

第 1 6 5 回

地震予知連絡会資料

2005 年 8 月 22 日



京都大学防災研究所
京都大学大学院理学研究科

第165回地震予知連絡会提出資料

目 次

近畿北部の地殻活動 ～丹波山地における微小地震活動の静穏化～	・・・・・・・・ 1
福岡県西方沖地震の余震の応力低下量分布 福岡県西方沖地震・合同地震観測班	・・・・・・・・ 7
GPS 連続観測で得られたスマトラ地震に伴う地殻変動	・・・・・・・・ 9

近畿北部の地殻活動

～丹波山地における微小地震活動の静穏化～

京都大学防災研究所地震予知研究センター

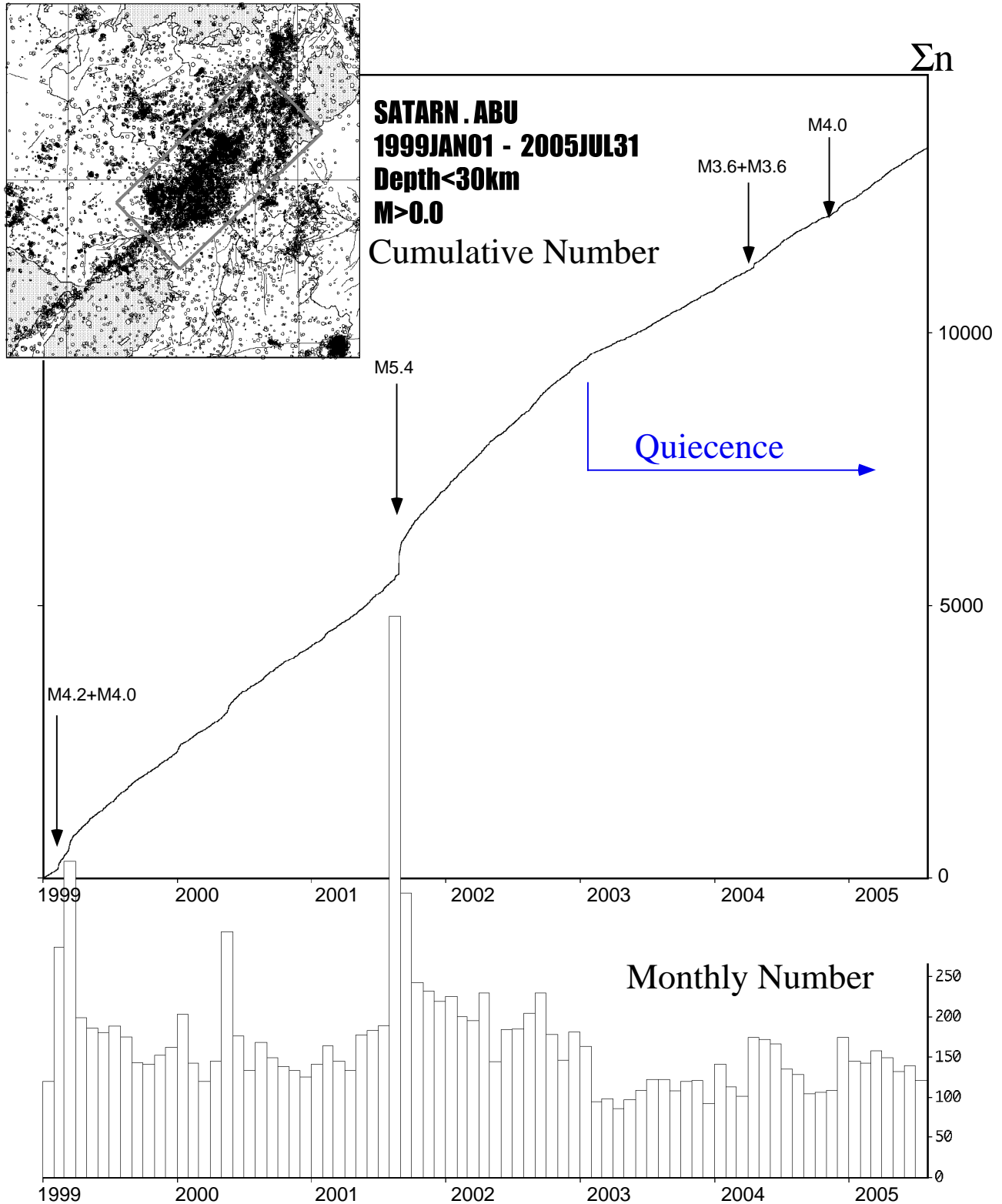


図1 (上) 近畿地方北部の微小地震活動。1999年～2005年7月。30km以浅。京都大学防災研究所地震予知研究センターによる。(中) 上図の矩形範囲内の積算地震発生数。(下) 上図の矩形範囲内の月別発生数。

