の報告 (2004) でも、特定の地域に限定はしているものの、同様な指摘がなされている。

両者の改良大森公式のパラメータを比較すると M 改訂は、余震の減少の割合を示す p 値はやや小さくなった。 c 値は大きく変化していないことがわかる。ただし、 a 値には b 値が含まれているので、そのことも両者間での違いに影響しているのだろう。

4. おわりに

今回再計算した余震パラメータの標準値は、Reasenber and Jones (1989) の手法による余震確率評

価を前提にしているが、余震確率の評価はそれ以外にも岡田・伊藤 (2001) によって提案されている。さらに Hosono and Yoshida(2002)は、大きな余震と小さな余震では余震パラメータが異なることも指摘しているので、よりの確かな評価を行うにはより詳細な余震発生の特性を考慮していかないとならないだろう。

参考文献

- 岡田正実・伊藤秀美 (2001) : 負の 2 項モデルによる余震の確率予測 (1) —基本モデルの構築とその評価—, 地震 2, 54, 335-345.
- 気象庁地震火山部地震予知情報課データ処理係 (2004) : 気象庁マグニチュードの改訂に関する比較調査, 験震時報, 67, 21-35.
- 干場充之, 清野政明, 岡田正実, 伊藤秀美 : 相互関連度付き震源リストの製作とその応用, 気象研究所研究報告, 44, 83-90.
- 細野耕司・吉田明夫(1992) : 余震活動の予報, 気象研究所研究報告, 42, 145-155.
- 松浦律子 (1993) : 改良大森公式中のパラメータ値について—日本付近の $M \geq 6.0$ の余震活動(1969—1991), 地球惑星科学関連学会予稿集, 224.
- Ogata, Y.(1983) Estimation of parameters in modified Omori Formula for aftershock frequencies by the maximum likelihood procedure, Jour. Phys. Earth, 31, 115-124.
- Hosono, K. and A. Yoshida(2002) : Do large aftershocks decrease similarly to smaller ones?, Geophys. Res. Lett. 29, 120-1-120-4.
- Reasenber, P. A. and L. M. Jones, (1989) : Earthquake hazards after a main shock in California, Science, 243, 1173-1176.