



地震研究所共同利用研究集会
地震活動の物理・統計モデルと発生予測
平成20年7月17日～18日（2号館第1会議室）

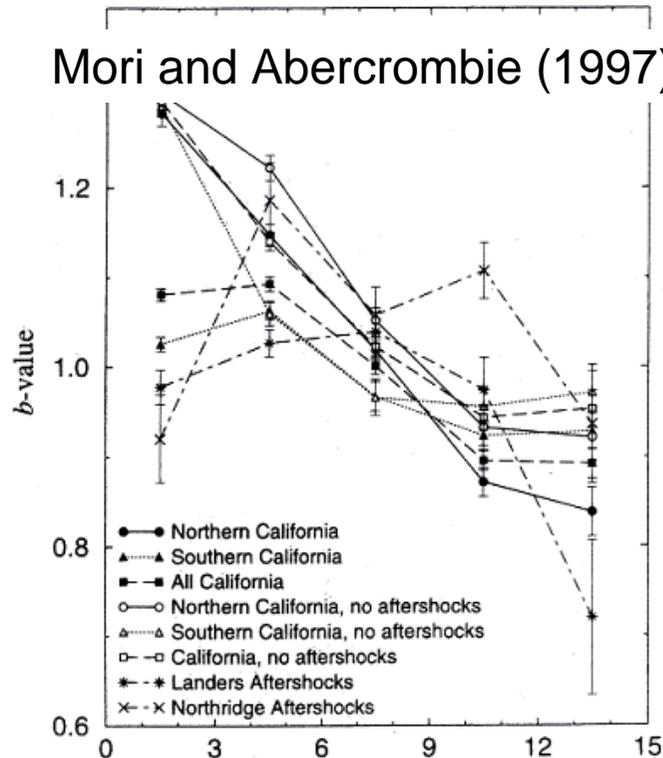
b 値のメカニズム・震源の深さ依存性

石辺岳男・鶴岡弘・島崎邦彦
（東京大学地震研究所）

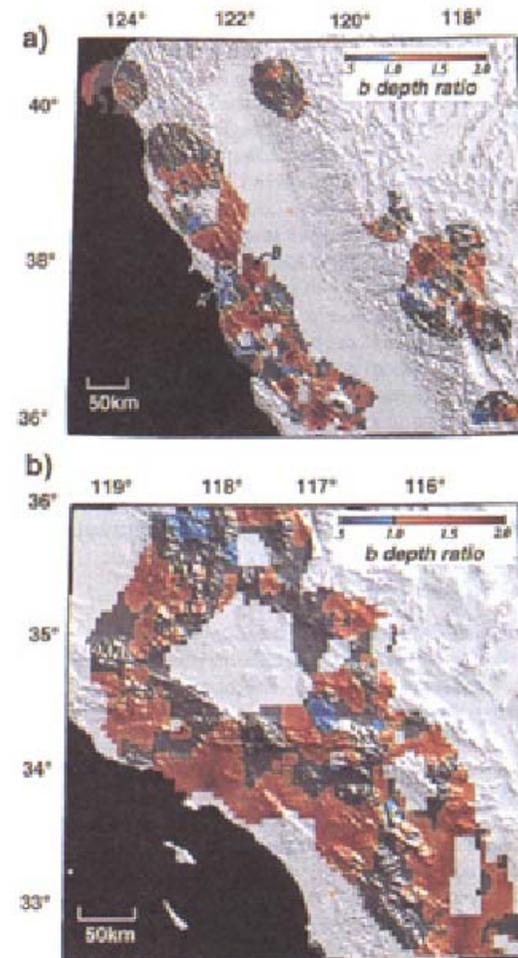


b値の震源の深さ依存性

Mori and Abercrombie (1997)



- カリフォルニアにおいて、大地震の余震を含む含まないに関わらず、地震の深さが増加するにつれてG-R則の**b値**が系統的に低下。
- 浅い深さの地震は高い不均質性から破壊は大地震に成長する前に停止しやすく、相対的に小規模の地震が発生しやすい。その一方で、深い地震は不均質性が低下するため、イベントが相対的に大地震に成長しやすい傾向にありこれが**b値**の深さ依存性を産み出す



Gerstenberger et al. (2002)

b値は不均質性を反映？

b値の震源メカニズム依存性

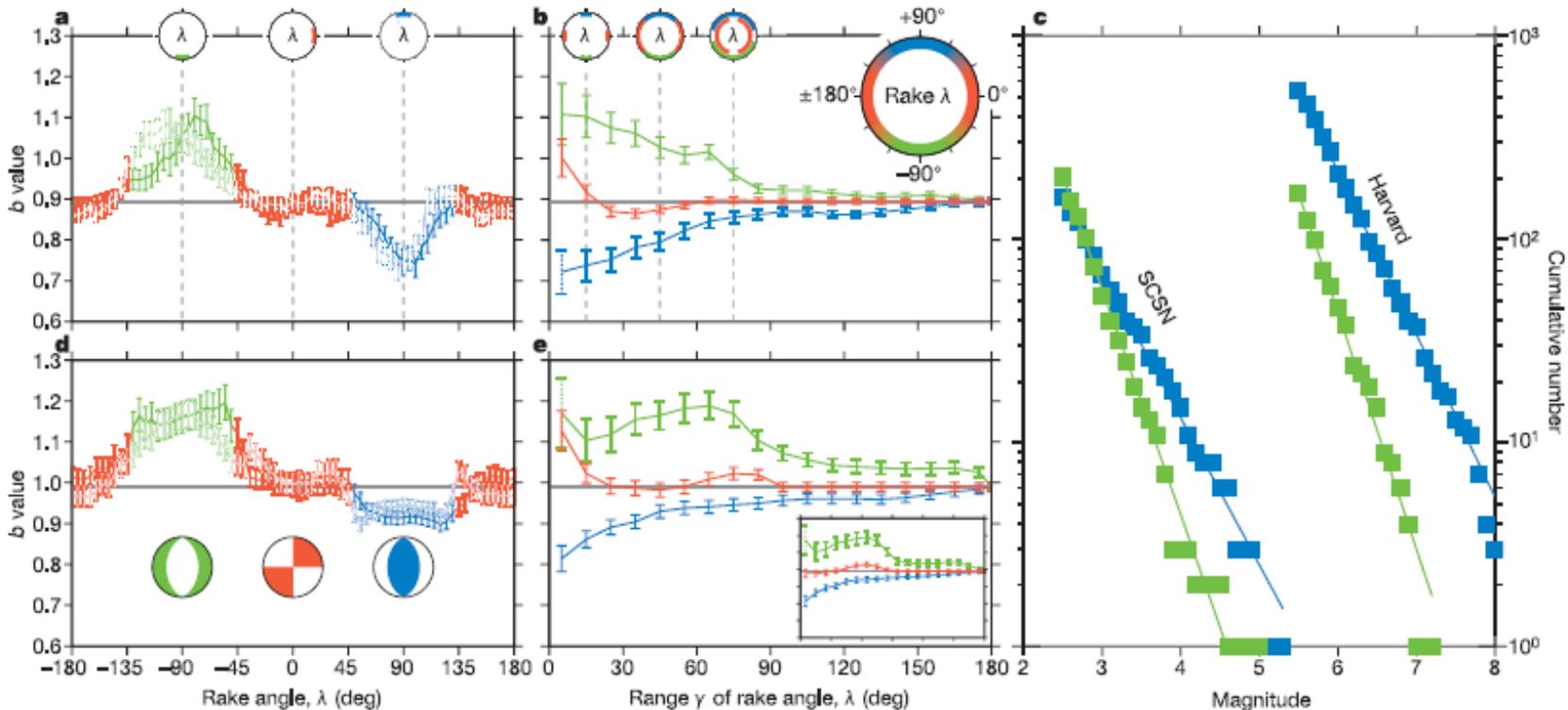


Figure 1 | Plots of b against rake angle and range of rake angle. **a**, b_λ plot of events in southern California, from the SCSN catalogue. In all frames the green, red and blue lines (solid, first plane; outlined, second plane) mark the b values of mainly normal, strike-slip and thrust events, respectively; the grey line marks the average b value and the vertical bars indicate the standard error⁷. (Solid bars are used for samples with $N \geq 200$, and dashed bars for samples with $200 > N \geq 100$). The circles at the top of the frame show the rake λ used for computing the b values $\lambda = -90^\circ \pm \gamma$, $\lambda = 0^\circ \pm \gamma$

and $\lambda = 90^\circ \pm \gamma$, $\gamma = 20^\circ$. **b**, b_γ plot of events in southern California. The circles at the top of the frame show the range of rake λ used for computing the b values ($\gamma = 15^\circ, 45^\circ$ and 75°). Inset, circle explaining the rake values and the corresponding colours of the classes of events. **c**, Frequency-magnitude distributions for pure normal (green) and pure thrust (blue) events of the SCSN and Harvard catalogues ($\gamma = 5^\circ$). **d**, As **a** for the Harvard catalogue. **e**, As **b** for the Harvard catalogue. Inset, as main panel but considering only the rake of the first nodal plane.

b値は応力を反映？

Schorlemmer et al. (2005)

b値についての相違についてのいくつかの解釈が存在.

(a) b値は物質の不均質性によって変化し, 物質の不均質性が高いほど高b値である [Mogi, 1962; Mori and Abercrombie, 1997].

(b) b値はせん断応力に依存し, 応力が高いほど低いb値になる [Scholz, 1968; Wyss, 1973, Urbanic et al., 1992; Hirose et al., 2002; Schorlemmer et al., 2005].

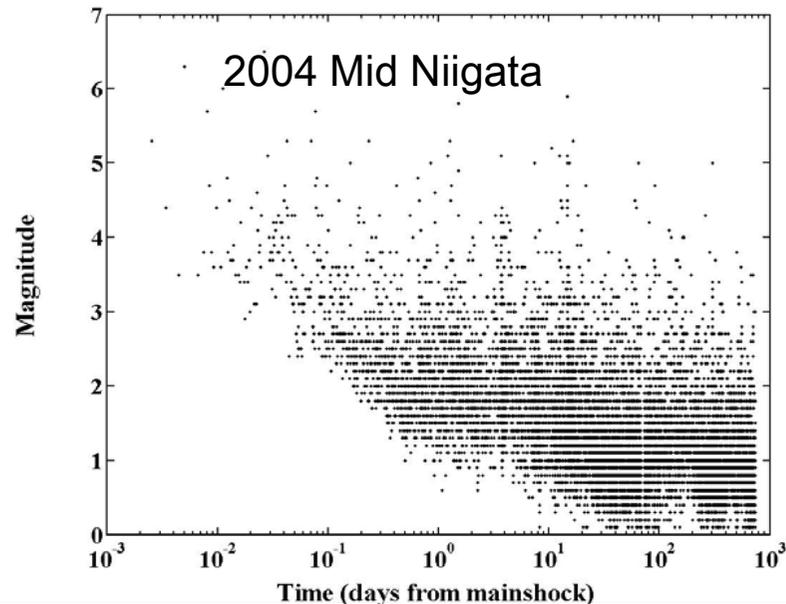
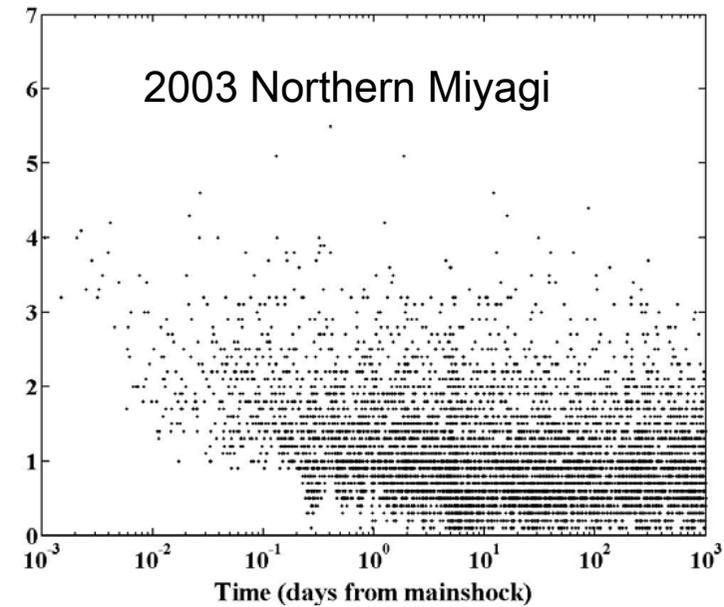
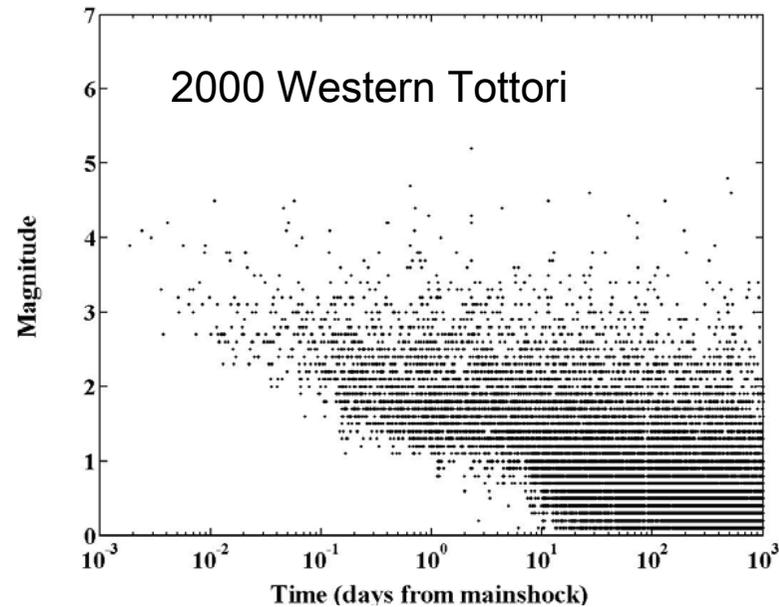
(c) b値は温度勾配と関連がある [Warren and Latham, 1970]

