

TECHNICAL REPORTS OF THE METEOROLOGICAL RESEARCH INSTITUTE NO.12

INVESTIGATION ON THE TECHNIQUES
FOR VOLCANIC ACTIVITY SURVEILLANCE

BY

SEISMOLOGY AND VOLCANOLOGY DIVISION, MRI

気象研究所技術報告

第12号

火山活動監視手法に関する研究

地震火山研究部

気象研究所

METEOROLOGICAL RESEARCH INSTITUTE, JAPAN

JULY 1984

Meteorological Research Institute

Established in 1946

Director : Dr. K. Takeuchi

Forecast Research Division	Head : Mr. T. Yoshida
Typhoon Research Division	Head : Dr. M. Aihara
Physical Meteorology Research Division	Head : Dr. T. Okabayashi
Applied Meteorology Research Division	Head : Mr. T. Majima
Meteorological Satellite Research Division	Head : Dr. K. Naito
Seismology and Volcanology Research Division	Head : Dr. M. Ichikawa
Oceanographical Research Division	Head : Dr. H. Iida
Upper Atmosphere Physical Research Division	Head : Dr. M. Kano
Geochemical Research Division	Head : Mr. T. Akiyama

1-1 Nagamine, Yatabe-Machi, Tsukuba-Gun, Ibaraki-Ken, 305 Japan

Technical Reports of the Meteorological Research Institute

Editor-in-chief : Mr. T. Majima

<i>Editors</i> :	Mr. K. Yamazaki	Mr. H. Kondoh	Dr. T. Ito
	Mr. F. Kimura	Dr. J. Aoyagi	Mr. M. Okada
	Dr. M. Endoh	Dr. K. Kodera	Dr. K. Fushimi

Managing Editors : K. Nishida, Y. Yuhara

Technical Reports of the Meteorological Research Institute

has been issued at irregular intervals by the Meteorological Research Institute since 1978 as a medium for the publication of survey articles, technical reports, data reports and review articles on meteorology, oceanography, seismology and related geosciences, contributed by the members of the MRI.



写真1 阿蘇山中岳火口
と中岳第1火口の湯溜り
(1983年11月9日)

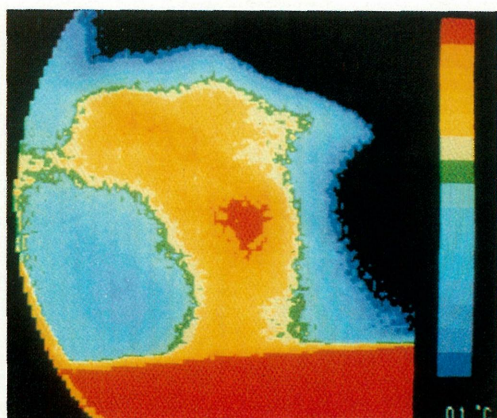


写真2 阿蘇山噴煙の赤外線熱映像（赤外線
検知装置による、1982年11月3日03時）

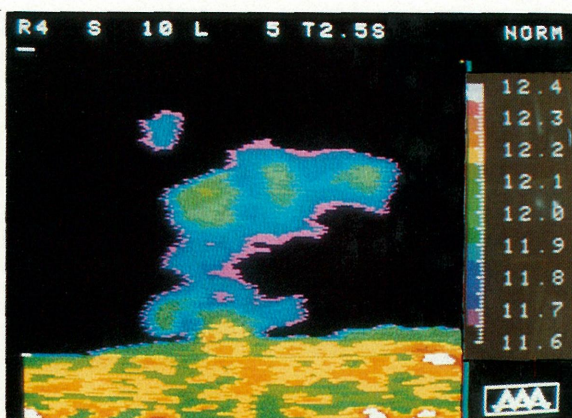


写真3 阿蘇山噴煙の赤外線熱映像（赤外線映像
装置による、1982年10月21日16時40分）



写真4 阿蘇山噴煙（可視光検知装置による、
1980年12月10日10時47分）

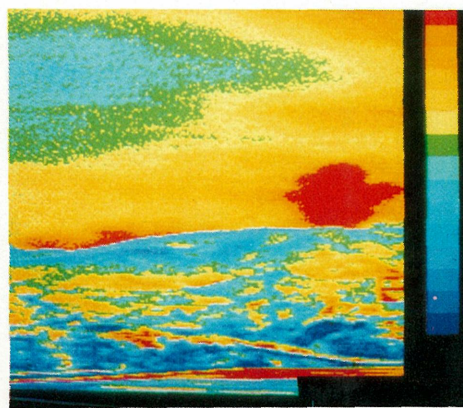


写真5 阿蘇山噴煙の色調処理器による
解析例。写真4の噴煙、雲などを解析。

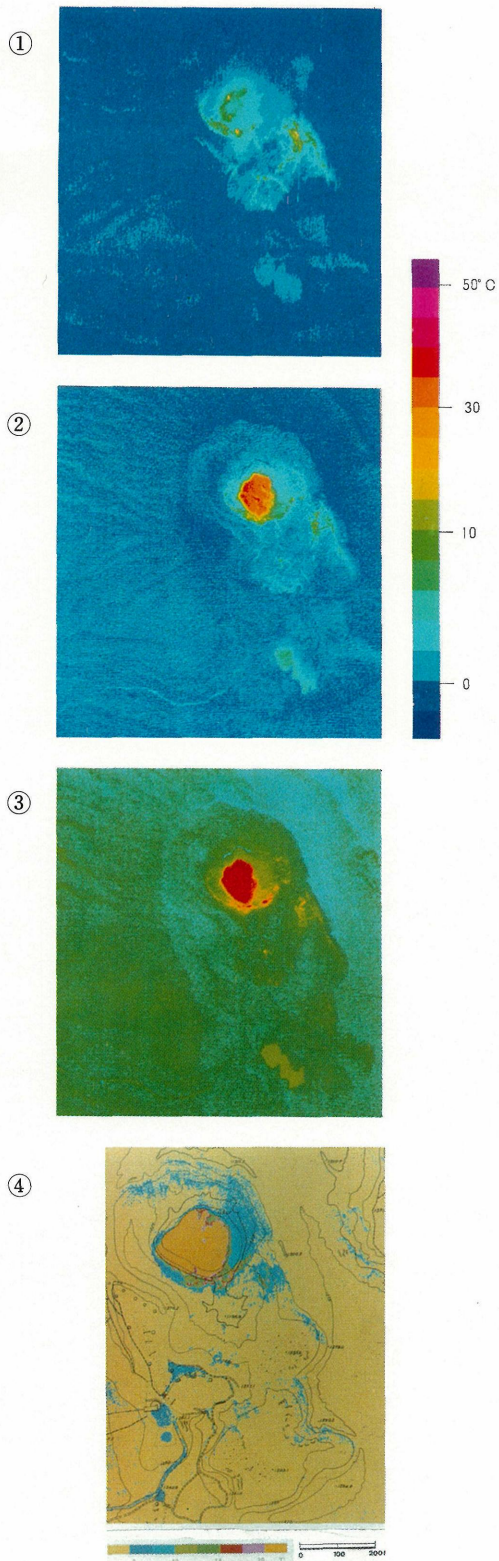


写真 6

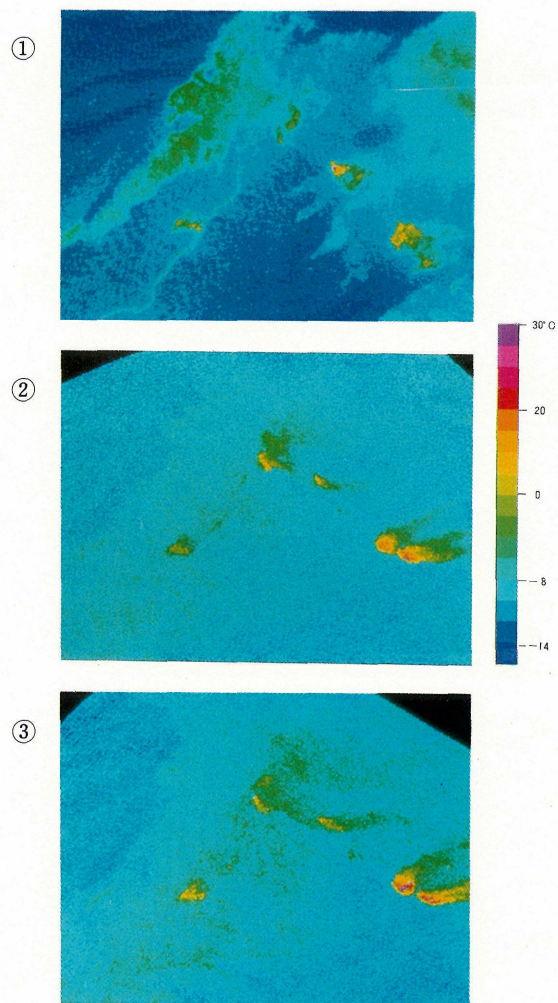
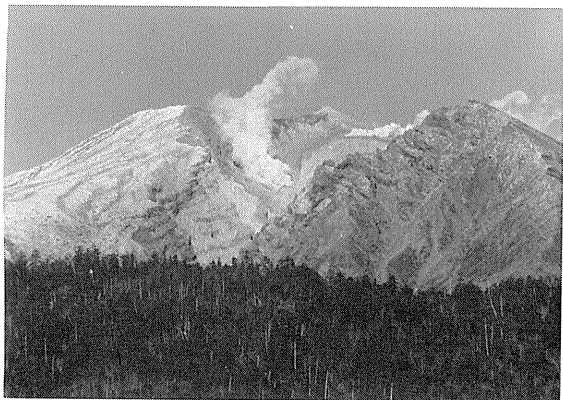


写真 7

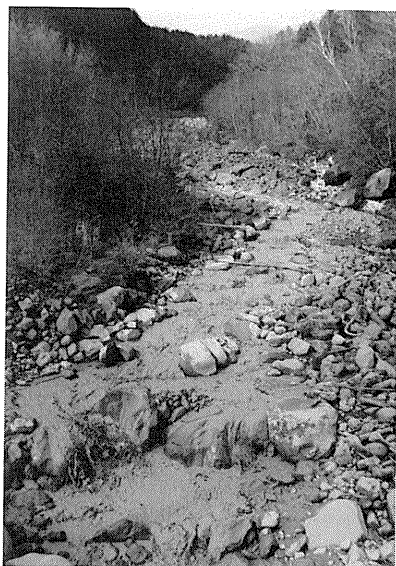
写真 6 阿蘇山中岳火口の空中赤外映像
 ①1979年12月24日 ②1980年3月27日
 ③1980年3月30日 ④1983年11月9日

写真 7 御岳山の空中赤外映像
 ①1979年12月13日 ②1980年2月29日
 ③1980年3月19日

①



④



②



⑤



③



写真8 御岳山噴煙関係

- ① 噴煙と地獄谷を南西から望む (1979年11月14日)
- ② 降灰上についた車輪の跡、火口の東方、六合目付近 (1979年11月13日)
- ③ 山麓の開田村災害対策本部 (1979年11月13日)
- ④ 濁川、pH観測点付近、常に泥水が流れている (1979年11月14日)
- ⑤ 登山道に立てられた入山禁止、登山禁止の立札 (1979年11月13日)



写真9 噴煙観測装置

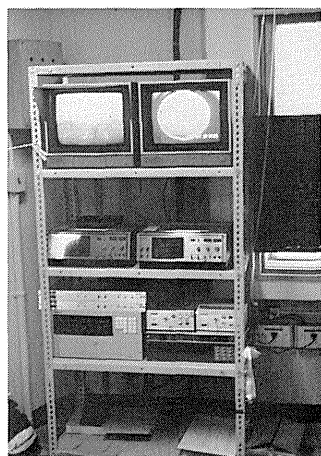


写真10 噴煙観測モニター装置 噴煙記録部、温度記録部、モニター用テレビ等をラックに収納

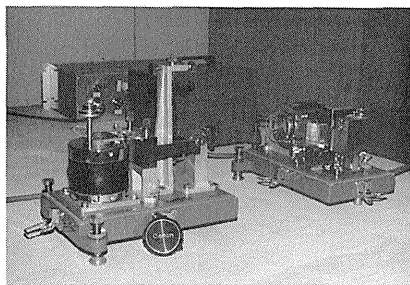


写真11 火山用長周期地震計変換器

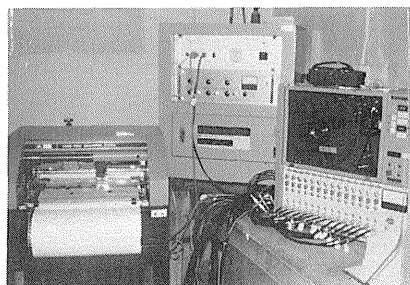


写真12 火山用長周期地震計記録部

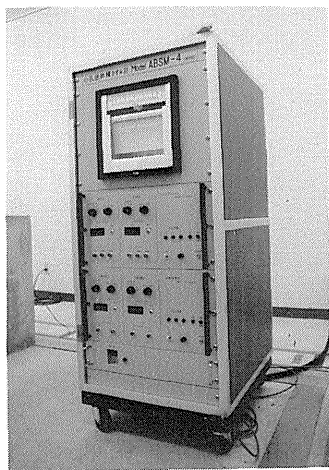


写真13 火山用体積歪計地上増幅制御部

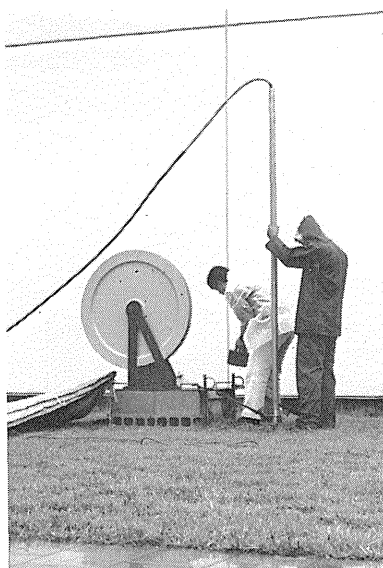


写真14 火山用体積歪計地中変換部とその埋込作業

序

近年、わが国では、火山周辺地域の急速な開発が進められているので、火山がひとたび噴火した場合には大きな被害が予想されるようになった。したがって、火山噴火による災害の軽減を図るため、火山噴火予知の実用化に対する社会的要請は、ますます強くなってきた。

そこで、国は昭和48年7月24日に「活動火山周辺地域における避難施設等の整備等に関する法律」を、さらに、昭和53年4月26日には「活動火山対策特別措置法」を公布して、火山現象の予知推進等に力を入れてきた。これらの法律と並行して、測地学審議会は昭和48年6月29日、及び昭和53年7月12日に、それぞれ、第1次及び第2次の「火山噴火予知計画の推進について」関係諸大臣に建議した。

これらの法律並びに建議に対処するため、国の関係機関及び大学は、火山の観測や研究を分担して、昭和49～53年度に第1次火山噴火予知5ケ年計画を、続いて昭和54～58年度には第2次火山噴火予知5ケ年計画を実施した。気象研究所もこれに参加し、第1次火山噴火予知5ケ年計画では、特別研究「火山噴火予知に関する研究」を実施した。その成果は気象研究所技術報告第2号に掲載してある。第2次火山噴火予知計画では昭和55年度から特別研究「火山噴火現象監視に関する研究」を4ケ年かけて実施した。

一方、第2次火山噴火予知計画の初年度にあたる昭和54年には阿蘇山と御岳山で大きな噴火が起こったので、噴火後の火山の状況を把握する必要上、特定研究（科学技術庁特別研究促進調整費）により「1979年の阿蘇山・御岳山噴火に関する研究」を実施した。

本技術報告は2編に分かれている。その第1編及び第2編の1部には第2次火山噴火予知計画で気象研究所が実施した特別研究について、また第2編の第2章を除く各章には阿蘇山と御岳山の特定研究で気象研究所が実施した研究について記述してある。

上述の特別研究及び特定研究に参加した気象研究所地震火山研究部の職員は次のとおりである。

特別研究

田 望（前部長、現東海大学教授、昭和55～56年度の主任研究者）

渡辺 偉夫（部長、昭和57～58年度の主任研究者）

田中 康裕（第2研究室長）

古田美佐夫（第2研究室主任研究官）

澤田 可洋（第2研究室主任研究官）

中禮 正明（第2研究室研究官）

福井 敬一（第2研究室研究官）

特定研究

田 望（主任研究者）

田中 康裕（研究担当者）

澤田 可洋（研究担当者）

中禮 正明（研究担当者）

なお、これらの研究を実施するにあたり、現地の気象官署に多大の協力を得たことを感謝すると共に、この報告が火山噴火予知の実現と関係方面の方々に多大の寄与をするものと期待している。大方の御批判をいただければ幸である。

昭和59年3月

気象研究所 地震火山研究部長

渡 辺 偉 夫

目 次

序

概要（和文）	1
アブストラクト（英文）	5

第1編 火山噴火現象監視に関する研究

11

第1章 リモートセンシングによる火山の表面現象の定量的把握に関する研究

11

1 目的	11
2 装置の概要	11
3 装置の選定と製作	16
3.1 可視光検知装置	16
3.2 赤外線検知装置	18
3.3 紫外線検知装置	19
4 装置の構成と仕様	20
4.1 可視光検知装置	20
4.2 赤外線検知装置	26
4.3 紫外線検知装置	32
5 観測小屋とモニター室	34
6 自動観測と問題点	36
6.1 観測視野及び観測時刻の制約	36
6.2 観測小屋の窓	37
7 観測方法	40
7.1 可視光	40
7.2 赤外線	42
7.3 紫外線	43
8 噴煙観測の捕捉率	45
8.1 映像観測	45
8.2 温度観測	47
8.3 火山ガス観測	48
9 観測結果	49
9.1 観測資料	49

9.2	可視光観測資料	49
9.3	温度観測資料	55
9.4	火山ガス観測資料	58
10	噴煙によって放出される水蒸気・熱・SO ₂ 量	63
10.1	噴煙によって放出される水蒸気量・熱量の保存則による推定の方法.....	63
10.2	阿蘇山における噴煙によって放出される水蒸気量・熱量.....	65
10.3	噴煙によって放出されるSO ₂ 量の推定	68
11	噴煙塊の温度分布	68
12	噴煙の色調処理	71
13	まとめ	72
付	火口周辺の光波測量	73
第2章	火山用長周期地震計によるマグマの動向把握に関する研究	101
1	目的	101
2	火山用長周期地震計の製作	101
3	地震計の性能試験	105
4	観測	108
4.1	概要	108
4.2	観測された震動	108
5	火山性長周期震動	115
5.1	波形の特徴	115
5.2	発生状況	117
6	第2種火山性微動と火山活動	122
7	まとめ	123
第3章	火山用体積歪計の開発	132
1	目的	132
2	装置の構成と特徴	132
3	装置各部の概要と性能	135
3.1	地中変換部	135
3.2	地上増幅制御部	137
3.3	ケーブル	139
4	性能試験	139
4.1	観測孔の状態	139
4.2	温度・圧力変化の試験	139

5	まとめ	143
第2編 阿蘇山・御岳山の噴火及び火山活動に関する研究		
第1章	阿蘇山の1979, 1980年の熱的状态と火山活動	145
1	まえがき	145
2	観測方法	145
3	空中赤外映像の処理	148
4	地上からの赤外温度観測	152
5	放出熱量	153
6	まとめ	155
付	1979年9月6日の阿蘇山爆発による中岳火口内の地形変化	155
第2章	阿蘇山中岳火口の熱的状态の変遷	158
1	まえがき	158
2	空中赤外温度観測実施状況	158
3	1983年11月9日(第8回目)の空中赤外温度観測	159
4	温度分布図の比較	160
5	火口の温度と火山活動の比較	162
6	まとめ	163
第3章	御岳山の1979年噴火後の熱的状态	164
1	まえがき	164
2	空中赤外温度観測	164
3	空中赤外映像の解析	166
4	地表温度分布図	166
5	まとめ	171
第4章	御岳山の1979年噴火による降灰分布と山麓の川水のpH	172
1	まえがき	172
2	噴火開始時刻の推定	172
3	噴火活動の経緯	173
4	降灰域	174
5	火山灰の特徴	175
6	山麓の川水のpH	175
7	まとめ	177

概 要

気象研究所では火山噴火予知、火山防災を目標にして火山の研究にとりくんでいる。火山噴火の前兆現象をとらえて、事前に噴火に対処することは、火山噴火災害の防止軽減に役立つ。

噴火に前駆する火山現象として、地殻・火山性地震・噴煙・地熱等に変動が現われることが多いので、それらの諸現象を正確に観測し、解析することによって、火山噴火の発生時期、位置、規模等が予測できると考えられる。

当研究部では火山下でマグマの活動が始まってから噴火に至るまでに発生する諸現象及び発生順序を、次のような単純化したモデルにあてはめて、第1次及び第2次火山噴火予知計画を実施してきた。

〈火山でマグマが活動を始めてから噴火に至る間の火山現象とその観測・研究〉

(第1期)

火山活動が活発化すると火山下のマグマ溜りが振動を始める。

研究手法：長周期地震波動観測

- 火山用長周期地震計でマグマ溜りの振動を観測、解析（昭和57～58年度実施）
- その他（地震観測資料の解析などが考えられる）

(第2期)

続いてマグマ溜りが拡張したり上昇する。

研究手法：地殻変動観測

- ジオジメーターで地盤の伸縮を観測、解析（昭和49～53年度実施）
- 傾斜計で山体の傾斜を観測、解析（昭和49～53年度実施）
- 火山用体積歪計で火山下の歪を観測、解析（昭和58年度機器開発）
- その他（水準測量や重力計による観測などが考えられる）

(第3期)

さらにマグマが上昇すると火山下の物質は破壊され、火山性地震・微動が発生する。

研究手法：地震観測

- 短周期地震計で火山性地震や火山性微動を観測、解析（火山観測指定火山で気象庁が観測実施中。この資料を用いて研究）
- その他（地震観測、臨時観測資料の解析などが考えられる）

(第4期)

マグマや火山ガスが火口近くまで達して地熱が上昇したり噴煙活動が活発化する。

研究手法：遠望観測・現地観測

○噴煙の目視観測、火口内外の噴気温度などの観測（火山観測指定火山で気象庁が実施中。

この資料を用いて研究）

○リモートセンシングで噴煙を観測、解析（可視・赤外・紫外線の波長域を利用、昭和55～58年度実施）

○航空機等で火口内外の温度を観測、解析（昭和49～54年度実施）

○その他（火山ガス、湧水の分析などが考えられる）

(第5期)

以上の結果噴火が起こる。

研究手法： { 長周期地震波動観測
地殻変動観測
地震観測
遠望観測
現地観測
その他（電磁気学的観測などが考えられる）

火山現象は複雑であるから、噴火は上の表に示した第1期から第4期までの現象をすべて経た後に起こるとは限らない。また、ある時期の現象を欠いたり、発生順序が狂うこともあり得ると考えねばならぬ。そうした複雑さはあるとしても、ここに示した長周期地震波動観測・地殻変動観測・地震観測・遠望観測・現地観測等は、火山活動監視上、いずれも重要な意義を持っていることは否定できない。

さて、第2次火山噴火予知計画による「火山噴火現象監視に関する研究」では、火山の噴煙を動的、定量的に観測する手法の開発、マグマ溜りの長周期振動を観測する手法の開発、及び火山の地下に働く歪量を観測するための手法の開発を推進することを目標として次の3つのサブテーマにより特別研究を実施した。

- a. リモートセンシングによる火山の表面現象の定量的把握に関する研究（昭和55～58年度）
- b. 火山用長周期地震計によるマグマの動向把握に関する研究（昭和57～58年度）
- c. 火山用体積歪計の開発（昭和58年度）

これらは第1編の中に研究項目ごとに章を改めて記述してある。

研究の結果、次のような成果があった。

a. について

従来の噴煙目視観測とくらべて、観測精度が格段と良くなることがわかった。すなわち、従来は噴煙の高さを100m単位で測っていたが、この装置によると10m単位で観測でき、噴煙の拡がり具合（噴煙量）も従来は1～7階級に分けて観測するのが精一杯だったのが100m²単位で測定できる。さらに、従来は全く手がつけられなかった噴煙の温度や火山ガス（SO₂）等を観測する手法が開発された。

この特別研究実施中の阿蘇山の火山活動は静穏であったが、噴煙量は冬期に多く夏期に少なくなるような年変化がみられ、噴煙の温度（ただし火口縁の高さないし火口縁上数十mの位置における温度）は冬期に低く夏期に高い年変化がみられた。それらは気象要素による影響である。また噴煙中のSO₂濃度にも、冬期にやや増加する傾向がみられた。ただし測定は火口縁よりやや高い位置の噴煙について行われた。

平均的な噴煙の諸要素の季節変動量とその平均値は次のとおりであった。

噴煙の高さ：50～200m（平均120m）

噴煙の幅：50～220m（平均140m）

噴煙の垂直断面積： $5 \times 10^3 \sim 4 \times 10^4 \text{ m}^2$ （平均 $2 \times 10^4 \text{ m}^2$ ）

噴煙の体積： $1 \times 10^5 \sim 5 \times 10^6 \text{ m}^3$ （平均 $2 \times 10^6 \text{ m}^3$ ）

噴煙の上昇速度：1～8 m/s（平均2.7m/s）

噴煙の温度：3～23°C（平均13°C）

噴煙中のSO₂濃度：100ppm-m～650ppm-m（平均310ppm-m）

また、噴煙によって放出される水蒸気量（ $\dot{W}$ ）・熱量（ $\dot{Q}$ ）・SO₂量（ $\dot{G}$ ）は、それぞれ、 $\dot{W} = 7 \times 10^3 \text{ ton/day}$ 、 $\dot{Q} = 5 \times 10^7 \text{ cal/sec}$ 、 $\dot{G} = 11 \text{ ton/day}$ と求められた。

b. について

火山では気温変化、傾斜変化が大きいため、従来の重い振子を利用した長周期地震計は振子がバランスを失いやすく、長周期震動を安定した状態で観測することは不可能に近かった。そこで、本研究では、周期2秒の電磁式地震計変換器とフィードバック回路とを組合せて周期10秒の安定した変位地震計を開発し、火山用長周期地震計と命名した。

この地震計を阿蘇山測候所へ設置したところ、既設の短周期地震計ではわからなかった周期6～10秒の火山性震動（第2種火山性微動）をよく記録するようになった。この微動はマグマ溜りの振動に原因するといわれてきたものである。この研究期間中の阿蘇山の火山活動は静穏であった、第2種火山性微動の発生状況は数回/月～150回/月程度であった。

c. について

活火山では、一般に 10^{-5} /年の辺長歪が起こっている。また、地中の温度は高温でしかも温度変化がある場所もある。そこで、 10^{-5} の大きな歪、及び 0.3°C の温度変化に耐える体積歪計を開発した。この歪計の感部は体積歪検出器・体積温度検出器・半導体温度計を一体として耐圧容器の中に組み込んであり、地下に掘った観測孔の中に設置するようになっている。地上の増幅制御部は地震予知のために用いられている埋込式体積歪計のものと同一である。この歪計は火山用体積歪計と命名された。なお、温度変化は $2/1000^{\circ}\text{C}$ まで検知できる。

本装置は気象研究所構内の観測孔内に入れ、温度変化、圧力変化の試験を行ったが、良好な結果が得られた。

一方、第2次火山噴火予知計画の研究実施期間中のできごととして、1979年の阿蘇山及び御岳山の噴火は特記すべきことであった。前者は阿蘇山としては比較的大きな噴火で、火口付近で死傷者を生じ、観光施設にも被害があり、多量の降灰が広い範囲で観測された。後者の噴火は有史以来初めてのもので、火山観測所を持たない同山にとっては、まさに、「寝耳に水」のできごとであった。

両火山の噴火の調査研究は科学技術庁の特定研究で実施したもので、航空機からのリモートセンシングにより、火山の熱的状态の推移等が研究された。これらの研究結果は第2編に述べてあり、その成果は次のとおりであった。

阿蘇山では、過去に調査した火口の熱分布と今回のものを比較検討し、火山活動度と熱的状态との関係を調べ、1980年当時の活動度は、かなり高いことを明らかにした。

一方、御岳山では、今回の熱的調査が初めてのものであり、山腹の高温地熱地帯の位置、形、状態等を明らかにするとともに、これらの地熱地帯の状態が1979年12月から1980年3月までの間にどのように変化したかを追跡した。また、この研究に関連して、映像装置(MSS)の可視光バンドによる映像を利用して、赤外線バンドの映像に地形補正を加える映像解析手法を開発した。また、噴火による降灰分布等の調査も実施し、御岳山の火山活動状況の判定に役立てた。

Abstract

The Meteorological Research Institute has conducted volcanological research for the purpose of prediction and disaster prevention of volcanic eruptions. It is effective for the prevention and mitigation of such disasters to detect phenomena preceding eruptive activities and to cope beforehand with their occurrence.

It has been known that extraordinary variations of ground & crustal deformations, seismological events, volcanic cloud ejections, geothermal activities, etc., occur as precursory phenomena of volcanic eruptions. It will be possible to predict the occurrence time, location, magnitude, etc., of volcanic eruptions by precise measurements and analysis of these phenomena.

We have conducted the investigations in the 1st and 2nd National Projects for Prediction of Volcanic Eruptions (1974—1978 and 1980—1983), assuming that the various accompanying phenomena and their occurrence sequences from the beginning of underground activities of magma till the occurrence of eruptions will take place on the following simple model.

Volcanic Activities from the Underground Magma Activity till the Occurrence of Volcanic Eruptions, and Their Observations and Research

(1st Stage)

The subground magma reservoir begins to vibrate by activation of volcanic activity.

Research item: Observation of long-period seismic waves.

- * Observation of vibrations of magma reservoir by volcanological long-period seismograph (1982—1983)
- * Others.

(2nd Stage)

Then, the magma reservoir expands and/or ascends.

Research item: Crustal and ground movements observation.

- * Ground surface strain measurements by geodimeter (1974—1978)
- * Tilt observation of volcano edifice by tilt meter (1974—1978)
- * Underground strain observation by volcanological volume strain meter (developed in 1983)
- * Others.

(3 rd Stage)

By successive ascent of magma, underground materials are destroyed and volcanic earthquakes occur.

Research item: Seismological observation.

- * Observation of volcanic earthquakes and tremors by short-period seismograph (routinely conducted by the Japan Meteorological Agency at designated volcanoes. The materials were used in our investigations).

- * Others.

(4 th Stage)

Magma and volcanic gases approach the ground surface, the geothermal temperature increases, and an active ejection of volcanic clouds occurs.

Research item: Visual observation of volcanic clouds and field inspections.

- * Observation of volcanic clouds by means of remote sensing techniques (using wavelengths of visible, infrared and ultraviolet, 1980—1983).

- * Thermal inspections in and around active craters by aerial and ground measurements (1974—1979).

- * Others.

(5 th Stage)

Occurrence of volcanic eruptions.

Research item: Observation of long-period seismic waves.

Observation of crustal / ground deformation.

Seismological Observation.

Visual observation.

Field inspection.

As volcanic activities are complicated, eruption does not always take place after the occurrence of the phenomena listed in the 1 st to the 4 th Stages in the table above. It is likely that some of the forerunning phenomena fail to occur or the order of occurrence may change. Though there are some complicated problems, the measurement items of long-period seismic wave observation, crustal/ ground deformation measurement, seismological observation, visual observation and field inspection shown in the above table are important and fundamental techniques for volcanological surveillance.

In this special research, Investigation on the Techniques for Volcanic Activity

Surveillance (1980—1983) conducted under the 2 nd National Project for Prediction of Volcanic Eruptions, developments of the techniques for quantitative and dynamic measurements of volcanic clouds, for observations of long-period vibrations generated by magma reservoir activities and for observation of underground strain have been conducted on the following three research items:

- a. Investigation on Quantitative Measurements of the Surface State of Volcanoes by Means of Remote-sensing (1980—1983)
- b. Investigation on Detection of Activity of the Magma Reservoir by Volcanological Long-Period Seismograph (1982—1983)
- c. Development of the Volcanological Volume Strain Meter (1983)

The results of these investigations, as reported in the respective sections in Chapter 1, are in brief as follows:

- a. It was confirmed that the system developed can observe the state of volcanic clouds more precisely than the conventional visual observations. In the case of the conventional observation method, the height of volcanic clouds has been observed in the order of 100 m, and the expanded volcanic clouds (quantity) have been observed in seven. However, the newly developed system can measure the height of volcanic clouds in 10 m order, and can measure the expansion of clouds in the order of 100 m². Furthermore, the techniques for measuring the surface temperature of rising volcanic clouds and concentrations of SO₂ gases in clouds, which have not been carried out by the conventional method, were developed.

The volcanic activity of Aso Volcano where this research was carried out was in a calm state throughout the investigation period. However, remarkable annual variations of the quantity of rising volcanic clouds, which is very great in the winter season, i.e., about 10 times the quantity of the summer season, were observed. The surface temperature of volcanic clouds (at around the crater-rim or at a height of about several tens of meters above the crater-rim) also indicated a clear annual variation showing higher temperatures in summer and lower in winter. These phenomena are due to meteorological effects. There was a tendency of some increase in SO₂ concentrations in winter. The SO₂ measurements were carried out in rising volcanic clouds at positions slightly above the crater-rim.

The results of measurements of volcanic clouds by the new system during this research-work period are shown below. Values in parentheses are mean ones.

Height: 50—200m (120m)

Width: 50—220m(140m)

Vertical profile: $5 \times 10^3 - 4 \times 10^4 \text{m}^2$ ($2 \times 10^4 \text{m}^2$)

Estimated volume: $1 \times 10^5 - 5 \times 10^6 \text{m}^3$ ($2 \times 10^6 \text{m}^3$)

Velocity of rising cloud: 1—8m/sec (2.7m/sec)

Temperature: 3—23°C (13°C)

SO₂ concentration: 100—650 ppm-m (310ppm-m)

The quantity of water vapour ($\dot{W}$), thermal energy release ($\dot{Q}$) and quantity of SO₂ gases ($\dot{G}$) ejected by volcanic clouds were estimated as $\dot{W} = 7 \times 10^3 \text{ton/day}$, $\dot{Q} = 5 \times 10^7 \text{cal/sec}$ and $\dot{G} = 11 \text{ton/day}$, respectively.

- b. At volcanoes, it is very difficult to operate stable and continuous seismological observations for long-period seismic waves by existing long-period seismographs using heavy pendulums, which are apt to lose their balance owing to disturbances of large variations of air temperature and ground tilts on the slope at great altitudes. For the present research, a new type of long-period seismograph, called Volcanological Long-Period Seismograph, has been developed. This seismograph, combining the existing 2-second period electromagnetic transducer and the electrical feedback system, is a stable 10-second period displacement type seismograph.

By continuous observations with this seismograph at Aso Weather Station, long-period (6—10 seconds) volcanic seismic wave-trains (the second kind of volcanic microtremor), which have not been well detected by the conventional short-period seismographs, could be registered very well. This type of volcanic tremor has been considered to be generated by the vibrations of the magma reservoir. During the research work period, the volcanic activity of Aso Volcano has been calm, and the occurrence frequency of the second kind of volcanic microtremor was several—150 times / month.

- c. Usually, a large horizontal distance strain of 10^{-5} / year takes place in active volcanic regions, and possibly there are high underground temperatures with their time variations. The newly developed volume strain meter is operable under a large strain of 10^{-5} and a time variation of ground temperature of 0.3°C. The strain meter sensor, designed so as to be installed in a drill hole, is composed of three units: the volume strain meter, the very high resolution thermometer using the same principle as the

volume strain meter and the diode thermometer, all three encased inside a pressure-proof cylinder. The amplification and control system is operated on the ground and has almost the same characteristics as the bore-hole type volume strain meter in operation for the purpose of earthquake prediction. The newly developed strain meter is called the Volcanological Volume Strain Meter. The resolution of ground temperature by the diode thermometer is $2/1000^{\circ}\text{C}$.

The performance of the strain-meter subjected to experiments in various temperatures and water-pressures conducted in the 100 m deep observation well of the Meteorological Research Institute showed satisfactory results for operation in volcanic regions.

In 1979, during the period of this research, there were two remarkable eruptions of Aso and of Ontake Volcanoes. The 1979 Aso Eruption was the one of the greatest of recent activities. The eruption caused victims near the crater and big damage to constructions around the crater. A large quantity of ashes was distributed over a wide area. The 1979 Ontake Eruption was the first event in the history of this volcano, an utterly unexpected one for this volcano where there had been no routine observation facilities.

The researches for both volcanic eruptions were conducted by the fund of the National Science and Technology Agency and the variations of thermal state in and near the active craters after the eruptions by air-borne infrared thermoscanners were investigated. The results of those investigations, which are reported in Chapter 2, are in brief as follows;

In the research on Aso Volcano, the relations between the state of volcanic activity and thermal activity were inspected by analyzing the observation results and the existing materials on thermal activities of this volcano. Through this analysis, it became clear that the thermal activity in 1980 was at a high level.

In the research on Ontake Volcano, the first thermal inspections of this volcano were done. Existence and locations of high-thermal anomalies were detected at eruption sites and on the upper slope of this volcano. The time variations of shape, state and intensity of the high-temperature areas from December, 1979 through March, 1980 were analyzed. Through this investigation, a technique of image analysis to process geographical corrections of infrared images by using visible MSS images was newly developed. Then, the distributions of ashfall areas etc. were also investigated and the results were used in assessing the state of volcanic activity of this volcano.

第1編 火山噴火現象監視に関する研究

第1章 リモートセンシングによる火山の表面現象の 定量的把握に関する研究*

1. 目 的

火山の噴煙は火山の活動度によって敏感に変化する。今まで噴煙が認められなかった火山から噴煙が出始めたり、白色の噴煙が紫色に変わったり、噴煙量が急に増加するような現象は火山活動が活発化した証拠であり、そのような異常噴煙の後で噴火が起きた例は古来少なくない。それゆえ、噴煙現象は火山活動監視上きわめて重要な観測種目である。

しかし、気象庁における噴煙観測の現状は、噴煙が見える位置に気象官署がある場合に限って、該当する官署またはその近くから目視による簡単な遠望観測が行われている程度である。観測の方法は、各火山についてあらかじめ作られた噴煙量階級図とその火山の噴煙の状況とを対照させながら、噴煙の色・量・高さ・流向・噴出位置などを毎日定時刻に測るものである。こうした観測方法は観測者の経験と勘にたよる所が多く、個人誤差も大きいし、火山の見えない官署では観測できないという欠点がある。また、噴煙の温度や噴煙中の火山ガスは火山活動と密接な関係があるにもかかわらず、その観測はこれまでほとんど手がつけられていなかった。

そこで本研究では噴煙観測を器械化することによって、これまでの遠望観測の精度を高めるとともに、噴煙の温度、火山ガスが測れ、かつ、火山の見えない官署でも観測できるようなシステムを開発した。また、この装置を用いて噴煙と火山活動との関係を研究した。

なお、日本には約70の活火山があり、気象庁はその中の活動的な17火山を指定して常時火山観測を行っている。これらの火山では最寄りの気象官署で地震計測を中心とした火山観測を実施しているが、官署から火山の要部が見えないため噴煙観測を行っていない火山が6火山もある(図1.1.1)。

2. 装置の概要

図1.1.2は上述の趣旨に沿って考案した火山噴煙の器械観測概念図である。

噴煙にあたる太陽光の反射や噴煙自身が発する放射エネルギーを可視光線、赤外線、紫外線の

* 田中康裕・古田美佐夫・澤田可洋・中禮正明・福井敬一：地震火山研究部

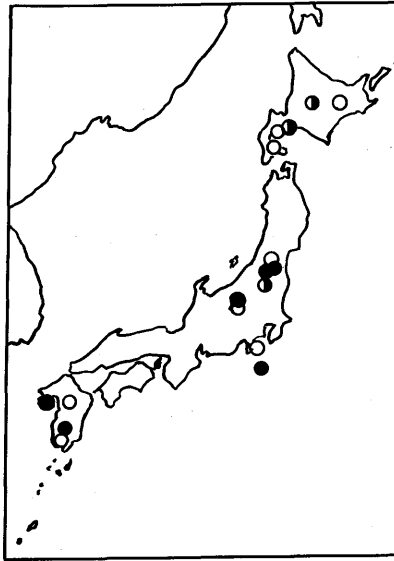


図1.1.1 気象庁の常時観測火山と観測指定官署からの遠望状況

- よく見える
- ◐ 遠望等に支障があるので観測所などを建てて別途観測
- 遠望不能

波長帯を使った検出器で常時自動観測し、噴煙の性質を解析しようというものである。このような観測手法は日本では勿論、世界でも初めての試みである。

このシステム全体の構成を図1.1.3に示す。可視光検知装置はテレビカメラを主体とした噴煙撮影部(VIS部)、噴煙記録部及び画像解析部とからなり、噴煙の色・量・高さ・形・噴出速度等を求める。赤外線検知装置は赤外映像カメラを主体とした温度検知部(IR部)、温度記録部及び温度解析部とからなり、噴煙の温度や夜間の噴煙の形状を観測する。また、噴煙撮影部の信号を温度解析部に入力することによって噴煙の色調や輝度が求まる。紫外線検知装置は相関スペクトロメーターを主体とした火山ガス検知部(UV部)と火山ガス記録部とからなり、噴煙中の SO_2 濃度を測る。

観測装置は阿蘇山へ設置した。それぞれの検出部(口絵写真9、写真1.1.1)は噴煙の良く見える位置に建てた無人小屋(写真1.1.2)内に置かれ、そこで撮影した映像を阿蘇山測候所の現業室へテレメーターした。観測はコントローラーの信号によって定時刻に自動的に行われるほか、必要な場合には任意の時刻にも手動で観測できる。噴煙の映像は現業室のモニターテレビに写し出されていると同時に記録器に収録される(口絵写真10、写真1.1.3)。なお、画像解析部と温度解析部(写真1.1.4)は気象研究所の火山実験室に置き、これを用いて阿蘇山から送られた噴煙資料を解析した。

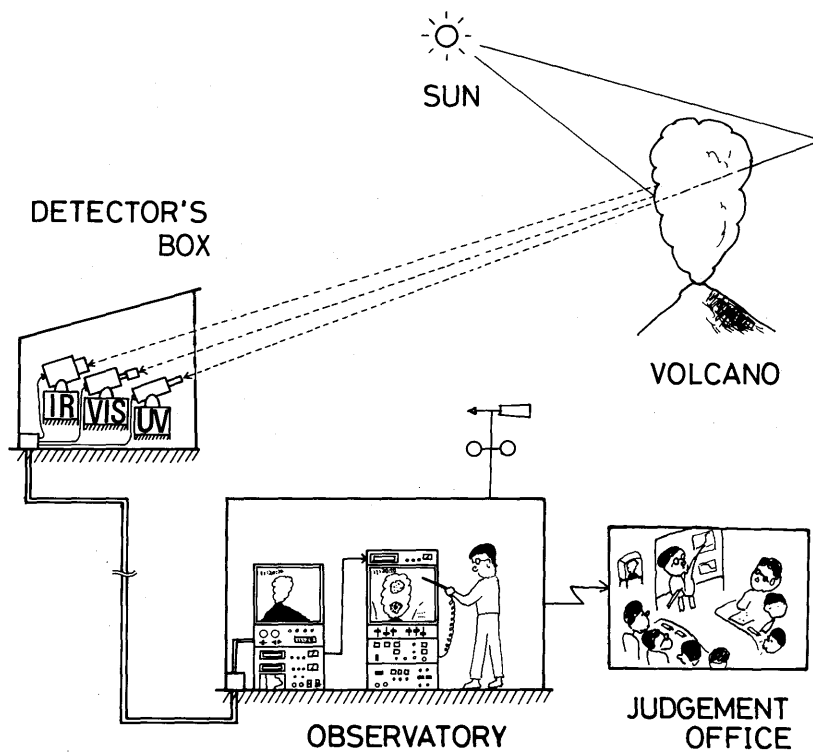


図1.1.2 火山噴煙監視システム概念図

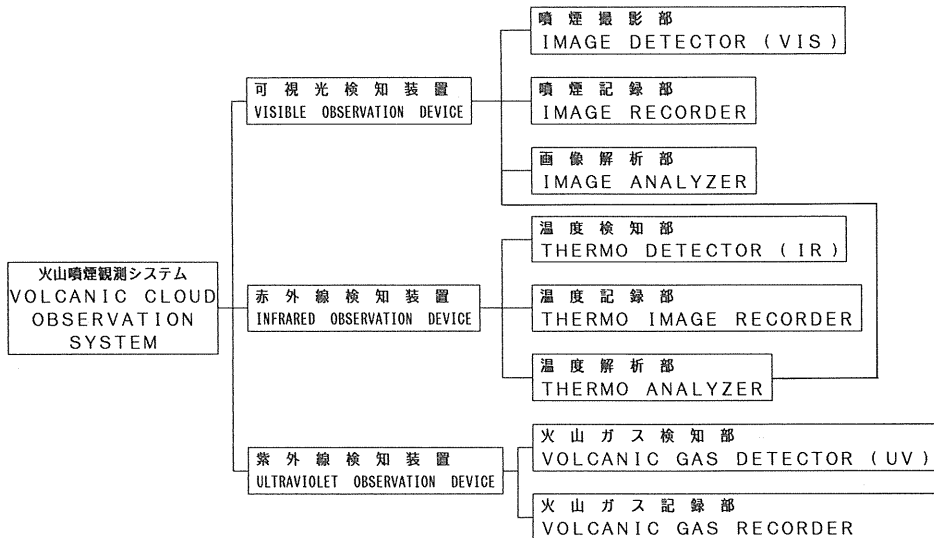


図1.1.3 火山噴煙観測システム

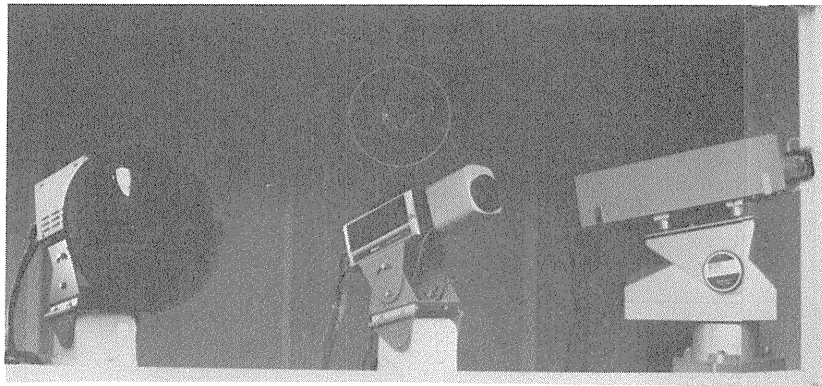


写真1.1.1 噴煙観測装置

左から、温度検知部、噴煙撮影部、火山ガス検知部

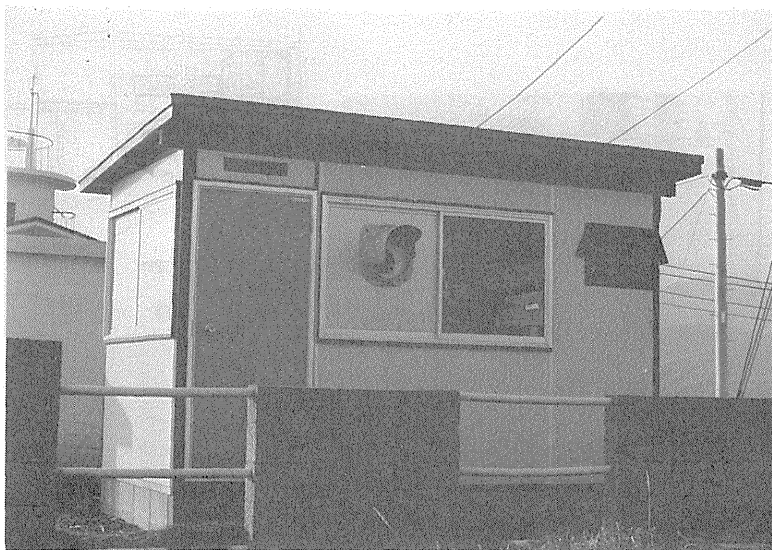


写真1.1.2 観測小屋



写真1.1.3 火山ガス記録部

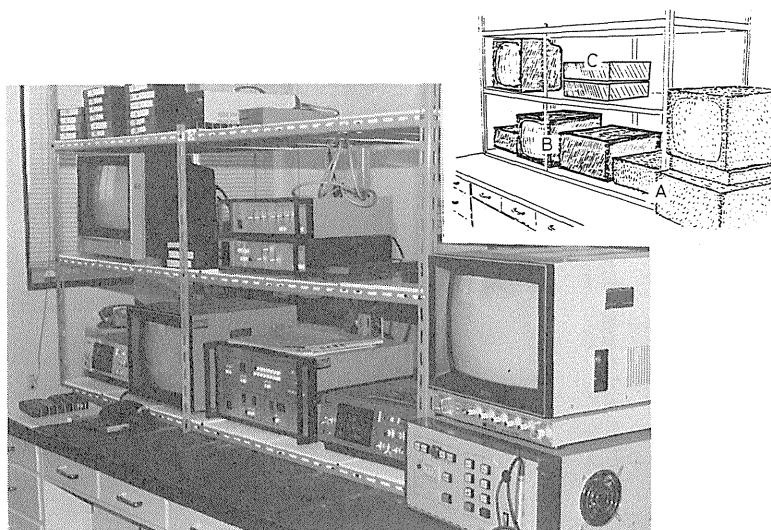


写真1.1.4 画像解析部(A)、温度解析部(B)、及び色調処理器(C)

