

## 地震の規模別頻度分布

産総研 梅田康弘

### 1. はじめに

2012年1月23日の読売新聞朝刊に「M7級首都直下地震、4年内に約70%の確率で発生と、東京大学地震研究所の研究チームがまとめた」という趣旨の記事が載り、他紙や週刊誌でも「M7級、4年内に約70%」という数値が大きく報道されました。

今日はまず、地震発生確率を求める前段階に作られた「地震の規模別頻度分布」についてお話しします。地震発生確率については、次の回以降に説明します。

### 2. 地震研究所の発表

地震研究所がHPで発表した2枚の図を引用します。図2は関東地方の震央分布図で、左は2011年東北地方太平洋沖地震の前6カ月、右は後の6カ月間です。3月11日の地震以降、関東地方では地震が増えていることがわかります。この地域は3月の巨大地震の震源域から離れていますので、増えた地震は余震ではなく、いわゆる誘発地震です。

図2の範囲で起こった地震の回数を、マグニチュード別に描いたのが図3で、**地震の規模別頻度分布**といいます。青い丸印が3月11日以降の分布、下側の並びはそれ以前の分布です。3月11日以降は、地震回数が増えたため、クリーム色の上向き矢印で示されているように、それ以前に比べて上方にシフトしています。それまではマグニチュード7の地震が起こる頻度は、図の黄色い☆印の位置でしたが、地震活動が活発になったため（図では分布が上方にシフトしたため）図の赤い星印にあがった。というのが大まかな説明です。今日の基礎講座ではこの図3の描き方を詳しく説明します。

今日のキーワードは  $\log$  (ログ) と  $b$  値 (ビーチ) です。

### 3. グラフ用紙の用意

図4のようなグラフ用紙を準備します。横軸はマグニチュード(以下ではMと記します)、縦軸には地震の発生回数をとります。地震回数は非常に多いので、図に示したように“桁”をとります。そうすると一番下の1目盛では1-10個の9個に対して、その上は10-100の90個、一番上では1000-10000個の9000個というように、上にいくほど、1目盛の中の地震回数が多くなっています。縦軸に限って言えば“多を押さえ、寡を延ばす”といったところでしょうか。

縦軸の左のスケールでは、桁そのものを書いています。つまり1000なら3桁ですので3、

10000 は 4 桁の 4 という具合です。それを一般に  $\log_{10}n$  (ろぐ じゅうていの えぬ) と表します。桁で表示する場合は常に 10 の何乗ですので「じゅうていの」は省略して  $\log n$  (ろぐ えぬ) です。こういう目盛を **ログスケール (対数目盛)** といいます。ログはもちろん log (Logarithm ログリズムの略) で、対数の事です。図 4 のように片側だけ (この場合は縦軸だけ) が対数表示になっているグラフを片対数グラフといいます。縦横共に対数の場合は両対数グラフになります。

図 5 では、片対数グラフの縦軸のひと桁の内訳を点線で示しました。1 と 2 の間隔より 2 と 3 の間隔が狭くなっています。上に行くほど (数値が大きくなるほど) 間隔が狭くなっている事がわかります。ひと桁の中でも“多を押さえ、寡を延ばす”目盛になっています。

#### 4. 地震の回数をプロットする

用意した片対数グラフに、マグニチュード毎に地震発生回数をプロットします。図 6 では M6.7 が 1 回、M6.2 と M6.3 がそれぞれ 1 回づつ、M6.0 は 7 回、というようにプロットしました。M6.0 以下も同様にプロットしていきませんが、この図ではめんどうなので M5.4 以下はプロットしていません。なお、前の図で説明しましたように、数が増えるほど間隔は狭くなりますので、グラフの右側の 4 ~ 9 は数値が重ならないようやや蛇行して記入しています。

#### 5. 積算地震数

次に、地震の数を足していきます。その際、ある M より大きい地震の数をすべて加えて、その M のところにプロットします (図 7)。例えば M6.0 ですと、M6.0 が 6 回、M6.1 と M6.3 がそれぞれ 2 回、それに M6.7 が 1 回起こっていますから、合計 11 回を M6.0 のところにプロットします。図 7 では黒丸でプロットしています。以下同様に、M5.9 でしたら、M5.9 の 2 回に、それより大きい地震の数 11 回を加えた 13 回をプロットします。

こうしてどんどん黒丸をプロットしていきまると、どうでしょう、M6.0 より小さい M のところでは黒丸が直線状に並ぶではありませんか！ このことを発見したのが、ゲーテンベルグさんとリヒターさんだったのです。今から 70 年近く前の 1944 年頃のことです。リヒターさんはマグニチュードを求める式を最初に提案した人で、このような研究もすすめることができたのでしょう。そういう経過もあって、この法則を **Gutenberg-Richter's formula** (ゲーテンベルグ・リヒター則、または簡単にそれぞれの頭文字をとって **G-R 則**) と呼んでいます。

日本では「**地震の規模別頻度分布**」と呼んでいます。日本語のほうが内容をよく表していると思います。なお、図 6 の左の目盛は単なる地震数 (n) ですが、図 7 の目盛は積算地震数 (N) になっています。英文字も n と N で使い分けています。

## 6. 関東地方における b 値

図 6, 7 では M5.4 以上しかプロットしていませんでしたが、全部をプロットしたのが図 8 です。この図は地震調査研究推進本部（通称、推本）が報告しているもので、図 2 の地図に示された領域の中で 1950 年から 2004 年までに深さ 30 km~80 km で起こった地震 1934 個をプロットしています。

前節で述べた黒丸が直線に並ぶのは M4.3~M6.0 の範囲です。M4.3 より小さい地震数は直線から下方に外れて頭打ちになっています。これは、小さな地震になるほど、観測できなかったり、観測できても震源が決まらなかった、あるいはマグニチュードが決められなかったためです。ですので M4.3 より小さい地震のほうは無視します。いっぽう、M6.0 より大きな地震の数も、やはり直線より下にずれています。これは期間が足りないからだと考えられています。つまり 1950 年から 2004 年までの 54 年間では M7 の地震は起こっていないが、もっと時間を長く取ればいずれ M7 は起こるのであろう、というのが G-R 則の意味するところです。

赤い点線で示した直線の勾配を「b 値」といいます。余りにも簡単な表現なので、丁寧に言う場合は「G-R 則の b 値」と言います。この b 値を求める事ができれば、M7 が起こるであろう年数を予測できます。次に b 値を求めます。

## 7. b 値を求める式とグラフ

図 9 は、X-Y 座標です。直線を数式で書くと  $Y = aX + b$  です。直線の勾配が a ですが、話しのつながりのため、a と b を入れ替えて  $Y = bX + a$  にします。そうすると直線の勾配が b になって、前節の b 値に対応します。この座標に、図 4, 5 で使った片対数グラフを重ねます。重ねたのが図 10 です。横軸は X の代わりにマグニチュードの M、縦軸は Y の代わりに、 $\log N$ （地震の積算回数の対数）になります。式も図に示したようにそれぞれ変わって、 $\log N = a - bM$  になります。

勾配 b の前にマイナスを付けたのは、直線の傾きは右下がり（図 10 の点線）になりますので、前もってマイナスを付ける事によって、いつも b 値が正の値になるようにしています。たいした意味はありません。

## 8. M7 は何年に一度起こるか

グラフと式の準備ができたので、推本の地震調査委員会が示した図 8 から、M7 の地震が起こる頻度を推定してみましょう。図 8 の中に M:4.3, b:0.96, N:566 とありますからこれらを前節の式に代入しますと、 $\log 566 = a - 0.96 \times 4.3$  となります。これから  $a = 6.88$  と求めますので、式を改めて書きなおすと、 $\log N = 6.88 - 0.96M$  となります。