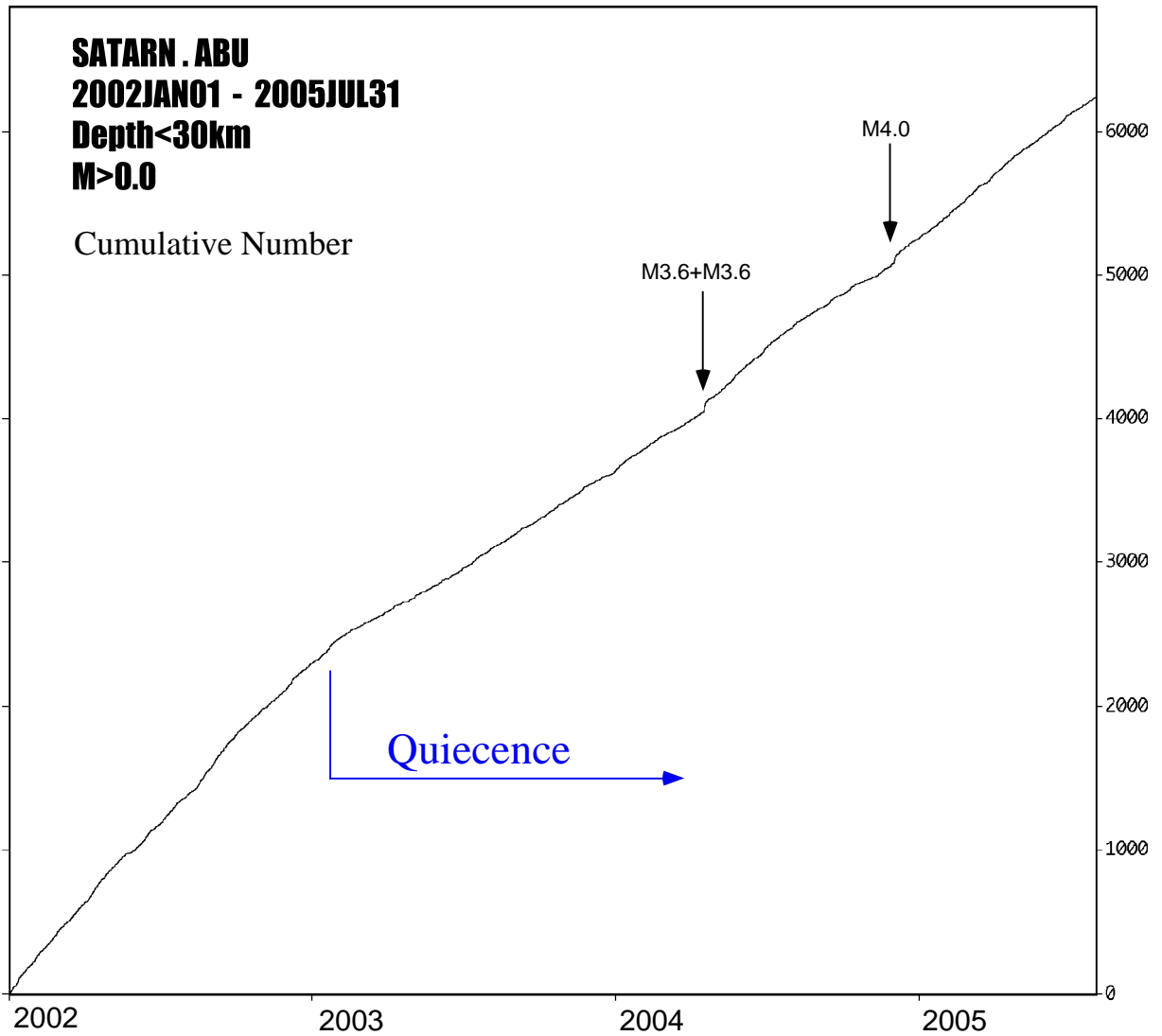
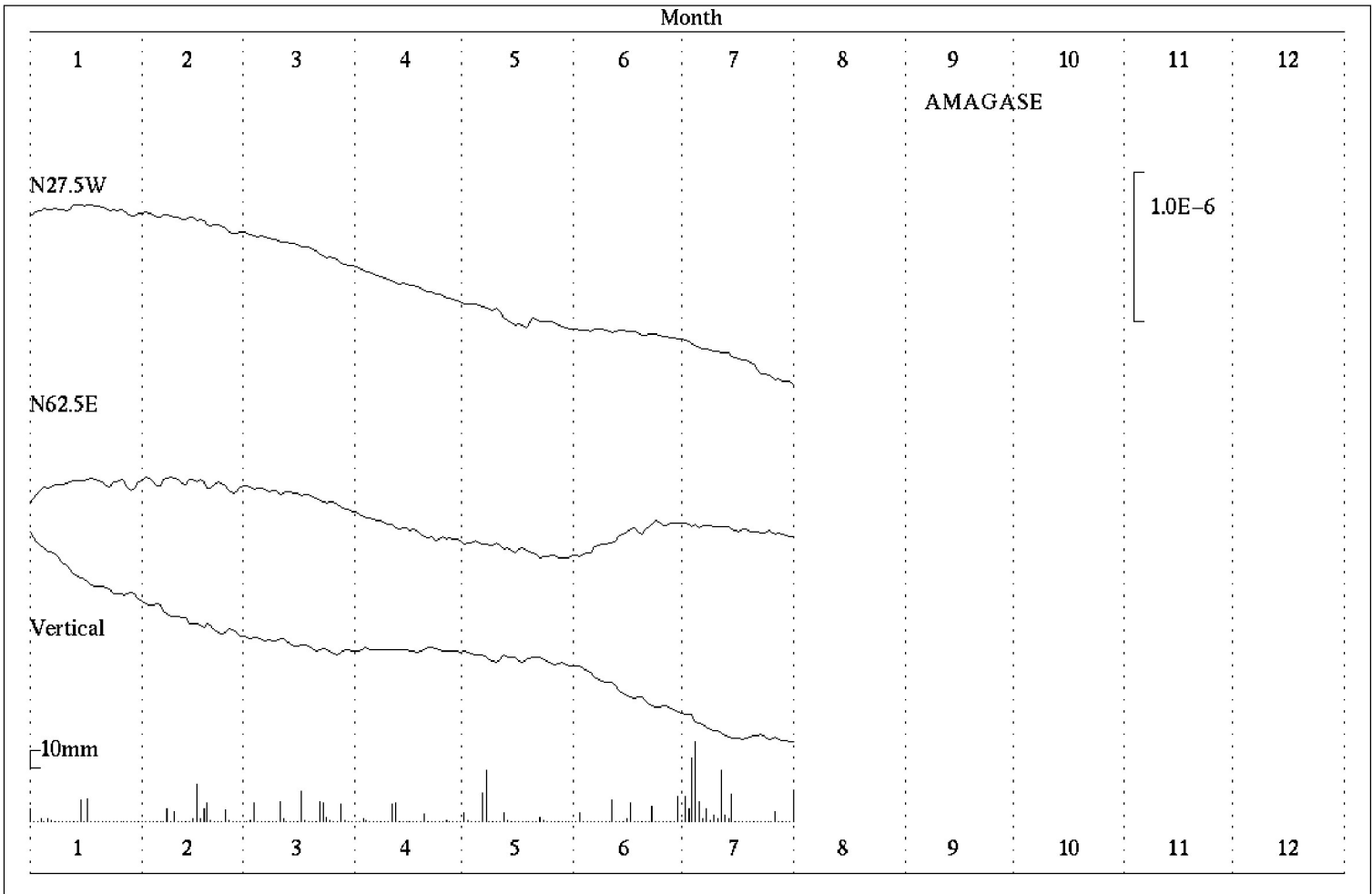
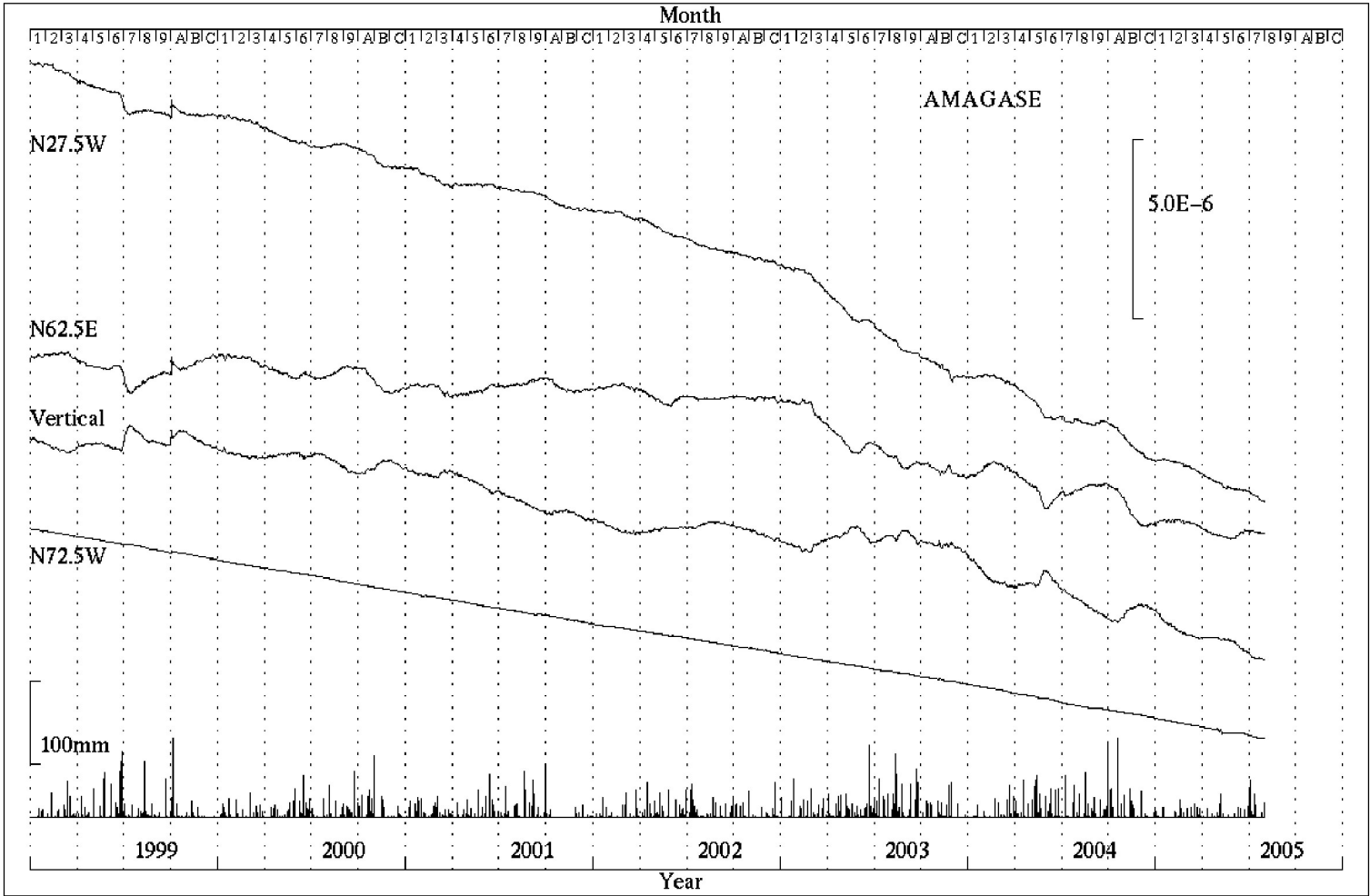
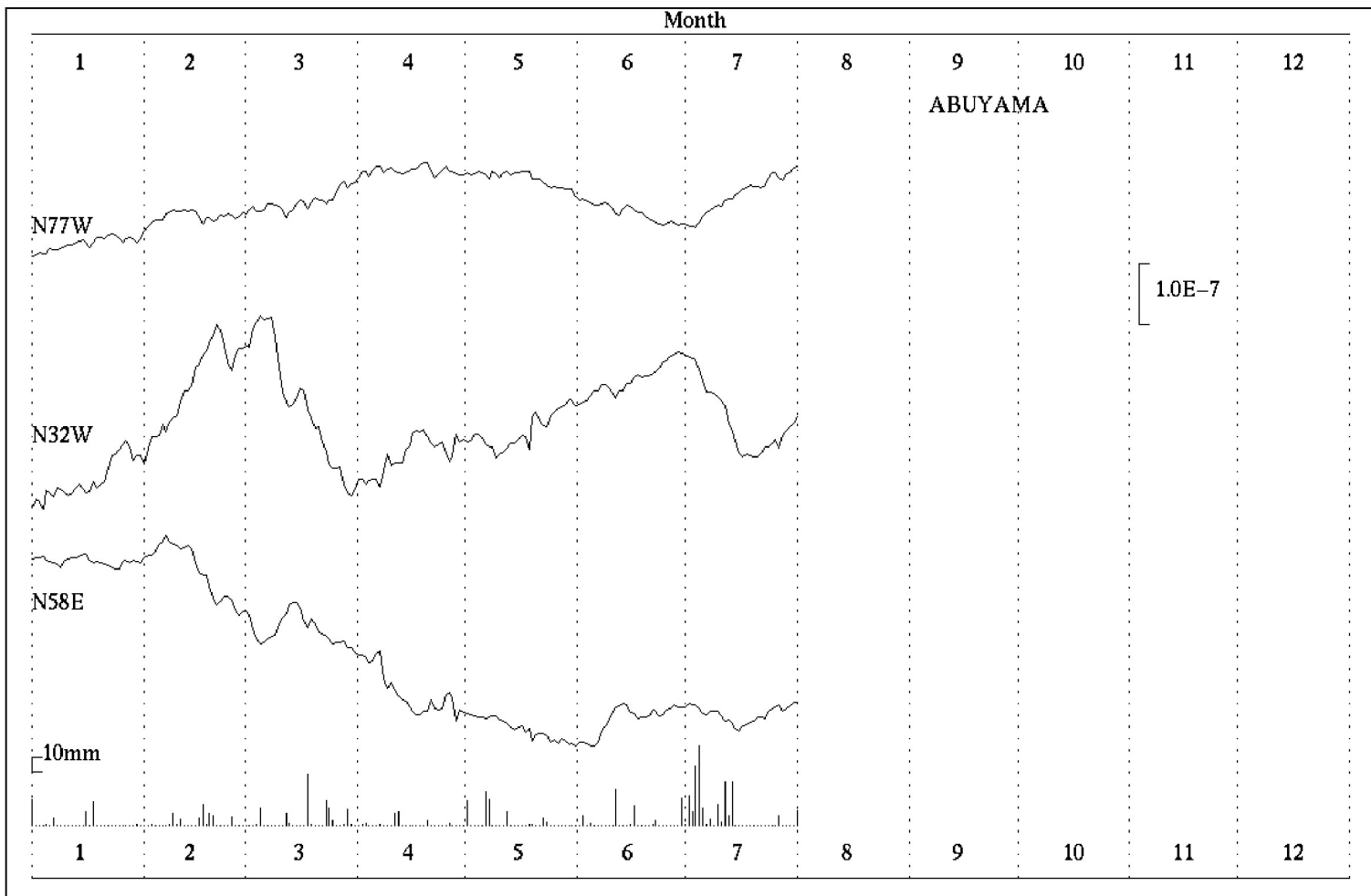
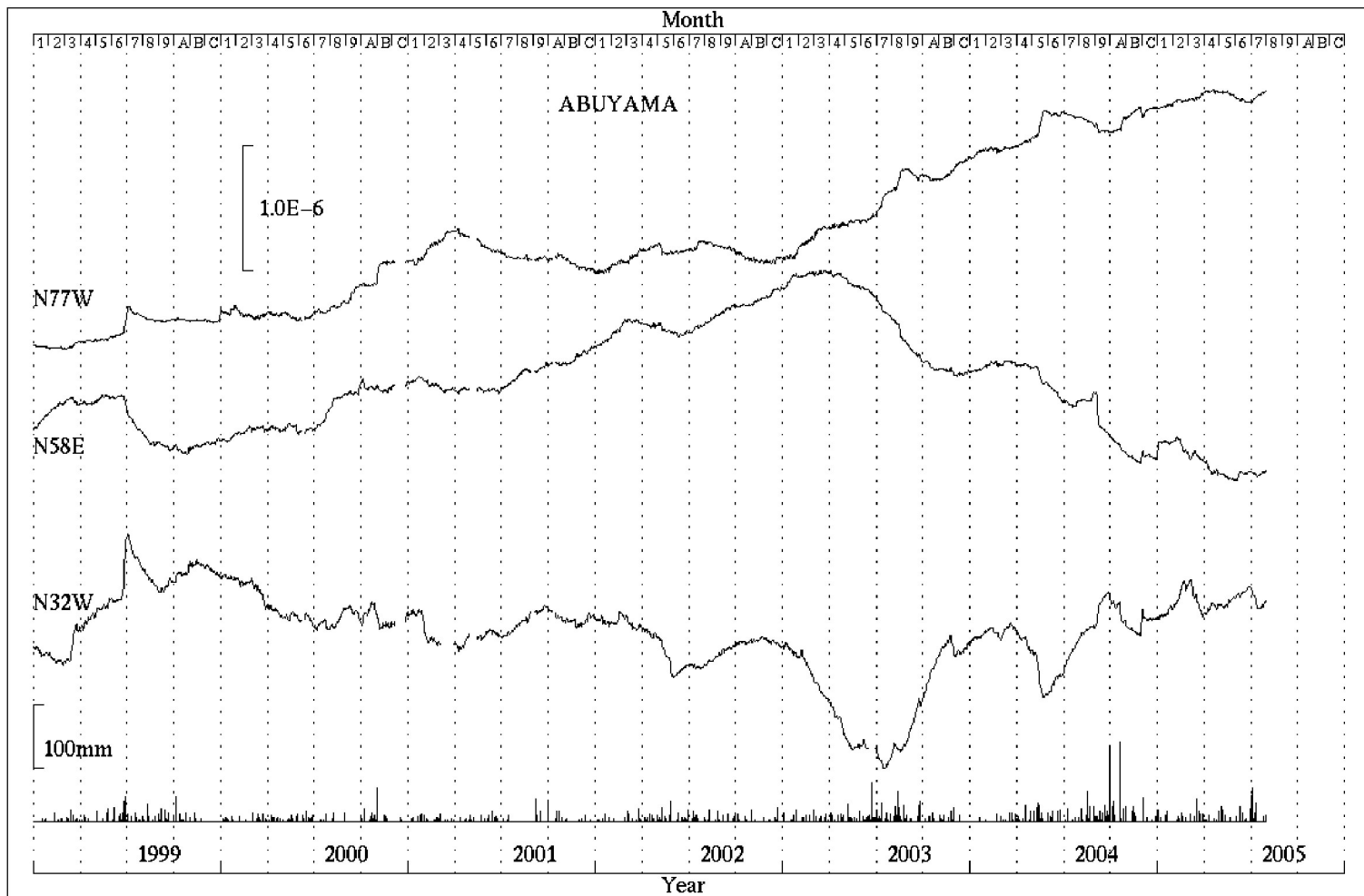
