

11 - 8 GPS 連続観測で得られたスマトラ地震に伴う地殻変動

Crustal deformations associated with the Sumatra Earthquake derived from continuous GPS observations

京都大学防災研究所地震予知研究センター

RCEP, DPRI, Kyoto University

京都大学大学院理学研究科

Dept. Geophysics, Graduate School of Science, Kyoto University

チュラロンコン大学理学部地質学科

Dept. Geology, Faculty of Science, Chulalongkorn University

1. スタティック解析

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。第 1 図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。

第 2～3 図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 $\Delta = 600\text{km}$) とスマトラ島北部サンパリ (SAMP: $\Delta = 327\text{km}$) 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。第 4 図に示すように、バンコク (BNKK: $\Delta = 1264\text{km}$) が西北西へ 78mm、チェンマイ (CHMI: $\Delta = 1746\text{km}$) 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。第 4 図に水平変位ベクトルを、第 5 図にこれから推定した断層モデルを示す。断層モデルは国土地理院 (2005a) 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)。

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 (第 2 図)。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(第6図)。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(第7図と第9図)、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。第6図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っており、応力状態に変化が生じたことが考えられる。第8図と第10図は、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(第11図)。第12図は、国土地理院(2005b)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(第13図)。第14図は、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)

参 考 文 献

- 国土地理院, 2005a, 人工衛星画像を用いた海岸線変化抽出による2004年スマトラ沖地震・インド洋津波に伴う隆起・沈降域の把握, 地震予知連絡会報, 74, 580-585.
- 国土地理院, 2005b, 衛星レーダー画像を用いた海岸線変化抽出による2005年3月28日スマトラ

沖地震に伴う隆起・沈降域の把握, 地震予知連絡会報, 74, 586-588.

Marone, C., C.H. Scholz, and R. Bilham, 1991, On the mechanics of earthquake afterslip, *J. Geophys. Res.*, 96, 8441-8452.

Rajendran, C. P., A. Earnest, K. Rajendran, R. Bilham, and J. T. Freymueller, 2005, A slow $M_w \geq 8.7$ earthquake embedded in the Andaman segment of the great 2004 Sumatra rupture, *Nature* submitted.

表 観測データのモデリングに用いた断層パラメータ.

Table. Fault parameters used in modeling of observed displacements

(a) 2004年12月26日の本震の断層パラメータ

(a) Fault parameters for the mainshock of December 26, 2004

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

(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

(b) Fault parameters for postseismic deformations during the period from December 27, 2004 to the end of January, 2005

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月からニラス地震直前までの余効変動に対する断層パラメータ

(c) Fault parameters for postseismic deformations during the period from February to the Nias earthquake of March 28, 2005

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
 (d) Fault parameters for the Nias earthquake of March 28, 2005

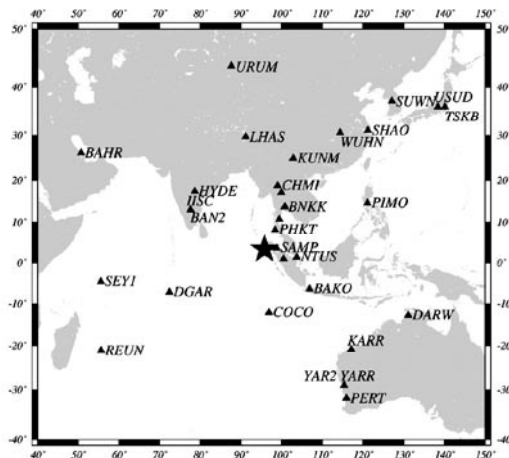
Lat.	Lon.	L	W	H	Strike	Dip	Us	Ud	Rake	U	Mo	Mw
-0.25	97.60	330	120	10	329	14	-2.80±0.53	3.27±0.26	130.63	4.30	6.82×10 ²¹	8.49

(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
 (e) Fault parameters for postseismic deformations during the period from the Nias earthquake to mid-May