3. 装置の選定と製作

3.1 可視光検知装置

3.1.1 噴煙撮影部

噴煙の動的形状を撮影するには、ムービーカメラにより映像をフィルムに収録する方法がある。これは古くから用いられてきた手法で、鮮明な画像が得られるのが長所である。しかし、毎日のルーチン観測となるとフィルムは莫大な量になり、その現像や解析処理、保管に苦慮することは明らかで、火山観測向きではない。また、近年は航空機や人工衛星に搭載するための精度のよいMSSカメラが開発されている。これは可視光線の波長帯を適当に分割して映像をテープに収録するようになっている。この方式はコンピューターにより詳細な画像解析を行えるという利点があるが、高速走査のため、毎日のルーチン観測では長大な磁気テープを累積させることになり、やはり火山観測には不向きである。

一方、近年のビデオ技術の急速な進歩によって、テレビカメラによる映像の撮影や再生は日常生活の中にも普及してきた。また映像の録画は小型のビデオカセットテープを使用でき、映像の入・出力も容易である。そこでこの技術を火山観測に応用することにした。

現在市販されているビデオの機種は非常に多いが、火山観測専用設計されたものは一つもない。そこで、既成の製品の中から、火山観測になるべく適したものを選び、それに改造を加えることにした。

ここでは、ビデオ装置の選定にあたって配慮した基本的事項とその理由について以下に記載する。

(1) 工業用（産業用）ビデオから選ぶ

ビデオ装置は、その用途から工業用ビデオと放送用ビデオの2つに分けられる。前者が後者と異なる特長を列挙すれば、次のとおりである。

- i カメラと受像機の間は、通常ケーブルによって接続される。
- ii カメラの調整は受像側から遠隔制御できるので、カメラマンを要しない。
- iii 構造が簡単で、調整箇所が少なく、据えつけ及び取扱いが容易である。
- iv 動作が安定確実で、長時間の連続使用に耐える。
- v カメラは一般に小形軽量で、人間の近寄りにくい場所にも設置できる。
- vi 被写体に対して特に明るい照明を加える必要がない。

(2) カラービデオである

噴煙の色を判別する必要があるのでカラービデオを選んだ。モノクロビデオの映像はカラーの場合と比べて、一般に画質がよいとされているが、その点は犠牲にせざるを得ない。

(3) カメラは単管式である

カラーテレビカメラは使用する撮像管の数により単管式、2管式、3管式に分類され、それぞれ対象物の色を光の3原色〔R（赤）、G（緑）、B（青）〕に分解する方式が異なる。また出力信号もR、G、Bを複合搬送するNTSCカラー信号方式と、それぞれを独立させたRGB信号方式とに大別される。色調の再現性や解像度などの画質は3管式カメラによるRGB方式が最も優れているが、単管式カラーカメラの解像度が近年向上してきたこと、および安価であることから単管式・NTSC信号方式のカメラを使用し、カラーデコーダーによってR、G、Bに分離させた上で画像を処理する方式をとった。

なお、カラーテレビカメラは通常人間の色感覚（明るさ、色相、彩度）に合わせてR（ $0.6\mu\text{m}$ 付近）、G（ $0.55\mu\text{m}$ 付近）、B（ $0.45\mu\text{m}$ 付近）各波長の組み合わせや信号変調を決めている。すなわち、明るさYの信号を E_Y 、R、G、B信号の大きさを E_R 、 E_G 、 E_B とした時、 $E_Y = 0.3E_R + 0.6E_G + 0.1E_B$ としている。色相、彩度は E_{R-Y} 、 E_{B-Y} の形に信号変換し、それぞれキャリア信号の振幅、位相に対応させている。したがってテレビ映像はGが最も明るくなる状態で表現される。

3.1.2 噴煙記録部

市販のカセットビデオにはVHS、 β 、U規格などがあり、録画方式が異なるとともにカセットテープの大きさも異なり互換性がない。本研究の噴煙観測においては、後述するように1巻のテープで少なくとも半月分の映像資料を収録する必要があり、このためには120分の収録時間が求められる。この点ではVHSおよび β 規格が適しているが、ここでは可視光の映像を温度解析部（4.2.3項、画像入力にはVHS規格のカセットビデオを使用）でも処理できるようにするため、VHS規

格に統一した。

3.1.3 画像解析部

気象庁の火山観測においては、噴煙は次の要素を観測するようにきめられている。すなわち、

〔色・量・高さ・幅・流れている方向、
噴出位置、その他気付いたこと〕

である。これらの要素はいずれも単純なものではないので、器械に自動的に判定させることは困難である。また、VTRの画質はフィルムやFMテープによるものと比べて、はるかに劣るので、ここでは、人間の判断を介入させることにした。すなわち、人間が画像を見て判別した噴煙現象に対して必要な入力を与えると計数処理がなされるというMan and Machineの処理方式を用いた。

画像解析部については適当な既成品がなかったので、医療関係の装置で使われている一部の技術を応用して新しい装置を開発した。

また、再生した映像のNTSC信号を、R、G、Bの各信号に分離し、それぞれの信号の強さを加減して組み合わせることにより画像の中から必要な部分を強調させて有意な画像資料を抽出させるための装置も開発した。このためには温度解析部を利用することとし、同解析部のオプションとして色調処理器と呼ぶ装置を製作した。

画像解析部で噴煙の高さ・幅・量を計測するには次のようにする。

まず、画面内の単位スケールを得るために、画面に写し出される地形のうち、既知の2地点間の距離を求め火口地点の平面上の長さに換算し、その値をブラウン管の画素数に置きかえて画像解析部に入力しておく。この値が火口からあがる噴煙の高さ・幅・量等を測るための基礎数値となる。

次に、ブラウン管に写し出された噴煙の高さ・幅・量（垂直断面積）について、その計測した部分にライトペンをあてる。長さに関しては測りたい2点にライトペンをあてるとその間の画素数が長さに換算されてブラウン管上に表示される。それを10m単位で読みとった。また、面積に関しては、測りたい画面の輪郭をライトペンで閉塞線で囲むと、その中にある画素数が面積に換算されてブラウン管上に表示されるのでそれを 10^2m^2 単位で読みとった。

3.2 赤外線検知装置

あらゆる物体は、その温度に対応した赤外線を外部のあらゆる方向に放射している。それは肉眼では見えないが特殊な半導体に感ずる。現在は赤外線を利用した多種類の温度観測機器が開発されているので、その中から火山観測に耐えられるようなものを選び、必要に応じた改造を加えて使用することにした。

赤外線映像装置の最も肝腎な所は赤外線検出機構である。例えば $8\sim 14\mu\text{m}$ 付近の遠赤外を検知するにはHgCdTeが、 $2\sim 5\mu\text{m}$ の赤外領域ではInSb素子が使われている。両者の検知器を使用

する際には低温で冷却させる必要があり、その方法として一般に液体窒素が用いられている。この方式の装置は温度分解能がよく、 0.1°C 程度まで測定できる。記録はFMテープに収録するのが普通である。

なお、 0°C 以上の黒体の中赤外領域における放射は遠赤外領域よりやや大きいので、その検出には有利であるが、反面、水蒸気による吸収や太陽光の散乱による影響が大きい。しかし、この性質を利用すれば、殆んど水蒸気からなる噴煙の形状は温度の情報も含めて中赤外域で観測するのが有利かも知れない。

一方、検知器に焦電素子を用いた装置もある。この原理は、赤外線吸収膜を蒸着した面状の焦電素子に赤外線を結像させ、赤外線の熱吸収で素子に生じた温度変化分布が焦電効果により表面電荷分布に変換されるのを、電子ビームで検出するものである。これは標準テレビ信号としてVTRに収録できる。焦電型方式による赤外映像装置を製作しているのは今の所松下技研一社しかなく、機種も限られていて、 $8\sim 14\mu\text{m}$ の波長帯が使われている。

この焦電型方式機器による温度分解能は、前述の冷却型方式よりはるかに劣るが、冷却装置を必要としないのが長所であり、毎日同じ観測を自動で繰り返すための装置としては焦電型方式が半導体素子を使った冷却方式より勝ると考えられる。そこで、自動観測用として設置する装置は焦電型方式を用いるが、その他に $2\sim 5.3\mu\text{m}$ の中赤外帯を使った液体窒素冷却方式の赤外線映像装置で時々噴煙を同時に観測し、噴煙と火口縁との温度差を比較するなど、自動観測の精度をチェックすることにした。

3.3 紫外線検知装置

気体はその種類によって特定の波長帯に吸収線を持っているので、ある気体の中を通過する光線は、その気体特有の吸収線の波長帯で減衰を生ずる。弱められる波長帯によってガスの種類がわかり、弱められる度合によってガスの濃度がわかる。 SO_2 はおよそ $290\sim 320\text{nm}$ の波長帯域において、約 2 nm 間隔で並ぶ吸収帯があり、このうち 300nm ($3000\text{ \AA}$) 付近が最大の吸収線である。

この原理を用い、リモートセンシングによって離れた所から太陽散乱光の中の吸収の程度を検出して気体中の SO_2 や NO_2 等を測定する装置がカナダのBarringer-Research社で開発された。装置名は相関スペクトロメーター (Correlation Spectrometer) と呼ばれ特許製品として世界各地へ輸出されている。日本にはこれに匹敵するような製品はまだない。

この装置を使って火口から噴出する噴煙中の SO_2 放出量を測定した例は既に多数あるが、これを自動的に観測した例はこれまで一つもない。本研究の目的は相関スペクトロメーターを加工し、 SO_2 濃度の自動観測ができるような装置を開発すること、及び自記記録を解析することによって、火山活動と火山ガスとの関係を求めることである。

4. 装置の構成と仕様

4.1 可視光検知装置

本装置は噴煙撮影部、噴煙記録部、画像解析部及び色調処理器（次節で述べる温度解析部の一部）からなっている。

4.1.1 噴煙撮影部

次の1)～5)の機器を接続して構成し、阿蘇山の観測小屋へ設置した。ブロックダイアグラムは図1.1.4のとおりである。各機器の仕様は次のとおり。

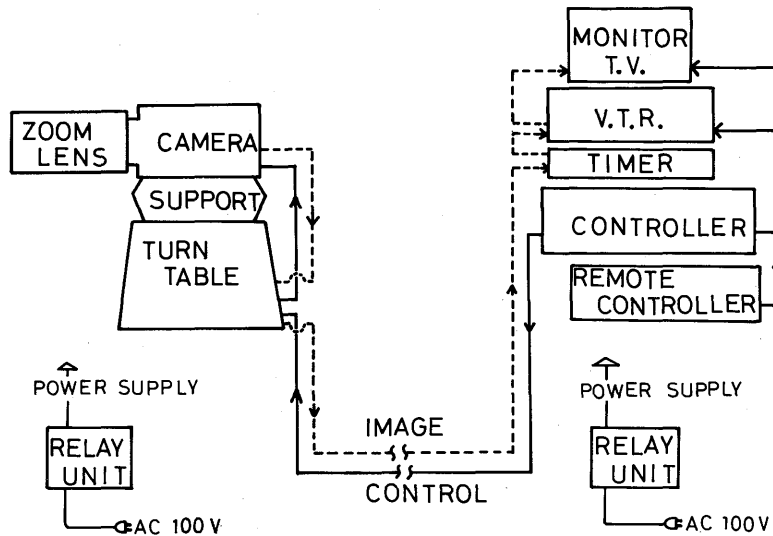


図1.1.4 噴煙撮影部（左側）と噴煙記録部（右側）のブロックダイアグラム

1) カラーテレビカメラ (CAMERA)

型 式 ナショナルWV-3600

撮 像 方 式 単一搬送周波数分離方式

撮 像 管 ストライプフィルター内蔵。1インチセパレートメッシュ静電集束ビジコン
S4089A

波 長 帯 域 人間の色感覚に対応 (3.1.1 参照)

走 査 方 式 525本、60フィールド、30フレーム。2:1インターレス

映 像 出 力 NTSCコンポジット信号。1.0V_{P-P}/75Ω、2出力

水 平 解 像 度 250本以上 (中心部)

S N 比 45dB以上

消 費 電 力 約8W

作 動 温 度 $0^{\circ}\text{C}\sim+40^{\circ}\text{C}$

寸 法 $104(\text{幅})\times 140(\text{高さ})\times 299(\text{奥行})\text{ mm}$

重 量 約 2.9kg (カメラ本体のみ)

2) テレビカメラ取付台 (SUPPORT)

型 式 ナショナル WV-7060

積 載 重 量 20kg 以下

可 変 角 度 水平： 45° 、垂直：上下ともに 45°

寸 法 $153.2(\text{幅})\times 150(\text{高さ})\times 180(\text{奥行})\text{ mm}$

重 量 約 3 kg

3) 電動ズームレンズ (ZOOM LENS)

型 式 キヤノン V10 $\times$ 15REA (DC)

焦 点 距 離 $15\sim 150\text{mm}$

最 大 口 径 比 $1:2.8$

ズ ー ム 比 10倍

E E 作 動 範 囲 F2.8 $\sim$ F362相当

包 括 角 度 15mm にて $45.4^{\circ}\times 34.8^{\circ}$ 、 150mm にて $4.9^{\circ}\times 3.7^{\circ}$

最短撮影距離 1.5m

最近接の撮像範囲 15mm にて $103\times 77\text{cm}$ 、 150mm にて $10.5\times 7.9\text{cm}$

操 作 方 式 ズーム、フォーカス各操作はコントロールボックスCC-7 Tによる直流モータードライブ。アイリスはEEアンプによる。

作 動 ス ピ ード ズーム：約 8秒 、フォーカス：約 10秒 、アイリス：約 3秒

作 動 温 度 $-5^{\circ}\text{C}\sim+50^{\circ}\text{C}$

寸 法 $100(\text{幅})\times 121(\text{高さ})\times 202(\text{奥行})\text{ mm}$

重 量 約 2 kg

4) 水平・垂直回転台 (TURN TABLE)

型 式 ナショナル WV-7260

電 源 入 力 AC24V50/60Hz

映 像 入 力 VS1.0V_{P-P}

電 源 出 力 AC24V50/60Hz：テレビカメラ、カメラハウジング用(直出し)。DC $\pm 6\text{V}$ ：
0.1Aズームレンズ用(直出し)。

映 像 出 力 VS1.0V_{P-P}。同軸ケーブル直取付

水平回転速度 50Hz：約 $6^{\circ}/\text{秒}$ 、60Hz：約 $7.2^{\circ}/\text{秒}$

垂直回転速度 50Hz：約 $3^{\circ}/\text{秒}$ 、60Hz：約 $3.6^{\circ}/\text{秒}$

水平回転角度 $10^{\circ}\sim 340^{\circ}$
 垂直回転角度 上： $0^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 、下： $0^{\circ}\sim 60^{\circ}$
 積 載 重 量 20kg以下
 消 費 電 力 最大50W
 作 動 温 度 $-20^{\circ}\text{C}\sim +50^{\circ}\text{C}$
 寸 法 208 (幅) $\times$ 295 (高さ) $\times$ 276 (奥行) mm
 重 量 約13kg

5) 電源制御器 (RELAY UNIT)

型 式 ナショナル WU-R40
 電 力 容 量 最大 800W
 電 流 容 量 最大 10A
 制 御 方 式 無電圧メーク接点制御により AC100V 断制御
 制 御 電 流 DC24V 60mA、一極性あり
 消 費 電 力 2.3W
 寸 法 パネル：163 (幅) $\times$ 115 (高さ) $\times$ 45 (奥行) mm
 筐 体：134 (幅) $\times$ 72 (高さ) $\times$ 40 (奥行) mm
 重 量 約0.6kg

4.1.2 噴煙記録部

次の1)～6)の機器を接続して構成し、阿蘇山測候所の現業室へ設置した。ブロックダイアグラ
 ムは噴煙撮影部とともに図1.1.4に示してある。各機器の仕様は次のとおり。

1) タイムデイトジェネレーター (TIMER)

型 式 ナショナルWJ-800
 電 池 寿 命 約10日間 (停電または電源切で連続使用時)
 映 像 入 力 $1.0\text{V}_{\text{P-P}}/75\Omega$ またはHi-Z (コンポジット信号) 1回路
 映 像 出 力 $1.0\text{V}_{\text{P-P}}/75\Omega$ (コンポジット信号) 1回路
 表 示 文 字 月一日一年、時：分：秒
 カ レ ン ダ ー 2099年までうるう年を含む完全自動繰上げ式
 表 示 配 列 横一列または横二列 (スイッチ切替)
 表 示 位 置 水平、垂直方向とも有効画面80%以内で任意可変
 文 字 寸 法 大 (36H)、小 (26H)、切替可 (走査線数にて)
 文 字 構 成 7セグメント構成
 文 字 縦 横 比 2：1
 時 刻 基準：使用電源周波数 (50Hzまたは60Hz)

精度：使用電源の周波数精度による

消費電力 最大13W

作動温度 $-10^{\circ}\text{C}\sim+50^{\circ}\text{C}$

作動湿度 90%以下

寸法 480 (幅)×44 (高さ)×251 (奥行) mm

重量 約4.1kg

2) プログラムコントローラー (CONTROLLER)

型式 ナショナルWZ-9000B

バックアップ電源 内蔵バッテリーまたは外部DC24V

内蔵バッテリー 密閉型ニッカド蓄電池7.1V 1.5AH

0 $\sim$ 30 $^{\circ}\text{C}$ で48時間バックアップ可能

プログラム数 100ステップ (メモリー増設による)

プログラム内容 曜日、時、分、秒、制御時間、出力番号

コントロール時間 1 $\sim$ 63秒または1 $\sim$ 63分及び起動・停止

出力回路 16回路 (無電圧メイク接点)、自動・手動切替可能

接点容量 DC24V0.1A以下

時計入力 別売の水晶発振器 (WU-Z100B) または1 Hzの24V正の矩形パルス

時刻設定 時刻合わせスイッチ及びキーボードによる

表示部 発光ダイオード及び数字表示器

消費電力 約70W

寸法 480 (幅)×221 (高さ)×275 (奥行) mm

重量 約12kg (バッテリー、水晶発振器を含む)

3) ビデオテープレコーダー (VTR)

型式 ナショナル NV-8200

録画方式 回転2ヘッドアジマス記録VHS規格

テープ速度 33.35mm/秒 (通常時)

使用テープ 12.7mm (1/2インチ) 幅高密度ビデオテープ

録画時間 120分

早送り時間 4分30秒以内 (NV-T120E)

巻戻し時間 4分30秒以内 (NV-T120E)

テレビジョン方式 日米標準テレビジョン方式、525本、60フィールド

変調方式 輝度信号周波数変調方式、色信号低域変換、 $\pi/2$ 移相

入力 1.0V_{P-P} 75 Ω 不平衡

出力 $1.0V_{P-P}$ 75Ω 不平衡
 水平解像度 白黒300本以上、カラー240本以上
 映像 S / N 45dB以上
 音声 S / N 40dB以上
 消費電力 50W
 寸法 382 (幅) $\times$ 156 (高さ) $\times$ 382 (奥行) mm
 重量 約15.5kg

4) モニターカラーテレビ (MONITOR T.V.)

型式 ナショナル TM-140TN
 使用ブラウン管 14型90度偏向
 ブラウン管の大きさ 画面有効高さ 211mm、画面有効幅 281mm
 接続端子 映像入出力端子 $1V_{P-P}75\Omega$ 、テレビ出力端子 (映像) $1V_{P-P}75\Omega$
 消費電力 64W
 寸法 380 (幅) $\times$ 355 (高さ) $\times$ 391 (奥行) mm
 重量 12.6kg

5) リモートコントロールユニット (REMOTE CONTROLLER)

型式 ナショナル WV-7460
 回転台動作 LEFT/RIGHT/UP/DOWN、メイク接点各1回路
 テレビカメラ電源 ON/OFF メイク接点 1回路
 電動ズームレンズ動作 WIDE/TELE/FAR/NEAR/OPEN/CLOSEメイク接点各1回路
 寸法 210 (幅) $\times$ 95 (高さ) $\times$ 179 (奥行) mm (ゴム足高さ 7mm含む)
 重量 約1.6kg

6) 電源制御器 (RELAY UNIT)

噴煙撮影部で使用しているものと同一規格品。

4.1.3 画像解析部

次の1)～4)の機器が接続されている。ブロックダイアグラムは図1.1.5のとおりである。

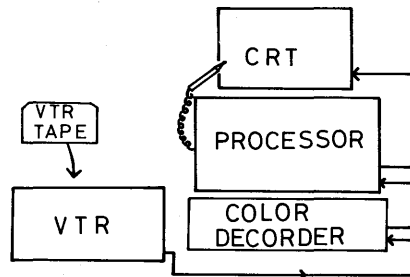


図1.1.5 画像解析部のブロックダイアグラム

1) ビデオテープレコーダー (VTR)

噴煙撮影部のものと同一規格品 (ナショナルNV-8200) を使用。

2) 画像解析器 (PROCESSOR)

型 式 池上通信VIP-11S (処理装置部カラーディスプレイ、カラーデコーダーで構成)

総合性能 NTSC信号を入力とし、カラーディスプレイ上で、ライトペンとの対話方式により噴煙の面積、距離 (幅、高さ)、移動速度を計測する。計測の基準となるスケールは1画素あたりの寸法 (基準値) を入力。本研究では火口と観測小屋との距離の関係により基準値は3.7m/画素とした。

映像入出力信号 NTSC VBS 1.0V_{P-P} またはVB 0.7V_{P-P}/75Ω

同期入力信号 EIA標準1V_{P-P} 負極性

同期出力信号 4V_{P-P} 負極性

計測画素数 288 (横) × 224 (縦) ドット

消費電力 約200W

作動温度 0°C ~ +40°C

寸 法 425 (幅) × 199 (高さ) × 500 (奥行) mm

重 量 28kg

機 能 入力映像、ライトペン画。計測結果を数値表示

計測項目 面積 (m²単位)、距離 (m単位) を指数表示

面積計測 画素数 × (基準値)² を有効数字3桁で表示。

噴煙の輪郭をループで囲むと、そのループ内の面積が表示される (ループを閉じない場合やループがクロスする場合の計測はできない)。

距離計測 カラーディスプレイ上でライトペンにより指定した2点 (座標 (X_A, Y_A), (X_B, Y_B)) 間の距離を $\{(X_A - X_B)^2 + (Y_A - Y_B)^2\}^{1/2} \times \text{基準値}$ によって計測。

3) カラーデコーダー (COLOR DECORDER)

型 式 池上通信 ICD-702N

機 能 NTSC方式カラー信号を、R、G、Bの各色信号及び同期信号に復調。ディスプレイ上の色調、輝度調整。

映像入力 NTSC方式VB 0.7V_{P-P} またはVBS 1V_{P-P}。映像正極性

信号出力 R、G、B各色信号及び同期信号一系統。R、G、B 0.7V_{P-P}、同期信号 1V_{P-P}

消費電力 約15W

作 動 温 度 $-5^{\circ}\text{C}\sim+40^{\circ}\text{C}$

寸 法 370 (幅) $\times$ 49 (高さ) $\times$ 365 (奥行) mm

重 量 約 5 kg

4) カラーディスプレイ (CRT)

型 式 池上通信 CDM-141-C

映 像 入 力 R、G、B各 $1.0\text{V}_{\text{P-P}}$ 正極性 75Ω

走 査 周 波 数 水平 15.734 KHz、垂直 59.94Hz

最大有効画面 14インチ、280 (横) $\times$ 210 (縦) mm

消 費 電 力 200W以下

作 動 温 度 $-5^{\circ}\text{C}\sim+40^{\circ}\text{C}$

寸 法 370 (幅) $\times$ 290 (高さ) $\times$ 420 (奥行) mm

重 量 30kg

4.1.4 色調処理器

ブロックダイアグラムは、4.2節 (赤外線検知装置) の中で示す。

総 合 機 能 本装置は後述する赤外画像処理装置と合わせて使用するものでNTSC方式映像入力をR、G、B各色信号に分離し、それぞれのレベルの強弱を独立に調整できる。これにより映像中の噴煙の輝度、色相、彩度を強調し、周辺から噴煙の信号を取り出し画素数計測等の解析を行う。

型 式 松下技研 イメージセクターA及びBで構成

入 力 信 号 NTSC信号

出 力 信 号 標準TV信号

信 号 調 整 R、G、B各色信号連続可変

消 費 電 力 約25W

作 動 温 度 $0^{\circ}\text{C}\sim+40^{\circ}\text{C}$

寸 法 350 (幅) $\times$ 220 (高さ) $\times$ 355 (奥行) mm

重 量 約14kg

4.2 赤外線検知装置

本装置は温度検知部、温度記録部及び温度解析部とからなる。

また、噴煙温度の細部を調べるため、この装置とは別に赤外線映像装置 (サーモトレーサ) を整備した。

これらの機能及び仕様は次のとおりである。

4.2.1 温度検知部

次の1)~5)の機器を接続して構成し、阿蘇山測候所構内の観測小屋へ設置した。これらの機器

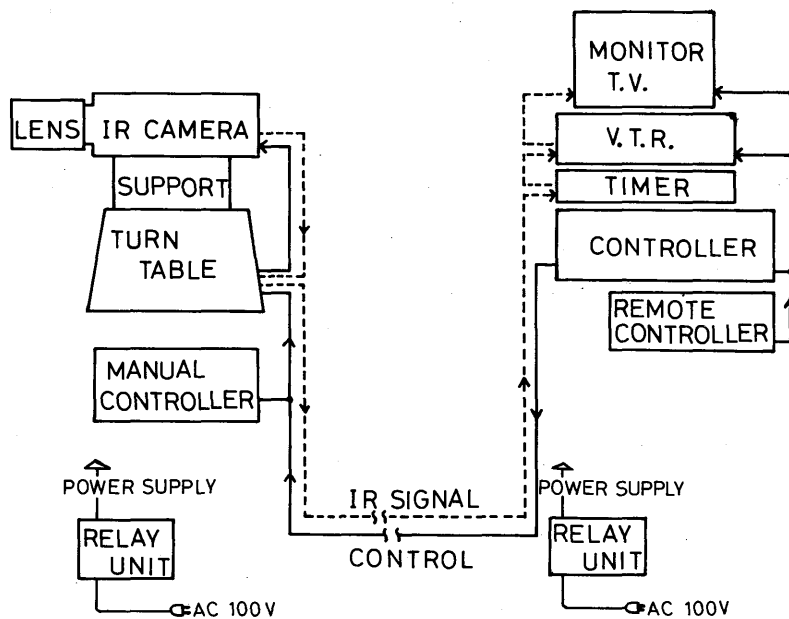


図1.1.6 温度検知部（左側）と温度記録部（右側）のブロックダイアグラム

のうち、3)～5)は噴煙撮影部のものと同一規格品を使用した。ブロックダイアグラムは図1.1.6のとおりである。

1) 赤外線検知カメラ (IR CAMERAとLENS)

型 式 松下技研 パナサーモカメラ MG-IR15

撮 像 管 1インチ焦電型ビジコン

赤外線レンズ 松下技研PANAKRON、ゲルマニウム、75mmF0.7、視野角12°(～210mrad)

波 長 帯 域 8～14 μ m

測 定 距 離 2m～ ∞

温 度 分 解 能 1°C以下(常温物体を計測の場合)

角 度 分 解 能 6 mrad以下/1°C

温度測定範囲 外部チョッパ温度 $\pm 16^\circ/1^\circ\text{CSTEP}$

外部チョッパ温度 $\pm 32^\circ/2^\circ\text{CSTEP}$

出 力 信 号 標準TV方式

出力インピーダンス 75 Ω (M型コネクタ)

走 査 方 式 525本/60フィールド、インターレス

入射光路遮断 シャッター内蔵

消 費 電 力 75W

作 動 温 度 0～+40°C

寸法(レンズを除く) 132(幅)×157(高さ)×292(奥行) mm

重 量 3.3kg(本体), 2.3kg(レンズ)

2) リレー制御器 (MANUAL CONTROLLER)

機 能 温度記録部からの制御信号をリレー制御し、水平垂直回転台および赤外線検知カメラの作動を手動に切り替える。

寸 法 220(幅)×195(高さ) 320(奥行) mm

重 量 6.1kg

3) カメラ取付台 (SUPPORT)

4) 水平垂直回転台 (TURN TABLE)

5) 電源制御器 (RELAY UNIT)

4.2.2 温度記録部

次の1)～6)の機器を接続して構成し、阿蘇山測候所の現業室へ設置した。ブロックダイアグラムは温度検知部とともに図1.1.6に示してある。各機器の規格または機能は、プログラムコントローラーを除き、噴煙記録部で使用したものと同一規格品である。

1) プログラムコントローラー (CONTROLLER)

型 式 ナショナル WZ-635

停 電 補 償 約100時間 (25°C)

プログラム数 120ステップ (メモリー増設による)

プログラム内容 曜日・時・分・秒・連続時間・出力番号

コントロール時間 1～99秒間または1～99分間または接・断の指定

精 度 月差±5秒以内 (25°C)

消 費 電 力 約12W

寸 法 420(幅)×90(高さ)×190.5(奥行) mm

2) タイムデイトジェネレーター (TIMER)

3) ビデオテープレコーダー (VTR)

4) モニターカラーテレビ (MONITOR TV)

5) リモートコントロールユニット (REMOTE CONTROLLER)

6) 電源制御器 (RELAY UNIT)

4.2.3 温度解析部

次の1)～4)の機器を接続して使用する。また、可視光で撮影した映像は1)～5)の機器を接続することにより噴煙の色調を調べることができる。

ブロックダイアグラムを図1.1.7に示す。

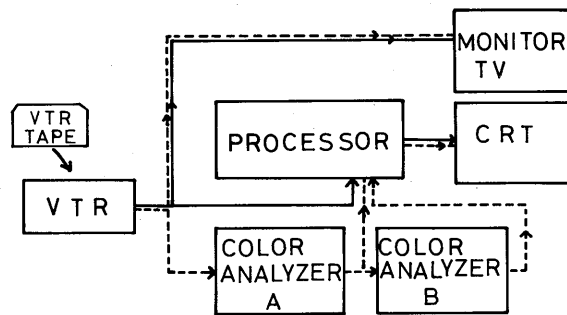


図1.1.7 温度解析部のブロックダイアグラム

1) ビデオテープレコーダー (VTR)

噴煙撮影部のものと同一規格品 (ナショナル NV-8200)。

2) 画像処理部 (PROCESSOR)

型 式 松下技研パナサーモMG-IR23

入 力 信 号 (複合映像信号)

映像信号：0.7V_{P-P}正極性、同期信号：0.3V_{P-P}負極性、入力インピーダンス：75Ω

出 力 信 号 R、G、B映像信号：各1.0V_{P-P}正極性、同期信号：1.0V_{P-P}負極性、出力インピーダンス：75Ω

画 素 数 256×256、128×128 (拡大表示時)

温 度 分 解 能 1°C (外部チョッパ3.75Hz)

等 温 表 示 任意の温度帯を選択表示

表 示 色 カラー16色、白黒64階調 (グレースケール16階調)

電 源 AC100V±10% 50/60Hz

消 費 電 力 200W以下

作 動 温 度 0～+40°C

寸 法 436 (幅)×226 (高さ)×440 (奥行) mm

重 量 約20kg

3) カラーディスプレイ (CRT)

型 式 松下技研MG-IR61

電 源 AC100V 50/60Hz

ブラウン管の大きさ 205 (縦)×275 (横) mm

寸 法 365 (幅)×300 (高さ)×420 (奥行) mm

重 量 30kg

4) モニターテレビ (MONITOR TV)

機能 赤外映像記録へ時刻を表示。また、可視光映像を解析する際に表示させる。
規格 噴煙撮影部のものと同一。

5) 色調処理器 (COLOR ANALYZER A及びB)

4.1.4 参照

4.2.4 赤外線映像装置 (写真1.1.5)

次の1)～5)を接続して使用する。ブロックダイアグラムを図1.1.8に示す。

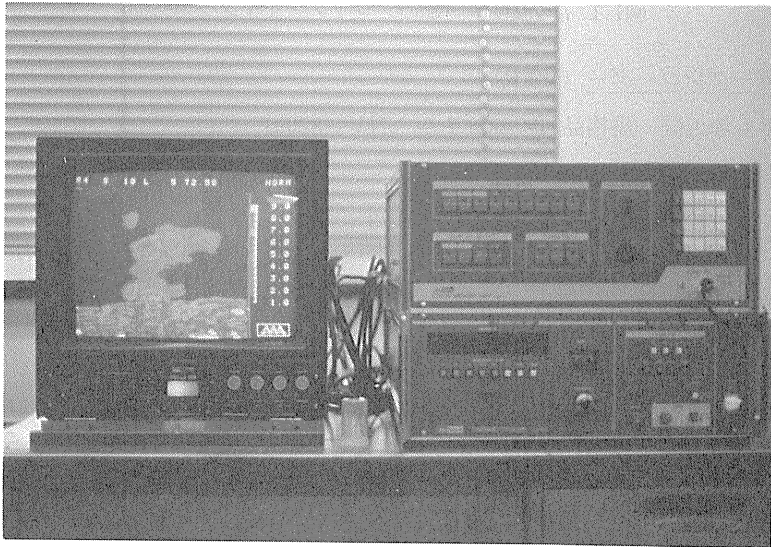


写真1.1.5 赤外線映像装置 (カメラ部とデータレコーダーを除く)

左：カラーディスプレイ
右上：カラーメモリー
右下：コントロール部

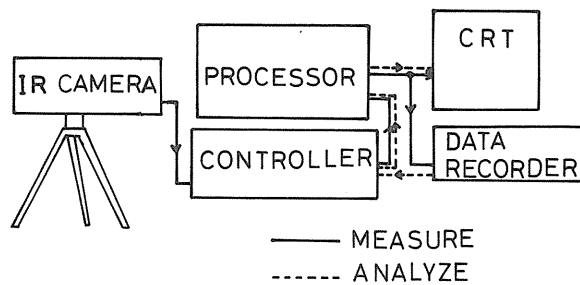


図1.1.8 赤外線映像装置のブロックダイアグラム

- 1) カメラ部 (6 T08A) (IR CAMERA)
- 2) コントロール部 (UNIT6T08A) (CONTROLLER)
- 3) カラーメモリー (静止画像表示装置UNIT1511) (PROCESSOR)
- 4) カラーディスプレイ (UNIT2333) (CRT)
- 5) データレコーダー (TEAC R-80) (DATA RECORDER)

なお、1)～5)を総合した特性は次のとおりである。

型 式 三栄測器 サーモトレーサー 6 T08A

温度測定範囲 0～1000°C (4レンジ)

温度分解能 0.2°C (30°C黒体に対して)

感 度 1、2、3、5、7°C×1,×10,×100

中心温度レベル 0～999°C

放射率補正 0.10～1.00連続

使用赤外線波長 2～5.3μm

検 出 器 InSb (液体窒素冷却)、約4.5時間ホールド

瞬間視野角 2 mrad

走査視野角 30° (水平)×25° (垂直)

ズーム機能 光学的に1～5倍連続

焦点範囲 15cm～∞

水平ミラー走査周波数 75Hz

フレーム時間 1.2秒～51分 (12段切替)

走査線数 1.2秒 96本、2.5秒 192本、5秒以上 384本

画像メモリー 512×512×6 bitにて静止画。

オーバーレイメモリー 512×256×1 bit

表 示 R、G、B方式 14インチカラーブラウン管

8色カラー、16色カラー、白黒64階調、白黒反転 (64階調) で切替

表示モード 8本偏光変調表示+画像表示、カラー1本等温度帯表示、偏光変調 (64本)、
白黒8段等温、1本等温線、1本等温線+白黒画像、4本等温線、4本等温
線+白黒画像で表示。なお、カーソル表示にて水平・垂直温度波形表示及び
クロスポイント温度表示。レンジ、感度、中心温度レベル、フレーム時間、
放射率、表示モードをCRT上に表示。

消費電力 約140W

作動温度 0°C～+40°C

寸 法 検出部160 (幅)×155 (高さ)×316 (奥行) mm

本体426(幅)×323(高さ)×520(奥行)mm

重量 検出部約7.5kg、本体約32.5kg

4.3 紫外線検知装置

本装置は火山ガス検知部と火山ガス記録部で構成されている。このうち、前者は阿蘇山の観測小屋に、後者は阿蘇山測候所の現業室に設置した。ブロックダイアグラムは図1.1.9のとおりである。

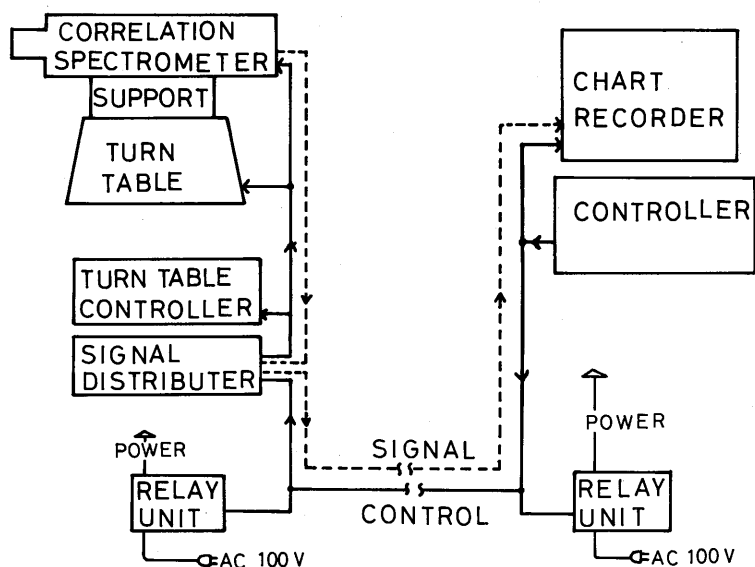


図1.1.9 紫外線検知装置の火山ガス検知部(左側)と火山ガス記録部(右側)のブロックダイアグラム

4.3.1 火山ガス検知部

1) 相関スペクトロメーター (CORRELATION SPECTROMETER)

型	式	相関スペクトロメーター (COSPEC V、カナダBarringer Research社製)
採	光	部 カセグレン望遠鏡、検定用内部光源付
分	光	部 Ebert—Fastieスペクトロメーター (焦点距離250mm、F5.6) スリットからの入射光を回折して後述のCorrelation Discへ導く
検	出	部 Correlation Disc、光電増幅管などで構成。スリットのあるCorrelation Disc (アルミコート石英製)が50Hzで回転して回折されたスペクトルをチョッピングし、光電増幅管へ導く。
検	定	用 セ ル 既知濃度のSO ₂ ガスが封入された石英ガラス製セル。モーターで光路へ自動

挿入され、検定に使用する。

測定対象ガス SO_2
 測定方式 自然光光源の相関測定法
 視野 $10\text{mrad} \times 30\text{mrad}$
 測定領域 $1 \sim 1000\text{ppm-m}$
 電源 AC100V 60HZ. または、24VDC作動
 S / N 0.5ppm-m
 応答 $1 \sim 32\text{秒}$ (5段切替)
 標準ガス濃度 高濃度 920ppm-m 、低濃度 130ppm-m
 出力 $0 \sim 10\text{V}$
 消費電力 23W
 作動温度 $0^\circ\text{C} \sim +50^\circ\text{C}$
 寸法 275 (幅) $\times 222$ (高さ) 785 (奥行) mm
 重量 約 20kg

2) 電動施回台 (SUPPORTとTURN TABLE)

型式 ミカミ製 PTH-V-S8
 水平施回角度 最大 340° (左、右 170°)、速度 $0.05^\circ \sim 0.8^\circ/\text{秒}$ から選定
 垂直施回角度 最大 80° (上向 20° 、下向 60°)、速度 水平施回に同じ
 消費電力 30W
 寸法 282 (幅) $\times 538$ (高さ) $\times 420$ (奥行) mm
 重量 40kg

3) 回転台制御器 (TURN TABLE CONTROLLER)

機能 相関スペクトロメーターによる自動測定の際の水平、垂直方向の測定視野範囲、および回転移動速度を調整。また、手動によって任意の方向の測定をするために電動施回台を作動させる。
 寸法 420 (幅) $\times 99$ (高さ) $\times 350$ (奥行) mm
 重量 約 15kg

4) シグナルディストリビューター (SIGNAL DISTRIBUTER)

機能 火山ガス記録部からの制御信号を分配する。また手動測定、自動測定の切替えを行い、手動測定時に1)～3)へ電源を供給する。
 寸法 420 (幅) $\times 145$ (高さ) $\times 350$ (奥行) mm
 重量 約 20kg

5) リレーボックス (同RELAY UNIT)

火山ガス記録部からの制御信号により各部に電源を供給。

4.3.2 火山ガス記録部

次の1)~3)の機器を接続して構成されており、阿蘇山測候所の現業室へ設置した。各機器の様子は次のとおり。

1) リレーボックス (RELAY UNIT)

火山ガス検知部と同一規格品。

2) プログラムコントローラー (CONTROLLER)

温度記録部と同一規格品。

3) 記録計 (CHART RECORDER)

型 式 理化電機製RO-102

ペ ン 数 2

動 作 方 式 DCサーボ方式

精 度 フルスケールの $\pm 0.25\%$

感 度 フルスケールの $\pm 0.1\%$

入 力 フローティング・ガード方式

ペンスピード 1600mm/sec. 動特性 $0 \sim 1.8\text{Hz} \sim 0.36\text{db}$

ペ ン ファイバーペン

ペンギャップ 3mm

ペ ン 上 げ 手動、全ペン同時

記 録 紙 有効幅250mm、長さ15m、折りたたみ

電 源 AC100V 50/60Hz (115V、230Vも可)

消 費 電 力 最大 $4\text{W} + 9\text{W} \times \text{ペン数}$

寸 法 484 (幅) $\times$ 310 (高さ) $\times$ 310 (奥行) mm

重 量 約20kg

5. 観測小屋とモニター室 (写真1.1.1、写真1.1.2)

火山観測のために、噴煙観測装置を野外へ設置するには、機器を風雨、塵埃、火山ガス等から保護する必要がある。そのためには機器自体を保護ケース (ハウジング) に入れて火山の見える位置に設置するか、火山の見える場所に小屋を建てて、その中に機器を設置するかのどちらかを選ばねばならない。

ところで、この噴煙観測装置の感部——噴煙撮影部、温度検知部、火山ガス検知部——は、観測の際、回転運動をさせるようになっており、その他の機器にも、可動部分が多いので、ハウジングを作るとしたら、かなり大がかりなものになる。一方、小屋の中に機器を設置するならば、

観測者が機器を調整したり、風雨をしのぐためにも都合がよい。このような理由で、本研究においては機器の保護のためには小さな小屋（観測小屋）を火山のよく見える場所に建てることにした。

観測小屋は阿蘇山測候所の敷地内の最も山寄りの空地に、市販のプレハブ小屋を建てた。ここから中岳第1火口までは1.2km離れており、小屋と火口との間に障害物がなくて噴煙はよく見える。火口縁と小屋との高度差は約120m、小屋から見た第1火口の方法は北から時計回りに65°(N 65°E)である。

小屋の大きさは床面が3.6m×2.7m、地表から屋根までの高さが2.6mである。

建物の位置、内部に配置した装置、ケーブル路線の見取図等を図1.1.10、図1.1.11に示す。ケー

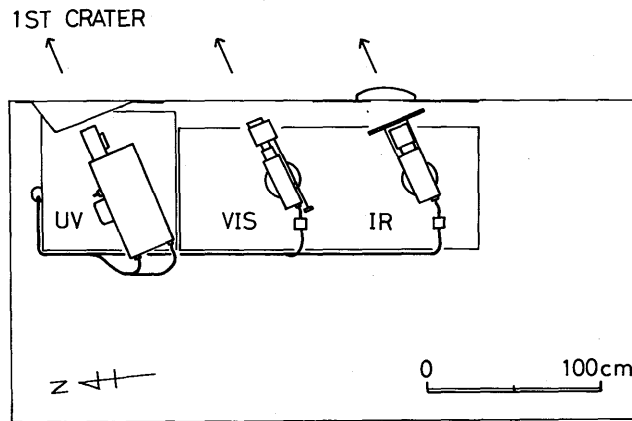


図1.1.10 観測小屋内の機器配置状況

UV：火山ガス検知部、VIS：噴煙撮影部、IR：温度検知部

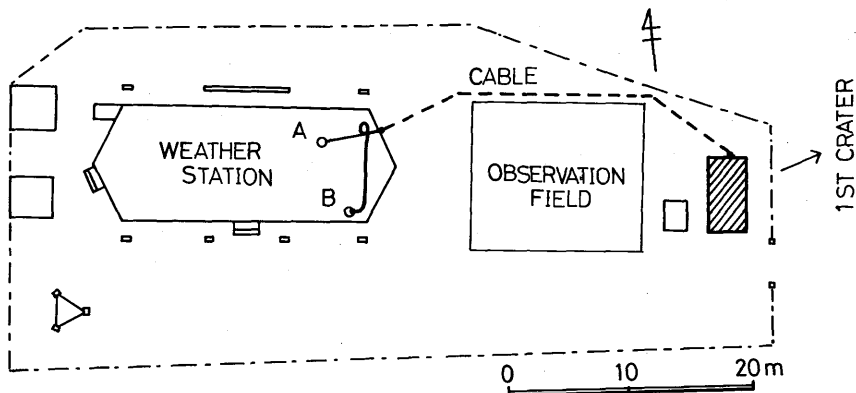


図1.1.11 観測小屋（斜線部）の位置とケーブル路線

ブル路線には直径5cmの塩化ビニール管を地下約30cmの深さに埋設し、その中に可視、赤外、紫外の3つの装置に必要な3系統のケーブルを通した。

この小屋は、噴煙をあげている中岳第1火口に対しておよそ25°東を向いているため、噴煙から放射される電磁波は、窓を斜めに通って入射する。このことは窓の面積が約1割も狭くなったのと同じことであり、観測の効率を悪くする。そこで、一部の窓については火口に向く窓枠を特製して取り付け、観測の効率をあげた。

また、電磁波は、その波長によって透過しなかったり、強度を著しく減衰させる物質がある。そこで、窓の材質として、可視光線用には普通のガラスを、赤外線用にはポリエチレンフィルム（厚さ70 μ m、直径160mm、透過率約90%、円形アルミ製フレーム枠に取り付ける）を、また、紫外線用には上質の石英ガラス（厚さ3mm、300（縦） $\times$ 400（横）mm、透過率約90%、昭栄商事製）を使用した。

観測のモニターは阿蘇山測候所の現業室で行った。ここには、ラックが設置してあり、その中にモニターテレビ、VTR、タイムデイトジェネレーター、コントロールユニット、プログラムコントローラー等が組み込んである。また、別のラックには、紫外線検知装置用の記録計、プログラムコントローラー等が組み込んである。

観測の初期のころ観測窓への結露に気付き、これを除去するため、1982年3月以降は小屋内に除湿器と扇風器を取り付け、湿度70%を検出すると自動的に作動するようにした。これは結露防止に効果があった。

各検知装置は、冬期間気温が0℃以下に低下しても作動した。しかし、機器数が年々増えるにしたがって電力の消費量が増えたため、電圧が低下して映像信号が不安定になった。そこで、1982～83年には、観測小屋及び現業室の機器に定電圧装置を使用した。

6. 自動観測と問題点

6.1 観測視野及び観測時刻の制約

図1.1.12は観測小屋から中岳火口縁方向を見た図である。上の図には各観測装置による水平観測視野が、下の図には垂直観測視野が示してある。

可視光による噴煙撮影部の視野は図中のVISと記した範囲で、第1火口の中心を含む火口列方向の幅約800m、高さ約700mである。赤外線による温度検知部の視野は図中のIRと記した直径約200mの円形内である。また、紫外線による火山ガス検知部の視野は図中のUVと記した水平方向約700m、垂直方向約500mの2つの帯上を走査するようにしてある。

なお、測候所は第1火口の西南西方向にあるため、季節及び時刻によっては太陽が視野内に入り、検出素子を破損するおそれがあるので、そのような時刻の観測は避けることにした。

図1.1.13は観測小屋（O）における立春（2月4日）、春分（3月21日）、立夏（5月6日）、夏

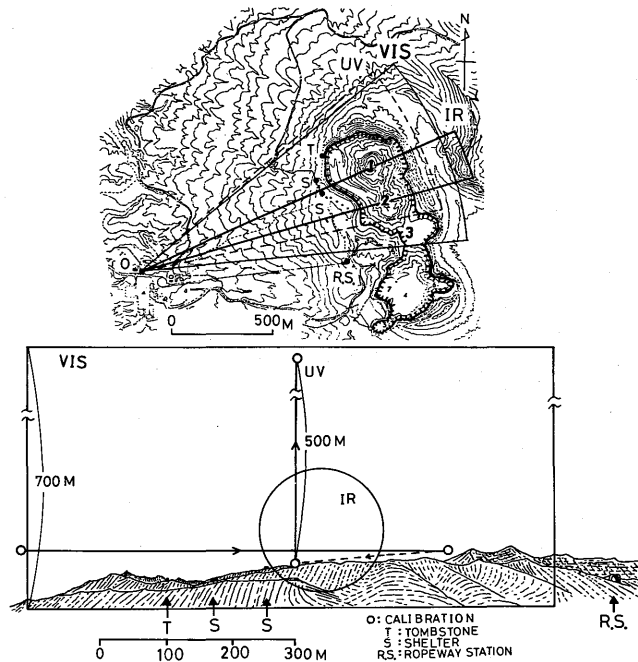


図1.1.12 観測小屋から中岳火口方向を望んだ各検知装置の水平（上）および垂直（下）観測視野。なお、下図のスケールは中岳の第1、第2、第3火口を結ぶ線上の縮尺である。