Purpose of this study

[1]一元化気象庁震源カタログをはじめとした様々なカタログを用いてb値の震源の深さ依存性、メカニズム依存性を検討

[2]b値の時空間変化の推定に影響を与えるバイアスについて検討

バイアス1:大地震発生直後の検出能力の低下



- 大地震発生直後においては、検出能力が低下し、微小地震の多数の検出漏れが発生することが報告されている (Ogata, 2001, 2004, 2005; Enescu and Ito, 2002; Kagan, 2005; Ogata and Katsura, 2006など)
- このような時空間領域を含めると、解析に影響を及ぼす危険性

2000年鳥取県西部地震発生後の均質限界マグニチュードの時間的推移

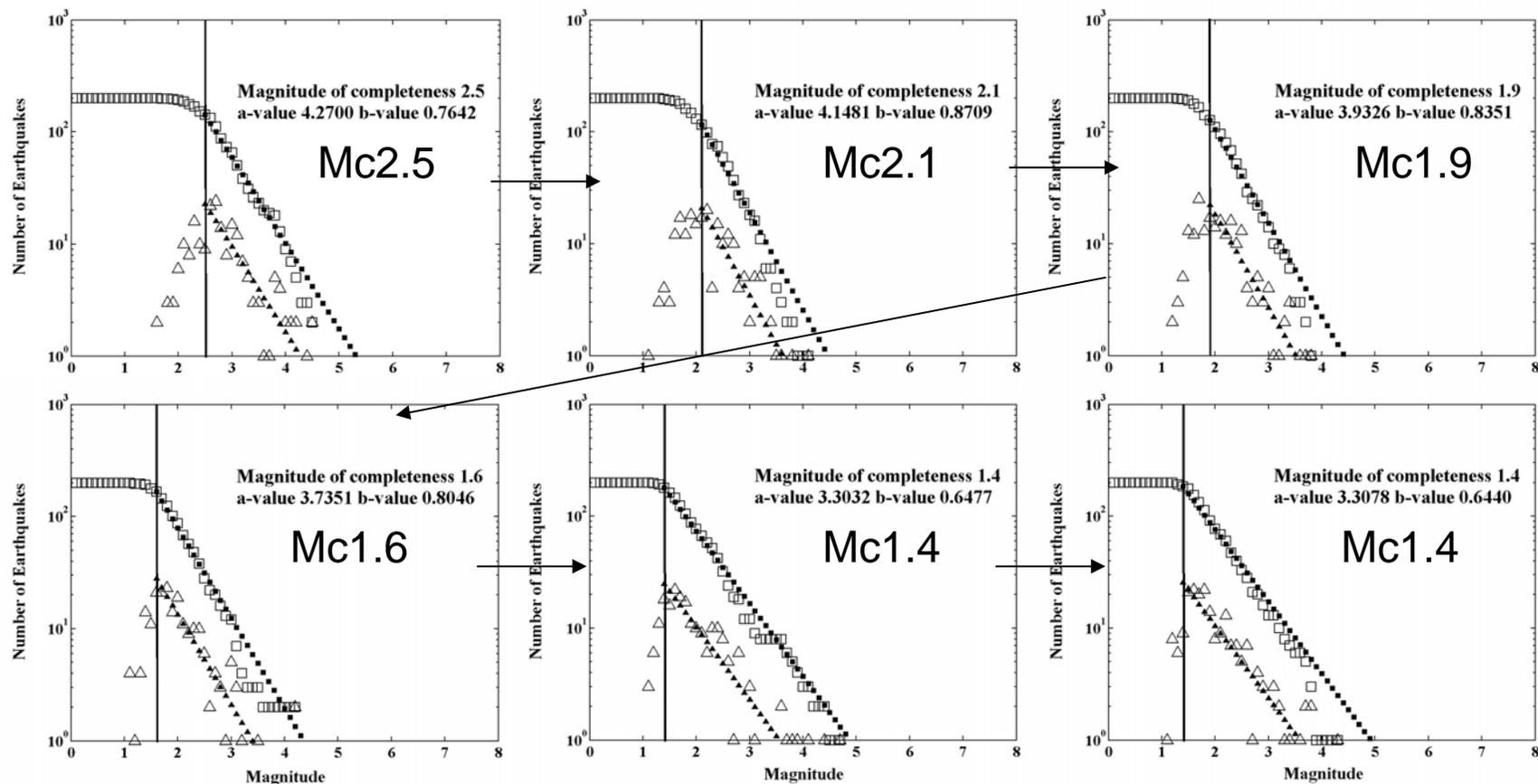


Figure. Temporal changes of the minimum magnitude of completeness for the 2000 Western Tottori earthquake aftershock sequence. The black vertical line indicates the minimum magnitude of completeness estimated by Wiemer and Wyss (2000)'s method.

⇒大地震発生直後は多数の余震の検出漏れにより、均質限界マグニチュードが上昇

⇒カタログ期間内に発生したM6+地震の震源域を除外した場合についても検討

最近接観測点からの震央距離と深さの決定誤差の関係

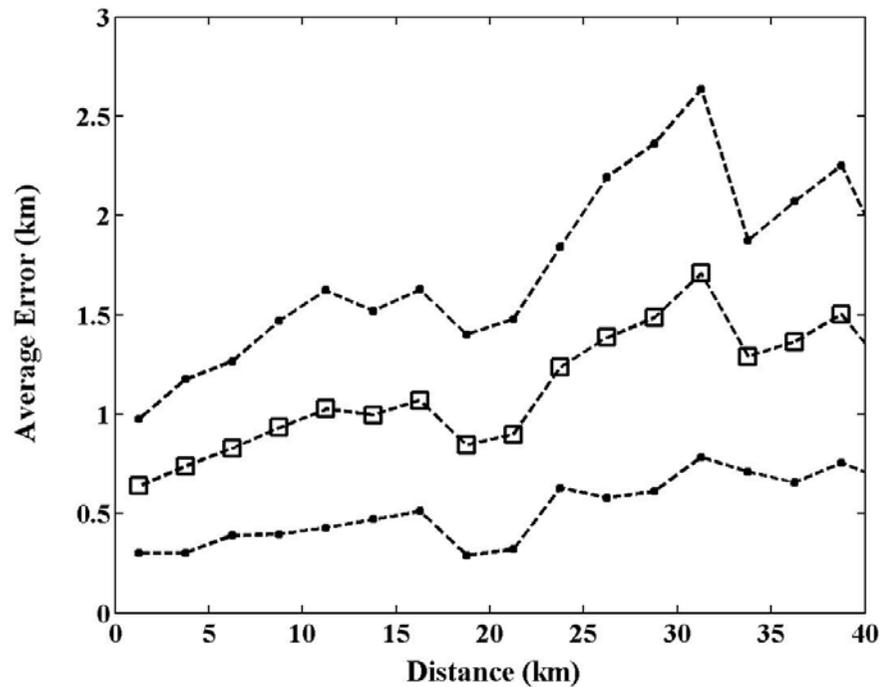


Figure Average error and its standard deviation in depth direction as a function of epicentral distance from the nearest seismic station.

