

2.1.3 霧島山における傾斜観測

2.1.3.1 はじめに

地中に埋設したことによる影響などによるドリフトや、降水に対して非線形で不規則な応答、地震や岩盤と計器との固着の仕方などによってステップが生じるなど、傾斜観測は長期的な変動を見るにはあまり適していない。しかしながら、GPSを用いた地殻変動観測と比較し、連続データが得られること、感度が3桁以上高いという特徴があり、短い時間スケールの変動を見ることに適しており、噴火活動や火山性微動に対応した変動も数多く報告されている（例えば、島田・他、1988、福山、1988；Oikawa *et al.*, 1991；北川・他、1995；札幌管区気象台・森測候所、2002；中禮・渴山、2006）。

2003年11月に霧島山新燃岳および御鉢火口の周辺3箇所において米国 Pinnacle Technologies Inc. 製坑内設置型高精度傾斜計5000型による連続観測を開始した。ここでは、観測システムと観測結果の概要、火山性微動に伴って記録された傾斜変動の解析結果について述べる。

2.1.3.2 霧島山における傾斜観測システム

(1) 観測点と設置方法

霧島山の主要な活動火口は新燃岳と御鉢であることから、これらの火口における火山活動に伴う浅い変動源によって生じる傾斜変動を捉えることに主眼に置いて各火口から2km以内に設置することを目標に地点選定を行った。傾斜変動は局所的な地形の影響を受けることから、平坦な場所に設置する必要がある。今回整備した傾斜観測装置はAC電源、固定電話回線を必要としないため、地点選定の制約は少なくなるものの観測井の掘削工事に用いる機材を運搬、設置できる必要がある。これらの条件を勘案し、新燃山頂部（新燃岳火口のN29°E, 1.1km, 御鉢火口のN28°W, 4.4km）、荒襲（御鉢火口のS24°W, 1.3km, 新燃岳火口のS26°E, 4.6km）、湯之野（御鉢火口のW8°N, 4.1km, 新燃岳火口のS31°W, 2.8km）の3箇所を選定し（Fig. 2.1.3.1, Table 2.1.3.1），観測井掘削、観測装置設置工事を2003年11月8～22日に実施した。なお、新燃山頂部観測点への掘削機材や観測装置の運搬は新燃山頂部観測点の南西約7kmにある神話の里公園を基地としてヘリコプターによって行った。

観測井の構造をFig. 2.1.3.2に示す。観測井は直径15cm、深さ12mの掘削孔に底部に蓋をした内径7.5cmの塩化ビニル管（以下PV管と記す）を挿入し、1.8m以深をコンクリートで固め、その上部は内径15cmのPV管で孔壁の崩落を保護している。表層部をコンクリートで固定していないのは地表面からの振動の影響を避けるためであり、観測井への雨水の進入を防止するためPV管は地表面から数十cm立ち上げている。このPV管の底部に粒径のそろった珪砂を数cm程度敷き、ワイヤーで吊り下げた傾斜計を入れ、傾斜計とPV管との間に珪砂を詰め固定している。傾斜計は珪砂ですべて埋め込まず、再設置可能な状態になっている。観測井上端は塩化ビニル製の蓋をかぶせている。なお、傾斜計の北方向を内蔵電子コンパスを利用し、霧島山における偏角（6°西偏）を補正した上で、真北に合わせた。

観測点の土質柱状図をFig. 2.1.3.3に示す。設置深度では各点とも礫混じりの火山灰層であった。荒襲観測点（以下荒襲）は林道脇の平坦な草地で、表層3.6mまでは玉石や木片が混じった盛り土、6.4mまではシルト混じりの中～細砂、8.8mまでは最大径300mmの玉石混じりの砂礫、その下部は礫混じりの中～粗径の砂、地下水位は7.13mであった。湯之野観測点（以下湯之野）は気象庁A点地震計送信機小屋から数m離れた、森林地帯の樹木を伐採した空き地にある。表層2.3mまで砂混じりシルト、3.0mまで玉石、9.5mまでは安山岩質の溶岩礫（最大径400mm）混じりのシルトで火山灰質の砂が混入していた。その下部は安山岩質の礫混じりの火山灰質の砂で、地下水位は9.4mであった。新燃山頂部観測点（以下新燃）周辺は灌木で覆われた平坦な場所であり、表層0.8mまでは軽石が混入した火山灰質の砂で、この層の下部にはシルトが混入していた。これ以深は礫径10～70mm、最大径150mm程の礫混じりの火山灰質の砂で、崩壊しやすく、地下水位は9.5mであった。各観測井底部の標準貫入試験結果は、荒襲の深度11mで50回/10cm、12mではN=27、湯之野50回/3cm、新燃50回/10cmであった。

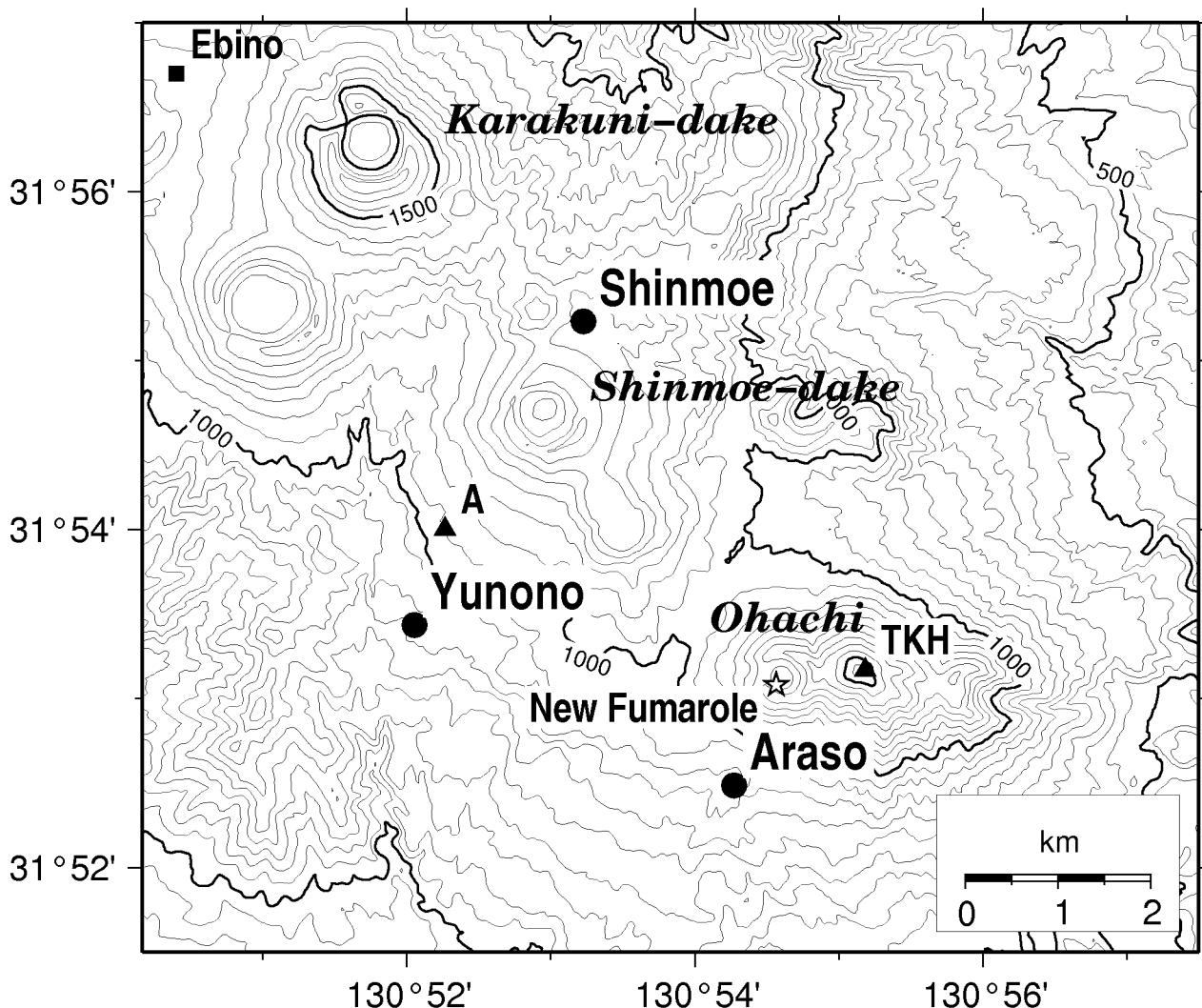


Fig. 2.1.3.1 Location map of tilt observation sites at Kirishima volcano (solid circles), seismic stations (triangles), and Ebino AMeDAS precipitation station (square). Star denotes the new vent that began fumarolic activity on 12 Dec. 2003.

Table 2.1.3.1 Locations of tilt observation sites at Kirishima volcano.

Station Name	Station code	Latitude [deg N]	Longitudde [deg E]	Height [m]	Telemetry
湯之野	Yunono	TC01	31.89053	130.86761	861
荒巻	Araso	TC02	31.87469	130.90453	Sattelite mobile phone
新燃山頂部	Shinmoe	TC03	31.92053	130.88711	Sattelite mobile Phone

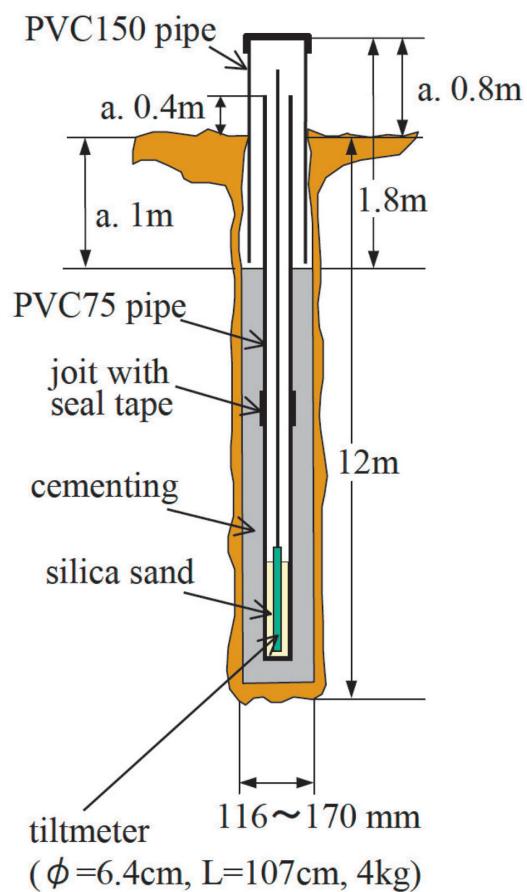


Fig. 2.1.3.2 Side view of tilt observation well.