至（6月22日）、立秋（8月8日）、秋分（9月23日）、立冬（11月8日）、冬至（12月4日）の日の出から09時までの太陽方位を、各観測装置の観測視野とともに示したものである。資料は理科年表（昭和57年版）によった。

立春から立秋のうち、とくに夏至の前後には日の出から08時ころまでは太陽の直射が可視光の観測視野内に入ることがこの図からわかる。

一方、観測小屋(O)から火口方向に $N60^{\circ}E$ 、 $N70^{\circ}E$ 、 $N80^{\circ}E$ 、 $N90^{\circ}E$ をとった地形プロファイル（図1.1.14）を見ると、立夏、夏至、立秋ころには太陽光の観測視野内への直射は避けられない。このため、観測時刻は09時以降に限定した。

6.2 観測小屋の窓

第5節で述べたように、観測小屋の窓の材質として、可視光線用には普通のガラスを、赤外線用にはポリエチレンフィルムを、紫外線用には石英ガラスを用いた。このうち、ポリエチレンフィルムは外面が直射日光、降雨、埃、温度変化等にさらされるため赤外線透過率の低下が懸念された。そこで使用期間の異なるポリエチレンフィルムの赤外線透過率の違いを求めた。図1.1.15はアメリカNICOLET社製NICOLET-FT-IR7199型赤外分光光度計（気象研究所応用気象研究部所

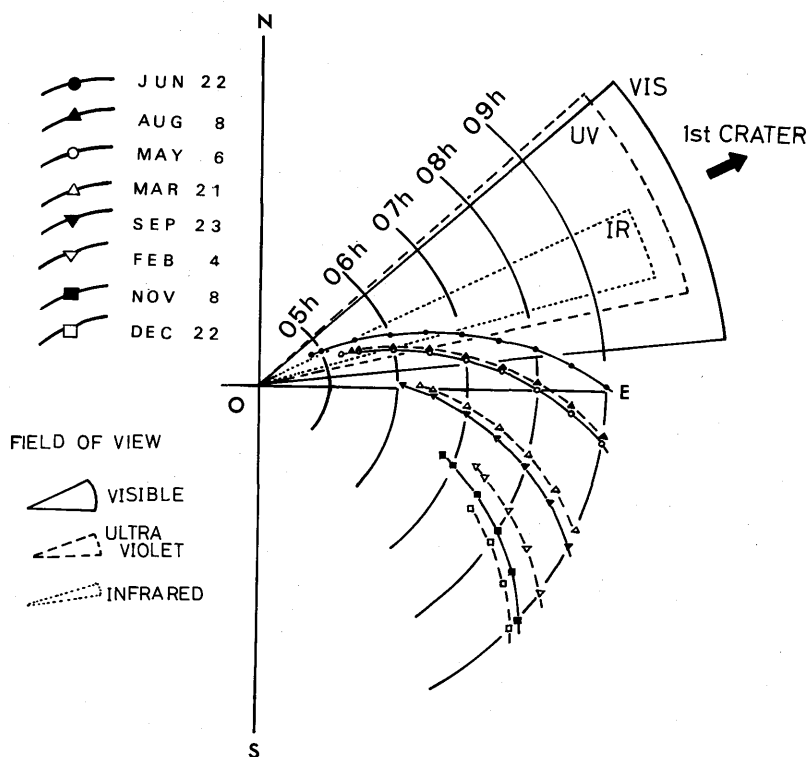


図1.1.13 時期別の日の出から09時までの太陽方位

有) で測ったポリエチレンフィルムの平均赤外透過率である。図に示した $8 \sim 14 \mu\text{m}$ の範囲では、未使用フィルム (A) で平均透過率が約90%、B (1ヶ月使用) と付したフィルムでは約3%ほど透過率が低下、C (3ヶ月使用)、D (6ヶ月使用) ではそれぞれ約8%、約13%程度低下した。これらの結果このような方式及び材質を用いた場合は、季節、気象状況にもよるが、最低1ヶ月程度でフィルムを交換することが必要なことがわかった。

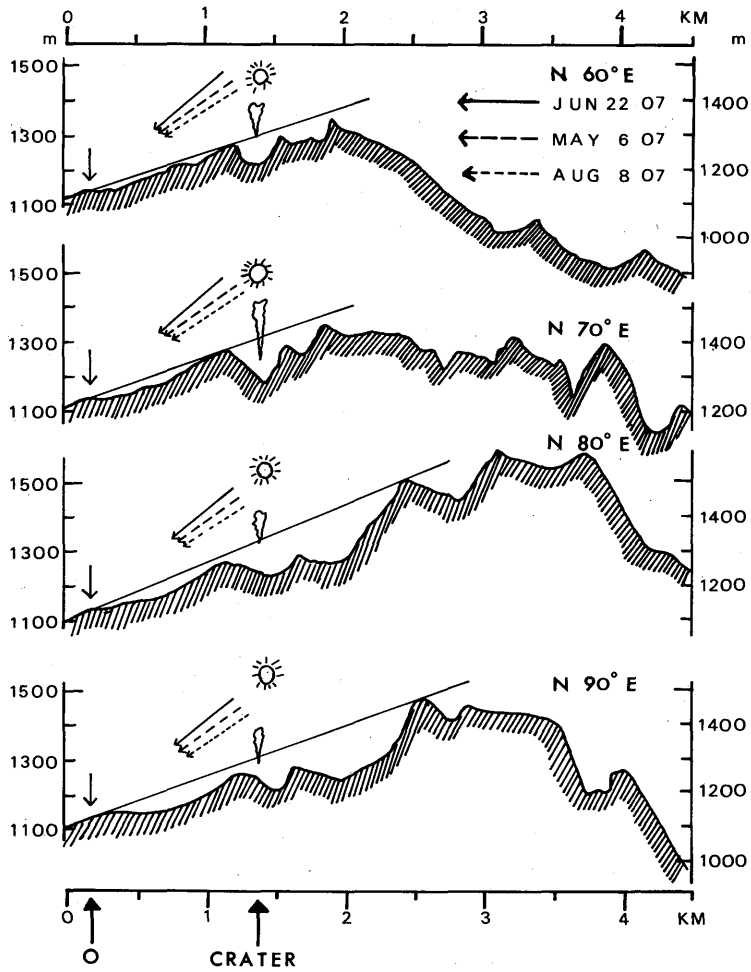


図1.1.14 方向別地形プロファイルに対する07時の太陽高度
(縦軸は横軸に対して拡大表示してある)

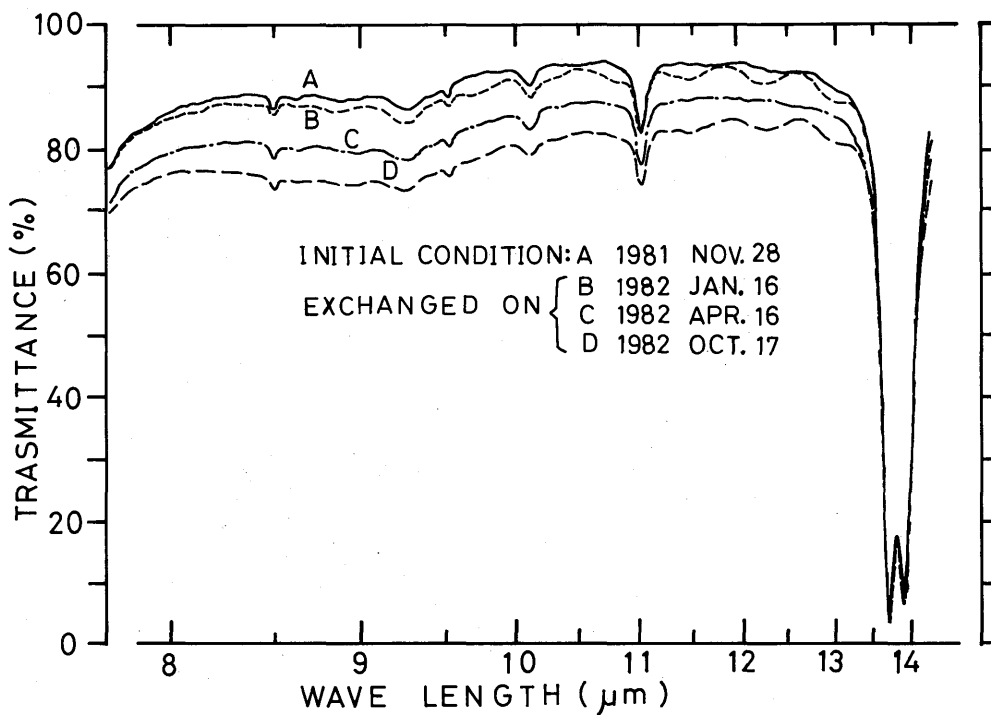


図1.1.15 ポリエチレンフィルムの遠赤外域透過率の変化

7. 観測方法

7.1 可視光

観測は1980年12月11日から1984年3月13日まで行われた。観測の視野角は観測窓の大きさの制約で水平 37° ×上下 21° となった。

毎日09時、11時、13時、15時、17時の5回自動観測を行った。観測時には自動制御によって一定時刻に電源ON、ウォーミングアップ、視野設定、観測・収録、電源OFF、カメラ部の位置リセットを行う。また、日射から撮像管を保護するため、観測しない時間帯にはカメラは外景に向けておかないで室内の壁に向けるようにした。プログラムの1部を表1.1.1に示す。

1日の映像の収録時間の合計は6分20秒で、一巻のカセットテープで16日以上収録でき、毎月1日、16日の2回交換した。

テープに収録された噴煙の映像は、画像解析器を通して、色・量・高さ・幅を読み取った。噴煙は火口上空の風の影響を受けて乱され、たえず形をかえるので、風のない時の状態を観測するのが望ましい。そのため、噴煙がなるべく高くあがった瞬間の形を風の影響が少なかった時の状

態と考えて読み取るようにした。噴煙の高さ及び幅は10m単位で、量は 10^2m^3 単位で計測した。

表1.1.1 可視光検知装置作動プログラム (07時、09時)

観測時刻	作 動 内 容	プログラム番号	時	分	秒	継 続 時 間	出力番号
07	カメラON	00	06	55	00	07 分	01
	回転台左よせ	01	06	56	00	25 秒	06
	回転台左よせ	02	06	56	00	25 秒	07
	回転台 下	03	06	56	30	25 秒	11
	回転台右よせ	04	06	57	00	10 秒	08
	回転台 上	05	06	57	30	22 秒	09
	回転台 上	06	06	57	30	22 秒	10
	テレビON	07	06	59	00	03 分	02
	ビデオ再生	08	07	00	00	10 秒	03
	ビデオ録画	09	07	00	00	10 秒	04
	ビデオ停止	10	07	01	00	05 秒	05
	カメラ左よせ	11	07	01	10	11 秒	06
	カメラ左よせ	12	07	01	10	11 秒	07
	カメラ 下	13	07	01	30	05 秒	11
09	カメラON	14	08	55	00	08 分	01
	回転台左よせ	15	08	56	00	25 秒	06
	回転台左よせ	16	08	56	00	25 秒	07
	回転台 下	17	08	56	30	25 秒	11
	回転台右よせ	18	08	57	00	10 秒	08
	回転台 上	19	08	57	30	22 秒	09
	回転台 上	20	08	57	30	22 秒	10
	テレビON	21	08	59	00	04 分	02
	ビデオ再生	22	09	00	00	10 秒	03
	ビデオ録画	23	09	00	00	10 秒	04
	ビデオ停止	24	09	01	40	05 秒	05
	カメラ左よせ	25	09	01	50	11 秒	06
	カメラ左よせ	26	09	01	50	11 秒	07
	カメラ 下	27	09	02	10	05 秒	11

7.2 赤 外 線

観測は1981年11月28日から1984年3月13日まで行われた。カメラのレンズ等の性能に制約され、観測可能な領域は火口上及び火口縁を含む直径約200mの範囲である。

毎日03時、09時、13時、15時、21時の5回自動観測を行った。自動制御によって電源ON、ウォーミングアップ、カメラ位置設定、観測・収録、カメラ位置修正、電源OFFを行う。日射から検知装置を保護するため観測しない時間帯はカメラを壁側に向けた。プログラムの1部を表1.1.2に示す。

表1.1.2 赤外線検知装置作動プログラム (03時)

作 動 内 容	プログラ ム 番 号	時	分	秒	継 続 時 間	出力番号
カメラ電源ON	01	02	50	00	16 分	01
回転台 右	02	02	51	00	20 秒	04
回転台 上	03	02	51	20	05 秒	05
TV電源ON	04	02	58	00	04 分	02
ビデオ再生	05	03	00	00	90 秒	15
ビデオ録画	06	03	00	00	90 秒	14
ビデオ停止	07	03	01	30	05 秒	16
カメラ12V	08	02	50	00	14 分	13
カメラオープン	09	02	58	00	04 分	11
カメラクローズ	10	03	02	03	02 分	12
回転台 下	11	03	04	00	05 秒	10
回転台 左	12	03	04	10	20 秒	03
アイリス 1	13	03	00	00	90 秒	17
アイリス 2 ON	14	02	58	00	02 分	18
アイリス 2 OFF	15	03	00	00	90 秒	18
アイリス 2 ON	16	03	01	30	30 秒	18
アイリス 2 OFF	17	03	02	00	05 秒	18

1日の赤外映像の収録時間の合計は7分20秒で、一巻のテープに16日分以上収録でき、毎月1日、16日の2回交換した。観測初期のころ内部チョッパー、外部チョッパーの同期不良が生じたが、その後は内部チョッパーを作動させないで観測を継続した。

この装置は相対温度を1℃の精度で観測できるが、絶対温度は測れない。そのため、噴煙の真の温度を知るためには、映像の視野内に既知の温度を持つ物体があることが必要で、その物体の

温度を基準にして噴煙の温度が計測される。この観測では、火口縁の地表温度または観測小屋内の温度を基準とした。

観測によって収録されたテープは、温度解析部を用いて、噴煙像の中で最高温度を示している所の温度階と、火口縁の最高温度階とを読み取り、それらとカメラの外部チョッパーとの温度差を観測値とした。

7.3 紫 外 線

観測は1982年10月20日から1984年3月13日まで行われた。観測の視野範囲は水平方向24°、上下方向12°である。

電源のON、測定位置の設定、測定前後の検定セルの光路挿入と測定、水平走査、上下走査、センサー位置の修正等を、毎日09時、11時、13時、15時の4回、可視光観測の時刻と合わせて自動観測した。また、日射の影響のない20時には内蔵光源により高濃度検定セルの測定を行い、長期間にセルの感度変化がどの程度あるかをモニターした。他の機器と同様、観測しない時間帯にはカメラを壁側に向けるようにした。プログラムの1部を表1.1.3に示す。

1日の観測は記録紙の上で合計約87cmとなり、一巻(15m長)で16日以上データをとれる。交換は毎月1日、16日の2回行った。石英ガラス窓の外面の汚れはときどき、測候所職員に清掃してもらった。

自記紙には測定前後における高濃度、低濃度の検定信号、水平及び上下に走査したSO₂濃度信号及びAGC(Automatic Gain Control: 入射光量の変化を自動調整する機能)信号が記録される(図1.1.16)。AGCは10V、SO₂は5Vレンジで測定した。

噴煙中のSO₂濃度は自記紙に記録された濃度と低濃度の検定信号の振幅、及びSO₂濃度の最大振幅を読み取り、それらの振幅比からSO₂濃度をppm-m単位で算出した。

なお、COSPEC Vによる観測には次のような問題があるが、後述するように、それぞれ検討し、ほぼ解決させた。

- 1) 入射光量によって信号が変化する。
- 2) ゼロレベルが変動する。
- 3) 温度変化により信号にドリフトが出る。
- 4) 感度が直線的でない。
- 5) 測定する距離の違いで信号の強度が変わる。
- 6) セル濃度の経年変化がある。
- 7) 観測時間は夏期で08時—17時、冬期で10時30分—14時に制約される。

1)の問題は時間、季節による太陽光散乱の変化をAGCで補償し切れないことを反映している。この現象は雲の量に変化しても生じる。本研究ではこの対策として7)の問題と合わせて測定を年間09時—15時に限定し、かつ測定の前後にガス濃度をセルによって検定することでその影

表1.1.3 紫外線検知装置作動プログラム (09時)

作 動 内 容	使 用 機 器	プログラム 番 号	出 力 番 号	時 刻			継 続 時 間
				時	分	秒	
COSPEC POWER	COSPEC	001	17	08	40	00	32 分
TABLE POWER	TABLE, RECORDER	002	05	08	58	00	15 分
REF.ライト	COSPEC	003	01	08	57	00	3 分
ペンダウン	RECORDER	004	11	08	58	00	13 分
チャート送り	RECORDER	005	10	08	58	40	80 秒
サンプルHI	COSPEC	006	02	08	58	40	01 秒
サンプルLO	COSPEC	007	03	08	59	05	01 秒
NORMAL	COSPEC	008	04	08	59	40	01 秒
チャート送り	RECORDER	009	10	09	00	00	80 秒
サンプルHI	COSPEC	010	02	09	00	00	01 秒
サンプルLO	COSPEC	011	03	09	00	25	01 秒
NORMAL	COSPEC	012	04	09	01	00	01 秒
タイムマーカー	RECORDER	013	12	09	00	40	05 秒
GO TO POS. 1	TABLE	014	13	09	01	20	01 秒
チャート送り	RECORDER	015	10	09	04	00	90 秒
サンプルHI	COSPEC	016	02	09	04	00	01 秒
サンプルLO	COSPEC	017	03	09	04	25	01 秒
NORMAL	COSPEC	018	04	09	05	00	01 秒
GO TO POS. 2	TABLE	019	14	09	05	30	01 秒
チャート送り	RECORDER	020	10	09	06	00	80 秒
サンプルHI	COSPEC	021	02	09	06	00	01 秒
サンプルLO	COSPEC	022	03	09	06	25	01 秒
NORMAL	COSPEC	023	04	09	07	00	01 秒
GO TO POS. 3	TABLE	024	15	09	07	20	01 秒
チャート送り	RECORDER	025	10	09	09	30	90 秒
サンプルHI	COSPEC	026	02	09	09	30	01 秒
サンプルLO	COSPEC	027	03	09	09	55	01 秒
NORMAL	COSPEC	028	04	09	10	30	01 秒
TABLE RESET	TABLE	029	16	09	11	00	01 秒

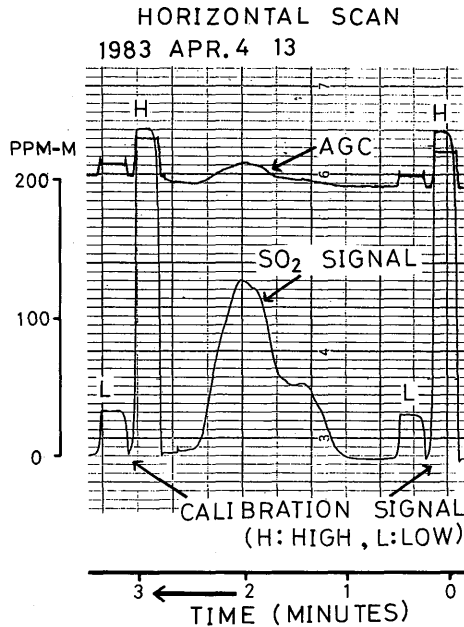


図1.1.16 SO₂記録例

響を減らすようにした。また、雲量、天候の妨害に対して同時刻に得られる可視光の映像から判断してデータを選択した。2) については記録状況から判断した。3) の問題については、機器を直射日光にさらすことがないように室内に設置してある。ただし、年変化については人工光源による検定値の変化でチェックした。4) については測定結果の数値の上限を500ppm-m程度までは直線的であるとして判断した。5) については本装置は定点観測であるため、その影響はないと考えられる。6) の問題は測定上致命的な点である。検定用セルの濃度変化の原因としてセルの材質である石英の含有水分の変化、SO₂ガスのセルへの吸着、測定時の日射照度による劣化が考えられている。本研究では、購入後半年ほど経過したセルを検定してから使用するようにした。例えば、本研究で当初購入した2個のセルはメーカーで520ppm-m、130ppm-mとしていたものであるが、7カ月経た1982年10月15日の測定(ジャスコインターナショナル社による)では426ppm-m、57ppm-mとそれぞれ半分程度の数値となった。こうしたセル濃度の変化を補正するための処置として、約1年後に新しい検定用セルを購入し、ガス濃度を検定した上でこれまで使用していた検定用セルと交換・測定して出力値に大きな変動がないことを確かめた。

8. 噴煙観測の捕捉率

8.1 映像観測

可視光検知装置のカラーディスプレイで見る噴煙の映像は背景に雲がある場合は噴煙だけを識

別することは容易でない。ここでは、ディスプレイ上で映像として解析可能なデータの割合を調べるため、噴煙のあるなしにかかわらず火口方向が良く見え、映像内に雲があっても噴煙と判別できた観測資料を解析可能なデータとし、一方、火口方向が天候などの理由で見えない場合及び雲のため噴煙を識別できない観測資料を解析不可能なデータとして両者の割合を調べた。

月別、観測時刻別に噴煙捕捉率を求めたものが図1.1.17、表1.1.4（本章末尾）である。全体の66%の噴煙が解析可能ということになる。なお07時のデータは1980年12月11日～1981年4月10日の観測しかなく若干問題があるが、観測時刻別捕捉率は07時、17時よりは09時、11時、13時、15時の方が高い。このことから朝、夕方より日中の時間帯の方が可視光観測に適しているといえる。また、月別の捕捉率では梅雨期の7月、秋～冬期の10月～2月には捕捉率が低く、7月を除く3～9月にかけて捕捉率が向上する傾向がある。

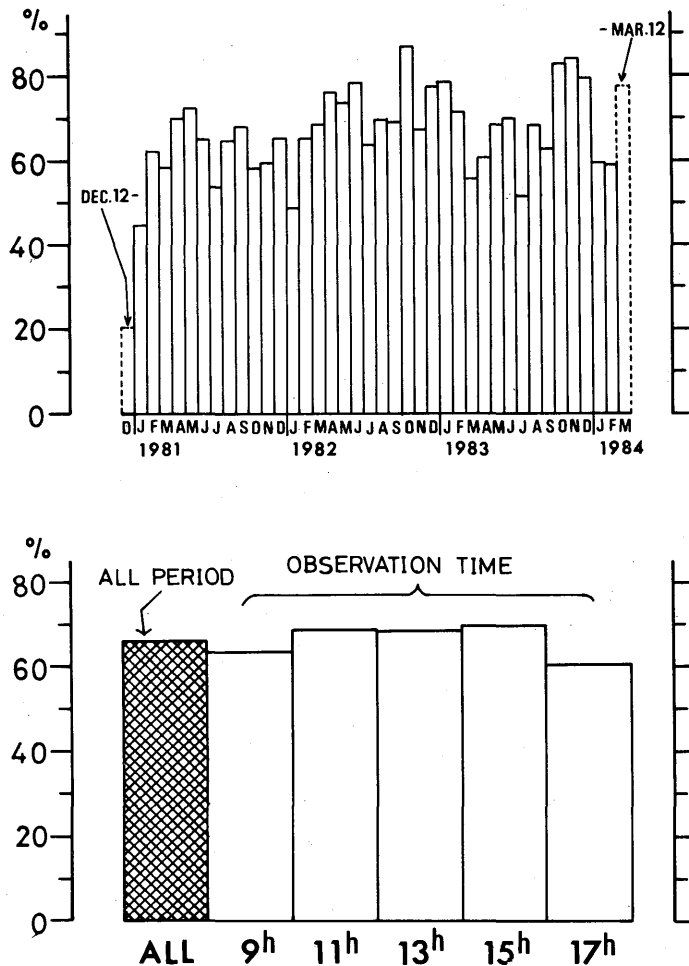


図1.1.17 可視光検知装置による噴煙捕捉率

8.2 温度観測

火口縁付近に雲がある時は赤外映像信号から噴煙を検出することが困難となる。それは噴煙の温度信号が雲でマスクされたり、日中には噴煙と雲の温度が同程度のレベルとなるからである。赤外線熱映像の捕捉率を把握するため可視光の場合と同様、噴煙の有無にかかわらず明瞭に火口方向の熱映像が得られている場合、及び雲と噴煙の識別が可能な場合とを解析可能なデータとしてその割合を求めた

図1.1.18は月別、観測時刻別に解析可能なデータの割合を表わしたものである。捕捉率は約51%で可視光の場合より低い。これは主に火口と観測小屋との間の水蒸気により赤外線の信号レベルが低下するのが原因と思われる。装置の温度分解能が現在の 1°C より向上すればさらに捕捉率は向上すると思われる。

なお、日中の13時、15時までは捕捉率が60%前後であるのに対し、噴煙の温度測定上で日射の影響のない03時と21時には約40%程度に低下する。(表1.1.4参照)。図1.1.18からは1～2月の冬期、7月の梅雨期に捕捉率がかなり低下するという傾向が見られる。また、温度分解能を 2°C (通常は 1°C)で観測した1982年6～7月の熱映像からは、火口縁は検出できたが、噴煙の熱映像はほとんど検出できなかった。

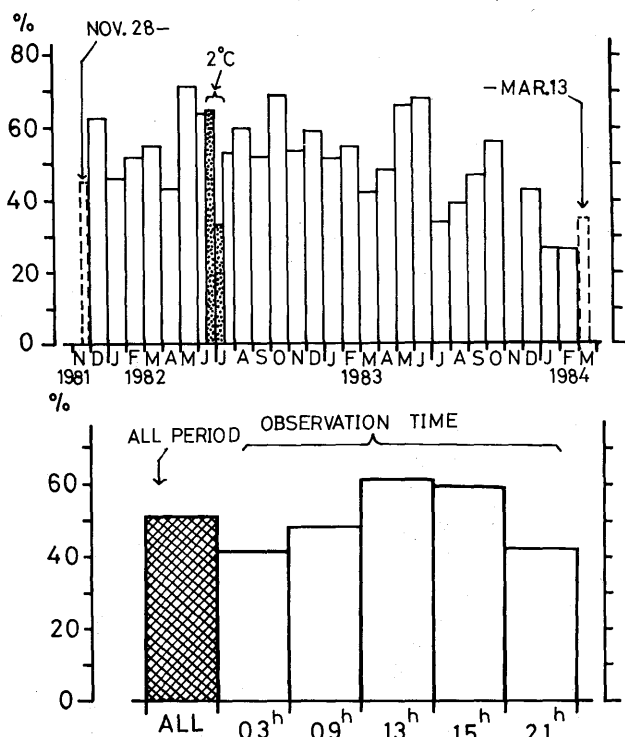


図1.1.18 赤外線検知装置による噴煙捕捉率

8.3 火山ガス観測

COSPEC Vの視野内に雲があれば、出力には見かけ上、 SO_2 を検知したようにあらわれる。したがって、もし火口上空に一樣に雲がある場合は、検定信号はすべてその出力記録上に重なってゼロレベルがとれなくなる。この場合は可視光映像と合わせて判別することにより、見かけ上の出力変動を判別できる。また、天候不順の際は入射光そのものが低下するのでAGCあるいは信号出力の状態が異なるため判断が容易である。そこで、明らかに噴煙による出力変動、及び噴煙が見えなくても SO_2 ガスを測定できたと判断できる資料を正しく測定できたデータとして、全測定頻度に対する割合を求めてこれを SO_2 ガス資料の捕捉率とした。月別、観測時刻別の捕捉率を図1.1.19、表1.1.4に示した。全体で約71%が測定できたことになり、可視光、赤外線検知装置と比べて捕捉率が高い。これは噴煙塊そのものが火口上に上昇していない場合でも放出されている SO_2 ガスを検出したことを表わしている。時刻別には11時から15時までの捕捉率が高く、日中の時間帯が測定に適していると言える。月別では変動があるもののほぼ60%以上測定できた。

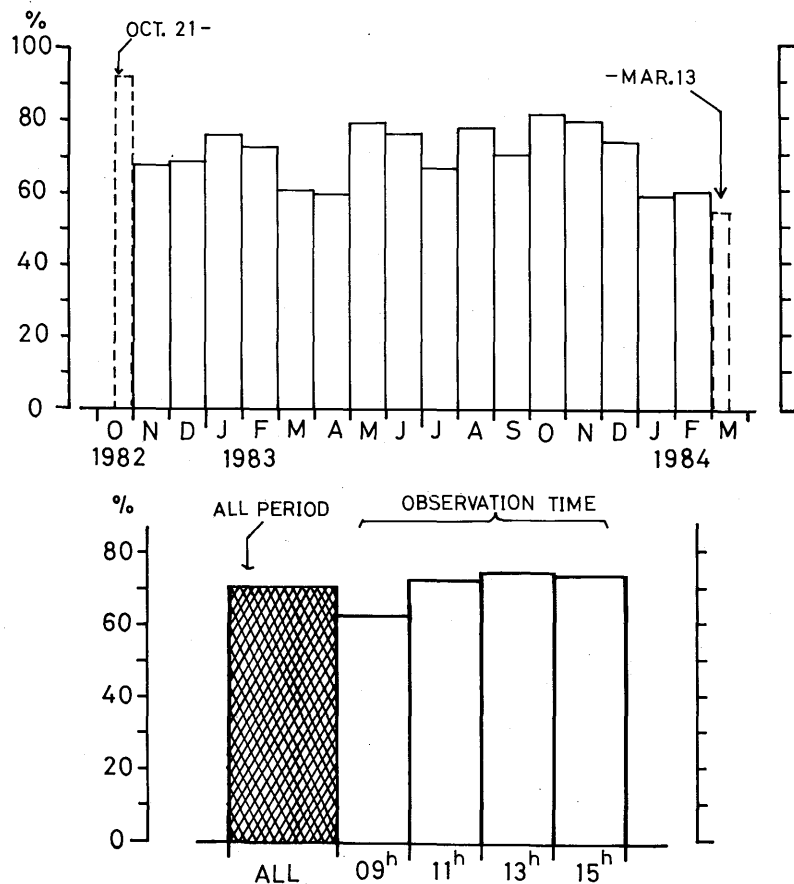


図1.1.19 紫外線検知装置による噴煙捕捉率

9. 観測結果

9.1 観測資料

この研究のために製作した噴煙観測装置を用いて、阿蘇山の噴煙を自動観測した資料を表1.1.5（本章末尾）に示す。同表には、阿蘇山測候所が行った従来の目視による噴煙の遠望観測資料も参考のため記載してある。

この表の中の可視光検知装置による噴煙の色・量・高さ・幅の値は、1日5回行った観測のうちで、噴煙が最も高くあがった時の値をその日の代表値として記載してある。これは、火山活動が静穏なときに、高くあがるような噴煙は、風の影響が少ないと考えられるからである。

赤外線検知装置による噴煙の温度の欄では、1日5回（昼間3回と夜間2回）行った観測のうち、日射の影響のない夜間2回の観測値から、高温を示す方を選んでその日の代表値とした。ただしここに示した温度は6.2.2節でも述べたように、カメラの外部チョッパーと中岳火口縁の地表最高温度との温度差(t_1)、及び同チョッパーと噴煙の表面最高温度との温度差(t_2)である。したがって、火口縁及び噴煙の真の温度は補正が必要である。

また、紫外線検知装置による噴煙中の SO_2 の観測は、1日4回、噴煙を水平及び垂直に走査して、それぞれ SO_2 の最大値を観測しているが、表1.1.5には、それらの観測値の平均をとってその日の代表値としてppm-m単位で記載してある。ただし、500ppm-m以上の数値は、この装置に取りつけた高濃度ガス検定セルの濃度を越えた値であって正確さを欠くので今後の検討、補正が必要である。

次に、表1.1.5の資料に基づき、阿蘇山の噴煙活動状況ないし火山活動を概観する。

9.2 可視光観測資料

9.2.1 器械観測と目視観測との比較

阿蘇山測候所のルーチン観測では毎日09時と15時に目視による噴煙の観測を行っている。そこで、この資料と可視光検知装置による09時、15時の観測結果を比較した。

図1.1.20は測候所の目視観測と、本システム作動時刻とが合致した場合の噴煙捕捉率の比較図である。図中のAの領域は天気が悪くて噴煙が見えなかった時であり、Bは目視観測と本システムによる器械観測とが良好であった時である。C、Dの領域は目視観測と器械観測とがうまく合致していない時で、両観測の時刻が少し違ったために、どちらかの観測で噴煙が見えなかったことに原因があると思われる。

図1.1.21は噴煙の高さの比較、図1.1.22は噴煙量の比較図である。これらの図からは、目視観測と器械観測の精度がある程度わかる。両観測結果は大勢としては正の相関があるが、器械観測値は目視観測値よりはるかに高い精度が得られていると考えられる。

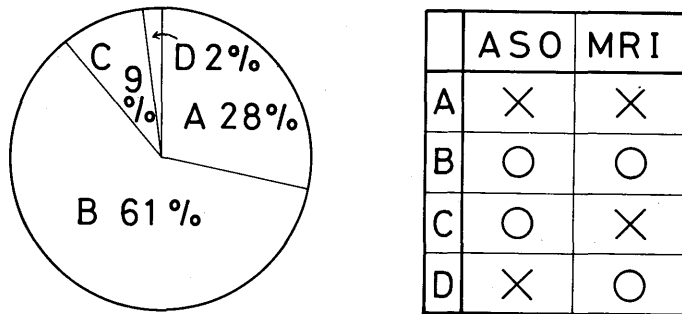


図1.1.20 噴煙の捕捉率の比較 (1980年12月11日～1983年末の資料による)

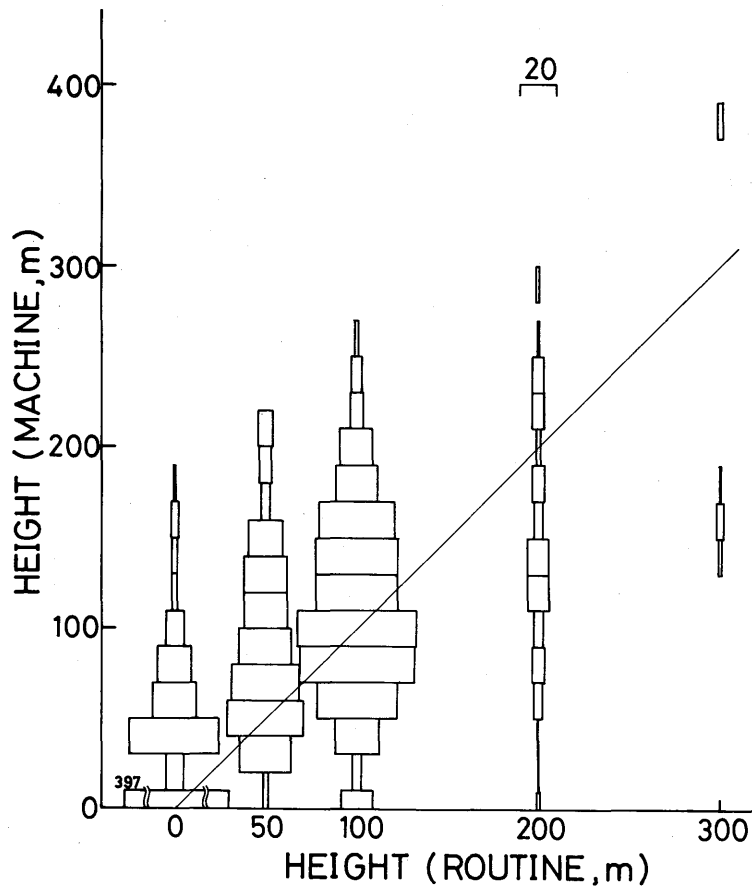


図1.1.21 噴煙の高さの比較 (1980年12月11日～1983年末)

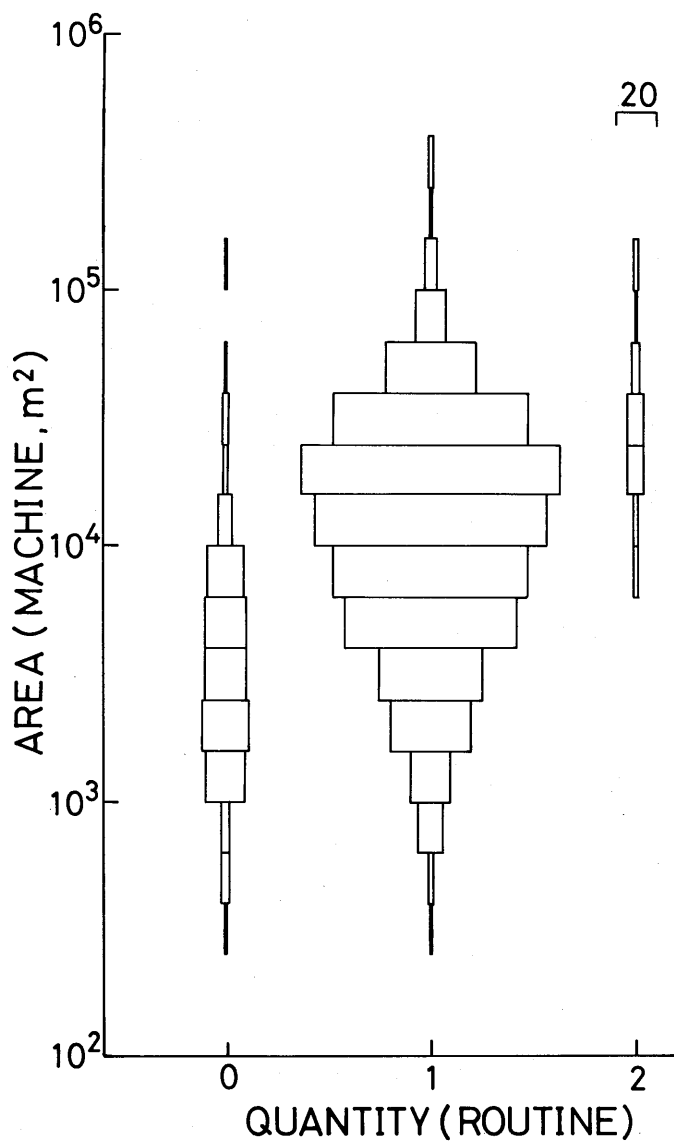


図1.1.22 噴煙の量の比較 (1980年12月11日～1983年末)

9.2.2 噴煙の形状の変動

図1.1.23、図1.1.24、図1.1.25は、それぞれ噴煙の高さ(h)、幅(ℓ)、垂直断面積(a)の旬別平均値の変化図である。また、噴煙の形を回転楕円体として、その体積 V は

$$V = \frac{2}{3} a \ell$$

で近似できると考え、Vの旬別変化を求めて図1.1.26に示す。

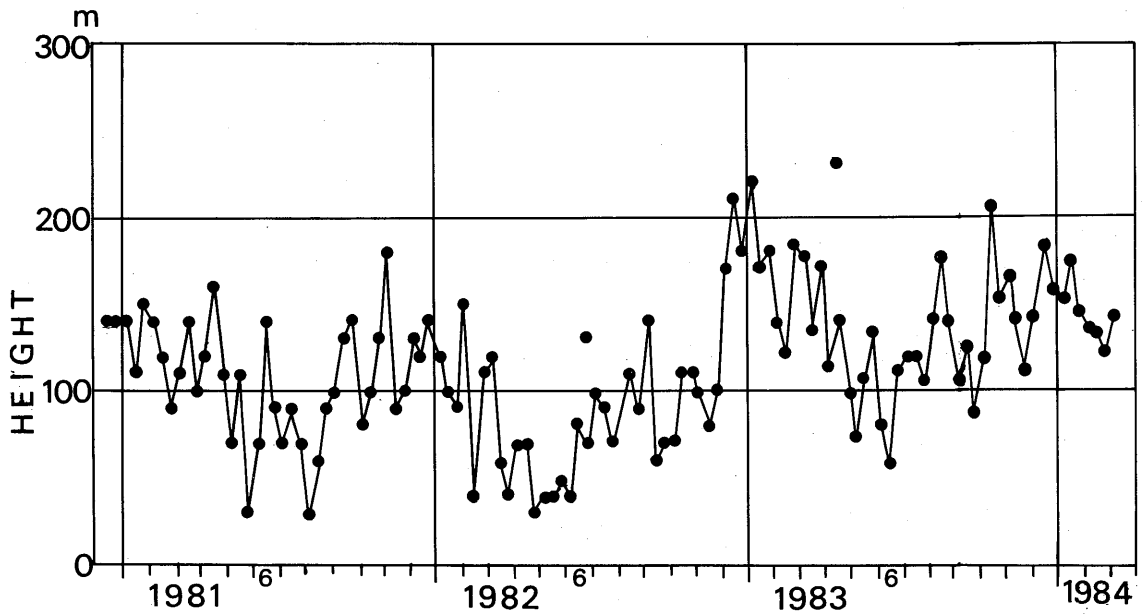


図1.1.23 噴煙の高さの変化

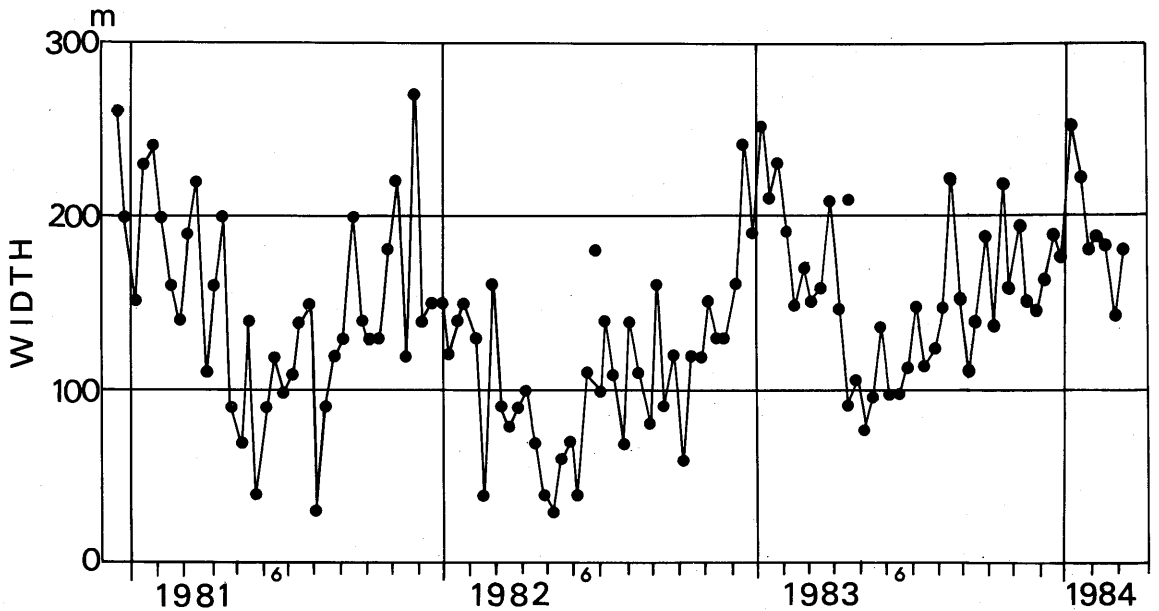


図1.1.24 噴煙の幅の変化

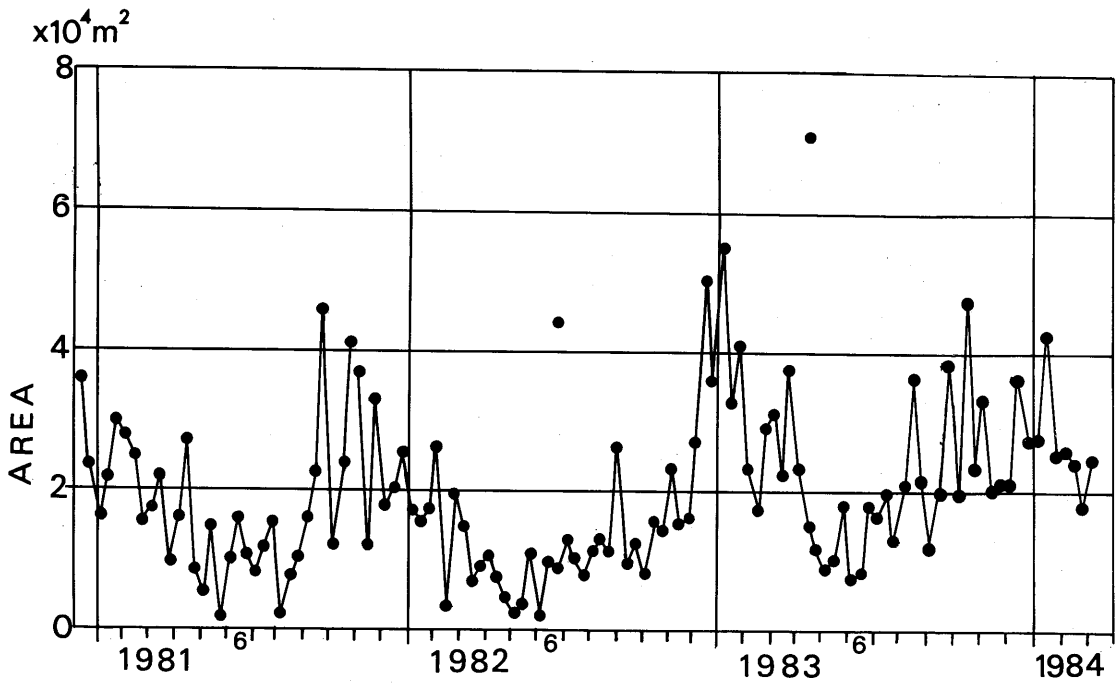


図1.1.25 噴煙量（垂直断面積）の変化

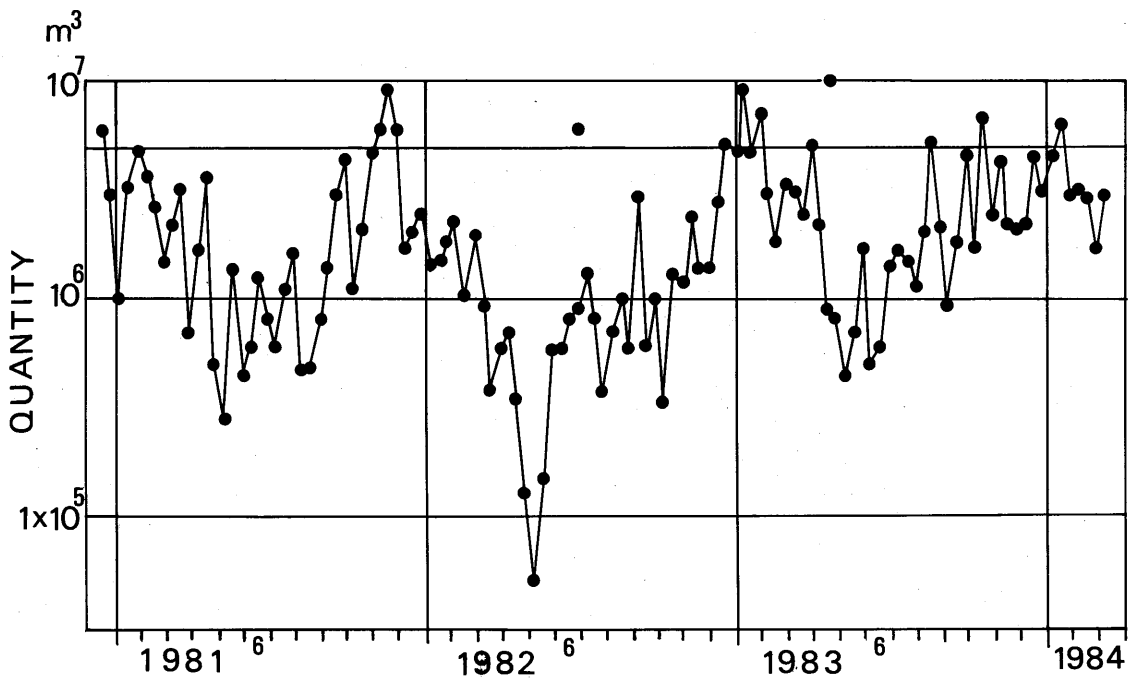


図1.1.26 噴煙量（体積）の変化

この観測実施期間中の阿蘇山の火山活動はきわめて静穏であり、噴火などはなかったが、図1.1.23～図1.1.26から、噴煙は冬期に多く夏期に少なくなるような年変化をしていることがわかる。この変動の原因は気象要素の変動によるものと考えられる。