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

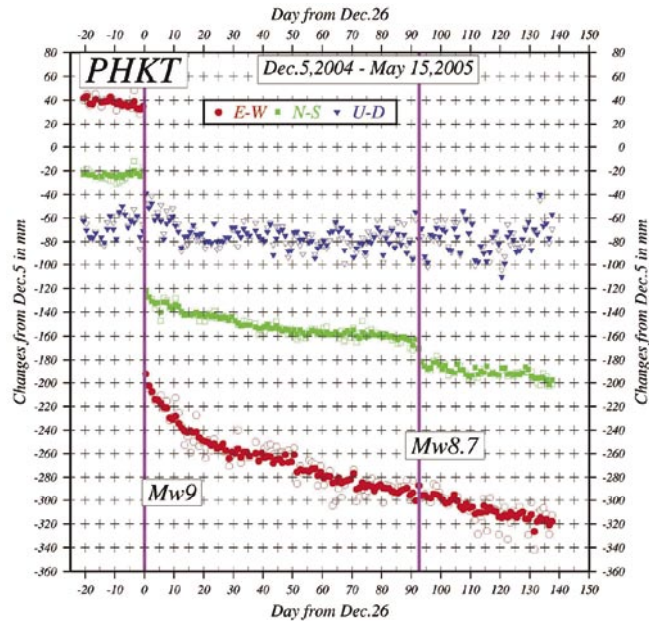
Lat と Lon は断層上端南側の緯度・経度, L は長さ (km), W は幅 (km), H は上端の深さ (km), Strike は走向, Dip は傾斜, Us, Ud は左ずれおよび逆断層すべり (m), Rake はすべり角, U はすべり量 (m), Mo はモーメント (剛性率 40GPa を仮定), Mw はモーメント・マグニチュード (以下同じ)

Lat and Lon are latitude and longitude of upper and southern edge of the fault, respectively. L, W, and H are length, width and the depth of upper margin, respectively, in km. Strike is measured from the north in degree. Us and Ud is strike and dip-slip components of slip, respectively, in m. Rake is in degree, and U is total slip. Mo is geodetic moment and Mw is moment magnitude.



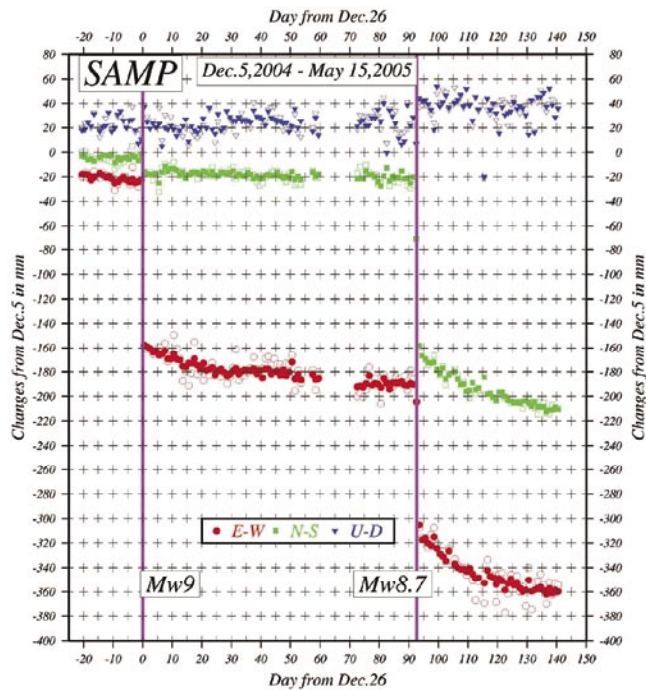
第1図 GPS連続観測点の配置. 星印は2004年12月26日の本震の震央を示す.

Fig.1 Distribution of continuous GPS observation sites, Star indicates the epicenter of the mainshock of Dec. 26, 2004.