この式の M に 7.0 を代入すると、 $N = 1.45$  回、つまり 1950 年から 2004 年までの 54 年間に 1.45 回、言い換えれば 37.4 年に 1 回（ $54/1.45$ ）M7 の地震が起こる勘定です。このように、G-R 則から M7 の地震が起こる時間予測ができるのは「何年に 1 度か」といった

平均の発生間隔です。こういう情報を基に地震発生確率も求められます。

## 9. b 値の地震学的意味

地震発生確率の求め方は次回以降にして、ここではせっかく b 値の求め方がわかりましたから、その地震学的な意味について述べます。図 11 に、b 値の異なる 3 つの点線を書き入れました。広い範囲で、かつ長い期間、例えば日本列島全体で 100 年間といった地震数を採ると、b 値はほぼ間違いなく 1.0 に近い値になります。しかし伊豆地方や箱根付近の地震数を採りますと、b 値は大きくなり、例えば図に示した  $b=1.33$  のように直線の勾配は急になります。勾配が急ということは小さな地震の起こる割合が大きいということです。逆に b 値が小さい値をとる場合は、小さな地震の起こる割合が小さい、あるいは小さい地震に対して大きな地震の起こる割合が大きい、ことを意味しています。前者のような場合は群発地震の起こりやすい地域でよく見られます。伊豆・箱根もそうで、温泉地帯でもあり、地殻内の温度も高く、地殻がグサグサに破壊されているといったイメージです。逆の場合は東北地方の太平洋沖などがあげられます。地殻はしっかり固く、大きめの地震がたまに起こるといった感じです。こういう地震発生の条件と b 値との関係は、むしろ岩石実験のほうから確かめられました。この事実を逆に利用しますと、b 値を調べる事によって、その地域の地震発生場の状態を知ることができます。

なお b 値が 1.0 の場合は、図 11 を見てもわかる通り、マグニチュードが 1 違うと、地震の数が 1 桁違います。つまり M が 1 小さいと地震の数は 10 倍に増える事を表しています。

## 10. 時間変化する b 値

前節では b 値が地域によって異なる事を述べましたが、b 値は時間的にも変化する事実を紹介します。図 12 は東大地震研究所の研究者の報告で、タイトルのとおり 2011 年東北地方太平洋沖地震の震源域での b 値を 2000 年から本震前まで調べたものです。2005 年頃までの b 値は 0.7 から 0.75 で推移していましたが、次第に小さくなって、本震前には 0.5 以下になっていたことがわかります。各丸印に付いている横の棒は、データを採った期間です。最初の 2002 年頃のポイント (○印) には 2000 年から 2006 年近くまでのデータを採っている事がわかります。縦棒は誤差です。2010 年の最後のポイントは、本震より先のデータは採れませんから、誤差が大きく、従って縦棒が長くなっています。

こういう事実があると、b 値を調べれば地震予知ができるのでは、と思われがちですが、そう簡単ではありません。図 13 に、1995 年の兵庫県南部地震の前の b 値の時間変化を示しました。1984 年頃から 1991 年頃までは下がっていましたが '92 年、'93 年と大きくなった後、本震前にはまた下がっています。このように時間的に変化すると言っても単純ではありません。

## 11. 収まりつつある誘発地震

関東地方の誘発地震は次第に収まりつつあります。産総研の石川有三さんが 2011 年 12 月までの同地域で発生した地震数をプロットして送ってくれました。図 14 です。3 月の巨大地震直後は非常に数が増えましたが、次第に減ってきているのがわかります。地震研究所の研究グループが最初に発表した地震発生確率（30 年以内に 98%）は 2011 年 9 月までの地震数の多い時期のデータを使ったものでしたが、地震数が少なくなった 2012 年 1 月現在で、同グループが再計算したところ 83%と小さくなったそうです。

誘発地震について、同じようなことは 1995 年兵庫県南部地震の時にもありました。震源域から離れた京都の北西部で、誘発地震が急に増えましたが、図 15 に示しましたように、次第に減っておさまって行きました。おそらく関東地方の誘発地震もこういう過程を経るでしょう。

8 節でも述べましたが、関東地方では M7 クラスの地震は 37.4 年に 1 回の割で起こっています。前回の地震は 1987 年の千葉県東方沖の M6.9 で、すでに 25 年経っています。注意が必要であることには変わりありません。

次回は地震発生確率の求め方についてお話しします。

## 2011年3月11日の前と後での関東地方の地震活動

図2

下の左図は3月11日までの半年間(2010年9月11日～2011年3月10日), 右図は3月11日以降の半年間(2011年3月11日～2011年9月10日)の, M3以上の地震の分布を表しています(気象庁一元化震源を使用). 3月11日の地震の前と後で, 地震の数は, **47個**から**343個**に増加しています.