噴煙の形状の年間の変動幅及び平均値（観測開始から1983年末まで）はおおよ次のとおりである。

$h = 50 \sim 200\text{m}$ （平均120m）

$\ell = 50 \sim 220\text{m}$ （平均140m）

$a = 5 \times 10^3 \sim 4 \times 10^4 \text{m}^2$ （平均 $2 \times 10^4 \text{m}^2$ ）

$V = 1 \times 10^5 \sim 5 \times 10^6 \text{m}^3$ （平均 $2 \times 10^6 \text{m}^3$ ）

一方、 h と ℓ との関係は図1.1.27のとおりである。この図には表1.1.5には載せなかった観測値も用いてある。

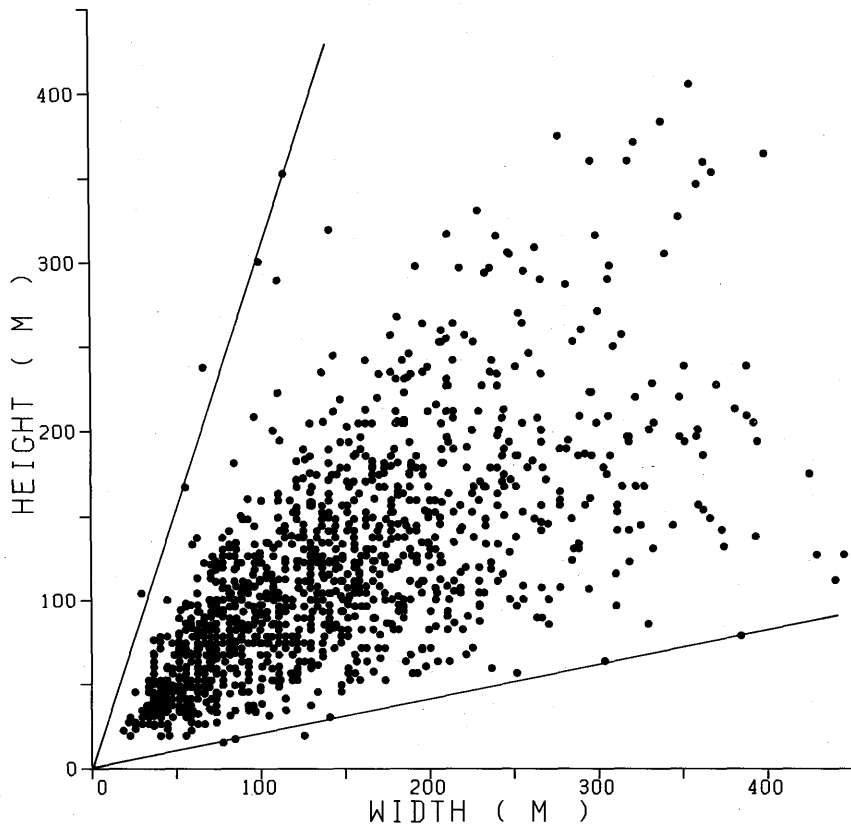


図1.1.27 噴煙の高さと幅の関係（1980年12月11日～1983年末）

なお、可視光検知装置で得られた噴煙の動画からは、噴煙の上昇速度を読み取ることができる

ので、噴煙の動く状態がよくわかる画像についてはそれを判読した。表1.1.6（本章末尾）は噴煙の上昇速度である。

この速度を測った噴煙の位置は観測小屋から火口縁を望んだ時、火口縁付近に見える噴煙であるため、火口底からは約150～200mの高さにあたる位置である。したがって、火口から放出した当初の噴出速度ではない。

観測された噴煙の上昇速度は1～8 m/sec、平均2.7m/secであった。

9.3 温度観測資料

9.3.1 観測資料の解釈

本研究で用いた赤外線検知装置は、温度検出機構に焦電型素子を使っているため、入射赤外エネルギーは、カメラの外側に取り付けた外部チョッパーの温度を基準として測られる。すなわち、温度測定のための対象物とチョッパーとの温度差を検出する構造になっている。そのため、測温対象物の温度が仮に一定であったとしても、赤外線検知装置周辺の気温が変化することによって、それに対応した測定値も見掛け上変化することはされない。

このことを考慮し、本装置を使って観測した熱映像からは、次の手順により温度を読み取り、解析した。

① 温度解析部を用い、熱映像から火口縁の最高温度 T_1 を求めるかわりに、温度検知部の外部チョッパーと火口縁の最高温度値との温度差 t_1 を読み取る。一般にチョッパーの温度 T_0 は T_1 より高くなっていた。

② 次に、熱映像から噴煙の温度の最高値 T_2 とチョッパーの温度 T_0 との差 t_2 を読みとる。

③ チョッパーの温度 T_0 はこの装置を設置してある観測小屋内の温度である。その小屋は阿蘇山測候所の露場近くにあり、しかもここでは夜間の観測資料について検討したので、小屋の温度は露場の気温に等しいとして解析を補足した。

④ また、 T_1 の実地観測は行われなかったが、たまたま1975～1977年に気象研究所が中岳火口北側で傾斜観測を実施した際に測った現地の温度の資料（田中・澤田1979）があるので、それを参考にして解析を補足した。

図1.1.28は03時と21時の t_1 （図の上段）、 t_2 （図の中段）の旬別最高値及び T_0 （図の下段）として03時の阿蘇山測候所における旬別最低気温をプロットしたものである。この図から、 t_1 と t_2 はともに夏期に低く（図の上、中段の実線）、冬期に高い年変化を、 T_0 はその逆の変化をしている（図の下段の点線）ことがわかる。 t_1 と t_2 の年間の変化幅はどちらも同じ程度で10数度あるように見えるが、これは真の温度並びに温度変化ではない。火口縁及び噴煙の真の温度 T_1 及び T_2 はそれぞれ、 $T_1 \div T_0 + t_1$ 、 $T_2 \div T_0 + t_2$ で近似できる。 T_0 は冬期 -10°C 、夏期 $+18^{\circ}\text{C}$ の年変化をしているので、その温度幅は 30°C 近くもある。 T_0 で火口縁や噴煙の温度を補正すると、図1.1.28に点線で示したように、 T_1 、 T_2 とも冬期に低く夏期に高い変化幅約 20°C の年変化が見られる。したがって、

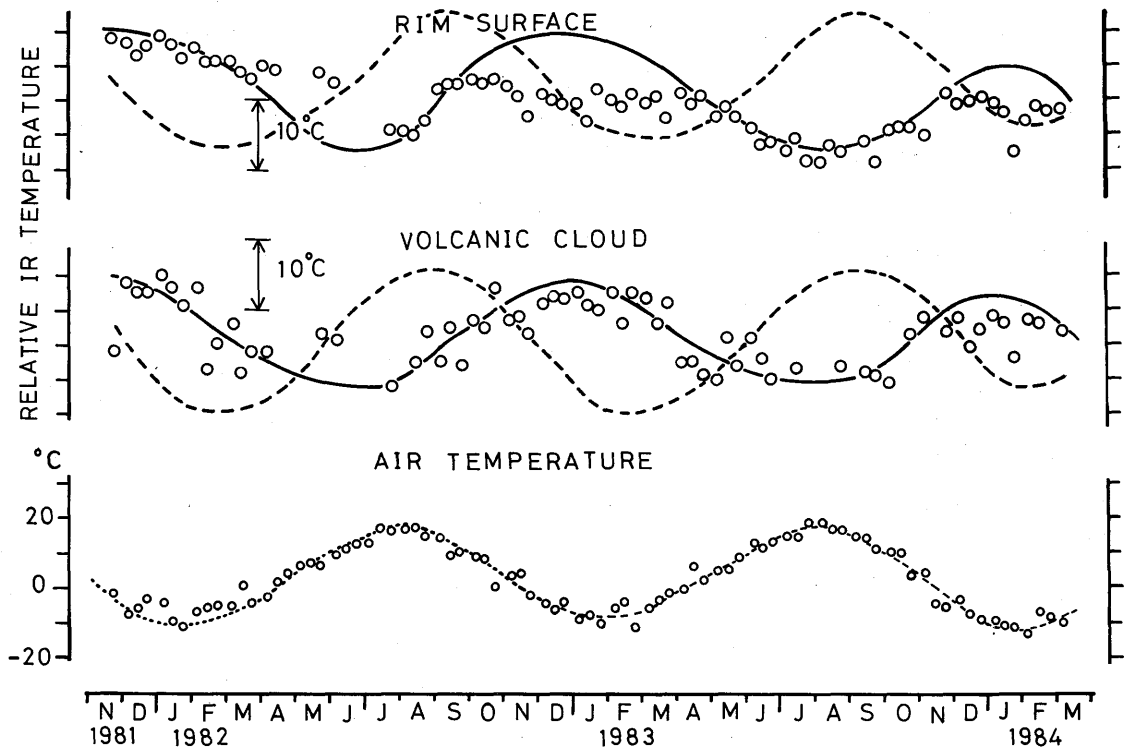


図1.1.28 火口縁表面、噴煙表面の旬別最高温度レベルと03時の旬別最低気温

T_1 、 T_2 とも、気温の影響を大きく受けていることがわかる。一方、上の④で述べた火口縁の03時と21時における平均温度は、冬期が約 2°C 、夏期が約 24°C でその間 22°C の幅を持つ年変化をしている。その形は図1.1.28上段の火口縁の温度変化図（点線）にほぼ合致していることから、本装置による温度観測は良好であることがわかる。したがって T_1 の平均値は $(24^{\circ}\text{C} - 2^{\circ}\text{C}) / 2 + 2^{\circ}\text{C} = 13^{\circ}\text{C}$ となる。

次に、観測時刻によって生ずる計測値の特徴を調べた。図1.1.29は1981年11月～1983年7月の観測時刻別 $T_1 - T_2 = t_2 - t_1$ の頻度分布である。日射の影響が大きい13時と15時、影響のない03時と21時の場合はそれぞれ類似しており、09時の形状は後者に近い。温度差の頻度の極大値は03時と21時が 0°C 付近、09時、13時、15時が 2°C 付近である。また、13時、15時では高温側での出現頻度が明らかに高く低温側への分布は低い。このことは日中の観測では太陽光が火口縁の温度を上昇させるため噴煙との温度差を検出できないこと、03時、21時には噴煙の温度が火口縁よりも高温となるのでその温度差を検出しているが、 0°C 付近の頻度が多いことから噴煙の温度そのものが余り高温ではなかったことを表わしている。なお、09時が夜間の結果と同様に低温側の出現頻度が多いことは日中ほど火口縁表面が太陽光で昇温しておらず、かつ噴煙が太陽光の直射を受け

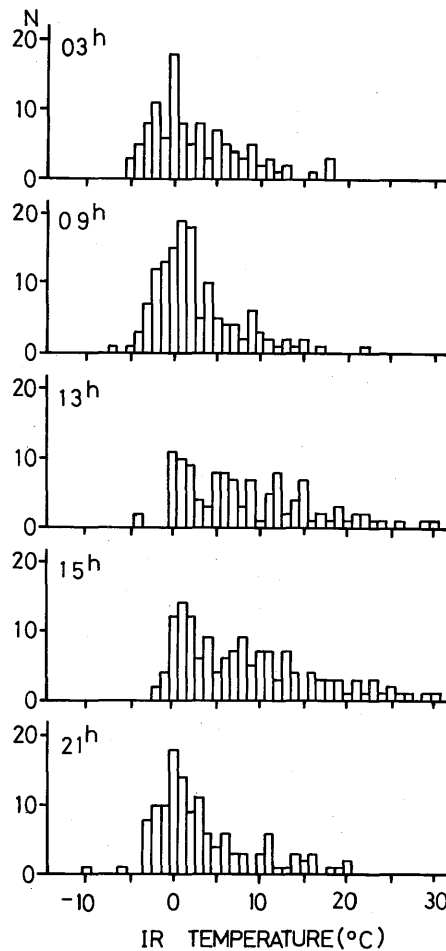


図1.1.29 火口縁と噴煙の観測時刻別温度差の頻度分布

たことの相乗効果によるものではないかと考えられる。

日射の影響のない03時と21時の $t_2 - t_1$ の値で、観測頻度の多い所を、図1.1.29から、 $-10 \sim +10^\circ\text{C}$ とすると、 $T_2 = T_1 + (t_2 - t_1) = 13^\circ\text{C} + (\pm 10^\circ\text{C})$ で、 T_2 の平均値は 13°C 、年変化幅はおよそ $3^\circ\text{C} \sim 23^\circ\text{C}$ となる。

9.3.2 噴煙の温度変化と火山活動

図1.1.30の下段には火口縁と噴煙との温度差の旬別最大値($T_1 - T_2 = t_2 - t_1$)がプロットしてある。同図の上段と中段には、下段の温度を測った時点での t_1 と t_2 が示してある。 $t_2 - t_1$ (下段)の値は観測開始以来2年間で、じょじょに小さくなっているように見える。この現象は、噴煙の温度が火口縁の温度に近づいていることを示すものである。もし、火口縁の温度が毎年同じ程度の年変化をしているならば、上述の現象は、噴煙の温度が次第に上昇したとも解釈できる。

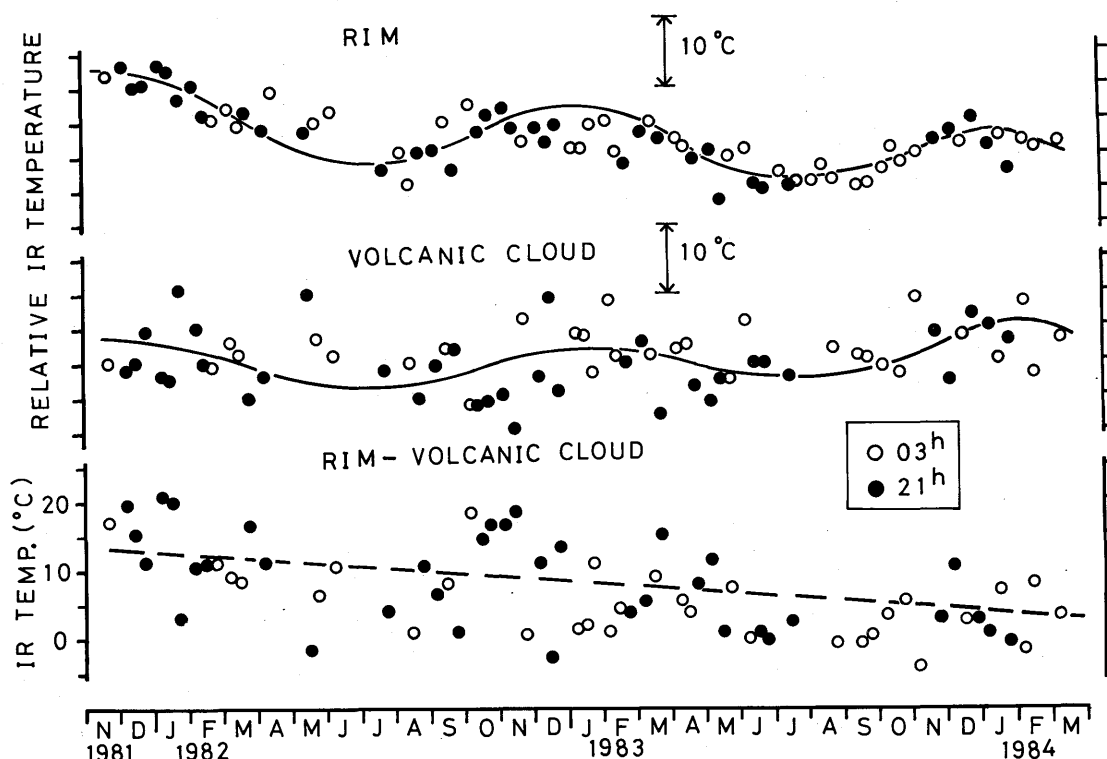


図1.1.30 火口縁と噴煙との旬別最大温度差（下段）とその時の火口縁（上段）、噴煙（中段）と観測小屋との温度差

図1.1.31は火口縁と噴煙との温度差の旬別最小値が現われた時の t_1 （上段）、 t_2 （中段）、 $t_2 - t_1$ （下段）をプロットした図である。

図1.1.30、図1.1.31とも、観測値のバラツキは大きい、似たような傾向が見受けられる。

9.4 火山ガス観測資料

9.4.1 検定信号

関連スペクトロメーターを用いて火口から放出される SO_2 ガスの量を長期にわたって測定しようとする際、ガス濃度検定用セルの濃度の経年変化が大きな問題となる。その検討のため、測定用データを読み取った観測時刻について検定セル濃度（高、低濃度）に対応する記録紙上の電圧出力値と、ゼロレベル（記録紙上のペン位置を電圧換算）をチェックした。また、20時に内蔵光源で測定している高濃度セルの出力とゼロレベルについても同様の方法でチェックした。

図1.1.32は記録紙の上に高、低濃度検定信号が入力した時のゼロレベルを水平及び上下走査の順で、観測時順にプロットした図である。一部にバックグラウンドとして SO_2 ガスが重畳したためシフトしている時期があるものの、全期間にわたり測定系のゼロレベルはほぼ一定であったと見

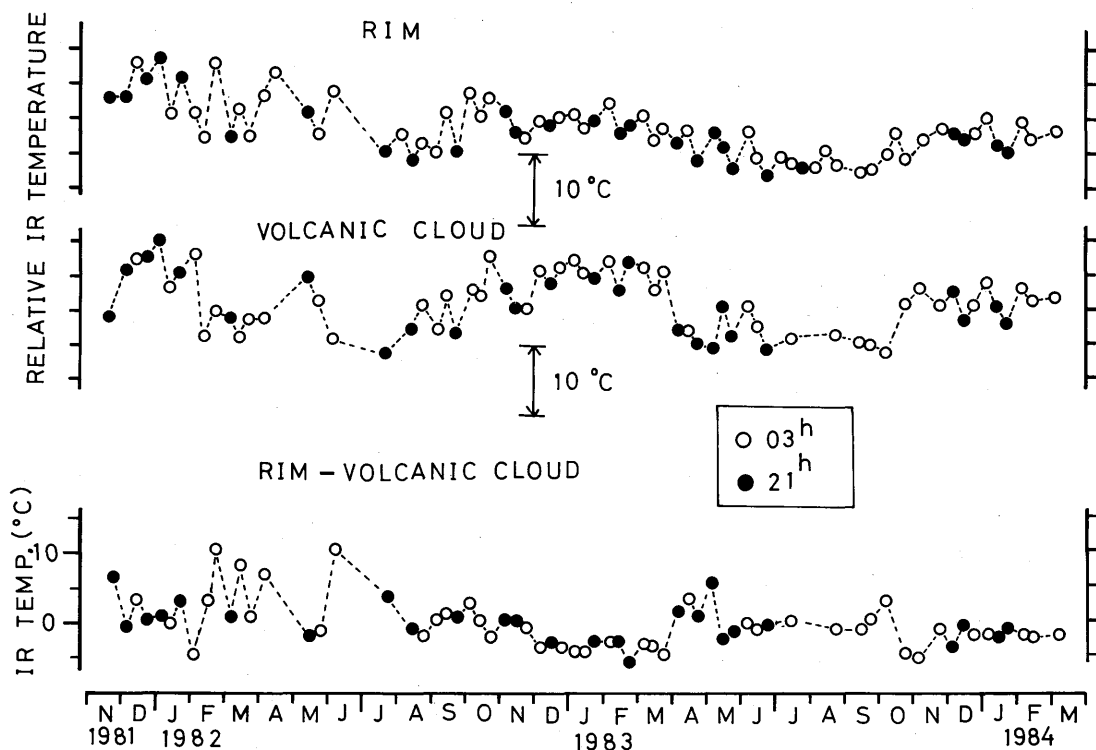


図1.1.31 火口縁と噴煙との旬別最小温度差（下段）とその時の火口縁（上段）、噴煙（中段）と観測小屋との温度差

なすことができる。

図1.1.33には観測時における高、低濃度検定セルの出力の日最大値の変化を示した。高濃度セルの出力は1982年10月下旬に観測を開始してからほぼ一定値を示していたが、1983年3月上旬以降次第に低下するようになってきた。低濃度セルの出力は変化幅が小さいものの同様の出力低下が見られる。しかし、9月下旬以降両者とも出力低下が鈍化し、12月以降は高濃度セルの出力の変動幅が大きくなった。また、図1.1.34には毎日20時の内蔵光源による高濃度検定セルの出力とゼロレベルの値の日別変化を示した。ゼロレベルは1983年1月～4月にわずかなシフトが見られるほかは全期間中ほぼ一定であった。ただし、高濃度セルの出力は1983年2月末以降出力低下が始まり、10月中旬まで続いた。しかしその後は出力の変動幅が大きくなり、出力値も一部回復する傾向が見られた。

観測時の高濃度セルの出力低下は1983年3月～9月で約0.4Vであるが、20時の場合は約1.2Vに及び、かつ低下の始まった時期がやや早い。これは、内蔵光源の方が、太陽光を光源とした場合より光源の状態が安定していることによるものであろう。

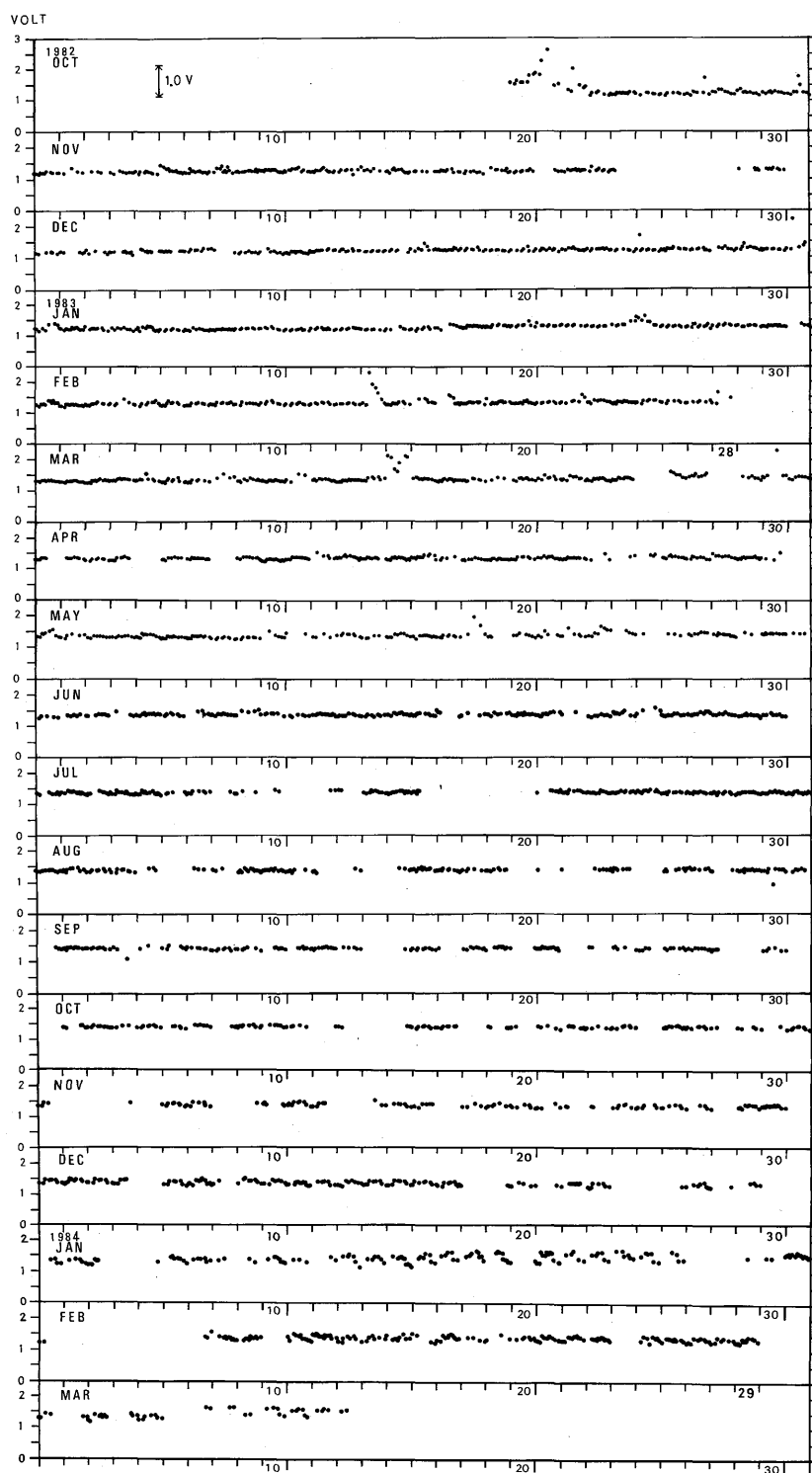


図1.1.32 観測時刻におけるゼロレベル変化

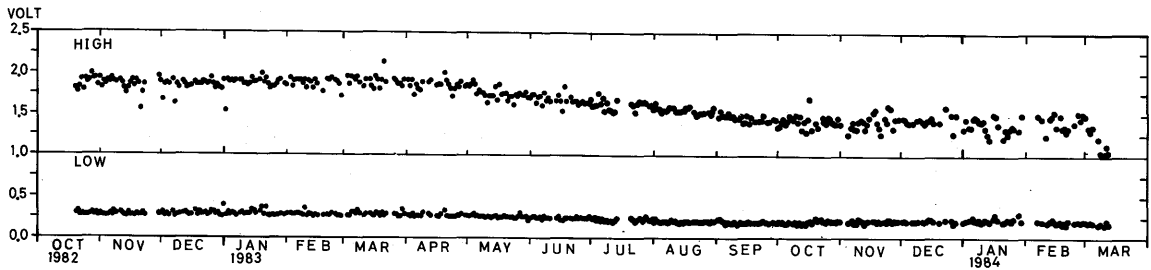


図1.1.33 観測時刻における高、低濃度検定セル出力の変化

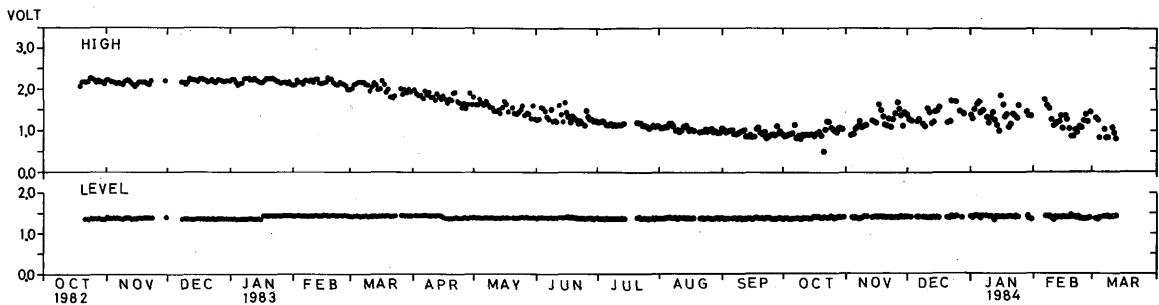


図1.1.34 毎日20時の内蔵光源による高濃度検定セル出力およびゼロレベルの変化

このような濃度検定用セルの出力が低下した原因としては、(1)光源入射軸のズレによる光源入射量の系統的な降下、(2)濃度検定用セルの濃度そのものの低下、(3)光電増幅管を含むエレクトロニクス系の検出感度の低下、(4)分光系のズレが考えられる。

これらを検討するため1983年10月9日、新しいセルを交換して観測に使用していたセルとの出力を比較した。結果を表1.1.7に示す。新しいセルの日本ジャスコインタナショナル社による検定結果（表中の検定濃度）は製造時濃度の約半分の値であった。

比較測定は内蔵光源を用いて機器のウォーミングアップを20分、内蔵光源点灯後15分後という

表1.1.7 SO₂セルの比較

種	類	製造時濃度 ppm-m	検定濃度 ppm-m	出力 mV	単位出力 mV/ppm-m
使用セル	高濃度	920	426	1,557	3.65
	低濃度	130	57	242	4.25
交換セル	高濃度	1,147	560	1,892	3.38
	低濃度	131	55	225	4.09

条件をおいて実施した。表の結果は3回の測定の平均値である。単位出力をみると、両セルで高濃度セルの値が低濃度の場合より小さい。これは分光測定では通常高濃度側の出力が完全に直線的ではないという傾向を反映しているものであろう。両セルの単位出力の数値を比較すると新しいセルの値の方が数%小さくなっているが、少なくとも両者の値が著しく異なるという結果ではなく、ほぼ同様の結果が得られたとみなすことができよう。したがって、これまで観測に使用していたセルの濃度に著しい濃度低下がなかったこととなる。

このため、セル濃度出力の変動の原因としては上述の(1)、(3)、(4)が残るが、(1)については機構上調整部分がなく固定されていること、また、(3)については前述のようにゼロレベルがほぼ一定であったことからそれぞれ考えにくいので、(4)が主な原因であると思われる。

セル濃度の数値が大きく低下することがなかったことは、観測に使用していたセルを製造後約半年を経過した時点で検定して使用していたものであるので、セル内でのSO₂ガスの吸着などがすでに平衡状態に達していて数値が安定したことを示すものであろう。

比較測定後は再び従来使用していたセルを取り付けて観測を続け、分光系の調整は行わなかった。その後わずかながら出力値の回復が見られる(図1.1.33、図1.1.34)本研究におけるSO₂の観測は火山ガス検知部が噴煙を水平及び上下走査する前後に高・低濃度のSO₂セルの出力を検定し、噴煙のガス濃度を算出している。したがって見かけ上のセル濃度の低下は測定値にも同様に影響するので測定値を補正しないですむ。

なお、表1.1.7の比較測定で示されたように高濃度側の出力は必ずしも直線的ではない。このため測定結果がほぼ500ppm-mを越えるような高濃度の観測値については数値として取扱う上で注意が必要である。

9.4.2 噴煙中のSO₂濃度の変化

図1.1.35はSO₂濃度の変化を示したものである。火山ガス検知部が噴煙を水平及び上下に走査してSO₂濃度を測定した値の中から日別に最大値を選び、さらに、それを旬別に平均したものを黒丸で、日別平均値をとり、さらにその旬別の平均値を白丸で示してある。観測期間中にSO₂濃度は最低10ppm-m付近から最高1100ppm-m付近までの広い範囲で変動した。ただし、前節でも述べたように、500ppm-m以上の値は不正確かもしれない。なお、観測開始から1983年末までのSO₂濃度の平均値は310ppm-mであった。

観測期間中にSO₂濃度が高くなったのは、観測初期の1982年10～11月、1983年9月以降である。火山活動は一貫して静かな期間だったので、この濃度変化は気象要素による季節変化かもしれない。気象要素が原因でSO₂濃度が増加する機構としては、風向きによって火口から上がる噴煙や火山ガスが、火口と観測小屋との間に吹き寄せられて、観測値が増大することも考えられる。

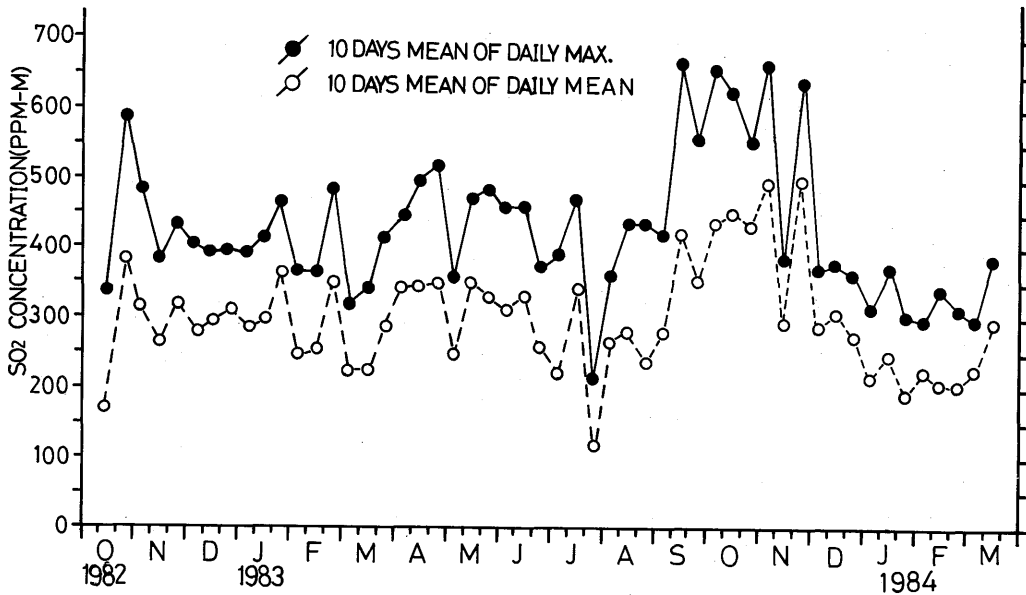


図1.1.35 SO₂濃度 (ppm-m) の旬別時間変化

10. 噴煙によって放出される水蒸気・熱・SO₂量

火山灰等の固形物を含まない火山噴煙は、地中の高温高压の水蒸気を含むガス体が低温低压の大気中に放出され、周囲の空気と混合、冷却、膨張しながら浮力によって上昇し、水蒸気が凝結して可視可能となる現象である。この節では、いくつかの仮定をおいて、熱及び質量保存則により、平均的な噴煙によって放出される水蒸気量・熱量・SO₂量を推定した。

10.1 噴煙によって放出される水蒸気量・熱量の保存則による推定の方法

噴出する噴煙の状態に、次のような仮定をおく。

① 火山噴煙中のH₂O以外の成分は無視できるとする。本研究の観測期間中には降灰を伴うような噴煙はなかった。一般に火山ガス中の水蒸気以外の成分 (SO₂、CO₂等) は数Vol.%以下である。

② 地中の高温高压の火山ガスが大気中に放出された後、瞬間的に外気と混合して外気圧と平衡に達し、まだ凝結を始めない段階を初期状態と考える。現地観測によれば、初期状態に相当すると考えられる噴気孔での水蒸気の温度は80°Cで、本研究期間中変化は見られなかった。初期段階において含まれる水蒸気量のうち外気から混入したものの割合は外気温が30°Cでも数%以下であり、放出水蒸気量を求める際、無視した。

③ 初期状態のガス塊はさらに外気と混合して凝結を始め、噴煙として観測されたとする。

④ 放出された H_2O は観測されている噴煙において、すべて可視可能な噴煙内部に含まれ、噴煙は飽和状態にあるとする。この拡散消滅し始める前の噴煙の状態を観測している。

⑤ 噴煙は外気と平衡を保ちながら上昇するものとする。

⑥ 観測された噴煙の上昇高度は高々200~300mであるので、気圧は噴煙中心の高度で代表させる。

⑦ 噴煙は一定の速度で上昇しているとする。

温度 T_0 、体積 V_0 を有する初期状態におけるガス塊が、温度 T_e 、体積 V_e の外気と混合し、温度 T 、体積 V で観測された噴煙を形成していると考え、エネルギー保存の式、乾燥空気の質量保存の式及び H_2O の質量保存の式は次のように書ける。

$$\begin{cases} \{C_v w_0 + C_d (\rho_0 - w_0)\} V_0 T_0 + \{C_v w_e + C_d (\rho_e - w_e)\} V_e T_e \\ = \{C_v w + C_d (\rho - w)\} V T + C_v T W_e - L(T) W_e \dots\dots\dots(1) \\ (\rho_0 - w_0) V_0 + (\rho_e - w_e) V_e = (\rho - w) V \dots\dots\dots(2) \\ w_0 V_0 + w_e V_e = w V + W_e \dots\dots\dots(3) \end{cases}$$

但し C_v : 水蒸気の定圧比熱 ($2.0 \times 10^3 \text{ J/K} \cdot \text{kg}$)

C_d : 乾燥空気の定圧比熱 ($1.0 \times 10^3 \text{ J/K} \cdot \text{kg}$)

$L(T)$: 水の気化熱 $L(T) = 2.490 \times 10^6 - 2.13 \times 10^3 t \text{ J/kg}$

ここで t は $^{\circ}\text{C}$ で表わした温度

この他の記号については次の表に示した。括弧内に次項で使用した値を付した。

	初 期 状 態	外 気	噴 煙
体 積 V	V_0	V_e	V ($1.8 \times 10^6 \text{ m}^3$)
温 度 T	T_0 (353K)	T_e (281K)	T (284K)
圧 力 P	$P_0 = P_e$	P_e (865mb)	$P = P_e$
密 度 ρ	ρ_0 (0.677kg/m ³)	ρ_e (1.068kg/m ³)	ρ (1.057kg/m ³)
水蒸気密度 w	w_0 (0.293kg/m ³)	w_e (0.006kg/m ³)	w (0.009kg/m ³)
水 蒸 気 圧 e	e_0 (474mb)	e_e (8 mb)	e (13mb)
相 対 湿 度 H	H_0 (100%)	H_e (80%)	H (100%)
水 滴 量	—	—	W_e

(1)~(3)式より、初期状態におけるガス塊の体積 V_0 は

$$V_0 = \frac{(\rho_e - w_e) A - (\rho - w) A_e}{(\rho_e - w_e) A_0 - (\rho_0 - w_0) A_e} V \dots\dots\dots(4)$$

但し、 $A_0 = C_d T_0 (\rho_0 - w_0) + \{L(T) + C_v (T_0 - T)\} w_0$

$$A_e = C_d T_e (\rho_e - w_e) + \{L(T) + C_v (T_e - T)\} w_e$$

$$A = C_d T (\rho - w) + L(T) w$$

から求められる。

又、凝結を無視した場合

$$V_o = \frac{\rho w_e - w \rho_e}{\rho_o w_e - w_o \rho_e} V \dots\dots\dots(4)$$

となる。

⑦の仮定により高さhの噴煙は、上昇速度をvとしてh/vの時間で形成されたと考えることができる。すると単位時間当りの水蒸気放出量 $\dot{W}$ は、仮定②に述べたように、初期段階において外気より混入した水蒸気量を省略して

$$\dot{W} = \frac{w_o V_o}{h/v} \dots\dots\dots(5)$$

となる。

噴煙によって放出される熱量 $\dot{Q}$ は、初期段階で混合した空気 $(\rho_o - w_o) V_o$ に与えられた熱量を考慮して、

$$\dot{Q} = \{C_v (T_o - T_e) w_o + L(T_o) w_o + C_d (T_o - T_e) (\rho_o - w_o)\} \frac{V_o}{h/v} \dots\dots\dots(6)$$

から求められる。

10.2 阿蘇山における噴煙によって放出される水蒸気量・熱量

(4)~(6)式を本研究期間中の阿蘇山の平均的な噴煙に適用し、その平均放出水蒸気量及び平均放出熱量を求めた。

第9節で与えられた平均的な噴煙に関する状態量は次のようになる。

	平均値
高さ h	120m
幅 ℓ	140m
断面積 a	$2 \times 10^4 \text{m}^2$
体積 V	$1.8 \times 10^6 \text{m}^3$
上昇速度 v	2.7m/s
温度 $T_{\max}$	13°C
SO ₂ 濃度 $s_{\max}$	310ppm-m

前項の表に記した噴煙に関する状態量中、温度Tは、観測された温度が噴煙中の最高温度 $T_{\max}$ であるので、 $T = (T_{\max} + T_e) / 2$ とした。仮定④、⑤により、密度等が求められる。前項②で述べ

たように初期状態における温度は80°Cであり、仮定②により密度等が求められる。

外気の気圧 P_e 、温度 T_e は、阿蘇山測候所における1981～83年の平均値（気圧886.4mb、気温9.3°C）より、噴煙中心と測候所の高度差200m（中央火口高度+噴煙の高さ×0.5—測候所高度）、気温減率を6.5deg/kmとして与えた。又、相対湿度 H_e についても阿蘇山測候所における1981～83年の平均値82%を考慮して80%とおいた。 ρ_e 、 w_e 、 e_e は T_e 、 P_e 、 H_e から求められる。

本研究期間中の噴煙による平均放出水蒸気量 $\dot{W}$ 、平均放出熱量 $\dot{Q}$ は、上記平均値を(4)～(6)式に当てはめることにより、

$$V_o = 0.0133V$$

$$\dot{W} = 1.6 \times 10^2 \text{ kg/s} \dots\dots\dots (7)$$

$$\dot{Q} = 4.1 \times 10^8 \text{ J/s} \dots\dots\dots (8)$$

と求められる。ここで $w_o V_o = 7.0 \times 10^3 \text{ kg}$ 、 $w_e V_e = 11.7 \times 10^3 \text{ kg}$ 、 $W_e = 1.3 \times 10^3 \text{ kg}$ となり、噴煙中への外気の混入の効果は大きく、又凝結の効果は数%程度きいてくることがわかる（凝結を無視した場合 $\dot{W} = 1.3 \times 10^2 \text{ kg/s}$ 、 $\dot{Q} = 3.3 \times 10^8 \text{ J/s}$ 、混合も無視した場合 $\dot{W} = 3.9 \times 10^2 \text{ kg/s}$ 、 $\dot{Q} = 9.7 \times 10^8 \text{ J/s}$ となる）。

(5)式において、噴煙は連続的に放出されとしたが、現実には間欠的に放出されることが多い。噴煙が放出されている割合を α （噴煙の放出率と呼ぶ）とすると、平均放出水蒸気量 $\dot{W}$ は、

$$\dot{W} = \alpha \cdot \frac{w_o V_o}{h/v} \dots\dots\dots (5')$$

となる。 $\dot{Q}$ も同様に修正される。 α がどの程度の大きさになるか問題となる。

図1.1.36のように噴煙の形状を6つの型及び噴煙なし（TYPE 0）に分類し、その発生率を求めた（09時の観測による）。また、各TYPEに対する、 α は観測時間に対する噴煙の噴出継続時間から与えた。

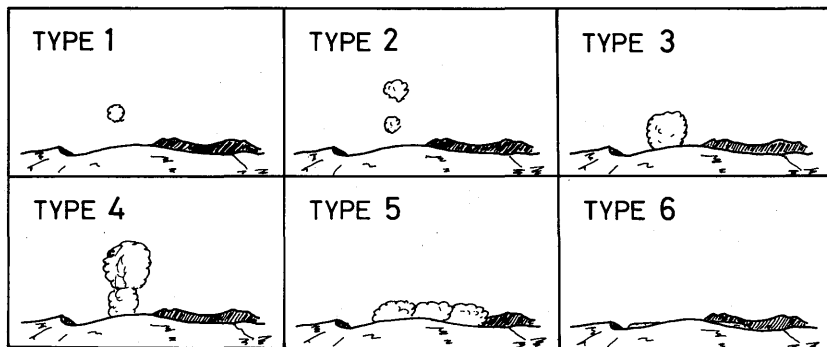


図1.1.36 噴煙上昇の形別分類

TYPE	0	1	2	3	4	5	6	計
FREQUENCY (%)	211 (32)	53 (8)	159 (24)	125 (19)	37 (6)	67 (10)	3 (1)	655 (100)
α	0	0.1	0.5	1	1	1	1	

この表から、噴煙の平均出現率としての α は0.5となる。この数値を用いて、(7)、(8)を補正すると、

$$\dot{W}=7.9 \times 10^4 \text{ kg/s} \dots\dots\dots (9)$$

$$\dot{Q}=2.0 \times 10^8 \text{ J/s} \dots\dots\dots (10)$$

となる。

なお、噴出初期の温度 T_0 、外気の温度 T_e 、相対湿度 H_e 及び噴煙の温度 T の違いによって、 $\dot{W}$ 、 $\dot{Q}$ は次のように変化する。

$$\Delta T_0 = \pm 10^\circ \text{C} \rightarrow \Delta \dot{W} = \mp 1\%, \Delta \dot{Q} = \mp 2\%$$

$$\Delta T_e = \pm 1^\circ \text{C} \rightarrow \Delta \dot{W} = \mp 25\%, \Delta \dot{Q} = \mp 25\%$$

$$\Delta H_e = \pm 10\% \rightarrow \Delta \dot{W} = \mp 25\%, \Delta \dot{Q} = \mp 25\%$$

$$\Delta T = \pm 1^\circ \text{C} \rightarrow \Delta \dot{W} = \pm 30\%, \Delta \dot{Q} = \pm 30\%$$

ΔT_0 に対する、 $\Delta \dot{W}$ 、 $\Delta \dot{Q}$ は他の量による変化に比べて小さく、 T_0 の測定がない時も、 100°C と仮定して $\dot{W}$ 、 $\dot{Q}$ を求めても大差はない。今回適用した方法では、気象要素の観測を並行して行うことが重要となる。

噴煙によって放出される熱量の推定にBriggs (1969) による plume rise の式

$$\dot{Q} = 1.1 \times 10^5 \frac{h^3 u^3}{x^2} \quad (\text{J/s}) \dots\dots\dots (11)$$

u : 風速 (m/s)

h : 熱源からの水平距離 x (m) の点における煙の高さ (m)

を用いることが試みられている (鍵山、1978)。噴煙は風と同じ速度で移動するものと仮定して、この方法を適用してみる。

上の仮定により

$$x = u\tau$$

ここで τ は噴煙が出現している時間で、上昇速度 v を用いると

$$\tau = \frac{h}{v}$$

以上より(11)式は

$$\dot{Q}=1.1 \times 10^5 v^2 h u \cdots \cdots \cdots (12)$$

と変形できる。uとして阿蘇山測候所の1981～83年の平均値4.6m/sを用い、h、vは(7)、(8)で用いたものを使うと

$$\dot{Q}=4.4 \times 10^8 \text{ J/s} \cdots \cdots \cdots (13)$$

となる。この値に対しても噴煙の放出率 α による補正が必要であり、これによって求められる値は(10)で求めたものに一致する。しかし、Briggsの式は平均的な大気状態に対する実験式であり、噴煙の温度及び大気の状態が観測される場合、今回用いた方法(4)～(6)（あるいは(4)(5)(6)）で $\dot{W}$ 、 $\dot{Q}$ を求めることがより望ましく、噴煙量の季節変化を考慮することができる。Briggsの式の適用は、可視光検知装置で得られる資料のみから求められることに利点がある。

10.3 噴煙によって放出されるSO₂量の推定

幅 ℓ を持った噴煙が、上昇速度 v で連続的に放出されているとする。噴煙中の視線方向の気柱の平均SO₂濃度 $\bar{s}$ を用いると、単位時間当りのSO₂放出量 $\dot{G}$ は

$$\dot{G}=k \bar{s} \ell v \cdots \cdots \cdots (14)$$

で求められる。ここで k は体積濃度を重量濃度に換算するための係数で

$$k=2.86 \times 10^{-6} \text{ kg/m}^3 \text{ ppm} \cdots \cdots \cdots (15)$$

である。

本研究で測定されたSO₂濃度は噴煙中の最高濃度で $s_{\max}$ であった。噴煙は鉛直方向を軸とする回転体であると仮定すると、

$$\bar{s}=\frac{\pi}{4} s_{\max}$$

となる。10.2の表で与えた値を用いると

$$\dot{G}=0.27 \text{ kg/s}=23 \text{ ton/day} \cdots \cdots \cdots (16)$$

となる。 $\dot{W}$ 、 $\dot{Q}$ と同様に放出率 α による補正を施すと

$$\dot{G}=0.14 \text{ kg/s}=11 \text{ ton/day} \cdots \cdots \cdots (17)$$

となる。この結果は、1976～77年の比較的静穏ではあるが、時々小噴火を起こした時期に測定された値50～80ton/day（太田他、1978）と比べオーダーは同じではあるが、値は小さい。

H₂OとSO₂の質量比は(9)、(17)より600：1となった。この値は、他のいくつかの火山で求められた値10～10³：1（鍵山、1978）に含まれている。

今回得られた放出水蒸気量、熱量、SO₂量は阿蘇火山の静穏期を代表するものと言える。

11. 噴煙塊の温度分布

噴煙の熱映像は噴煙塊表面の温度分布を示すが、同時に、ある程度噴煙塊内部の熱分布をも反映する。図1.1.37は赤外線検知装置で得られた噴煙熱映像（口絵写真3）にもとづく噴煙塊の温

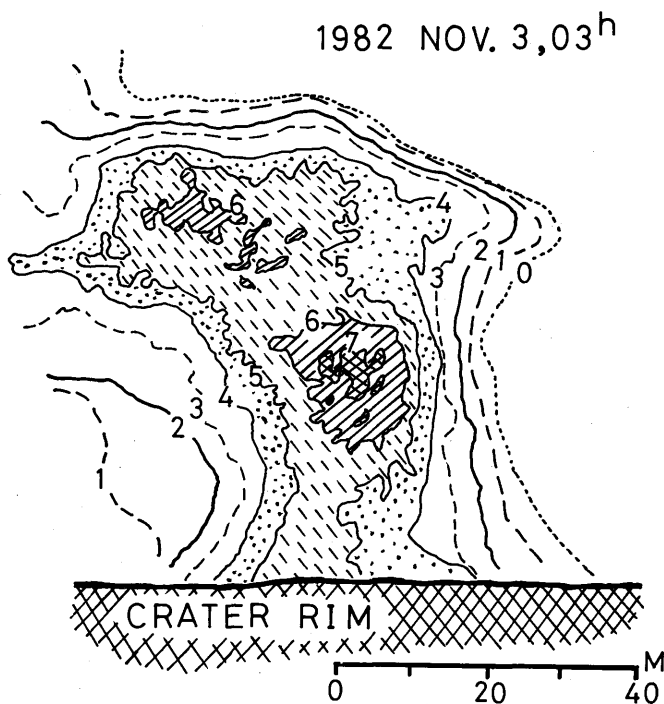


図1.1.37 口絵写真2の熱映像内の噴煙塊の温度分布。数字は相対的な温度差(°C)である。

度分布の例である。噴煙の高さは約70m、火口縁と噴煙との温度差は6°Cで、このときは火口縁の温度が高く現われている。噴煙塊の温度分布において最高温度を示す領域は火口縁上約30mにあり、噴煙の外縁との温度差は7°Cである。噴煙の表面温度が最高値を示す領域は噴煙塊の主要部であると考えられるが、通常は火口縁付近に位置することが多い。図1.1.37の場合は風が弱く、かつ下方から噴煙が連続して上昇したような状況での噴煙塊である。