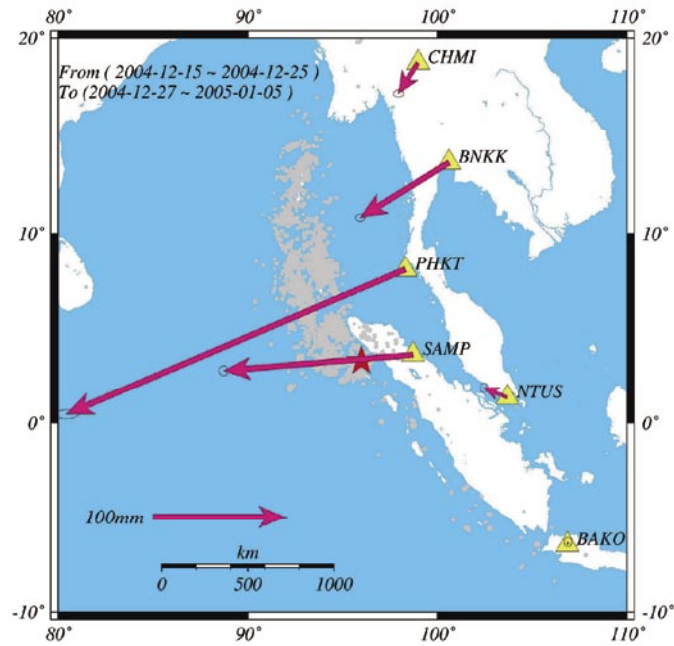
第2図 タイ南部プーケット (PHKT) の座標変化. 赤が東西, 緑が南北, 青が上下成分を示す. それぞれ白抜きのシンボルが生データで, これに空間フィルターを適用した結果を塗りつぶしたシンボルで示す. 縦軸の一目盛は20mm. 横軸は2004年12月26日からの経過日数を示す. 一目盛は10日. ピンクの縦線は2004年12月26日の本震と2005年3月28日のニース地震の発生時を示す.

Fig.2 Coordinate changes at Phuket (PHKT) in southern Thailand. Red, green and blue symbols show east-west, north-south and vertical components, respectively. Solid and open symbols indicate spatial filtered and raw data, respectively. One division in vertical axis is 20mm. Horizontal axis, whose one division is 10 days, shows elapsed days from Dec. 26, 2004. Pink vertical lines show origin times of the mainshock and the Nias earthquake on March 28, 2005.



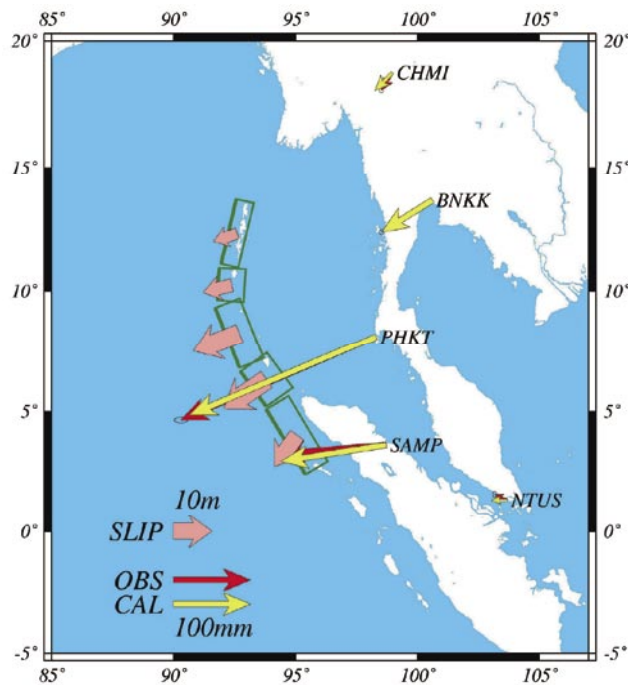
第3図 スマトラ島北部サンパリ (SAMP) の座標変化. シンボル等は第2図と同じ.

Fig.3 Coordinate changes at Sampari (SAMP) in northern Sumatra. See also the legend of Fig.2.



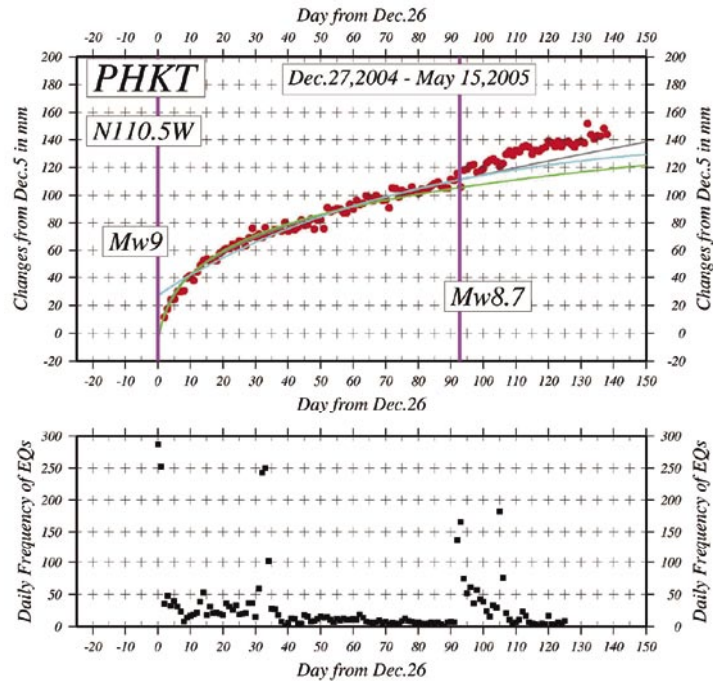
第4図 12月26日の本震時の変位（発生前後10日間の平均の差）。グレーの点はUSGSによるニアス地震直前までの余震の震央。