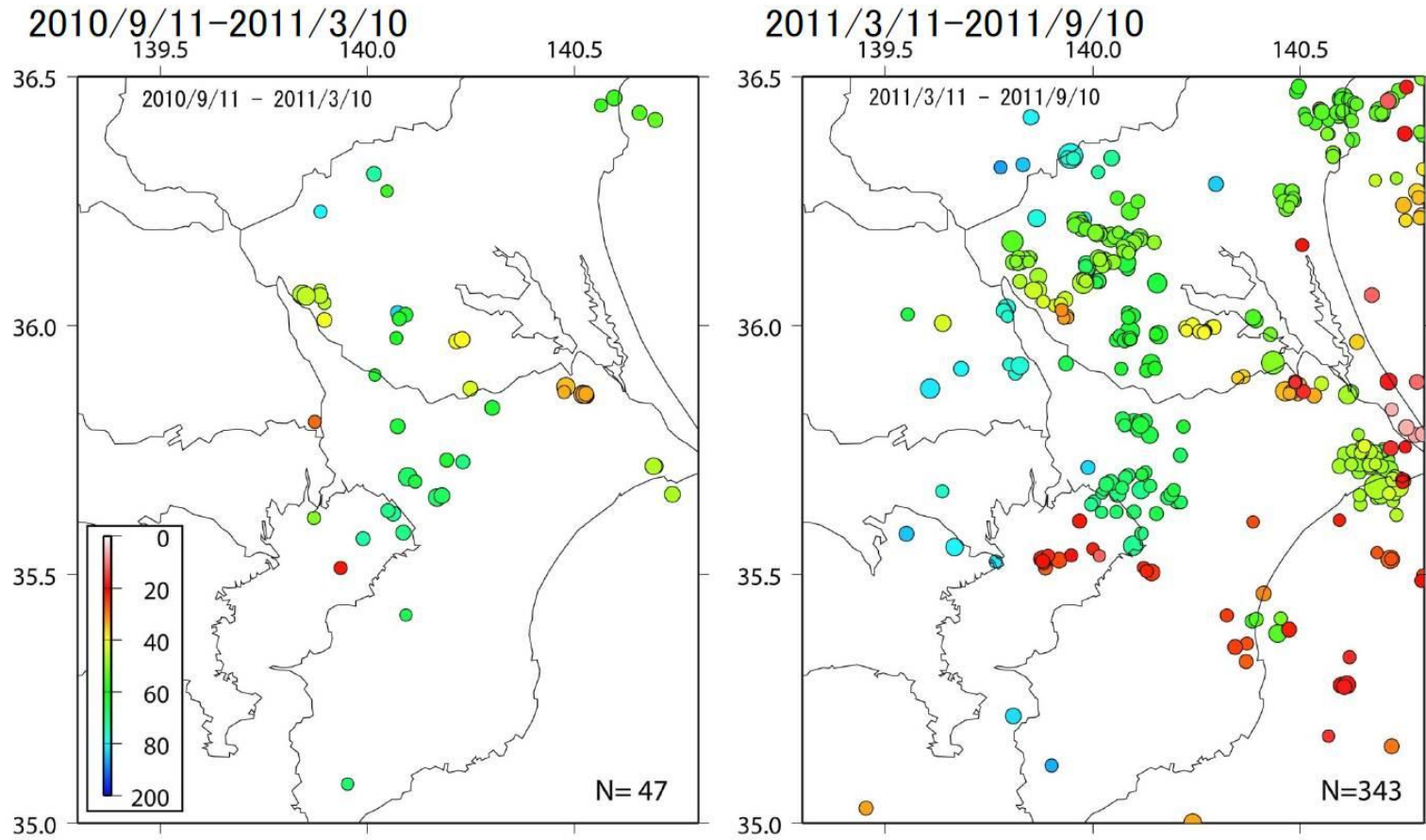


図3

# 地震の規模別頻度分布

東大地震研究所 HPより

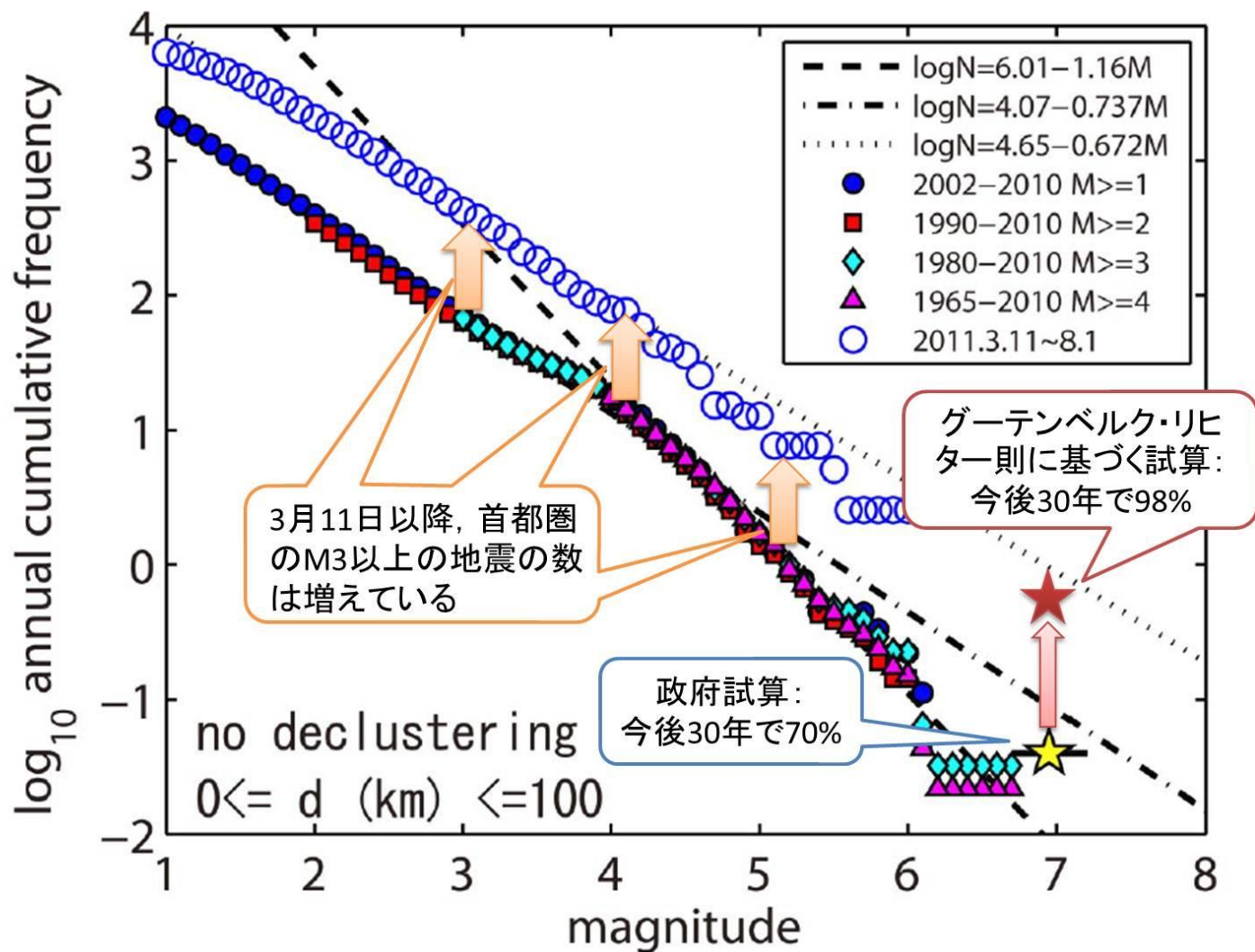
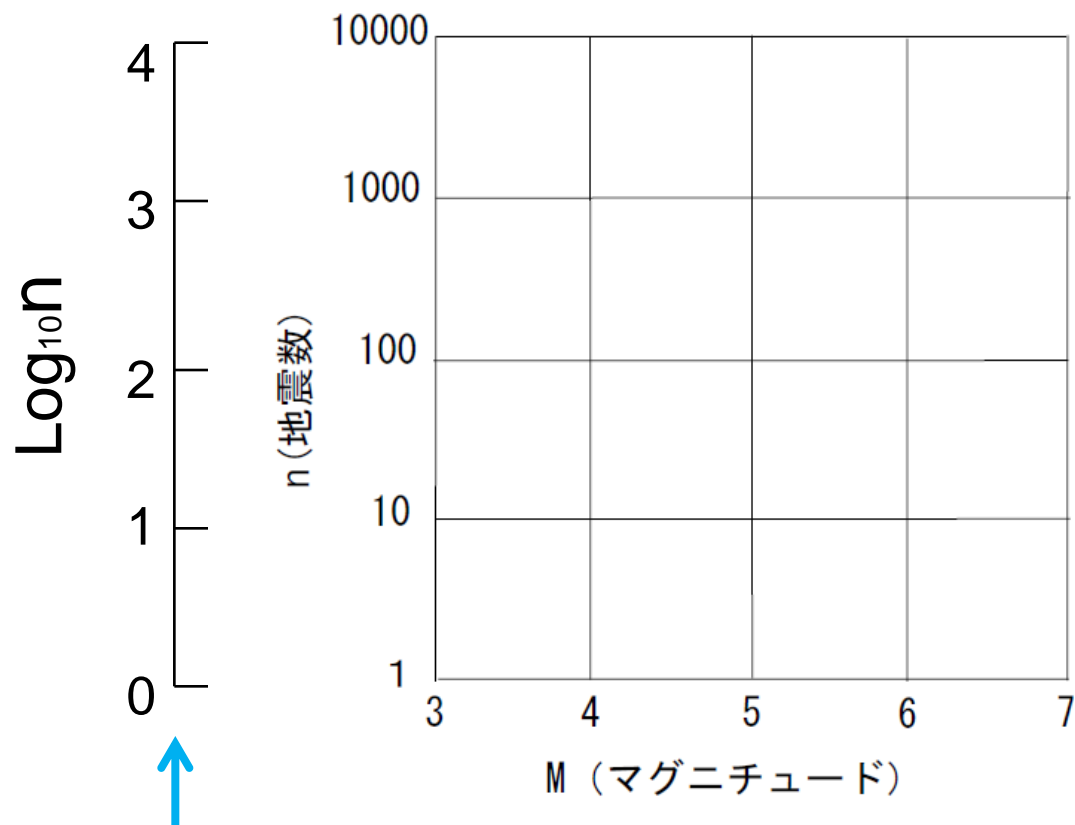


図 4

## 1. グラフ用紙を作る

地震の数が多いので、縦軸は桁で表示する



Log (ログ スケール)  
対数 (対数目盛)