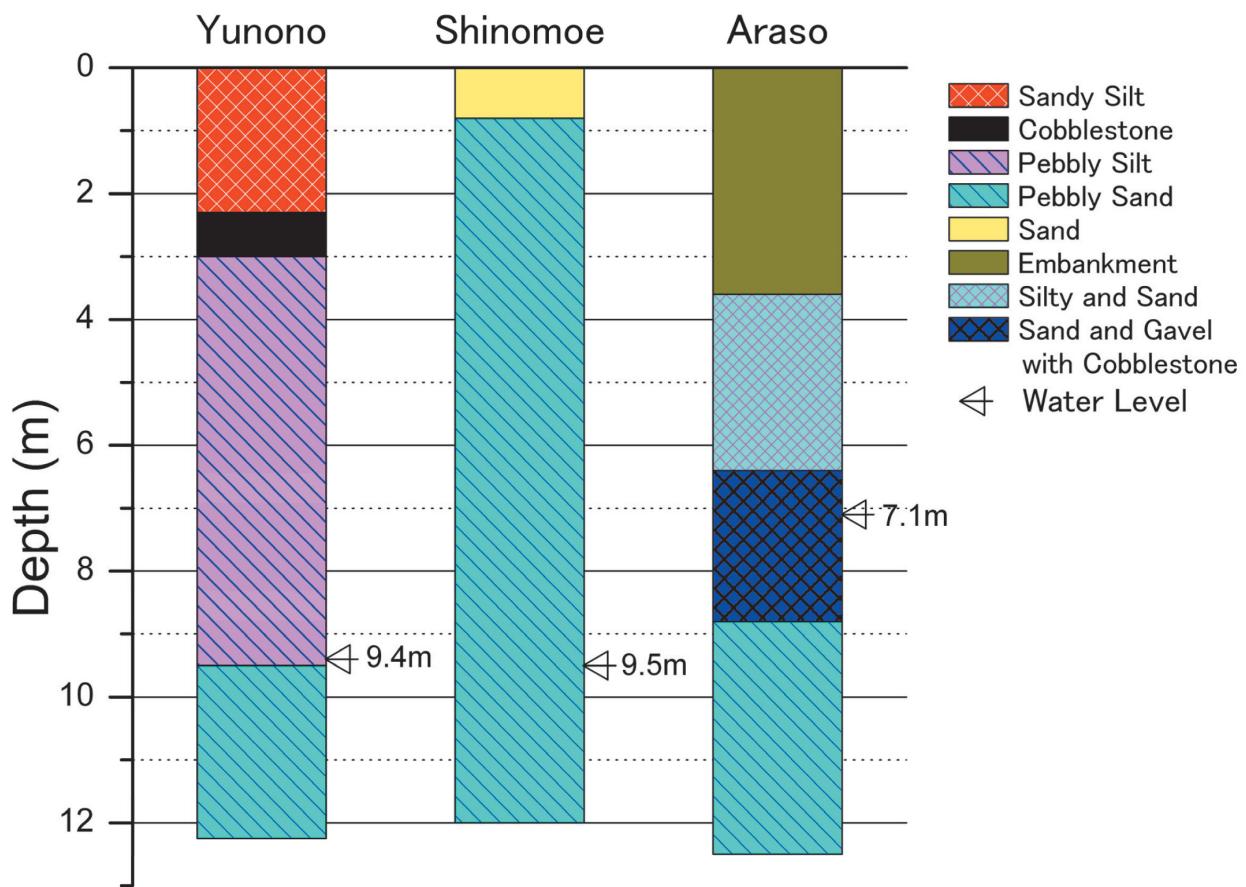


Fig. 2.1.3.3 Soil boring logs at Yunono, Shinmoe, and Araso tilt stations.

(2) 観測システム

使用した傾斜計は米国 Pinnacle Technologies Inc. 製坑内設置型高精度傾斜計5000型である (Photo 2.1.3.1, Table 2.1.3.2, 2001年以前は5500シリーズと呼称されていた)。この傾斜計は直交するように組み立てられた2個の気泡式センサーを利用し、1 nrad という高い分解能と、自動レベリング機構によって $\pm 8^\circ$ という広いダイナミックレンジを有し、電子コンパス（分解能2度）とRS-232Cポートを介して各種パラメータ設定が可能なデータロガーも内蔵されている（容量は88,000データ）。直径6.4cm、長さ107cm、重量4kgと小型軽量で、12Vで動作し、消費電力は280mWと小型のバッテリーと太陽電池のみでも連続観測を行える。出力データは内蔵24bit A/D変換器でデジタルデータに変換された傾斜X、Y成分、傾斜計内部温度、供給電圧であり、1~255秒サンプリングで収録できる、内蔵コンパスの方位についても記録されており、設置方位に変化がないかモニタできる。この傾斜計は国内では岩手山における火山観測に初めて利用され（松岡・他、1999）、2004年の浅間山噴火活動において、個々の爆発的噴火に前駆した傾斜変動を捉えた（中禮・渴山、2006）。

新燃(Photo 2.1.3.2), 荒襲の観測システムは傾斜計本体、(株)近計システム社製通信制御ユニットTCU-1000、衛星携帯電話、太陽電池、バッテリーで構成されている (Fig. 2.1.3.4(a))。通信制御ユニットなどが収納された筐体（寸法：W60×H100×D25cm）と太陽電池パネル部は、各々45×90cmの鉄板2枚の上に、20×20×50cmのコンクリートブロック2個をボルトで固定した基礎（総重量143kg）に取り付けた上、基礎を半埋設し平均風速30m/s以上の強風に耐える構造とした。湯之野では商用電源とNTTアナログ電話回線が利用可能な気象庁A点送信機小屋内に設置したアナログモデムを利用してテレメータした。モデムと傾斜計の電力は無停電電源装置を介して供給し、停電に対処した (Fig. 2.1.3.4(b))。

データ収集はパーソナルコンピュータ上で動作する専用ソフトウェアによった。Fig. 2.1.3.5(a)に気象研究所に設置したデータ収集システムの構成を示す。サンプリング間隔は10秒で、データ回収は1日3回9, 15, 21時に観測点側システムを呼び出すダイヤルアップ方式で行った。新燃の回収時刻は各05分から、荒襲は20分から、湯之野は35分からである。収集側からの保守作業を行うことを想定し、新燃および荒襲では12時台も待ち受け状態にした。湯之野では常時待ち受け状態になっている。データ収集システムの制約により、約25分毎にサンプリング時刻が2秒前後とび、通信時には約3分間欠測となる。また、衛星回線の通信状態によっては通信途中にデータ収集が中断され、そのタイミングによっては計測中止状態となることがある。Fig. 2.1.3.5(b)に本ソフトウ

Table 2.1.3.2 Pinnacle Tiltmeter model 5000 specifications.

Resolution	1 nrad
Range	$\pm 8^\circ$ from vertical
Max gain	1000 mV/ μ rad
Gain levels	3
Leveling ability	Self leveling
Data storage	internal A/D and 88,000 data storage
Sampling interval	1~255 sec
A/D resolution	24 bit
Azimuth detection	internal magnetic compass ($\pm 2^\circ$)
Borehole diameter	Min 7 cm
Dimension	6.4 cm diameter × 107 cm
Weight	4 kg
Operating range	-25~85 °C
Average power consumption	280 mW



Photo 2.1.3.1 Pinnacle tiltmeter model 5000 and observation well of Araso station.



Photo 2.1.3.2 Tilt observation system at Shinmoe station.

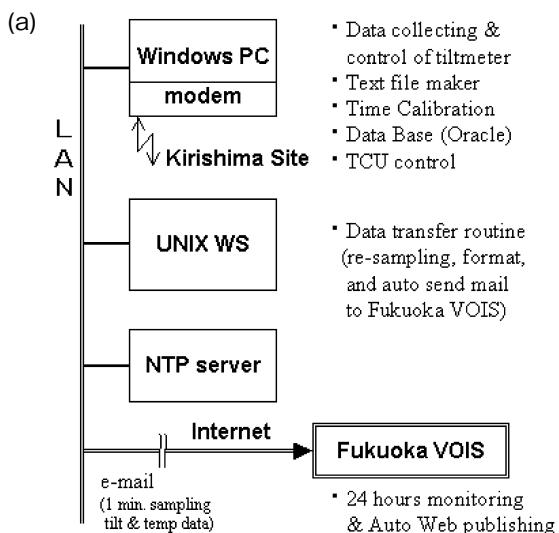
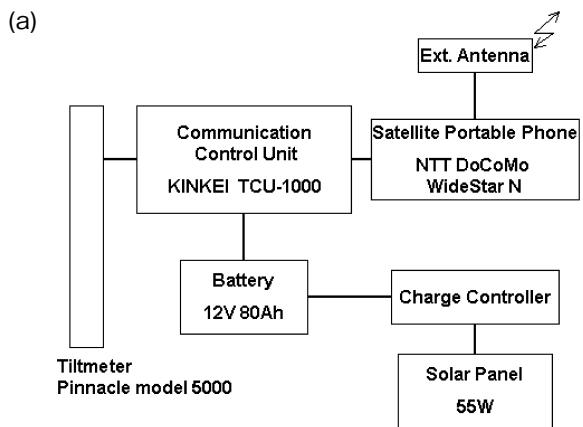


Fig. 2.1.3.5 (a) Block diagram of tilt data-collecting system at MRI.

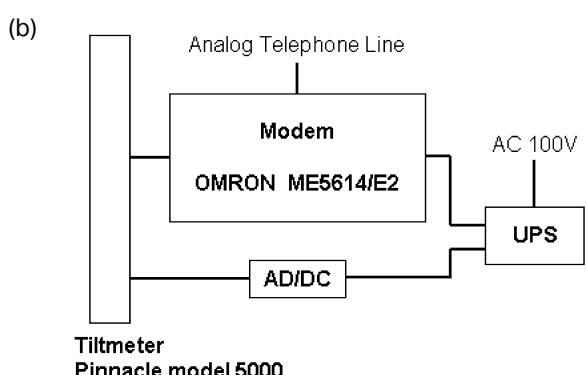


Fig. 2.1.3.4 Block diagram of the tilt observation system. (a) Satellite phone system at Shinmoe and Araso stations. (b) Wired phone system at Yunono station.

エアで通常表示されている監視画面を示す。ログ画面や観測データ表示画面を随時モニタし、異常があった際には、待ち受け時間内に手動により観測点側システムにアクセスし、パラメータ設定や計測再開作業を行った。観測点側システムに自動時刻校正機能がなく、データ収集時に気象研究所側のPCから随時時刻合わせを行った。このため、最大数分程度の時刻ずれが生じている時もある。

2004年12月、火山性微動に対応して傾斜変動が現れたため、福岡管区気象台火山監視・情報センターでもこれらの傾斜データを監視することとなった。傾斜2成分、温度、電圧値のテキストファイルを生成させ、このテキストファイルを整形、1分値にリサンプリングしてセンター宛てに自動的に電子メールによって福岡管区気象台に転送するようにした。センターではこのメールを火山監視・情報センターシステム(VOIS)に取り込み常時監視するとともに、荒襲の1日および2週間分の時系列グラフを火山噴火予知連絡会ホームページに貼り付け、関係者向けに公開された。

2.1.3.3 傾斜観測結果

(1) 長期変動

Fig. 2.1.3.6の上段に各観測点の傾斜2成分の30分値の時間変化を示す(2006年2月28日まで)。傾斜は北下

(b)

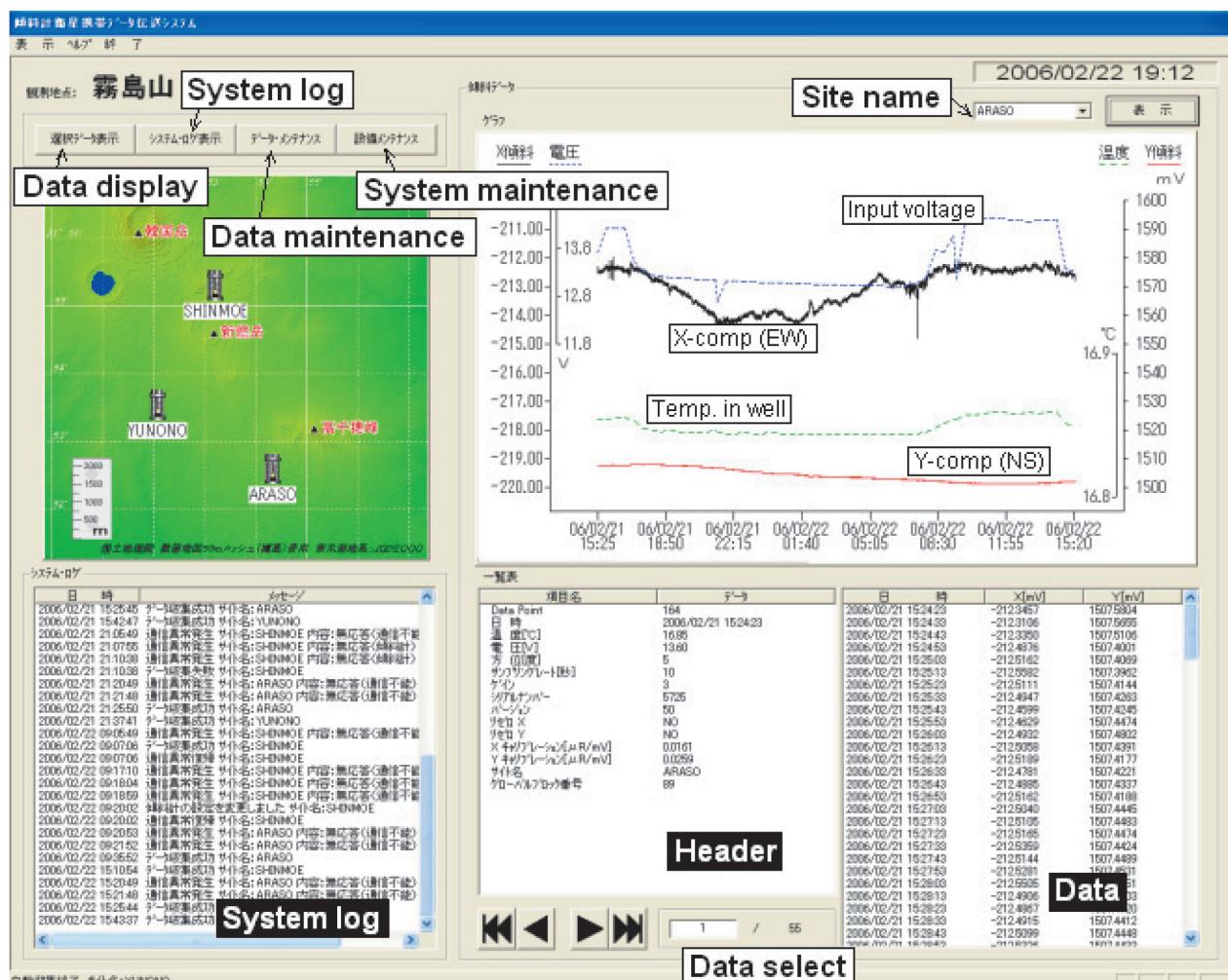


Fig. 2.1.3.5 (b) Monitoring screen of tilt data-collecting system.