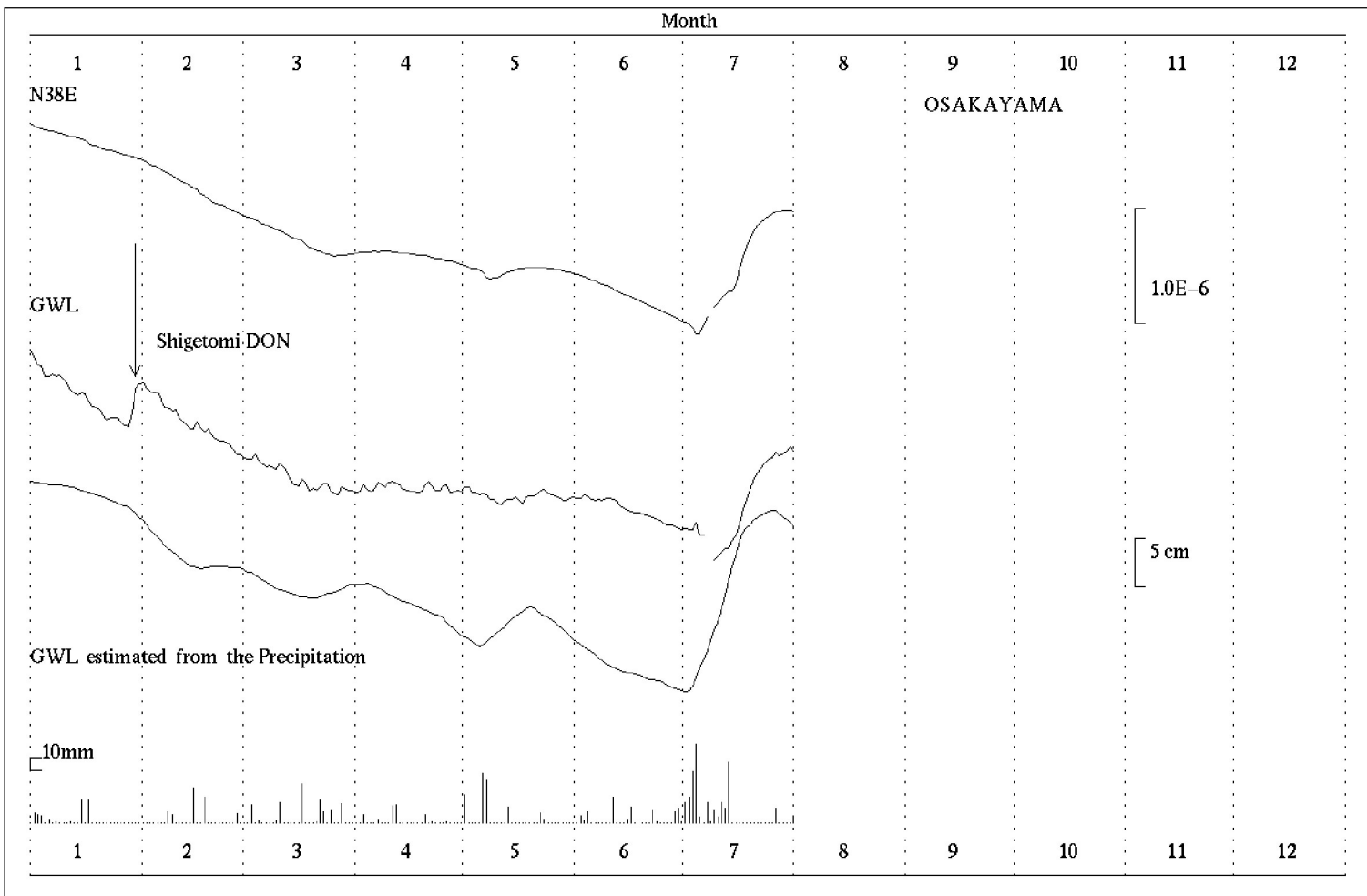
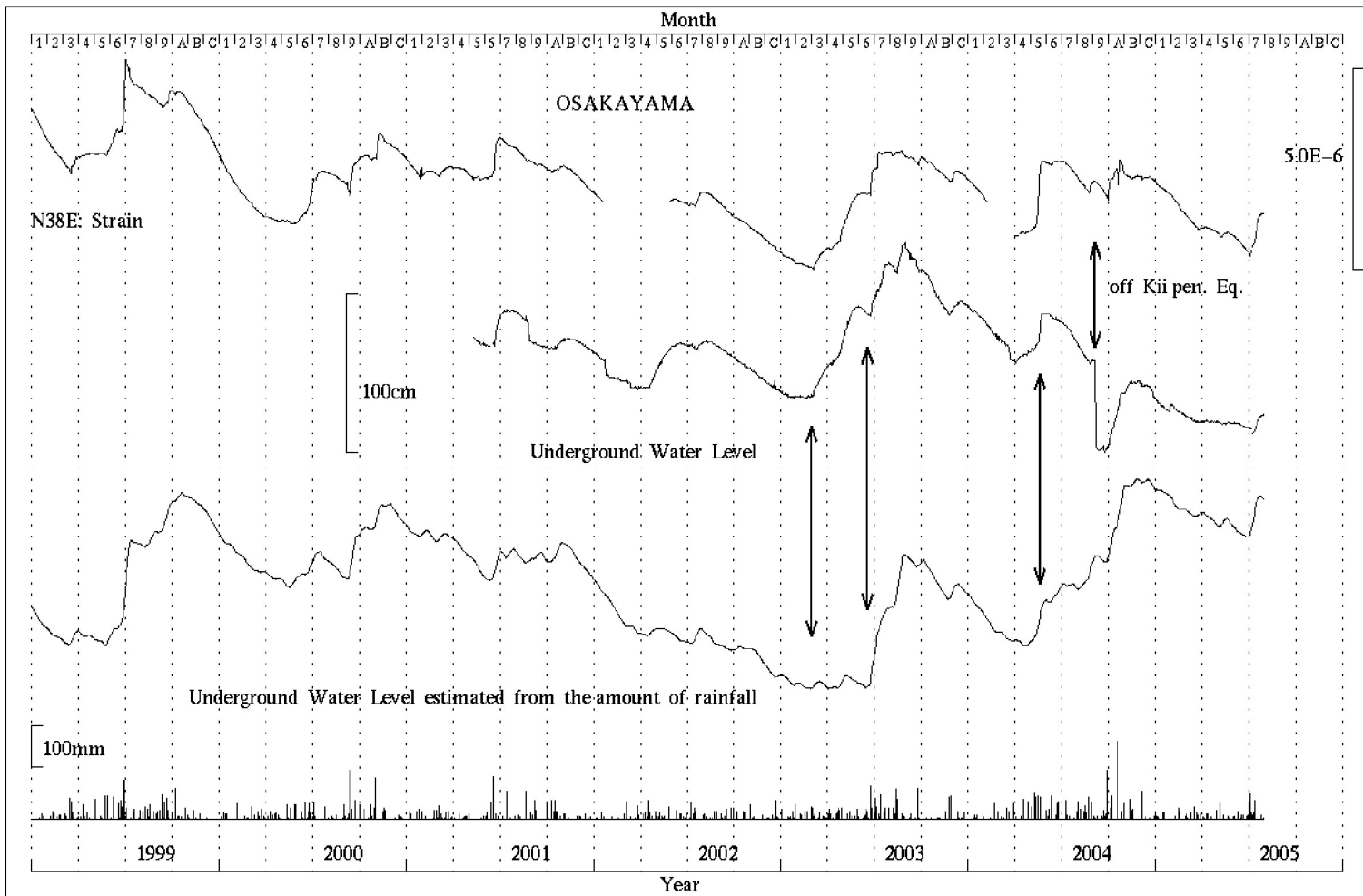
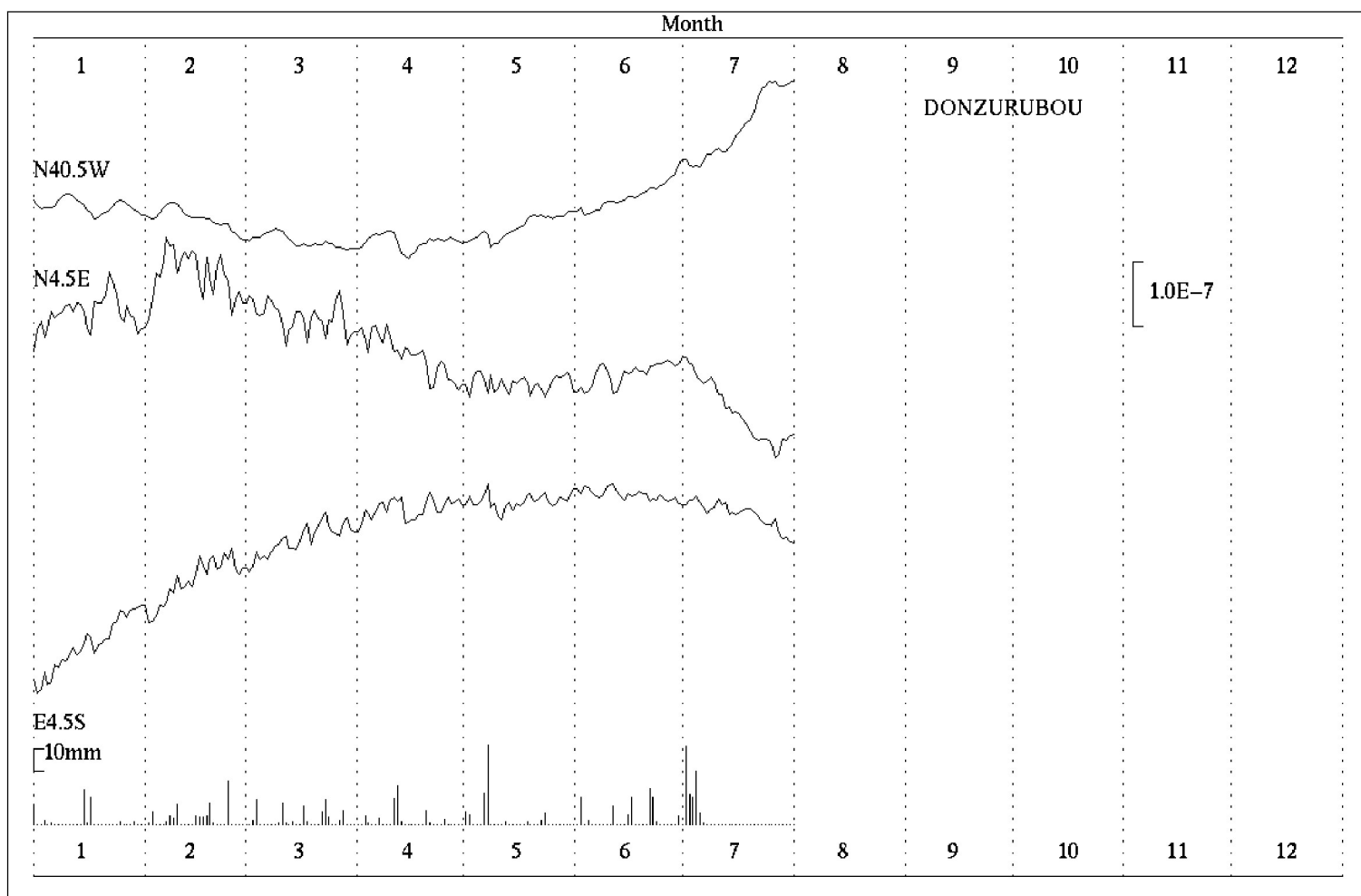
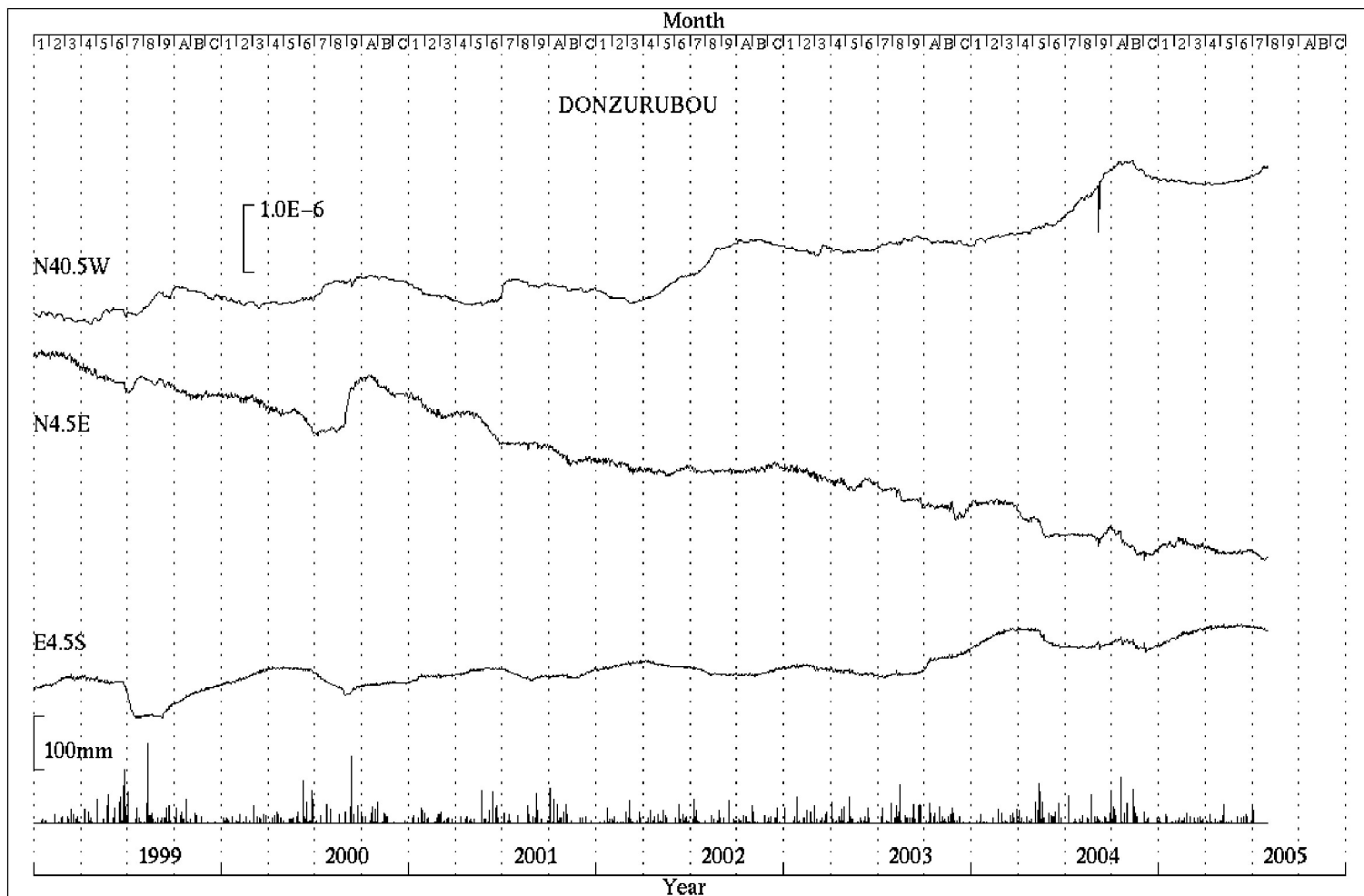


