

1988年十勝岳火山噴火に伴う地殻変動の観測

Observation of a Crustal Deformation Associated with
the 1988 Tokachi-dake Volcanic Eruptions

北海道大学理学部

宮町 宏樹・前川 徳光・岡山 宗夫・笠原 稔・岡田 弘

Faculty of Science, Hokkaido University

Hiroki MIYAMACHI, Tokumitsu MAEKAWA, Muneo OKAYAMA,

Minoru KASAHARA and Hiromu OKADA

Abstract

The notable precursory changes of the tilt and the strain associated with the volcanic eruptions at Mt. Tokachi-dake from December 1988 to March 1989 were detected by an one-component water tube tiltmeter and an one-component extensometer installed at the station located in the north-west direction with a distance of about 2 km from the 62-II crater at Mt. Tokach-dake. The precursor of the eruptions was observed by these instruments for the 11 large eruptions among 23 eruptions : the observed apparent downward tilt with 0.01 to 0.02 microradians toward the south and the observed apparent contraction with 0.2×10^{-8} to 0.5×10^{-8} continued during 30 to 60 minutes before eruption. During each eruption, abrupt changes of the tilt and the strain with an opposite direction to the precursory changes were usually observed. It was also suggested that the long-term upward tilt toward the south gradually cotinued during 8 months before the first eruption in December 1988.

The above observational results strongly suggest that the continuous geodetic monitoring conducted at the high S / N condition (using a vault or a borehole) will provide us an extremely important knowledge on the pre-eruption process, and hence, more data are necessary for different types of volcanic eruptions. Two axial measurements are also very important for the better geophysical interpretation and modelling of the eruptive mechanism.

キーワード：十勝岳, 火山噴火, 傾斜変動, 歪変動

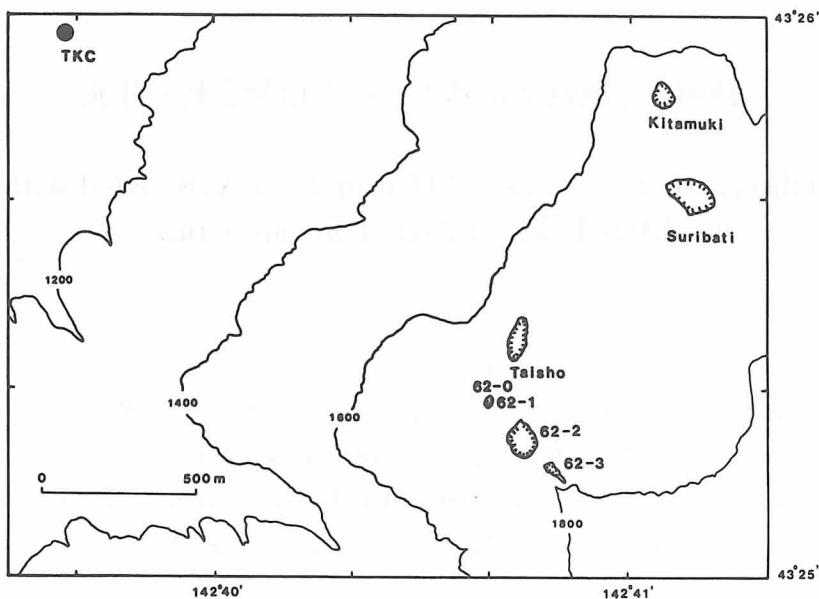


図1 十勝岳62火口群と十勝岳観測坑道観測点（TKC）の分布図

1. はじめに

1988年12月16日、十勝岳（標高2,077メートル）は、1962年の噴火の際に形成された62-II火口から26年ぶりに爆発的な噴火活動を始め、1989年3月5日までに合計23回の火山噴火をおこした。北海道大学理学部では、第3次火山噴火予知計画に従い、1985年以来、十勝岳における火山観測を実施してきた。1987年5月には、十勝岳の62火口群から約2km北西に離れた全長30メートルの観測坑（十勝岳火山観測坑道点）に基線長7.5メートルの水管傾斜計および伸縮計各1成分を設置し、火山体の地殻変動の常時観測を実施してきた。このような観測機器による火山の地殻変動の観測はすでに桜島火山において行われ、桜島の噴火の約10分～約7時間前から噴火までに $1 \sim 20 \times 10^{-8}$ rad. の傾斜変動および $10^{-8} \sim 10^{-7}$ の歪変動が観測され、火山噴火の直前予知の一手段として有効である事が報告されている（加茂・石原、1986）。本報告では、これらの観測計器によって観測された十勝岳噴火時前後の地殻の傾斜および歪変化について述べる。

2. 観測方法

図1に、十勝岳の62火口群（標高1,700～1,775メートル）と十勝岳火山観測坑道観測点（標高1,125メートル、以下TKC）の位置を示す。観測点TKCは、62火口群から北西に約2kmの地

点に位置している。また、全長30メートルの横穴式の観測点であるため、S / N 比の非常に良い観測が可能である。坑道内には、速度型地震計（固有周期1秒および5秒各3成分）が、設置されている。1986年6月、火山体の地殻変動を常時観測するために、この観測坑の最深部に基線長7.5メートルの水管傾斜計（Tilt Meter）と伸縮計（Strain Meter）各1成分が設置された。伸縮計には、直径約25mmの石英管を用い、約1メートル間隔でピアノ線により吊っている。また、この観測点建設時に、これらの地殻変動観測計器の設置を考慮しなかったため、傾斜計の1水槽と伸縮計の固定端の観測台は、坑道本体の建造物の基礎に固定されている。観測坑の伸張方向が南北であるため、設置された傾斜計及び伸縮計も南北に向いている。したがって、図1から解るように、観測計器は、十勝岳の62火口群とは、約47度の角度をなしている事になる。水管傾斜計の両端の水槽中のフロートの変位は、それぞれマグネセンサーにより電気量に変換され増幅器により増幅される。この水管傾斜計の最終的出力感度は、水位変化に対して $20 \text{ mV} / \mu \text{ meter}$ であり、傾斜変化に対して $150 \text{ mV} / \mu \text{ rad}$ である。また、伸縮計の変位は、マグネセンサー（高感度）及び差動トランス（低感度）によって検出され、増幅される。伸縮計の高感度及び低感度センサーの出力感度は、変位に対してそれぞれ $81 \text{ mV} / \mu \text{ meter}$ 、 $20 \text{ mV} / \mu \text{ meter}$ であり、歪に対しては、 $61 \text{ mV} / 10^{-8}$ 、 $15 \text{ mV} / 10^{-8}$ である。これらの観測機器によって観測された地殻変動データは、16ビット1秒サンプリング（フルレンジ±5 V）され、気温・気圧のデータと共にテレメータ装置により北海道大学理学部付属有珠火山観測所に常時伝送されている。有珠火山観測所では、伝送されたこれらのデジタルデータを、十勝岳火山観測地殻変動資料処理装置（1987年5月以降）によりディスプレイ上にリアルタイム表示すると共に、毎正分のデータのみを磁気テープに保存している。本報告では、この保存されている毎分値のデータを用いている。