図 5

## 2. 片対数グラフ

一桁の間の目盛が不等間隔になっている

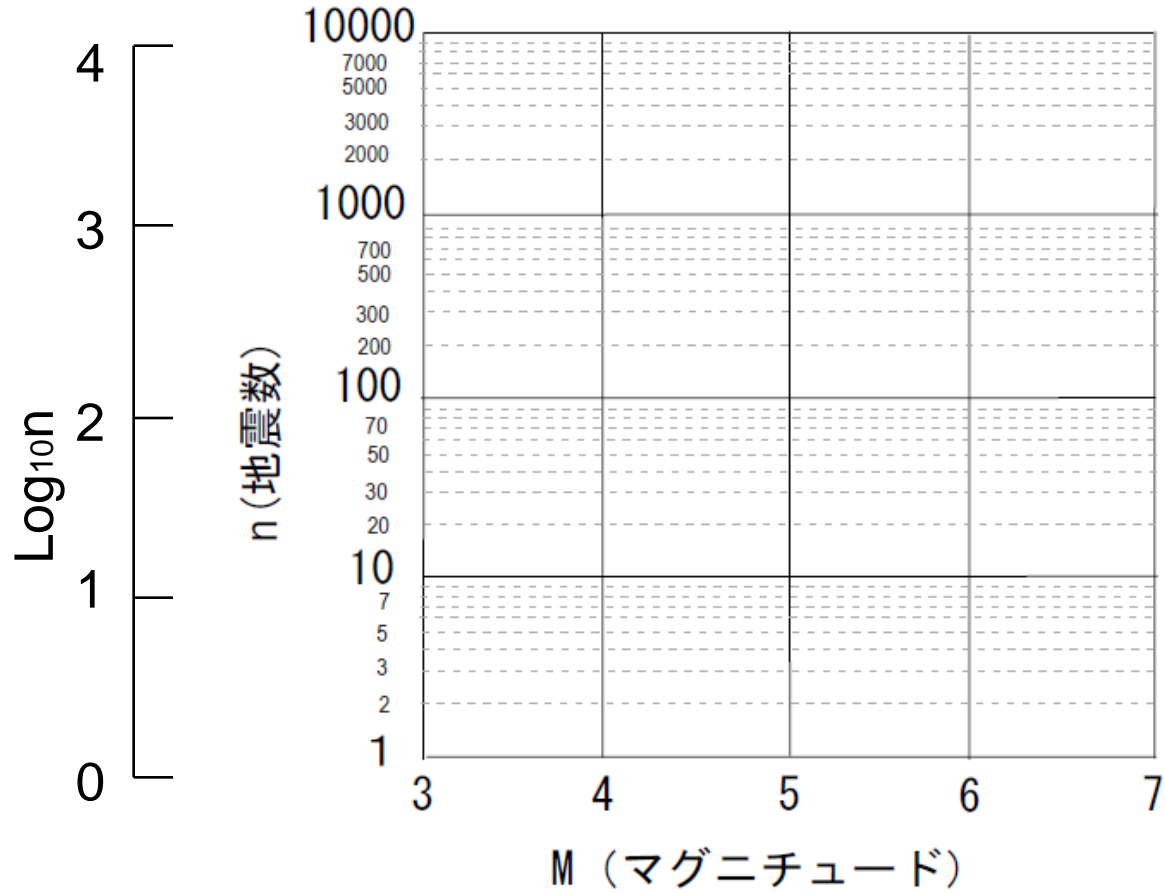


図 6

### 3. マグニチュード毎の地震数をプロットする

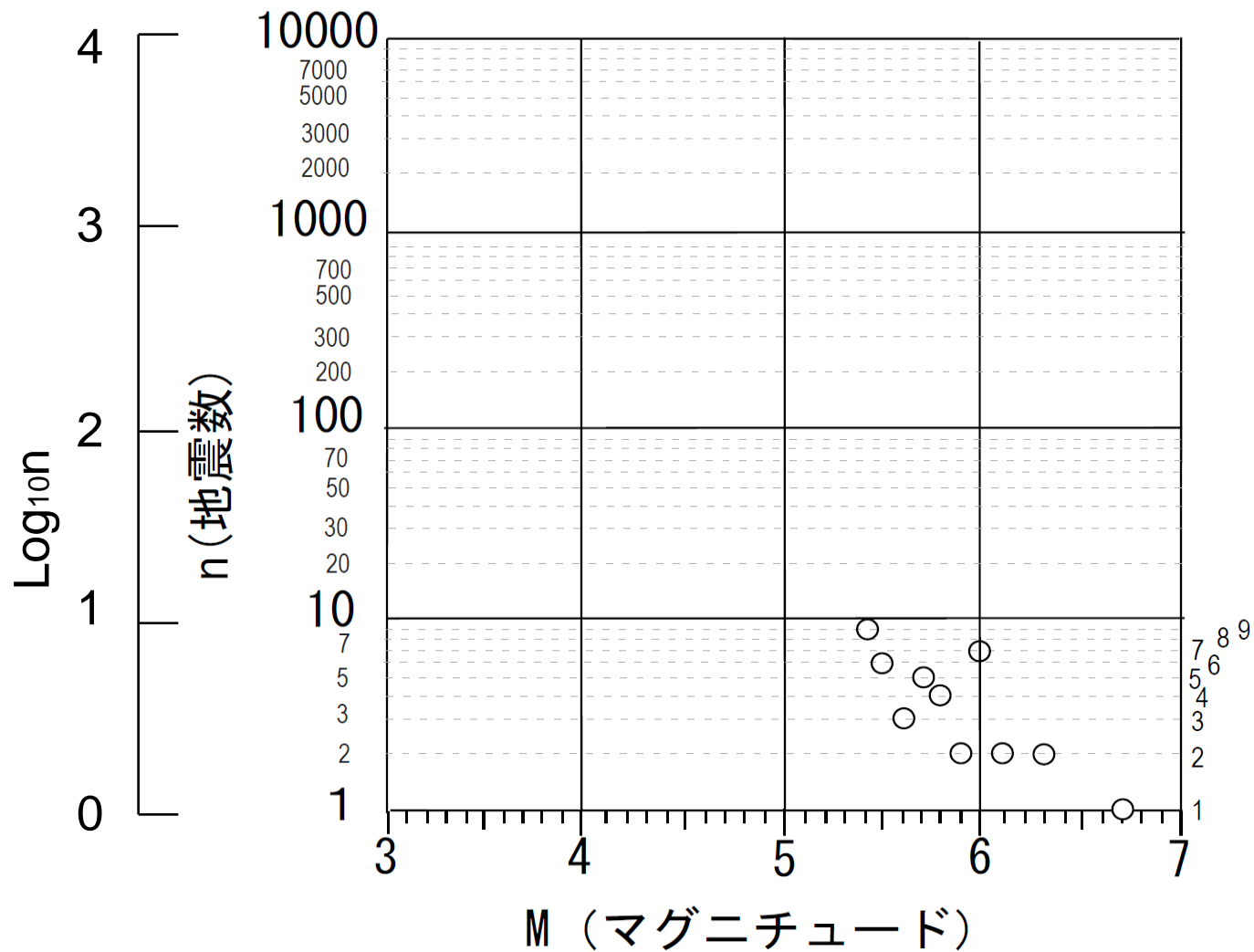


図 7