Fig.4 Coseismic displacements from the mainshock of Dec. 26, 2004. Displacements are estimated as differences of averaged positions 10 days before and after the occurrence. Gray dots indicate epicenter of aftershocks during the period from the mainshock to Nias earthquake determined by USGS.



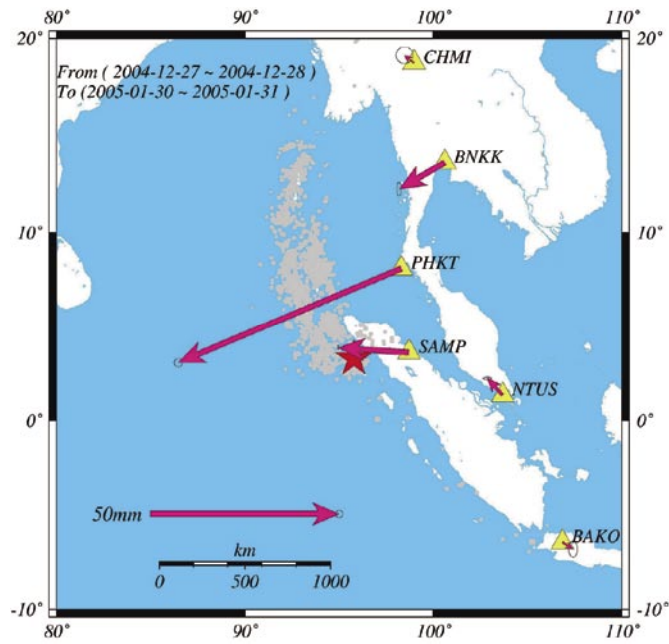
第5図 本震の断層モデルと観測変位（赤矢印）と理論変位（黄色矢印）の比較。ピンクの矢印は推定されたすべり。

Fig.5 Comparison of observed and theoretical displacements (red and yellow arrows, respectively). Green rectangles show the segments of modeled fault. Pink arrows show estimated slips.



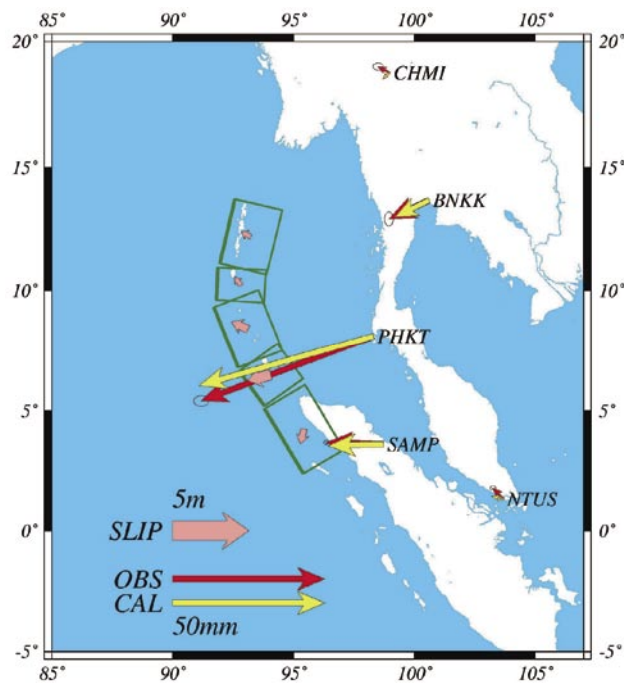
第 6 図 上は、プーケットの最大変位方向 (N110.5°W) の座標成分の時間変化 (赤丸). 3 本の実線は、岩石実験に基づく Marone et al.(1991) の理論式によるフィッティング結果. 緑が 2004 年 12 月 26 日から 2005 年 1 月 31 日までの期間のデータ, 水色が 2005 年 2 月 1 日から 3 月 27 日までの期間のデータ, グレーが 2004 年 12 月 26 日から 2005 年 3 月 27 日までの期間のデータにそれぞれフィッティングした結果. 下は USGS による日別余震回数.