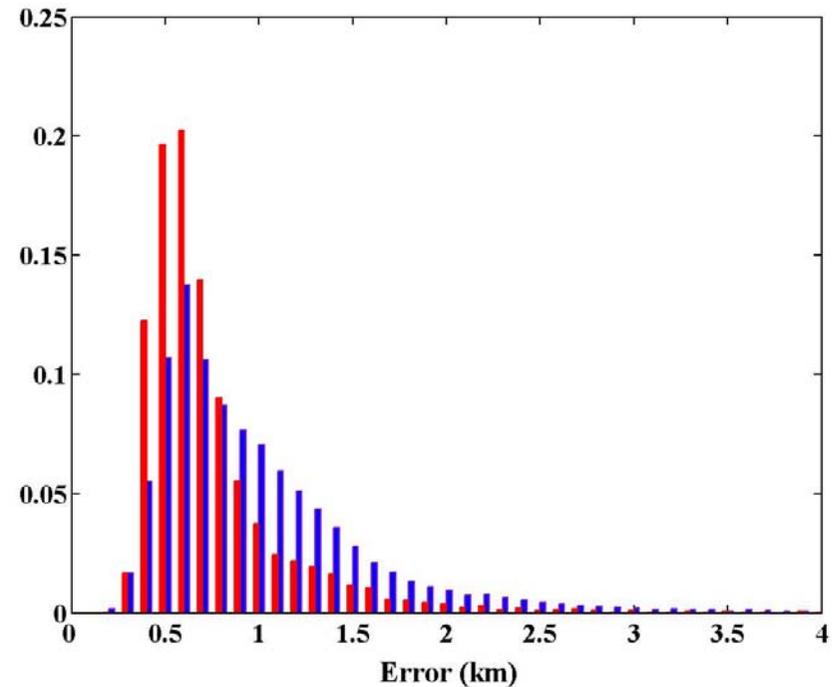
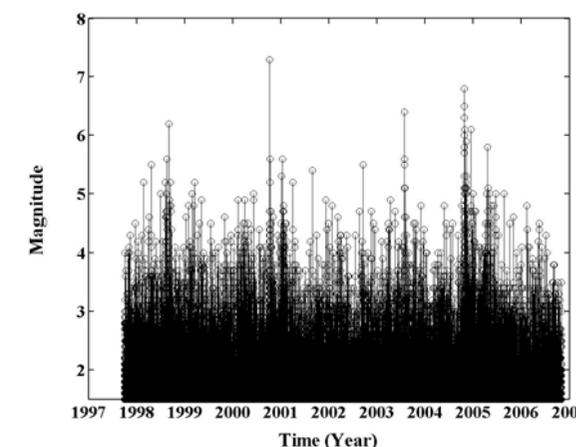
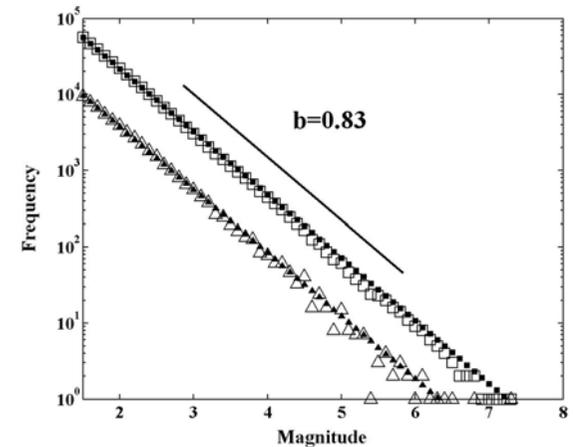
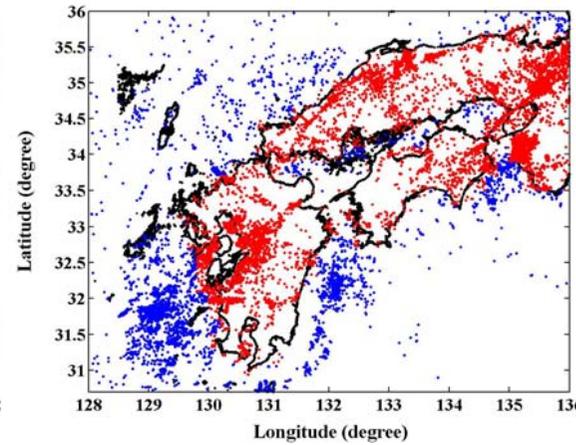
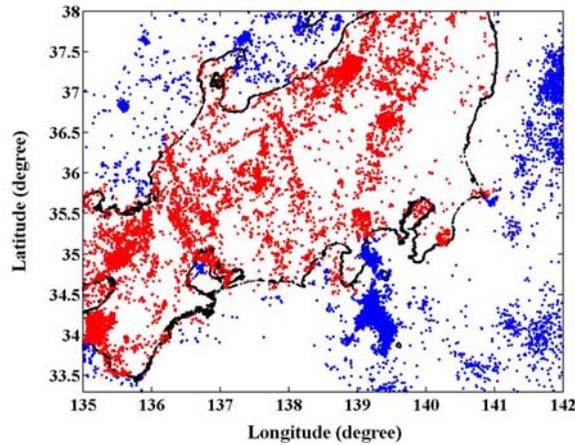
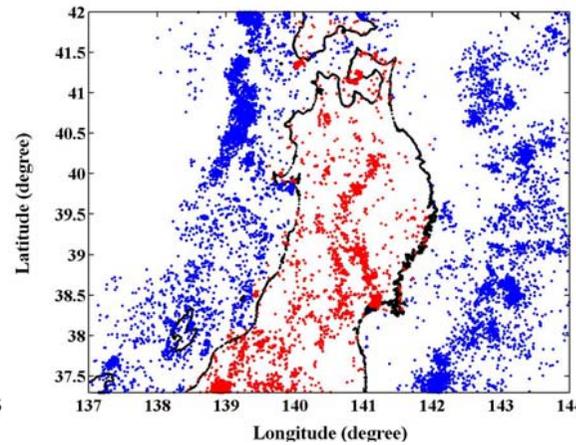
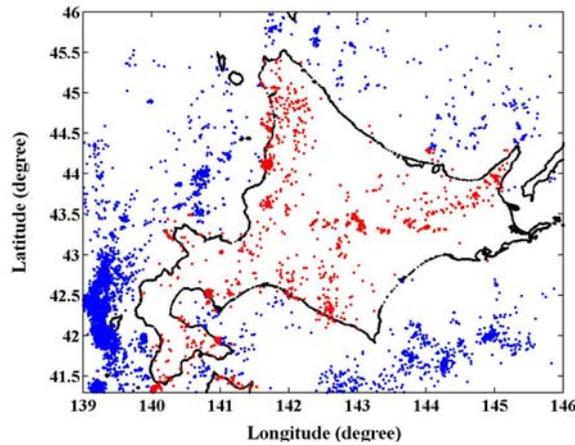


Figure Red bars and blue bars indicate the probability density function for events occurred within and over 5km epicentral-distance from the nearest seismic station, respectively

観測点近傍のイベントほど、相対的に深さ方向の震源決定精度が高い

⇒最近接観測点から震央距離5km以内で発生した地震のみによる b 値の深さ依存性を検討



Data Set

一元化気象庁震源カタログを用いた解析

カタログ期間: 1997年10月~2006年10月

震源の深さ: 0~20km

マグニチュード: $M \geq 1.5$

日本内陸で発生した地震(図中の赤点)のみを使用

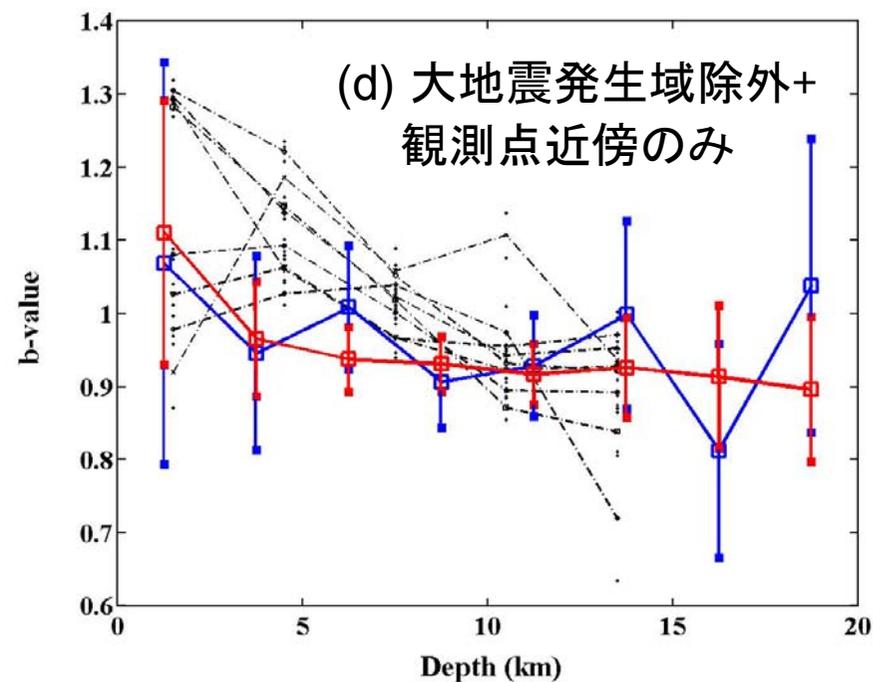
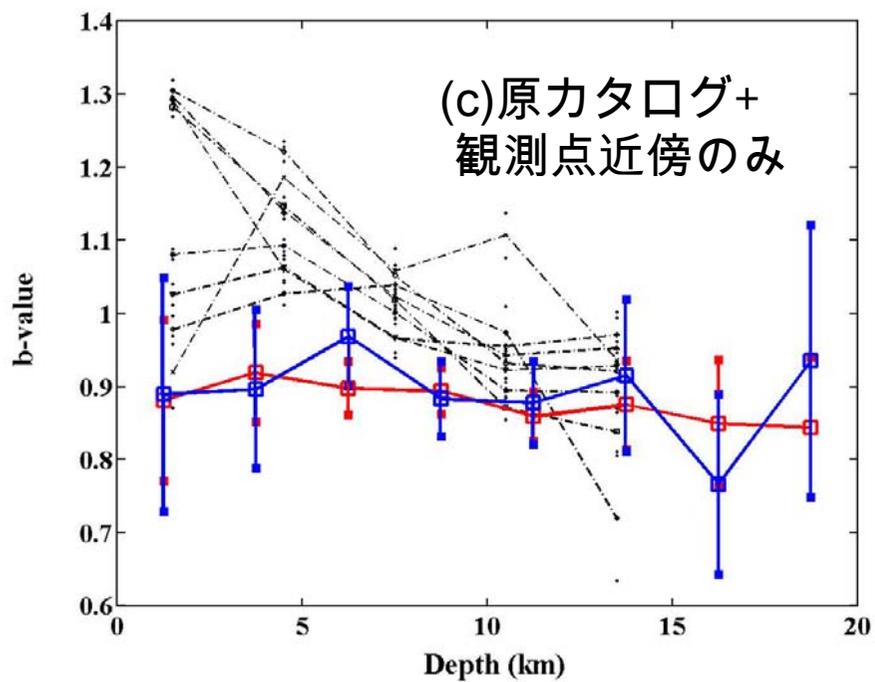
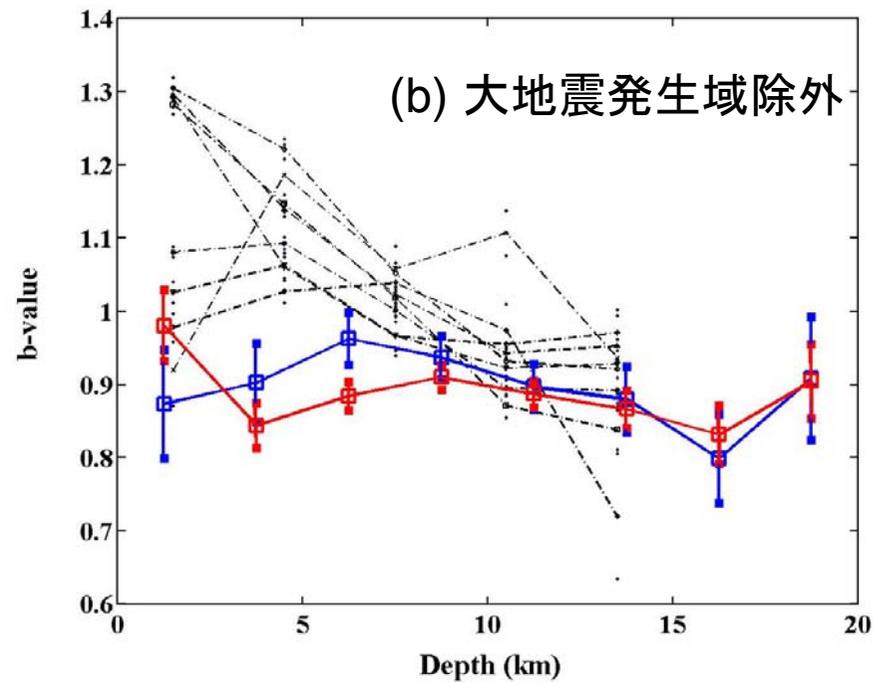
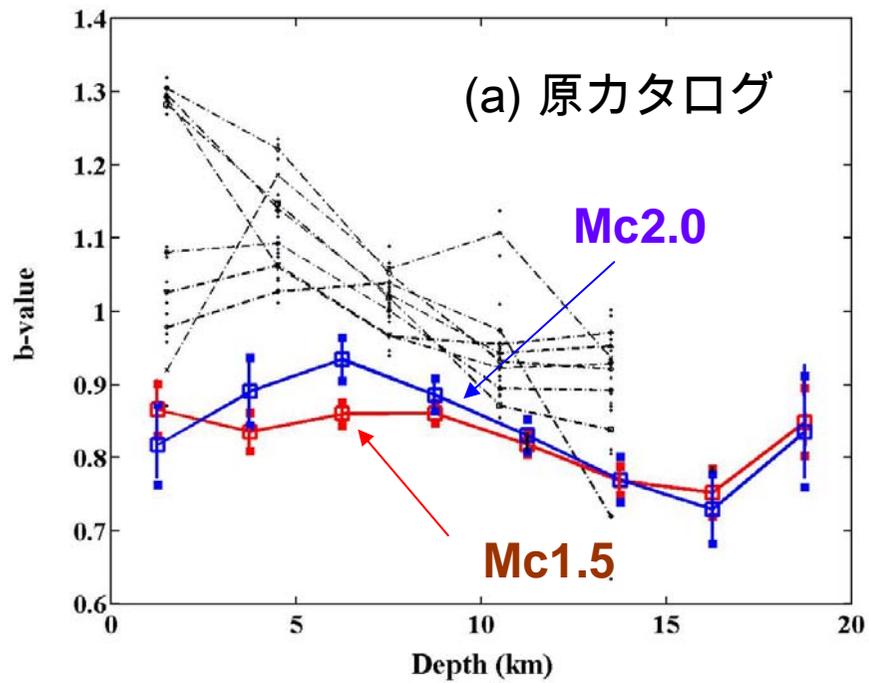
Methodology