## 4. 積算地震回数をプロットする

あるマグニチュード ( $M_i$ ) より大きい  $M$  の地震数をすべて加える

規模別頻度分布

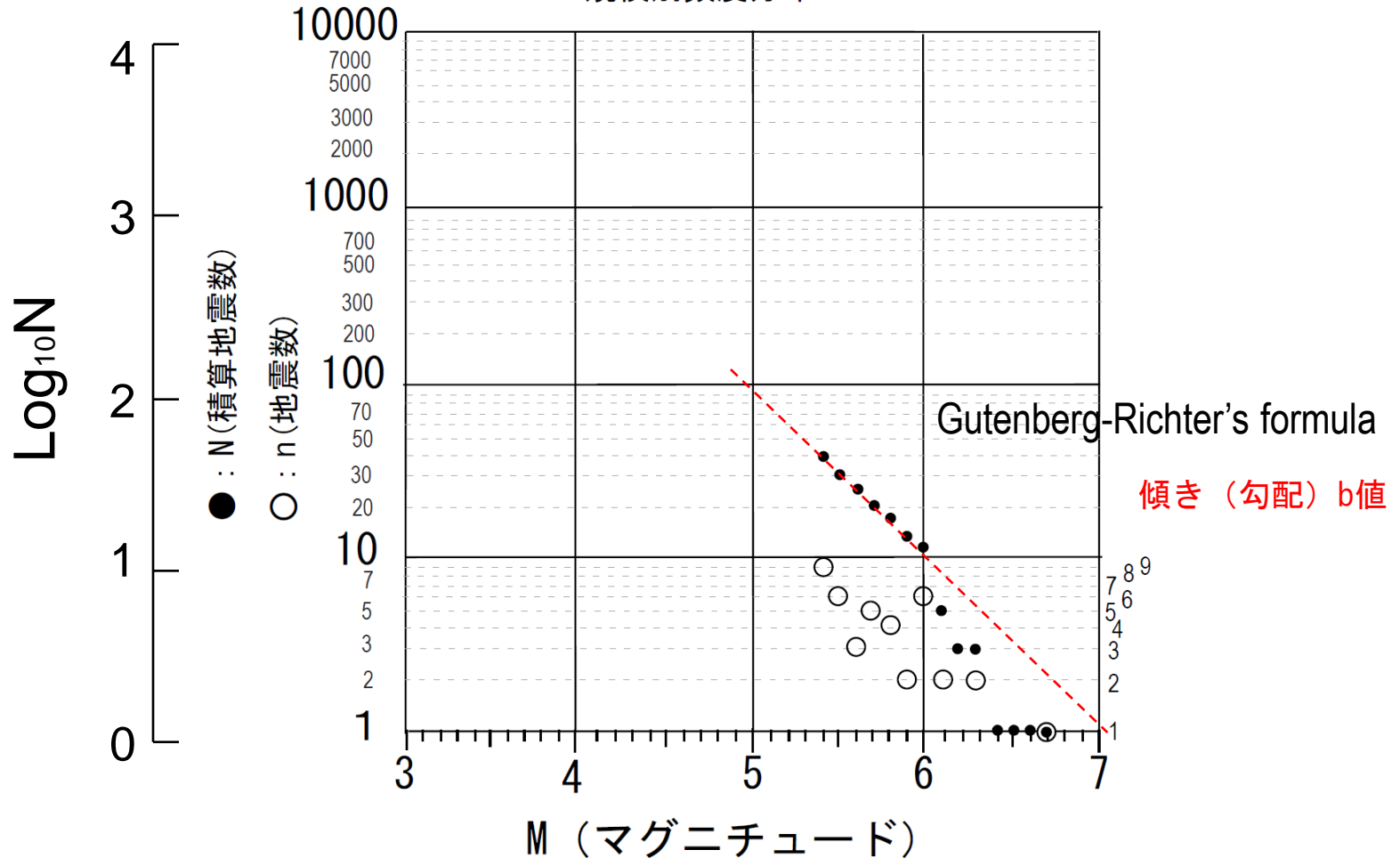
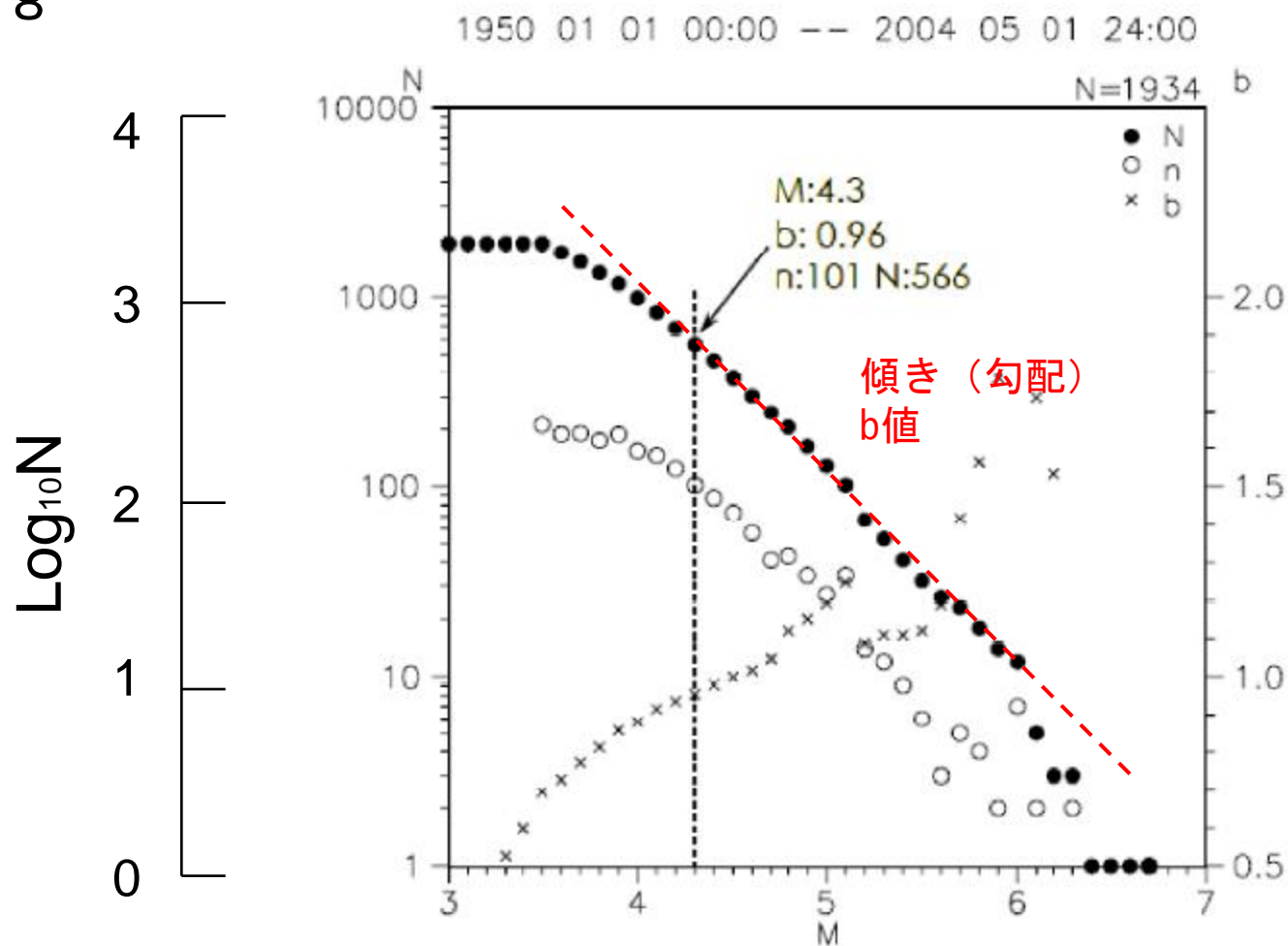