3. 観測結果と考察

十勝岳は、1988年12月16日午前5時24分の噴火をかわきりに、1989年3月5日午前5時22分の噴火までの間に、合計23回の噴火を数えた。参考のため、各噴火の時刻、気象庁十勝岳火山観測所A点における爆発地震の地震動の最大振幅、噴火に伴う低周波空気振動の最大振幅、噴火前の傾斜および歪の異常変動の方向、噴火時の傾斜および歪の変動方向を表1に示す。これらの噴火のうち、1989年1月1日および1月27日の噴火については、傾斜計および伸縮計欠測のため記録はとれなかった。1988年12月19日と1989年1月22日の噴火の前後約24時間に観測された傾斜、歪、気圧及び気温変化を図2に示す。各観測値は、前後1分間の観測値の中央値を用いているが、他の補正（気温補正、気圧補正、ドリフト補正、潮汐補正等）は、行っていない。したがって、本報告で取り扱われている噴火に伴う傾斜および歪の変動量は、すべて、みかけの量である。各図中に見られる傾斜、歪、気圧及び気温変化のスケールバーは、それぞれ、 $5 \times 10^{-8} \text{ rad.}$ 、 $1 \times$

表1. 1988年～1989年十勝岳の各噴火リスト

噴火番号	噴火日時 年月日時分	爆発地振動 の最大振幅 (ミクロン)	低周波空気 振動の最大 振幅 (mb)	噴火前の異常 歪変動	噴火時の 歪変動	噴火前の異常傾斜変動 (南)	噴火時の 傾斜変動 (南側)
1	1988 12 16 05 24	12.9	欠測	縮み	伸び	無	下降
2	12 18 08 38	13.6	欠測	縮み	伸び	下降	下降
3	12 19 21 47	16.1	欠測	縮み	伸び	下降	上昇
4	12 24 22 12	5.6	1.10	無	伸び	無	上昇
5	12 25 00 49	22.0	0.99	縮み	伸び	無	下降
6	1988 12 30 05 27	6.9	1.25	無	伸び	無	上昇
7	1989 01 01 02 12	無	無	欠測	欠測	欠測	欠測
8	01 08 19 38	21.2	0.94	無	伸び	無	下降
9	01 13 22 29	不明	0.07	無	不明	無	不明
10	01 16 18 55	12.0	2.68	縮み	伸び	無	上昇
11	1989 01 20 03 21	15.0	3.75	縮み	伸び	無	不明
12	01 22 00 14	不明	0.31	無	不明	無	不明
13	01 23 12 17	不明	0.04	無	不明	無	不明
14	01 27 01 44	27.0	3.67	欠測	欠測	欠測	欠測
15	01 28 05 18	5.0	0.67	無	伸び	無	上昇
16	1989 01 28 06 11	14.9	0.42	縮み	伸び	下降	上昇
17	01 28 07 00	12.6	0.33	縮み	伸び	下降	上昇
18	02 01 18 18	12.6	0.58	無	不明	無	不明
19	02 04 00 38	36.7	0.71	縮み	伸び	下降	上昇
20	02 06 09 37	8.4	0.76	無	伸び	無	上昇
21	1989 02 07 23 54	10.1	0.64	無	伸び	無	上昇
22	02 08 04 02	31.9	0.89	縮み	伸び	無	上昇
23	03 05 05 22	21.0	0.77	縮み	伸び	無	不明

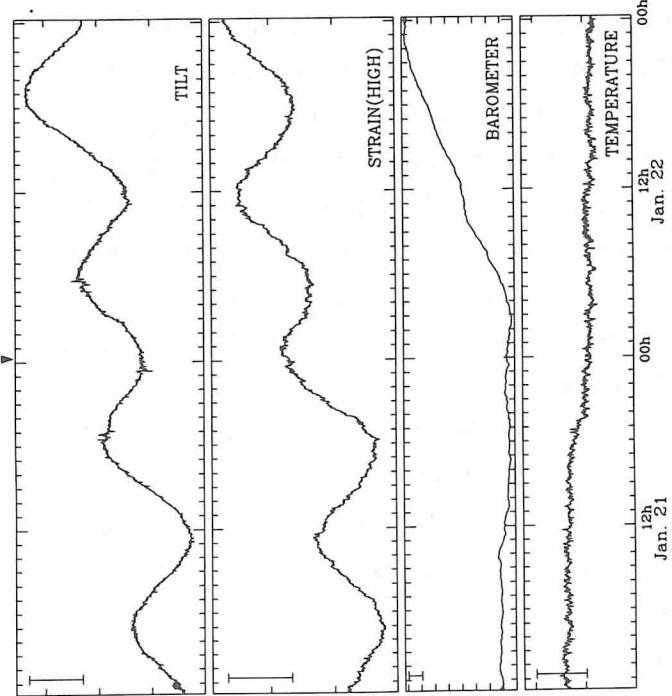


図 2. 2 1989年1月22日0時14分の噴火前後24時間の傾斜、歪、気圧および気温変動のグラフ。図中のスケールおよび記号は、図2. 1と同じである。

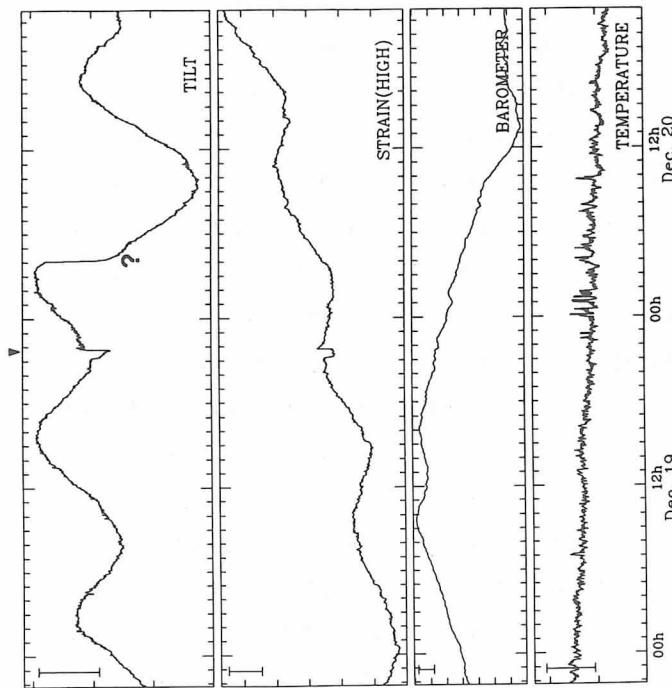


図 2. 1 1988年12月19日21時47分の噴火前後24時間の傾斜、歪、気圧および気温変動のグラフ。各グラフ中のスケールは、それぞれ、 5×10^{-8} rad., 1×10^{-8} , 2 mb, 0.01°C である。また、各グラフの上向きの方向は、それぞれ、南方向向上向き（傾斜計）、伸び（伸縮計）、気圧上昇（気圧計）および気温上昇（温度計）を意味している。図の上部の矢印は、噴火時間を示している。また、記号“?”は、計測機器あるいは原因不明に起因すると考えられる変動を示している。