[1]Mori and Abercrombie (1997)に準拠した手法……

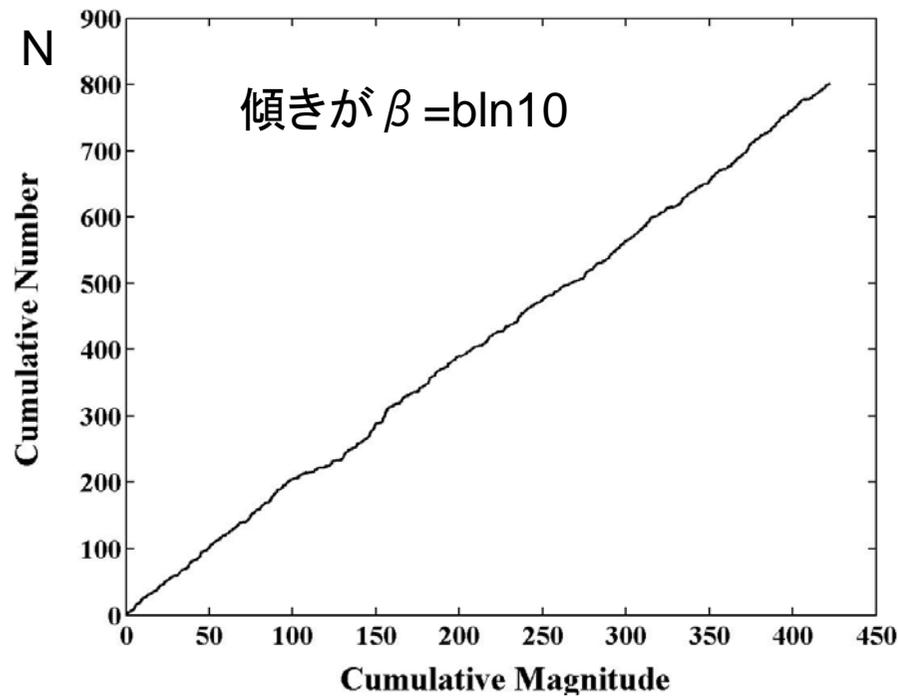
震源の深さで2.5km刻みでグルーピングを行い、それぞれの深さ範囲内で発生した地震の b 値を最尤推定により、標準偏差をShi and Bolt (1982)により推定

[2]Cumulative Magnitude curveに類した手法

[3]dAICを用いた有意性検定



[2] Cumulative Magnitude Curveに類した手法

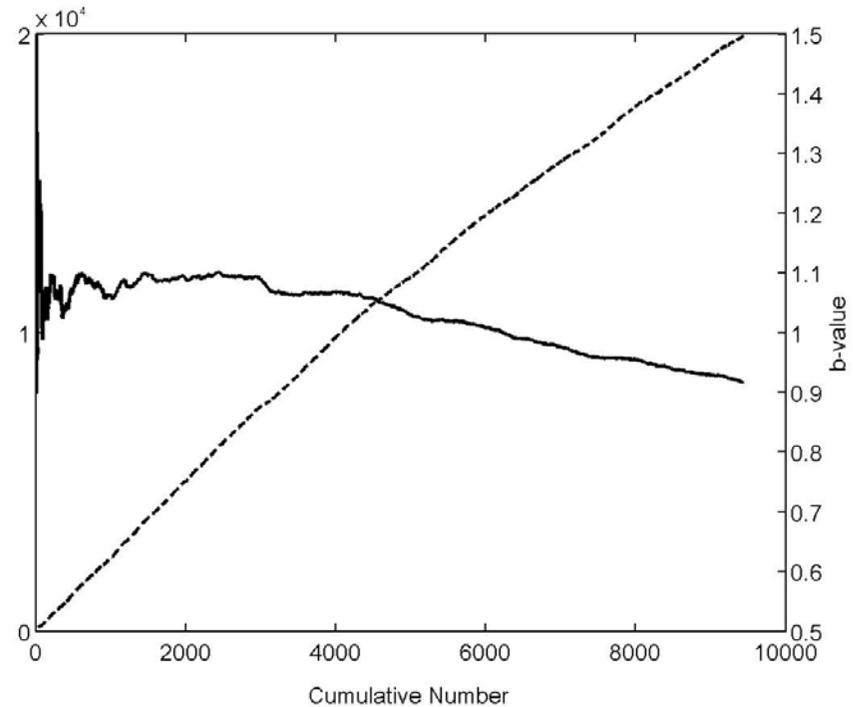


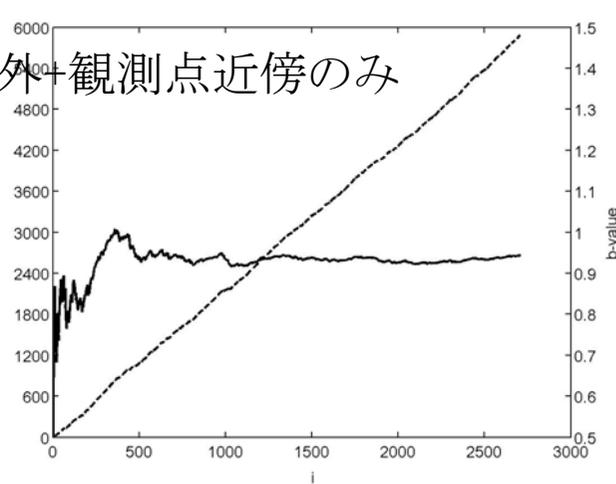
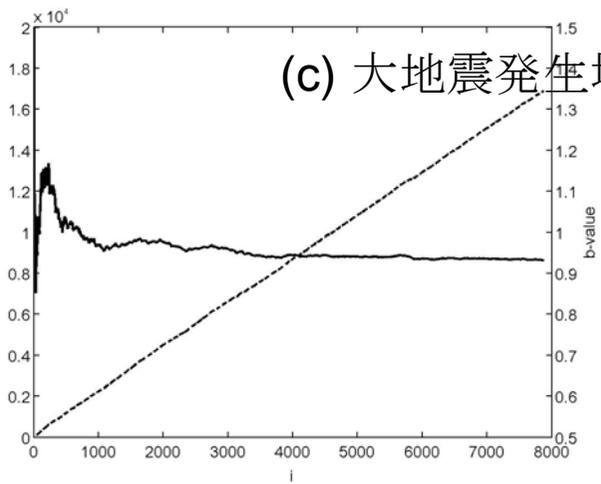
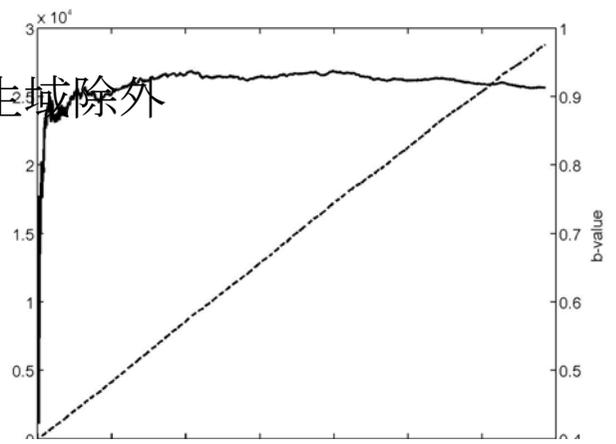
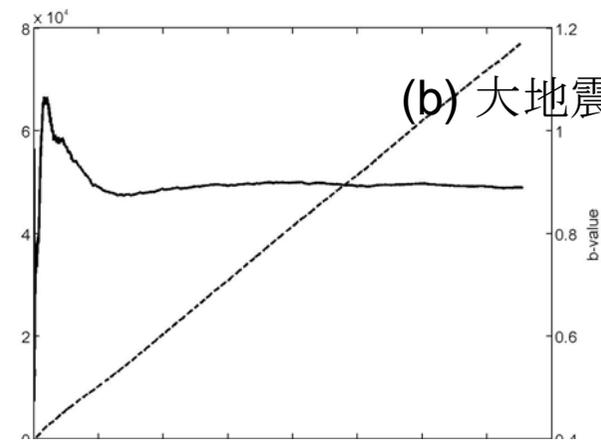
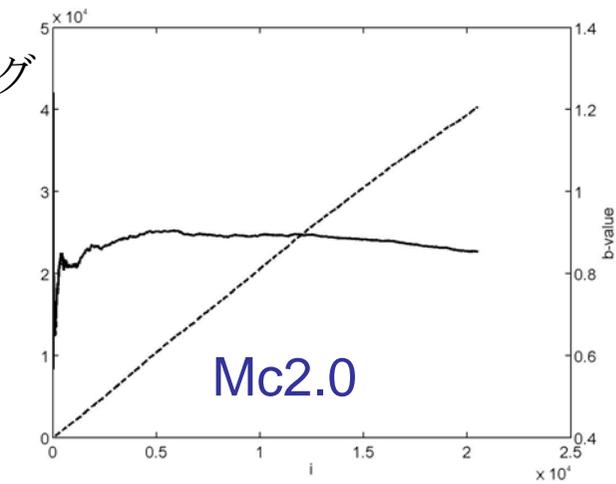
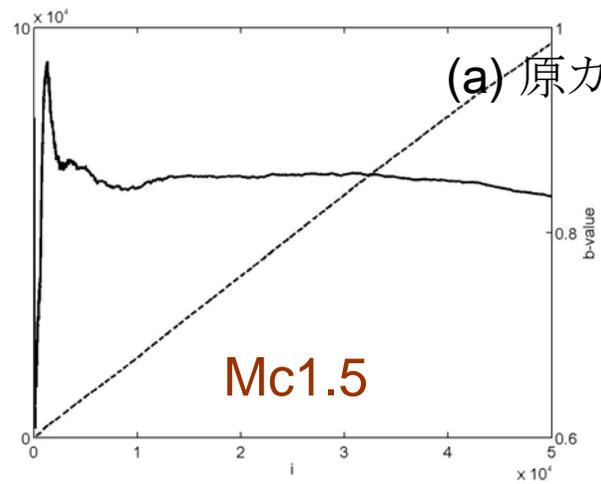
$$\sum M_i - N * M_z$$

横軸を累積度数にした場合に, 曲線の傾きが β となる縦軸
は $N^{**2} / (\sum M_i - N * M_z)$

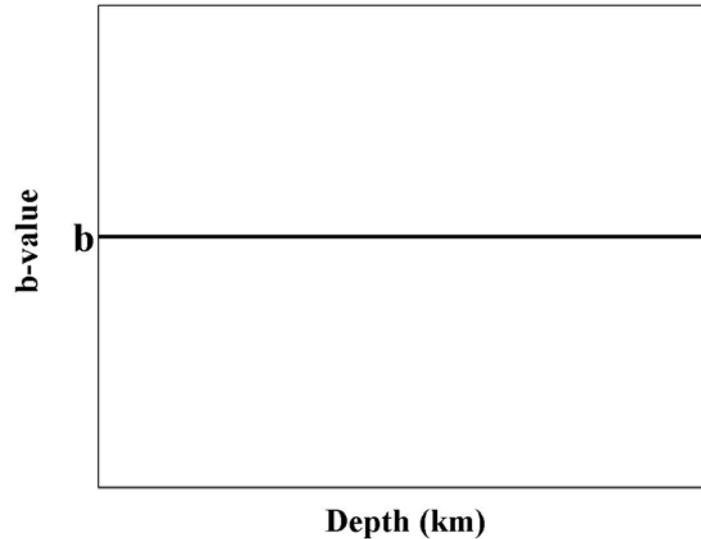
⇒ cumulative number vs. $N^{**2} / (\sum M_i - N * M_z)$

⇒ cumulative number vs. b-value ($\log_e(10) / (\sum M_i - N * M_z)$)