また、噴煙の熱映像により噴煙の外形を判別することもできる。図1.1.38は赤外線映像装置(4.2.3項、図1.1.8)による熱映像(口絵写真4)にもとづく噴煙塊と火口縁の温度分布の例である。観測小屋わきから撮影したもので、風は殆んど無く、撮影視野内にはうすい雲がわずかにあり(雲量2)、周辺気温は11.2°C、やや太陽の直射があった(図中の白、黒矢印は次の図1.1.39と対応する位置を示す)。視野内の雲は、雲より高温域を抽出することで除去でき、噴煙外形には殆んど影響が無かった。噴煙の高さは約280mで、塊状の噴煙の上昇が繰り返されていた。太陽光の直射がやや付加されているものの、上昇してきた噴煙塊(A)が火口縁付近で最高温度を示すこと、その前に上昇した噴煙塊(B)がやや高温を保ちつつ拡散すること、さらにその前の噴煙塊(C)が消散直前である状況、そしてそれぞれの温度分布や形状の変化を把握できる。

また、図1.1.39は同じく赤外線映像装置による夜間の温度分布図の例である。観測小屋わきか

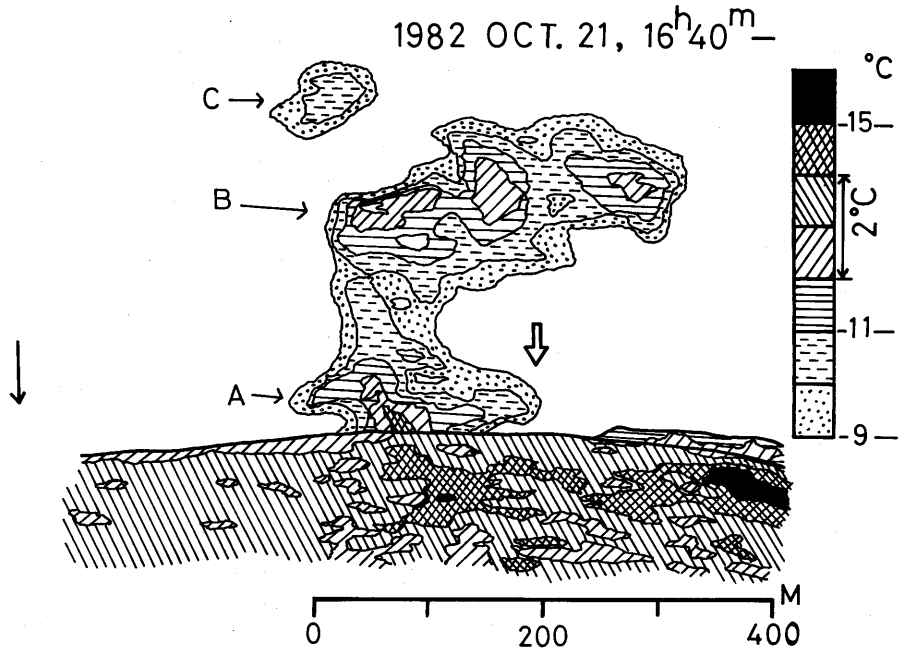


図1.1.38 口絵写真3の熱映像にもとづく噴煙塊、火口縁の温度分布。白、黒矢印は図1.1.39との位置関係を示す。

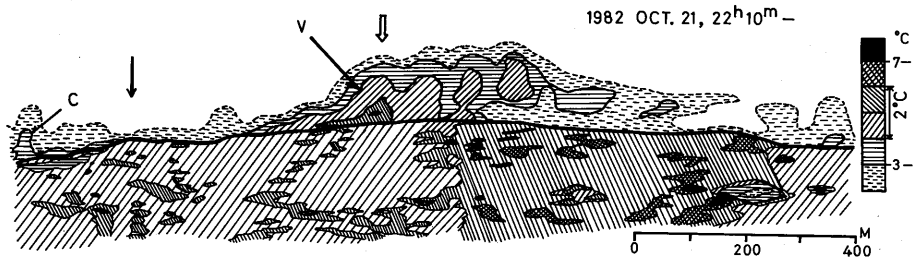


図1.1.39 赤外線映像装置による1982年10月21日22時10分～18分の熱映像

ら撮影し、風は弱く、周辺気温は8.2°C、暗夜であった。熱映像中に高岳の地形が見えないこと、図中Cと印した低温側の温度域が火口上にもあることから火口上ないし後方には低層の雲か霧があったと思われる。その中に図中Vと印したやや高温の領域の移動が見られ、火口付近にはさらに高温部があるのでVと印した領域が噴煙塊であろう。したがって後方に雲が存在していても熱映像によって噴煙外形とその移動状況を把握することが可能である。

12. 噴煙の色調処理

可視光検知装置で噴煙を検出する際、周辺の雲と噴煙との判別が問題となる。口絵写真4は可視光検知装置による噴煙の観測状況で、周辺に雲が多いものの噴煙の判別が可能である。そのスケッチを図1.1.40に示すが、図中A、Bは人間が判別した噴煙塊で、噴煙の高さ、幅、面積は、

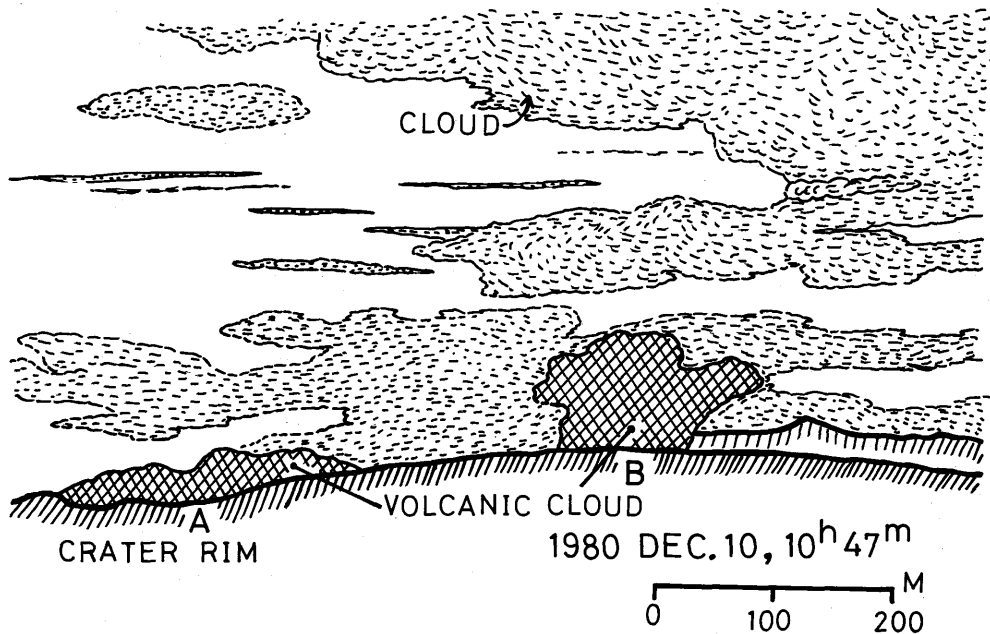


図1.1.40 口絵写真4の可視画像のスケッチ。A、Bが噴煙。

Aではそれぞれ40m、260m、 $70 \times 10^2 \text{m}^2$ 、Bでは100m、190m、 $170 \times 10^2 \text{m}^2$ である。

4.1.4項、図1.1.7に示した色調処理器で可視画像出力をR、G、Bの3色調信号に分離した上で周辺の雲との分離を行いカラー表示した結果が口絵写真5である。図1.1.41にはその結果を相対的な色調レベルで表わした。周辺の雲との分離の際、Rを消去ないし極く低いレベルに置き、Gを強調し、Bは低レベルにした時が、噴煙を抽出する上で効果があった。このことは、TVカメラ撮像管ではG領域がR、Bと比べて感度が高いという一般的な特性のほかに、噴煙塊表面における太陽光散乱の状況が雲と異なることも反映しているのであろう。図1.1.41の抽出した噴煙A、Bは、人間が判別した広がりより10%ほど小さい。しかし、図1.1.41で14と表示した領域も含めると周辺の雲や火口縁内にも同じレベルの領域が現われてくる。

なお、噴煙塊が薄い場合には当装置による雲と噴煙の差のエンハンスメントや、人間による判別は困難である。将来、撮像カメラなどの波長特性を考慮する必要がある。

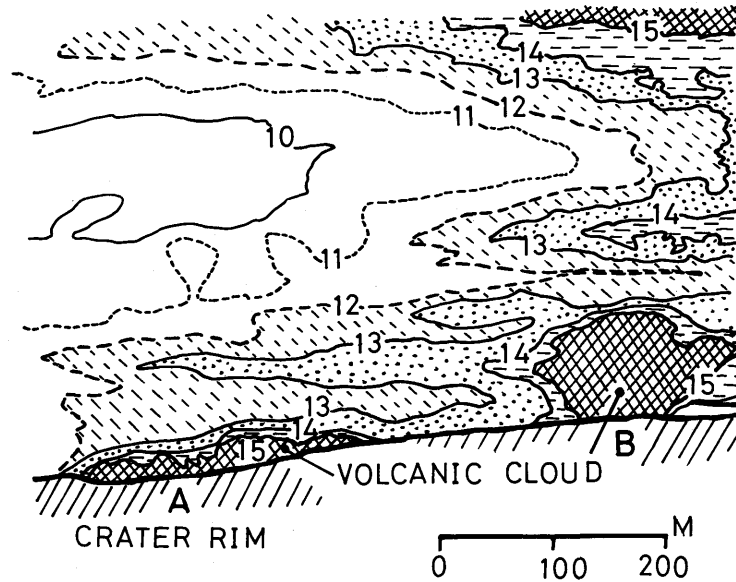


図1.1.41 口絵写真5で示した解析例にもとづく相対的な色調のレベル (各数字)

13. ま と め

可視光、赤外線、紫外線を用いた噴煙観測システムを開発し、阿蘇山へ設置して観測を行った。可視光では噴煙の色、量、高さ、幅、噴出速度等を、赤外線では噴煙の温度を、紫外線では噴煙中の SO_2 濃度を観測するようにした。

観測装置は噴煙がよく見える無人小屋に設置した。観測はコントローラーによって自動的に行われ、観測資料は阿蘇山測候所の現業室へテレメーターされ、テレビ画面でモニターされると同時に、テープ等に記録された。

一方、気象研究所には噴煙資料の解析部をおき、阿蘇山測候所から送られたテープ等を解析した。

阿蘇山の噴煙は従来、阿蘇山測候所により、主として目視観測が行われていたが、この装置を用いると観測精度が格段と良くなることがわかった。また、従来は全く手がつけられていなかった噴煙の温度や、噴煙中の SO_2 等も観測できるので、火山活動と噴煙活動との関係を明らかにするために、有望な装置である。さらに、この装置は、気象官署から火山が見えない場合にも、観測装置を火山の見える所に置き、そこから官署までテレメーターすることによって、噴煙の遠望観測を可能にする。

この特別研究実施中(1980~1984年)の阿蘇山の火山活動は静穏であったので、平穏時における噴煙活動の状況を把握することができた。すなわち、噴煙は気象要素の影響を受けて冬期に多

く、夏期に少なくなるような年変化をしている。平均的な測定量としては次のように求められた。

噴煙の高さ120m、噴煙量 $2 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、噴煙の温度 13°C 、噴煙中の SO_2 量 310 ppm-m

また、噴煙によって放出される水蒸気量は $7 \times 10^3 \text{ ton/day}$ 、熱量は $5 \times 10^7 \text{ cal/sec}$ 、 SO_2 量は 11 ton/day と推測される。

〔付〕 火口周辺の光波測量

阿蘇山には昭和49～53年度気象研究所特別研究「火山噴火予知の研究」に関連して設けられた測量網（図1.1.42）がある。これを利用し、昭和50～53年度の特別研究期間中、ジオジメーターAGA—6BLにより辺長測量を年1回実施した。

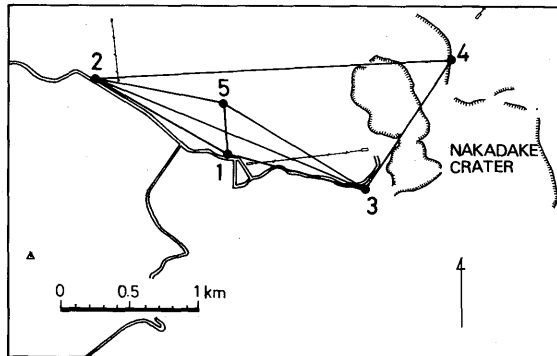


図1.1.42 阿蘇山における光波測量網

測線1—5は観測誤差が大きく出ることが明らかになったので測量を中止した。基点4は1979年の大爆発により埋没し使用できなかった。従って、基点1、2、3で囲まれた三角形について測量を行った。

表1.1.8に測量結果を、図1.1.43に各測線の歪量の変化を示す。ここで歪量は第1回目の測量（1975年3月27～28日）を基準としている。又、図中最終観測時に付した縦線は最大測量誤差（田中他1982）を示し、上部の矢印等は噴火活動（気象庁火山報告による）を示す。特に、1979年9月6日の爆発は死者3名を出す大規模なものであった（第2編参照）。

図1.1.44に三角形1-2-3により求めた主歪を（I）1975年3月～9月、（II）1975年9月～76年3月、（III）1976年3月～80年12月、（IV）1980年12月～81年11月、（V）1981年11月～83年11月の期間に分けて示す。主歪の大きさ及び方向は2回の測量のうち、前の測量値を基準として計算した。実線は伸び、破線は縮みで、矢印は中岳第一火口の方向である。測線2—3については1980年の測量が欠測となったので、 -3×10^{-5} を仮定して計算したものを示した（1975～76年の歪量を

表1.1.8 阿蘇山における辺長測量結果

D : 斜距離

ϵ : 歪量 (－は縮み)

測線 年月日	1-2		2-3		3-1	
	D	ϵ	D	ϵ	D	ϵ
1976.3.25~28	1,058,576 ^{mm}	$\times 10^{-6}$ -17.0	2,072,035 ^{mm}	$\times 10^{-6}$ -13.0	1,035,384 ^{mm}	$\times 10^{-6}$ -16.4
1980.12.10	601	6.6	—	—	360	-39.6
1981.11.28	592	-1.9	049	-6.3	394	-6.8
1982.10.20	595	0.9	044	-8.7	399	-1.9
1983.11.9	595	0.9	043	-9.2	406	4.8

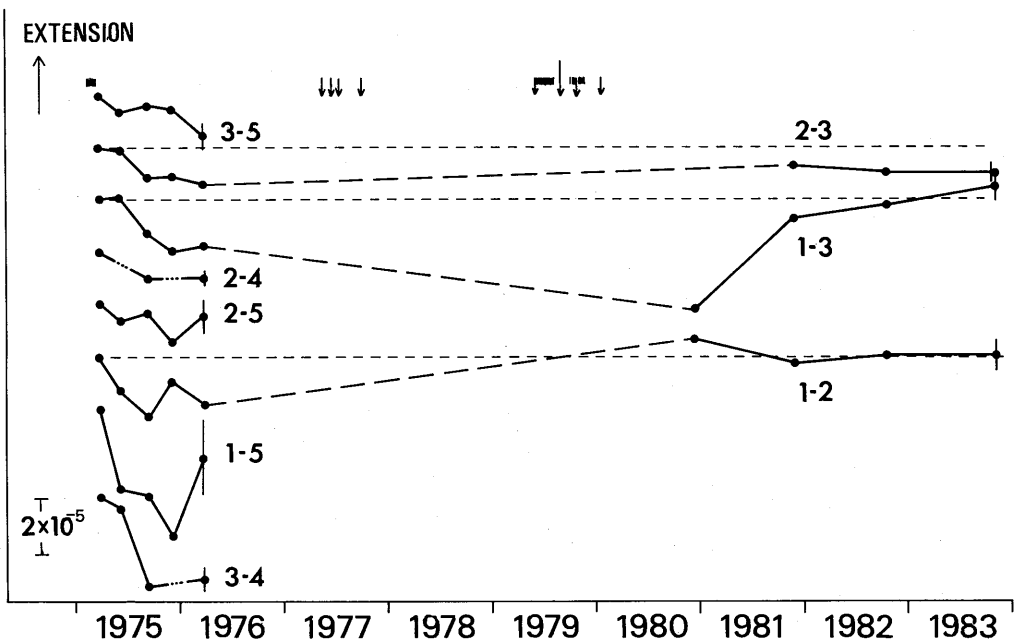


図1.1.43 光波測量による基線の伸縮

見ると測線2-3の歪量は1-3と同じような変化を示し、その量は約5分の4である)。この値に 1×10^{-5} 程度の幅をもたせると大きさでは0.5~2倍、方向については $\pm 10^\circ$ の範囲で変化する。

この三角網は扁平であるため主歪の計算誤差は大きく、歪量の標準誤差を 2×10^{-6} (田中他1982) として見積ると、(I)では 7×10^{-4} 、(II)で 1×10^{-4} 、(III)で 2×10^{-4} 、(IV)で 1×10^{-4} 、(V)で 8×10^{-4} 程度となる。

これまで種々の火山で観測された噴火前後の歪変化を考えると、1979年の大爆発前後に 10^{-3}

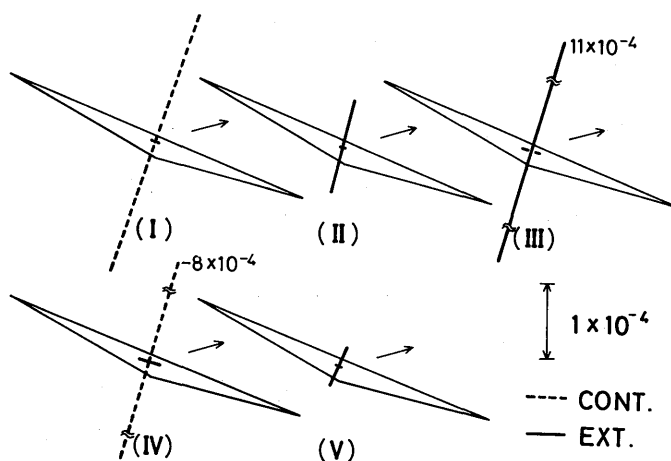


図1.1.44 観測点1—2—3でかこまれた三角形の応力変化

$\sim 10^{-4}$ のオーダーの伸びから縮みへの変動があったと推定される。この大きさは浅間山の1982年10月の爆発前後の歪変化（例えば東京大学地震研究所1983、気象研究所地震火山研究部1984）に比べ1～2桁大きなものとなっている。歪量については2倍程度の時間変動を示している。

1981年以降の伸縮は誤差範囲内でほとんど変化していない。

参考文献

Briggs, G.A. (1969): Plume Rise, AEC Critical Review Series, TID-25075, U.S. Atomic Energy Comm., Washington D.C. 1-81.

中禮正明・田中康裕 (1979): ジオジメーターによる火山周辺の地殻変動の測量、気象研究所技術報告 No. 2、39-66

鍵山正臣 (1978): 火山からの噴気による熱エネルギーと H_2O の放出量——Plume riseからの推定——、火山II、23、183-197

気象研究所地震火山研究部 (1984): 浅間山の光波測量、火山噴火予知連絡会会報、29、54-56

太田一也・松尾紉道・鎌田政明 (1978): 阿蘇火山からの二酸化イオウ放出量の遠隔測定、阿蘇火山の集中総合観測 (第2回) 報告、51-55

田中康裕・澤田可洋 (1979): 傾斜計による火山の地殻変動の観測、気象研究所技術報告No. 2、77-145

田中康裕・中禮正明・澤田可洋・紫田武男 (1982): 活火山における光波測量の精度と有意測線の検出、気象研究所研究報告、33、175-185

東京大学地震研究所 (1983): 浅間火山北東山麓における辺長と水準測量、火山噴火予知連絡会会報、26、26-32

表1.1.4 噴煙観測の捕捉率(%)

(1) 可視光検知装置

年月	観測時刻	07 ^h	09 ^h	11 ^h	13 ^h	15 ^h	17 ^h	平均*3
1980	12*1	(5)	(19)	(21)	(16)	(30)	(15)	19
1981	1	31	50	56	26	50	42	45
	2	50	54	54	57	71	75	62
	3	52	71	58	39	55	68	58
	4	(63)*2	71	76	72	69	62	70
	5		68	74	74	74	71	72
	6		63	60	70	72	60	65
	7		55	65	63	48	35	54
	8		55	71	71	80	47	65
	9		70	77	73	73	47	68
	10		71	68	55	58	39	58
	11		69	78	50	59	43	59
	12		77	74	68	71	35	65
1982	1		45	63	52	45	39	49
	2		71	70	61	63	61	65
	3		61	68	74	74	65	68
	4		80	77	77	77	70	76
	5		71	81	77	71	67	73
	6		73	73	87	83	73	78
	7		61	68	71	65	53	64
	8		61	77	81	72	57	70
	9		72	66	72	76	59	69
	10		83	81	87	93	90	87
	11		72	70	73	70	50	67
	12		71	74	84	81	77	77
1983	1		77	88	76	77	73	78
	2		61	68	75	79	75	71
	3		39	55	58	71	55	56
	4		47	57	66	67	67	60
	5		58	68	71	77	68	68
	6		67	76	79	62	66	70
	7		39	48	67	58	45	51
	8		71	71	73	69	57	68
	9		62	65	70	64	52	63
	10		81	87	81	87	77	83
	11		70	83	87	87	93	84
	12		81	81	83	77	74	79
1984	1		45	65	61	65	61	59
	2		45	55	66	64	66	59
	3*4		62	62	75	100	92	77
平	均	38.9	63.2	68.7	68.4	69.6	60.4	66.1

* 1 12日～31日(但し、07^h、09^hは11～31日)、* 2 1日～10日、* 3 07^hを除く、* 4 1日～13日(但し、13、15、17^hは1日～12日)

表1.1.4 (2) 赤外線検知装置

年月	観測時刻	03 ^h	09 ^h	13 ^h	15 ^h	21 ^h	平 均
1981	11* ¹	50	25	50	50	50	45
	12	45	61	77	63	61	62
1982	1	39	35	52	62	43	46
	2	33* ³	58	53* ³	38* ²	39	52
	3	56* ³	75* ²	50* ²	56* ³	35* ³	55
	4	—	—	—	—	43* ²	43
	5	73* ²	73* ²	73* ²	73* ²	64* ²	71
	6	53* ³	53* ³	80* ²	80* ²	60* ²	63
	6* ⁴	67* ³	73* ³	75* ³	70* ³	40* ³	64* ⁴
	7* ⁴	25* ³	30* ³	47* ³	47* ³	20* ³	33* ⁴
	7	64* ²	73* ²	50* ³	50* ³	31* ³	53
	8	45	65	77	76	36	60
	9	39	55	66	59	39	52
	10	60	70	81	87	43	68
	11	40	55	60	57	53	53
	12	48	48	77	65	57	59
1983	1	42	52	55	58	48	51
	2	36	50	68	71	46	54
	3	39	26	61	58	26	42
	4	40	40	53	60	47	48
	5	58	65	77	74	55	66
	6	63	70	79	70	57	68
	7	26	36	45	42	19	34
	8	28	28	54	—	—	39
	9	29	43	68	—	—	46
	10	45	58	65	—	—	56
	11	—	—	—	—	—	—
	12	29	43	55	48	38	43
1984	1	26	6* ³	33	33* ³	29* ³	27
	2	29	15	39	33	17	27
	3* ⁵	23	27	42	42	42	35
平	均* ⁶	41.8	48.6	61.7	59.8	42.8	51.1

* 1 27日～30日、* 2 観測日数8～14日、* 3 観測日数15～20日、

* 4 感度2℃、* 5 1日～13日、* 6 感度2℃を含まず

表1.1.4 (3) 紫外線検知装置

年月	観測時刻	09 ^h	11 ^h	13 ^h	15 ^h	平 均
1982	10* ¹	92	83	92	100	92
	11* ²	60	70	75	65	68
	12	65	61	77	71	69
1983	1	74	81	74	74	76
	2	61	71	79	79	72
	3	39	65	65	71	60
	4	53	57	63	63	59
	5	77	77	81	81	79
	6	63	67	77	97	76
	7* ²	48	57	81	81	67
	8	77	83	77	73	78
	9	70	73	70	67	70
	10	74	87	84	81	82
	11	75	83	81	80	80
	12* ³	56	94	87	60	74
1984	1	32	77	72	55	59
	2	63* ²	63* ²	56* ²	58* ²	60
	3* ⁴	46	58	40	73	55
平 均		62.6	72.6	74.5	73.6	70.8

* 1 20日～31日、* 2 観測日数20～21日、* 3 観測日数15～16日、* 4 1日～13日

表1.1.5 噴煙観測表

可視の欄

色・量・高さ・幅は可視光検知装置による観測値で、噴煙が最も高くあがった時の値を記載。

Col、Q、Hは阿蘇山測候所による噴煙の遠望観測値で、記号はそれぞれ、噴煙の色、量(階級)、高さ。観測値は各項独立に日別最大値を記載。

噴煙の色の欄でW：白、Be：青、－：現象なし、×：不明。

赤外の欄

赤外線検知装置で観測した03時、又は21時（*印）における火口縁及び噴煙表面の相対的温度。×：不明、－：現象なし。

温度検出部の外部チョッパーと火口縁、チョッパーと噴煙との温度差をそれぞれ t_1 、 t_2 とする。 $t_1 - t_2$ は火口縁と噴煙の温度差（℃単位）となる。

紫外の欄

紫外線検知装置で観測した噴煙中の SO_2 濃度（ppm-m）の日平均値。×：不明、－：現象なし。

年 月 日	可 視						
	色	量 ×10 ³ m ³	高さ ×10m	幅 ×10m	Col	Q	H ×100m
1980.12.11	W	407	19	29	W	2	1
12	×	×	×	×	×	×	×
13	×	×	×	×	×	×	×
14	×	×	×	×	×	×	×
15	W	296	22	17	W	2	2
16	×	×	×	×	W	2	1
17	W	342	14	13	W	2	1
18	W	78	7	13	W	1	1
19	×	×	×	×	W	1	1
20	W	258	10	23	W	1	0.5
21	×	×	×	×	W	1	1
22	×	×	×	×	W	1	0.5
23	×	×	×	×	×	×	×
24	×	×	×	×	×	×	×
25	×	×	×	×	W	1	1
26	×	×	×	×	W	1	1
27	×	×	×	×	×	×	×
28	×	×	×	×	W	1	0.5
29	×	×	×	×	W	1	0.5
30	W	229	13	20	W	2	2
31	×	×	×	×	W	2	2

表1.1.5 (続き)

年 月 日	可 視						
	色	量 ×10 ² m ²	高さ ×10m	幅 ×10m	Col	Q	H ×100m
1981. 1. 1	W	186	20	16	W	1	0.5
2	W	119	12	10	W	2	1
3	×	×	×	×	×	×	×
4	×	×	×	×	W	2	1
5	×	×	×	×	W	1	×
6	×	×	×	×	W	2	1
7	W	54	5	11	W	1	0.5
8	×	×	×	×	Be	1	0.5
9	W	287	20	21	W	2	1
10	×	×	×	×	W	1	0.5
11	×	215	11	20	W	1	1
12	W	103	9	22	W	1	0.5
13	W	194	9	27	W	1	0.5
14	W	337	16	29	W	2	1
15	W	120	10	12	W	1	2
16	×	×	×	×	W	2	1
17	W	497	19	35	W	2	2
18	×	×	×	×	W	1	1
19	W	127	11	13	W	1	0.5
20	W	139	7	17	W	2	1
21	×	×	×	×	W	1	0.5
22	W	645	26	21	W	1	1
23	W	118	8	12	W	1	1
24	W	246	15	20	W	1	0.5
25	×	×	×	×	W	1	1
26	W	134	14	13	W	2	1
27	W	192	14	19	W	1	1
28	W	31	7	7	W	1	0.5
29	W	349	19	25	W	2	2
30	W	106	11	7	W	1	0.5
31	×	×	×	×	W	2	2

表1.1.5 (続き)

年 月 日	可 視						
	色	量 ×10 ² m ²	高さ ×10m	幅 ×10m	Col	Q	H ×100m
1981. 2. 1	×	×	×	×	×	×	×
2	W	427	19	30	W	2	2
3	W	370	13	29	W	2	1
4	W	360	14	23	W	2	1
5	W	109	13	8	W	1	1
6	W	177	14	13	W	1	1
7	W	217	12	18	W	2	1
8	W	401	16	19	W	2	1
9	W	182	12	14	W	1	1
10	W	207	9	27	W	1	1
11	W	301	15	21	W	1	1
12	×	×	×	×	×	×	×
13	×	×	×	×	×	×	×
14	W	168	8	21	W	2	2
15	W	357	15	25	W	1	1
16	W	248	20	13	W	1	1
17	W	1080	36	32	W	2	1
18	W	149	11	14	W	2	1
19	W	105	9	11	W	1	0.5
20	W	257	14	22	W	1	2
21	W	440	19	29	W	2	1
22	W	24	6	6	W	1	1
23	×	×	×	×	W	1	1
24	W	96	7	12	W	2	1
25	W	58	6	15	W	1	1
26	×	×	×	×	W	2	1
27	×	×	×	×	W	2	1
28	W	11	5	3	W	1	0.5

表1.1.5 (続き)

年 月 日	可 視						
	色	量 ×10 ² m ²	高さ ×10m	幅 ×10m	Col	Q	H ×100m
1981. 3. 1	×	×	×	×	W	1	0.5
2	W	142	14	14	W	1	1
3	×	×	×	×	×	×	×
4	W	214	11	23	W	2	1
5	W	50	9	5	W	1	0.5
6	W	202	10	22	W	1	1
7	W	52	10	6	W	1	0.5
8	W	8	3	3	W	1	0.5
9	W	26	3	10	W	×	×
10	W	399	13	45	W	2	1
11	W	45	3	3	W	1	1
12	W	37	8	5	W	1	1
13	W	97	7	13	×	×	×
14	×	×	×	×	×	×	×
15	W	83	9	10	W	1	1
16	W	43	9	6	W	1	0.5
17	×	8	3	3	Be	1	0.5
18	×	×	×	×	Be	1	0.5
19	×	×	×	×	W	1	1
20	W	89	7	14	W	1	0.5
21	×	×	×	×	W	1	0.5
22	W	81	10	9	W	1	0.5
23	W	12	3	6	—	—	—
24	×	×	×	×	×	×	×
25	×	×	×	×	×	×	×
26	W	168	12	18	W	2	1
27	W	39	7	6	W	1	0.5
28	×	×	×	×	Be	1	0.5
29	×	×	×	×	W	1	0.5
30	×	×	×	×	Be	1	0.5
31	×	×	×	×	×	×	×

表1.1.5 (続き)

年 月 日	可 視						
	色	量 ×10 ² m ²	高さ ×10m	幅 ×10m	Col	Q	H ×100m
1981. 4. 1	W	167	12	15	W	1	0.5
2	W	199	10	25	W	1	1
3	W	114	9	18	W	1	1
4	×	×	×	×	×	×	×
5	×	×	×	×	×	×	×
6	W	221	15	17	W	1	0.5
7	W	22	5	4	W	1	0.5
8	—	—	—	—	W	1	0.5
9	×	×	×	×	×	×	×
10	×	×	×	×	×	×	×
11	W	438	19	19	W	1	0.5
12	W	72	9	11	W	1	0.5
13	W	82	11	7	W	1	0.5
14	W	213	30	10	W	1	0.5
15	W	95	9	11	W	1	1
16	×	×	×	×	×	×	×
17	W	96	10	9	W	2	1
18	W	15	4	5	Be	1	1
19	×	×	×	×	×	×	×
20	W	250	11	30	×	×	×
21	W	36	7	6	W	1	0.5
22	W	11	3	3	—	—	—
23	W	107	13	8	—	—	—
24	W	201	10	21	W	1	1
25	W	103	12	12	W	2	1
26	×	×	×	×	W	1	0.5
27	—	—	—	—	W	1	0.5
28	W	58	7	7	W	1	0.5
29	W	62	12	7	×	×	×
30	W	164	8	20	W	2	2

表1.1.5 (続き)

年 月 日	可 視					
	色	量 ×10 ² m ²	高さ ×10m	幅 ×10m	Col	Q ×100m H
1981. 5. 1	W	66	6	12	W	1 0.5
2	×	×	×	×	W	1 1
3	W	118	12	9	W	2 1
4	W	76	10	9	W	1 0.5
5	×	×	×	×	W	1 0.5
6	×	×	×	×	×	×
7	W	128	10	16	W	1 0.5
8	—	—	—	—	—	—
9	W	97	15	9	W	1 1
10	×	×	×	×	×	×
11	×	×	×	×	×	×
12	W	54	7	9	W	1 0.5
13	W	45	3	14	W	1 1
14	—	—	—	—	W	1 1
15	W	111	12	10	W	1 1
16	W	65	10	7	W	1 1
17	W	449	19	36	W	2 1
18	W	270	17	16	W	2 1
19	W	386	21	18	W	1 1
20	W	36	7	7	W	1 1
21	W	39	7	7	W	1 1
22	—	—	—	—	W	1 0.5
23	W	22	5	4	Be	1 1
24	×	×	×	×	W	1 1
25	—	—	—	—	W	1 0.5
26	—	—	—	—	—	—
27	—	—	—	—	—	—
28	×	×	×	×	×	×
29	W	16	5	5	W	1 0.5
30	W	23	7	4	—	—
31	—	—	—	—	—	—

表1.1.5 (続き)

年 月 日	可 視					
	色	量 ×10 ² m ²	高さ ×10m	幅 ×10m	Col	Q ×100m H
1981. 6. 1	W	597	20	35	W	1 1
2	×	×	×	×	—	—
3	—	—	—	—	—	—
4	W	22	6	4	—	—
5	W	29	6	8	W	1 1
6	W	14	5	4	W	1 0.5
7	—	—	—	—	W	1 0.5
8	W	17	5	4	W	1 0.5
9	W	81	7	17	—	—
10	W	246	15	18	W	1 1
11	W	65	9	8	W	1 1
12	×	×	×	×	×	×
13	×	×	×	×	W	1 2
14	W	174	15	16	W	2 2
15	W	108	12	8	W	2 2
16	W	58	7	10	W	1 1
17	W	166	10	18	W	1 0.5
18	×	×	×	×	×	×
19	W	426	32	14	W	1 0.5
20	×	×	×	×	×	×
21	W	270	17	19	W	1 1
22	W	26	5	5	W	1 0.5
23	W	149	11	12	W	1 0.5
24	—	—	—	—	—	—
25	×	×	×	×	W	1 0.5
26	×	×	×	×	×	×
27	×	×	×	×	×	×
28	W	54	6	10	W	1 1
29	×	×	×	×	×	×
30	W	162	13	15	W	2 1

表1.1.5 (続き)

年 月 日	可 視						
	色	量 ×10 ² m ²	高さ ×10m	幅 ×10m	Col	Q	H ×100m
1981. 7. 1	W	209	11	17	W	1	1
2	W	89	9	10	W	1	0.5
3	×	×	×	×	W	1	1
4	×	×	×	×	×	×	×
5	W	16	5	4	W	1	1
6	W	167	9	17	W	1	1
7	W	68	6	17	W	1	0.5
8	W	97	10	12	W	×	×
9	W	40	7	7	W	1	0.5
10	×	×	×	×	W	1	1
11	×	×	×	×	W	1	0.5
12	W	80	9	10	W	1	1
13	×	×	×	×	W	1	1
14	×	×	×	×	W	1	0.5
15	W	615	29	28	W	2	1
16	W	24	5	7	W	1	3
17	W	577	21	25	W	1	0.5
18	×	×	×	×	—	—	—
19	×	×	×	×	W	2	1
20	×	×	×	×	W	1	1
21	W	277	11	26	W	1	1
22	W	283	11	28	W	2	1
23	W	57	7	9	W	1	1
24	W	383	14	32	W	1	1
25	W	124	7	17	W	1	0.5
26	W	×	×	×	W	1	0.5
27	W	359	17	23	W	1	2
28	W	70	5	16	—	—	—
29	×	×	×	×	W	1	0.5
30	W	64	17	6	W	1	0.5
31	×	×	×	×	×	×	×

表1.1.5 (続き)

年 月 日	可 視						
	色	量 ×10 ² m ²	高さ ×10m	幅 ×10m	Col	Q	H ×100m
1981. 8. 1	×	×	×	×	×	×	×
2	×	×	×	×	W	1	0.5
3	W	42	4	7	Be	1	1
4	×	×	×	×	W	2	2
5	×	×	×	×	W	2	1
6	W	79	8	12	W	1	1
7	—	—	—	—	W	1	0.5
8	×	×	×	×	×	×	×
9	×	×	×	×	W	1	1
10	W	73	9	8	W	1	0.5
11	×	×	×	×	×	×	×
12	W	18	3	6	W	1	0.5
13	W	369	18	24	W	1	1
14	W	295	26	18	×	×	×
15	—	—	—	—	—	—	—
16	—	—	—	—	—	—	—
17	×	×	×	×	—	—	—
18	×	×	×	×	—	—	—
19	×	×	×	×	W	1	1
20	W	20	5	5	W	1	0.5
21	W	1790	47	47	W	1	3
22	×	×	×	×	W	1	0.5
23	W	726	21	39	W	1	0.5
24	W	28	7	6	W	1	1
25	—	—	—	—	W	1	1
26	W	100	9	8	W	1	1
27	×	×	×	×	×	×	×
28	W	60	4	13	W	1	1
29	×	×	×	×	W	1	0.5
30	W	67	7	12	W	1	0.1
31	W	16	3	4	W	1	0.1

表1.1.5 (続き)

年 月 日	可 視					
	色	量 ×10 ² m ²	高さ ×10m	幅 ×10m	Col	Q ×100m
1981. 9. 1	W	74	10	7	W	1
2	W	102	13	8	W	1
3	×	×	×	×	×	×
4	×	×	×	×	×	×
5	W	371	13	33	W	1
6	W	17	7	4	—	—
7	W	166	13	13	—	—
8	W	91	7	9	W	1
9	W	152	7	9	W	1
10	W	505	22	30	W	1
11	W	80	6	9	W	1
12	W	370	19	25	×	×
13	W	444	16	28	W	1
14	W	232	10	31	—	—
15	W	243	18	17	W	1
16	W	169	30	24	W	1
17	W	85	8	6	W	1
18	W	482	16	34	W	1
19	×	×	×	×	×	×
20	×	×	×	×	W	1
21	W	63	7	6	W	1
22	W	402	25	19	W	1
23	W	3100	71	62	W	1
24	×	×	×	×	×	×
25	×	×	×	×	W	1
26	W	86	6	20	W	1
27	×	×	×	×	—	—
28	W	61	6	13	Be	1
29	×	×	×	×	W	1
30	W	38	6	6	W	1

表1.1.5 (続き)

年 月 日	可 視					
	色	量 ×10 ² m ²	高さ ×10m	幅 ×10m	Col	Q ×100m
1981.10. 1	W	328	15	23	W	1
2	W	99	8	17	W	1
3	W	203	14	14	W	2
4	—	—	—	—	W	1
5	×	×	×	×	×	×
6	W	95	9	14	W	1
7	×	×	×	×	×	×
8	×	×	×	×	×	×
9	W	102	5	17	W	1
10	W	43	5	9	W	1
11	W	23	5	5	W	2
12	—	—	—	—	—	—
13	W	68	8	11	W	1
14	W	214	12	23	W	2
15	W	57	8	7	W	2
16	W	17	4	4	W	1
17	—	—	—	—	—	—
18	—	—	—	—	W	1
19	W	1240	36	40	W	1
20	W	712	21	29	W	1
21	×	×	×	×	W	1
22	W	1600	31	54	W	1
23	W	124	10	12	W	1
24	W	252	13	19	W	2
25	W	106	11	10	W	2
26	W	176	13	12	W	1
27	×	×	×	×	W	1
28	×	×	×	×	W	1
29	W	457	23	24	W	1
30	W	9	5	3	W	1
31	W	19	6	4	W	1

表1.1.5 (続き)

年 月 日	可 視							赤 外	
	色	量	高さ	幅	Col	Q	H	t ₁	t ₂
		×10 ² m ²	×10m	×10m			×100m		
1981.11. 1	W	1030	38	47	W	2	3		
2	×	×	×	×	W	1	0.5		
3	W	93	11	9	W	1	1		
4	W	362	12	29	W	1	1		
5	W	342	17	20	W	1	2		
6	W	186	12	14	W	2	×		
7	×	×	×	×	W	2	1		
8	W	156	13	9	W	2	1		
9	W	478	19	31	W	1	0.5		
10	W	298	20	18	W	1	1		
11	W	475	19	31	W	1	1		
12	W	42	7	7	W	1	1		
13	W	119	7	10	W	1	1		
14	W	72	6	7	W	1	1		
15	W	219	11	22	W	1	2		
16	×	×	×	×	W	2	0.5		
17	W	184	10	14	W	1	1		
18	W	19	4	5	W	2	3		
19	W	53	14	6	W	1	1		
20	W	18	4	5	W	1	0.5		
21	W	1030	22	85	W	1	1		
22	W	79	7	14	W	1	1		
23	×	×	×	×	×	×	×		
24	—	—	—	—	—	—	—		
25	×	×	×	×	W	1	0.5		
26	×	×	×	×	W	2	2		
27	W	436	14	35	W	1	1		
28	×	×	×	×	W	1	1	27	10
29	W	371	23	21	W	1	1	*20	14
30	W	55	8	9	W	1	2	×	×

(11月28日観測開始)

表1.1.5 (続き)

年 月 日	可 視							赤 外	
	色	量	高さ	幅	Col	Q	H	t ₁	t ₂
		×10 ² m ²	×10m	×10m			×100m		
1981.12. 1	×	×	×	×	W	1	1	×	×
2	W	237	19	15	W	1	1	×	×
3	W	207	12	21	W	1	1	*28	9
4	W	130	12	14	W	1	0.5	*28	13
5	W	134	13	13	W	2	1	*22	19
6	W	313	20	16	W	2	0.5	*20	21
7	W	100	9	12	W	1	1	*21	21
8	W	212	17	12	W	1	1	*25	19
9	W	118	13	8	W	2	2	*26	24
10	W	137	11	15	W	1	1	17	16
11	W	301	18	20	W	1	1	26	21
12	W	1380	21	91	W	1	1	×	×
13	W	70	11	6	W	1	1	20	16
14	W	248	15	20	W	1	0.5	25	21
15	W	406	16	30	W	2	1	×	×
16	W	121	12	13	W	1	1	25	12
17	W	168	14	13	W	1	2	*25	13
18	W	50	6	9	W	1	1	26	22
19	×	×	×	×	×	×	×	×	×
20	×	×	×	×	×	×	×	×	×
21	W	153	14	14	W	1	1	×	×
22	W	256	20	11	W	1	1	×	×
23	×	×	×	×	×	×	×	×	×
24	W	218	12	20	W	2	1	×	×
25	W	14	3	3	W	1	0.5	*28	—
26	W	175	9	14	W	1	0.5	27	—
27	W	291	23	14	W	1	1	*17	16
28	W	5	2	4	W	1	0.5	*23	22
29	W	381	18	19	W	1	0.5	25	—
30	W	786	29	26	W	1	2	*25	14
31	W	169	8	20	W	1	0.5	×	×

表1.1.5 (続き)

年 月 日	可 視							赤 外	
	色	量	高さ	幅	Col	Q	H	t ₁	t ₂
		×10 ² m ²	×10m	×10m			×100m		
1982. 1. 1	W	423	20	21	W	1	1	×	×
2	×	×	×	×	W	1	1	*28	8
3	—	—	—	—	W	1	0.5	26	—
4	×	×	×	×	W	1	0.5	×	×
5	×	×	×	×	W	1	1	*21	14
6	W	39	8	7	W	1	1	26	8
7	W	340	19	24	W	1	1	*24	15
8	W	182	13	19	W	1	1	26	10
9	W	245	17	13	W	1	1	*26	25
10	W	206	21	10	W	1	1	23	21
11	W	33	4	4	—	—	—	*18	13
12	W	115	12	8	W	1	0.5	18	18
13	W	70	8	7	W	1	1	26	21
14	W	1280	27	48	W	1	1	*27	7
15	W	306	17	20	W	1	1	25	—
16	×	×	×	×	W	1	0.5	×	×
17	W	257	13	24	W	1	2	*24	23
18	×	×	×	×	W	×	×	×	×
19	×	×	×	×	W	1	0.5	×	×
20	W	202	11	19	W	1	1	×	×
21	×	×	×	×	W	1	1	×	×
22	W	34	5	9	W	1	1	×	×
23	W	616	21	31	W	1	1	*26	—
24	×	×	×	×	W	1	×	×	×
25	W	174	13	15	W	1	1	*23	20
26	W	125	6	19	W	1	0.5	21	—
27	W	163	6	16	W	×	×	×	×
28	W	135	16	10	W	1	0.5	×	×
29	W	1040	16	75	W	1	0.5	×	×
30	W	376	24	19	W	2	5	×	×
31	×	×	×	×	W	1	0.5	18	—

表1.1.5 (続き)

年 月 日	可 視							赤 外	
	色	量	高さ	幅	Col	Q	H	t ₁	t ₂
		×10 ² m ²	×10m	×10m			×100m		
1982. 2. 1	×	×	×	×	×	×	×	×	×
2	W	502	27	18	W	1	2	18	23
3	W	88	10	8	W	1	1	×	×
4	W	53	6	7	W	1	0.5	×	×
5	W	496	24	20	W	1	1	×	×
6	W	104	7	10	W	1	0.8	×	×
7	W	832	30	30	W	2	2	×	×
8	W	183	16	13	W	1	1	*25	15
9	W	84	13	8	W	1	1	27	—
10	W	285	18	18	W	1	1	*19	16
11	—	—	—	—	—	—	—	18	—
12	—	—	—	—	W	1	0.5	×	×
13	W	3	2	3	W	1	0.5	×	×
14	W	189	12	15	W	1	1	*21	10
15	W	75	12	7	W	1	1	*25	—
16	×	×	×	×	×	×	×	15	11
17	×	×	×	×	×	×	×	×	×
18	—	—	—	—	—	—	—	23	—
19	×	×	×	×	×	×	×	×	×
20	×	×	×	×	×	×	×	×	×
21	×	×	×	×	×	×	×	×	×
22	W	194	15	15	W	1	1	*15	—
23	—	—	—	—	W	1	1	15	—
24	×	×	×	×	×	×	×	×	×
25	W	422	14	33	W	1	0.5	25	15
26	W	66	7	10	W	1	0.7	×	×
27	W	418	18	27	W	1	2	×	×
28	W	209	11	22	W	1	1	20	9

表1.1.5 (続き)

年 月 日	可 視							赤 外	
	色	量	高さ	幅	Col	Q	H	t ₁	t ₂
		×10 ² m ²	×10m	×10m			×100m		
1982. 3. 1	×	×	×	×	×	×	×	×	×
2	W	246	15	19	W	1	1	×	×
3	W	238	17	13	W	1	0.5	22	13
4	×	×	×	×	W	1	1	17	12
5	×	×	×	×	×	×	×	×	×
6	W	262	14	17	W	1	1	*17	10
7	W	43	7	7	W	1	1	13	11
8	W	152	14	12	W	1	1	*15	14
9	W	3	2	2	W	1	1	*15	14
10	W	5	3	2	—	—	—	23	18
11	—	—	—	—	W	1	0.5	×	×
12	×	×	×	×	W	1	0.5	×	×
13	W	57	7	12	W	1	1	×	×
14	×	×	×	×	W	1	0.5	24	—
15	×	×	×	×	×	×	×	×	×
16	W	47	5	7	W	1	0.5	×	×
17	W	7	4	4	—	—	—	19	11
18	W	190	12	22	×	×	×	×	×
19	×	×	×	×	W	1	1	×	×
20	×	×	×	×	×	×	×	×	×
21	×	×	×	×	×	×	×	*21	5
22	—	—	—	—	—	—	—	22	—
23	×	×	×	×	×	×	×	17	7
24	W	131	6	25	W	1	0.5	×	×
25	W	510	13	29	W	1	1	×	×
26	W	6	3	3	W	1	2	*15	—
27	—	—	—	—	W	1	0.5	×	×
28	W	36	5	8	—	—	—	15	14
29	—	—	—	—	W	1	0.1	23	—
30	—	—	—	—	W	1	1	×	×
31	W	57	6	15	×	×	×	×	×

表1.1.5 (続き)