10^{-8} , 2 mb, 0.01°Cを示している。各図中の上段に示されている矢印は、噴火時を表している。また、図中の記号“?”は、観測計器等の機械的な要因あるいは原因不明による測定値の飛びを示し、火山本体の地殻変動に起因するとは考えられない変動である。傾斜のグラフは、プラス方向が南側上がりを示し、歪のグラフのプラス方向は伸びを示す。また、気圧および気温のグラフのプラス方向は、それぞれ、気圧上昇、気温上昇を示す。図2に見られる正弦波状の変動は地球潮汐によるものであり、通常、傾斜計では $4 \sim 6 \times 10^{-8}$ rad., 伸縮計では 1×10^{-8} 程度で検出されている事が解る。また、気温変化は、通常0.01°C以下であり、気温変化による傾斜および歪の日周変化は、見られない。図2. 1に見られるように、大きな爆発地震を伴う噴火の際には、傾斜計および伸縮計に急激なステップ状の変動が観測されている事が解る。

図3は、観測された21回の噴火の前後約6時間の観測値を示したものである。図中の記号およびスケールは、図2のものと同様であるが、上段の太い実線及び点線は、それぞれ、連続した火山性微動の発生期間、断続的な火山性微動の発生期間を概略的に表し、記号“T”は遠地地震による変動を示している。噴火活動中の1989年1月27日には、伸縮計のセンサーの交換および調整を行ったため、その人為的影響によるドリフトが大きく、その後の観測データにも現れている。図中の斜線は、噴火直前に観測された傾斜及び歪のみかけの異常変動と考えられる部分を示している。この異常変動は、観測データが得られている21回の噴火中、11回について見られた。しかしながら、対象とする噴火を、気象庁十勝岳火山観測所のA点における爆発地震の最大変位が10ミクロン以上の爆発地震を伴う噴火に限定すると、14回中11回の異常変動を検出できた事になる。また、多くの観測データでは、噴火に伴う急激なステップ状の変動を示している。

噴火前に観測された伸縮計のみかけの異常変動は11回あり、噴火の30分～60分前から現れる傾向がある。その変動は、 $0.2 \sim 0.5 \times 10^{-8}$ 程度の縮みである。また、そのみかけの異常変動の現れ方には、2種類見られる。すなわち、1988年12月18日午前8時38分の噴火(図3. 2)の際に見られるように、噴火直前まで縮み続ける場合と、1988年12月19日午後9時47分の噴火(図3. 3)のように、数分の間に急激な縮みを起こし、その状態を噴火直前まで維持していく場合である。その後、噴火時に、それまでの異常変動の向きと逆の方向、すなわち、伸びの方向にステップ状の変動をする。また、噴火前の異常変動を確認できない噴火においても、噴火時のステップ状の変動は伸びの方向である(表1参照)。このステップ状の変動後、数分～数10分間に、異常変動前の定的な変動レベルに徐々に向かう傾向がある(例えば、図3. 3)。一方、噴火前のみかけの異常傾斜変動が観測された噴火は5回あり、その変動は、 $1 \sim 2 \times 10^{-8}$ rad.程度の南側下向きである。また、その変動が噴火30～50分前から現れる傾向がある事、その異常変動のタイプが2種類ある事(図3. 3および図3. 14)、噴火時のステップ状の急激な変動と噴火後の変動の挙動は、歪変動と同様である。しかしながら、歪変動の場合と異なり、噴火時のステップ状の傾斜変動は、南側上向き(11例)、下向き(4例)の2種類がみられる(表1参照)。実際の変動量

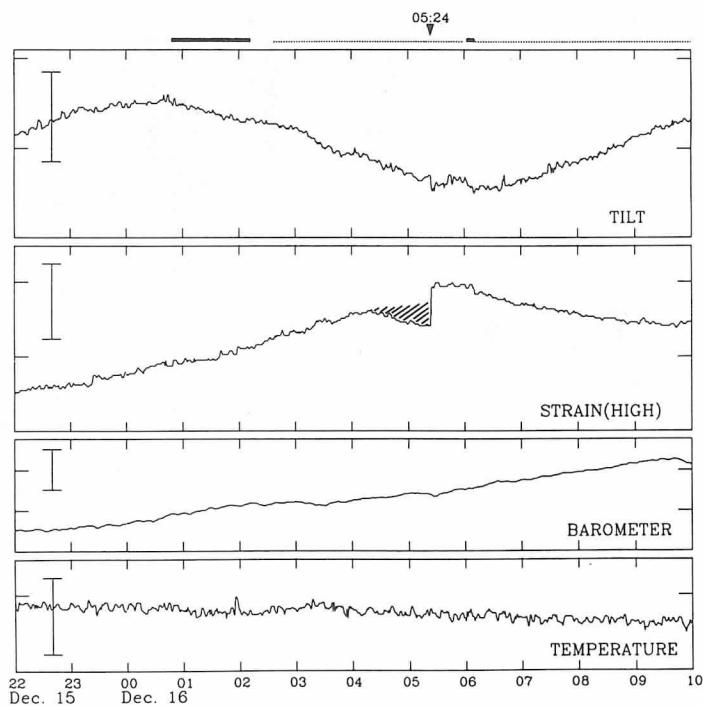


図3.1 1988年12月16日5時24分の噴火前後6時間の傾斜, 歪, 気圧および気温変動のグラフ。各グラフ中のスケールは, それぞれ, 5×10^{-8} rad., 1×10^{-8} , 2 mb, 0.01°C である。また, 各グラフの上向きの方向は, それぞれ, 南方向上向き(傾斜計), 伸び(伸縮計), 気圧上昇(気圧計)および気温上昇(温度計)を意味している。図の上部の矢印, 太い実線, 点線は, それぞれ, 噴火時間, 連続的火山性微動の発生期間, 断続的火山性微動の発生期間を示している。また, 記号“?”と“T”は, 計測機器に起因すると考えられる変動, 遠地地震の地震動による変動をそれぞれ示している。