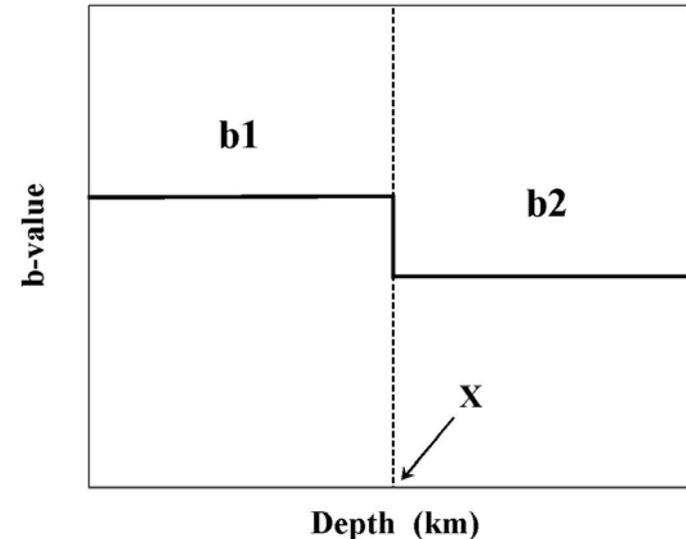


〔3〕 $dAIC$ を用いた b 値の差の有意性の検定



(仮説1) b 値に震源の深さ依存性は認められず, すべての地震 $N=N_1+N_2$ に対して $b=b$

$$AIC_1 = -2N \ln \beta + 2N + 2$$



(仮説2) b 値に震源の深さ依存性が認められ, ある深さ X よりも浅い地震 N_1 個について $b=b_1$, N_2 個の X よりも深い地震に対して $b=b_2$ で書き表される

$$AIC_2 = -2N_1 \ln \beta_1 - 2N_2 \ln \beta_2 + 2N + 4$$

$$\delta AIC = AIC_1 - AIC_2 = -2N \ln \beta + 2N_1 \ln \beta_1 + 2N_2 \ln \beta_2 - 2$$

$\Delta AIC > 0$ の場合, 2群に分けたほうが統計的によいことになり, 一般的に2を超えると統計的に有意. あるカットオフ深さ X を与え, X よりも深い位置で発生した地震の b 値と X よりも浅い位置で発生した地震の b 値の違いの統計的有意性を検定

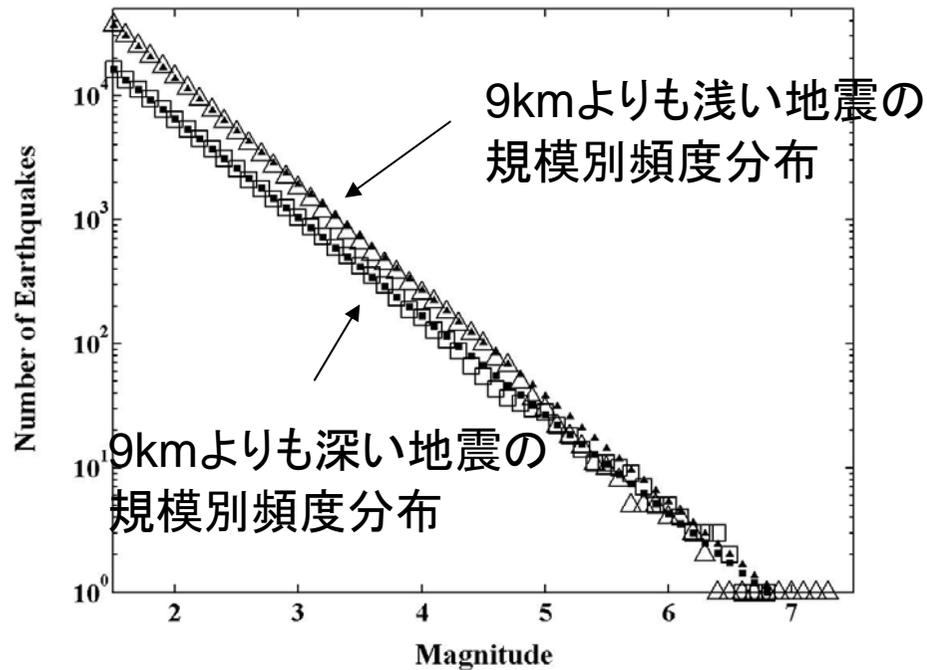
(a) Original JMA

X (km)	NUM1	NUM2	NUM3	b1	b2	b3	AIC1	AIC2	dAIC
5	52957	6134	46823	0.8329	0.8477	0.8310	36941.5	36941.3	0.1
6	52957	9336	43621	0.8329	0.8429	0.8308	36941.5	36941.8	-0.4
7	52957	13197	39760	0.8329	0.8543	0.8261	36941.5	36932.3	9.2
8	52957	18361	34596	0.8329	0.8543	0.8220	36941.5	36925.7	15.7
9	52957	24583	28374	0.8329	0.8560	0.8139	36941.5	36910.1	31.4
10	52957	31153	21804	0.8329	0.8578	0.7998	36941.5	36880.3	61.2
11	52957	36872	16085	0.8329	0.8514	0.7935	36941.5	36887.5	53.9
12	52957	41901	11056	0.8329	0.8491	0.7769	36941.5	36873.2	68.2
13	52957	45544	7413	0.8329	0.8428	0.7772	36941.5	36900.9	40.6
14	52957	47927	5030	0.8329	0.8388	0.7808	36941.5	36919.7	21.8
15	52957	49578	3379	0.8329	0.8363	0.7870	36941.5	36931.6	9.9

(b) Near Events from modified JMA

X (km)	NUM1	NUM2	NUM3	b1	b2	b3	AIC1	AIC2	dAIC
5	7872	735	7137	0.9317	0.9896	0.9261	3728.9	3728.0	0.9
6	7872	1219	6653	0.9317	0.9669	0.9255	3728.9	3728.9	-0.1
7	7872	1928	5944	0.9317	0.9785	0.9175	3728.9	3724.9	4.0
8	7872	2837	5035	0.9317	0.9626	0.9151	3728.9	3726.2	2.6
9	7872	3908	3964	0.9317	0.9427	0.9211	3728.9	3729.8	-0.9
10	7872	4833	3039	0.9317	0.9415	0.9166	3728.9	3729.5	-0.7
11	7872	5507	2365	0.9317	0.9397	0.9135	3728.9	3729.5	-0.7
12	7872	6260	1612	0.9317	0.9350	0.9192	3728.9	3730.5	-1.6
13	7872	6740	1132	0.9317	0.9352	0.9116	3728.9	3730.2	-1.4
14	7872	7036	836	0.9317	0.9352	0.9034	3728.9	3730.0	-1.1
15	7872	7226	646	0.9317	0.9340	0.9062	3728.9	3730.3	-1.5

(a) Original JMA



(b) Near Events from modified JMA

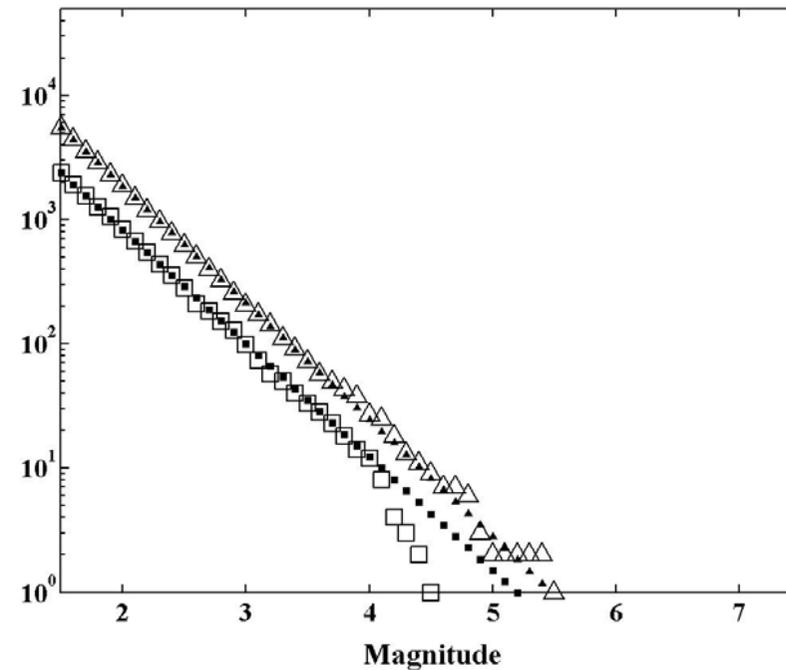
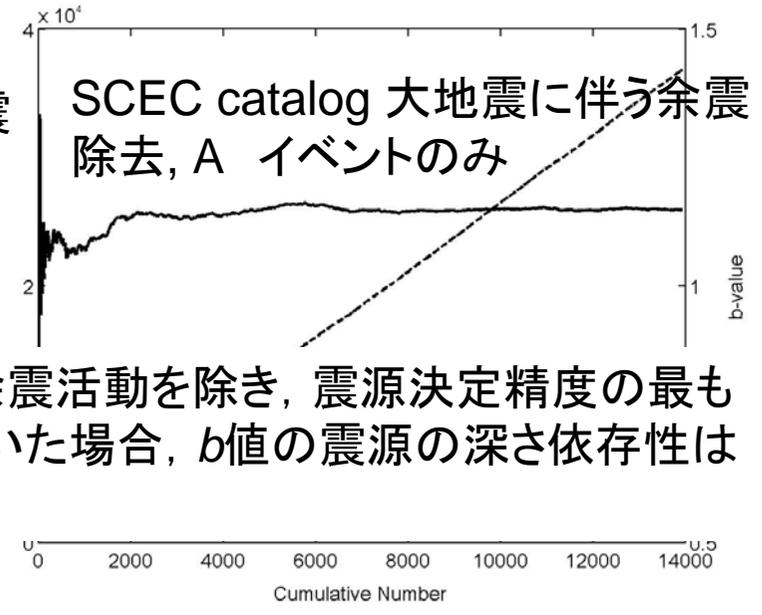
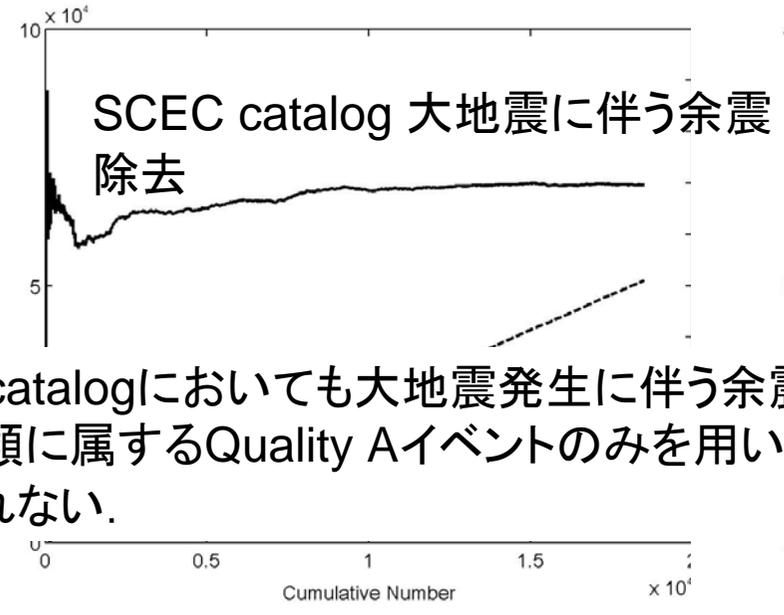
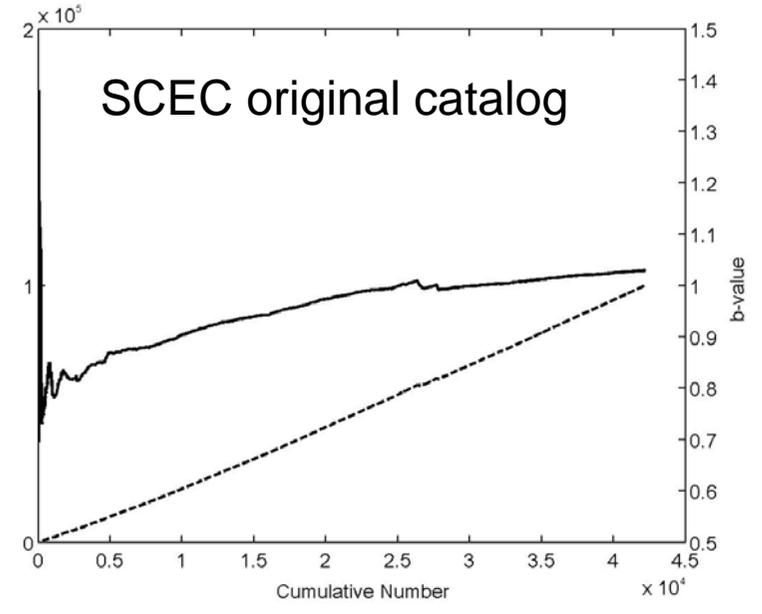
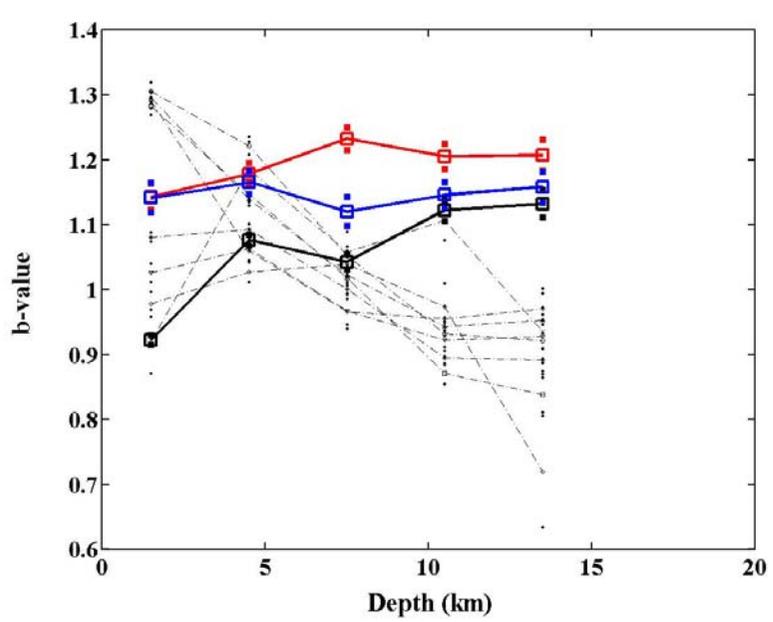