がり、東下がりの方向を上向きにプロットしている。また、地震などによって生じたステップ変化は補正している。新燃で2004年9月28日から2005年1月31日、湯之野で2005年7月30日から2006年1月25日の間、通信制御装置やモデムの不調により長期欠測となった。各観測点とも、観測期間中電源部に異常はなく、傾斜計への電圧供給が途絶えたことはなかったと推測され、傾斜のトレンドも長期欠測の前後で特段変化は認められない。

Fig. 2.1.3.6の下段には傾斜計に内蔵された温度計で観測された温度30分値、都城特別地域気象観測所（北緯 $31^{\circ}43.8'$ 、東経 $131^{\circ}4.8'$ 、標高154m）における日平均気温（橙色線）、気圧（水色線）、えびのアメダス観測点（北緯 $31^{\circ}56.7'$ 、東経 $130^{\circ}50.4'$ 、標高1150m）における日降水量（下段の棒グラフ）の変動を示す。地下10mにおける地中温度は通常年平均気温程度で一定している（例えば檀原・友田、1969）。都城におけるこの期間の平均気温は約17°Cであり標高差を勘案すると荒襲、湯之野の平均気温は10°C程度、新燃は6°C程度と推定される。観測された傾斜計内部温度はこれらより数°C高くなっている。また、季節変化の様相も10m深で通常見られる、冬に温度が高くなる変化とは異なっている。これらのこととは、この傾斜計が埋め戻しではなく、設置深度も浅いことから、観測井内部の空気が外気温の影響を受けているためと考えられる。

荒襲では観測初期のトレンドは直線的（東下がり）で、地震時のとびも生ず、傾斜計内部温度の変化も小さかったが、2004年12月頃からトレンドに変化が生じるようになった。Fig. 2.1.3.6の荒襲NS成分の真ん中あたり見えるヒゲ状の変動は2004年12月26日に発生したスマトラ地震に関連した傾斜変動であるが、その左側の小さなヒゲに対応する地震（2004年12月12日14h28mJST、鹿児島県西方沖地震、M5.3）の後に、トレンドが変化したように見える。その後、何度かトレンドに変化が見えるが、それに対応する顕著な降水現象や地震などはなく、トレンドに変化が現れる原因は不明である。新燃では降水によって顕著な傾斜変動を示し、傾斜計内部温度も同

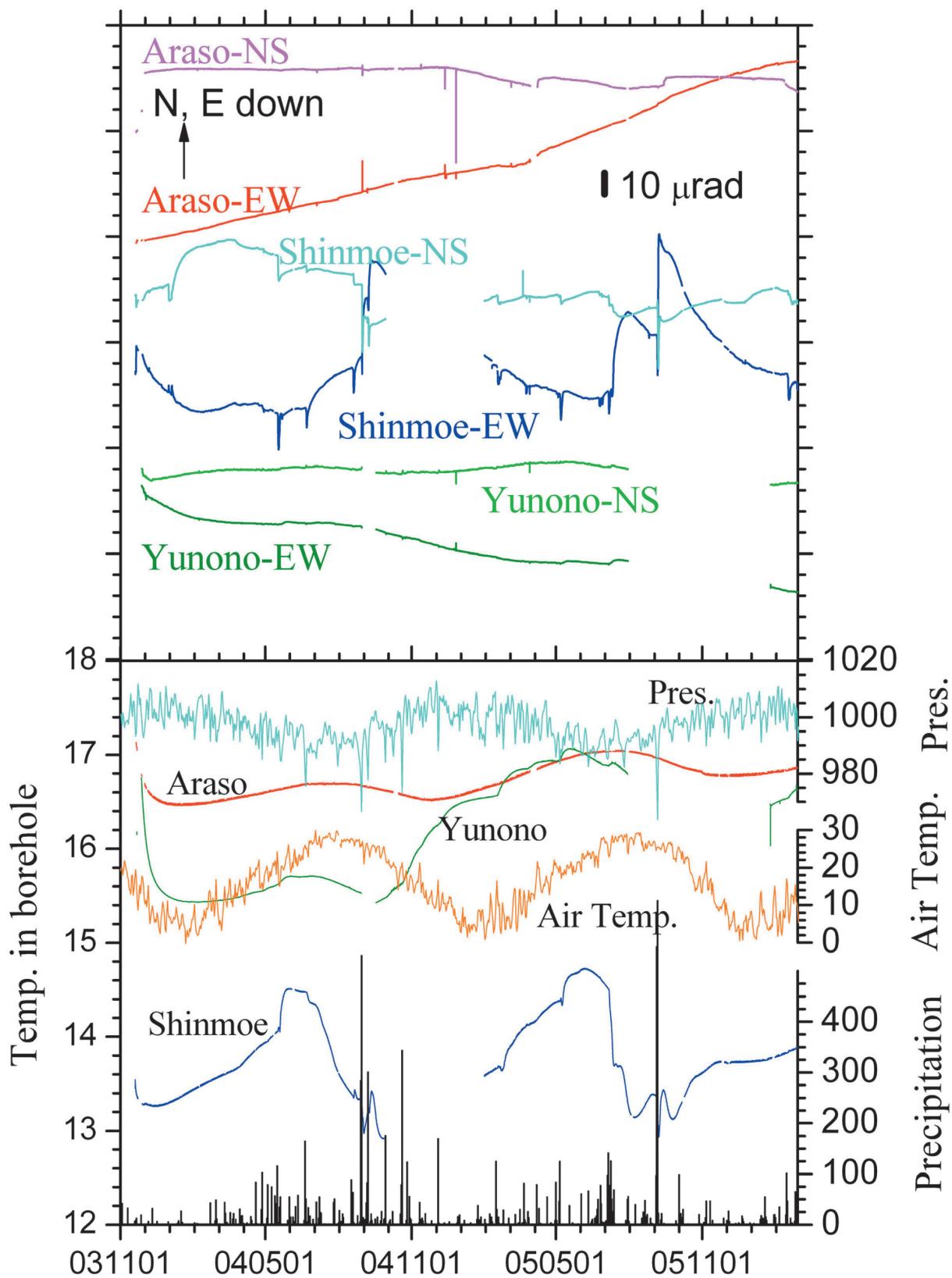


Fig. 2.1.3.6 (a) Tilt records at Araso, Shinmoe, and Yunono stations on Kirishima volcano. Tilt data plotted in 30 min intervals from November 2003 to 28 February 2006. (b) Time variation of temperature in the tiltmeters at Araso, Shinmoe, and Yunono stations on Kirishima volcano; daily mean atmospheric pressure; atmospheric air temperature at Miyakonojo (SE 30 km from Araso); and daily precipitation at Ebino.

時に不規則に変化していた。特に日降水量が100mm を越える時、おおむね西南西下がりの後、元に戻る変動を示し、降水の前後でトレンドにも変化を生じることが多く、短周期のノイズも他の観測点に比べ大きかった。湯之野では観測期間中ほぼ一様な西下がりのトレンドに季節変動がのっている。傾斜計内部温度にも降水の影響が現れているが、2004年8月30日に霧島山の西方約50km を通過した台風第16号による豪雨（8月29～30日総降水量815mm）の後、この影響が大きくなつた。

(2) 潮汐変化

Fig. 2.1.3.7に傾斜30分値データセットをBAYTAP-G (Tamura *et al.*, 1991) で処理し求めた、2004年2月1日から3月13日まで42日間の潮汐成分（黒太線）とGOTIC2 (Matsumoto *et al.*, 2001) によって求めた傾斜潮汐の予測値（赤細線）を示す。また、Fig. 2.1.3.8には不規則成分を示す。解析に用いた傾斜のデータセットはあらかじめBAYTAP-Gの異常値抽出機能を利用して地震や降水に対応した異常値をある程度取り除いたものであり、都城における気圧時間値を並行観測データとして用いた。新燃のEW成分を除き、観測値と予測値が良くあっており、傾斜計の感度や設置方向に異常がないことを示している。なかでも、荒襲は両者が非常に良く一致しており、不規則成分も3地点の中で一番小さい。前述したようにトレンドも比較的安定しており、荒襲は大変良好なデータが得られる観測点である。新燃のEW成分で差が大きいのは降水の影響で解析誤差が大きいことによる可能性がある。

(3) 遠地地震に対する応答

Fig. 2.1.3.9に2005年3月29日01h09mJSTにスマトラ島付近で発生した地震(M8.5)によって生じた傾斜EW成分の時間変化と、傾斜ベクトル図を示す。ベクトル図は左図の赤色の初動前後を示している。3地点とも時間

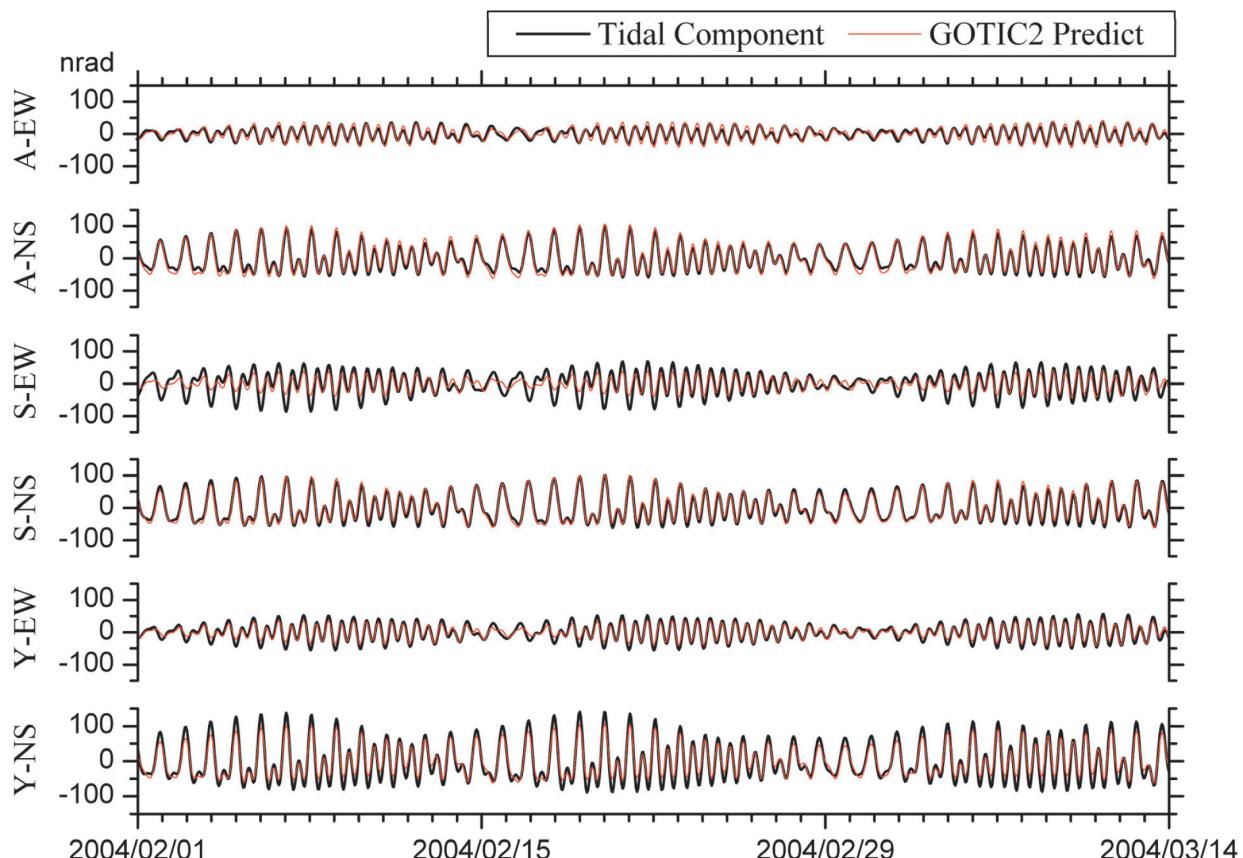


Fig. 2.1.3.7 Observed tidal component (black bold line) of tilt data processed by BAYTAP-G (Tamura *et al.*, 1991) and predicted tidal changes (red thin line) by GOTIC2 (Matsumoto *et al.*, 2000). A means Araso; S means Shinmoe; and Y means Yunono.