図2 近畿地方北部の微小地震活動。2002年1月～2005年7月。30km以浅。京都大学防災研究所地震予知研究センターによる。









福岡県西方沖地震の余震の応力降下量分布

福岡県西方沖地震・合同地震観測班 (京大防災研)

福岡県西方沖地震の断層の端や大すべり域の特徴を明らかにするために、合同地震観測班によるオンライン地震波形データを用いて、余震波形の地域的な特徴を調べた。今回は、相島(DP.AINS)のデータのみを用いたが、今回は、余震域とその近傍に設置された他のオンライン臨時観測点のデータも用いて、スペクトル解析により、余震の応力降下量の分布を調べた。図1に、余震の波形の例を示す。観測点によって波形に特徴があり、高周波が他の点に比べて大きく出る点があるため、最初に各観測点のサイト特性を見積もった。図2に、各観測点毎に余震のスペクトルを重ね合わせることで推定された、各観測点のサイトの周波数特性を示す(テレメーターの高周波特性の補正を含んでいる)。非弾性減衰の補正については、深さ2.5kmまでは $Q=50$ 、それ以深を $Q=1000$ で補正した。この Q 値は、AINSにおいて、重ね合わせたスペクトルが深さ依存性を持たないように設定された。サイト特性と非弾性減衰を補正した変位スペクトルに、 $\Omega_0/(1+(f/f_0)^p)$ の関数を当てはめてコーナー周波数 f_0 を求め(図1下側)、Brune stress dropを計算した。各観測点毎の地震モーメントとコーナー周波数の関係を図3に示す。各観測点で得られた応力降下量から、両極端の値を除き対数平均した値を、その余震の応力降下量とした。ただし、小呂島(FORQ)は余震域からやや離れており南東部の余震についてはSN比が低いので今回は用いなかった。図4に応力降下量の分布を示す。地震の大きさによる見かけの変化が入らないように、M2.5-3.5の余震についての応力降下量の値を示した。

分布の両端付近で発生した地震の応力降下量が小さい。また、分布の上限付近でも応力降下量が小さい余震が多い。また、推定断層面の北東側(図4左上・右では上側)で発生している余震の応力降下量が小さい傾向が見られる。4月20日のM5.8の余震群については、全体的に応力降下量が大きい傾向にある。特に、北西側(震源に近い側、図4左下で左側)で応力降下量の大きい余震が多い。

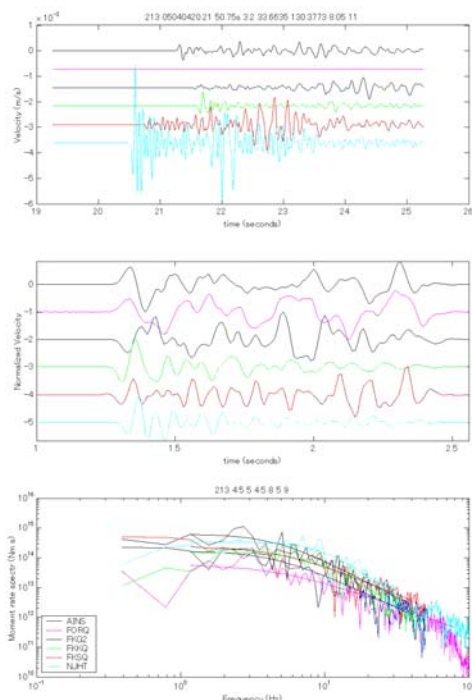


図1. 波形と変位スペクトル(サイト特性の補正済み)の例。

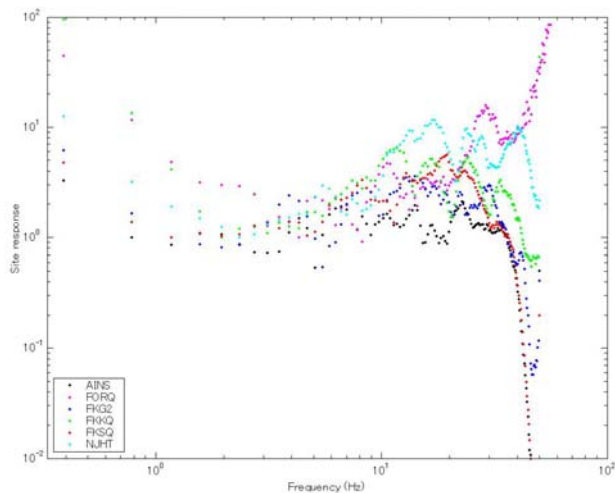


図2. サイト特性(テレメーターの高周波特性を含む)。FORQの高周波側はノイズ。

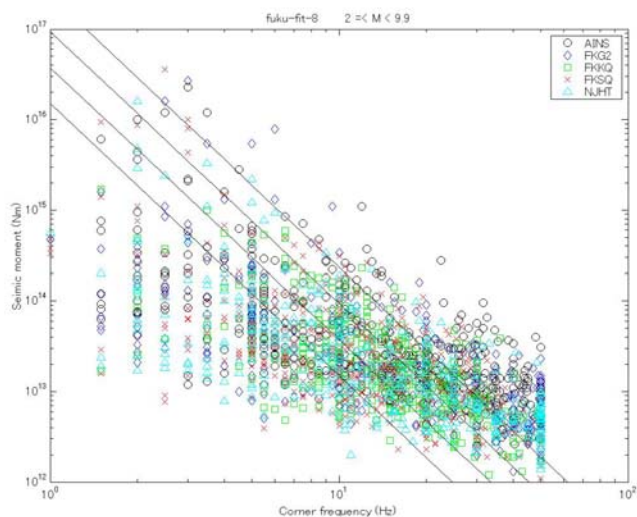


図3 地震モーメントとコーナー周波数の関係

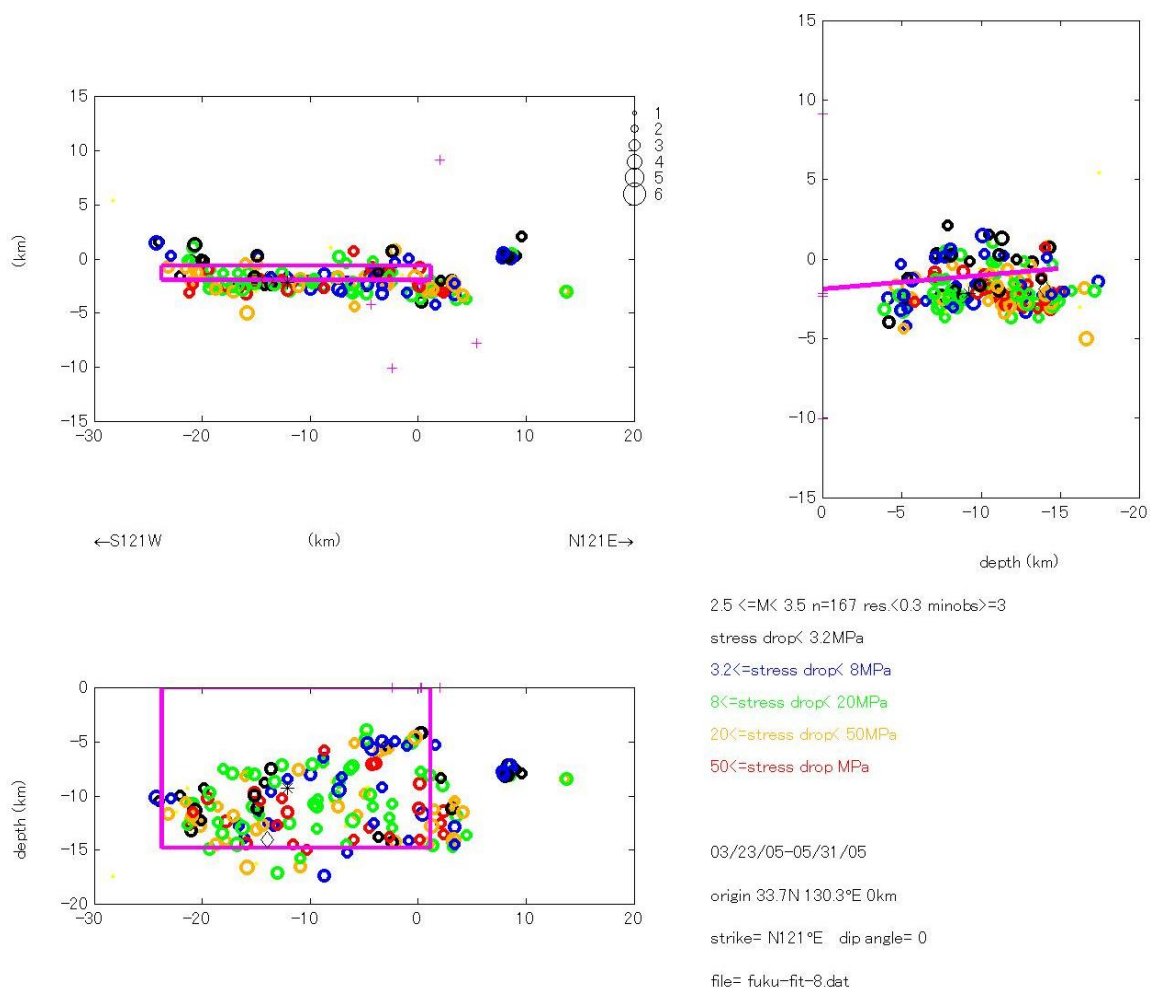


図4. 応力降下量の分布. $M_{2.5-3.5}$ の余震に対して, 応力降下量の値により, 大きい方から赤・黄・緑・青・黒と色分けして示した. 震源データは気象庁による一元化震源データを使わせていただいた. *および◇は, 気象庁および九大による本震の震源である. 断層モデルは国土地理院によるものを示している.