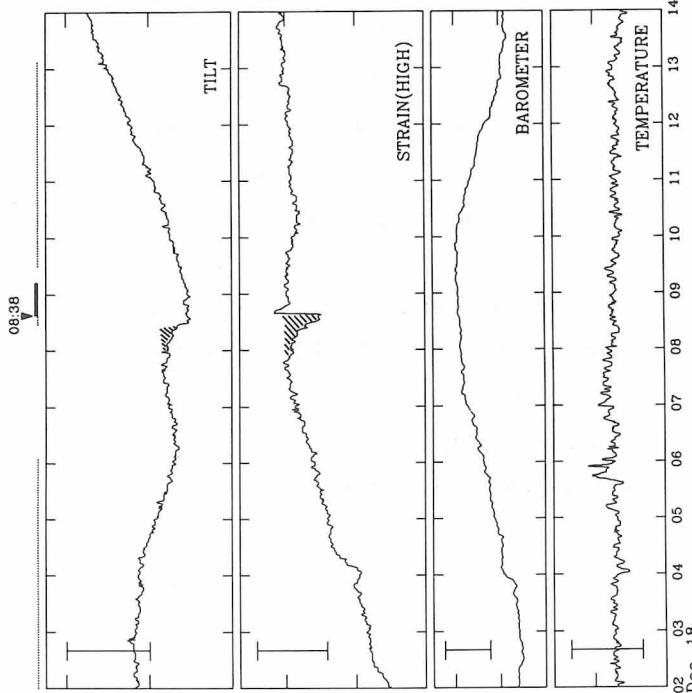


図 3.2 1988年12月18日8時38分の噴火前後6時間の傾斜、歪、気圧および気温変動のグラフ。図中のスケールおよび記号は、図3.1と同様である。

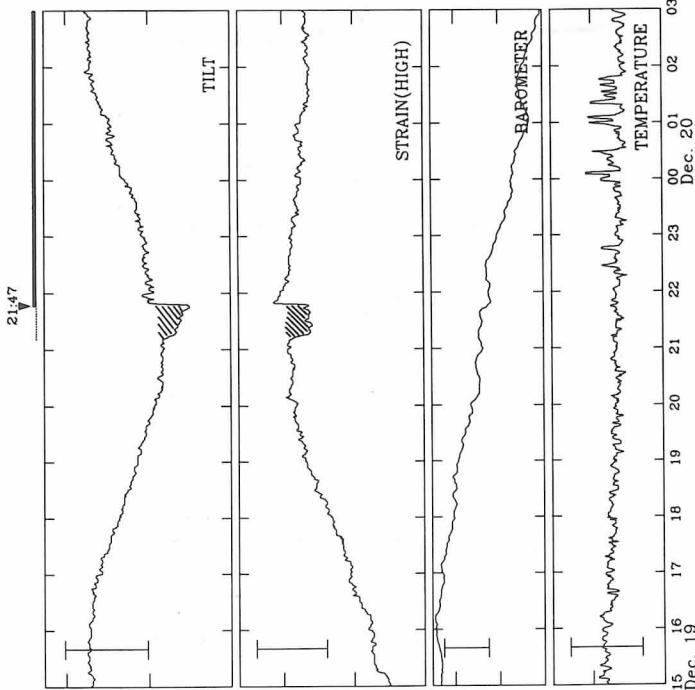


図 3.3 1988年12月21時47の噴火前後6時間の傾斜、歪、気圧および気温変動のグラフ。図中のスケールおよび記号は、図3.1と同様である。

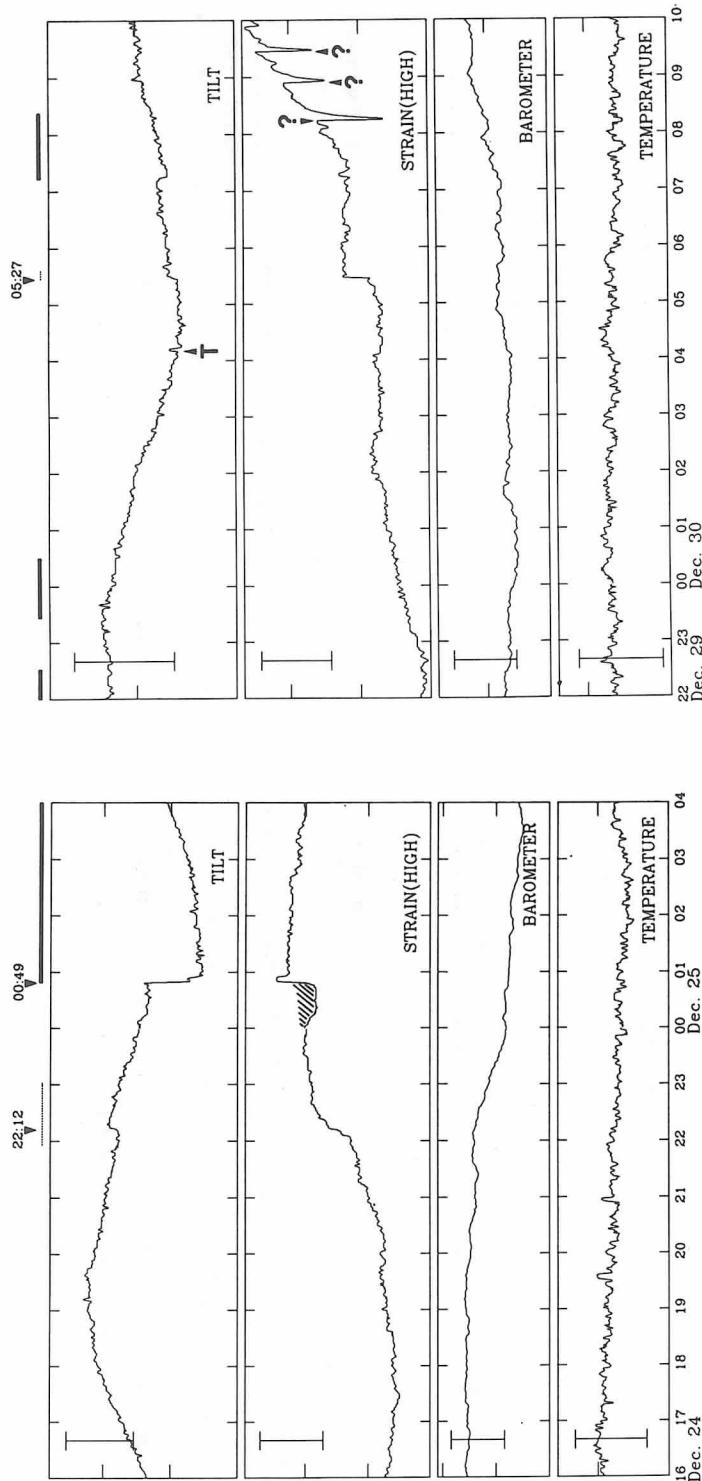


図 3.4 1988年12月24日22時12分および12月25日0時12分の噴火前後6時間の傾斜、歪、気圧および気温変動のグラフ。図中のスケールおよび記号は、図3.1と同様である。