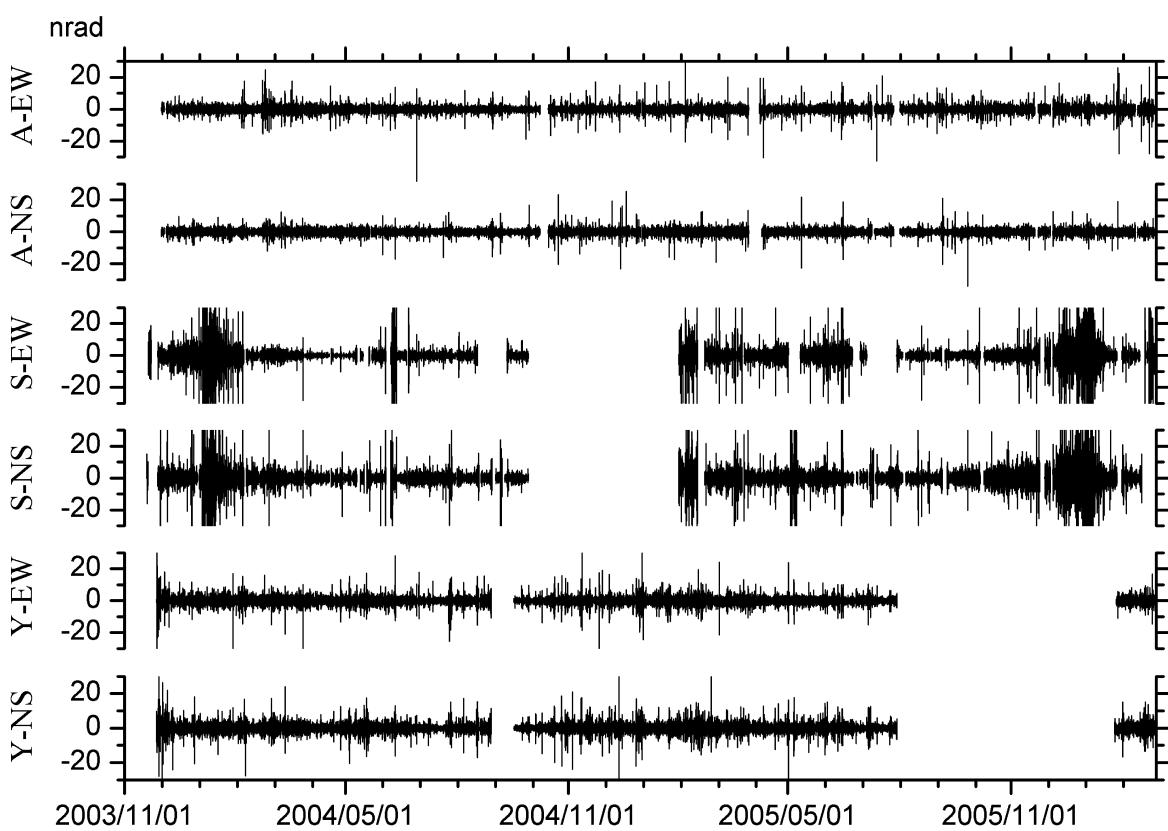


Fig. 2.1.3.8 Residual part of the tilt data processed by BAYTAP-G. A means Araso; S means Shinmoe; and Y means Yunono.

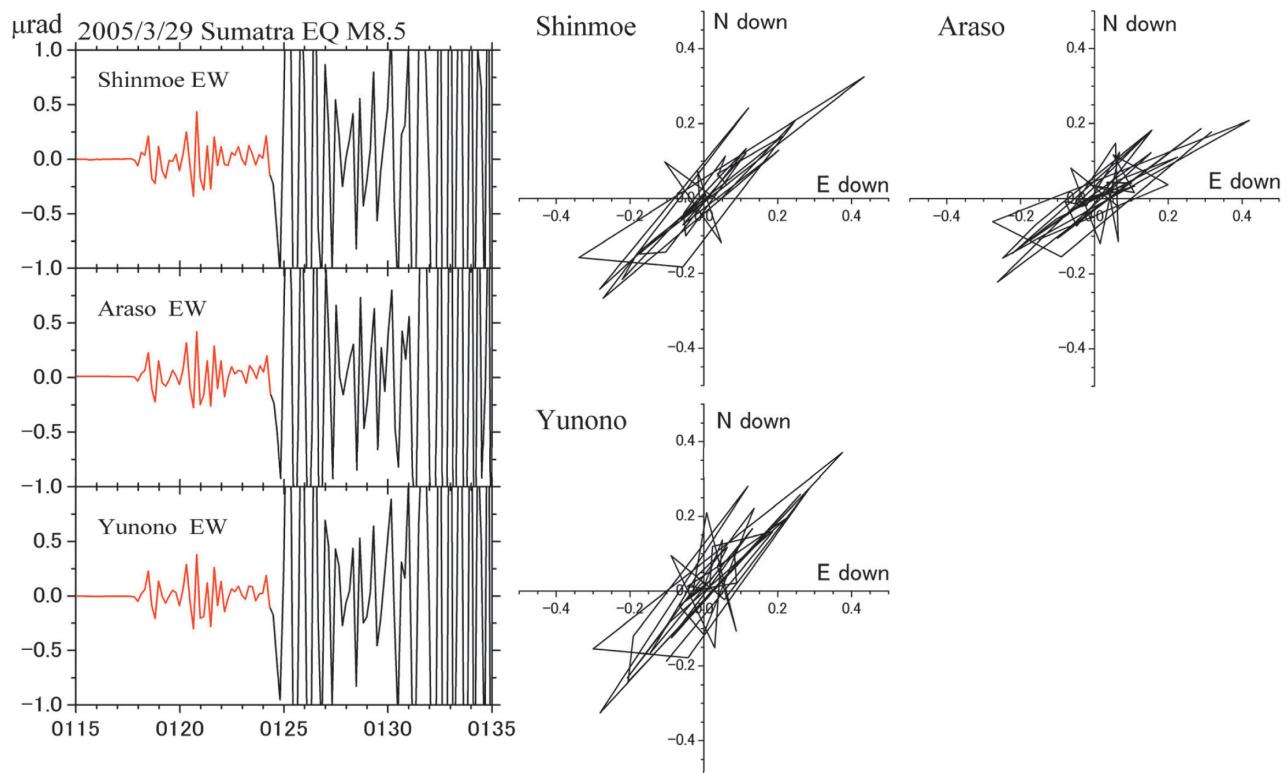


Fig. 2.1.3.9 Tilt changes (east-west component; downward is plus) observed at Shinmoe, Araso, and Yunono stations on Kirishima volcano caused by the Northern Sumatra Earthquake (01h 09m JST, March 29, 2005, M 8.5), and its tilt vectors against the red parts in the left figures.

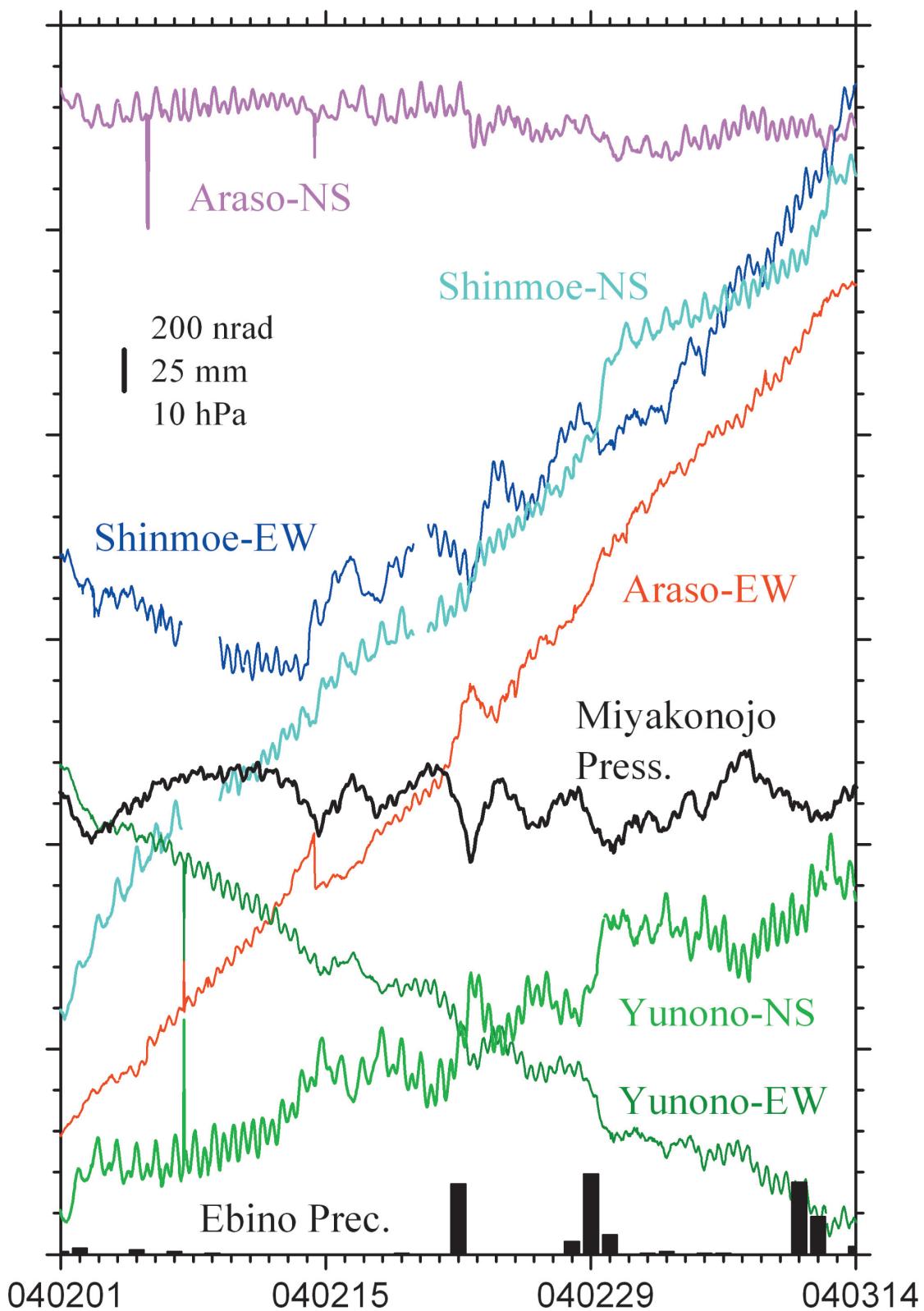


Fig. 2.1.3.10 Tilt changes observed at Shinmoe, Araso, and Yunono stations on Kirishima volcano; hourly atmospheric pressure at Miyakonojo; and daily precipitation at Ebino from 1 February to 13 March 2004.