GPS 連続観測で得られたスマトラ地震に伴う地殻変動

京都大学防災研究所地震予知研究センター・京都大学大学院理学研究科
チュラロンコン大学理学部地質学科

チュラロンコン大学がタイ国内に設置している GPS 観測点 3 点と SOPAC により公開されている IGS 観測点 20 点以上およびインドネシア測量局の 1 点の GPS 連続観測データを解析し、2004 年スマトラ地震に伴う地殻変動を検出したので報告する。図 1 に使用した観測点の配置を示す。解析には 30 秒サンプリングのデータを用い、IGS 最終暦および地球回転パラメータ・時計の遅延と Bern 大による電離層遅延データ等を用い、Bernese5.0 により行った。さらに、座標変化の時系列に対して空間フィルターを適用し、衛星軌道情報等に起因する共通成分を除去した。

図 2～3 に代表的な観測点としてタイ南部プーケット (PHKT : USGS の本震震央からの距離 $\Delta = 591\text{km}$) とスマトラ島北部サンパリ (SAMP : $\Delta = 306\text{km}$) の座標変化の時系列を示す。地震前後 10 日間の平均を取り、その差を変位とすると、プーケットは 12 月の本震時に西に 255mm、南に 110mm の変位が認められる。サンパリは本震時に西に 141mm、南に 12mm 移動した。図 4 に示すように、バンコク (BNKK : $\Delta = 1255\text{km}$) が西北西へ 78mm、チェンマイ (CHMI : $\Delta = 1742\text{km}$) が南南西へ 28mm、シンガポール (NTUS : $\Delta = 883\text{km}$) が西方に 18mm それぞれ変位している。図には示していないが、中国の昆明 (KUNM)、フィリピンのマニラ (PIMO)、インドのハイデラバード (HYDE)、インド洋のココス島 (COCO) やディエゴ・ガルシア島 (DGAR) でも数 mm から 1cm 程度の有意な変位が検出された。図 4 に水平変位ベクトルを、図 5 にこれから推定した断層モデルを示す。断層モデルは水藤・他 (2005) の 5 セグメントのモデルから幅・傾斜角を変えて、最適な断層モデルを求めた。なお、断層モデルの推定に当たっては、Rajendran et al. (2005) によるアンダマン=ニコバル諸島の変位を、重みを小さくしてデータに加えている。また、セグメント間のすべりの滑らかさを先駆的情報として用いた。推定されたすべりは、ニコバル諸島より南のセグメントで大きく、10~13m 程度と推定される。また、傾斜については 10° 、 12° で試したが残差の大きな減少は見られなかった。主として、南半分で大きなモーメント解放があったことが確認された。モーメントは $6.4 \times 10^{22}\text{Nm}$ 、 M_w は 9.14 と推定される (表 a)。

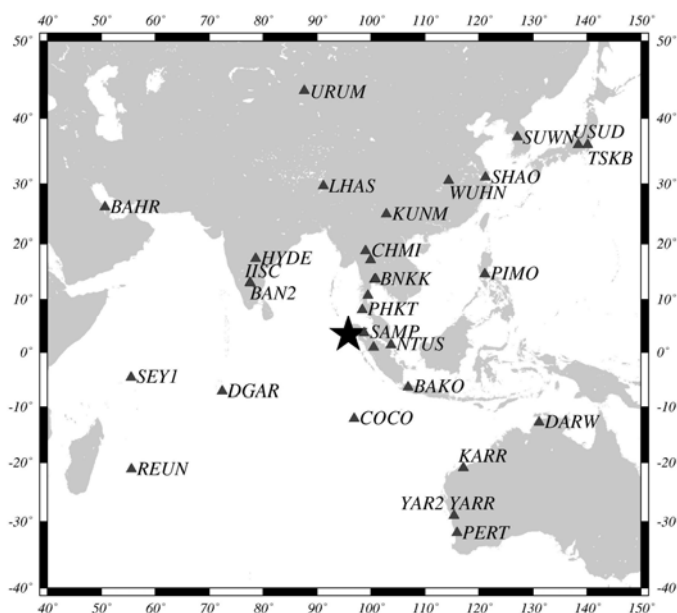


図 1. GPS 連続観測点の配置。星印は 2004 年 12 月 26 日の本震の震央を示す。

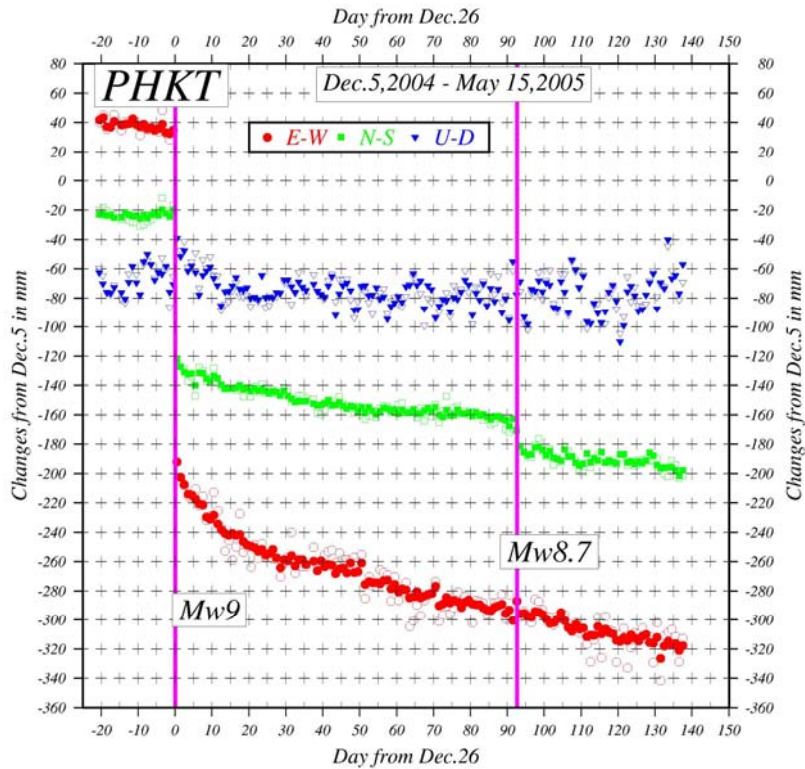


図2. タイ南部プーケット (PHKT) の座標変化. 赤が東西, 緑が南北, 青が上下成分を示す. それぞれ白抜きシンボルが生データで, これに空間フィルターを適用した結果を塗りつぶしたシンボルで示す. 縦軸の一目盛は20mm. 横軸は2004年12月26日からの経過日数を示す. 一目盛は10日. ピンクの縦線は2004年12月26日の本震と2005年3月28日のニアス地震の発生時を示す.

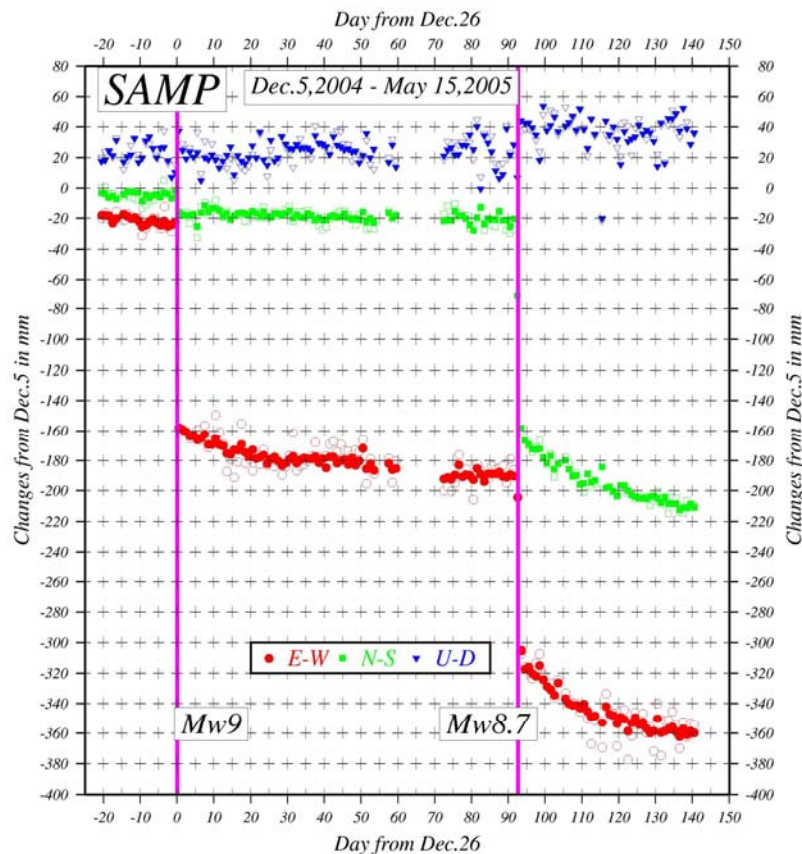


図3. スマトラ島北部サンパリ (SAMP) の座標変化. シンボル等は図2と同じ.

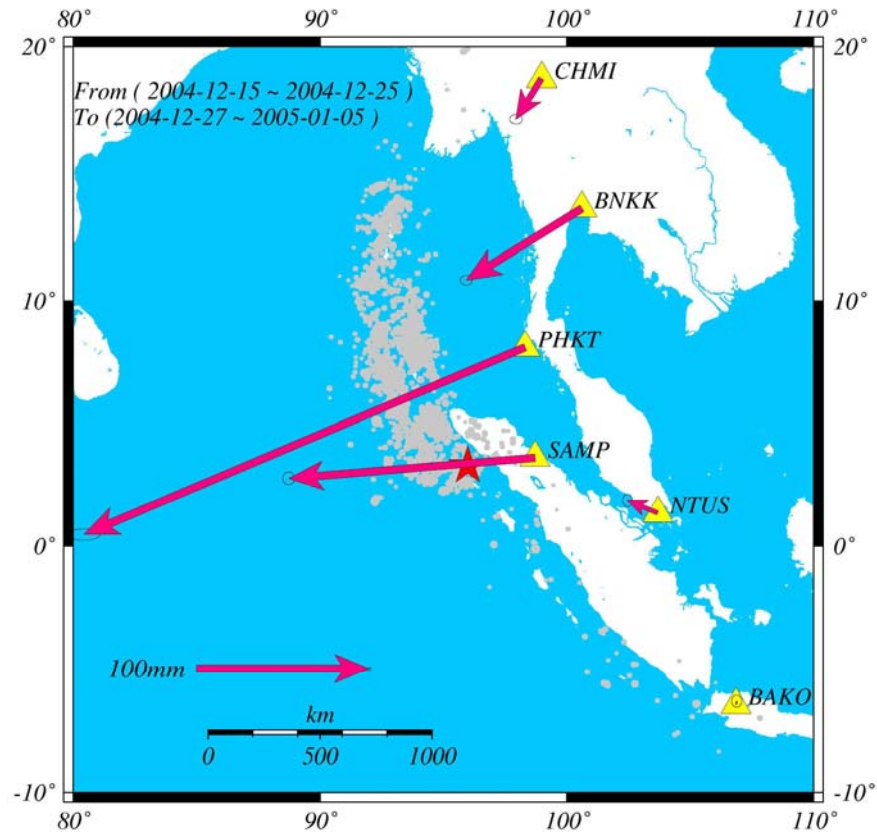


図4. 12月26日の本震時の変位（発生前後10日間の平均の差）. グレーの点はUSGSによるニアス地震直前までの余震の震央.

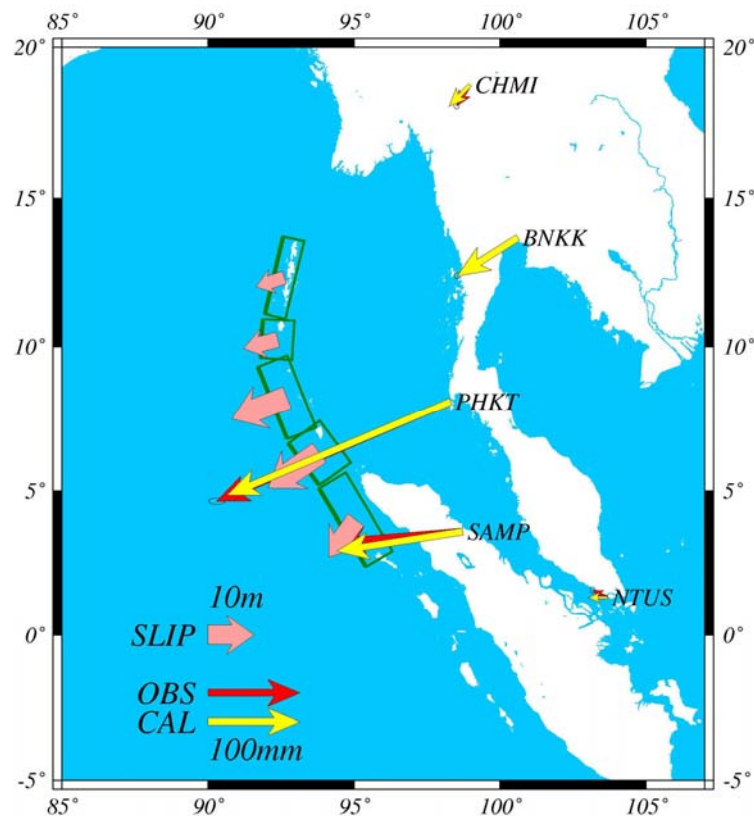


図5. 本震の断層モデルと観測変位（赤矢印）と理論変位（黄色矢印）の比較. ピンクの矢印は推定されたすべり.