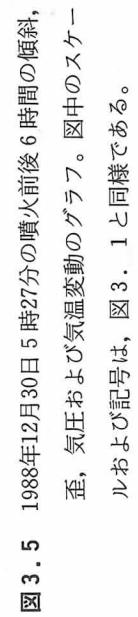


図 3.5 1988年12月30日5時27分の噴火前後6時間の傾斜、歪、気圧および気温変動のグラフ。図中のスケールおよび記号は、図3.1と同様である。

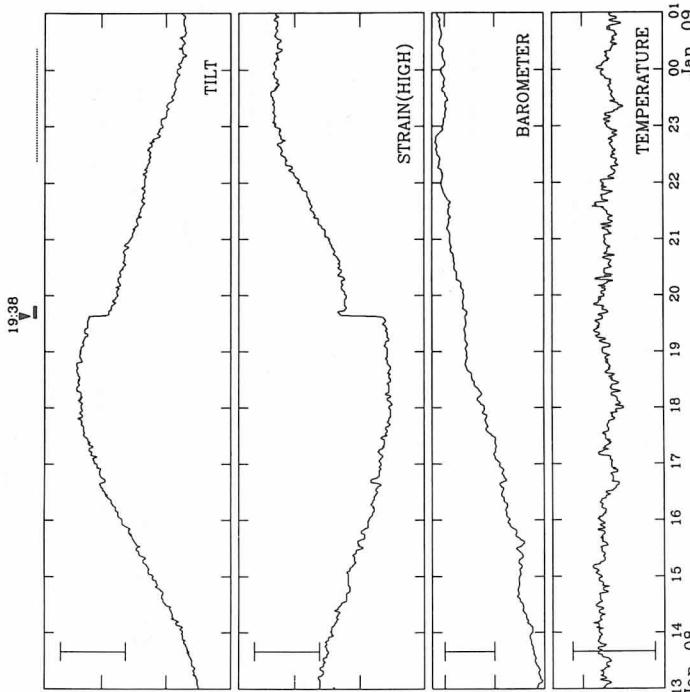


図 3.6 1989年1月8日19時38分の噴火前後6時間の傾斜、
歪、気圧および気温変動のグラフ。図中のスケー
ルおよび記号は、図 3. 1 と同様である。

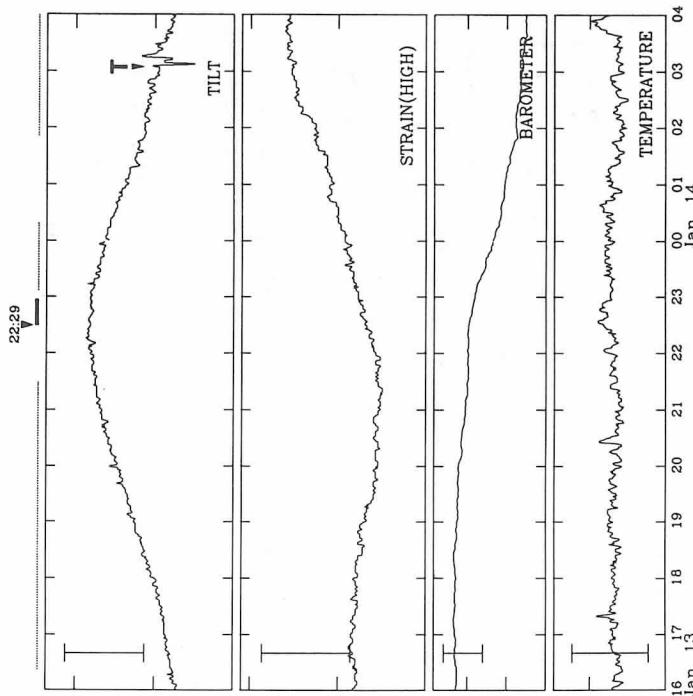


図 3.7 1989年1月13日22時29分の噴火前後6時間の傾斜、
歪、気圧および気温変動のグラフ。図中のスケー
ルおよび記号は、図 3. 1 と同様である。

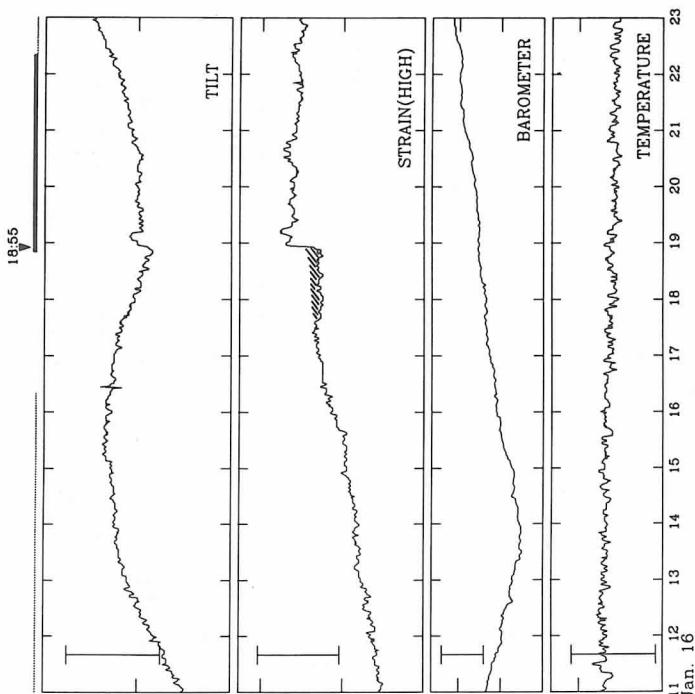


図 3.8 1989年1月16日18時55分の噴火前後6時間の傾斜、歪、気圧および気温変動のグラフ。図中のスケールおよび記号は、図3.1と同様である。

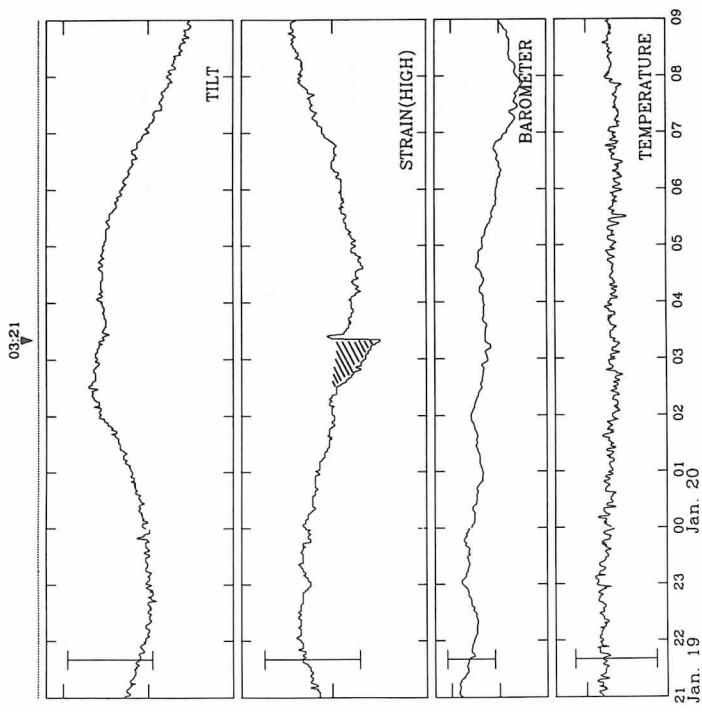


図 3.9 1989年1月20日3時21分の噴火前後6時間の傾斜、歪、気圧および気温変動のグラフ。図中のスケールおよび記号は、図3.1と同様である。