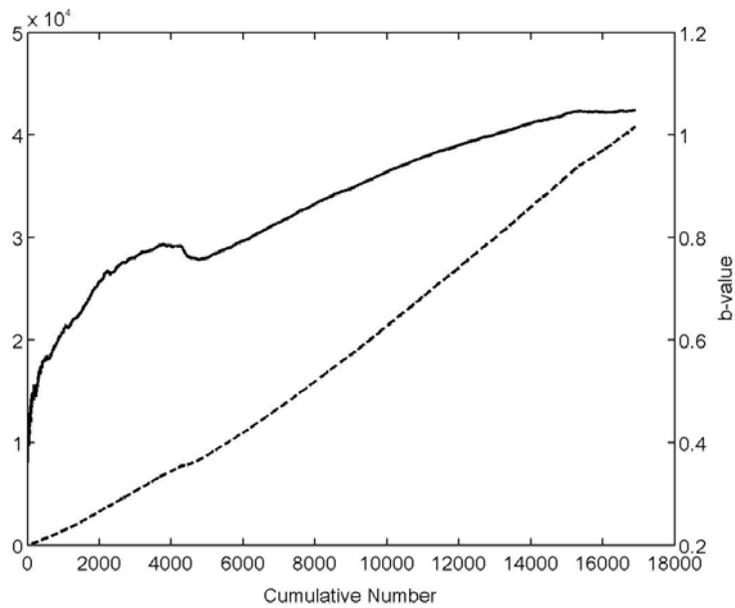
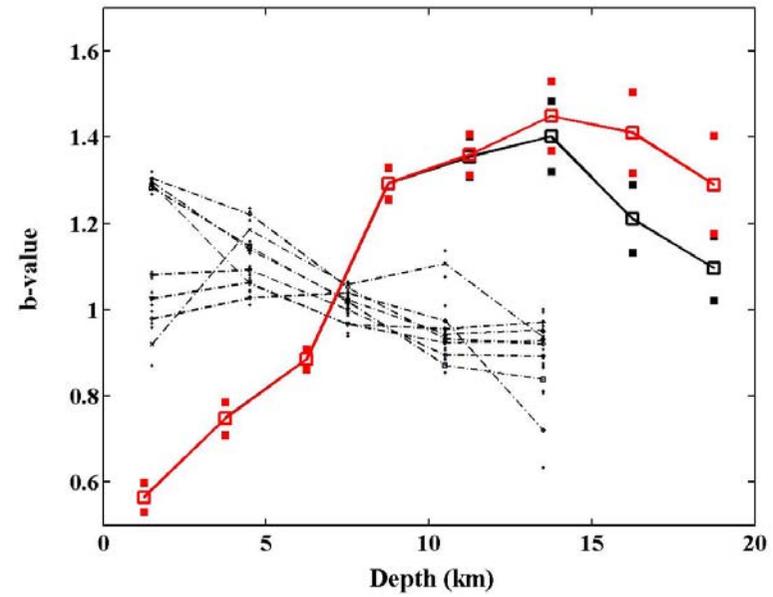
Figure. Magnitude frequency distribution of events occurred at shallower depth than 9km, which is denoted by open triangles, and at deeper than 9km, which is denoted by open squares. The filled triangles and squares indicate the synthetic distribution for each events.

Southern California Earthquake Center (SCEC) catalog

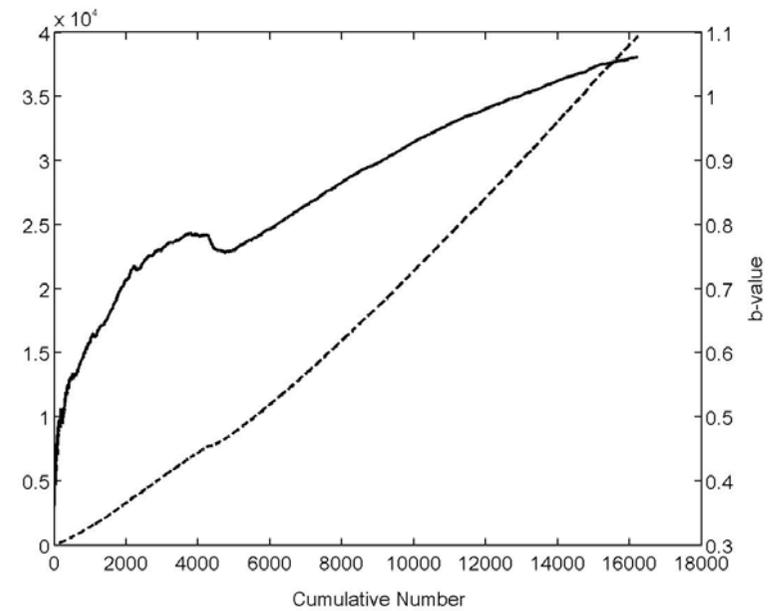


SCEC catalogにおいても大地震発生に伴う余震活動を除き、震源決定精度の最も高い部類に属するQuality Aイベントのみを用いた場合、*b*値の震源の深さ依存性は認められない。