図 8



(観測データ諸元) 深さ : 30-80 km; 期間 : 1950年1月1日 ~ 2004年5月1日

地震調査推進本部HPより

海溝型地震の長期評価  
相模トラフ沿いの地震活動の長期評価について  
図7 その他の南関東の地震の評価領域とその領域におけるM別度数分布

图 9

$$Y = aX + b \longrightarrow Y = bX + a$$

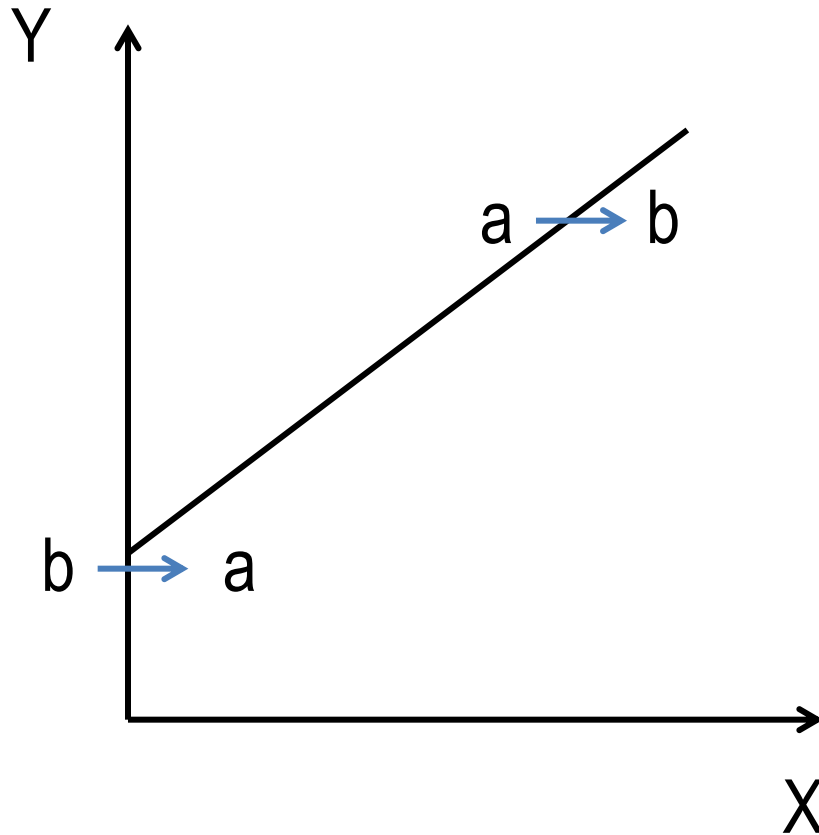
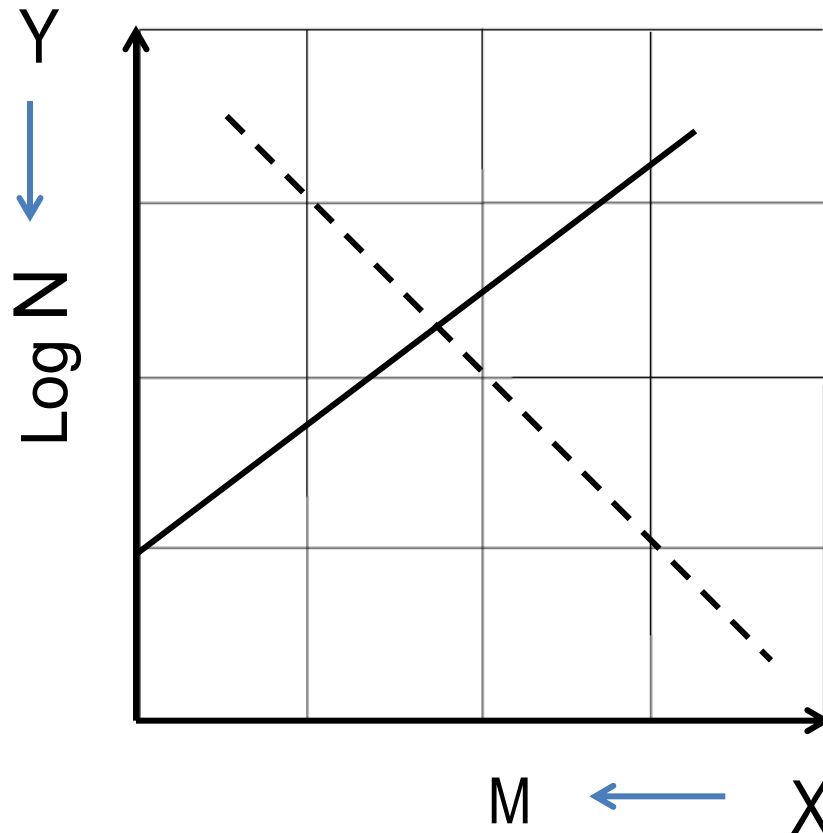


図10

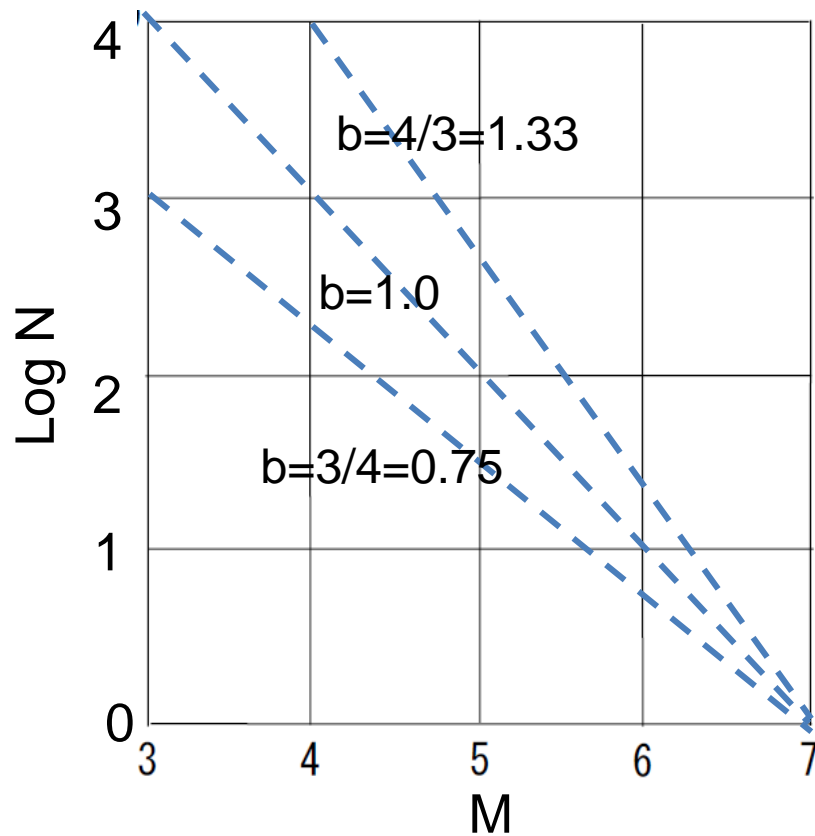
$$Y = aX + b \quad \longrightarrow \quad Y = bX + a$$
$$\text{Log } N = bM + a$$
$$\text{Log } N = a - bM$$



点線の勾配  
b値 (b value)

図11

$$\text{Log } N = a - bM$$



### b値(b value)

- ・ 1.0 が普通（広域・長期間）
- ・ 1.0より大きい  
→ 小さい地震が多い  
（群発地震など）
- ・ 1.0より小さい  
→ 小さい地震が少ない  
（時々大きな地震が起こる）