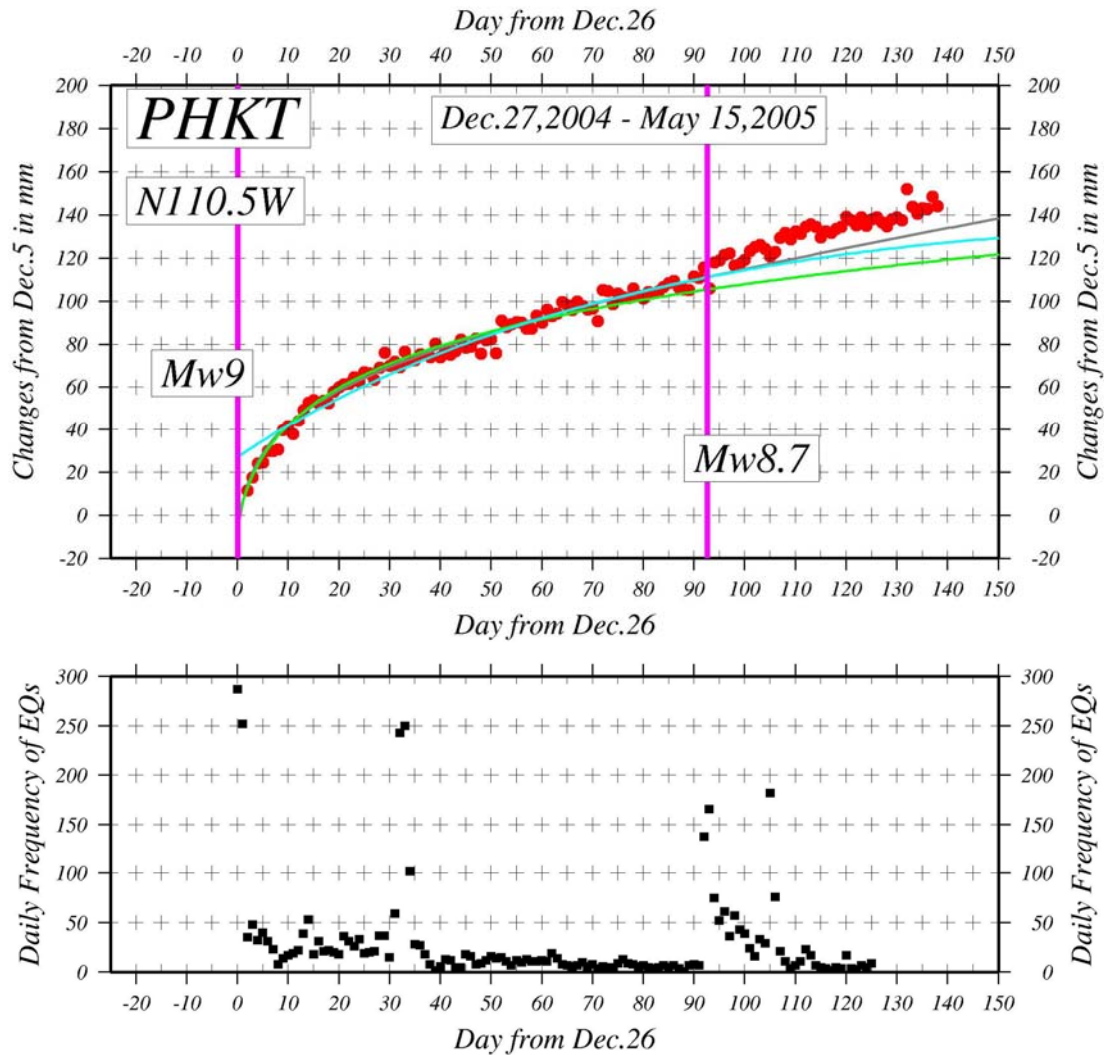


図6. 上は、プーケットの最大変位方向 (N110.5° W) の座標成分の時間変化 (赤丸). 3本の実線は、岩石実験に基づく Marone et al. (1991)の理論式によるフィッティング結果. 緑が2004年12月26日から2005年1月31日までの期間のデータ, 水色が2005年2月1日から3月27日までの期間のデータ, グレーが2004年12月26日から2005年3月27日までの期間のデータにそれぞれフィッティングした結果. 下はUSGSによる日別余震回数.

プーケットで2005年1月末までに西に57mm, 南に21mmの余効変動が認められる(図2). この時点で一旦余効変動は停止したように見えたが, 2月になって再加速し, 3月28日のニアス地震直前まで, 西に35mm, 南に15mm変動した. 一方, サンパリは1月末までに西に19mm, 北に1mm, さらにニアス地震直前までに西に11mm, 南に5mm移動している. いずれの観測点でも2005年1月末ころに余効変動が一旦停止し, その後再び加速したように見える. そこで, プーケットの時系列について最大変位方向の成分の時間変化を求め, 岩石実験に基づくMarone et al. (1991)の理論式を適用して, 1月末を境にする変化の有無を調べた(図6). 非線形の関係式でもあり推定値の幅が大きい, 1月末で分けてフィッティングした場合の最適解は, 互いの期間のデータをあまりうまく説明しない. 空間的なパターンを見ても, サンパリの変位の方向が2期間で異なり(図7と9), この間に余効すべりに変化が生じていることが考えられる. 図6に示す日別余震回数でも1月末のアンダマン海の群発活動を境にレベルが異なる

っており、応力状態に変化が生じたことが考えられる。図8と10は、2期間の余効変動に対する断層モデルである。最初の期間はニコバル諸島の南のセグメントですべりが大きく（～1.6m）推定されているが、2月以降は一番南のセグメントで1.2m程度のすべりが推定される以外、他のセグメントでは1m前後と、前の期間よりやや小さいすべりが得られている（表b, c）。なお、幅については1月末までは220km、2月以降は180kmが最適と推定され、大きなすべりの位置が変動している可能性が示唆される。なお、アンダマン諸島下のセグメントのすべりについては、データがないために、十分拘束できていない。均一すべりを仮定しているため、上限を与えるにとどまるが、参考にモーメント及びMwを求めると、1月末までは 1.19×10^{22} Nm, 8.65, 2月以降については 9.66×10^{21} Nm, 8.59と推定される。

2005年3月28日に発生したニアス地震では、サンパリは西に131mm、南に153mm移動したのに対し、プーケットは西に5mm、南に23mmの変位にとどまっている（図11）。図12は、水藤・他（2005）の断層モデルを用いてフィッティングした結果であるが、サンパリの変位が20cm程度であるため、すべりは4m程度にしかない。そのため、モーメントは 6.82×10^{21} Nm, Mwは8.49と、CMT解などと比較してかなり小さいものとなる（表d）。周辺の臨時観測データなどと総合して解析し、再検討する必要がある。

ニアス地震後2005年5月15日まで期間の余効変動は、本震とニアス地震両方の余効変動が重なって、プーケットは西に23mm、南に15mm、サンパリは西に47mm、南に46mm変位した（図13）。図14は、この余効変動の断層モデルである。2ヶ月弱の期間に1m以下のすべりが推定される。なお、北部のセグメントについては、データがないため拘束できていないことに注意する必要がある。参考までにモーメントとMwを推定すると、 9.68×10^{21} Nm, 8.59となる（表e）。2005年5月中旬まで、余効変動により 3.13×10^{22} Nm, Mw8.93に相当するモーメントが解放されたと推定される。ただし、この値は均一すべりを仮定した断層モデルを用いているため、上限を与えるにすぎない。しかし、プーケットの地震時変位と余効変動の大きさを単純に比較しても、Mw8を超えるエネルギー解放が震源域付近で生じたと考えるのが妥当であろう。

地震後、チュラロンコン大学と京都大学大学院理学研究科により新たに3ヶ所の観測点を設置しており、京都大学防災研究所および大学院理学研究科とチュラロンコン大学では、これからも協力して余効変動の観測・解析を継続し、スマトラ地震後の南アジアの変動を研究していくこととしている。なお、タイ国内プーケット・バンコクおよびチェンマイは、海洋研究開発機構の伍培明氏らにより設置されたものをチュラロンコン大学が運営してきたものである。ここに感謝いたします。

（橋本学・Nithiwatthn Choosakul・橋爪道郎・竹本修三・瀧口博士・福田洋一・藤森邦夫）

表. 観測データのモデリングに用いた断層パラメータ.

(a) 2004年12月26日の本震の断層パラメータ

Lat.	Lon.	L	W	H	Strike	Dip	Us	Ud	Rake	U	Mo	Mw
2.40	95.40	350	120	10	330	8	-4.10±0.82	9.25±0.51	113.88	10.12	1.70×10^{22}	8.75
5.20	93.80	200	150	10	325	8	0.09±1.24	13.66±1.06	89.61	13.66	1.64×10^{22}	8.74
6.80	92.70	300	120	10	340	8	-0.35±1.21	13.07±1.05	91.53	13.08	1.88×10^{22}	8.78
9.60	91.80	150	120	10	5	8	-2.61±1.25	7.34±1.14	109.59	7.79	5.61×10^{21}	8.43
11.10	91.95	300	80	10	15	8	-3.62±1.01	5.51±1.13	123.27	6.59	6.33×10^{21}	8.47
Total											6.41×10^{22}	9.14

スマトラ地震に伴う地殻変動-6

(b) 2004年12月27日から2005年1月末までの余効変動に対する断層パラメータ

Lat.	Lon.	L	W	H	Strike	Dip	Us	Ud	Rake	U	Mo	Mw
2.40	95.40	350	220	10	330	8	-0.71 ± 0.44	0.69 ± 0.28	135.95	0.99	3.04×10^{21}	8.26
5.20	93.80	200	220	10	325	8	0.56 ± 1.06	1.48 ± 0.77	69.13	1.58	2.79×10^{21}	8.23
6.80	92.70	300	220	10	340	8	0.83 ± 1.22	0.87 ± 0.89	46.41	1.20	3.16×10^{21}	8.27
9.60	91.80	150	220	10	5	8	0.52 ± 1.39	0.51 ± 1.03	44.34	0.73	9.67×10^{20}	7.92
11.10	91.95	300	220	10	15	8	0.16 ± 1.62	0.72 ± 1.00	77.51	0.74	1.96×10^{21}	8.13
Total											1.19×10^{22}	8.65

(c) 2005年2月からニアス地震直前までの余効変動に対する断層パラメータ

Lat.	Lon.	L	W	H	Strike	Dip	Us	Ud	Rake	U	Mo	Mw
2.40	95.40	350	180	10	330	8	-0.86 ± 0.55	0.88 ± 0.41	134.44	1.23	3.11×10^{21}	8.26
5.20	93.80	200	180	10	325	8	-0.48 ± 0.74	0.97 ± 0.60	116.28	1.09	1.57×10^{21}	8.06
6.80	92.70	300	180	10	340	8	-0.27 ± 0.81	1.03 ± 0.70	104.63	1.07	2.30×10^{21}	8.18
9.60	91.80	150	180	10	5	8	-0.14 ± 0.86	0.95 ± 0.65	98.32	0.96	1.03×10^{21}	7.94
11.10	91.95	300	180	10	15	8	0.09 ± 1.57	0.76 ± 0.93	83.42	0.76	1.65×10^{21}	8.08
Total											9.66×10^{21}	8.59

(d) 2005年3月28日のニアス地震の断層パラメータ

Lat.	Lon.	L	W	H	Strike	Dip	Us	Ud	Rake	U	Mo	Mw
-0.25	97.60	330	120	10	329	14	-2.80 ± 0.53	3.27 ± 0.26	130.63	4.30	6.82×10^{21}	8.49

(e) ニアス地震直後から5月中旬までの余効変動に対する断層パラメータ

Lat.	Lon.	L	W	H	Strike	Dip	Us	Ud	Rake	U	Mo	Mw
-0.25	97.60	330	220	10	329	14	0.20 ± 0.19	0.52 ± 0.12	68.76	0.52	1.61×10^{21}	8.07
2.40	95.40	350	220	10	330	8	-0.43 ± 0.31	0.36 ± 0.24	139.81	0.56	1.72×10^{21}	8.09
5.20	93.80	200	220	10	325	8	-0.38 ± 0.50	0.55 ± 0.31	124.64	0.67	1.17×10^{21}	7.98
6.80	92.70	300	220	10	340	8	-0.29 ± 0.54	0.64 ± 0.42	114.75	0.70	1.86×10^{21}	8.11
9.60	91.80	150	220	10	5	8	-0.15 ± 0.56	0.55 ± 0.42	105.65	0.57	7.51×10^{20}	7.85
11.10	91.95	300	220	10	15	8	-0.90 ± 1.07	0.37 ± 0.59	157.90	0.97	2.57×10^{21}	8.21
Total											9.68×10^{21}	8.59