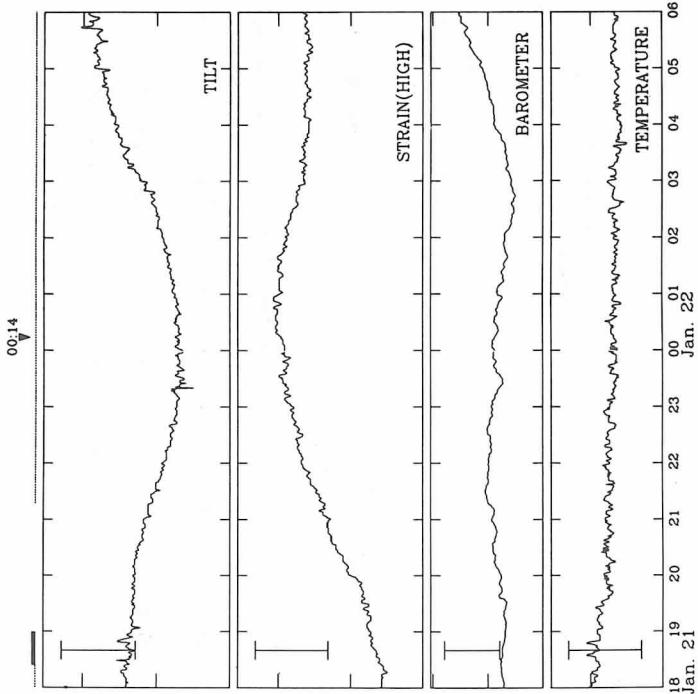


図 3.10 1989年1月22日0時14分の噴火前後6時間の傾斜、
歪、気圧および気温変動のグラフ。図中のスケー
ルおよび記号は、図3・1と同様である。

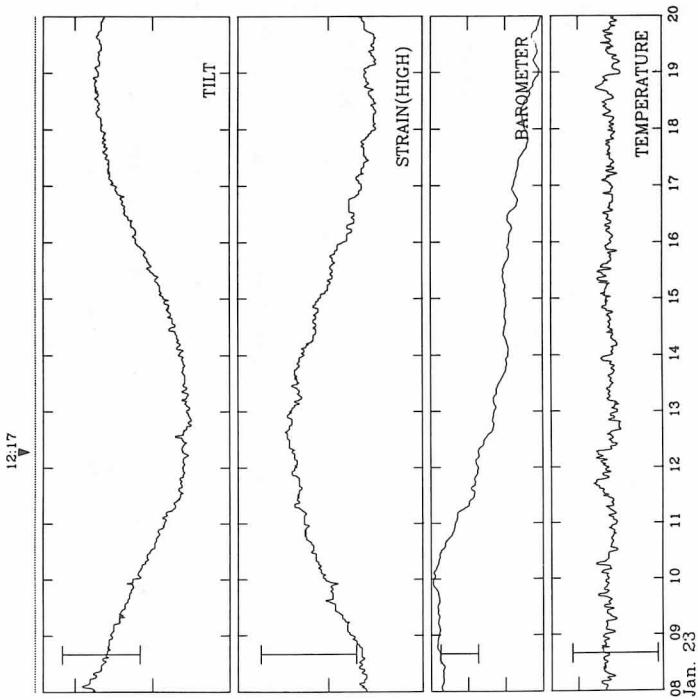


図 3.11 1989年1月23日12時17分の噴火前後6時間の傾斜、
歪、気圧および気温変動のグラフ。図中のスケー
ルおよび記号は、図3・1と同様である。

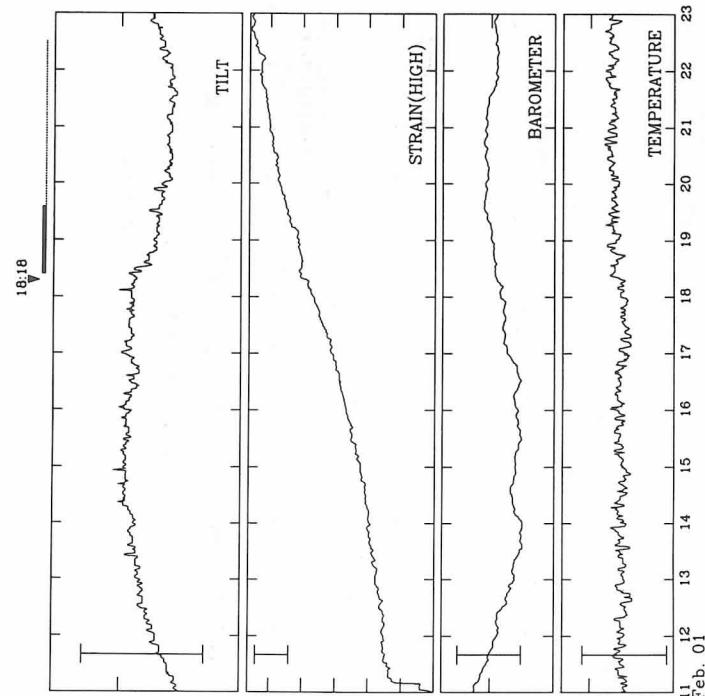


図 3.13 1989年2月1日18時18分の噴火前後6時間の傾斜、歪、気圧および気温変動のグラフ。図中のスケールおよび記号は、図3.1と同様である。

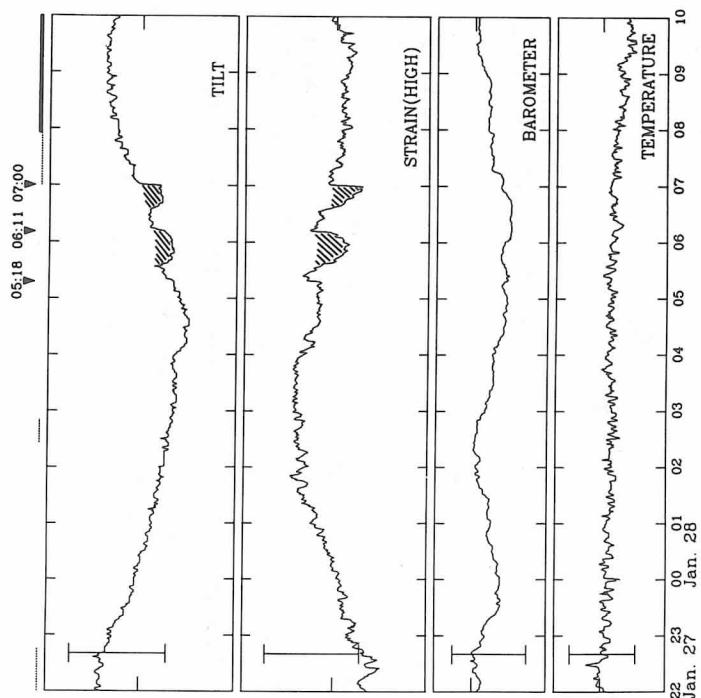


図 3.12 1989年1月28日5時18分、6時11分および7時0分の噴火前後6時間の傾斜、歪、気圧および気温変動のグラフ。図中のスケールおよび記号は、図3.1と同様である。ただし、歪のグラフにおいて、センター交換等に起因する人為的ドリフトを一次関数によって近似しドリフトを除去している。