変化、ベクトルの方向がほぼ一致しており、この周期帯においても観測地点間で感度に差はないと言える。

(4) 環境要素に対する応答

電源に太陽電池とバッテリーを用いた新燃、荒襲では太陽電池から給電される日中8~20h頃の間電源電圧が高くなり、約0.01度傾斜計内部温度が高くなる日変化（Fig. 2.1.3.5(b) 参照）が見られたが、傾斜データにはこれに対応した変動は認められない。

Fig. 2.1.3.10に2004年2月1日から3月13日の傾斜30分値生データ、都城の気圧時間値、えびのの日降水量を、Fig. 2.1.3.11にBAYTAP-G (Tamura *et al.*, 1991) で処理し求めた、気圧応答成分と都城の気圧変化を、Fig. 2.1.3.12にトレンド成分とえびのの日降水量を示す。

気圧応答成分は荒襲と湯之野で応答が逆向きになるなど、観測点によって全く異なる様相を示す。応答係数の絶対値は概ね 10^{-8} rad/hPa程度であるが、新燃のNS成分では応答成分が見えない。Fig. 2.1.3.10の生のデータで見ても、他の成分と比較し、気圧変化に対応した変動は顕著でない。しかし、後述する降水に対する応答が他に比べ大きく、気圧応答成分を正確に求めるには、降水に対応したデータを除くなど、データの精査が必要であると思われる。気圧応答成分は観測点周辺の地下構造の影響を受ける。有限要素法を活用して、構造との関係を調査することは今後の課題である。

降水に対する応答も、気圧と同様に観測点によってその様相は異なっている。荒襲は降水による変動は小さく、1日程で元のトレンドに戻っている。湯之野は降水前後でステップ状の変化が残っているように見えるが、その量は小さく、Fig. 2.1.3.6ではこの影響はほとんど見えない。新燃は不規則な変動を示す。この例では降水量が少なく、降水前後でトレンドにそれほど大きな変動は見えないが、Fig. 2.1.3.6に示したように、降水量が多いととげ状の変化を示す。特に日降水量が100mmを越える時、おおむね西南西下がりの後、元に戻る変動を示す。

2.1.3.4 火山性微動に同期した傾斜変動

(1) 御鉢で発生した火山性微動に対応した傾斜変動

2003年12月12日11時14分御鉢周辺の観測点において火山性微動（以下、微動と記す）が観測され、この微動に対応して荒襲で傾斜変動が観測された。12月13日に鹿児島大学のグループが火口内に新しく形成された噴気孔から噴出物が周辺に飛散されていたことを確認し（筒井・他, 2005），翌14日には福岡管区気象台の現地観測により、御鉢火口南南西壁に新しい噴気孔が形成され、周辺に小石や泥が飛散していることが確認された（福岡管区気象台・鹿児島地方気象台, 2003；Photo 2.1.3.3）。この後、2006年2月末までに合計38回火山性微動が観測さ

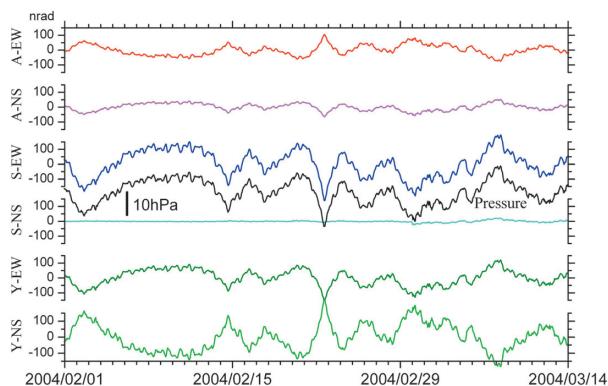


Fig. 2.1.3.11 Pressure response part of the tilt processed by BAYTAP-G, and atmospheric pressure from 1 February to 13 March 2004. A means Araso; S means Shinmoe; and Y means Yunono. The black line indicates the atmospheric pressure at Miyakonojo.

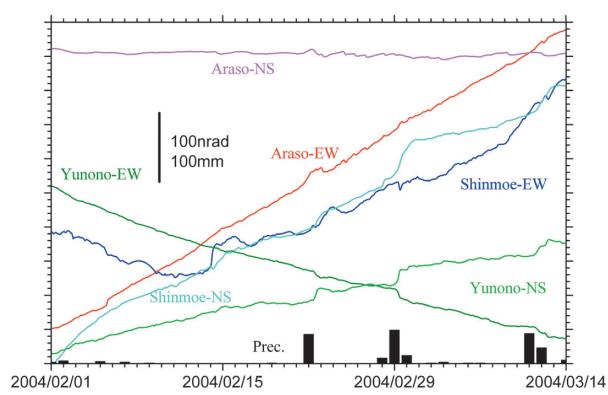


Fig. 2.1.3.12 Trend part of the tilt processed by BAYTAP-G and the daily precipitation at Ebino from 1 February to 13 March 2004.

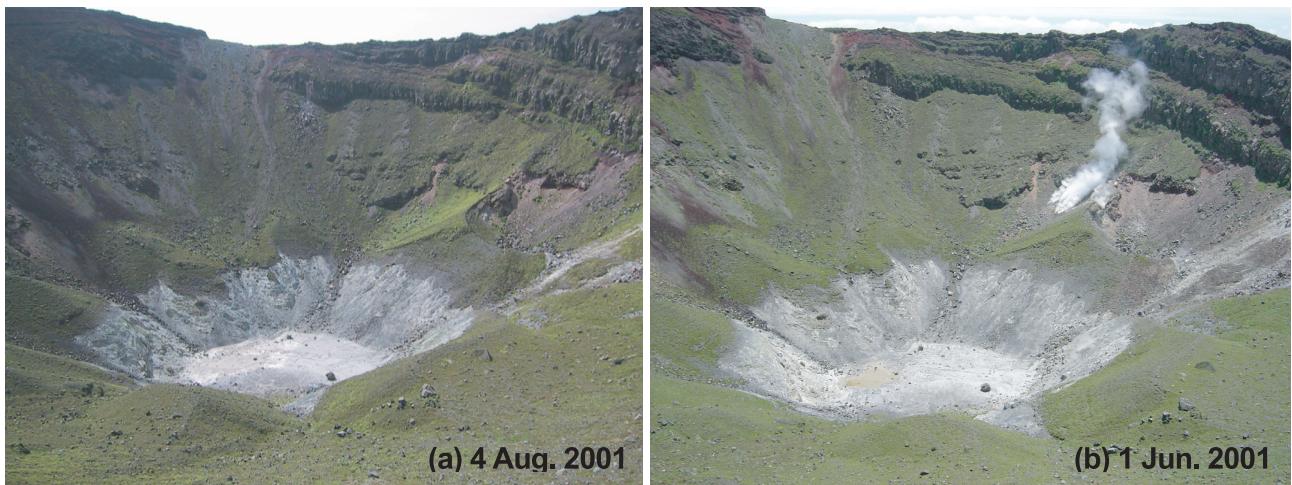


Photo 2.1.3.3 Photos of the Ohachi crater taken from the north rim before and after the opening of the new fumarole. (a) 4 August 2001. (b) 1 June 2004.

れ、このうち継続時間が長い4個の微動（2003年12月12日、12月15日、2004年1月3日、3月26日）に対応して御鉢火口方向下がりの傾斜変化が観測された。Table 2.1.3.3(a)に本研究観測期間中に気象庁高千穂峰機動観測点（Fig. 2.1.3.1のTKH）で観測された御鉢付近で発生したと思われる微動の検測値と荒襲における傾斜変化量を示す。ここで、傾動の継続時間は北方向下がりの変動が継続している時間を示した。なお、これらと同程度の継続時間である2004年11月21日04h12m58sの微動については地震に伴う傾斜振動と重なり、微動に対応した変動を識別することができなかった。また、2006年2月15日17h01mに御鉢で発生したと思われる微動の振幅は傾斜変動が観測されたものと同レベルであるが、継続時間は短く、傾斜変動は認められなかった。

Fig. 2.1.3.13に2003年12月12日の微動発生日1日分の各観測点の傾斜生データを、Fig. 2.1.3.14には微動に対応して観測された4つの事例を時間軸を拡大して示す。Fig. 2.1.3.13に示したように荒襲観測点の南北成分には全振幅約 $0.1 \mu\text{rad}$ の潮汐変化の上に約 $0.05 \mu\text{rad}$ の北下がりのステップ状の変化が、東西成分では全振幅約 $0.03 \mu\text{rad}$ の潮汐変化の上に約 $0.02 \mu\text{rad}$ の東下がりのステップ状の変化が見える。この変動はFig. 2.1.3.5(b)に示した監視画面でも明瞭に認められた。湯之野では微動前後の傾斜変化傾向の違いがあることからごく微小な南東方向下がりの変化があったと言えるかもしれないが定かなものではない。もし、湯之野に荒襲の1/10以上の変動が現れていたとすれば充分識別できる量であり、湯之野での傾斜変化は荒襲の1/10以下の量である。新燃山頂部観測点はノイズが大きいこともあり対応

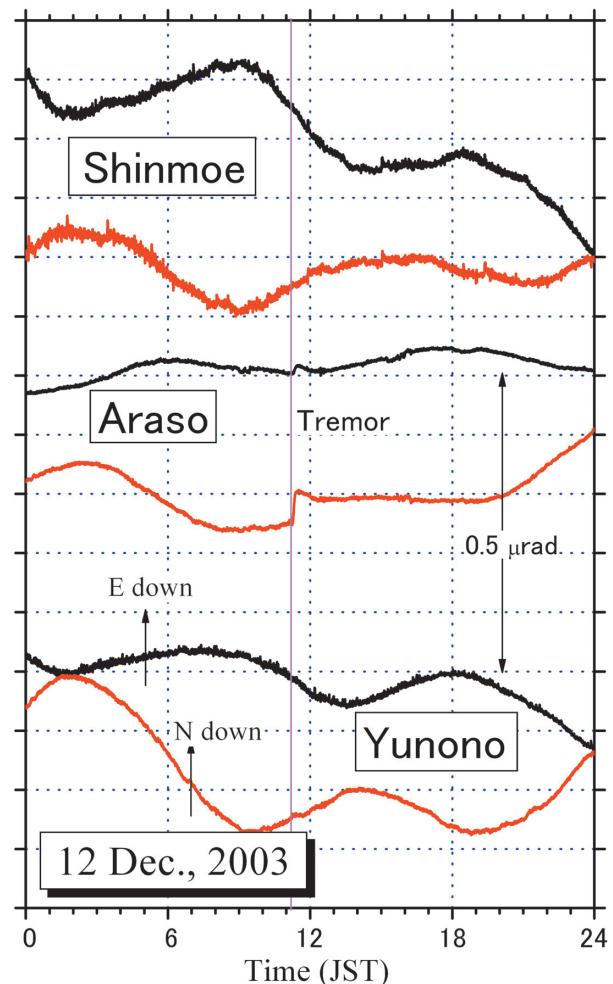


Fig. 2.1.3.13 Temporal variations of the ground tilt observed at Araso, Shinmoe, and Yunono stations on Kirishima volcano on 12 December 2003. The vertical line in the center of figure indicates the observation time of the volcanic tremor at the TKH seismic station.