年 月 日	可 視							赤 外	
	色	量	高さ	幅	Col	Q	H	t ₁	t ₂
		×10 ² m ²	×10m	×10m			×100m		
1982. 4. 1	W	31	5	4	—	—	—	×	×
2	—	—	—	—	—	—	—	25	—
3	×	×	×	×	W	1	2	×	×
4	W	58	7	8	W	1	1	×	×
5	W	18	5	4	W	1	1	×	×
6	×	×	×	×	×	×	×	×	×
7	W	598	20	36	×	×	×	×	×
8	W	164	10	15	W	1	1	21	14
9	W	208	12	16	W	1	1	×	×
10	W	239	13	20	W	1	1	*24	—
11	—	—	—	—	—	—	—	24	—
12	W	139	14	12	W	1	1	×	×
13	—	—	—	—	×	×	×	×	×
14	W	292	13	21	W	1	1	×	×
15	W	147	8	22	W	1	1	×	×
16	×	×	×	×	×	×	×	×	×
17	W	67	7	10	W	1	2	×	×
18	W	221	17	14	W	1	1	×	×
19	—	—	—	—	—	—	—	×	×
20	W	26	4	4	W	1	0.5	22	—
21	×	×	×	×	×	×	×	×	×
22	—	—	—	—	—	—	—	×	×
23	—	—	—	—	—	—	—	×	×
24	—	—	—	—	W	1	4	×	×
25	—	—	—	—	—	—	—	×	×
26	×	×	×	×	—	—	—	×	×
27	×	×	×	×	W	1	0.3	×	×
28	×	×	×	×	W	1	0.5	×	×
29	W	1290	27	53	W	1	0.5	×	×
30	W	1320	33	53	W	1	1	×	×

表1.1.5 (続き)

年 月 日	可				視			赤 外	
	色	量	高さ	幅	Col	Q	H	t ₁	t ₂
		×10 ² m ²	×10m	×10m			×100m		
1982. 5. 1	W	109	6	19	W	1	1	×	×
2	×	×	×	×	×	×	×	×	×
3	W	46	6	6	W	1	1	×	×
4	W	17	4	6	W	1	0.5	×	×
5	—	—	—	—	W	1	0.5	×	×
6	×	×	×	×	×	×	×	×	×
7	—	—	—	—	—	—	—	×	×
8	—	—	—	—	—	—	—	×	×
9	×	×	×	×	×	×	×	×	×
10	W	39	6	9	W	1	0.5	×	×
11	W	80	8	14	W	1	0.5	×	×
12	—	—	—	—	—	—	—	×	×
13	×	×	×	×	×	×	×	×	×
14	×	×	×	×	W	1	1	×	×
15	—	—	—	—	—	—	—	×	×
16	W	23	5	9	—	—	—	×	×
17	W	159	12	13	W	1	2	×	×
18	—	—	—	—	—	—	—	×	×
19	—	—	—	—	W	1	2	×	×
20	W	43	7	9	W	1	2	*18	20
21	W	63	8	9	W	1	1	*24	—
22	—	—	—	—	—	—	—	22	—
23	—	—	—	—	—	—	—	20	13
24	—	—	—	—	W	1	0.5	*22	—
25	—	—	—	—	—	—	—	22	—
26	—	—	—	—	—	—	—	15	16
27	—	—	—	—	—	—	—	19	—
28	W	56	8	6	×	×	×	21	—
29	W	305	16	20	W	1	1	×	×
30	W	249	14	19	×	×	×	×	×
31	×	×	×	×	×	×	×	×	×

表1.1.5 (続き)

年 月 日	可				視			赤 外	
	色	量	高さ	幅	Col	Q	H	t ₁	t ₂
		×10 ² m ²	×10m	×10m			×100m		
1982. 6. 1	×	×	×	×	×	×	×	×	×
2	W	18	3	6	W	1	0.5	×	×
3	W	48	9	5	W	1	0.5	×	×
4	W	5	3	3	W	1	1	22	—
5	—	—	—	—	—	—	—	22	13
6	W	72	8	8	—	—	—	20	15
7	W	43	6	7	×	×	×	×	×
8	W	17	4	5	—	—	—	*18	—
9	W	7	4	6	—	—	—	*21	10
10	—	—	—	—	—	—	—	21	11
11	W	16	4	5	W	1	1	×	×
12	W	21	5	6	—	—	—	×	×
13	×	×	×	×	×	×	×	×	×
14	×	×	×	×	×	×	×	×	×
15	W	31	7	4	—	—	—	×	×
16	W	21	4	6	W	1	.2	×	×
17	W	363	15	29	W	1	1	×	×
18	W	179	11	20	W	1	2	×	×
19	W	98	13	8	W	1	2	×	×
20	W	79	10	11	W	1	1	×	×
21	×	×	×	×	W	1	2	×	×
22	×	×	×	×	W	1	0.5	×	×
23	×	×	×	×	×	×	×	×	×
24	W	462	17	33	W	1	1	×	×
25	W	284	17	23	W	1	4	×	×
26	W	3460	66	81	W	1	1	×	×
27	W	357	21	22	W	1	0.5	×	×
28	—	—	—	—	W	1	0.5	×	×
29	—	—	—	—	W	1	0.5	×	×
30	W	19	7	4	W	1	0.1	×	×

表1.1.5 (続き)

年 月 日	可 視							赤 外	
	色	量	高さ	幅	Col	Q	H	t ₁	t ₂
		×10 ³ m ²	×10m	×10m			×100m		
1982. 7. 1	W	184	9	33	W	1	1	×	×
2	W	132	14	12	W	1	1	×	×
3	W	95	10	15	W	1	1	×	×
4	—	—	—	—	—	—	—	×	×
5	W	66	10	8	W	1	1	×	×
6	W	128	6	24	W	1	0.5	×	×
7	W	117	11	9	W	1	1	×	×
8	W	151	12	13	W	1	2	×	×
9	W	83	7	12	W	1	2	×	×
10	W	508	25	23	W	1	1	×	×
11	×	×	×	×	×	×	×	×	×
12	×	×	×	×	×	×	×	×	×
13	×	×	×	×	×	×	×	×	×
14	×	×	×	×	×	×	×	×	×
15	W	302	16	21	W	1	0.5	×	×
16	W	28	4	12	×	×	×	×	×
17	W	63	7	8	W	1	1	×	×
18	W	28	10	3	W	1	1	×	×
19	×	×	×	×	×	×	×	×	×
20	×	×	×	×	W	1	2	×	×
21	—	—	—	—	W	1	0.5	*14	—
22	—	—	—	—	—	—	—	13	—
23	×	×	×	×	—	—	—	×	×
24	×	×	×	×	×	×	×	×	×
25	×	×	×	×	×	×	×	×	×
26	W	314	16	18	W	1	1	*13	9
27	W	101	10	13	W	1	2	×	×
28	W	84	9	13	—	—	—	14	—
29	W	112	12	10	W	1	2	*12	—
30	W	84	9	7	W	1	0.5	13	—
31	W	15	4	4	—	—	—	15	—

表1.1.5 (続き)

年 月 日	可 視							赤 外	
	色	量	高さ	幅	Col	Q	H	t ₁	t ₂
		×10 ³ m ²	×10m	×10m			×100m		
1982. 8. 1	W	7840	75	90	W	1	2	×	×
2	W	111	12	11	W	1	1	×	×
3	W	18	3	7	W	1	1	*13	—
4	W	31	7	6	W	1	1	15	—
5	W	55	6	12	W	1	1	×	×
6	W	83	8	11	W	1	2	×	×
7	W	2070	69	41	W	1	1	×	×
8	W	39	7	7	W	1	2	×	×
9	W	131	14	12	W	1	1	×	×
10	W	113	13	14	W	1	1	×	×
11	W	86	13	7	W	1	1	11	10
12	×	×	×	×	W	1	0.5	×	×
13	×	×	×	×	×	×	×	×	×
14	W	12	5	3	W	1	0.5	*12	12
15	W	527	20	32	—	—	—	15	—
16	W	86	9	10	W	1	1	×	×
17	×	×	×	×	×	×	×	×	×
18	W	402	18	26	W	1	0.5	×	×
19	W	244	12	22	W	1	1	×	×
20	W	273	29	11	W	1	1	×	×
21	W	366	19	25	W	1	1	14	16
22	W	64	10	6	W	1	0.5	12	—
23	W	149	16	12	W	1	2	×	×
24	—	—	—	—	W	1	1	*13	9
25	×	×	×	×	—	—	—	×	×
26	×	×	×	×	—	—	—	×	×
27	×	×	×	×	×	×	×	×	×
28	W	186	9	21	W	1	0.5	×	×
29	W	170	16	13	—	—	—	17	17
30	—	—	—	—	—	—	—	14	7
31	W	196	24	7	W	1	1	15	12

表1.1.5 (続き)

年 月 日	可				視			赤	外
	色	量	高さ	幅	Col	Q	H	t ₁	t ₂
		×10 ² m ²	×10m	×10m			×100m		
1982. 9. 1	W	390	17	27	W	1	1	15	9
2	W	66	9	6	W	1	1	13	12
3	W	447	21	27	W	1	1	×	×
4	W	79	10	7	W	1	0.5	*16	9
5	W	24	7	5	W	1	1	×	×
6	×	×	×	×	W	1	2	×	×
7	W	80	9	15	W	1	3	*21	—
8	W	513	27	25	W	1	1	20	—
9	W	106	10	16	W	1	1	×	×
10	W	1080	38	34	W	1	3	*19	—
11	W	87	6	16	W	1	1	19	7
12	W	155	10	16	W	1	1	*20	15
13	—	—	—	—	—	—	—	22	—
14	—	—	—	—	—	—	—	*18	15
15	—	—	—	—	—	—	—	×	×
16	W	42	5	11	W	1	0.5	×	×
17	W	344	19	22	W	1	1	×	×
18	W	292	17	15	W	1	0.5	×	×
19	W	130	10	10	W	1	1	×	×
20	×	×	×	×	×	×	×	×	×
21	W	21	4	7	W	1	1	*19	—
22	—	—	—	—	W	1	0.5	×	×
23	W	360	13	29	×	×	×	×	×
24	×	×	×	×	×	×	×	×	×
25	×	×	×	×	×	×	×	×	×
26	×	×	×	×	×	×	×	*13	12
27	×	×	×	×	W	1	0.5	22	—
28	×	×	×	×	W	1	1	×	×
29	W	181	13	14	W	1	2	×	×
30	W	187	14	18	×	×	×	×	×

表1.1.5 (続き)

年 月 日	可 視				赤 外			紫 外			
	色	量	高さ	幅	Col	Q	H	t ₁	t ₂	SO ₂	
		×10 ² m ²	×10m	×10m			×100m			×10ppm-m	
1982.10. 1	W	98	11	10	W	×	×	×	×	(10月20日観測開始)	
2	W	182	14	18	W	1	0.5	×	×		
3	×	×	×	×	W	1	1	*23	—		
4	—	—	—	—	—	—	—	22	—		
5	W	153	13	11	W	1	1	22	—		
6	W	24	5	4	W	1	0.5	*16	13		
7	—	—	—	—	W	1	0.5	21	18		
8	W	30	6	6	W	1	0.5	22	4		
9	W	82	10	9	W	1	1	×	×		
10	W	456	26	20	W	1	2	18	9		
11	W	61	10	7	W	1	2	20	7		
12	W	24	5	7	W	1	1	21	—		
13	—	—	—	—	W	1	0.5	21	10		
14	W	79	9	10	W	1	0.5	22	—		
15	W	32	7	7	W	1	2	20	—		
16	W	583	31	25	W	1	3	18	17		
17	W	38	6	11	—	—	—	13	12		
18	W	281	24	16	W	1	2	18	17		
19	W	29	6	5	W	1	1	×	×		
20	W	441	16	31	W	1	1	×	×		17
21	W	207	19	14	W	1	2	*15	16		37
22	W	32	4	5	W	1	0.5	16	18		53
23	W	198	15	9	W	1	2	21	23		33
24	W	85	6	12	W	1	1	×	×		16
25	W	158	13	13	W	1	2	*21	—		51
26	W	12	4	3	—	—	—	*21	4		53
27	W	28	5	7	W	1	1	23	—		37
28	W	191	15	18	W	1	1	×	×		29
29	W	482	17	32	W	1	1	×	×		48
30	W	17	4	7	W	1	2	×	×		26
31	W	294	20	15	W	1	3	19	13		34

(10月20日観測開始)

表1.1.5 (続き)

年 月 日	可 視							赤 外		紫 外
	色	量	高さ	幅	Col	Q	H	t ₁	t ₂	SO ₂
		×10 ² m ²	×10m	×10m			×100m			×10ppm-m
1982.11. 1	W	61	5	12	W	1	1	*19	18	16
2	W	845	24	39	W	1	2	21	8	68
3	—	—	—	—	W	1	0.5	*22	17	50
4	—	—	—	—	—	—	—	*20	9	49
5	W	206	12	18	W	1	1	×	×	27
6	W	320	18	19	W	1	2	×	×	18
7	×	×	×	×	×	×	×	×	×	6
8	W	639	23	33	W	1	2	×	×	26
9	W	180	15	13	W	1	1	×	×	23
10	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
11	W	400	13	38	W	1	1	×	×	20
12	×	×	×	×	×	×	×	*16	15	8
13	×	×	×	×	—	—	—	*20	6	47
14	—	—	—	—	—	—	—	20	14	43
15	W	217	13	17	W	1	1	×	×	9
16	×	×	×	×	W	1	0.5	×	×	21
17	W	216	10	27	W	1	1	*19	0	21
18	—	—	—	—	—	—	—	19	—	43
19	W	189	14	15	W	1	1	*10	8	19
20	W	488	26	22	W	1	2	*17	19	31
21	W	11	4	4	W	1	1	17	16	56
22	×	×	×	×	W	1	0.5	×	×	13
23	W	30	6	7	W	1	2	×	×	28
24	W	395	15	27	W	1	1	×	×	×
25	W	328	20	19	W	1	3	14	14	×
26	W	68	8	9	W	1	1	*12	—	×
27	W	251	18	17	W	1	3	*17	16	×
28	×	×	×	×	×	×	×	15	15	×
29	×	×	×	×	W	1	1	×	×	×
30	W	63	7	11	W	1	1	×	×	28

表1.1.5 (続き)

年 月 日	可 視							赤 外		紫 外
	色	量	高さ	幅	Col	Q	H	t ₁	t ₂	SO ₂
		×10 ² m ²	×10m	×10m			×100m			×10ppm-m
1982.12. 1	W	86	9	11	W	1	0.5	×	×	16
2	W	334	18	17	W	1	2	×	×	21
3	W	380	23	20	W	1	2	*19	8	16
4	W	13	5	3	W	1	1	21	—	37
5	W	135	13	11	W	1	2	13	—	25
6	×	×	×	×	×	×	×	*14	14	×
7	W	396	17	23	W	1	3	18	19	18
8	W	952	36	36	W	2	5	×	×	30
9	W	295	16	19	W	1	1	×	×	44
10	W	245	19	16	W	1	2	17	21	41
11	×	×	×	×	W	×	×	×	×	×
12	W	304	10	31	W	1	1	×	×	22
13	W	319	21	16	W	1	2	×	×	19
14	W	543	23	27	W	1	2	*15	18	37
15	W	729	29	27	W	1	3	19	22	39
16	W	508	19	32	W	1	1	20	—	33
17	W	62	7	14	W	1	1	×	×	×
18	W	283	17	17	W	1	2	×	×	24
19	W	1290	40	36	W	1	3	*20	—	29
20	W	665	33	23	W	1	3	*17	19	32
21	W	58	13	6	W	1	1	19	20	40
22	×	×	×	×	W	1	1	×	×	11
23	W	808	23	37	W	1	1	*15	15	20
24	W	118	12	12	W	1	1	*15	15	40
25	W	132	10	17	W	1	2	×	×	28
26	W	195	12	13	W	1	1	×	×	19
27	W	770	32	30	W	1	1	×	×	24
28	W	755	37	28	W	2	4	17	20	41
29	W	434	18	24	W	1	2	18	21	32
30	W	369	20	19	W	1	2	*16	18	29
31	W	119	13	12	W	1	2	19	16	52

表1.1.5 (続き)

年 月 日	可				視			赤	外	紫 外
	色	量	高さ	幅	Col	Q	H	t ₁	t ₂	SO ₂
		×10 ² m ²	×10m	×10m			×100m			×10ppm-m
1983. 1. 1	W	15	4	4	W	1	1	16	14	52
2	×	×	×	×	W	1	0.5	18	20	15
3	×	×	×	×	W	1	2	×	×	37
4	×	×	×	×	W	1	2	18	22	36
5	×	×	×	×	×	×	×	×	×	10
6	W	225	14	22	W	1	3	*10	10	43
7	×	×	×	×	W	1	×	×	×	14
8	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
9	W	1120	35	36	W	2	3	13	13	28
10	W	318	18	17	W	1	1	*16	19	21
11	W	133	13	10	W	1	1	16	20	42
12	W	505	19	28	W	1	1	×	×	21
13	W	358	19	21	W	1	1	*16	18	19
14	W	121	12	12	W	1	1	16	19	38
15	W	298	20	16	W	1	2	16	14	46
16	W	879	36	30	W	1	4	17	18	40
17	W	347	15	27	W	1	1	15	—	23
18	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
19	W	166	9	22	W	1	1	×	×	16
20	W	268	14	19	W	1	1	×	×	21
21	W	390	23	19	W	1	2	×	×	17
22	W	451	16	28	W	1	1	*15	—	24
23	W	940	30	34	W	1	3	×	×	35
24	W	622	31	26	W	2	5	*17	14	45
25	W	600	17	43	W	2	3	21	—	33
26	W	316	19	19	W	1	3	*19	—	52
27	W	79	8	10	W	1	1	16	8	45
28	W	613	20	33	W	1	1	*17	20	20
29	W	174	13	17	W	1	1	*18	14	34
30	×	×	×	×	W	1	0.5	×	×	×
31	W	13	3	6	W	1	0.5	*21	—	52

表1.1.5 (続き)

年 月 日	可 視				赤 外			紫 外		
	色	量	高 さ	幅	Col	Q	H	t ₁	t ₂	SO ₂
		×10 ² m ²	×10m	×10m			×100m			×10ppm-m
1983. 2. 1	W	20	5	5	W	1	1	20	22	16
2	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
3	W	112	12	12	W	1	1	×	×	13
4	W	432	19	28	W	1	2	*15	16	50
5	W	358	18	18	W	1	1	×	×	20
6	W	345	16	21	W	1	1	×	×	23
7	W	169	10	20	W	1	1	×	×	19
8	W	377	16	23	W	1	1	×	×	29
9	W	527	19	28	W	1	2	×	×	27
10	W	153	11	15	W	1	1	×	×	22
11	W	340	21	24	W	1	2	15	11	31
12	W	156	12	15	W	1	2	*15	17	17
13	W	423	20	26	W	1	2	*17	—	28
14	W	100	12	10	W	1	1	*15	18	27
15	W	100	11	10	W	1	1	*15	—	23
16	W	18	6	5	—	—	—	19	—	43
17	×	×	×	×	W	1	1	×	×	×
18	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
19	W	126	11	16	W	1	1	×	×	11
20	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
21	W	841	39	23	W	1	2	*17	—	26
22	W	96	9	12	W	1	0.5	*17	22	37
23	W	376	15	37	W	1	1	13	—	18
24	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
25	W	378	17	25	W	1	2	*18	17	22
26	W	282	35	12	W	1	1	*16	16	31
27	W	52	10	6	W	1	0.5	*14	10	49
28	W	11	3	4	—	—	—	19	—	63

表1.1.5 (続き)

年 月 日	可 視				赤 外			紫 外		
	色	量	高さ	幅	Col	Q	H	t ₁	t ₂	SO ₂
		×10 ² m ²	×10m	×10m			×100m			×10ppm-m
1983. 3. 1	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
2	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
3	W	113	10	11	W	1	1	×	×	5
4	W	441	25	21	W	1	1	*18	—	24
5	W	560	23	24	W	1	2	×	×	20
6	W	551	24	22	W	1	1	×	×	17
7	W	84	12	7	W	1	1	19	17	21
8	W	317	21	14	W	1	3	*18	19	36
9	W	97	9	7	W	1	2	18	21	36
10	×	×	×	×	W	1	1	×	×	×
11	W	154	16	9	W	2	5	*17	17	37
12	W	57	7	9	W	1	1	13	15	14
13	×	×	×	×	W	1	1	×	×	×
14	W	438	15	31	W	1	1	×	×	22
15	W	115	13	11	W	1	2	17	—	29
16	W	352	12	24	W	1	2	×	×	19
17	×	×	×	×	×	×	×	×	×	10
18	W	273	14	19	W	1	1	*20	—	16
19	W	52	9	6	W	1	1	*17	19	46
20	W	335	21	18	W	1	1	15	18	13
21	W	349	18	24	W	1	1	×	×	26
22	W	315	17	18	W	1	1	16	21	25
23	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
24	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
25	W	532	25	26	W	1	2	17	14	×
26	W	361	15	20	W	1	1	×	×	16
27	W	761	25	31	W	1	3	×	×	19
28	W	435	20	24	W	1	2	×	×	65
29	W	45	8	6	W	1	0.5	×	×	34
30	×	×	×	×	×	×	×	×	×	28
31	W	283	12	23	W	1	1	×	×	21

表1.1.5 (続き)

年 月 日	可 視				赤 外			紫 外		
	色	量	高さ	幅	Col	Q	H	t ₁	t ₂	SO ₂
		×10 ² m ²	×10m	×10m			×100m			×10ppm-m
1983. 4. 1	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
2	W	99	11	12	W	2	1	×	×	13
3	W	62	7	10	W	1	1	*13	—	35
4	W	89	12	7	W	1	0.5	14	12	26
5	W	16	4	5	W	1	1	*18	—	72
6	W	70	8	6	—	—	—	*14	10	38
7	W	105	11	11	×	×	×	13	—	17
8	W	1290	27	51	W	1	2	*21	—	61
9	W	140	12	11	W	1	1	17	12	11
10	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
11	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
12	W	2910	60	58	W	1	2	*18	—	40
13	×	×	×	×	W	1	1	16	12	19
14	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
15	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
16	W	166	15	12	W	1	3	×	×	43
17	W	260	17	14	W	1	2	*18	—	36
18	W	56	9	8	—	—	—	19	—	35
19	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
20	W	129	16	11	W	1	2	*18	—	33
21	W	162	14	13	W	1	1	20	—	15
22	W	319	13	29	W	×	×	*12	10	21
23	—	—	—	—	—	—	—	*13	—	58
24	—	—	—	—	—	—	—	12	8	52
25	W	23	5	6	—	—	—	18	—	53
26	W	110	12	9	W	1	0.5	15	8	14
27	W	91	11	11	W	1	1	×	×	32
28	W	158	16	13	W	1	1	13	—	19
29	×	×	×	×	W	1	×	*10	7	×
30	—	—	—	—	—	—	—	*14	6	49

表1.1.5 (続き)

年 月 日	可 視				赤 外			紫 外
	色	量	高さ	幅	Col	Q	H	
		×10 ² m ²	×10m	×10m			×100m	×10ppm-m
1983. 5. 1	W	175	15	14	W	1	1	9
2	W	175	15	15	W	1	0.5	*16 — 43
3	×	×	×	×	—	—	—	13 — 38
4	W	27	6	5	×	×	×	×
5	W	265	13	17	W	1	1	×
6	×	×	×	×	×	×	×	×
7	×	×	×	×	W	1	1	×
8	W	32	5	6	W	1	1	*16 4 29
9	W	19	4	4	—	—	—	17 — 33
10	—	—	—	—	—	—	—	*16 10 48
11	W	27	6	6	W	1	2	18 — 54
12	—	—	—	—	—	—	—	19 — 43
13	W	63	10	9	W	1	2	*14 — 30
14	W	35	7	6	W	1	0.5	* 8 7 47
15	W	88	12	7	W	1	0.5	17 — 32
16	×	×	×	×	W	×	×	×
17	W	105	13	10	W	1	1	*14 16 19
18	W	145	15	12	W	1	0.5	18 — 48
19	W	339	21	19	W	1	1	18 — 31
20	W	178	16	17	W	1	1	13 12 30
21	W	413	20	24	W	1	1	*13 9 36
22	W	202	18	13	W	1	1	×
23	W	258	16	16	W	1	1	×
24	W	620	32	21	W	1	1	×
25	W	9	4	4	W	1	1	*17 — 38
26	W	34	7	7	—	—	—	17 — 52
27	W	102	10	10	W	1	1	15 7 35
28	W	102	10	10	W	1	1	*13 — 29
29	W	196	17	12	W	1	1	11 12 39
30	×	×	×	×	×	×	×	13 — 12
31	W	229	13	23	W	1	0.5	13 — 50

表1.1.5 (続き)

年 月 日	可 視				赤 外			紫 外
	色	量	高さ	幅	Col	Q	H	
		×10 ² m ²	×10m	×10m			×100m	×10ppm-m
1983. 6. 1	×	×	×	×	—	—	—	16 16 37
2	—	—	—	—	—	—	—	12 — 34
3	W	136	10	14	—	—	—	*13 — 32
4	W	17	6	4	W	1	1	*15 — 40
5	W	129	10	13	W	1	1	14 — 14
6	W	65	10	7	W	1	1	×
7	W	45	6	7	W	1	1	×
8	W	142	12	16	W	1	2	×
9	W	21	3	6	W	1	1	13 — 34
10	W	65	7	8	W	1	1	10 — 20
11	W	21	4	6	W	1	0.5	12 13 41
12	×	×	×	×	W	1	0.1	×
13	W	88	7	16	W	1	1	*12 — 37
14	—	—	—	—	—	—	—	13 — 16
15	×	×	×	×	×	×	×	12 — 9
16	W	235	8	15	×	×	×	×
17	×	×	×	×	W	1	1	×
18	W	188	15	20	W	1	1	11 — 46
19	W	81	7	11	W	1	0.5	11 — 22
20	×	×	×	×	×	×	×	×
21	W	89	9	12	×	×	×	×
22	—	—	—	—	—	—	—	×
23	—	—	—	—	—	—	—	14 — 29
24	W	243	18	17	W	1	1	*10 10 35
25	W	52	9	8	W	1	1	11 — 34
26	×	×	×	×	×	×	×	×
27	W	429	23	18	×	×	×	×
28	W	93	10	11	W	1	1	×
29	W	154	12	13	W	1	1	×
30	W	553	20	24	W	1	1	×

表1.1.5 (続き)

年 月 日	可 視				赤 外			紫 外		
	色	量	高 さ	幅	Col	Q	H	t ₁	t ₂	SO ₂
		×10 ² m ²	×10m	×10m			×100m			×10ppm-m
1983. 7. 1	W	264	16	20	W	1	1	12	—	17
	W	225	12	16	W	1	0.5	×	×	10
	W	181	15	18	W	1	1	*9	—	12
	W	76	7	12	W	1	1	×	×	10
	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	W	99	11	8	W	1	1	×	×	18
	W	193	10	19	W	1	1	×	×	26
	W	432	23	24	W	1	1	×	×	32
	W	48	9	6	W	1	2	×	×	53
	W	34	7	6	W	1	2	×	×	37
11	W	671	25	29	W	1	2	*10	8	57
12	W	178	18	14	W	1	1	12	11	35
13	W	279	17	16	W	1	2	×	×	27
14	W	144	15	9	W	1	0.5	14	—	16
15	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
16	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
17	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
18	—	—	—	—	—	—	—	*10	—	×
19	—	—	—	—	—	—	—	12	—	×
20	W	122	9	12	×	×	×	×	×	×
21	W	123	10	13	×	×	×	×	×	5
22	W	162	14	15	×	×	×	×	×	7
23	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
24	W	226	13	22	W	1	0.5	*11	—	19
25	W	192	9	20	W	1	0.5	×	×	19
26	W	138	12	13	W	1	1	×	×	16
27	W	223	15	14	W	1	1	×	×	14
28	W	109	9	16	W	1	1	×	×	20
29	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
30	×	×	×	×	W	1	1	×	×	10
31	×	×	×	×	W	1	×	×	×	7

表1.1.5 (続き)

年 月 日	可 視				赤 外			紫 外		
	色	量	高さ	幅	Col	Q	H	t ₁	t ₂	SO ₂
		×10 ² m ²	×10m	×10m			×100m			×10ppm-m
1983. 8. 1	×	×	×	×	W	1	1	×	×	×
2	W	149	14	17	W	1	0.5	×	×	15
3	W	82	10	10	W	1	2	11	—	32
4	W	44	7	5	W	1	1	×	×	37
5	W	116	13	10	×	×	×	10	—	40
6	W	63	10	9	W	1	1	×	×	43
7	W	580	20	35	W	1	2	×	×	11
8	W	652	32	24	W	1	1	×	×	33
9	W	150	11	16	W	1	1	×	×	29
10	W	62	10	7	W	1	1	×	×	23
11	W	126	12	12	W	1	1	×	×	41
12	W	313	18	19	W	1	1	13	—	40
13	W	697	15	36	W	1	1	×	×	31
14	×	×	×	×	×	×	×	×	×	28
15	×	×	×	×	W	1	1	×	×	29
16	×	×	×	×	×	×	×	×	×	12
17	W	230	10	26	×	×	×	×	×	18
18	W	562	27	30	W	1	0.5	×	×	22
19	W	354	23	18	W	1	2	×	×	30
20	W	226	19	13	×	×	×	13	—	×
21	W	184	16	13	W	1	2	×	×	27
22	W	112	12	9	W	1	2	×	×	34
23	W	196	15	14	W	1	2	×	×	20
24	W	211	14	17	W	1	1	×	×	12
25	W	71	9	9	W	1	0.5	×	×	31
26	W	61	11	8	W	1	1	12	—	21
27	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
28	W	196	11	21	W	1	0.5	×	×	19
29	W	266	14	19	W	1	0.5	×	×	14
30	W	124	12	15	W	1	1	11	12	31
31	W	677	26	29	W	1	1	×	×	34

表1.1.5 (続き)

年 月 日	可 視				赤 外			紫 外		
	色	量	高さ	幅	Col	Q	H	t ₁	t ₂	SO ₂
		×10 ² m ²	×10m	×10m			×100m			×10ppm-m
1983. 9. 1	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
2	×	×	×	×	W	1	1	×	×	×
3	W	214	11	17	W	1	1	×	×	33
4	W	70	13	9	W	1	1	×	×	35
5	W	141	12	14	W	1	0.5	×	×	26
6	W	88	8	9	W	1	1	×	×	36
7	W	211	16	14	W	1	1	×	×	27
8	W	127	11	10	W	1	1	×	×	38
9	W	15	4	4	—	—	—	×	×	42
10	×	×	×	×	×	×	×	×	×	10
11	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
12	×	×	×	×	W	1	1	×	×	×
13	W	130	13	13	W	1	3	14	—	59
14	W	204	15	18	W	1	1	10	11	35
15	W	559	18	26	W	1	1	×	×	53
16	W	64	9	7	W	1	0.5	13	—	51
17	W	47	7	6	W	1	1	×	×	73
18	W	116	9	10	W	1	0.5	×	×	27
19	×	×	×	×	W	1	0.5	×	×	×
20	W	278	17	17	W	1	0.5	×	×	33
21	W	105	11	10	×	×	×	×	×	×
22	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
23	W	166	15	14	W	1	2	×	×	24
24	W	690	26	32	W	1	2	×	×	20
25	W	440	23	19	W	1	2	11	10	38
26	W	197	12	16	W	1	1	×	×	35
27	W	97	13	9	×	×	×	×	×	32
28	×	×	×	×	W	1	0.5	×	×	×
29	W	1070	33	35	W	1	4	×	×	64
30	W	258	18	15	W	2	3	×	×	36

表1.1.5 (続き)

年 月 日	可 視				赤 外			紫 外		
	色	量	高さ	幅	Col	Q	H	t ₁	t ₂	SO ₂
		×10 ² m ²	×10m	×10m			×100m			×10ppm-m
1983.10. 1	—	—	—	—	—	—	—	12	—	76
2	W	279	18	19	W	1	0.5	15	—	34
3	W	263	19	16	W	1	1	13	9	36
4	W	227	12	17	W	1	1	×	×	28
5	W	287	14	19	W	1	1	×	×	35
6	W	46	7	7	—	—	—	12	—	52
7	W	27	5	6	—	—	—	13	—	46
8	W	156	9	19	×	×	×	×	×	×
9	W	540	25	21	W	1	2	×	×	42
10	W	118	11	13	W	1	1	×	×	48
11	W	321	14	22	W	1	2	16	—	51
12	W	861	29	31	W	1	1	×	×	58
13	W	355	18	19	W	1	1	×	×	26
14	W	484	26	22	W	1	2	×	×	47
15	W	450	24	24	×	×	×	×	×	21
16	W	246	17	15	W	1	1	×	×	36
17	W	115	9	15	W	1	0.5	×	×	46
18	W	1210	35	37	W	1	2	13	—	53
19	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
20	W	148	14	11	W	1	1	×	×	68
21	W	671	19	40	W	1	1	×	×	34
22	W	39	6	7	W	1	1	×	×	×
23	W	280	19	18	W	1	2	×	×	23
24	W	374	21	23	W	1	1	16	13	43
25	W	146	15	11	W	1	1	16	13	85
26	W	157	13	16	W	1	0.5	14	8	20
27	W	303	18	21	W	1	1	×	×	36
28	W	170	18	12	W	1	3	12	16	30
29	W	296	22	15	W	1	2	×	×	44
30	W	114	14	8	W	1	1	×	×	66
31	W	23	4	4	W	1	0.5	16	—	52

表1.1.5 (続き)

年 月 日	可 視				赤 外			紫 外			
	色	量	高さ	幅	Col	Q	H	t ₁	t ₂	SO ₂	
		×10 ² m ²	×10m	×10m			×100m			×10ppm-m	
1983.11.	1	W	92	13	9	W	1	2	×	×	19
	2	W	593	26	26	W	2	3	15	19	×
	3	W	41	8	9	W	1	2	×	×	×
	4	W	220	19	11	W	1	2	×	×	×
	5	W	273	16	18	W	1	2	×	×	63
	6	W	594	20	39	W	1	2	×	×	42
	7	W	807	30	25	W	1	1	×	×	40
	8	W	35	5	6	W	1	0.5	×	×	72
	9	W	569	20	36	W	1	1	×	×	75
	10	W	121	9	15	W	1	1	×	×	37
	11	W	206	12	17	W	1	1	×	×	24
	12	W	202	12	19	W	1	1	×	×	26
	13	W	188	14	16	W	1	0.5	×	×	×
	14	W	435	23	21	W	1	2	×	×	44
	15	W	297	19	15	W	1	2	×	×	33
	16	W	74	10	8	W	1	1	×	×	17
	17	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	18	W	251	15	18	W	1	1	×	×	16
	19	W	307	19	18	W	1	2	×	×	21
	20	W	16	3	4	W	1	0.5	×	×	55
21	—	—	—	—	W	1	2	×	×	70	
22	W	674	22	30	W	1	0.5	×	×	82	
23	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	
24	W	352	18	21	W	1	1	×	×	24	
25	W	371	21	20	W	1	1	×	×	32	
26	W	68	8	11	W	1	1	*17	14	38	
27	W	322	14	31	W	1	1	16	16	39	
28	—	—	—	—	—	—	—	20	—	83	
29	W	104	11	13	W	1	0.5	*17	15	34	
30	W	41	8	6	W	1	1	×	×	×	

表1.1.5 (続き)

年 月 日	可 視				赤 外			紫 外		
	色	量	高さ	幅	Col	Q	H	t ₁	t ₂	SO ₂
		×10 ² m ²	×10m	×10m			×100m			×10ppm-m
1983.12. 1	W	280	17	19	W	1	1	×	×	33
2	W	81	10	12	W	1	1	×	×	15
3	W	170	12	15	W	1	0.5	×	×	24
4	W	207	13	20	W	1	2	×	×	28
5	W	179	12	17	W	1	1	14	13	×
6	W	231	16	15	W	1	1	*16	18	29
7	W	93	11	9	W	1	1	17	—	44
8	W	253	15	22	W	1	0.5	*18	7	×
9	W	283	17	17	W	1	1	*13	14	23
10	W	288	20	17	W	1	1	×	×	34
11	×	×	×	×	W	1	1	*16	14	×
12	W	623	30	22	W	1	5	*18	—	32
13	W	168	12	16	W	1	1	18	—	37
14	W	400	23	21	W	1	2	×	×	21
15	W	265	18	15	W	1	1	×	×	22
16	W	132	10	14	W	1	0.5	×	×	24
17	W	184	16	12	W	1	1	×	×	29
18	W	649	29	33	W	1	2	*15	14	×
19	W	221	14	16	W	1	1	×	×	×
20	W	598	22	32	W	1	1	16	14	52
21	W	18	3	6	—	—	—	19	—	32
22	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
23	W	348	16	22	W	1	1	*14	13	31
24	W	155	12	13	W	1	2	16	16	×
25	W	675	22	35	W	1	1	*13	12	×
26	W	361	23	17	W	1	2	×	×	27
27	W	216	19	16	W	1	2	×	×	25
28	W	155	14	13	W	1	1	×	×	25
29	W	267	16	19	W	1	1	17	16	25
30	W	321	19	18	W	1	2	*20	17	×
31	W	175	15	16	W	1	1	×	×	×

表1.1.5 (続き)

年 月 日	可 視				赤 外			紫 外		
	色	量	高さ	幅	Col	Q	H	t ₁	t ₂	SO ₂
		×10 ² m ²	×10m	×10m			×100m			×10ppm-m
1984. 1. 1	W	240	19	17	W	1	4	×	×	27
2	W	223	16	17	W	1	2	17	19	40
3	W	327	12	26	×	×	×	×	×	×
4	×	×	×	×	×	×	×	×	×	2
5	W	241	14	30	W	1	1	*16	15	15
6	W	214	10	24	W	1	1	19	—	33
7	W	416	17	32	W	1	2	×	×	20
8	W	161	12	15	W	1	1	×	×	29
9	W	203	12	22	W	1	1	×	×	12
10	W	432	27	43	W	1	1	×	×	18
11	W	296	13	21	W	1	1	17	10	28
12	W	417	18	23	W	1	2	*13	15	35
13	W	39	7	6	W	1	1	×	×	24
14	W	433	14	27	W	1	1	*14	—	34
15	W	187	13	14	×	×	×	17	—	×
16	W	487	22	32	W	1	1	*16	18	8
17	W	341	16	21	W	1	2	×	×	17
18	×	×	×	×	W	1	0.5	16	—	39
19	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
20	W	1180	36	33	W	1	4	13	12	13
21	W	148	10	15	×	×	×	×	×	13
22	W	128	9	14	W	1	1	×	×	14
23	W	321	21	16	W	1	2	×	×	21
24	W	245	16	17	W	1	2	×	×	16
25	W	192	9	19	W	1	1	×	×	16
26	W	256	14	26	W	1	0.5	×	×	8
27	W	359	19	18	W	1	1	×	×	×
28	W	248	15	19	W	1	1	×	×	×
29	W	478	18	22	W	1	2	*12	13	54
30	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
31	W	168	15	14	×	×	×	×	×	14

表1.1.5 (続き)

年 月 日	可 視				赤 外			紫 外		
	色	量	高 さ	幅	Col	Q	H	t ₁	t ₂	SO ₂
		×10 ² m ²	×10m	×10m			×100m			×10ppm-m
1984. 2. 1	W	209	13	20	W	1	1	×	×	24
2	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
3	W	185	13	17	W	1	1	×	×	×
4	W	299	15	20	W	1	1	×	×	×
5	W	430	20	21	W	1	2	×	×	×
6	W	205	13	19	W	1	1	×	×	×
7	W	205	13	17	W	1	1	×	×	29
8	W	28	6	8	×	×	×	×	×	×
9	W	511	16	32	W	1	1	×	×	15
10	W	255	14	14	W	1	1	17	18	×
11	×	×	×	×	×	×	×	×	×	28
12	×	×	×	×	×	×	×	*19	—	×
13	W	284	14	26	W	1	1	16	8	9
14	W	199	10	19	W	1	2	*13	12	13
15	W	117	8	10	W	1	2	14	16	9
16	W	143	11	12	W	1	2	×	×	16
17	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
18	W	319	14	23	W	1	1	×	×	29
19	W	366	20	19	W	1	4	16	18	36
20	W	271	16	19	W	1	2	15	—	26
21	W	76	9	11	W	1	1	14	—	24
22	W	107	9	13	—	—	—	18	—	14
23	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
24	W	342	20	19	W	1	1	*15	—	×
25	W	116	9	12	W	1	1	14	—	19
26	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
27	W	206	13	16	W	1	1	×	×	26
28	W	317	19	14	W	1	2	×	×	30
29	W	102	7	15	W	1	1	×	×	10

表1.1.6 噴煙の上昇速度 (m/sec)、観測時刻はすべて09^hである

年 月 日	上昇速度	年 月 日	上昇速度	年 月 日	上昇速度	年 月 日	上昇速度
1980		1981		1981		1981	
12 11	1.6	4 23	1.4	9 17	0.5	12 8	1.7
15	1.8	25	2.0	22	3.1	10	3.1
23	3.1	30	1.7	23	1.5	12	2.0
1981		5 1	1.3	10 1	1.3	13	1.3
1 17	2.3	9	3.1	2	0.6	14	2.3
19	2.8	15	3.5	3	1.3	15	1.7
22	2.3	17	1.3	13	1.1	16	2.1
30	2.0	18	2.8	14	1.8	17	2.1
2 2	1.3	19	3.7	15	2.4	18	1.6
3	2.1	20	4.5	19	1.7	22	3.0
4	2.3	21	3.1	20	0.9	27	2.4
5	2.0	23	2.7	22	4.8	30	1.7
6	1.6	6 1	4.1	23	0.9	1982	
11	2.7	10	3.5	26	1.9	1 6	2.4
16	0.9	11	2.8	30	6.8	7	2.8
18	1.7	16	2.9	11 1	1.3	9	2.4
21	2.3	22	2.9	3	3.5	15	3.9
28	1.1	30	0.6	5	2.6	17	2.1
3 4	1.6	7 2	2.0	6	1.7	23	1.2
5	2.6	9	0.4	8	1.4	29	1.3
10	3.3	12	3.2	10	0.8	30	2.1
11	1.1	15	2.5	11	2.4	2 2	1.2
20	3.1	17	2.3	15	3.6	5	1.5
26	7.4	21	0.3	18	3.4	6	2.4
27	4.1	24	1.6	19	3.0	7	1.6
4 1	3.3	8 21	1.3	21	1.6	15	2.2
6	1.8	23	1.8	22	5.9	22	2.8
7	1.6	9 1	2.1	12 2	2.0	25	2.4
11	3.6	5	1.8	3	1.4	26	0.6
14	1.6	8	1.3	4	3.5	27	1.0
15	1.1	11	1.4	5	3.7	3 2	1.8
21	2.6	13	0.5	7	1.8	3	2.6
						6	2.6

表1.1.5 (続き)

年 月 日	可 視				赤 外			紫 外		
	色	量	高さ	幅	Col	Q	H	t ₁	t ₂	SO ₂
		×10 ² m ²	×10m	×10m			×100m			×10ppm-m
1984. 3. 1	W	466	29	27	W	1	2	×	×	12
2	W	295	12	24	W	1	2	×	×	×
3	W	120	11	15	W	1	1	*14	15	11
4	W	250	13	18	W	1	2	×	×	16
5	W	349	17	22	W	1	3	15	17	22
6	W	95	9	12	W	1	0.5	*16	12	34
7	W	158	10	13	W	1	1	×	×	18
8	W	217	10	19	W	1	1	16	13	37
9	W	412	20	21	W	1	2	×	×	20
10	W	128	12	10	W	1	1	×	×	35
11	W	311	16	19	W	1	1	*16	15	50
12	W	310	14	21	W	1	2	18	—	23
13	×	×	×	×	W	1	1	×	×	36

(3月13日観測終了)

表1.1.6 (続き)

年 月 日	上昇速度	年 月 日	上昇速度	年 月 日	上昇速度	年 月 日	上昇速度
1982		1982		1982		1983	
3 7	2.9	8 2	3.6	10 25	1.4	1 9	3.1
8	2.4	4	2.2	28	2.4	10	4.3
9	3.0	9	3.4	31	2.4	11	2.9
10	2.8	10	1.8			12	2.9
13	4.7	11	1.9	11 2	2.2	13	3.7
25	3.5	18	1.3	5	3.7	14	2.3
		21	2.4	6	1.0	15	2.3
4 4	7.7	23	3.6	8	2.2	16	3.3
7	0.9	29	1.8	9	3.0	17	2.3
10	2.1	31	4.5	15	2.8	20	2.2
14	1.9			20	5.6	22	2.6
17	1.9	9 4	7.3	23	1.6	23	3.4
18	2.4	7	1.5	25	2.1	25	2.7
29	1.0	9	3.7	27	2.3	27	4.7
		10	3.8			28	3.1
5 17	1.6	11	3.7	12 2	3.3	29	3.1
21	3.2	12	3.3	5	1.0		
29	1.7	16	1.8	7	2.3	2 4	2.6
		17	0.6	8	2.2	5	2.6
6 4	3.7	18	3.6	9	1.8	9	2.7
7	1.2	23	3.4	10	4.2	10	5.4
17	1.2	29	2.0	13	2.4	11	2.3
19	3.1	30	3.6	14	1.5	12	2.3
20	5.0			15	3.7	13	3.5
25	5.2	10 2	2.1	16	2.9	14	2.8
26	4.1	5	2.7	19	2.0	16	4.8
27	2.0	9	1.9	20	1.8	21	3.9
30	7.0	11	4.5	21	1.8	22	2.1
		12	1.7	23	5.6	25	3.1
7 5	4.0	14	4.1	24	4.8	26	3.2
7	3.2	15	2.6	27	4.2	27	3.1
10	2.9	16	3.1	28	1.8		
26	2.0	18	1.8	29	1.8	3 15	2.1
30	1.9	21	2.6	31	1.8	19	4.6
8 1	7.8	23	2.0			20	2.9

表1.1.6 (続き)

年 月 日	上昇速度	年 月 日	上昇速度	年 月 日	上昇速度	年 月 日	上昇速度
1983		1983		1983		1983	
3 21	3.0	7 1	3.8	10 3	2.3	12 20	3.3
25	4.8	4	1.6	4	2.4	24	1.3
26	3.2	6	1.6	11	3.0	25	2.2
27	2.4	8	3.5	12	3.1	26	2.0
28	4.8	11	3.1	13	1.9	27	2.3
29	5.5	12	2.9	16	3.6	28	2.5
31	2.8	13	2.6	18	2.6	29	2.1
		14	3.9	24	5.0		
4 3	3.1			25	5.7		
7	4.3	8 4	5.3	27	3.0	1 1	2.8
9	3.7	9	2.4	28	1.5	5	2.2
21	3.7	10	4.4	29	2.7	7	2.3
27	3.4	12	1.7	30	3.1	8	4.3
28	4.6	18	1.7			11	3.9
		19	1.4	11 1	3.5	12	1.5
5 8	2.7	20	2.8	2	3.3	23	2.2
11	2.2	21	5.0	3	2.5	24	3.3
13	5.1	22	1.1	5	3.0	28	1.8
14	2.7	24	1.5	6	3.9		
18	4.8	28	2.7	12	2.9	2 1	3.3
20	3.5	31	4.3	14	2.1	4	2.1
21	3.4			15	2.6	10	4.7
23	4.9	9 4	2.9	22	3.3	16	2.0
26	4.8	5	4.2	24	2.1	19	2.1
28	2.6	6	1.3	25	2.9	20	3.9
29	2.8	7	1.8			21	7.4
31	5.8	9	3.5	12 1	2.1	28	2.1
		14	2.8	4	2.1		
6 4	2.6	20	1.8	6	2.1	3 4	2.5
6	1.2	23	3.3	7	1.4	5	2.5
9	2.6	24	2.0	10	1.7	8	1.6
10	3.2	25	3.6	12	2.3	9	1.9
18	0.6	27	5.4	15	2.4	10	3.4
28	2.6	29	2.6	17	2.5	11	5.0
30	3.6	30	3.1	18	2.0	12	1.0

第2章 火山用長周期地震計によるマグマの動向把握 に関する研究*

1. 目 的

火山の地下から長周期の地震波動が発生することは、かなり前から注目されていた。たとえば、阿蘇山の第2種火山性微動 (Sassa 1935、5.1 参照) は周期が3～10秒もあり、その発生原因は火山下のマグマ溜りの振動によるのであろうといわれている。この微動は噴火の前兆として現われやすいので、火山活動監視上からも、その観測が必要とされている。また、浅間山や桜島の火山爆発の際に記録される爆発地震の波形の中には、長周期波動を含んでいるものをしばしば見かける。この記録からは、爆発の震動によって、火山体ないし地上のマグマ溜りの振動が誘発されたかもしれないことが想像される。このように、火山における長周期地震波動は重要な意義を持っている。

さて、火山観測を行っている測候所の多くは火山のふもとにある。山が日射で暖められると、高地と低地とで顕著な温度差を生じ地表の暖まり方が一様でないことから地盤が傾斜する。その結果、従来の長周期地震計は傾斜して地震計の振子はバランスをくずす。また、地震計室内の温度変化も激しいので、地震計の振子を支えているバネが敏感に伸縮し、振子はバランスを失って観測不能になる。こうした傾斜や温度変化の影響を受けにくい地震計としては、固有周期を短くすることが必要であり、気象庁の火山観測には周期1秒の短周期地震計が用いられてきた。火山の悪環境が長周期地震計の使用を長い間阻んできたのである。