Fig.6 Fitting of logarithmic decaying function by Marone et al.(1991) to the time series of postseismic movement at PHKT in the direction of its maximum displacement. Three curves show the results of fitting to data during different period: Gray solid line, December 27, 2004 – January 31, 2005; Gray dashed line, February 1 – March 27, 2005; Gray centered line, December 27, 2004-March 27, 2005. Lower diagram is temporal variation in daily frequency of aftershocks observed by NEIC/USGS.



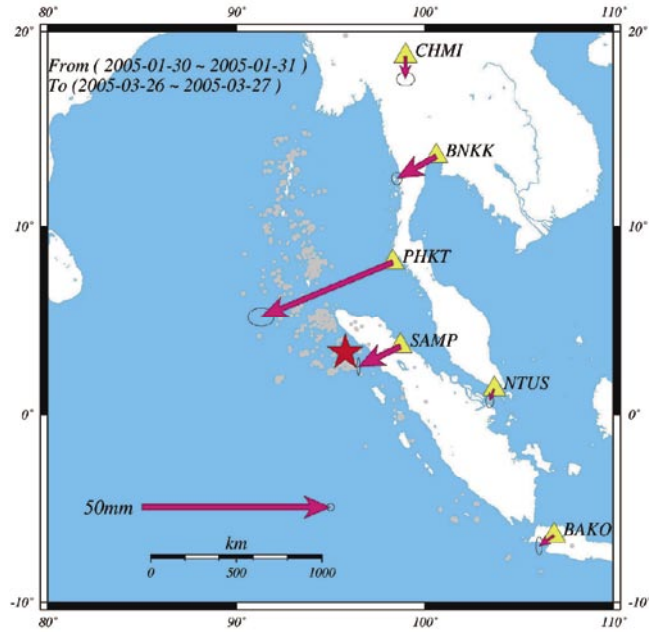
第 7 図 本震直後から 2005 年 1 月末までの余効変動. グレーの点は USGS による対応する期間の余震の震央.

Fig.7 Postseismic displacement field in southern Asia during the period from December 26, 2004 and January 31, 2005. Light gray circles show the epicenters of aftershocks during the corresponding period.



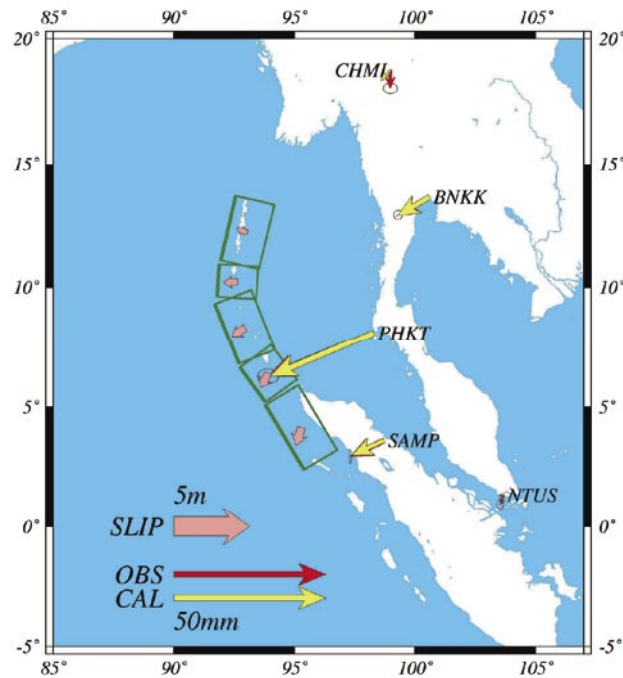
第 8 図 第 7 図の余効変動の余効すべり断層モデルと観測 (赤矢印) 及び理論 (黄色矢印) 変位の比較.