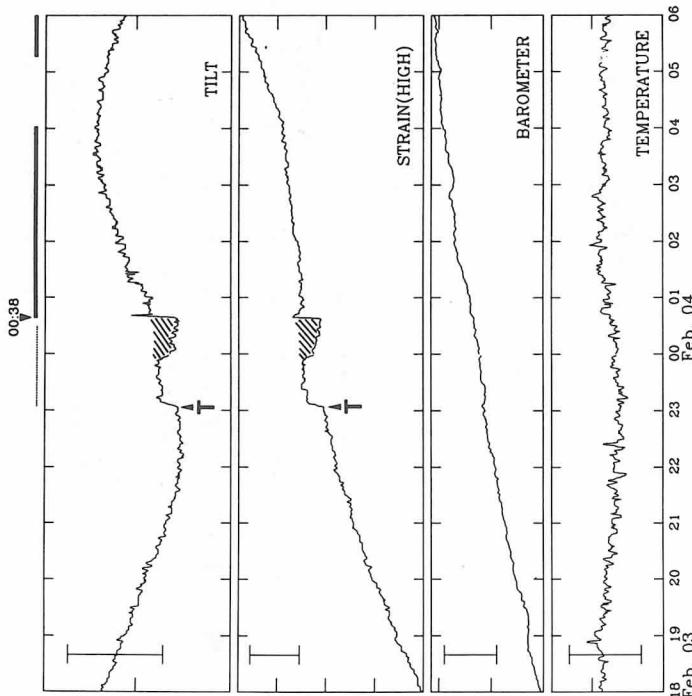


図 3.14 1989年2月4日0時38分の噴火前後6時間の傾斜、歪、気圧および気温変動のグラフ。図中のスケールおよび記号は、図3.1と同様である。

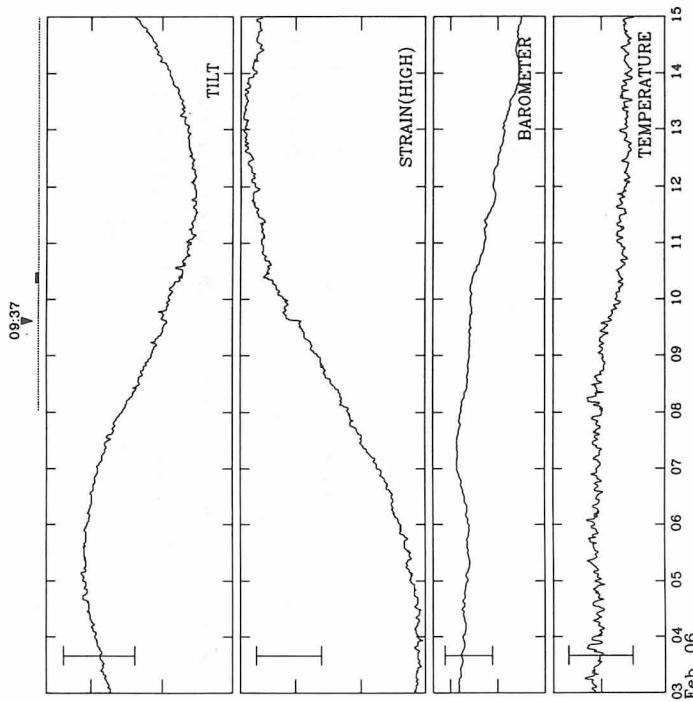


図 3.15 1989年2月6日9時37分の噴火前後6時間の傾斜、歪、気圧および気温変動のグラフ。図中のスケールおよび記号は、図3.1と同様である。

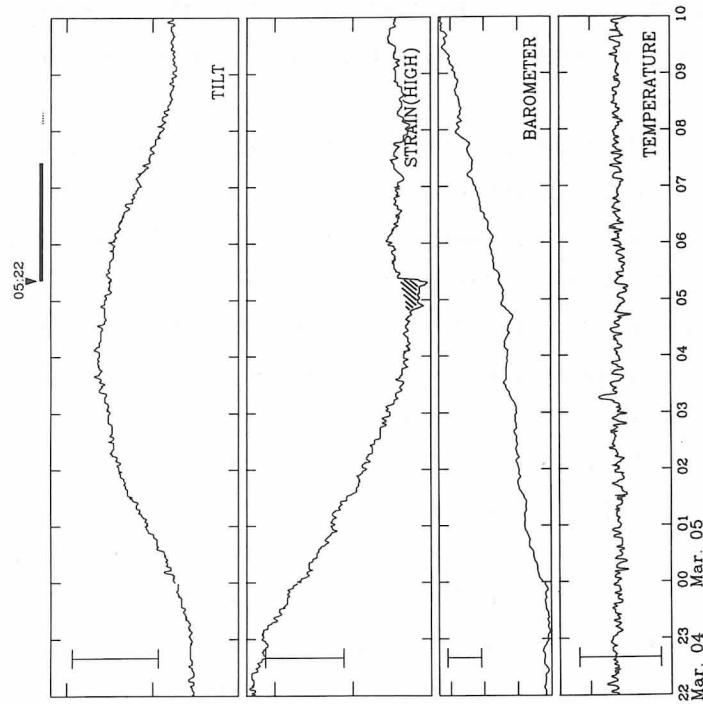
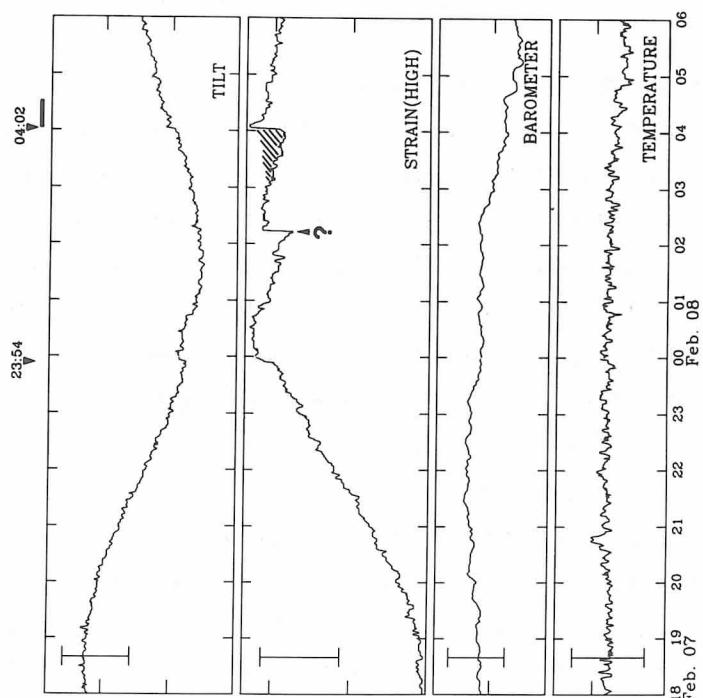


図 3.17 1989年3月5日5時22分の噴火前後6時間の傾斜、歪、気圧および気温変動のグラフ。図中のスケールおよび記号は、図3.1と同様である。

1と同様である。

図 3.16 1989年2月7日23時54分および2月8日4時2分の噴火前後6時間の傾斜、歪、気圧および気温変動のグラフ。図中のスケールおよび記号は、図3.1と同様である。



を得るためにには、今回の解析では行わなかった種々の補正が必要である。特に、観測された2種類のみかけの異常変動の現れ方は、地球潮汐と気圧の変動によるみかけの挙動である可能性が考えられる。

次に、上述の噴火直前の傾斜及び歪変動と火山性微動との関係を見てみる。多くの噴火の場合、噴火直後から連続あるいは断続的な火山性微動を伴っている事がわかる。また、噴火前に新たに火山性微動が発生する観測例も見られるが、微動を伴わない噴火や長時間の微動発生中に噴火する場合もあり、一意的な火山性微動と噴火の関係は明白でない。

図4に、1987年8月～1989年12月までの観測データを示す。図中の記号“I”で示されている期間は、観測計器の交換等の人為的要因による変動と考えられる期間である。また、記号“X”は、欠測期間を示している。観測計器が設置されている観測坑は、1986年に掘られたものである。したがって、観測坑建設に伴う坑自体の初期変動や観測計器の初期安定性等を考慮すると、図4に示した長期変動のすべてが火山本体と地殻変動を反映しているとは考えられない。しかしながら、歪変動を見ると、5月から6月にかけての歪のピークと10月中旬から始まる縮みの変動は、年周変化である事を示唆している。また、傾斜変動について見ると、1987年8月～1988年1月と1989年5月以降の変動は、南側下向きであるが、今回の噴火前の1988年4月頃から、活発な噴火を含む火山活動がほぼ終了する1989年4月頃まで南側上向きの変動が続いている事がわかる。すなわち、個々の噴火の直前の異常なみかけの傾斜変動は南側下向きであったが（図3）、噴火活動期約8カ月前から噴火活動期にわたって、南側上向きの傾斜変動が続いている事を示唆している。