この特別研究においては、短周期の変換器にフィードバック回路を組み合わせる方法を用いて、火山でも使える長周期地震計を開発した。また、これを阿蘇山へ設置して、火山から発生する長周期震動を観測研究した。

2. 火山用長周期地震計の製作

この地震計の変換器は、短周期の電磁式変換器にフィードバック回路を組み合わせることでその固有周期を長くしたものである (田他1984)。図1.2.1は長周期化の原理図で、変換器の検出コイル (DETECTOR COIL) の出力を演算増幅器 (A) で増幅し、その出力電流をフィードバックコイル (FEEDBACK COIL) に帰還して微分することにより、振子は慣性力に比例した力を受けるこ

* 中禮正明・田中康裕・澤田可洋・福井敬一；地震火山研究部

田 望；東海大学

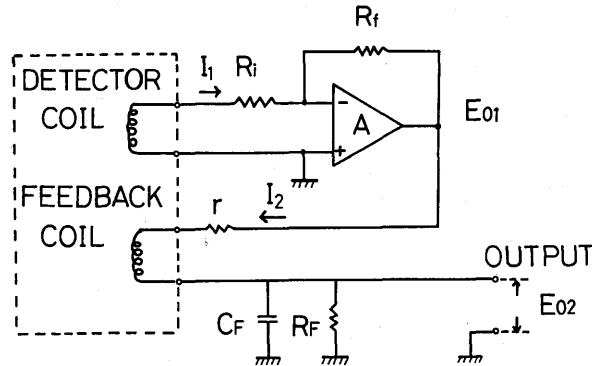


図1.2.1 フィードバック長周期地震計の構成

とと同等になり、固有周期が長くなることを示している。

地震計の総合周波数特性は、0.1Hz～10Hzの周波数領域で地動変位に比例した出力を持つように設計・製作した。

この地震計は、図1.2.2のブロックダイアグラムに示すように、変換器、フィードバック増幅器、積分増幅器、検定用正弦波発振器、アッテネーター、定電圧電源装置、記録器、時計及び商用電源保安器で構成されている。一点破線で囲んだ部分は一つのラックに組み込まれている。こ

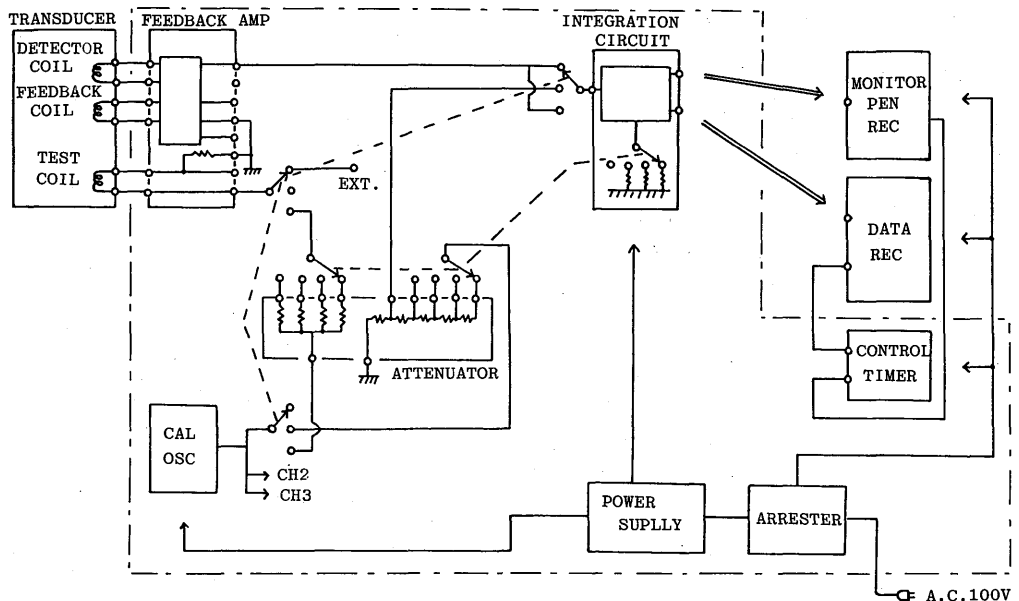


図1.2.2 火山用長周期地震計のブロックダイアグラム

これらの各部を次に説明する。

1) 変換器 (TRANSDUCER)

固有周波数0.5Hzの変換器を用い、ボビンには地動検出用、フィードバック用及び検定用の3種類のコイルを捲いてある。表1.2.1はこの変換器の諸定数である。

表1.2.1 変換器の諸定数

		単 位	水 平 成 分	上 下 成 分
振子の慣性能率		$\times 10^4 \text{gr} \cdot \text{cm}$	9.67	9.70
振子の重さ		gr	1502	1428
振子の長さ		cm	6.88	7.21
周 波 数		Hz	0.5	0.5
感 度	検出コイル	volt $\cdot$ sec	35.68	34.83
	フィードバックコイル	volt $\cdot$ sec	33.56	32.81
	検定コイル	volt $\cdot$ sec	2.19	2.49

2) フィードバック増幅器 (FEEDBACK AMP)

変換器の地動検出用コイルの出力を演算増幅して変換器のフィードバックコイルに帰還する部分と、その出力を微分する部分とからなっている。変換器とこのフィードバック増幅器とを組合せた回路により変換器の固有周波数を0.1Hzまで低くすることができる。

表1.2.2にはこの回路と変換器を組合せて設計・製作した火山用長周期地震計の諸定数を示す。

表1.2.2 火山用長周期地震計の諸定数

	単 位	水 平 成 分	上 下 成 分
周 波 数	Hz	0.1	0.1
感 度	volt/kine	1.5	1.5
減 衰 定 数		0.6	0.6

3) 積分増幅器 (INTEGRATION CIRCUIT)

図1.2.1でフィードバック回路からの出力 E_{02} は速度電圧であるので、これを変位電圧に変えるための積分増幅器である。これにより0.1Hz~10Hzの周波数領域で地動変位に比例した電圧が得られる。また、この増幅器の1Hzにおける増幅率は、2.12倍、4.24倍、8.49倍、21.2倍のいずれかに切替えられ、これによって倍率は50倍から100倍、200倍、500倍まで切替えられ、 $\pm 10^{-4} \sim \pm 0.4$

mmの地動変位を観測できる。

4) 検定用正弦波発振器 (CAL OSC)

この発振器には、クワドラチャ (Quadrature) 発振回路を用いている。出力信号は1 Hzの正弦波で、この信号はアッテネーターを通して積分増幅器あるいは検定用コイルに入力される。これにより積分増幅器以降あるいは変換器を含めた地震計全体の感度の検定ができる。

5) アッテネーター (ATTENUATOR)

検定用コイル及び積分増幅器への入出力電圧を調整する装置である。

6) 定電圧電源装置 (POWER SUPPLY)

地震計に必要な $\pm 6\text{ V}$ 、 $\pm 9\text{ V}$ の電圧を得るためのものである。

7) 記録器 (REC)

記録器は、モニター用に長時間連続記録計を、解析用にアナログデータレコーダーを用いた。

7.1) モニター用記録器 (MONITOR PEN REC)

三栄測器社製長時間連続記録計 8 D01型を使用

成分数：1

ガルバノメーター：3123 L形ガルバノメーターを2個使用

最大記録幅：30mm_{p-p}

記録方式：インク書き (円弧)

感 度：0.5、1、2、4 V/cmおよびOFF

周波数特性：DC~30Hz

連続記録時間：2 mm/分のとき約5.5ヶ月

8 mm/分のとき約22ヶ月

制御信号：毎分パルス及び毎時間パルスの外部同期信号

刻時信号：外部刻時信号を入力に重畳

観測は次のようにして行った。

1982年10月23日~1983年6月20日

記録速度：4 mm/秒、紙送り速度：2 mm/分、刻時：1回/秒、改行：1回/分、改頁：1回/時

1983年6月21日以降

記録速度：15mm/分、紙送り速度：8 mm/15分、刻時：1回/分、改行：1回/15分、改頁：1回/8時間

7.2) データレコーダー (DATA REC)

ソニーマグネスケール社製UFR-31400ALを使用

チャンネル数：14チャンネル

火山用長周期地震計3チャンネル、短周期地震計3チャンネル、タイムコード1チャンネルの合計7チャンネルを使い、往復で14チャンネル使用

記録再生方式：FM

テープ速度：19cm/sec、1.9cm/sec、0.19cm/sec

連続記録時間：10号リール(全長1440m)。0.19cm/secの記録速度で往復記録して、419時間56分連続記録できる。

周波数特性：

テープ速度	周波数特性	S/N (RMS)
19cm/sec	DC～2.5kHz	48dB
1.9 //	DC～250Hz	45dB
0.19 //	DC～25 //	42dB

観測はテープ速度0.19cm/secで行った。

8) 時計 (CONTROL TIMER)

三栄測器社製コントロールタイマー5569を使用

この時計からモニター用記録器の刻時、動作制御及びデータレコーダーへの刻時に対応した直列信号(スローコード)の入力を行った。おもな規格・性能は次のとおりである。

水晶発信器：OCXO-045

発振周波数：1MHz

時刻表示：01月01日00時00分00秒～12月31日23時59分59秒までの10桁LED表示

手動修正：押ボタンスイッチにて±0.1sec、±1secの進み遅れを修正

バッテリーバックアップ：約5時間(20°C完全充電時)、ニッケルカドミウム電池浮動充電方式

9) 商用電源保安器 (ARRESTER)

(1)～(8)の機器を雷などによる異常電圧から保護するための装置である。次の性能を備えている。

1次電圧：AC100V (50/60Hz)

2次電圧：AC100V

2次電流許容量：3A

放電開始電圧：AC $\geq$ 10±50V

避雷管最大衝撃電流：1000A

使用条件：連続

3. 地震計の性能試験

製作した地震計の性能を調べるために振動試験と温度試験を行った。振動試験には3ポスタ油

圧ベアリング方式の精密振動実験装置（ASE-385）を、温度試験には恒温槽（トリメイトギャラクシー：型式GAL-60-CL）を使用した。

図1.2.3に振動試験で得られた地震計の出力波形の例を示す。図のa)、b)及びc)はそれぞれ1 Hz、0.5 Hz及び0.1 Hzにおける波形で、各図の上段は振動台の振動をマグネセンサー（ソニーマグネスケール社製マグネセンサーセットB2）で測った波形、下段は振動台に乗せた上下動地震計の出力波形である。

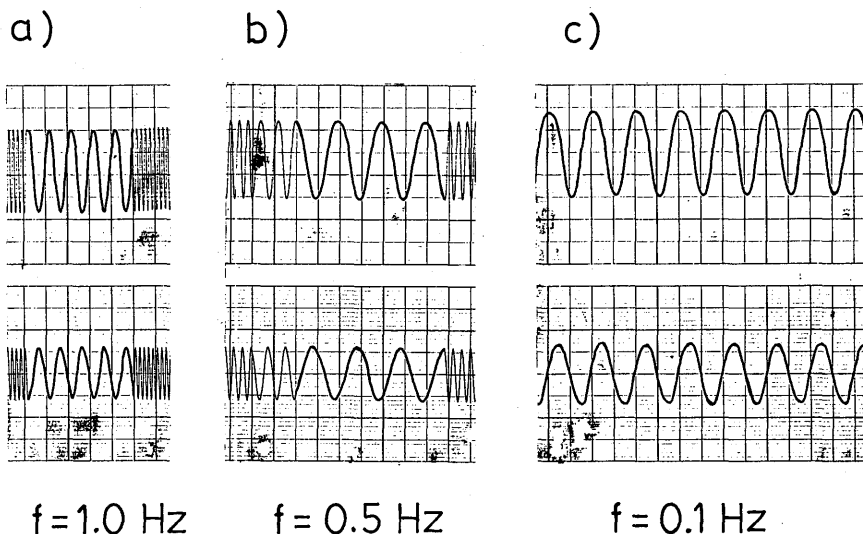


図1.2.3 振動試験による波形

上段は振動台の動き、下段は火山用長周期地震計（上下動）の出力波形

図1.2.4にこの試験で求めた総合周波数特性を示す。

図1.2.5には振動試験で求めた位相特性を示す。正の方向は位相の進み、負の方向は位相の遅れである。0.5 Hz付近から10 Hz付近までは位相差は小さいが、10 Hz以上あるいは0.4 Hz以下では急激に大きくなっている。

なお、この振動試験によりこの地震計は設計どおり変位倍率が50倍から100倍、200倍、500倍まで切替えられること及び変位に比例した出力を持つことが確かめられた。

一方、長周期地震計の上下動成分は振子の吊りバネの温度変化が周波数特性に影響することがしばしば問題になる。そこで製作した地震計の変換器について温度試験を行った。

図1.2.6に試験結果を示す。-5°Cで約5%の出力低下があるが常温付近での温度特性はきわめてよい。なお、バネ材には明石合金株式会社製の恒弾性合金アカシスパンASCを使用した。これはNi、Cr、Ti、Al、Feの合金を硬化処理したもので熱弾性係数は $-1.0 \sim +1.0 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 、熱膨張係数は $8.1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ である。

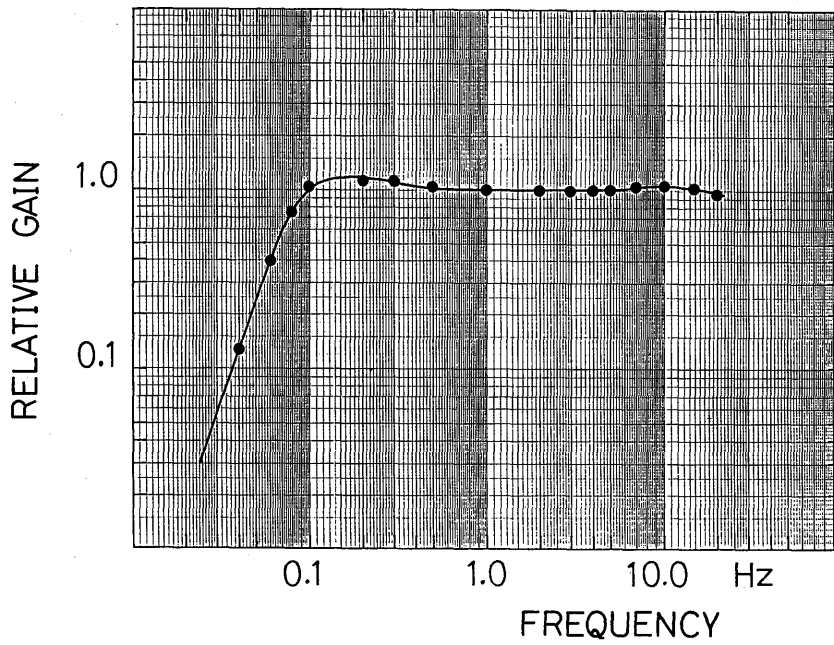


図1.2.4 振動試験で求めた火山用長周期地震計の周波数特性

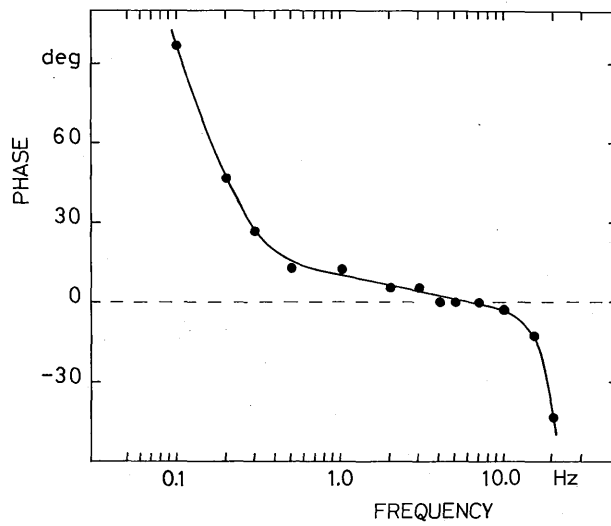


図1.2.5 振動試験で求めた火山用長周期地震計の位相特性

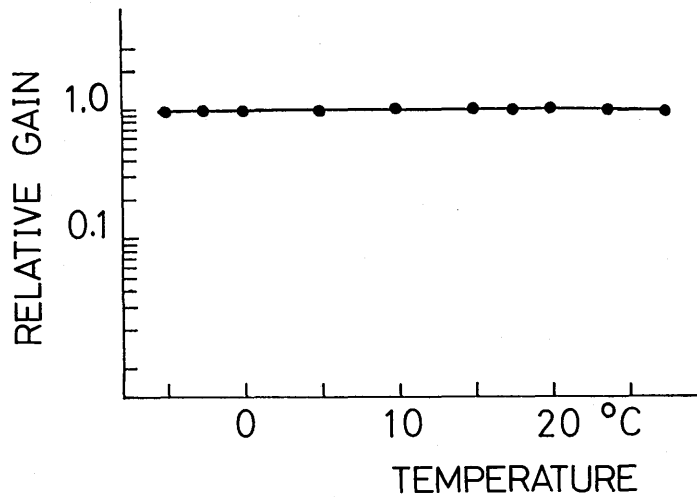


図1.2.6 火山用長周期地震計の変換器（上下動）の温度特性

4. 観 測

4.1 概 要

前節で述べた火山用長周期地震計を阿蘇山測候所の地震計台に設置し、1982年10月23日から1984年3月13日まで倍率500倍で観測を行った。データレコーダー及び長時間連続記録計で記録したアナログ磁気テープとモニター記録紙は、半月毎に阿蘇山測候所職員が交換し、気象研究所へ郵送した。気象研究所でアナログ磁気テープを再生し、地震記象の読み取り、解析等を行った。また、テープには火山用長周期地震計の3成分と時刻の他に、阿蘇山測候所のC点地震計3成分を同時に記録し比較解析した。

図1.2.7には、阿蘇山測候所の地震観測網(A、B、C、D、E点、JMA-A74型電磁地震計： $T_0=1$ 秒、 $V=3,000$ 倍による)と今回製作した火山用長周期地震計を設置してある測候所(O点)及び中岳火口の位置を示す。測候所は中岳第1火口の西南西約1.2kmの地点にある。

4.2 観測された震動

火山用長周期地震計で記録した火山性震動、火山以外の地震、脈動及び人工的雑震動について次に述べる。

4.2.1 火山性震動

これまで阿蘇山測候所は短周期の地震計($T_0=1$ 秒)で観測を行ってきたが、火山性震動として計測した震動には、孤立型微動、火山性地震、火山性連続微動があり、これらはいずれも中岳火口付近で発生すると考えられている。

図1.2.8、図1.2.9、図1.2.10は、それぞれ孤立型微動、火山性地震、火山性連続微動の記録

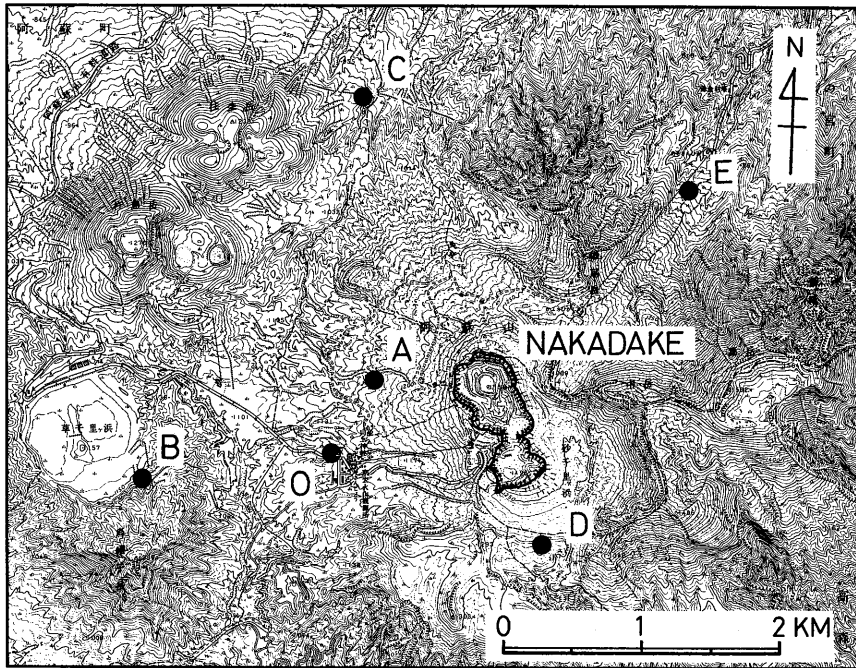


図1.2.7 中岳火口と阿蘇山測候所(O)及び同測候所による地震観測点(A~E)

例である。各図で、上段の3つは火山用長周期地震計の記録、下段の3つはこれと同じ震動のC点の記録である。

図1.2.8の記録には、孤立型微動に対応して卓越した長周期の震動がみられる。この例のような火山性長周期震動はいずれも孤立型微動に対応して観測されたが、逆に孤立型微動が観測されても長周期震動が観測されない場合も多数あった。

図1.2.9は、中岳火口付近で発生した火山性地震(P-S:0.3秒)で、A型火山性地震とも呼ばれている。この型の地震は観測期間中に20個以上発生したが、いずれも長周期成分は含まれていなかった。

図1.2.10に示した例は、周期0.3秒前後の火山性連続微動で、1982年11月末から12月上旬と1983年9月下旬にA点での振幅が3~4 μ に達するものが発生した。この連続微動発生中にはときどき長周期震動が観測されたが、同じ時刻に対応するC点の記録をみると、その付近だけに1秒程度の明らかに周期の異なる波動が検出された。このことは、連続微動発生中に図1.2.8の型の震動が重なって起こったと推定される。従って、この連続微動は本質的には長周期成分は含んでいないと考えられる。

以上述べたように、火山性長周期震動は孤立型微動にのみ対応して観測された。

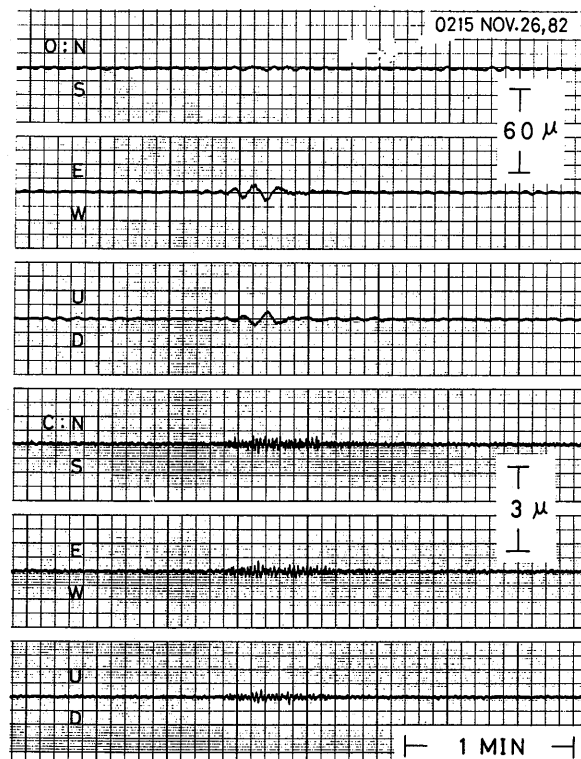


図1.2.8 孤立型微動の記録例
上段3つは火山用長周期地震計の記録、
下段3つはJMA-A74型電磁式地震計の記録

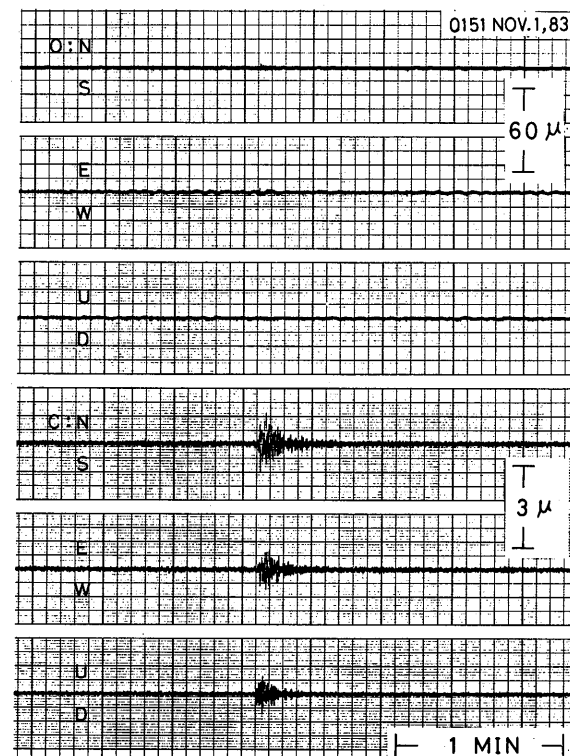


図1.2.9 A型火山性地震の記録例
記録の並べ方は図1.2.8に同じ。

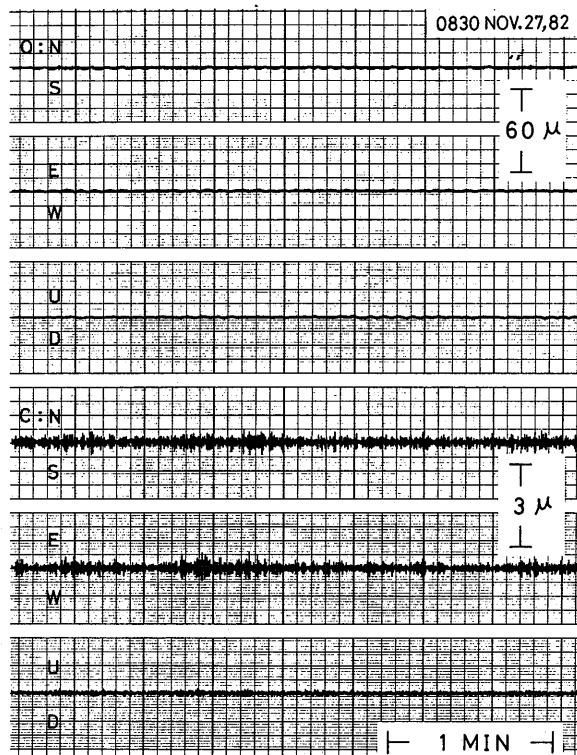


図1.2.10 火山性連続微動の記録例
記録の並べ方は図1.2.8に同じ。

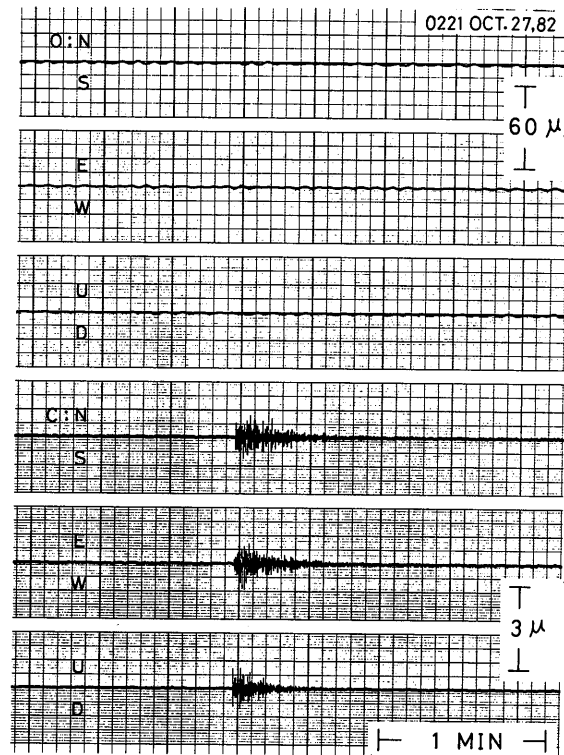


図1.2.11 阿蘇カルデラ北西外輪付近で発生した地震の記録例
記録の並べ方は図1.2.8に同じ。

4.2.2 火山以外の地震

阿蘇カルデラ外輪付近ではしばしば地震が群発する。図1.2.11には、1982年10月下旬に阿蘇カルデラ北西外輪で発生した群発地震の記録例を示す。上段の3成分は火山用長周期地震計の記録、下段の3成分はC点の短周期地震計の記録 (P-S: 2.3秒) である。この時には、同じ地域で発生した地震を10個以上記録したが、いずれも長周期震動は観測されなかった。

図1.2.12は1982年12月28日22時49分 (JST) のフィリピン付近の地震 (19.945°N , 121.397°E , $H=34\text{km}$, $M_b=6.0$, $\Delta \approx 1,730\text{km}$) の記録である。火山用長周期地震計は遠地地震の波動をよく記録していて、遠地地震観測用の地震計としても適していることがわかる。

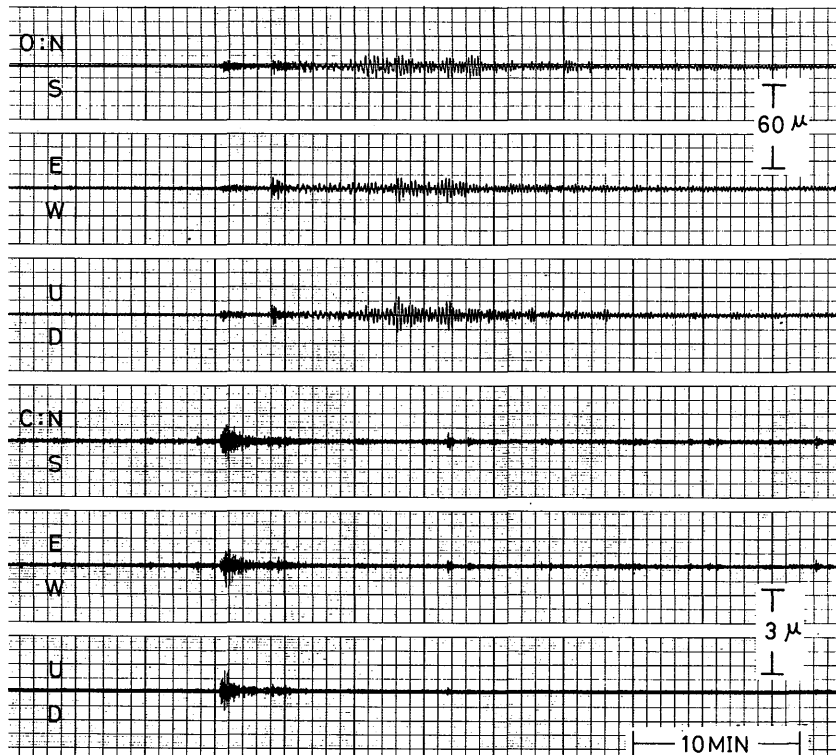


図1.2.12 1982年12月28日22時49分 (JST) のフィリピン付近の地震。
記録の並べ方は図1.2.8に同じ。

4.2.3 脈 動

脈動は、台風や低気圧など気象擾乱が主な原因の震動で、火山用長周期地震計の観測帯域で最も大きなバックグラウンドノイズである。今回の観測でも上下動成分で 2μ 以上の振幅を記録した場合が27回あったが、このときの気象概況は、台風の接近、西高東低の冬型及び九州付近を通過

する低気圧のほぼ3つのパターンに代表される。図1.2.13には、冬型の気圧配置による吹き出しのあった1982年11月10日21時頃の脈動の記録例を示す。最大振幅は 5.7μ 、卓越周期はほぼ5秒で定常的な振動である。図1.2.14には、この脈動のオービットを示してあるが、振動方向は非常に複雑である。水平動と上下動の最大振幅の比は約2:1で、水平面内での振動が卓越している。図1.2.15には同時刻のC点の記録を示す。

図1.2.16のa)、b)、c)には、台風、冬型天気、及び九州付近を低気圧が通過する場合の脈動の相対的なスペクトル(いずれも南北動成分で、それぞれ0.2Hzで正規化したもの)を示す。a)は台風5号によるもの(1983年8月15日07時20分頃)で、卓越周期は7秒である。このときの脈動の最大振幅は南北動の 10.8μ 、阿蘇山測候所の06時の平均風速は 8.2m/sec で風向は北北東、台風5号は阿蘇山の南南東約400kmの海上にあった。b)は冬型の天気の時のも(1983年2月19日04時55分頃)で、卓越周期は5秒である。脈動の最大振幅は南北動の 7.6μ 、阿蘇山測候所の06時の平均風速は 6.2m/sec で風向は西、発達した低気圧が秋田沖と岩手沖にあった。同図c)は阿蘇山を挟むように九州南部と北部を低気圧が通過した時のもの(1983年6月16日14時05分頃)で、卓越周期は4秒である。脈動の最大振幅は南北動の 9.0μ 、阿蘇山測候所の15時の平均風速は 7.0m/sec で風向は南西、低気圧は宮崎県沖と山陰付近にあった。それぞれの場合のスペクトルには違いがみられる。

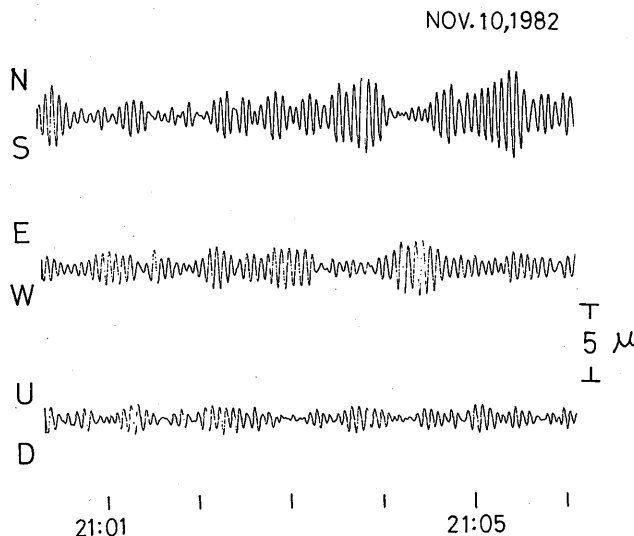


図1.2.13 火山用長周期地震計による脈動の記録例 (1982年11月10日21時頃)。

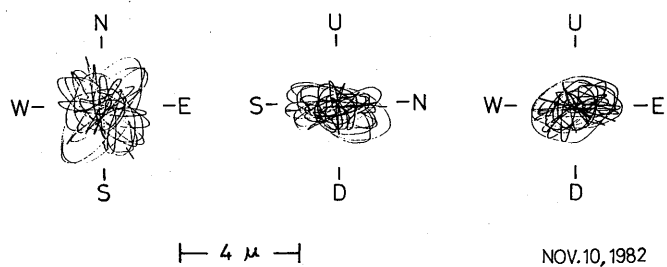


図1.2.14 図1.2.13に示した脈動のオービット

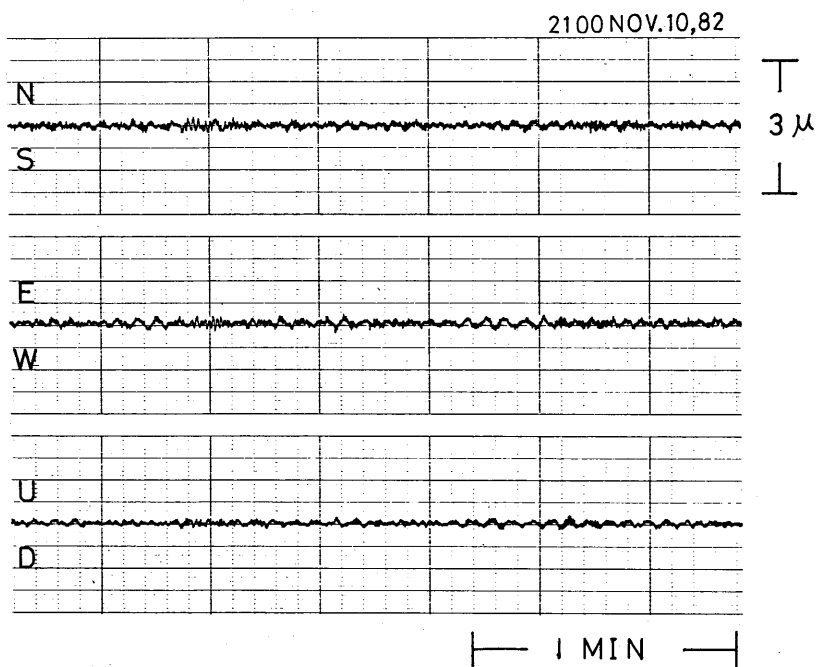


図1.2.15 阿蘇山測候所のC点における脈動の記録例。

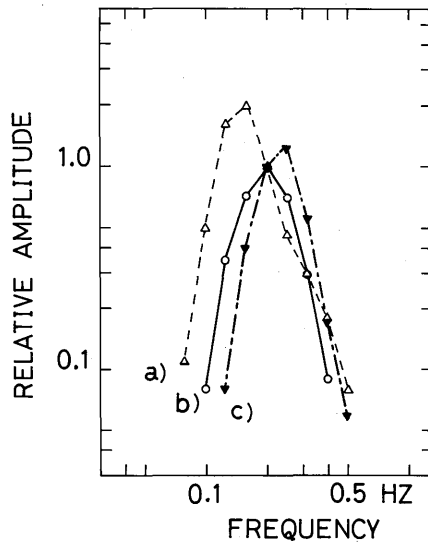


図1.2.16 脈動のスペクトル

- a) 台風5号接近時 (1983年8月15日)
- b) 冬型の気圧配置による吹き出し時 (1983年2月19日)
- c) 九州南部と北部を低気圧が通過した時 (1983年6月16日)

4.2.4 人工的雑震動

火山用長周期地震計の変換器は、阿蘇山測候所の地震計台に設置してあるので、この台の付近で人が作業したり、物を動かすことにより雑震動が記録される。この震動の周期は数秒、最大振幅は2～3 μ で、水平2成分に顕著に現われ、上下動成分はほとんど記録されない。しかし、その記象は振幅の変化が不自然で、他の記象と識別することは容易である。

5. 火山性長周期震動

5.1 波形の特徴

ここでは、図1.2.8に示した型の火山性長周期震動の解析結果を述べる。

図1.2.17には、火山性長周期震動の記録を3例示してある。波動はいずれも東西動成分と上下動成分に卓越し、南北動成分は非常に小さい。波形は数振動の波から成り、最大振幅での見掛けの周期は約8秒である。

図1.2.18には、代表的な長周期震動のオービットを示してあるが、水平面内での振動方向は約E11°N～W11°S、東西断面での振動様式は、西上り、東下がり、長軸方向は東下がり約40度である。現在もっとも活動的な火口は中岳第1火口であるが、その火口の中心はこの長周期震動の振動方向から約12度北へずれている。

Sassa (1935) は、阿蘇山で観測される火山性微動を4つに分類した。その中で、周期3.5～7秒の孤立した微動を第2種火山性微動と呼んだ。この微動を1932年10月と1933年8～9月に本堂観測所（阿蘇山測候所の東南東約300mの地点にある）で観測した時の特徴として、i) 周期約6秒、ii) 水平面内の振動方向はN74°E～S74°Wで、これは第4火口の方角にあたる、iii) それと直角方向の振幅は約1/5程度で周期は約半分、iv) 上下動の振幅は水平動と同程度、v) 振動様式は西上り、東下がり、等をあげている。

今回観測した火山性長周期震動は、これらの特徴とほぼ一致しているので、第2種火山性微動に相当すると考えられる。以後、本論ではこの型の火山性長周期震動を第2種火山性微動と呼ぶことにする。

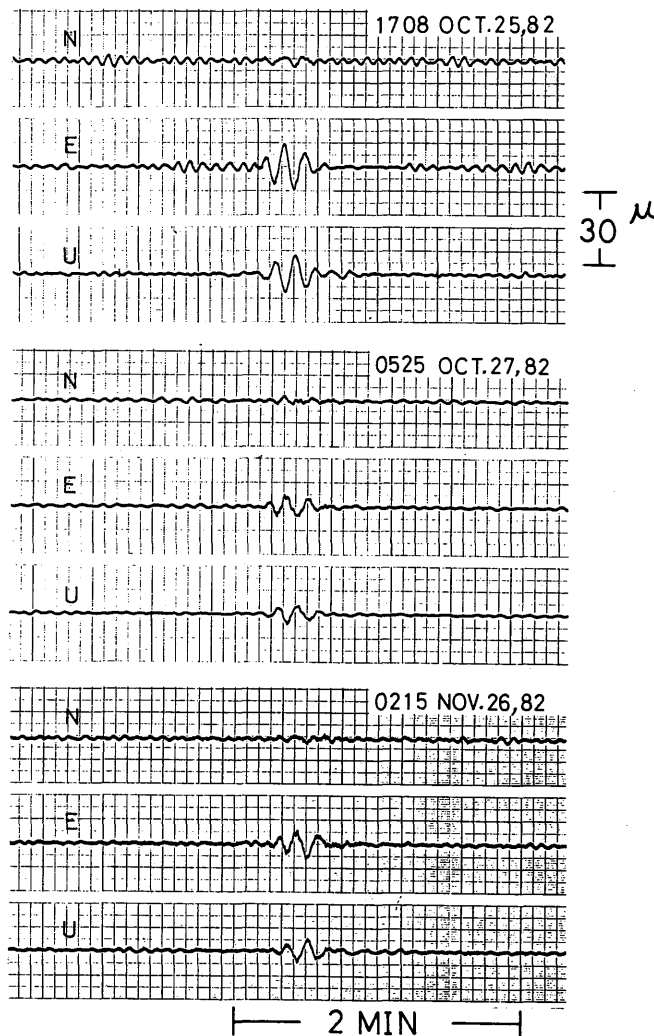


図1.2.17 火山性長周期震動の記録例

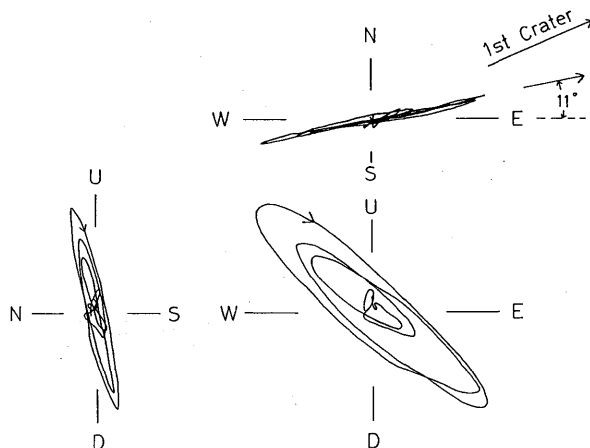


図1.2.18 火山性長周期震動のオービット

5.2 発生状況

表1.2.3（本章末尾）には上下動成分で 2μ 以上の第2種火山性微動の日別発生回数を、表1.2.4（本章末尾）には最大振幅とその周期の検測結果をそれぞれ示す。

図1.2.19には第2種火山性微動の発生状況（上下動成分、 2μ 以上）を示す。この図の下段は微動の最大振幅、上段はその最大振幅部分の周期である。

1982年10月から12月には、 $2\sim 6\mu$ の振幅を持つ微動がほぼ一様に発生している。1983年1月から4月にかけては、この微動の振幅は全般に小さく、また発生数も少ない。しかし、5～6月頃からは、振幅は $2\sim 3\mu$ で小さいが、発生数は次第に増加し、11月には148回を記録した。一方、周期は6～10秒で、時間的な周期の変化はほとんどみられない。図1.2.20には周期別の頻度分布を示してあるが、最も多いのは7～8秒のものである。

4.2.1節で述べたように、第2種火山性微動は孤立型微動に対応して観測された。しかし、孤立型微動は必ずしも長周期の震動を伴うとは限らず、伴う場合もあればそうでない場合もある。図1.2.21には、同じくらいの大さきの孤立型微動を2個並べてあるが、矢印Aで示したものは明瞭な長周期震動を伴っているのに対して、矢印Bで示したものには長周期成分は含まれていないか、あっても小さい。この例のように、明瞭な孤立型微動が観測されても長周期震動がほとんど記録されていないものも多数あった。

図1.2.22には、第2種火山性微動（黒丸）とA点で振幅 0.5μ 以上を記録した孤立型微動（白丸）の月別発生回数を示す。第2種火山性微動は、観測開始から1983年5月までは毎月数回～20回発生していたが、6月頃から増加傾向を示し、11月には148回観測された。一方、孤立型微動も、1982

年10月から1983年4月までは毎月数回程度であったが、5月頃から次第に増え始め、11月には2706回を記録した。

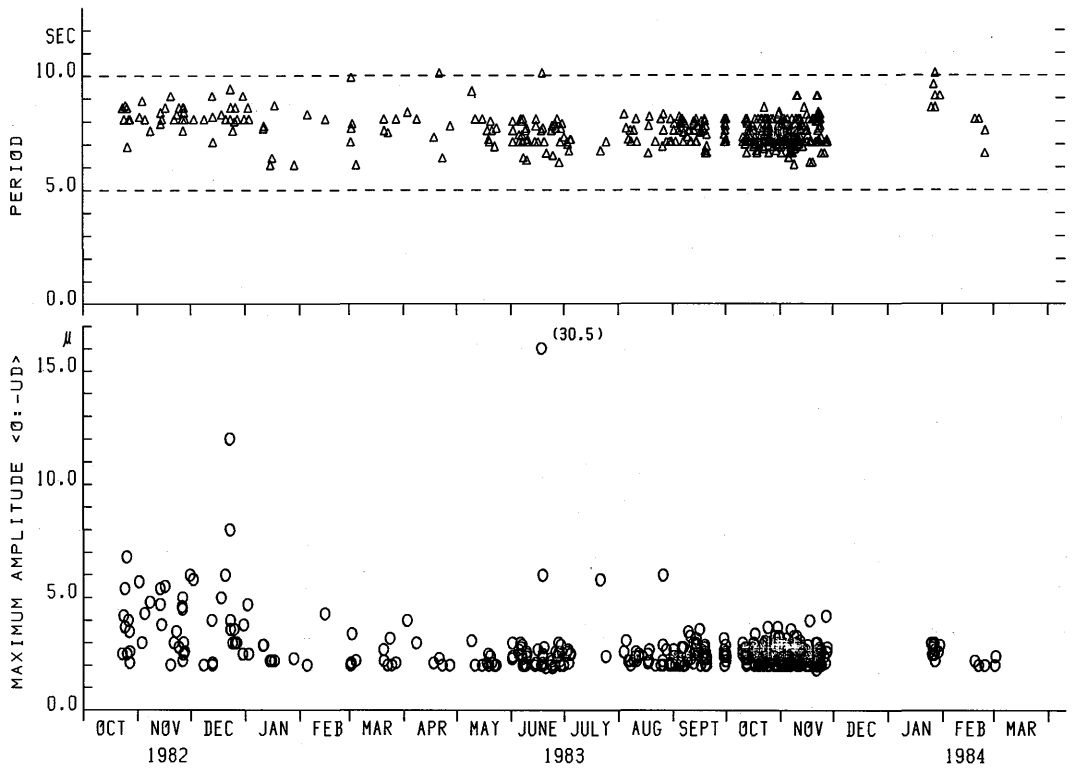


図1.2.19 第2種火山性微動の発生状況
上段は周期、下段は振幅の推移

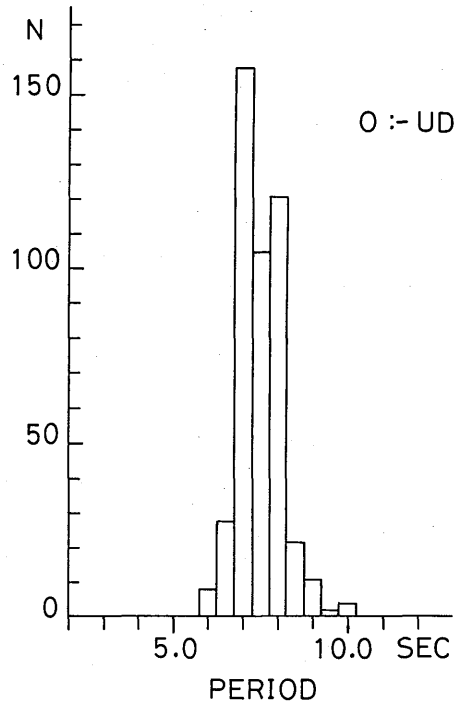


図1.2.20 第2種火山性微動の周期別頻度分布 (O点の上下動成分)

図1.2.23には、第2種火山性微動の最大振幅とそれに該当するC点の孤立型微動の最大振幅との関係を示す。前者は後者に比べて、数倍から1桁以上大きい。

図1.2.24には、C点で記録した孤立型微動の周期別頻度分布を示す。最大振幅部の波動の周期は、1秒から2秒の間にほとんど分布している。この地震計 ($T_0 = 1$ 秒) の特性は1秒以上の周期の波動に対しては倍率が著しく低下するので、このことを考えれば図1.2.24の頻度分布はかなり特異なことであり、この微動は、1秒以上の長い周期の震動が卓越したものであることを示唆する。