Table 2.1.3.3(a) Volcanic tremor that occurred at the Ohachi crater of Kirishima volcano from December 2003 to February 2006 and its tilt signal. Note: - undetected, x indistinguishable by earthquake, ND no data

Date & Time (JST)		volcanic tremor at TKH			Tilt step at Araso				
		Dur. (sec)	Amplitude ($\mu\text{m/s}$)		Dur. (sec)	EW (nrad)	NS (nrad)	Amp (nrad)	
			NS	EW	UD				
2003/12/12	11:13:48	480.0	35.5	48.2	18.1	490	12.3	49.7	51.2
2003/12/12	13:15:26	56.9	5.3	7.5	2.6	-	-	-	-
2003/12/15	11:20:17	303.3	40.5	45.1	11.4	230	6.6	21.7	22.7
2004/01/03	06:36:56	300.0	388.2	609.8	192.7	270	7.8	35.2	36.1
2004/02/18	21:44:55	38.0	12.4	18.1	5.5	-	-	-	-
2004/03/18	05:08:15	52.1	52.4	61.9	15.4	-	-	-	-
2004/03/26	19:46:13	254(min)	688.3	654.8	357.2	250	10.8	43.1	44.4
2004/05/05	02:40:01	55.1	27	31.3	9.8	-	-	-	-
2004/07/08	15:27:44	35.3	13.8	19.1	4.4	-	-	-	-
2004/11/18	20:16:24	30.0	35.8	89.8	20.8	-	-	-	-
2004/11/21	04:12:58	296.2	351.8	362	123.3	x	x	x	x
2004/11/21	04:32:50	63.4	8.0	7.5	4.1	-	-	-	-
2004/12/31	01:30:00	71.0	56.6	71.1	18.0	ND	ND	ND	ND
2005/03/11	06:50:50	51.4	35.3	52	16.5	-	-	-	-
2005/03/16	09:53:35	51.3	50.9	46.3	12.4	-	-	-	-
2005/03/19	17:57:17	42.6	10.6	13.6	3.4	-	-	-	-
2005/03/28	19:09:47	48.4	26.1	36.6	9.7	-	-	-	-
2005/10/03	02:04:08	34.0	15.0	22.4	6.2	-	-	-	-
2006/01/03	22:20:52	48.9	39.0	48.2	10.7	-	-	-	-
2006/01/12	10:07:15	46.0	18.7	22.3	7.5	-	-	-	-
2006/01/18	09:14:00	71.7	21.3	29.4	8.8	-	-	-	-
2006/01/19	03:40:39	32.4	13.3	18.6	4.9	-	-	-	-
2006/01/19	12:27:16	27.4	8.9	10.4	2.1	-	-	-	-
2006/01/21	02:52:53	35.0	7.4	9.5	3.6	-	-	-	-
2006/01/26	20:34:29	21.0	8.3	14.1	3.7	-	-	-	-
2006/01/28	16:09:58	15.1	8.1	10.3	2.5	-	-	-	-
2006/01/29	23:49:40	74.4	23.5	40.4	7.4	-	-	-	-
2006/01/31	07:44:07	26.3	7.3	5.4	3.1	-	-	-	-
2006/02/01	02:37:40	29.1	5.9	8.2	2.5	-	-	-	-
2006/02/01	08:10:28	41.0	9.9	12.7	3.0	-	-	-	-
2006/02/14	16:26:14	42.2	15.3	24.6	14.3	-	-	-	-
2006/02/14	17:25:50	44.7	6.8	9	5.7	-	-	-	-
2006/02/14	23:57:51	45.0	24.9	24.3	9.2	-	-	-	-
2006/02/15	12:02:29	54.3	7.1	8.4	2.7	-	-	-	-
2006/02/15	15:01:29	36.5	7.6	7.1	-	-	-	-	-
2006/02/15	15:16:53	57.9	21.2	40.6	10.3	-	-	-	-
2006/02/15	17:01:44	43.8	144.9	227.9	58.1	-	-	-	-
2006/02/19	15:14:30	20.1	5.4	6.8	2.0	-	-	-	-

した変動を認めることはできない。

Fig. 2.1.3.15に荒襲における12月12日の微動に対応した傾斜変化の拡大図を高千穂峰機動観測点における地震計記録を付して示す。このように、この傾動は微動の発現(11h13m48s JST)とともに始まり、数分間北北東下がりの変化を示した後、元のレベルへとゆっくり戻ってゆく。Fig. 2.1.3.16(a)には微動に対応した荒襲観測点の傾斜時系列図を、Fig. 2.1.3.16(b)には傾動方向が反転する頃までのベクトル図を示す。Fig. 2.1.3.16では傾動発生前の変化傾向を差し引いて示している。4例とも傾動開始直後1~2分間は北下がりに変化し、その後北北東すなわち御鉢火口方向下がりの変化を示す。傾動方向が御鉢火口(新噴気孔)方向であったこと、2003年12月12日に新噴気孔から噴出物が放出したことから、12月12日の傾斜変化は新噴気孔から物質が放出された際の圧力減少によって生じたと推測され、微動もこの圧力変化あるいは物質の移動に伴って発生していると推測される。しかしながら、「微動発生時には噴気が御鉢の火口縁を越える規模の噴煙活動はなかった」と

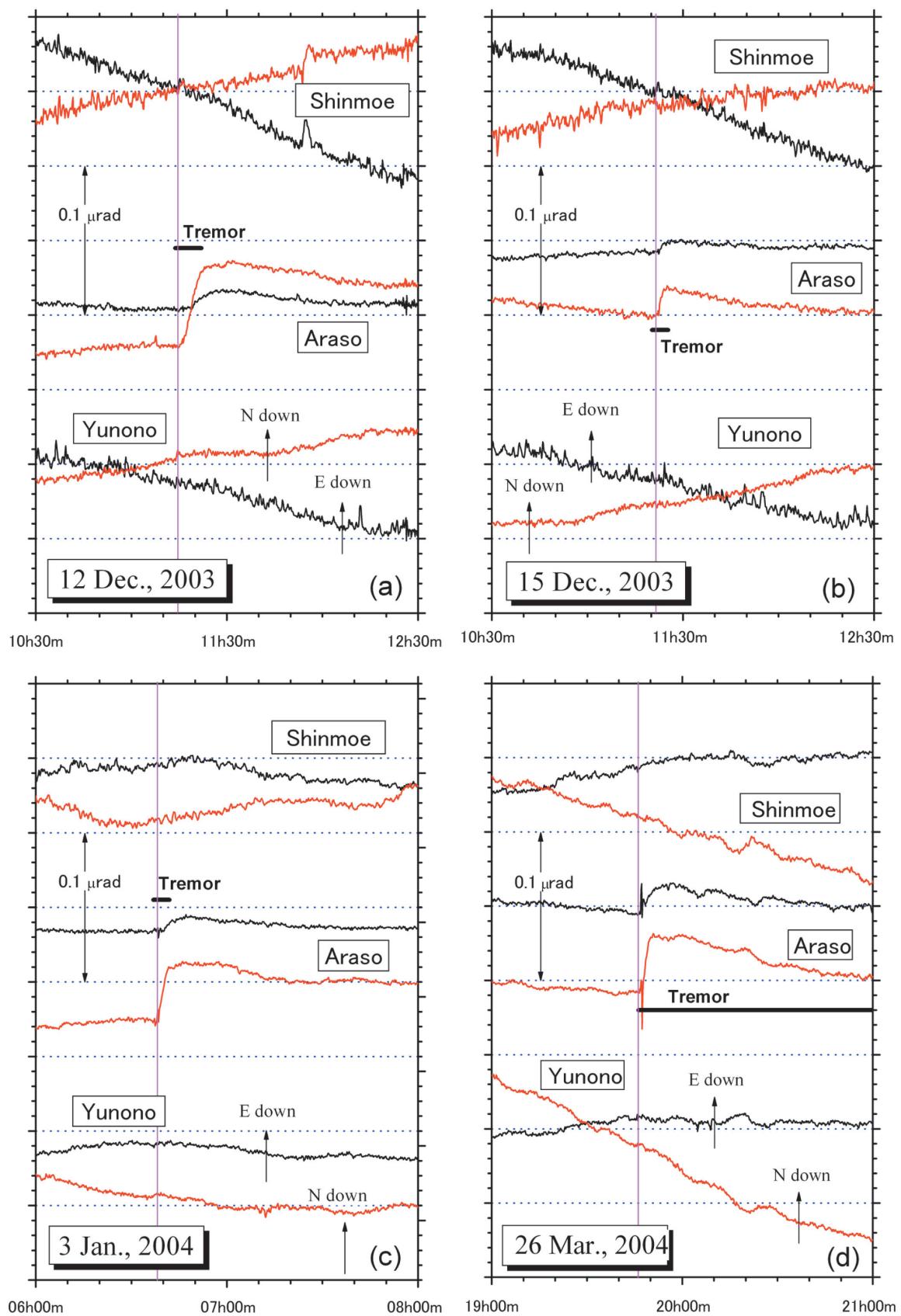


Fig. 2.1.3.14 Temporal variations of the ground tilt observed at Araso, Shinmoe, and Yunono stations on Kirishima volcano two hours before and after the volcanic tremors that occurred on 12 and 15 December 2003, 3 January 2004, and 26 March 2004. Changes were clearly observed at Araso station. Tilt changes associated with tremor at Yunono and Shinmoe stations were less than a tenth of the Araso signals.

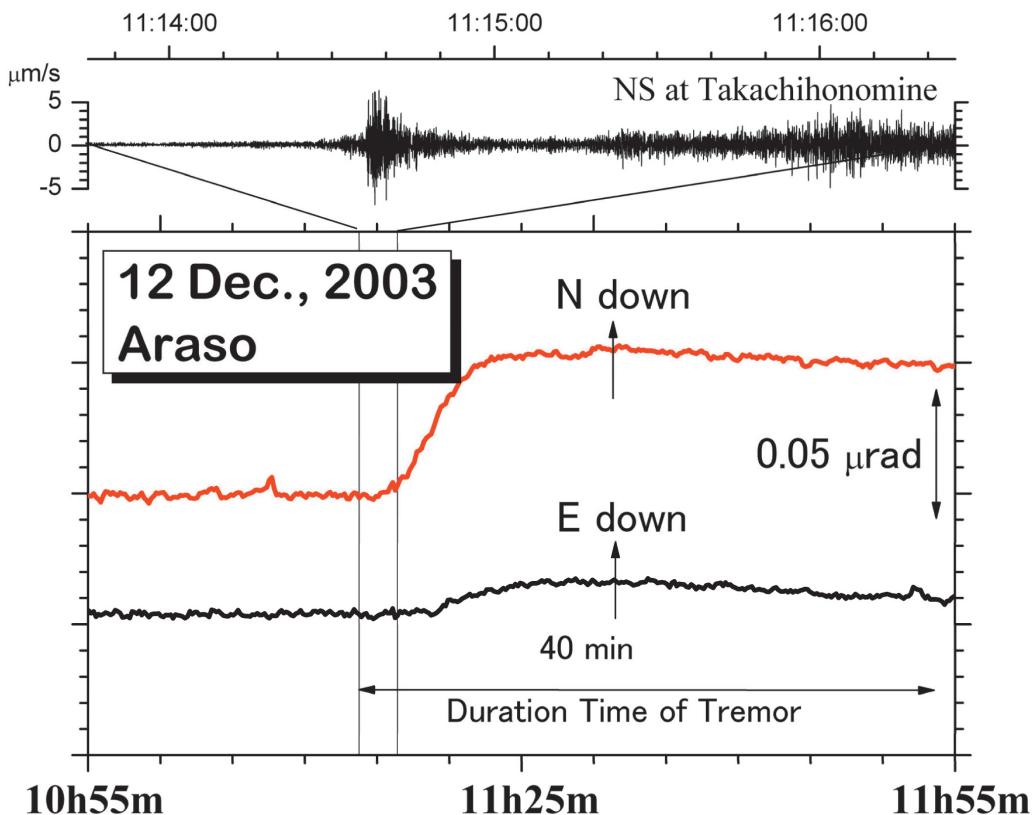


Fig. 2.1.3.15 Observed tilt changes associated with tremor that occurred at 11h 14m JST on 12 December 2003.

The lower part indicates the NS and EW components at Araso; the upper part indicates the NS component of the seismic signal at Takachihonomine seismic station (TKH in Fig. 2.1.3.1). This tremor was estimated to have occurred at Ohachi volcano from the spatial distribution of the amplitude of the seismic signal.