LatとLonは断層上端南側の緯度・経度, Lは長さ(km), Wは幅(km), Hは上端の深さ(km), Strikeは走向, Dipは傾斜, Us, Udは左ずれおよび逆断層すべり(m), Rakeはすべり角, Uはすべり量(m), Moはモーメント(剛性率40GPaを仮定), Mwはモーメント・マグニチュード(以下同じ)

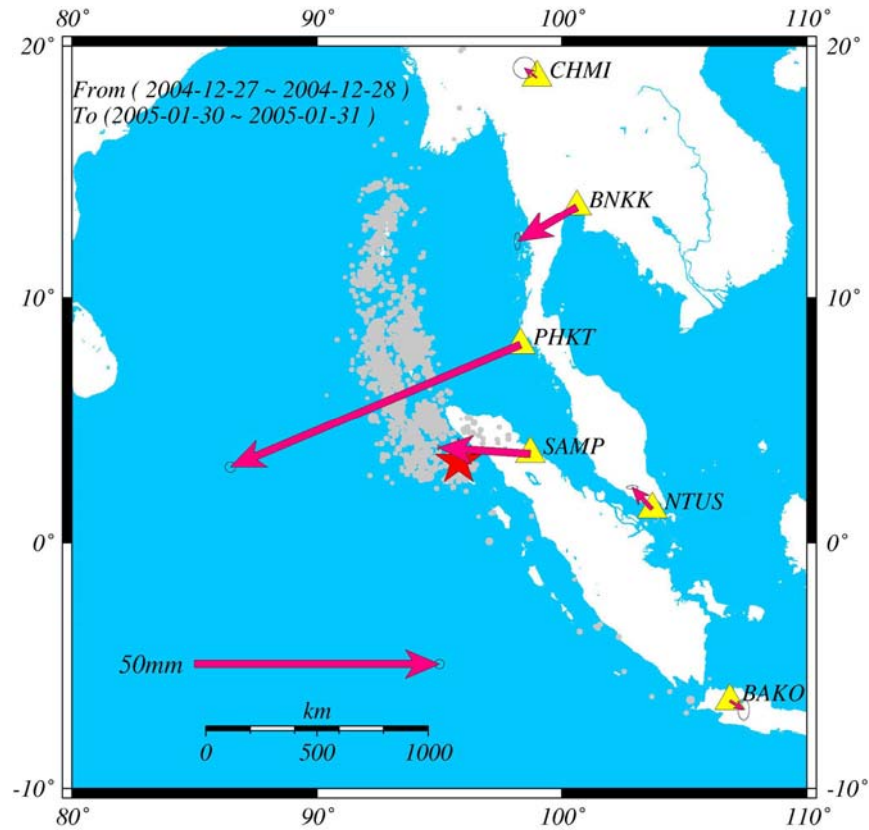


図7. 本震直後から2005年1月末までの余効変動. グレーの点はUSGSによる対応する期間の余震の震央.

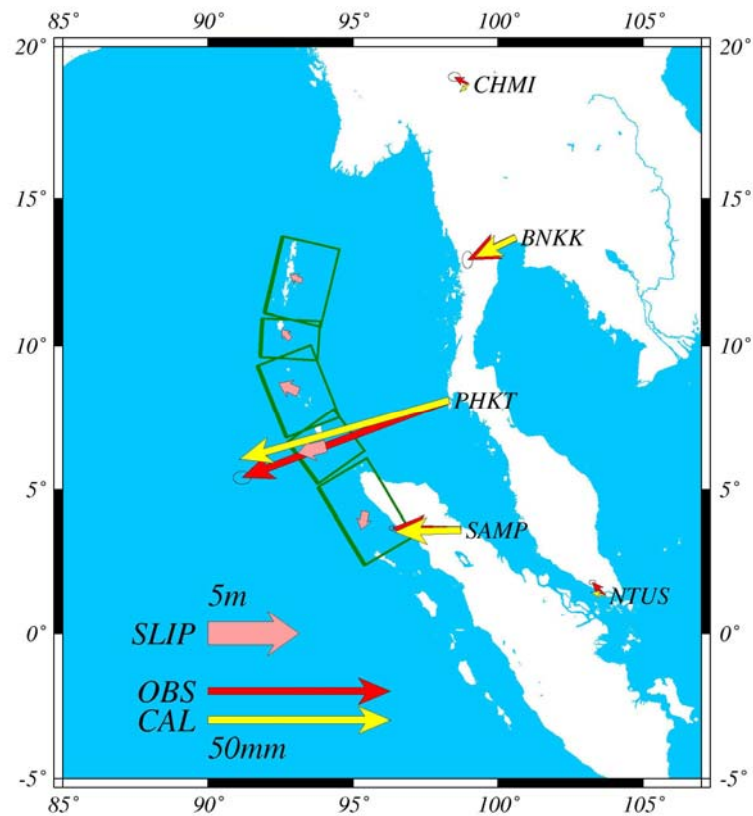


図8. 図7の余効変動の余効すべり断層モデルと観測（赤矢印）及び理論（黄色矢印）変位の比較.

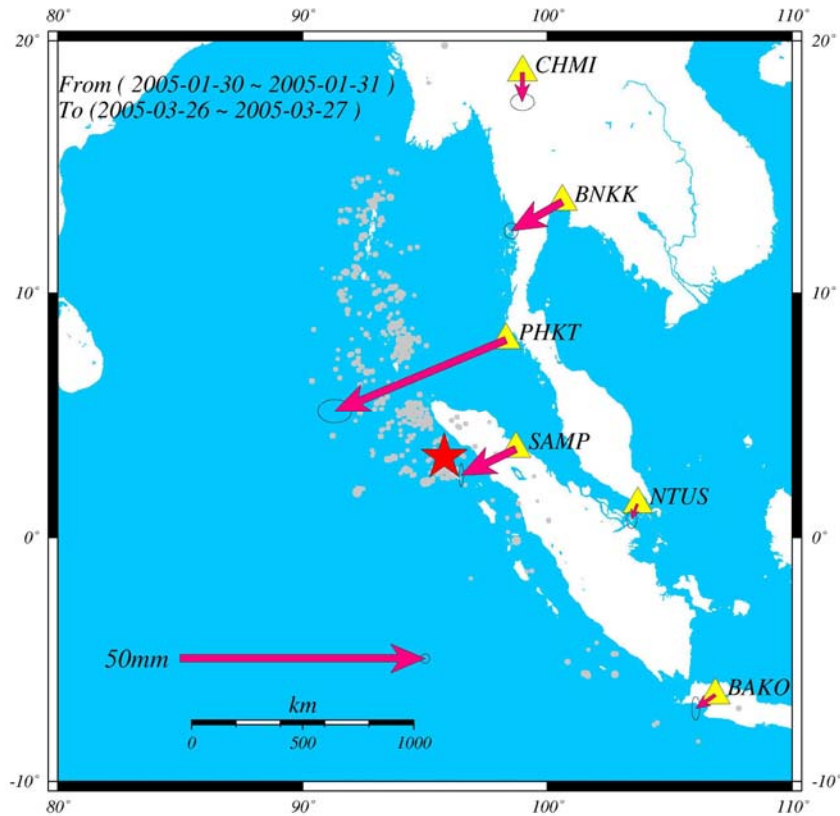


図9. 2005年2月初旬からニアス地震発生直前までの余効変動. グレーの点はUSGSによる対応する期間の余震の震央.

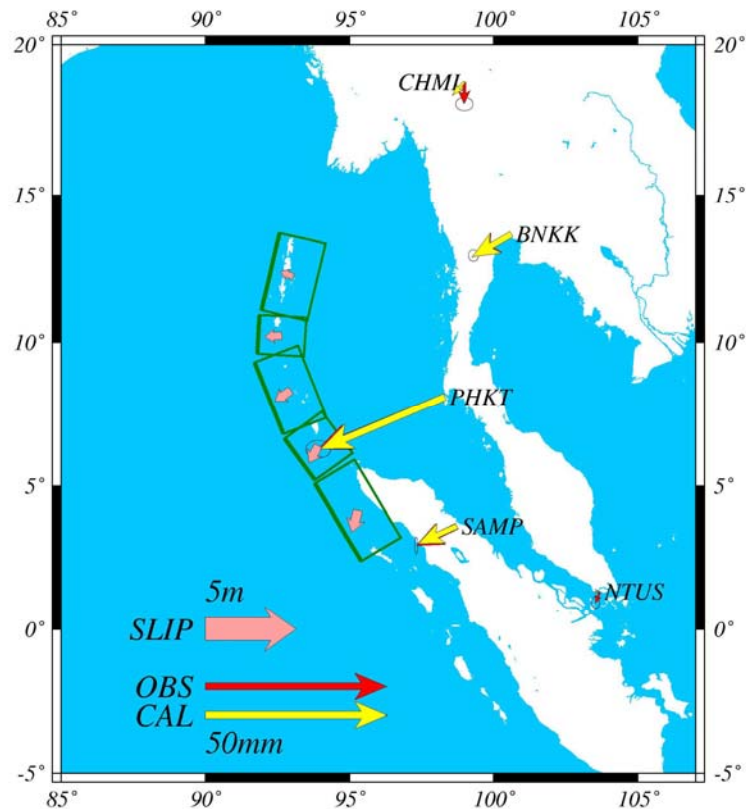


図10. 図9の余効変動の余効すべり断層モデルと観測（赤矢印）及び理論（黄色矢印）変位の比較.

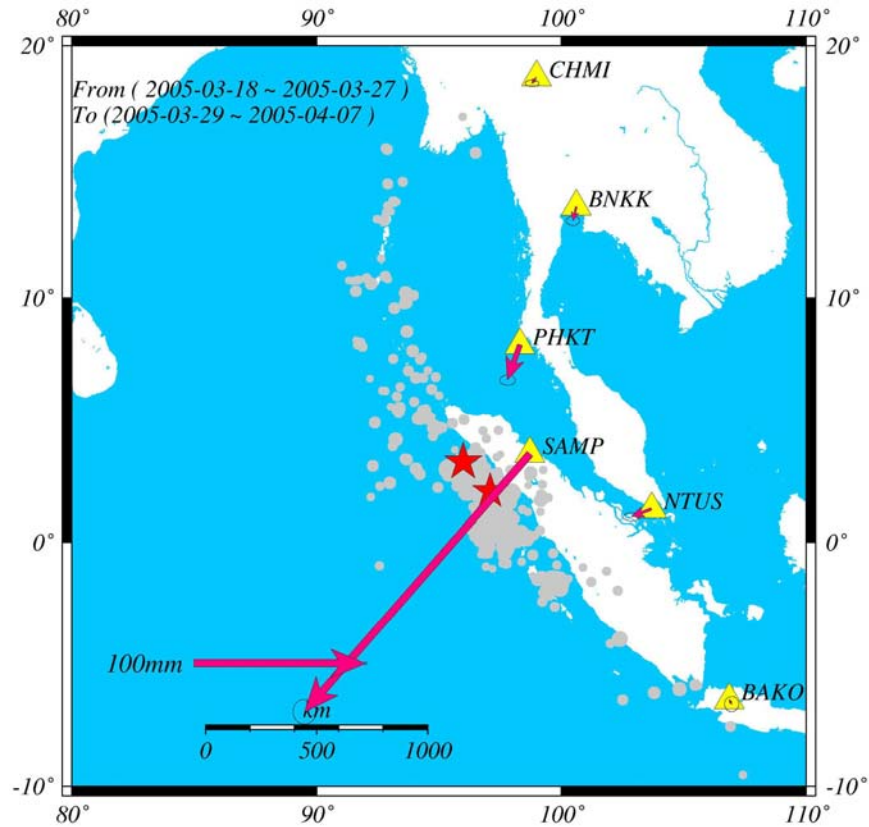


図 11. 2005 年 3 月 28 日のニアス地震に伴う変動. グレーの点は USGS によるニアス地震発生後の余震の震央.