Fig.8 Comparison of theoretical and observed postseismic displacements during the period from December 27, 2004 - January 31, 2005. February 1 - March 27, 2005.



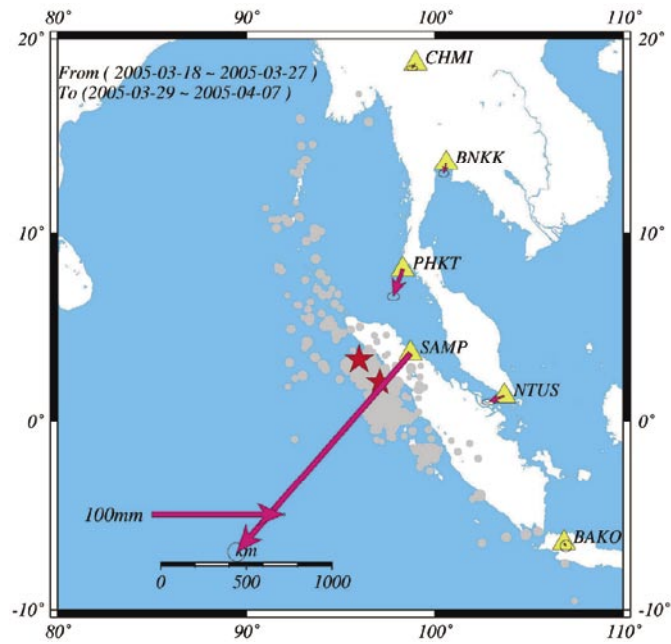
第 9 図 2005 年 2 月初旬からニアス地震発生直前までの余効変動。グレーの点は USGS による対応する期間の余震の震央。

Fig.9 Postseismic displacement field in southern Asia during the period from February 1 to March 27, 2005. Light gray circles show the epicenters of aftershocks during the corresponding period.

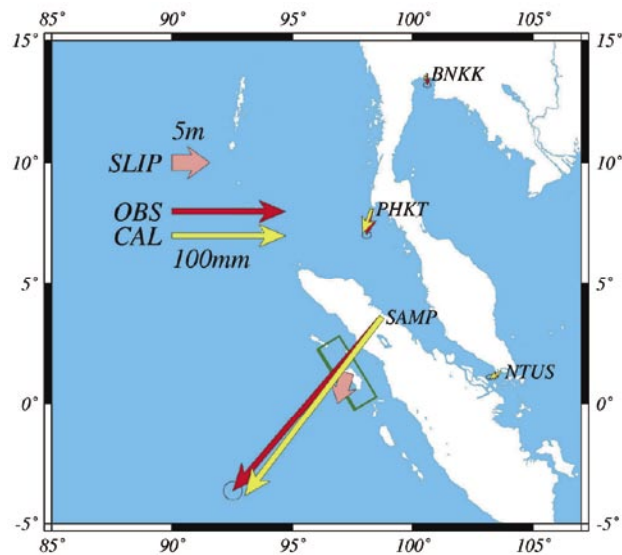


第 10 図 第 9 図の余効変動の余効すべり断層モデルと観測（赤矢印）及び理論（黄色矢印）変位の比較。

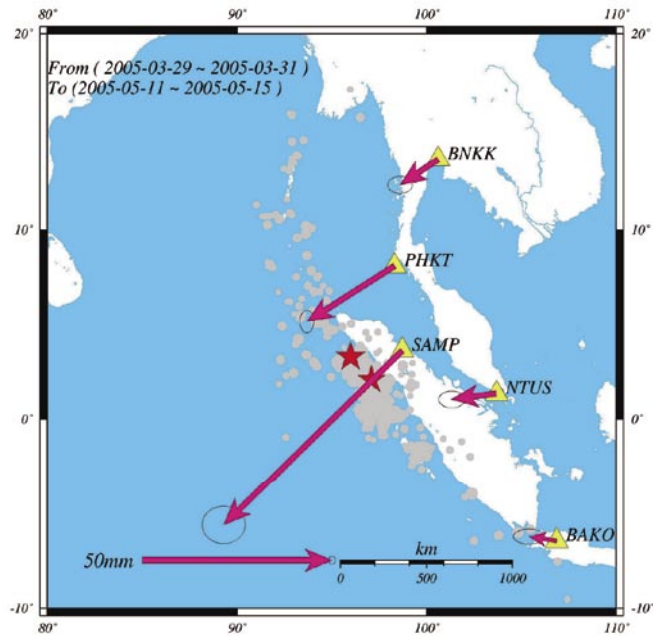
Fig.10 Comparison of theoretical and observed postseismic displacements during the period from February 1 to March 27, 2005.