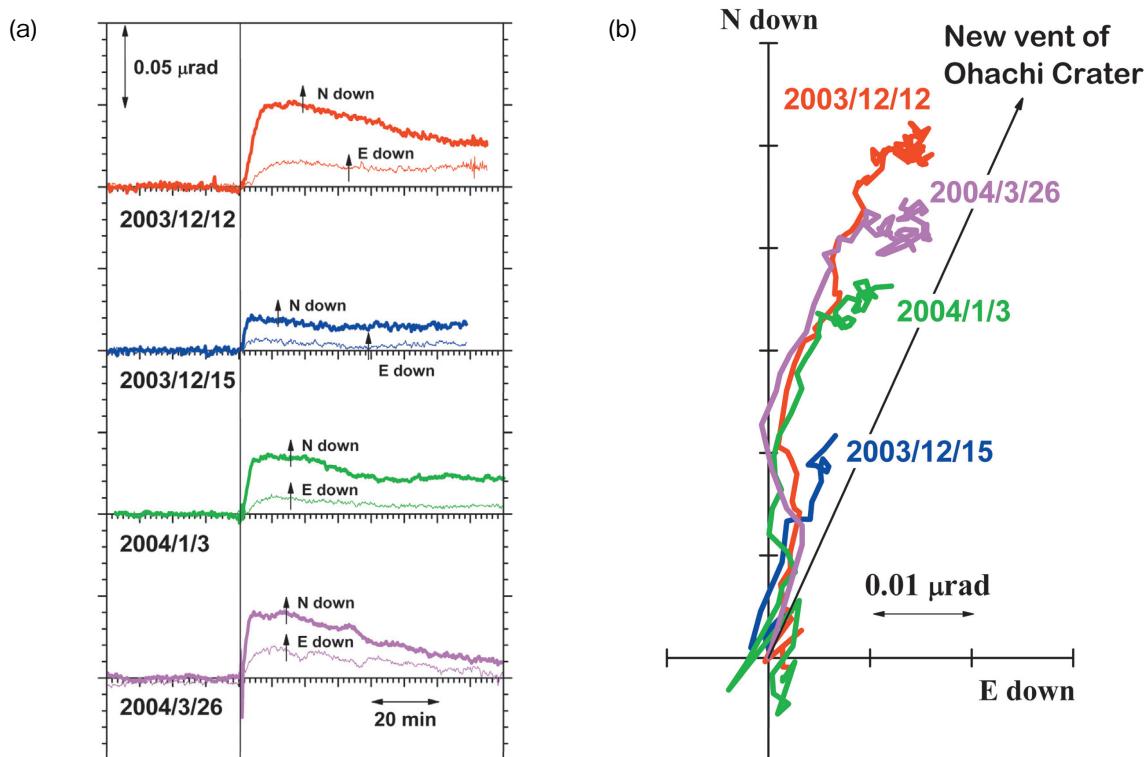


Fig. 2.1.3.16 (a) Detrend tilt changes associated with tremor on 12 and 15 December 2003, 3 January 2004, and 26 March 2004. These changes were indicated by a reduced variation of the trend just before the tremor. (b) Vector graph of the detrend tilt data is presented in Fig. 2.1.3.16(a). The tilt vector moved northward with the tremor and then turned to the direction of the new fumarolic vent of the Ohachi crater.

も言われており（筒井・他, 2005），新噴気孔からの物質の噴出そのものではなくそれに前駆した地下での圧力変化によって生じたとも考えられる。また，4例とも北下がりの変動を示した後，北北東下がりに転じているが，このことは圧力源が荒巻の北方から御鉢火口方向に移動したことを反映しているのかもしれない。

Table 2.1.3.3(a) に示すように2003年12月から2004年3月に観測された4回の微動対応傾斜変化の火口下がりの変動の継続時間はそれぞれ490, 230, 270, 250秒，変動量は51, 23, 36, 44nrad となっている。Fig. 2.1.3.16(a) に示すように最初の3個の時間変化の様子は良く似ており，概ね火口下がりに傾動している時間の違いによって傾斜変化量が決まっている。このことは圧力が減少していく様子が定まっていることを表しているのかもしれない。しかし，傾動量は1番目が最も大きいのに対し，微動の振幅，継続時間とも4番目が最も大きいなど，微動と傾斜変動とは量的には必ずしも単純な関係にはない。このことから微動の発生には圧力減少のみならず微動発生源における他の要因も深く関わっていることを伺わせる。

(2) 新燃岳で発生した火山性微動に対応した傾斜変動

2006年2月1日07h43m13s 新燃岳で発生した火山性微動（霧島山A点で継続時間236秒，NS成分振幅 $25.7\mu\text{m/s}$ ）に対応して新燃で傾斜変動が観測された。2月5日までに6回の火山性微動が観測されたが，傾斜変化が観測されたのはこの1回のみであった。Table 2.1.3.3(b) に本特別観測期間中に気象庁霧島山A点観測点（Fig. 2.1.3.1のA）で観測された新燃岳付近で発生したと思われる微動の検測値と新燃における傾斜変化量を示す。ここで，傾動の継続時間はFig. 2.1.3.18の①から③の間の時間である。

Fig. 2.1.3.17に2006年2月1日の新燃の傾斜生データを，Fig. 2.1.3.18に新燃における微動対応傾斜変化と霧島山A点における地震計記録を，Fig. 2.1.3.19に傾斜ベクトル図を示す。Fig. 2.1.3.19の①～③はFig. 2.1.3.18の①～③に対応している。傾動方向は最初約40秒間北西下がりの後，東南東下がりを示し，新燃岳火口方向とは異なる方向であった。しかし，微動発生前後（図の①と③）で比較すると，新燃岳火口上がりの変動となっている。2.1.3.3項に記したように，新燃の地球潮汐，遠地地震に対する応答は湯之野，荒巻の応答ともほぼ一致しており，設置方位に誤りはないことから，火口上がりであることは確からしく，御鉢における微動対応傾斜変動が火口下がりであったこととは異なる様相を示している。

この微動対応傾斜変動の後，北東下がりから元に戻る特異な傾斜変動（Fig. 2.1.3.17の丸で囲った箇所）が発生した。これに対応した現象は確認されておらず，その原因は不明である。この傾動方向は新燃岳火口上がりであり，新燃岳の地下で圧力増加が発生していた可能性も否定できない。

Table 2.1.3.3(b) Volcanic tremor at Shinmoe-dake crater of Kirishima volcano from December 2003 to February 2006 and its tilt signal.

Date & Time (JST)	volcanic tremor at A			Tilt step at Shinmoe					
	Dur. (sec)	Amplitude ($\mu\text{m/s}$)			Dur. (sec)	EW (nrad)	NS (nrad)	Amp (nrad)	
		NS	EW	UD					
2006/02/01	07:43:13	236.5	25.7	19.0	10.2	160	11.1	12.5	16.7
2006/02/02	01:45:24	78.6	6.1	2.4	2.3	-	-	-	-
2006/02/02	04:03:41	20.7	7.9	7.4	3.8	-	-	-	-
2006/02/02	04:08:14	51.3	13.6	17.7	7.3	-	-	-	-
2006/02/02	04:28:22	25.6	4.4	3.1	2.2	-	-	-	-
2006/02/05	20:20:03	34.6	4.7	5.2	2.2	-	-	-	-

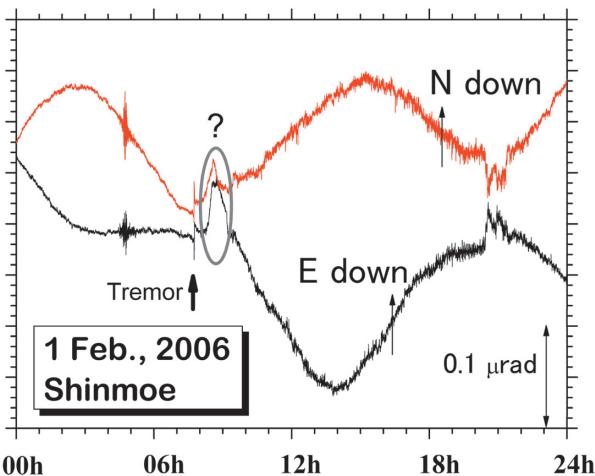


Fig. 2.1.3.17 Observed tilt changes at Shinmoe station on 1 February 2006. The arrow indicates a tilt change associated with the tremor. The abnormal tilt change that is indicated in the gray circle occurred after the tremor.

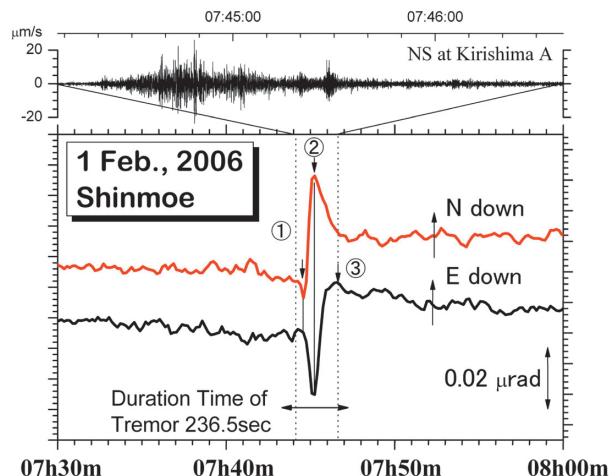


Fig. 2.1.3.18 Observed tilt changes associated with the tremor that occurred at 07h44m JST on 1 February 2006. The lower part indicates the NS and EW components at Shinmoe; the upper part indicates the NS component of the seismic signal at Kirishima A seismic station (A in Figure 2.1.3.1). This tremor was estimated to have occurred at Shinmoe volcano from the spatial distribution of the amplitude of the seismic signal.

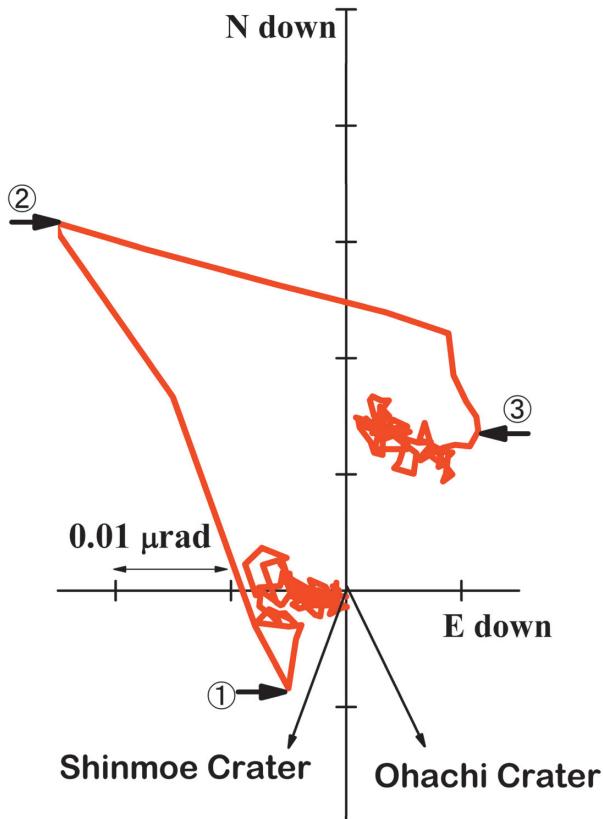


Fig. 2.1.3.19 Tilt vectors drawn from the tilt data presented in Fig. 2.1.3.18. ①, ②, and ③ correspond to those in Fig. 2.1.3.18.

2.1.3.5 霧島山御鉢における火山性微動に対応した傾斜変化の変動源

2003年12月12日の微動対応傾斜変化が新噴気孔から物質が放出された際の圧力減少によって生じたと考え、その変動源の深さと体積変化量を茂木モデル（茂木, 1957）によって推定する。

茂木モデルによると、半無限均質弾性体に微小な球状圧力源がある場合の地表面の傾斜 Γ は

$$\Gamma = -\frac{\partial U_z}{\partial r} = -\frac{9a^3 \Delta P}{4\mu} \frac{Dr}{(D^2 + r^2)^{5/2}} \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 U_z は上下変位、 r は圧力源直上の点からの水平距離、 a は圧力源半径、 ΔP は圧力変化量、 μ は剛性率、 D は圧力源深さであり、傾斜は r 方向に下がる場合を正に取っている。(1)式を用いると、水平距離 r_1 、 r_2 の2地点での傾斜 Γ_1 、 Γ_2 の比 Γ_1/Γ_2 は圧力源深さ D に対して

$$\Gamma_1/\Gamma_2 = \frac{r_1}{r_2} \left(\frac{D^2 + r_2^2}{D^2 + r_1^2} \right)^{5/2} \quad (2)$$

となる。傾斜変動の圧力源は新噴気孔直下にあるとすると、荒襲までの水平距離は1.23km、湯之野までは4.12kmであり、両地点の傾斜比と圧力源深さの関係はFig. 2.1.3.20のようになる。前項に述べたように、湯之野での傾斜変化は荒襲の1/10以下と思われる。傾斜比が1/10の場合、(2)式から $D=1.9\text{ km}$ と求められるから、茂木モデルからは圧力源の深さは2km以浅と推定される。

萩原（1977）によると、茂木モデルにより生じる半径の変化量 Δa は

$$\Delta a = \frac{a \Delta P}{4\mu} \quad (3)$$

であるので、水平距離 r の地点における傾動量が Γ の時、体積変化量 ΔV は圧力源深さから次式で求めることができる。

$$\Delta V \approx 4\pi a^2 \Delta a = \frac{\pi a^3 \Delta P}{\mu} = \frac{4\pi}{9} \Gamma \frac{(D^2 + r^2)^{5/2}}{Dr} \quad (4)$$