今回の噴火で得られた噴火前の傾斜および歪変動を桜島におけるそれと比較してみる。桜島では、火口から2.8km離れた観測坑内に基線長28メートルの水管傾斜計2成分と伸縮計3成分を用いた観測により、噴火の約10分～約7時間前から噴火発生までに $0.01\sim0.2\mu\text{rad}$ の傾斜変動および $10^{-8}\sim10^{-7}$ の歪変動が検出されている（加茂・石原、1986）。また、加茂・石原（1986）によると、前兆期間（噴火前に異常な傾斜および歪の変動が始まり噴火するまでの期間）が長い噴火の場合、火口方向の上向きの傾斜変動と伸縮計全成分の伸びが観測され、また、前兆期間が短い場合には、火口方向の上向きの傾斜変動と伸縮計の火口方向の成分の不明瞭な伸びあるいは縮みとそれに直交する成分の伸びが観測されている。今回の十勝岳の噴火で観測されたみかけの変動量は、 $0.01\sim0.02\mu\text{rad}$ の傾斜変動、 $0.2\sim0.5\times10^{-8}$ の歪変動であった。したがって、十勝岳で検出された変動量は、桜島での変動量の同程度～1/10程度である事になる。また、彼らは、傾斜変動の場合、前兆期間が長いほど全異常変動量は大きくなる事を報告しているが、我々の観測データ不足のため、今回の十勝岳の噴火に対しては不明である。また、我々の観測した変動方向は、南方向の下向きの傾斜変動、伸縮計の縮みであったが、観測に用いている傾斜計および伸縮計が各1成分である事や計器の方向が火口方向と約47度をなす事を考慮すると、桜島で得られ

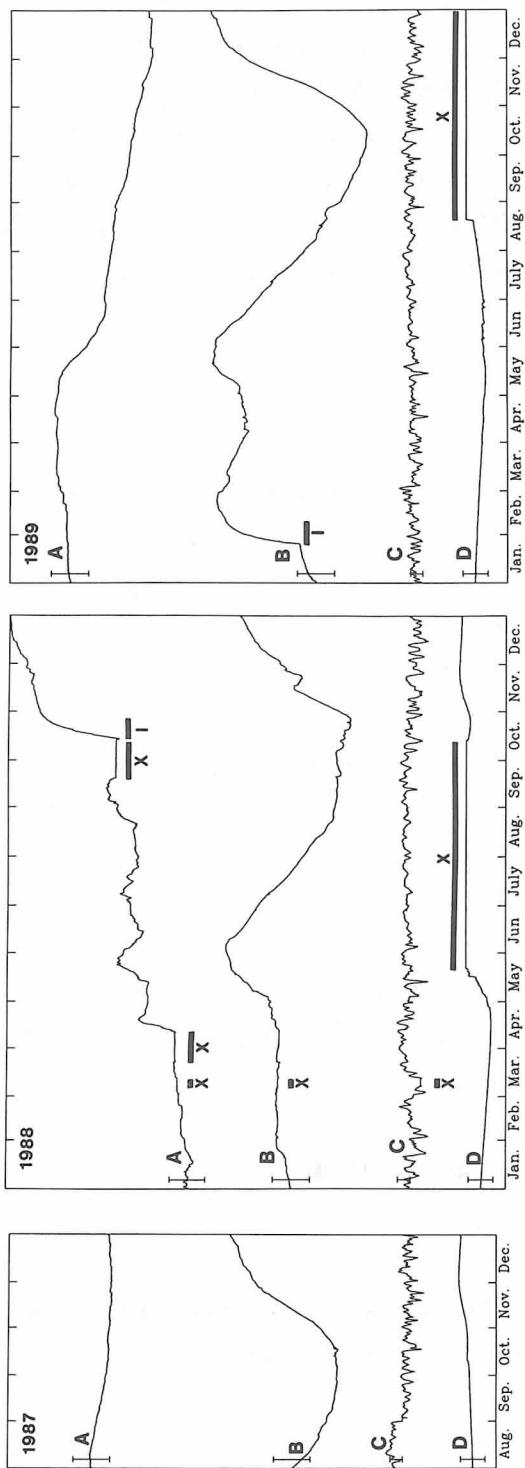


図4 1989年8月から1989年12月までの傾斜(A), 亘(B), 気圧(C)および気温(D)変動のグラフ。各スケールは, それぞれ, 5×10^{-6} rad, 1×10^{-6} , 20 mb , 1°C である。また, 各グラフの上向きの方向は, それぞれ, 南方向上向き(傾斜計), 伸び(伸縮計), 気圧上昇(気圧計)および気温上昇(温度計)を意味している。図中の記号“X”と“I”は, それぞれ, 欠測期間, 人為的影響による変動と考えられる期間を示している。

ている変動方向と定量的に比較する事は困難である。しかしながら、単純に、いわゆる茂木モデル（Mogi, 1958）を仮定すると、観測された伸縮計の縮み変動は、十勝岳62火口下に存在する球状力源内の内部圧の静水圧の増加に伴う地盤の変動として解釈可能である。一方、傾斜計の南側の下向きの変動は、この茂木モデルと反する現象である。この現象の要因としては、より複雑の力源モデル、あるいは、観測計器の方向を含めた計器の設置状況や局所的な地盤の影響が考えられるが、今回行われた傾斜計および伸縮計の各一成分のみによる観測では、その要因を断定する事は不可能である。したがって、今後は、多成分による傾斜および歪の観測が必要不可欠であろう。

4. ま と め

1988年12月～1989年3月にかけての23回の十勝岳噴火中11回の噴火の際に、噴火の30分～60分前から噴火までの間に、 $1 \sim 2 \times 10^{-8}$ rad. の南側下向きのみかけの傾斜変動と $0.2 \sim 0.5 \times 10^{-8}$ の縮みのみかけの変動を観測した。噴火時には、それまでの異常変動と逆向きのステップ状の傾斜および歪の変動が検出された。また、噴火活動が始まる8カ月前から、南側上向きの傾斜変動が徐々にはじまっていた事が示唆された。傾斜計および伸縮計とも1成分のみによる観測のため定量的な解析は、行わなかった。今回の地殻変動観測で明かなように、噴火の前兆現象を捕捉する一手段として、傾斜計および伸縮計による火山体の地殻変動の連続観測は非常に重要である。ただし、より定量的な変動量を得るために、多成分による傾斜および歪の観測が必要である。

5. 謝 辞

本研究にあたり、北海道大学理学部有珠火山観測所助手森済氏には、有益な助言をしていただいた。また、傾斜計等の設置作業では、北海道大学理学部硝子工室技官林信夫氏に協力願った。記して感謝の意を表します。

6. 参 考 文 献

- 加茂幸介・石原和弘、地盤変動連続観測で捕捉された山頂噴火の前駆現象、京都大学防災研究所年報、29, B-1, pp. 1-12, 1986.
- Mogi, K., Relations between the Eruptions of Various Volcanoes and the Deformations of the Ground Surfaces around them, Bull. Earthq. Res. Inst., Vol. 36, pp. 99-134, 1958.