第 11 図 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.
 Fig.11 Coseismic displacements from the March 28, 2005, Nias earthquake as the differences in 10 day-averaged coordinates before and after the event. Stars show the epicenters of the December mainshock and Nias event.

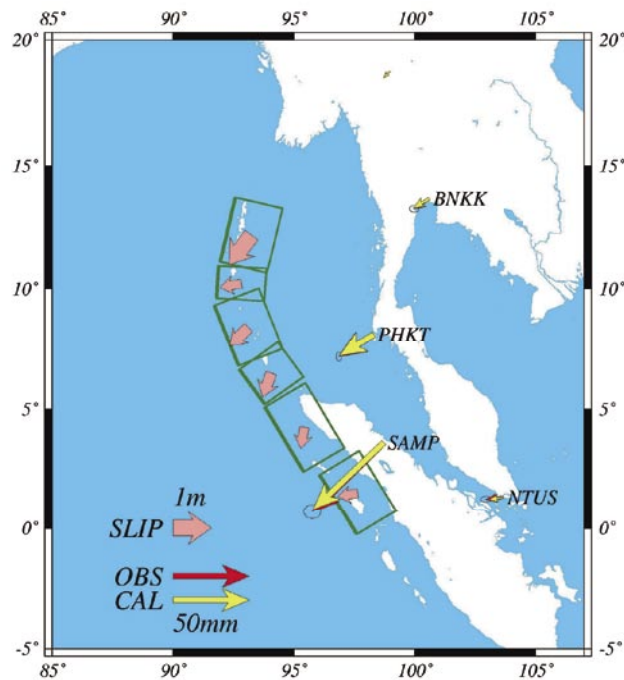


第 12 図 ニアス地震の断層モデルと観測及び理論変位の比較
 Fig.12 Comparison of theoretical and observed coseismic displacements from the Nias earthquake.



第 13 図 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.

Fig.13 Postseismic displacement field in southern Asia during the period from March 29 to May 15, 2005. Light gray circles show the epicenters of aftershocks during the corresponding period.



第 14 図 第 13 図の余効変動の断層モデルと観測および理論変位の比較.

Fig.14 Comparison of theoretical and observed postseismic displacements after the Nias earthquake.

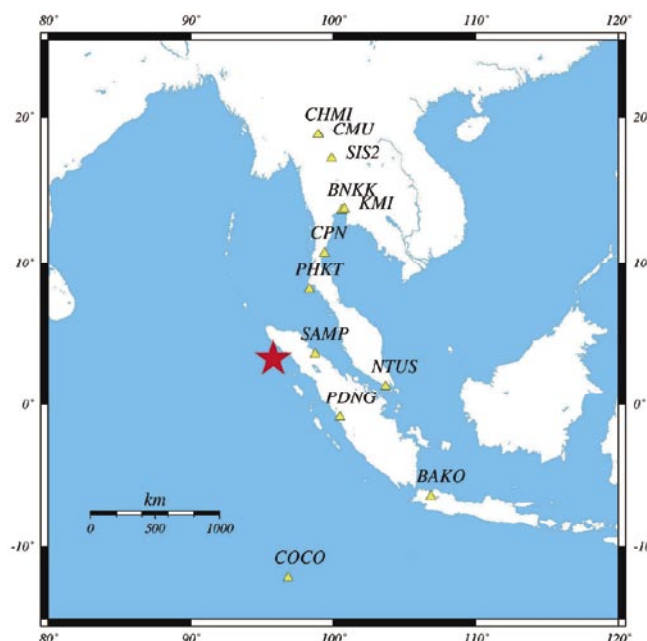
2. キネマティック解析による12月26日の本震時変動の解析（暫定結果）

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（第15図）。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。