防災科学技術研究所地震カタログ



原カタログ



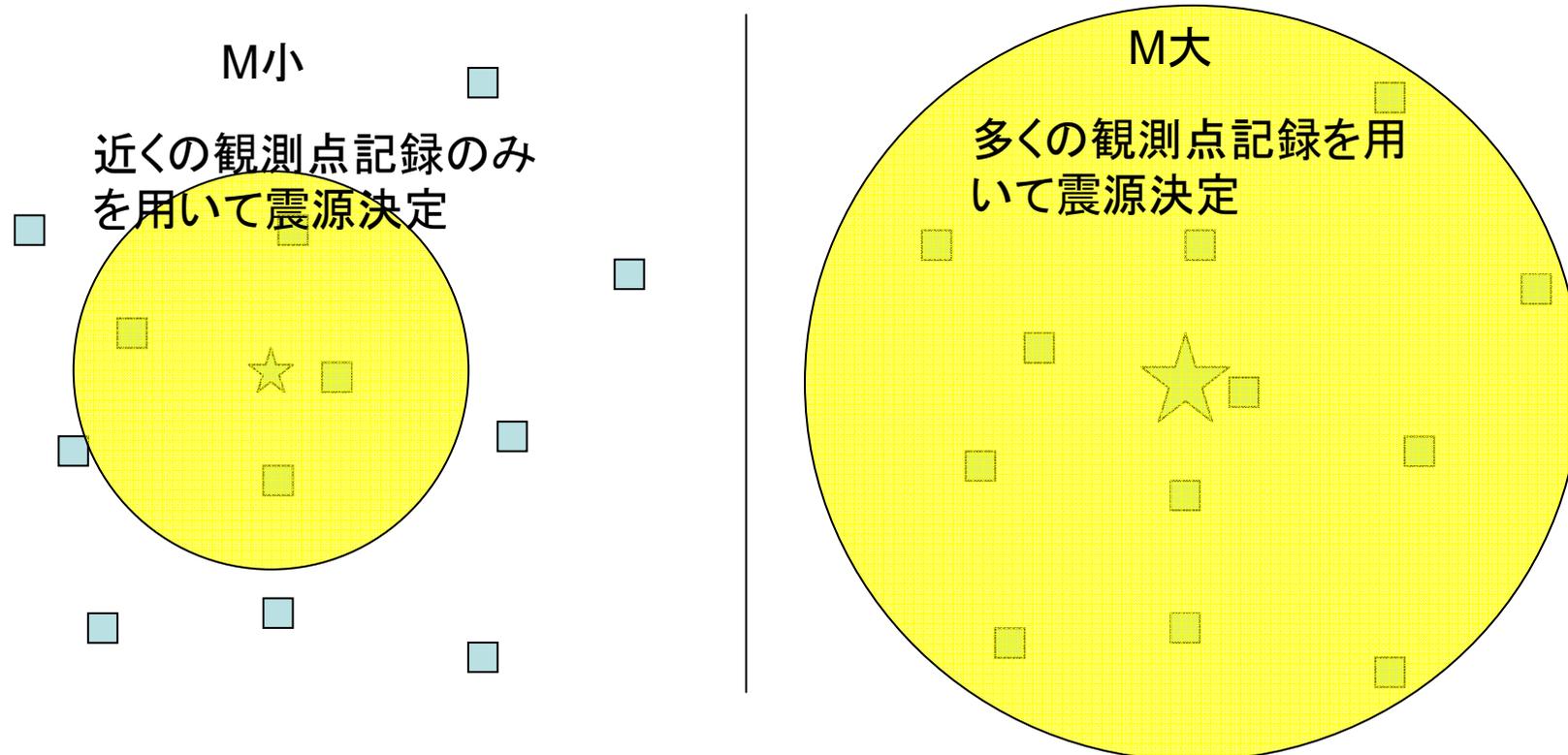
山梨県東部地震除外

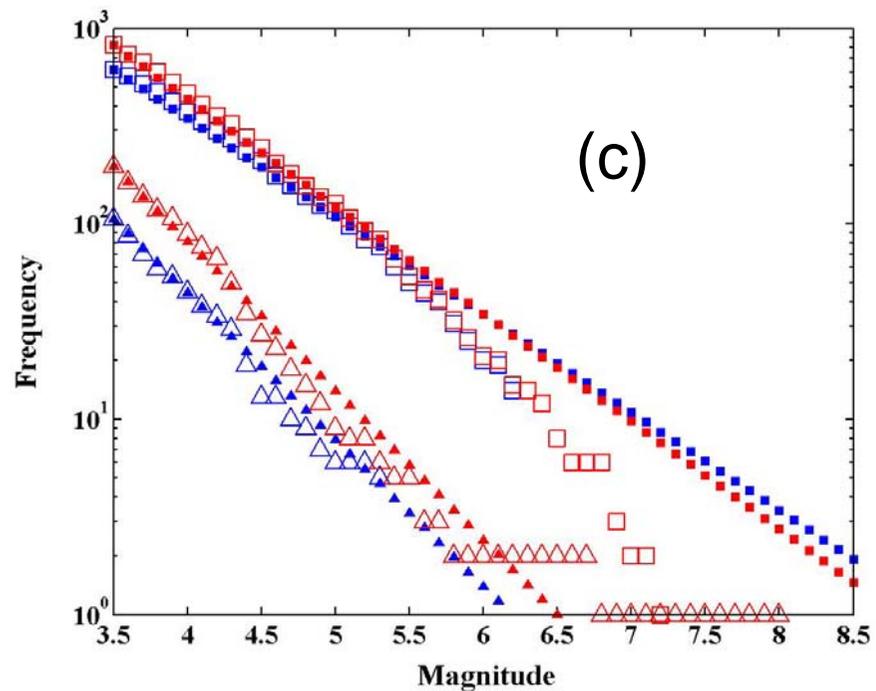
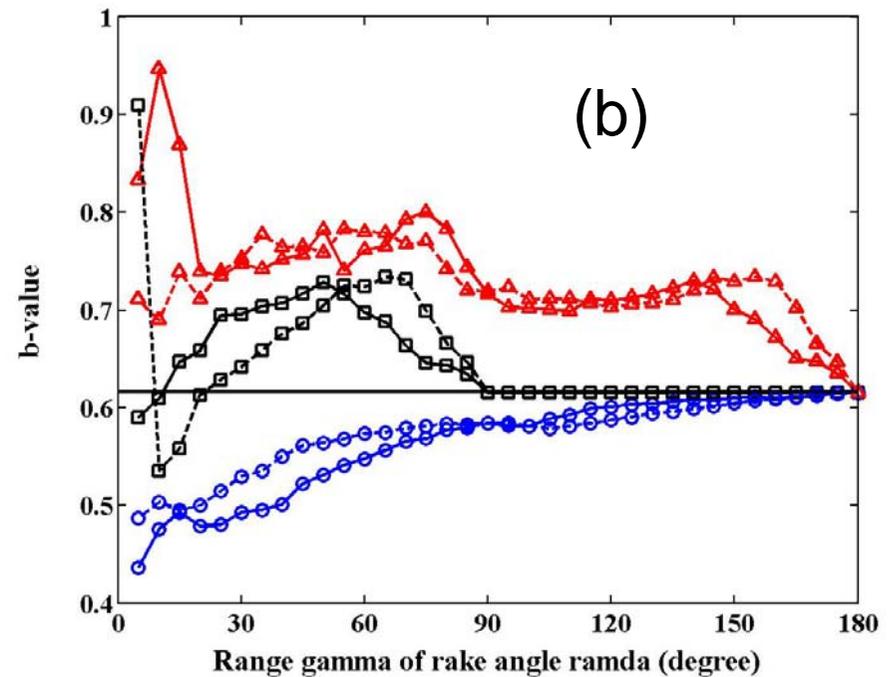
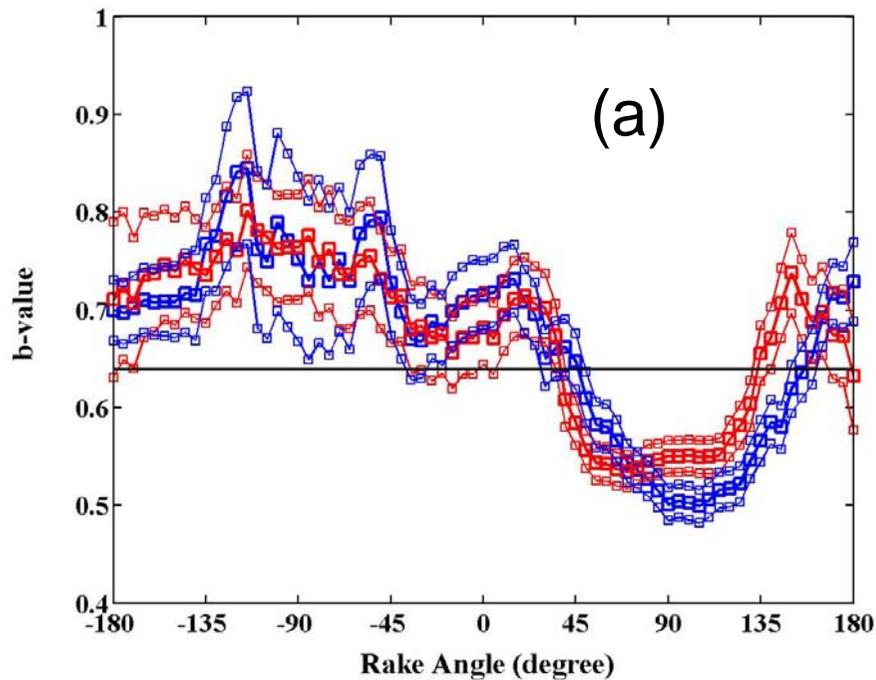
b値の震源の深さ依存性

- 一元化気象庁震源カタログやSCECカタログにおいては、大地震発生域を除外し相対的に震源決定精度の高いイベントのみを用いた場合統計的に有意なb値の深さ依存性は認められない。また、防災科学技術研究所地震カタログではb値は震源の深さと共に顕著に増加し、カリフォルニアで報告されたb値の深さ変化とは逆である。⇒震源やマグニチュード決定の際の系統的な偏りに起因する可能性もあり、本質的な変化であるか否かについては今後十分に検討する必要性。

[1]震源決定に用いられる観測点分布のマグニチュード依存性

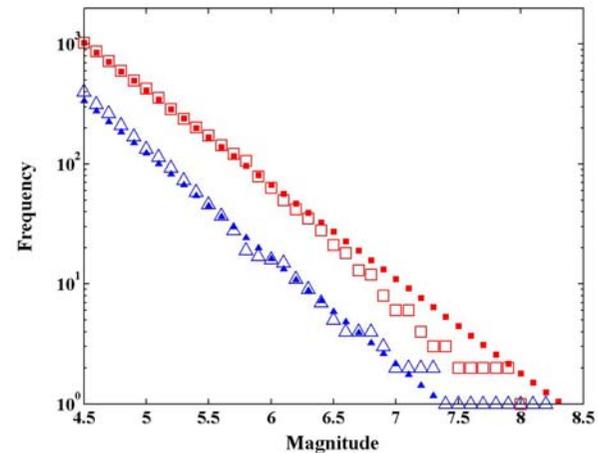
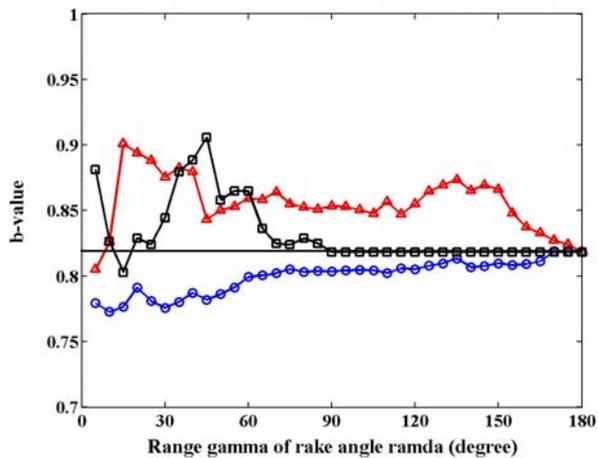
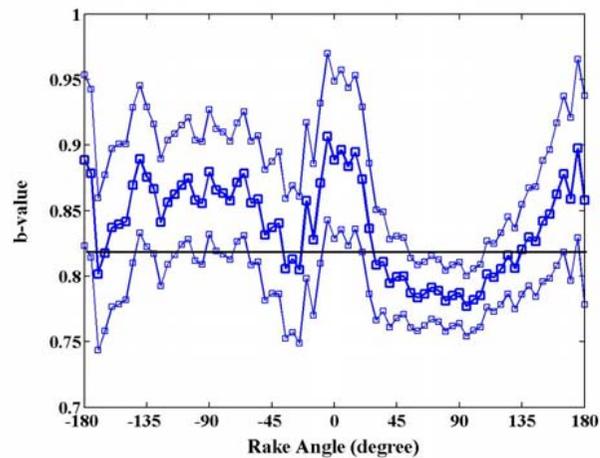
[2]推定マグニチュードの震源の深さ依存性



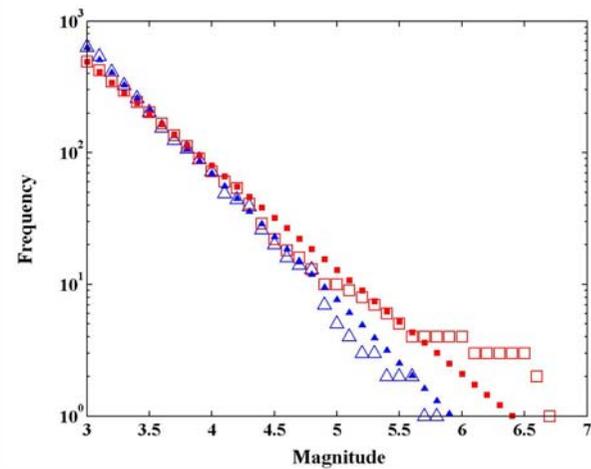
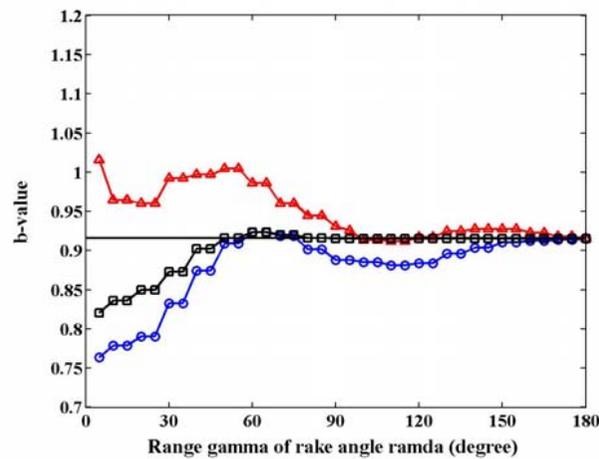
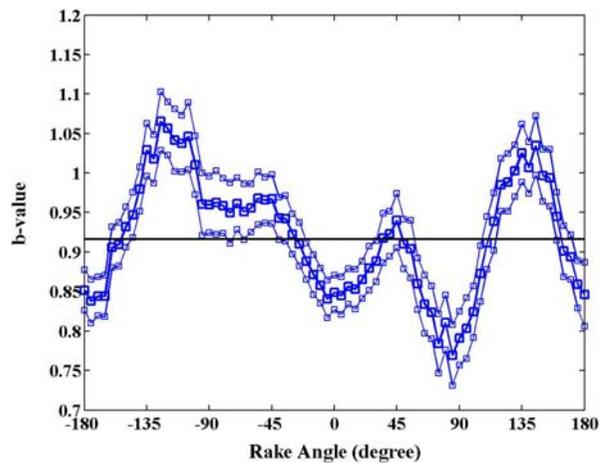


気象庁一元化初動メカニズム解

Figure. (a) b -value as a function of rake angle. The blue and red lines indicate the result for the first and second nodal plane and its range of 95 % confidence limit, respectively. (b) b -gamma plot. The red triangle, black square and blue circle respectively represent the b -value for earthquakes with normal-, strike-, and reverse-slip. (c) The MFD for thrust (triangles) and normal-events (circles)