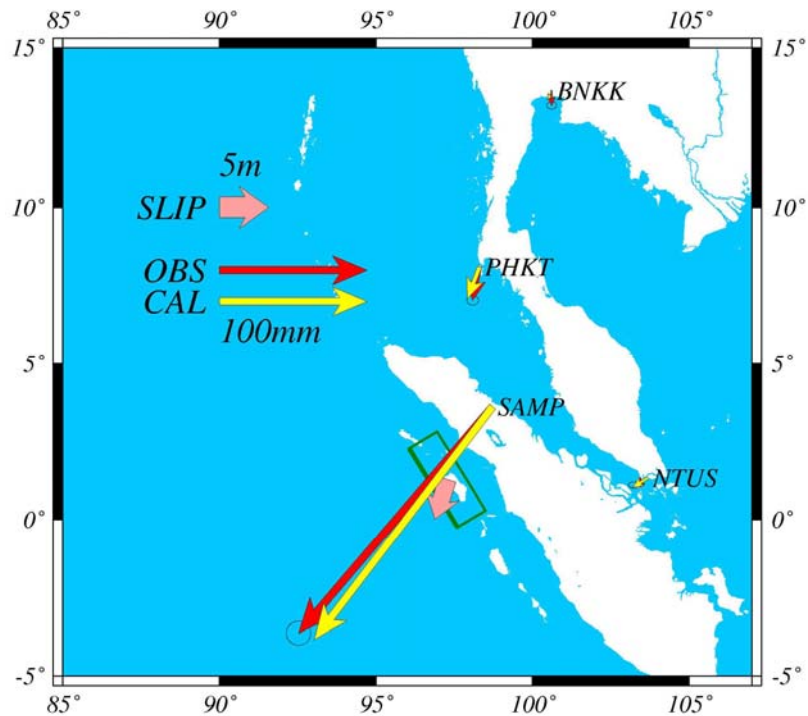


図 12. ニアス地震の断層モデルと観測及び理論変位の比較

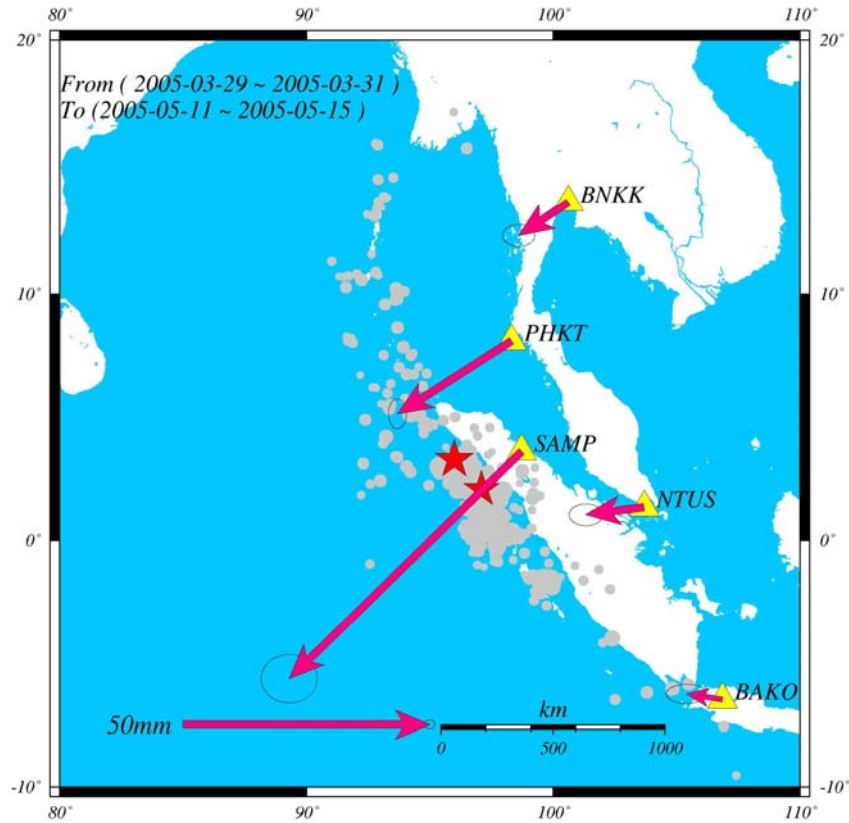


図 13. ニアス地震発生後 5 月中旬までの余効変動. グレーの点是对应する期間の USGS による余震の震央.

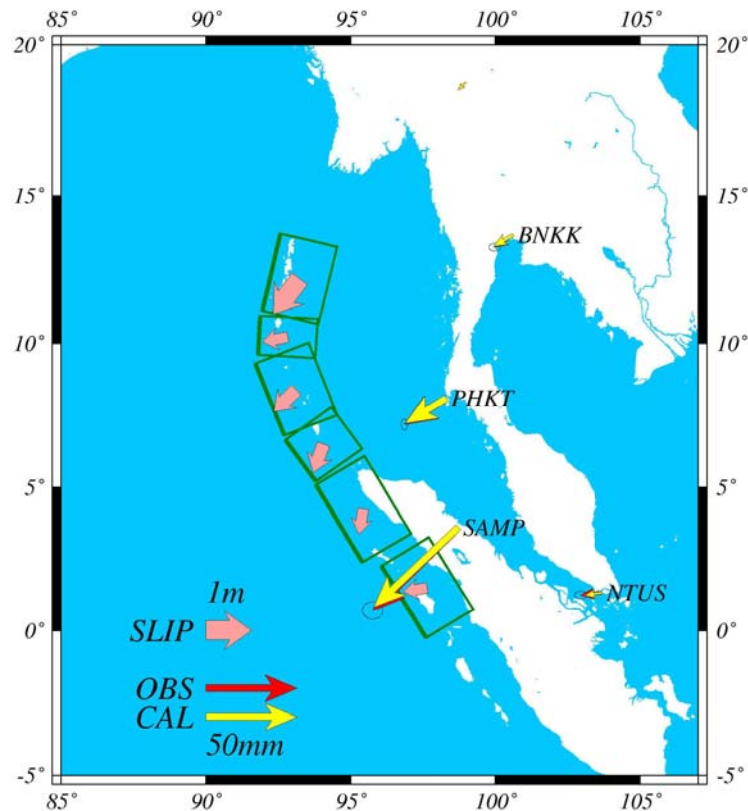


図 14. 図 13 の余効変動の断層モデルと観測および理論変位の比較.

●キネマティック解析による12月26日の本震時変動の解析（暫定結果）

GIPSYによるキネマティック解析を使って、12月26日の本震時の変動を推定した。解析には、タイ国内のチュラロンコン大学の観測点4点のほか、情報通信機構の3点と、スマトラ島パダンの名古屋大太陽地球環境研の観測点のデータも使わせていただいた（図15）。オーストラリアの北西岸のKarratha(KARR)と中国の武漢(WUHN)を不動として、時計を水沢に準拠して30秒サンプリングの解析を行った。

図16～17に12月26日0時30分(GMT)から2時30分までの南北・東西各成分の時間変化を示す。推定誤差が10cmを越える部分はカットしている。また、全体的にトレンドが乗っているが、これは図の範囲外の0時20分頃に大きな擾乱があり、カルマンフィルターを適用した結果、トレンドとして残っているものと考えられる。

ほとんどの観測点において、本震発生時から時間をおいてステップが生じている。ただし、PHKTの東西成分に見られる70分(1時10分)ころの東向きの変位は、誤差が大きいエポックが断続的に見られるため、解析上の問題と考える。BNKKやSAMPなどの東西成分の時間的変化を見ると、最終的な変位に落ち着くのは80分頃である。このことは600秒を越える時定数の破壊が生じたことを示唆する。しかし、擾乱後のトレンドや衛星配置の日周変化の影響なども含まれているため、これらの除去について検討を進める必要がある。

GIPSYの解析に関してご指導いただいた東京大学地震研究所宮崎真一氏、データをご提供いただいたProf. Narong Hemmakorn, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, (KMIL), Thailand, Prof. Tharadol Komolmis, Chiang Mai University, Thailand, (独)情報通信研究機構電磁波計測部門電離圏・超高層Gおよび名古屋大学太陽地球環境研究所電磁気圏環境部門の皆さまに感謝いたします。(橋本学・Nithiwatthn Chhoosakul・橋爪道郎・竹本修三・瀧口博士・福田洋一・藤森邦夫・佐藤一敏)



図15. キネマティック解析に用いた観測点(BAKO, COCOを除く)の分布

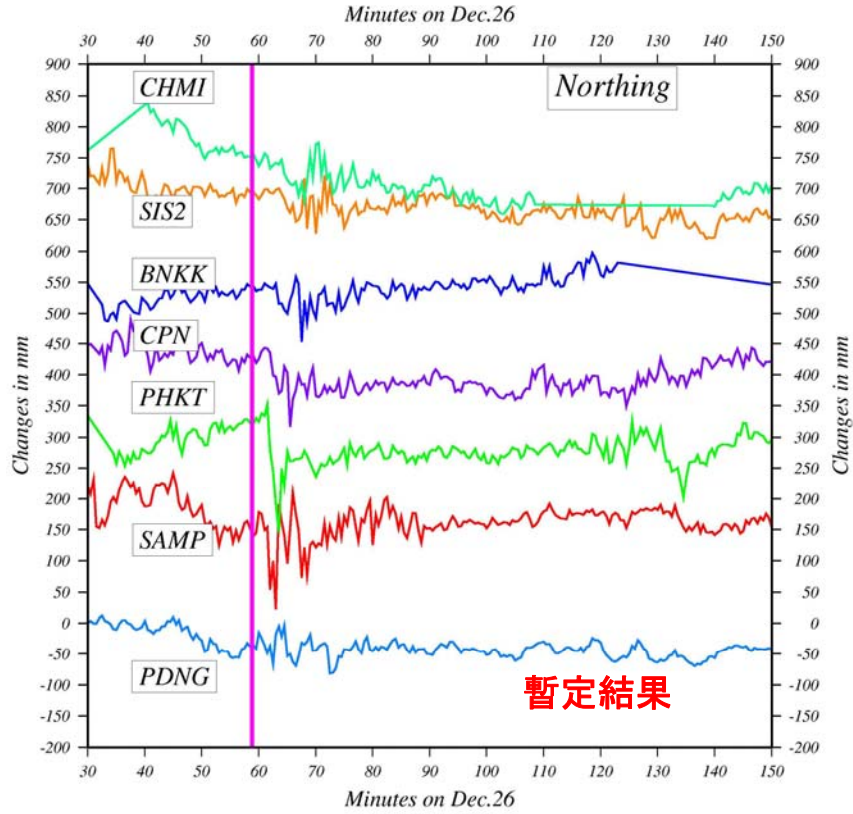


図 16. 12月26日0時30分から2時30分までの南北成分の時間変化. ピンクの縦線は、本震発生時. 縦軸の一目盛は5cm. 横軸の一目盛は10分. 各トレースの上下方向の位置は、緯度に比例している.

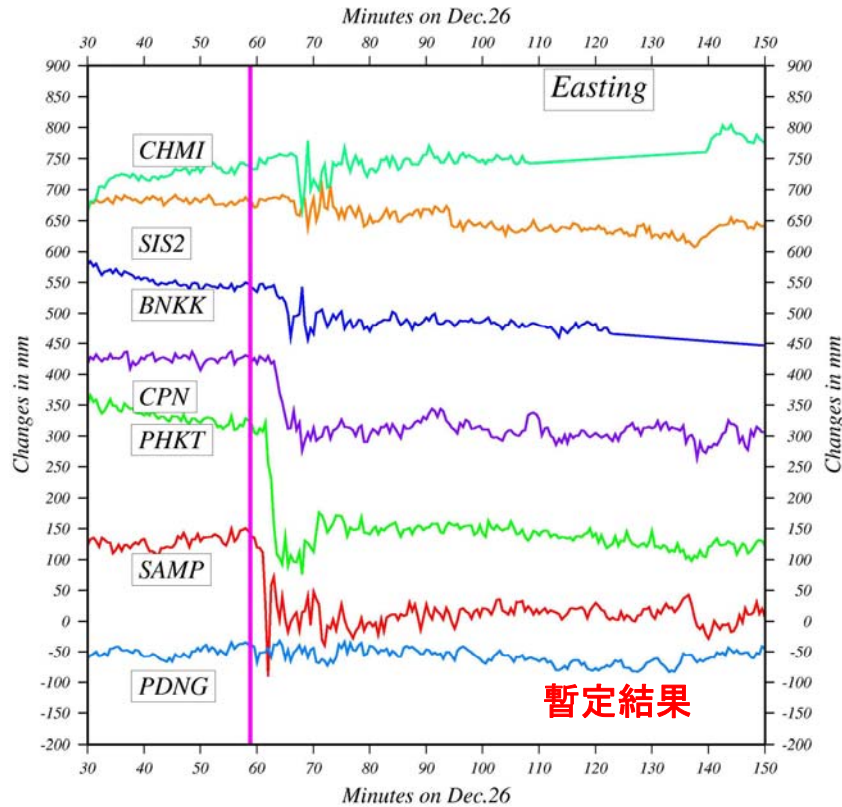


図 17. 12月26日0時30分から2時30分までの東西成分の時間変化. その他は、図16と同じ.