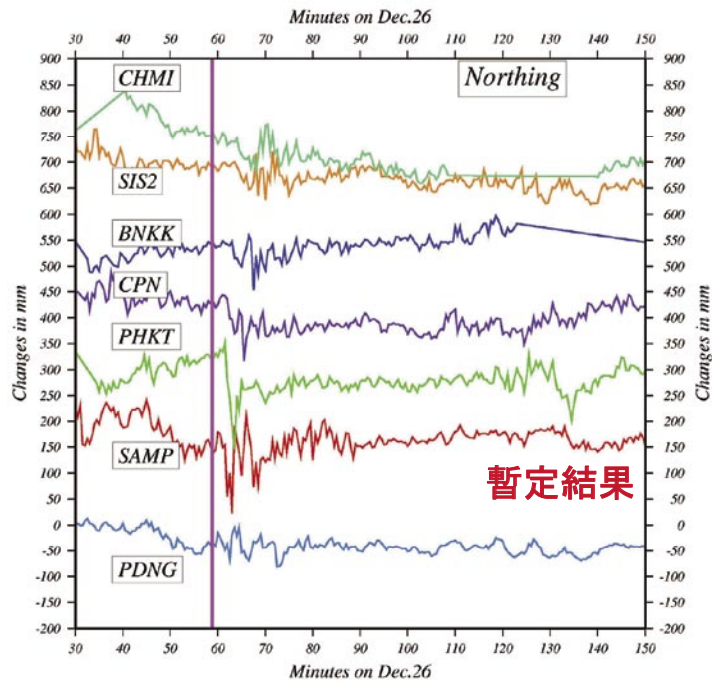
第16～17図に12月26日0時30分(GMT)から2時30分までの南北・東西各成分の時間変化を示す。推定誤差が10cmを越える部分はカットしている。また、全体的にトレンドが乗っているが、これは図の範囲外の0時20分頃に大きな擾乱があり、カルマンフィルターを適用した結果、トレンドとして残っているものと考えられる。

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,(KMITL), 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)

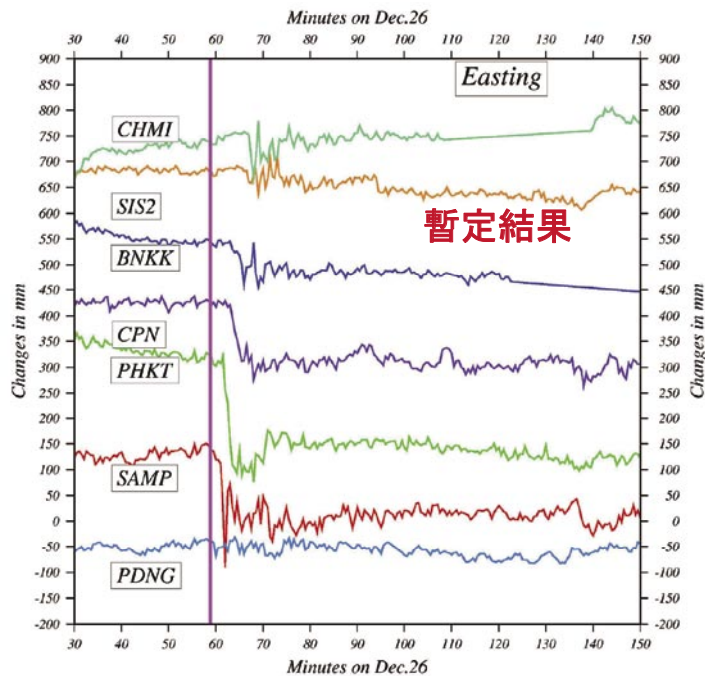


第15図 キネマティック解析に用いた観測点(BAKO, COCOを除く)の分布
Fig.15 Distribution of CGPS sites used in kinematic analysis except BAKO and COCO



第 16 図 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.

Fig.16 Temporal changes in north-south components of coordinates of each site from 0:30 to 02:30 on December 26, 2004. Pink vertical line show the origin time of the mainshock. One division of vertical axis is 5cm, while that of horizontal axis is 10min. Vertical position of each trace is proportional to its latitude.



第 17 図 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, 第 16 図と同じ.

Fig.17 Temporal changes in east-west components of coordinates of each site from 0:30 to 02:30 on December 26, 2004. See also the legend of Fig.16.