2003年12月12日の微動対応傾斜の荒襲における変動量は51nradであったから、圧力源深さを2kmとした場合、体積変化量は 2100 m^3 、1kmとした場合は 600 m^3 となる。Fig. 2.1.3.20のように体積変化量は0.6km付近で最小（約 500 m^3 ）となる。

1.4節で述べたように平坦な地表面での茂木モデルを地形の影響がある現実のデータに適用した場合、求められる圧力源深さは地表面から測った深さとすれば、圧力源の位置は実際のものと良く合うことが分かっている。御鉢新噴気孔の標高は約1230mであり、このことを考慮すれば、微動対応傾斜変動を説明する圧力源の標高は海面下1kmより浅いと推測される。このことを確認するため霧島山の地形を組み込んだ三次元有限要素モデルに対して、球状圧力源によって生じる地表面変位を計算し、荒襲、湯之野における傾斜比を求めた。

1.1.1項で述べた、有限要素モデルによる計算精度とモデルサイズとの関係から、圧力源深さ D と同程度の距離まで上下変位を1%の精度で求めるには D の15倍程度のモデルサイズで良く、この時 $3D$ の距離では92%の精度で上下変位が求められる。また、上下変位の計算ではモデルの高さは水平方向の大きさよりも良い

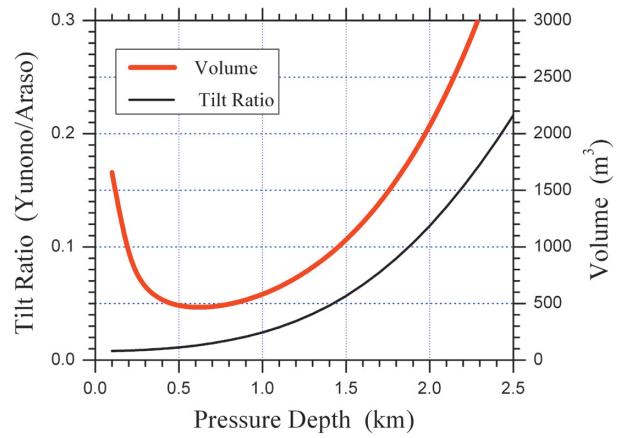


Fig. 2.1.3.20 Ratio between the tilt change at Yunono ($r = 4.12\text{ km}$) and that at Araso ($r = 1.23\text{ km}$), calculated by the Mogi model against the depth of the pressure source (black line) and the volume change of Mogi's source calculated for 51 nrad that observed tilt change associated with the tremor on 12 December 2003 at Araso (red line).

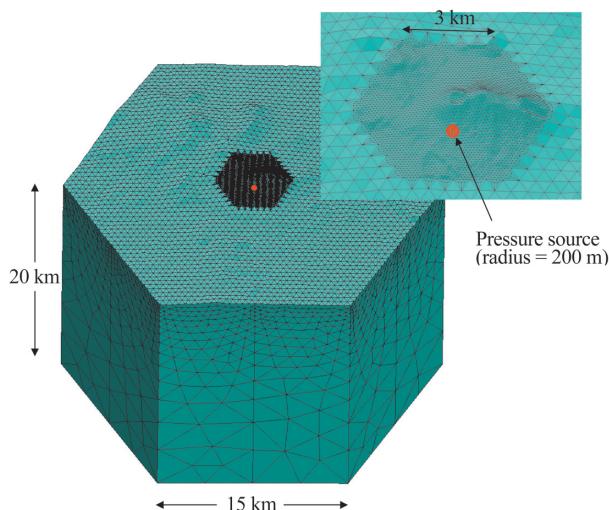


Fig. 2.1.3.21 3D FE model of Kirishima volcano. The red circle designates a pressure source that is a sphere with a radius of 200 m at sea level. The region of the model is a hexagonal column with a side of 15 km and a height of 20 km. The topography is generated from 50 m mesh DEM of the GSI. The mesh size on the center part of the volcano is 100 m, and that on the top surface is 500 m. The mesh size on the surface of the pressure source is 50 m. The total number of elements is about 100,000. The bottom and lateral boundary conditions are fixed.

ことが分かっている。傾斜は上下変位の水平方向の微分量であるから、この結果を利用して、モデル領域は一辺15km、高さ20kmの六角柱とした。地形は国土地理院50mメッシュ数値標高データを用いて1.1.2項の方法で、中心部100m、周辺500mの正三角形メッシュで表現した。圧力源は半径200mの球とし、その表面は約50m、モデル底面は半径方向5kmで分割し、地表面、圧力源表面に向かメッシュサイズが次第に小さくなるように四面体十節点要素(1.1.1項参照)でメッシングした。

メッシングの際は圧力球の周囲を二重の小六角柱で囲む

ことで、要素数を約10万にまで減らした。Fig. 2.1.3.21はこのようにして作成した有限要素モデルである。図の赤丸は圧力源であり、標高を海平面とした場合のものである。圧力源表面に加わる圧力は100 atm (10.1325 MPa)、剛性率は40 GPa、ポアソン比は0.25とした。有限要素モデルの作成、解析には ANSYS Inc. の ANSYS Ver. 8.1を用いた。同じモデル規模の地表面が平坦な有限要素モデルにおいて球状圧力源によって生じる地表面変位を計算し、これと茂木モデルで求められる値とを比較することで計算精度を確認した。

Fig. 2.1.3.22は圧力源を御鉢の新噴気孔直下、海平面に置いたモデルで求められた上下変位を半径方向に微分することで得られた地表面における傾斜分布である。なお、ここでは1.4節で指摘した、斜面傾斜の効果は差し引いていない。茂木モデルの場合、傾斜分布は同心円状を示すが、図のように地形の影響で同心円状にはならず、荒巻は圧力源に対する感度が高くなる位置に当たっている。Fig. 2.1.3.23には圧力源を標高0.5, 0.0, -0.5, -1 kmに置いてFEMで求めた荒巻、湯之野の傾斜比(黒丸)、標高補正茂木モデル(1.4節参照)

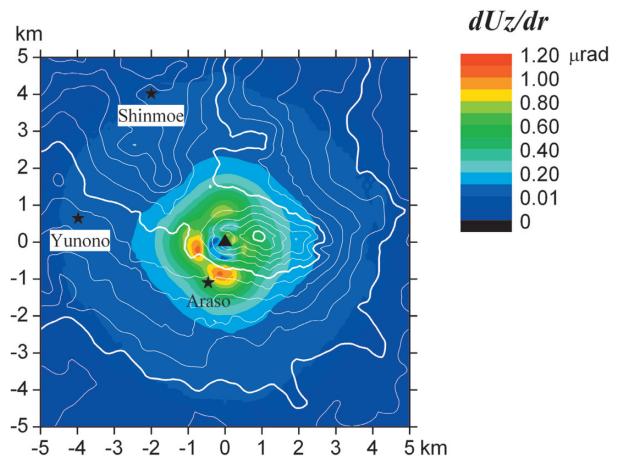


Fig. 2.1.3.22 Tilt along the radius direction from the center calculated by the FEM for the spherical pressure source with $D = 0$ km asl, $\Delta P = 100$ atm, $\mu = 40$ GPa, $\sigma = 0.25$.

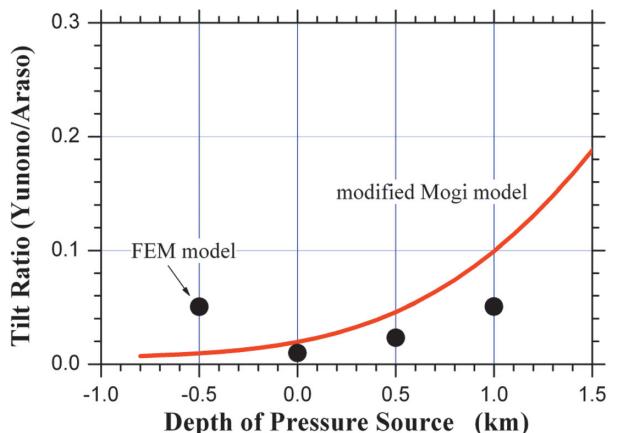


Fig. 2.1.3.23 Tilt ratio between Araso and Yunono stations, simulated by the FEM (solid circle) and calculated by the modified Mogi model (red line) against the depth of the pressure source. The modified Mogi model is expressed as equation (5).

$$\Gamma = -\frac{9a^3 \Delta P}{4\mu} \frac{(D+h)r}{((D+h)^2 + r^2)^{5/2}} \quad (5)$$

で求めた傾斜比と圧力源深さとの関係（赤線）を示す。前述した斜面傾斜の影響を考慮すれば、傾斜比はFEMによる結果よりも大きくなることから、湯之野と荒襲の傾斜比が1/10よりも小さくなるためには、圧力源は海面下1kmよりも浅くなければならないことがFEM計算結果から確認される。

2.1.3.6 おわりに

霧島山御鉢は1880年から1923年にかけ頻繁に噴火していたが、その後、火山性地震が多発することがあるものの、表面現象は静穏な状態が続いている。一方、この期間新燃岳が噴火するなど御鉢以外の火山活動が活発であった。安井・長友（1961）は新燃岳と御鉢の活動は数十年周期で交替に起こっていると指摘している。御鉢では2001年10月26日から火山性微動が観測されるようになり、本研究期間には地下における圧力変動に起因すると思われる傾斜変化が観測され、土砂噴出活動が発生した。これらのこととは御鉢が1900年前後のような活動期に入ったことを示しているのかもしれない。

本研究終了後、傾斜観測装置は福岡管区気象台に移管され、引き続き監視業務に活用されている。

（福井敬一）

参考文献

- 中禮正明・鴻山弘明, 2006: 2004年浅間山噴火活動に伴う傾斜変動について. 火山, **51**, 91-101.
- 檀原毅・友田好文, 1969: **測地・地球物理学**. 地球科学講座第5巻, 共立出版, pp. 240-243.
- 福岡管区気象台・鹿児島地方気象台, 2003: 火山活動解説資料（平成15年12月17日）霧島山（御鉢）.
- 福山英一, 1988: 伊豆大島の火山性微動と同期したノコギリ歯型傾斜変動. 火山, **23**, S128-S135.
- 萩原幸男, 1977: 伊豆半島の異常隆起を説明する茂木モデルとそれに伴う重力変化. 東京大学地震研究所彙報, **52**, 301-309.
- 北川貞之・山里平・緒方誠, 1995: 雲仙岳で観測された傾斜変化を伴う微動について. 日本国山学会講演予稿集, 1995 No. 2, 102.
- Matsumoto,K., T. Sato, T. Takanezawa, M. Ooe, 2001: GOTIC2: A program for computation of oceanic tidal loading effect. *J. Geod. Soc. Japan*, **47**, 243-248.
- 松岡俊文・芦田護・深森広英・桑野恭・黒墨秀行・中禮正明・原田智史・鈴木巖・向井正三郎・荒井文明・高杉真司・館野正之・高橋昌宏・C. Wright, 1999: 岩手山の火山活動に伴う地殻変動観測への高精度傾斜計の応用. 物理探査, **52**, 583-593.
- Oikawa, J., Y. Ida, K. Yamaoka, H. Watanabe, E. Fukuyama, K. Sato, 1991: Ground deformation associated with volcanic tremor at Izu-Oshima volcano. *Geophys. Res. Lett.*, **18**, 443-446.
- 札幌管区気象台・森測候所, 2002: 北海道駒ヶ岳の2000年9月～11月の噴火活動. 火山噴火予知連絡会会報, 第79号, 7-15.
- 島田誠一・渡辺秀文・福井敬一・福山英一, 1988: 伊豆大島火山1986年噴火前後の傾斜変動. 火山, **33**, S161-169.
- Tamura, Y., T. Sato, M. Ooe, M. Ishiguro, 1991: A Procedure for tidal analysis with a Bayesian Information Criterion, *Geophys. J. Int.*, **104**, 507-516.
- 筒井正明・富田克利・小林哲夫, 2005: 霧島・御鉢火山における2003年12月以降の噴気活動と明治～大正時代の火山活動. 火山, **50**, 475-489.
- 安井豊・長友久雄, 1961: 霧島火山噴火史の一調査. 測候時報, **28**, 32-42.