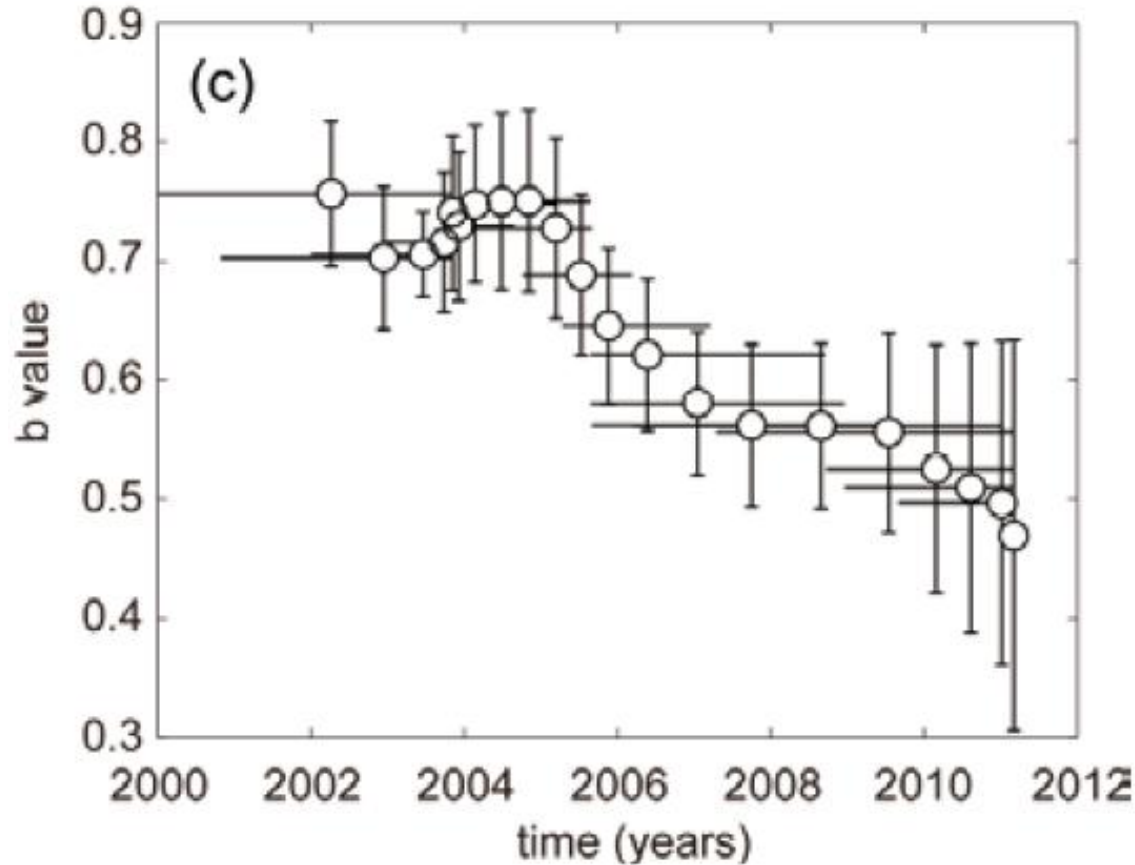
b値(b value) には地域性がある。  
また時間的にも変化する。

図12

2011年東北地方太平洋沖地震震源域の  $b$  値の時空間変化

東京大学地震研究所

楠城一嘉・平田 直・小原一成・笠原敬司



(c) 本震震源付近の領域 (37.8-39.0° N, 142.6-144.0° E) における  
2000年以降の  $b$  値の時間変化。



図13

# 1995年兵庫県南部地震

京都大学防災研究所  
渡辺 晃

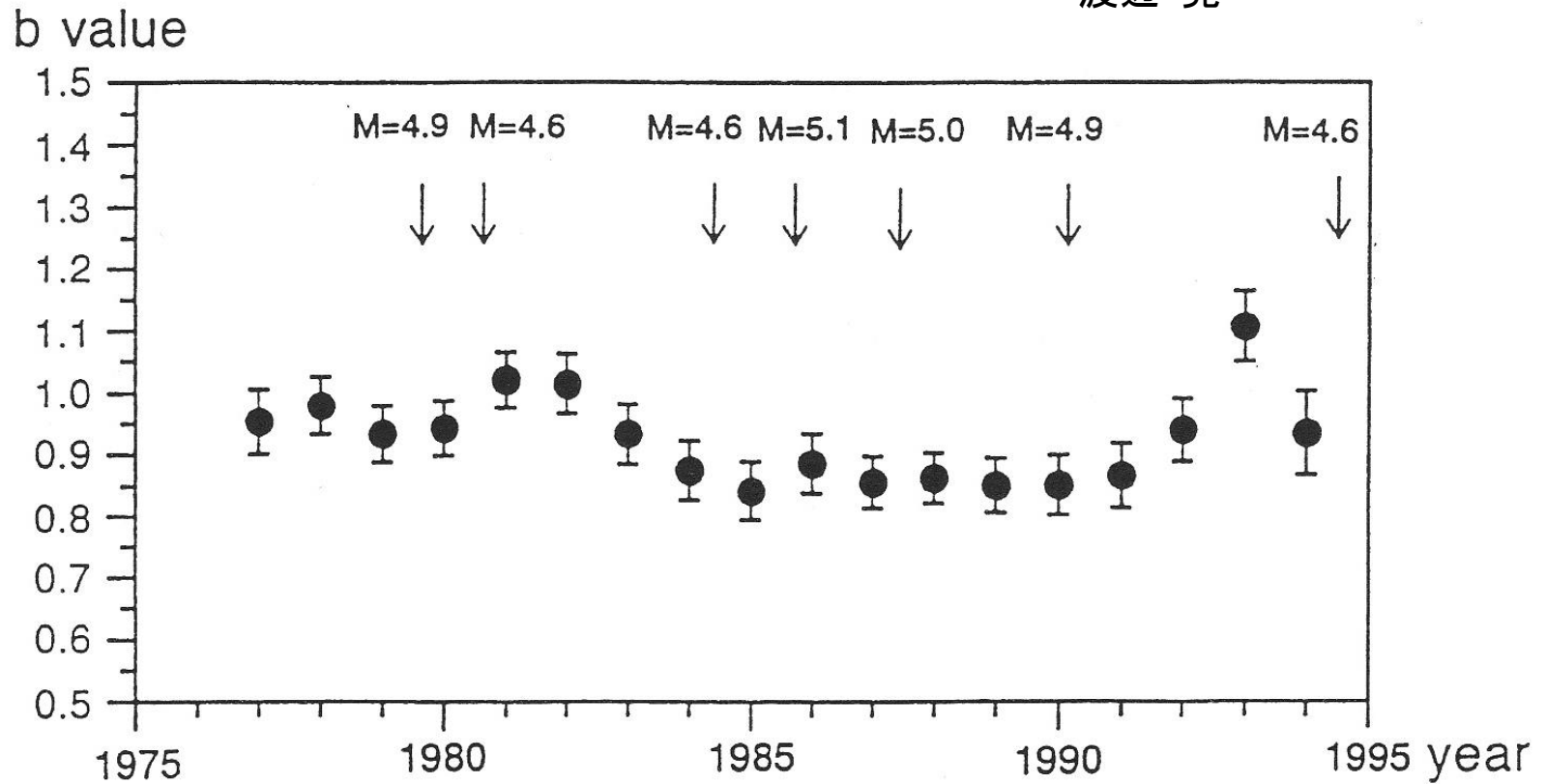


図 2.2.5 b 値の時間的変化

1987年以降、小さい値で推移したが、1992年中頃から異常に増加し、再び減少するうちに本震につながった。この異常変化の時期は琵琶湖北部の地殻下地震（図2.2.6 および2.2.7）の活動と一致する。