防炎研究所地震カタログ



NCSNカタログ

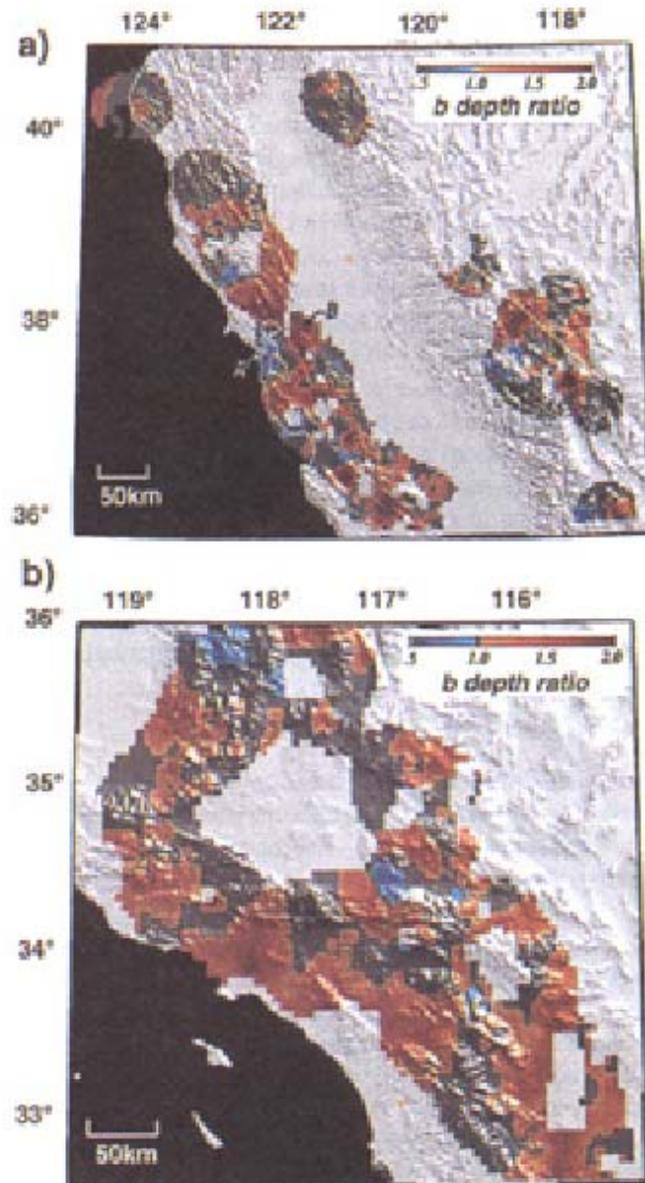
Conclusion

- (1) 一元化気象庁震源カタログにおいては、大地震発生域を除外し、相対的に震源決定精度の高い観測点近傍のイベントのみを用いた場合には統計的に有意な b 値の深さ依存性は認められない。またSCECカタログでも同様の傾向が見られる。
- (2) 防災科学技術研究所地震カタログにおいては b 値は震源の深さとともに増加する傾向が認められ、カリフォルニアとは逆の深さ依存性を示す。 b 値の深さ依存性がカタログ依存であることから震源やマグニチュード決定の際の系統的な偏り等による人為的要因が b 値の空間変化に含まれている可能性が示唆される。
- (3) 様々なカタログに共通して b 値は、normal-slipで高 b 値、reverse-slipで低 b 値となる震源メカニズム依存性を示し、Schorlemmer et al. (2005)と調和的である。カタログ依存でないことから b 値は応力の指標としての役割を果たす可能性を示唆。

謝辞

本研究では、北海道大学、弘前大学、東北大学、東京大学、名古屋大学、京都大学、高知大学、九州大学、鹿児島大学、独立行政法人防災科学技術研究所、独立行政法人産業技術総合研究所、東京都、静岡県、神奈川県温泉地学研究所、横浜市、海洋科学技術センター及び気象庁の検震データを一元的に処理、震源決定を行った気象庁一元化震源カタログおよびその初動メカニズム解、防災科学技術研究所地震カタログ、Northern California Seismic Network catalog, Southern California Earthquake Center catalog, ならびに防災研究所地震カタログにおけるメカニズム解を使用させていただきました。この場を借りて御礼申し上げます。

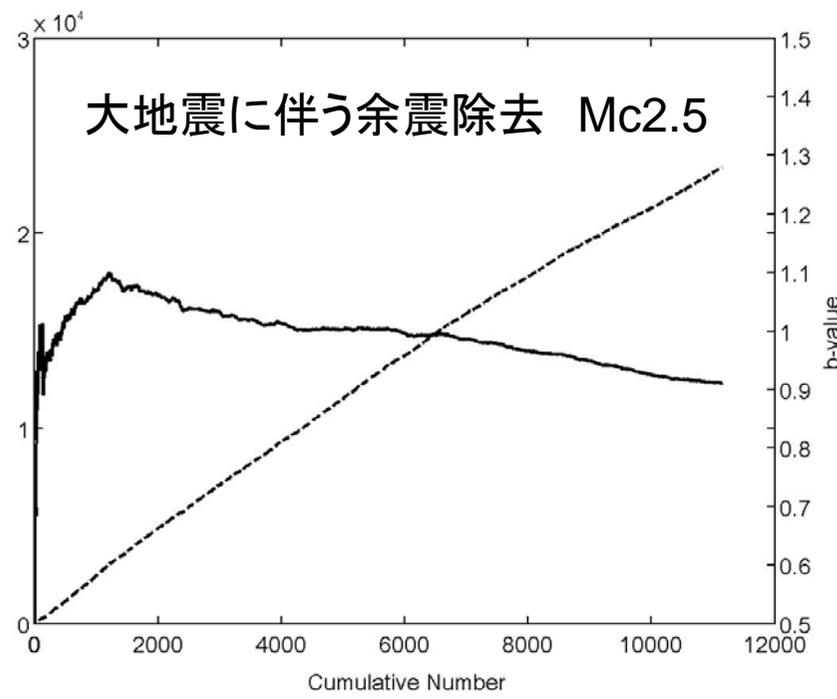
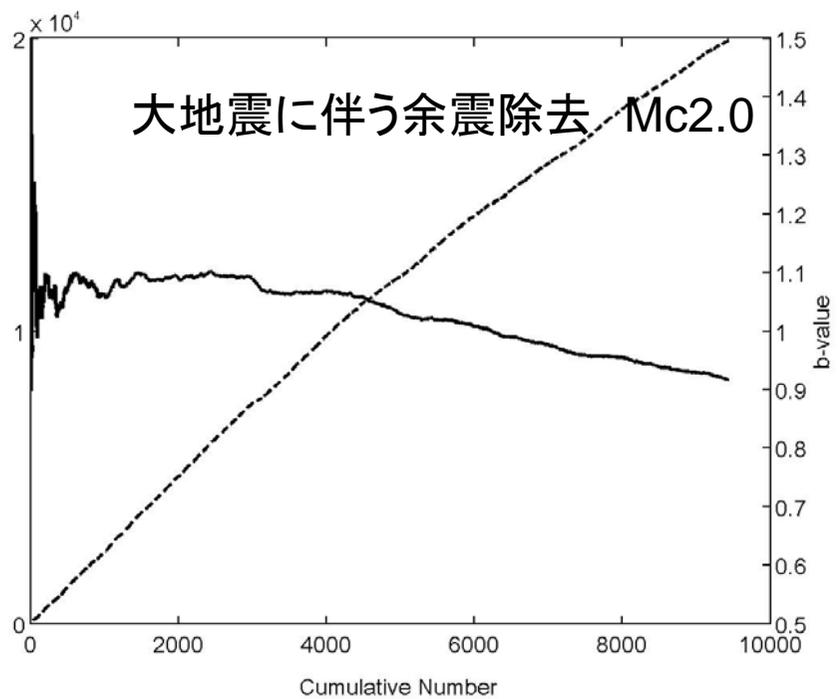
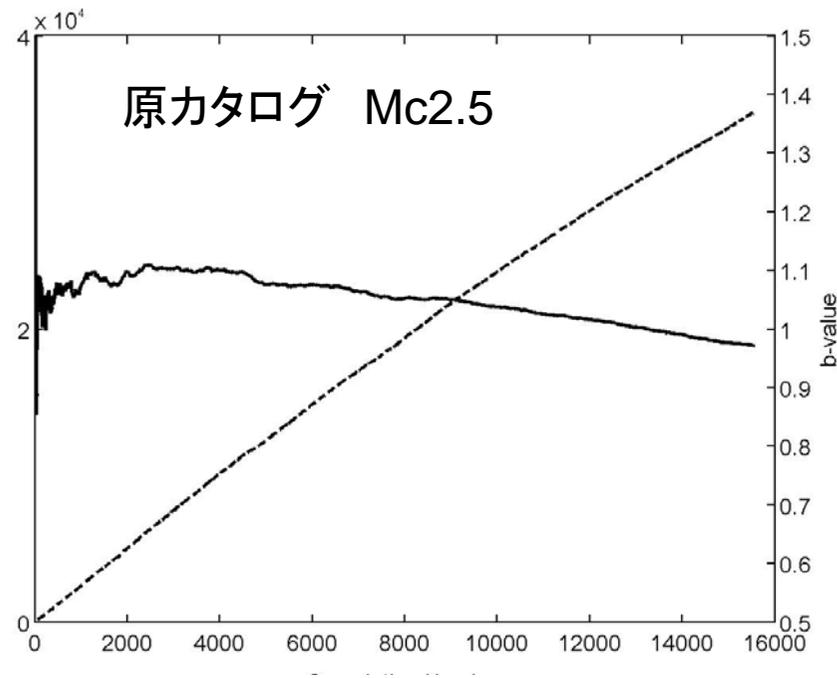
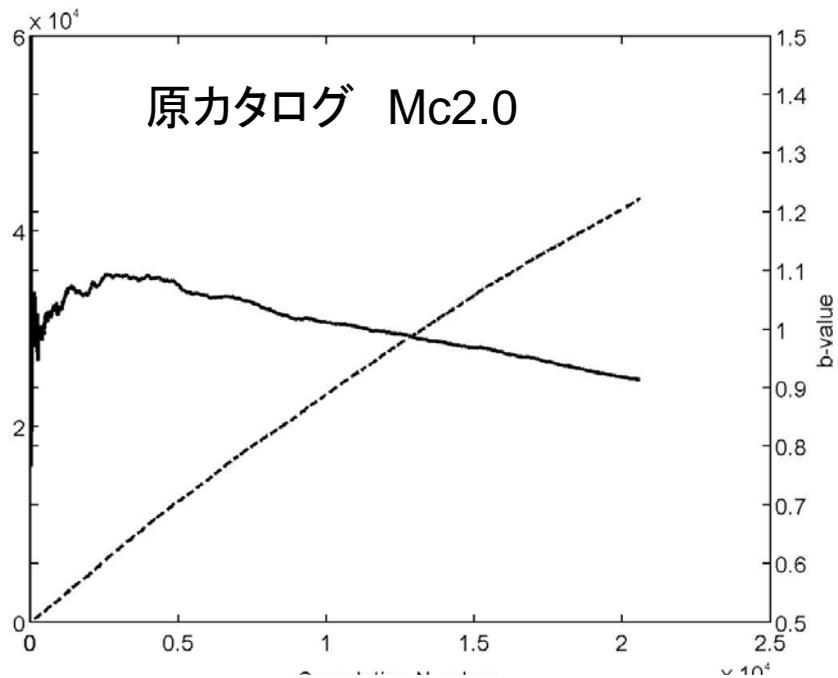
Table 1. Summary of the Results Obtained From the Mapping of r_b for Different Data Sets.



<i>Data set</i>	$r_b > 1.0$	$r_b < 1.0$
Northern California 0km–25km	31.50%	4.5%
Northern California 0km–15km	30.2%	2.9%
Southern California 0km–25km	35.7%	1.5%
Southern California 0km–15km	34.4%	1.1%
Northern California 0km–15km, all M	31.7%	2.8%
Southern California 0km–15km, all M	33.1%	1.1%

Gerstenberger et al. (2002)

b値は不均質性を反映？



大地震発生域を除外してみると?

- 1998年岩手県北部地震(M6.2)
- 2000年鳥取県西部地震(M7.3)
- 2003年宮城県北部地震(M6.2)
- 2004年新潟県中越地震(M6.8)
- 2004年留萌支庁南部の地震(M6.1)
- 2005年福岡県西方沖地震(M7.0)