図14

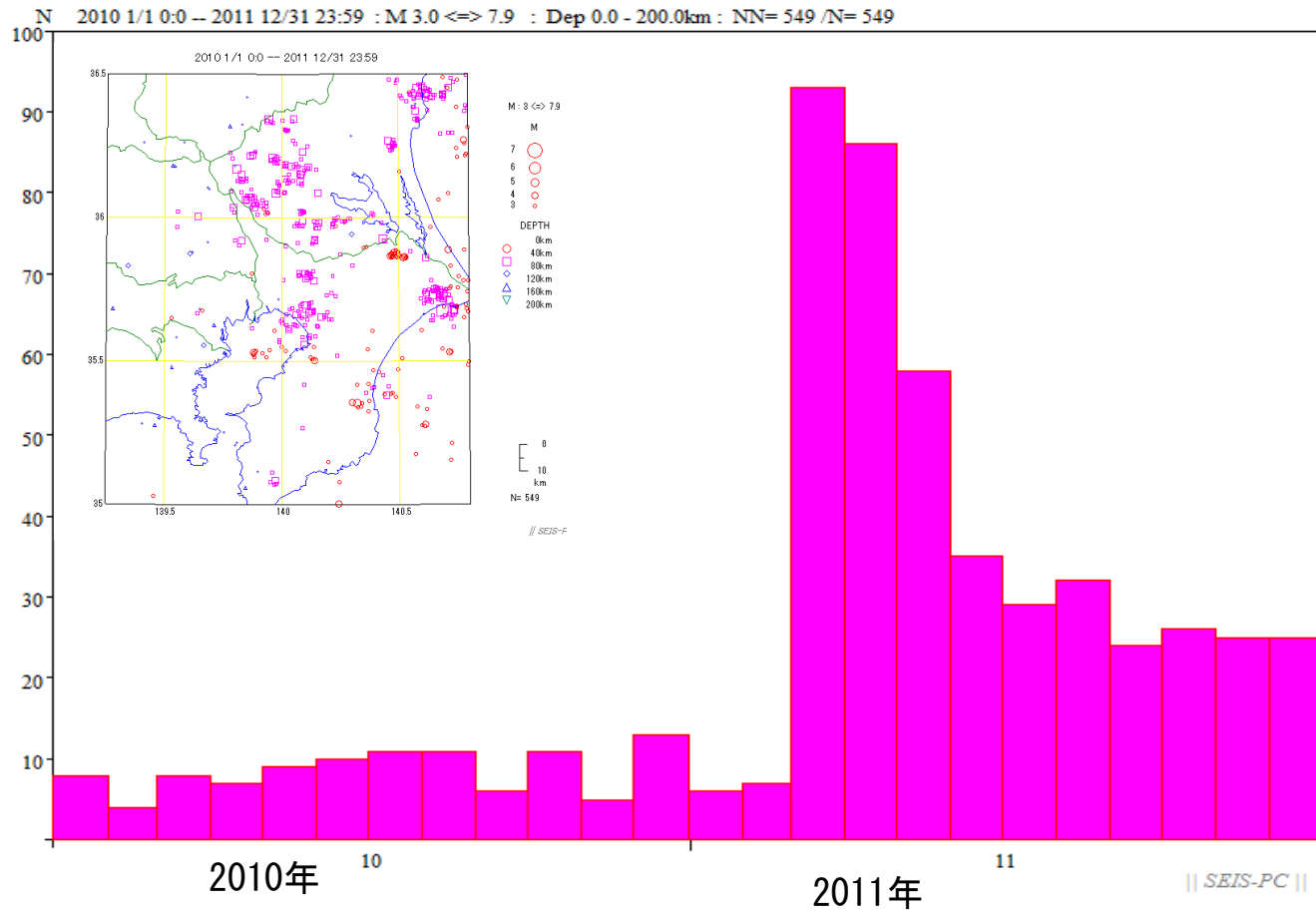


図2全域の月別地震回数

産総研, 石川有三さんから

図15

1995年兵庫県南部地震の後も丹波山地で地震活動が活発

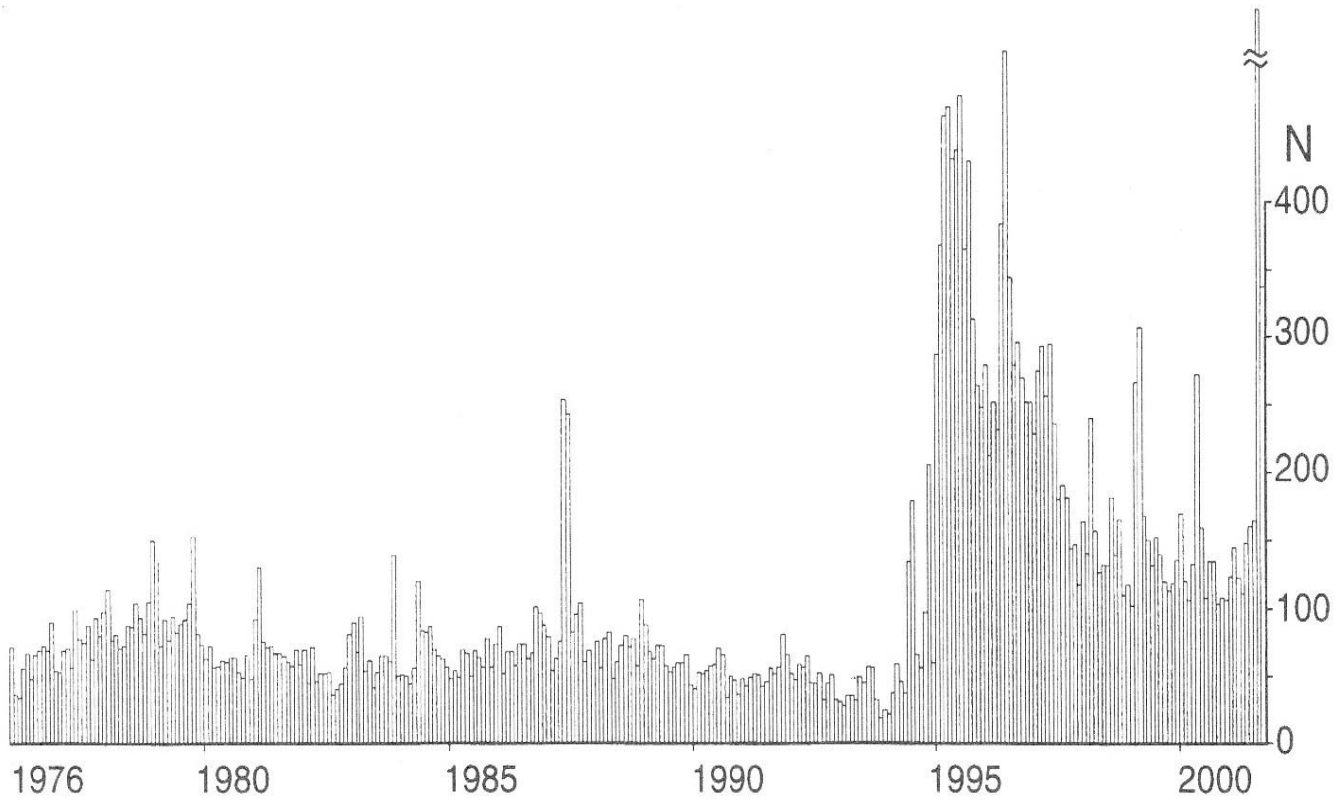


図7 京大阿武山系観測網による図1中央の矩形領域内の月別地震発生数. 1976年1月～2001年9月.

## 基礎講座 まとめ

### 地震の規模別頻度分布（M別頻度分布）

Gutenberg-Richter's formula（G-R則）

- ・ 小さい地震ほどたくさん起こる
- ・ 地震の積算回数を対数グラフにプロット → 直線になる
- ・ 発見者の名を冠してG-R則と呼ぶ.
- ・ 直線の勾配をb値（b value）と言う
- ・ 広い領域，長い時間をとればb値は1.0になる
- ・ b値が1.0 → M6が10回に対してM7が1回の割で起こる
- ・ b値には地域性がある → 地殻の状態を表現
- ・ b値が時間変化する → 地殻の状態変化を示唆