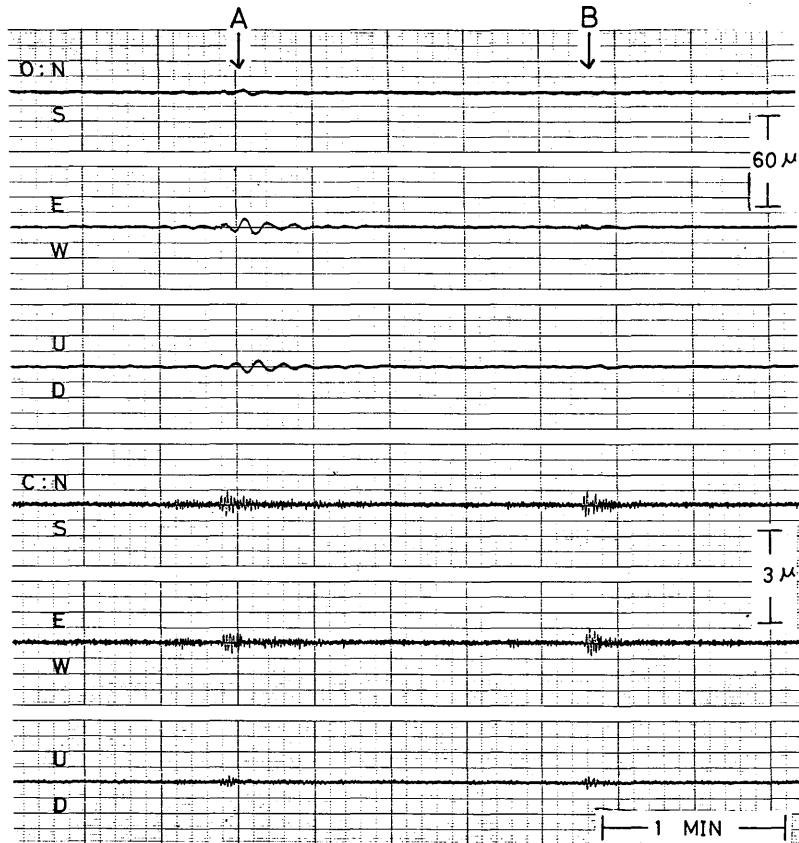


図1.2.21 第2種火山性微動を伴う孤立型微動（矢印A）と伴わない孤立型微動（矢印B）の記録例

これまで述べてきたように、従来孤立型微動として観測していた微動には、その振幅の数倍以上もある長周期の震動、すなわち第2種火山性微動を伴っていたものがあつた。一方、菊池(1974)によれば、第2種火山性微動は火山性微小地震に対応して発生している。おそらく第2種火山性微動は、単独に発生するものではなく、孤立型微動あるいは火山性微小地震の発生と相互に密接に関係していると推定される。

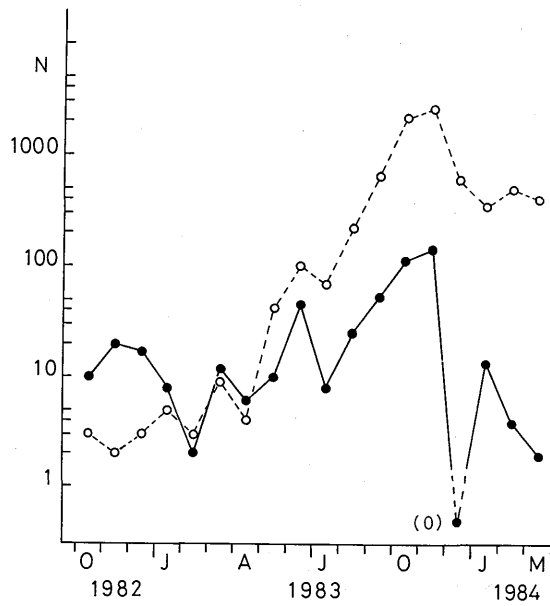


図1.2.22 第2種火山性微動（黒丸）と孤立型微動（白丸、A点での振幅 0.5μ 以上のもの）の月別発生回数

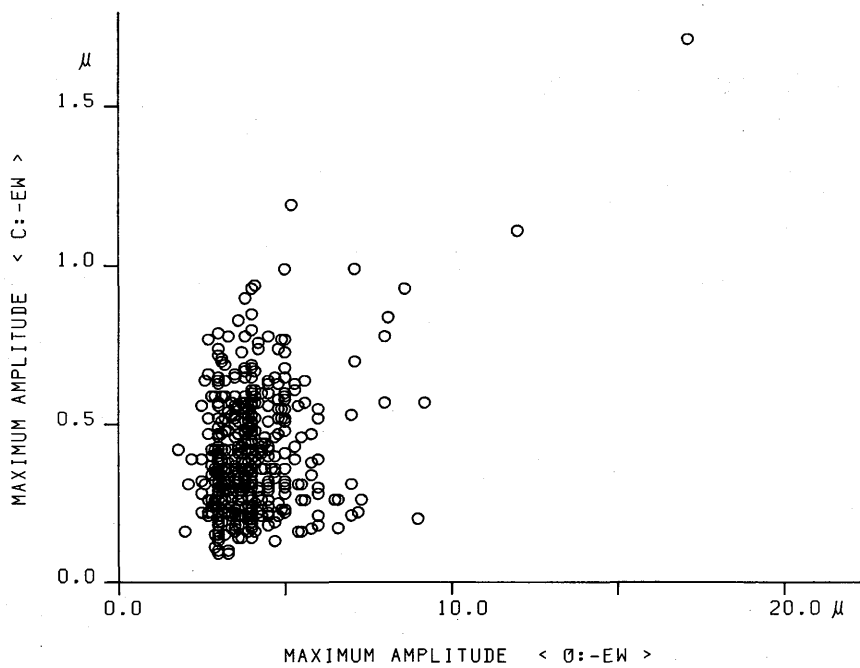


図1.2.23 火山用長周期地震計による第2種火山性微動の最大振幅（O点の東西動成分）と短周期地震計による最大振幅（C点の東西動成分）の関係

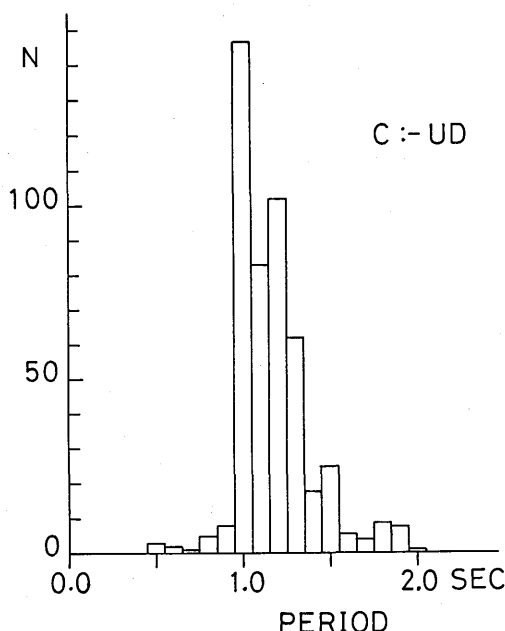


図1.2.24 第2種火山性微動を伴う孤立型微動（C点の地震計による）の最大振幅の周期別頻度分布

6. 第2種火山性微動と火山活動

第2種火山性微動は、火山下のマグマ溜りの固有振動によって生成されるもので、その周期の変化はマグマ溜りの内部状態の変化を示すものと考えられている（Sassa 1935）。久保寺（1964）、Kubotera（1964）はこの微動源の理論解として半径2～4 kmのマグマ溜りを求めている。また、Sassa（1935）によれば、1933年の大噴火活動前にはこの微動の周期に時間的な変化があった。

このように、この微動は火山下のマグマ溜りの内部状態に関する情報を伝えるとともに、将来の火山活動を予測する上で極めて重要な微動である。

中岳第1火口は、1980年初め湯溜りを形成し、現在（1984年3月）まで続いている。火口壁は少しずつ崩壊して、湯溜りの面積は拡がり、1981年10月12日には直径約170mの大きさとなった（土肥・大田1983）。火口底では、噴湯現象や高さ数m程度の小規模の土砂噴出がときどき発生している。火口壁及び湯面からは白色の噴煙を最高200～300m程度にあげているが、その量は少ない。

本研究の観測期間中の阿蘇山の表面活動は、上述のように静穏であったが、1983年5月以降地震活動が活発化し、11月には第2種火山性微動が148回観測された。また、孤立型微動の発生回数も2,706回に達し、噴火活動への進展が懸念された。しかし、12月にはいと第2種火山性微動は

1回も観測されなくなり、また孤立型微動も640回と急激に少なくなった。今回観測した第2種火山性微動は、発生回数には変化があったが周期には変化はみられなかった。表面活動も前述のように静穏で、この微動の発生状況に対応するような活動の消長はみられなかった。

7. ま と め

火山で長周期地震計による観測を行うことは、これまで非常に困難であった。その主な理由は、長周期地震計は観測室の温度変化や地震計台のわずかな傾斜等でその性能が著しく変化したためである。

本研究では、観測環境が多少悪くても安定した性能を有する長周期地震計「火山用長周期地震計」を設計・製作した。

この地震計は、固有周波数0.5Hzの短周期の電磁式変換器に微分回路を含んだフィードバック増幅器を組み合わせて、その固有周波数を0.1Hzまで低くしたものである。

振動試験の結果、この地震計は、総合特性として0.1Hzから10Hzの周波数帯域で地動変位に比例した出力があること、倍率は、50倍から100倍、200倍、500倍まで切替えられ、 $\pm 10^{-4} \sim \pm 0.4 \text{ mm}$ の地動変位を観測できることが確かめられた。また、温度試験では $-5^{\circ}\text{C} \sim 27^{\circ}\text{C}$ の広い温度範囲で安定に動作することが確認された。

類による第2種火山性微動に相当する長周期震動が多数観測された。

この微動の周期は、6～10秒（大部分は7～8秒）で、振幅はほとんど数 μ 以下であった。10 μ 以上を記録したのは1982年12月20日07時53分の微動（最大振幅は東西動成分の17.1 μ ）と、1983年6月18日08時26分の微動（最大振幅は東西動成分の37.2 μ ）の2つであった。また、この微動は、これまで阿蘇山測候所で孤立型微動と分類している火山性微動に対応して発現していることがわかった。しかし、孤立型微動が起これば第2種火山性微動も必ず発生するものではなく、明瞭な孤立型微動が観測されても第2種火山性微動が観測されない場合も多数あった。

第2種火山性微動の発生回数は、1982年10月～1983年4月は月平均10回程度であったが、1983年5月以降はその数倍以上に増加した。しかし、マグマ溜りの大きさに関係すると考えられているこの微動の周期には、時間的な変化はみられなかった。

今回の観測は、火山活動の静穏な時期に行ったので、阿蘇山の平常時における第2種火山性微動の基礎的資料が得られたことになる。

参考文献

- Kubotera, A. (1964) : Volcanic micro tremor of the second kind——Nature of its wave generation and source condition——, Special Contrib. Geophy. Inst., Kyoto Univ., 1, 81-91.
- Sassa, K. (1935) : Volcanic micro-tremor and eruption earthquakes, Mem. College of Science Kyoto Univ. 18, 255-293.
- 田望・中禮正明・田中康裕・細野耕司 (1984) : 振子に電氣的フィードバックを施した火山用長周期地震観測装置の開発、気象研究所研究報告、35、21-29.
- 菊池茂智 (1974) : 阿蘇山の長周期火山性微動について——第2種火山性微動と火山性微小地震の関係——、京都大学防災研究所年報、第17号B、107-114.
- 土肥規男・大田安男 (1983) : 1979年9月の噴火後に形成された地形図の比較による阿蘇中岳第1火口の地形変化、火山噴火予知連絡会会報、27、39-44.
- 久保寺章 (1964) : 阿蘇火山の微動について(I)、第2種火山性微動の波動特性とその震源の解明、火山II、9、87-98.

表1.2.3 第2種火山性微動の日別発生回数

年	1982			1983					
月 日	10	11	12	1	2	3	4	5	6
1	(10月23日観測開始)	1				3			3
2			1	2		2	1		
3		1							
4		1			1	1			
5									2
6									3
7									5
8		1							1
9			1				1		3
10				1				1	1
11				1					
12									
13		2	3						
14		1		1					3
15				1	1			1	1
16		1			1				
17				1			1		1
18			1					2	6
19		1						1	1
20			1			2	1	2	1
21		1							
22		1				1	1	1	
23	2		4					1	2
24	2	1	1			1			2
25	2		1			1			1
26	1	6	1				1		2
27	3	1	1			1			1
28				1					4
29									2
30		1							1
31			1						
計	10	20	17	8	2	12	6	10	46

年	1983						1984		
月 日	7	8	9	10	11	12	1	2	3
1			2	1	8				1
2	1		1		6				1
3	3	1	1		8				
4	2		2		4				
5		1	4		6				
6		1	3		13				
7		2	1		6				
8					8				
9		1	2		9				
10		2	2	3	10				
11		1	1	2	4				
12		2	3	8	8				
13			3	5	7				
14			2	1	1				
15			1		5				
16			3	6	2				
17		3	1	8	5				
18		1	4	2	2				
19			5	4	2			1	
20			2	6	2				
21	1	1		5	12			1	
22				10	8				
23				8	5				
24	1	1		10	2			1	
25		1		5	1		2	1	
26		3		5	2		4		
27				2	2		6		
28		1		3					
29		1	4	6			1		
30		2	7	12			1		
31				4					
計	8	25	54	116	148	0	14	4	2

表1.2.4 第2種火山性微動の最大振幅とその周期

発 現 時	N	E	Z	発 現 時	N	E	Z
日 時 分	μ s	μ s	μ s	日 時 分	μ s	μ s	μ s
1982				1982			
10月				12月			
23 03 14	1.5 (6.8)	4.5 (7.9)	2.5 (8.5)	23 13 49		6.0 (8.0)	3.6 (8.5)
23 00	1.9 (6.8)	5.5 (8.6)	4.2 (8.0)	24 17 12		3.6 (8.0)	3.0 (7.5)
24 16 04	2.8	6.6 (8.0)	5.4 (8.6)	25 15 00		5.0 (7.8)	3.6 (7.9)
17 53	2.0	4.7 (8.1)	3.7 (8.6)	26 03 02		4.0 (8.0)	3.0 (8.5)
25 17 08	1.6	9.0 (8.6)	6.8 (8.5)	27 02 53		4.0 (8.5)	3.0 (8.0)
22 11	1.5	3.4 (7.5)	2.5 (6.8)	30 11 45		3.0 (9.0)	2.5 (9.0)
26 14 57	1.5	5.8 (7.8)	4.0 (8.0)	31 00 59	1.0	4.3 (8.1)	3.8 (8.0)
27 05 25	1.5 (6.3)	4.5 (8.2)	3.5 (8.0)	1983			
09 06		2.9 (7.5)	2.1 (8.0)	1月			
11 15		3.5	2.6	2 06 49	1.4 (9.0)	6.6 (8.5)	4.7 (8.5)
11月				20 24		3.8 (8.0)	2.5 (8.0)
1 17 37	1.9	7.2 (8.1)	5.7 (8.1)	10 23 47		4.5 (6.8)	2.9 (7.6)
3 08 03		3.9 (8.3)	3.0 (8.8)	11 07 51		4.1 (8.0)	2.9 (7.7)
4 21 58		5.8 (8.1)	4.3 (8.0)	14 22 09		3.0 (6.0)	2.2 (6.0)
7 23 23	1.1 (8.0)	6.0 (7.7)	4.8 (7.5)	15 21 43		3.0 (6.6)	2.2 (6.3)
13 17 39	1.4	7.3 (7.0)	5.4 (7.8)	17 10 07		3.0 (8.2)	2.2 (8.6)
18 32	1.5	6.5 (7.5)	4.7 (8.3)	28 10 15		3.1 (6.8)	2.3 (6.0)
14 10 55	1.1	5.0 (7.0)	3.8 (8.0)	2月			
16 10 16	1.3 (7.5)	7.0 (8.2)	5.5 (8.5)	4 23 16		2.8 (8.6)	2.0 (8.2)
19 13 15		3.0 (9.0)	2.0 (9.0)	15 01 47	1.7 (6.6)	5.8 (7.3)	4.3 (8.0)
21 10 57		4.5 (7.0)	3.0 (8.0)	3月			
22 20 48		5.0 (8.0)	3.5 (8.2)	1 14 21		3.5 (7.8)	2.0 (7.0)
24 06 06		4.0 (8.0)	2.8 (8.5)	21 09		3.0 (7.5)	2.0 (9.8)
26 02 15		5.4 (8.0)	4.6 (8.0)	21 45	1.6 (3.0)	3.5 (7.6)	2.1 (7.6)
09 24		6.0 (8.0)	4.5 (8.5)	2 09 58		4.5 (8.0)	3.4 (7.8)
09 50	2.2	6.0 (8.2)	5.0 (8.5)	22 49	2.3 (4.4)	4.0 (6.0)	
10 06		3.1 (7.5)	2.2 (7.5)	4 15 43		3.6 (5.7)	2.2 (6.0)
22 45		3.0 (8.0)	2.5 (8.5)	20 09 21	1.0	3.4 (7.5)	2.7 (8.0)
23 06	1.3	3.9 (8.0)	3.0 (8.3)	13 14		3.1 (7.6)	2.2 (7.5)
27 12 25		4.3 (7.5)	2.6 (8.0)	22 16 54		3.5 (7.0)	2.0 (7.4)
30 16 20		8.0	6.0	24 00 06		3.8 (7.0)	3.2
12月				25 00 48		3.0 (7.2)	2.0
2 11 14	2.1	8.0 (7.2)	5.8 (8.0)	27 08 10		3.0 (8.0)	2.1 (8.0)
8 10 07	2.3	3.8	2.0 (8.0)	4月			
13 00 07		7.0 (9.5)	4.0 (9.0)	2 19 23		4.5 (7.5)	4.0 (8.3)
08 07		3.3 (7.0)	2.0 (8.1)	8 01 12		4.1 (8.0)	3.0 (8.0)
09 16		3.4 (6.5)	2.1 (7.0)	17 18 42		3.3 (7.5)	2.1 (7.2)
18 07 10		7.0 (8.0)	5.0 (8.2)	20 23 08		2.9 (10.0)	2.3 (10.0)
20 15 38	2.0	9.2 (8.5)	6.0 (8.0)	22 16 51		3.0 (7.0)	2.0 (6.3)
23 07 53	6.0 (6.0)	17.1 (7.9)	12.0 (8.0)	26 23 17		3.0 (6.5)	2.0 (7.7)
08 47	3.1	12.0 (9.0)	8.0 (9.3)	5月			
11 47	2.0	5.0	4.0	9 08 45		4.0 (9.8)	3.1 (9.2)

表1.2.4 (続き)

発 現 時	N	E	Z	発 現 時	N	E	Z
日 時 分	μ s	μ s	μ s	日 時 分	μ s	μ s	μ s
1983				1983			
5月				6月			
11 06 57		3.0 (7.7)	2.0 (8.0)	24 11 42		3.2 (6.6)	2.0 (6.4)
15 08 15		3.0 (7.7)	2.0 (8.0)	25 15 16		3.2 (7.0)	2.0 (7.8)
18 02 13	2.2 (5.1)	3.1 (6.8)	2.1 (7.5)	26 02 33	1.1	4.3 (7.0)	2.6 (7.6)
21 21	1.0 (5.5)	4.0 (6.5)	2.5 (7.1)	21 45		3.8 (7.0)	2.4 (8.0)
19 05 20		3.0 (7.3)	2.0 (7.0)	27 17 53		4.5 (6.3)	3.0
20 00 44		3.4 (7.4)	2.4 (7.9)	28 00 53		3.9 (7.0)	2.6 (6.1)
18 50		3.2 (6.4)	2.1 (7.5)	02 54		3.9 (6.1)	2.5
22 08 30		3.0 (7.0)	2.0 (6.8)	13 59		3.9 (7.1)	2.2 (7.0)
23 08 00		3.3 (6.2)	2.0 (7.6)	22 48		3.6 (6.5)	2.0
6月				29 01 29	1.9	4.3 (6.9)	2.9 (7.6)
1 12 26		3.1 (6.6)	2.3 (7.0)	18 01		3.7 (6.9)	2.6 (7.8)
13 24		4.0 (7.0)	3.0 (7.9)	30 17 17		3.0 (6.2)	2.0 (7.2)
17 09		3.1 (6.8)	2.4 (7.5)	7月			
5 04 55		3.8 (7.1)	2.7 (7.3)	2 13 37		4.0 (7.0)	2.6 (7.0)
06 01		3.9 (6.5)	2.5 (7.0)	3 00 50		4.1 (7.0)	2.7 (6.9)
6 03 31		4.2 (6.9)	3.0 (8.0)	05 47		3.7 (7.0)	2.7
12 20		3.8 (7.0)	2.8 (7.9)	14 34		3.6 (6.6)	2.1 (6.6)
18 40		3.6 (6.5)	2.5 (7.3)	4 05 18		3.5 (7.0)	2.5 (7.1)
7 02 37		4.4 (6.6)	2.9 (7.0)	16 50		3.6 (6.5)	2.5 (7.1)
07 33		3.7 (7.0)	2.3 (7.0)	21 14 14		8.1 (6.2)	5.8 (6.6)
10 54		2.9 (7.8)	2.0 (8.0)	24 18 05		3.6 (7.1)	2.4 (7.0)
12 31		3.2 (6.7)	2.0 (7.0)	8月			
16 24		3.1 (6.3)	2.0 (6.3)	3 22 29		3.6 (8.7)	2.6 (8.2)
8 20 23		2.9 (7.7)	2.0 (7.5)	5 04 26	1.9	4.3	3.1 (7.6)
9 07 52		2.9 (7.3)	2.0 (7.6)	6 08 18		4.0 (6.3)	2.2 (7.1)
13 11		3.9 (6.5)	2.4 (6.2)	7 10 22		3.5 (7.1)	2.2 (7.5)
14 35		4.0 (7.0)	2.6 (7.0)	20 33		3.1 (6.5)	2.0 (7.0)
10 00 09		4.7 (7.6)	2.5 (7.1)	9 11 33		3.0 (7.1)	2.2 (7.5)
14 06 19		3.1 (7.0)	2.0 (7.0)	10 16 46		3.0 (7.5)	2.4 (8.0)
18 41		2.9 (7.0)	2.0 (7.7)	18 18		3.0 (8.0)	2.6 (8.0)
20 30	1.0	2.9 (7.5)	2.1 (8.0)	11 02 54	1.1	2.5 (7.6)	2.2 (7.0)
15 23 01		4.4 (6.9)	2.7 (7.0)	12 09 04		5.0	2.5
17 20 52		3.0 (6.5)	2.0 (7.5)	09 09		5.0 (7.0)	2.4
18 08 26	12.9 (10.1)	37.2 (10.0)	30.5 (10.0)	17 13 59		4.0 (6.8)	2.5
19 00	1.1 (6.0)	4.0 (7.0)	2.5 (7.6)	16 20		2.6 (6.5)	2.1 (6.5)
19 58	3.1	7.1	6.0	23 30		3.1 (7.5)	2.2 (7.7)
20 59		3.5	2.0	18 09 47		4.3	2.7 (8.1)
21 02		3.5	2.4	21 18 14		3.2 (7.2)	2.0 (7.0)
21 08		3.7	2.1	24 21 11		3.0 (7.7)	2.0 (8.0)
19 13 09	1.0 (7.0)	3.9 (7.3)	2.8 (7.0)	25 21 37		3.7 (7.0)	2.2 (6.8)
20 16 00		3.2	2.0 (6.5)	26 02 14		3.7 (7.8)	2.9
23 13 26		4.0 (7.0)	2.3 (7.5)	06 40	2.5	8.6 (8.0)	6.0 (8.2)
16 13		3.1 (7.3)	2.0 (7.5)	09 45		3.0 (7.6)	2.0 (7.5)
24 03 15		4.0 (6.9)	2.2 (7.7)	28 00 56		4.0 (6.7)	2.7 (7.0)

表1.2.4 (続き)

発 現 時	N	E	Z	発 現 時	N	E	Z
日 時 分	μ s	μ s	μ s	日 時 分	μ s	μ s	μ s
1983				1983			
8月				9月			
29 20 07		2.9 (7.0)	2.0 (7.0)	19 20 37		3.6 (7.5)	2.3 (7.3)
30 08 30		3.2 (6.9)	2.1 (8.0)	20 00 30		4.5 (6.0)	2.3 (6.5)
21 19		3.0 (7.4)	2.0 (7.0)	01 37		3.1 (7.2)	2.0
9月				29 19 18		5.0 (7.0)	3.2 (7.3)
1 04 54	1.1	4.9 (7.0)	2.7 (7.5)	21 45		3.0 (7.0)	2.5 (7.0)
11 18		3.0 (7.9)	2.4 (7.8)	22 43		3.6 (7.0)	2.4 (7.3)
2 04 19		3.5 (7.0)	2.0 (7.0)	23 47		3.2 (7.8)	2.7 (8.0)
3 23 58		3.0 (7.8)	2.4 (7.5)	30 00 00		3.0 (7.6)	2.5 (7.0)
4 10 44		3.0 (7.9)	2.2 (8.1)	03 39		2.5 (8.0)	2.0 (7.8)
15 09		3.4 (7.8)	2.0 (7.8)	10 06	1.0	4.0 (7.2)	2.5 (7.5)
5 07 10		2.8 (7.0)	2.1 (8.0)	14 30		3.5 (7.2)	2.6 (7.7)
10 38		3.4 (7.2)	2.2 (7.8)	17 20		3.8 (7.7)	2.9 (7.1)
17 50		3.8 (7.0)	2.8 (7.6)	19 20		5.0 (6.8)	2.5 (7.0)
21 32		3.1 (7.5)	2.2 (8.0)	21 56		3.1 (7.3)	2.2 (8.0)
6 13 10		3.6 (7.0)	2.0 (7.0)	10月			
17 20		3.7 (6.5)	2.2 (7.4)	1 01 03	1.0	2.8 (8.0)	2.4 (8.0)
19 59	1.0	3.4 (6.8)	2.8 (7.9)	10 08 07		4.0 (6.2)	2.7 (7.0)
7 13 31		3.0 (7.1)	2.0 (7.8)	10 08	1.9	3.8 (6.6)	2.5 (7.2)
9 00 49	1.0	4.0 (7.0)	2.2 (7.2)	10 22		5.0 (6.5)	3.0 (7.0)
12 56	1.3	4.5 (7.6)	3.5 (7.5)	11 19 27	1.5	3.2 (6.9)	2.5 (6.9)
10 05 14	1.3	4.1 (6.2)	2.6 (7.5)	22 58		3.2 (6.7)	2.3 (7.0)
16 58	1.2	4.7 (7.1)	3.3 (7.0)	12 00 52	1.3	4.5 (6.8)	2.8 (7.1)
11 01 21	1.0	3.7 (6.8)	2.3 (7.0)	01 47		3.4 (7.5)	2.4 (8.0)
12 11 10		4.3 (7.0)	2.5 (7.8)	08 59		3.0 (7.4)	2.5 (7.0)
12 35	1.3	4.7 (7.0)	3.0 (7.9)	11 06		4.5 (6.7)	2.5 (7.2)
14 51		2.7 (7.2)	2.1 (7.5)	15 30	1.0	4.0 (7.3)	2.8 (7.9)
13 04 54		4.2 (7.4)	2.6 (7.9)	16 01		3.8 (7.0)	2.0 (6.5)
17 41		3.9 (6.6)	2.6 (7.0)	18 21		3.0 (8.0)	2.1 (8.0)
18 57		4.3 (7.7)	3.0 (8.0)	22 30	1.0	4.0 (7.0)	2.7 (7.8)
14 02 18	1.3 (6.4)	5.4 (7.0)	3.2 (7.0)	13 02 48	1.2	4.2 (7.0)	2.6 (7.2)
10 55		3.8 (7.3)	2.9 (7.7)	04 30	1.2	4.5 (6.7)	2.5 (7.5)
15 00 39	1.1	4.0 (7.1)	2.7 (7.7)	11 57		3.6 (7.0)	2.3 (7.8)
16 00 24	1.2	4.7 (7.3)	3.6 (7.4)	12 21	1.0	4.1 (7.0)	2.8 (7.0)
13 38		2.9 (8.0)	2.0 (7.5)	18 42		4.0 (7.0)	2.7 (7.3)
21 27		4.0 (7.0)	2.7 (7.9)	14 10 01		3.1 (7.4)	2.6 (7.5)
17 17 34		3.6 (7.0)	2.5 (7.6)	16 03 44	1.0	4.0 (7.1)	2.8 (7.7)
18 02 39		3.5 (7.2)	2.3 (7.5)	09 18	1.0	3.9 (7.0)	3.0 (7.5)
13 59		3.0 (8.5)	2.5 (8.0)	10 58	1.1	3.0 (6.6)	2.6 (6.8)
18 43		4.2 (7.2)	2.8 (7.9)	13 16	1.1	4.0 (7.0)	3.0 (7.0)
23 40		3.9 (6.7)	2.9 (6.6)	17 16	1.2	5.2 (7.0)	3.0 (7.0)
19 06 56		4.0 (6.0)	2.6 (6.5)	20 43		4.0 (7.0)	2.5 (7.0)
07 07		3.6 (6.1)	2.0	17 00 42		3.8 (6.9)	2.4 (7.0)
07 38		3.5 (7.1)	2.3 (7.7)	02 34		3.0 (7.5)	2.1 (7.2)
19 30		3.5 (6.4)	2.4 (6.8)	07 09		3.5 (6.0)	2.0 (6.9)

表 1.2.4 (続き)

発 現 時	N	E	Z	発 現 時	N	E	Z
日 時 分	μ s	μ s	μ s	日 時 分	μ s	μ s	μ s
1983				1983			
10月				10月			
17 10 03		3.8 (7.4)	2.5 (8.0)	24 16 06		3.8 (6.5)	2.0 (7.0)
11 43	1.0 (7.0)	4.9 (7.0)	3.4 (7.2)	17 23	1.1	4.5 (7.3)	3.7 (7.8)
17 47		3.8 (6.5)	2.7 (7.0)	17 49	1.0	3.0 (7.0)	2.3 (7.5)
20 49		4.0 (6.5)	2.4 (7.0)	18 52		2.5 (7.0)	2.3 (7.8)
22 26		4.0 (6.5)	2.4 (6.9)	19 40	1.0	3.0 (8.0)	2.3 (8.0)
18 07 44	1.1	3.8 (6.4)	2.5 (6.6)	23 37		3.3 (6.4)	2.3 (7.4)
14 46	1.0	3.7 (6.2)	2.3 (6.5)	25 01 48	1.0	3.4 (7.0)	2.5 (7.6)
19 05 21		3.0 (7.5)	2.0 (8.0)	02 28	1.0	3.6 (7.0)	2.0 (7.2)
09 48	1.0	3.3 (6.4)	2.1 (7.0)	04 43	1.0	3.5 (7.0)	2.8 (7.1)
20 58		3.5 (7.0)	2.3 (7.0)	06 07	1.0	3.8 (6.5)	2.3 (6.5)
21 27		3.6 (7.0)	2.0 (7.0)	16 35	1.0	3.2 (7.1)	2.0 (7.6)
20 08 07		3.0 (7.3)	2.0 (7.6)	26 02 00	1.2	4.5 (6.9)	2.6 (7.3)
13 14	1.5	3.3 (6.2)	2.3 (7.0)	05 31		3.3 (7.0)	2.4 (7.5)
14 53		3.1 (7.0)	2.5 (8.0)	09 56	1.0	3.3 (7.0)	2.8 (8.0)
18 28		3.8 (7.7)	2.5 (7.5)	11 16		3.7 (7.2)	3.1 (7.2)
21 29		3.1 (7.0)	2.1 (7.3)	18 33	1.5	4.0 (6.9)	2.7 (7.0)
23 43		3.1 (6.7)	2.4 (7.0)	27 13 21	1.0	3.5 (7.0)	2.2 (8.0)
21 05 48		3.7 (7.7)	2.9 (8.0)	20 17		3.5 (6.8)	2.5 (6.8)
07 58		3.1 (7.0)	2.4 (7.5)	28 03 59	1.1	3.8 (7.0)	3.0 (7.2)
11 43		3.0 (7.2)	2.1 (7.2)	08 23		2.7 (7.0)	2.0 (7.0)
18 41		3.1 (7.4)	2.3 (7.5)	19 49	1.0	4.0 (7.2)	3.3 (7.3)
19 57	1.2	3.8 (7.0)	2.2 (6.8)	29 03 23		3.9 (7.4)	2.7 (7.4)
22 01 03		3.7 (7.0)	2.5 (7.0)	05 50		3.9 (6.3)	2.3 (6.6)
02 16		3.3 (7.3)	2.6 (7.3)	09 20	1.0	3.9 (7.0)	2.5 (7.4)
05 40		3.8 (6.5)	2.0 (6.8)	09 29		4.2 (7.2)	2.8 (7.3)
08 15		3.5 (7.0)	2.3 (7.0)	13 28		3.0 (6.9)	2.4 (6.9)
09 07	1.0	3.2 (6.5)	2.0 (6.7)	22 06	1.0	3.0 (7.0)	2.3 (7.0)
09 30	1.0	3.4 (7.0)	2.3 (7.0)	30 04 16	1.0	3.0 (6.8)	2.5 (7.0)
10 43	1.0	4.3 (6.8)	3.0 (7.0)	05 16	1.0	3.8 (6.6)	2.5 (7.0)
15 49	1.0	3.3 (7.3)	2.5 (8.5)	05 32	1.8	4.5 (7.5)	3.0 (7.7)
18 58		2.8 (7.0)	2.2 (8.0)	06 23		3.0 (7.6)	2.0 (7.0)
23 23	1.0	3.9 (6.9)	2.5 (7.3)	07 54		2.9 (7.5)	2.4 (7.0)
23 04 49		3.9 (6.8)	2.3 (7.0)	08 08	1.4	5.0 (7.0)	3.7 (7.0)
07 13	1.2	4.5 (7.2)	3.1 (7.5)	08 38		4.0 (7.0)	2.7 (7.4)
08 36		3.0 (7.1)	2.3 (7.0)	16 49		3.0 (6.8)	2.4 (7.3)
08 58	1.0	3.8 (6.7)	2.4 (7.0)	18 27	1.1	4.5 (7.0)	3.3 (7.0)
11 22		3.2 (7.0)	2.1 (7.5)	18 42	1.5	3.6 (8.0)	2.2 (8.2)
12 52	1.0	3.1 (7.3)	2.3 (7.5)	20 13	1.0	3.0 (7.9)	2.3 (7.8)
16 50	1.2	3.4 (7.8)	2.7 (8.0)	20 20		3.7 (6.8)	2.6 (7.0)
17 07	1.0	3.5 (7.0)	2.1 (7.0)	31 01 33		3.8 (7.5)	3.0 (7.3)
24 04 46	1.0	3.9 (7.0)	2.3 (7.5)	04 10		3.1 (8.0)	2.5 (8.3)
05 19	1.0	3.0 (7.4)	2.2 (7.0)	07 15		4.7 (6.8)	3.3 (7.0)
05 29	1.0	4.0 (7.0)	2.5 (7.8)	16 29	1.0	3.8 (6.5)	2.3 (7.0)
09 07	1.2	4.8 (7.0)	3.1 (7.0)				

表1.2.4 (続き)

発 現 時	N	E	Z	発 現 時	N	E	Z
日 時 分	μ s	μ s	μ s	日 時 分	μ s	μ s	μ s
1983				1983			
11月				11月			
1 02 14		5.0 (7.2)	3.0 (7.2)	6 21 20		4.1 (8.0)	3.6 (7.6)
04 16		4.0 (6.9)	2.5 (7.8)	7 03 08		4.0 (6.7)	2.7 (7.0)
08 40	1.2	3.6 (6.2)	2.0 (6.5)	09 29		2.8 (8.2)	3.0 (8.0)
08 48		3.5 (7.0)	2.5 (6.8)	15 01		4.0 (6.8)	2.4 (6.5)
11 03		2.7 (7.9)	2.3 (8.0)	16 11		2.6 (7.4)	2.3 (6.8)
16 49		2.8 (7.5)	2.0 (7.5)	21 04		4.2 (7.0)	2.9 (7.0)
18 17		4.0 (6.8)	2.5 (7.0)	22 19		1.8 (6.5)	2.3 (6.9)
22 21		2.5 (7.5)	2.4 (7.8)	8 00 32		4.8 (7.0)	2.9 (7.0)
2 03 24		3.8 (8.0)	2.3 (8.0)	03 33		3.0 (6.8)	2.9 (7.0)
04 04		3.0 (6.5)	2.0 (7.0)	07 41		3.0 (6.8)	2.1 (7.2)
11 44		3.5 (6.8)	2.5 (7.2)	09 59		4.9 (6.7)	2.7 (6.9)
12 14		4.4 (7.2)	3.0 (7.6)	10 57		2.7 (7.5)	2.9 (7.2)
15 36		2.8 (7.0)	2.3 (6.9)	11 57		3.3 (7.0)	2.6 (6.8)
22 11		2.8 (8.5)	2.0 (8.0)	13 29		5.4 (6.5)	3.3 (6.0)
3 00 43		3.4 (7.7)	2.6 (8.0)	21 41	2.0	3.6 (6.6)	2.3 (7.0)
10 36		3.5 (7.5)	2.9 (7.9)	9 01 11		3.2 (6.4)	2.4 (6.7)
11 41		3.0 (7.2)	2.5 (7.1)	02 25		4.0 (7.9)	2.6 (7.8)
12 06		3.5 (7.0)	2.5 (7.1)	06 06		3.0 (7.1)	2.9 (7.0)
12 52	1.0	4.0 (6.4)	2.5 (7.0)	07 46		3.0 (7.0)	2.6 (7.2)
16 55	1.4	3.9 (7.0)	2.5 (7.0)	09 31		5.0 (7.2)	2.9 (7.4)
18 19	1.0	4.0 (6.8)	2.9 (7.0)	11 41		3.0 (6.0)	2.5 (7.5)
19 50		3.8 (7.0)	2.0 (7.5)	12 54	2.0	4.1 (7.0)	3.0 (8.0)
4 00 05	1.0	4.1 (7.0)	2.5 (7.1)	18 02		4.0 (6.7)	2.6 (7.0)
16 04		3.0 (7.0)	2.0 (8.0)	21 13		4.0 (7.0)	2.8 (8.0)
17 43	1.4	4.2 (7.2)	3.2 (7.4)	10 01 34		4.0 (7.0)	2.8 (9.0)
19 57		4.9 (7.0)	2.0 (7.0)	03 01		5.0 (7.0)	3.3 (7.2)
5 02 17		3.8 (7.0)	2.1 (7.0)	07 13		4.0 (7.0)	2.5 (7.0)
05 35	1.3	4.0 (6.6)	2.3 (7.0)	12 57			2.0 (9.0)
09 22		2.7 (8.0)	2.1 (7.5)	13 46			2.4 (6.9)
13 11		4.0 (6.3)	2.9 (6.3)	14 54			3.0
21 45	1.0	3.5 (7.8)	2.7 (7.5)	15 02			2.4 (7.5)
23 31	1.4	2.7 (7.0)	2.2 (7.5)	18 25	1.8	5.8 (6.7)	3.0 (7.2)
6 00 39		2.7 (6.9)	2.0 (6.5)	20 20	1.5	4.8 (7.2)	2.4 (7.1)
05 01		3.5 (6.9)	2.8 (7.6)	22 50		5.0 (6.8)	2.5 (8.0)
06 38		5.0 (7.0)	3.0 (7.4)	11 11 46	2.8	6.0 (6.3)	2.9 (6.9)
07 36		3.9 (7.0)	2.5 (6.5)	14 38	3.3	5.5 (6.9)	2.8 (7.0)
09 49		2.5	2.0 (6.5)	19 21	1.0	4.0 (7.0)	2.0 (8.0)
10 16		3.0 (7.0)	2.6 (7.2)	22 03	1.6	5.6 (7.0)	3.1 (7.7)
10 23		4.0 (6.8)	2.1 (7.0)	12 00 26		4.0 (6.9)	2.0 (8.0)
14 46		3.0 (6.5)	2.0 (7.0)	00 38		4.6 (7.0)	2.1 (7.2)
15 04		2.0 (6.6)	2.8 (6.8)	01 26		4.0 (7.3)	2.1 (8.0)
17 04		3.8 (6.7)	2.2 (7.0)	02 14		4.0 (7.2)	2.3 (7.6)
18 23		2.2 (6.6)	2.0 (7.0)	07 47		3.9 (7.5)	2.8 (7.5)
19 45		2.1 (7.0)	2.5 (6.6)	09 58		5.6 (7.0)	2.7

表1.2.4 (続き)

発 現 時	N	E	Z	発 現 時	N	E	Z
日 時 分	μ s	μ s	μ s	日 時 分	μ s	μ s	μ s
1983				1983			
11月				11月			
12 15 22		5.6 (7.7)	2.9	22 15 01		3.0 (8.0)	2.4 (7.1)
22 03		4.8 (6.1)	2.2	15 31		3.6 (8.0)	2.4 (8.0)
13 04 53		7.1 (6.1)	2.5 (7.7)	16 10		5.3 (6.7)	2.7 (7.0)
10 54		3.5 (8.2)	2.5	19 51		6.0 (7.3)	2.2 (7.6)
15 39		4.7 (7.0)	2.5 (7.7)	23 00 18		3.0 (7.8)	2.0 (8.0)
16 08		5.0 (6.4)	2.4 (6.8)	07 41		4.3 (8.2)	2.2 (8.2)
18 40		4.3 (7.0)	2.7	09 01		5.3 (7.2)	2.8 (8.0)
19 52		4.0 (6.8)	2.2	10 01		4.5 (7.1)	2.6 (7.7)
20 58		4.1 (6.5)	2.2 (7.0)	21 48		4.0 (6.8)	2.7 (7.2)
14 06 25		4.0 (8.0)	2.2 (8.5)	24 02 54		3.0 (6.0)	2.6 (6.5)
15 02 01		4.0 (7.0)	2.4 (7.7)	05 17		4.8 (7.9)	2.0
06 01		5.0 (7.0)	2.7 (7.5)	25 17 46		3.0 (7.2)	2.4 (6.5)
17 09		4.8 (6.5)	2.0 (7.0)	26 11 06		4.3 (6.8)	2.1 (7.0)
18 22		4.1 (7.3)	2.2 (8.2)	21 26		3.6 (7.5)	4.2
22 33		4.0 (6.9)	2.0 (7.5)	27 04 33		5.0 (6.2)	2.6 (7.1)
16 08 27		6.0 (7.0)	2.9 (7.3)	12 06		3.7 (7.0)	2.8 (7.0)
23 52		5.0 (7.3)	2.0 (8.0)	1984			
17 00 51		5.0	2.2	1月			
04 12		4.0 (5.5)	2.0	25 12 25		5.0	3.0 (8.5)
10 06		3.9 (7.3)	2.5	23 33		3.0	2.5
11 27		3.7 (7.0)	2.3 (7.0)	26 08 16		5.1	2.8
14 09		5.5 (6.0)	4.0 (6.1)	18 47		3.5 (8.0)	2.9 (9.5)
18 09 53		5.5 (5.7)	2.3 (7.0)	19 15		4.0	3.0
22 25		4.2 (7.0)	2.4 (8.0)	20 03		3.0	2.5
19 03 39		3.4 (7.7)	2.1 (6.1)	27 04 30		3.7	2.5
17 46		3.5 (7.5)	2.0 (8.0)	04 38		3.5	3.0
20 13 28		3.2 (7.2)	2.3 (8.0)	06 05		3.8	2.5
21 09		4.6 (7.0)	2.5 (7.0)	15 54		4.0 (8.4)	2.7 (9.0)
21 00 02		4.8 (7.5)	3.0 (7.9)	15 57		3.5 (8.2)	2.2 (8.5)
07 39		5.3 (7.0)	3.0 (7.9)	16 51		3.6 (9.4)	2.2 (10.0)
08 12		2.7 (9.0)	2.3	29 12 46		4.0 (9.2)	2.6
09 47		3.0 (8.5)	2.0 (8.1)	30 08 14		4.8 (9.0)	2.9 (9.0)
09 53	1.3	2.8 (7.4)	1.8 (7.9)	2月			
12 18		4.8 (6.8)	2.2 (7.0)	19 04 51		3.0 (8.0)	2.2 (8.0)
12 48		4.1 (8.3)	2.7 (9.0)	21 09 52		3.5 (7.0)	2.0 (8.0)
17 58		4.0 (7.6)	2.2 (8.0)	24 21 03		2.9 (6.1)	2.0 (6.5)
19 00		5.3 (7.6)	3.0 (8.0)	25 01 09		3.3 (7.0)	2.0 (7.5)
20 44		3.8 (7.2)	2.5 (7.5)	3月			
23 25		3.3 (8.0)	2.5 (8.2)	1 17 04		3.0 (7.0)	2.0
23 54		3.0 (9.0)	2.0 (9.0)	2 02 40		3.7	2.4
22 00 28		3.9 (7.0)	2.0 (8.0)				
10 07		3.8 (8.1)	2.5 (7.9)				
11 09		3.8 (8.0)	2.0 (8.3)				
14 24	1.7	4.7 (7.2)	2.5 (8.2)				

第3章 火山用体積歪計の開発*

1. 目 的

火山は地下のマグマ溜りなどの作用によって、たえず応力をうけている。マグマの活動が活発化すると応力は増大し地殻の変動は顕著になり、ときにはこれが噴火の前兆現象にもなりうる。こうした地殻変動を観測する方法には、水準測量、傾斜観測、伸縮観測などがあり、いずれも火山活動監視上重要な項目である。

地殻変動に関する研究として、気象研究所では第1次火山噴火予知計画において、傾斜計による火山体の傾斜観測とジオジメーターによる火口、山体の観測を実施し、それぞれに成果をあげた。その後、気象庁では、火山観測に傾斜計を導入し始めた。ジオジメーターによる地殻変動の研究では、 10^{-5} /年の大きな歪変動が活火山では起こっていることがわかり、 10^{-6} ~ 10^{-7} /年の歪変動を対象とした従来の地震観測用の埋込式体積歪計を火山観測に使用した場合には支障をきたすと考えられる。

また、ジオジメーターによる辺長測量は、観測が間欠的であり連続観測はできない。火山活動監視のためにはどうしても連続した観測資料が必要である。

さらに、火山の地下では、温度が変化したり、高温であったり、有害な火山ガスの発生などが懸念される。

そこで、火山体下の歪を連続観測でき、 $0.3^{\circ}\text{C}/\text{日}$ の温度変化と 100°C の高温に耐える火山用体積歪計を開発した。

2. 装置の構成と特徴

本装置は地中変換部と地上増幅制御部とから構成されている。

地中変換部は、普通、深さ200~300mの観測孔内へ固定し、地上の観測所内へ設置した地上増幅制御部との間をケーブルで接続して使用する。

地中変換部は長さ255cm、直径5cmの円筒状をしたステンレススチール製の耐圧真空容器の中に、体積歪検出器、体積温度検出器及び半導体温度計を一体として収容したものである。

体積歪検出器が検出する歪変化は、それが設置されている場所の岩盤自体の歪変化だけでなく、観測孔内の温度変化によって検出器の体積が変るために生ずる見かけの歪変化や、地上の気圧・

* 田中康裕・澤田可洋・中禮正明・福井敬一；地震火山研究部

降雨などの変化が微妙に影響して、きわめて複雑な記録として現われる。とくに火山地帯においては、地中の温度はたえず変化していると考えなければならない。

そこで、温度変化によって生ずる見かけの歪量だけを検出するために製作したのが体積温度検出器である。この部分は気象庁が地震予知のために使用している従来の埋込式体積歪計にはなかったところで、全く新しい着想により開発された。体積歪検出器が観測した歪変化量から体積温度検出器の変化量を差引くことによって、真の歪変化を求めようとするのである。

一方、観測孔内の温度を知ること、火山地帯においては必要である。ところが、体積温度検出器は温度変化は検知するが、絶対温度はわからないので、半導体を使った高感度の温度計を地中変換部に入れ、温度も測れるようにした。

地上増幅制御部では地中変換部の出力を増幅、制御し、記録する。

本装置全体の構成ブロックダイアグラムを図1.3.1に、総合周波数特性を図1.3.2に示す。

なお、気象庁が従来使用してきた埋込式体積歪計と、本装置「火山用体積歪計」の比較対象表を表1.3.1に示す。

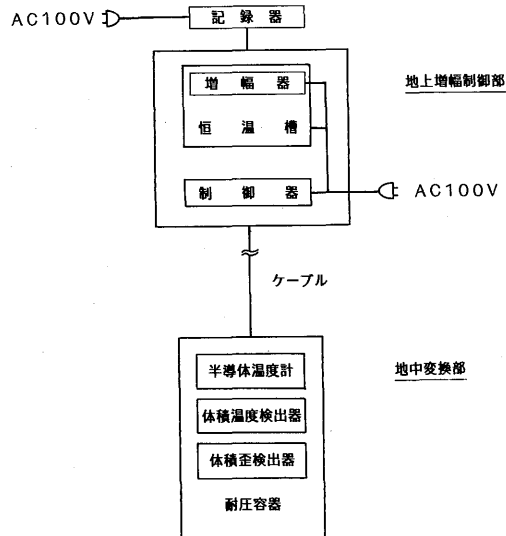


図1.3.1 火山用体積歪計ブロックダイアグラム

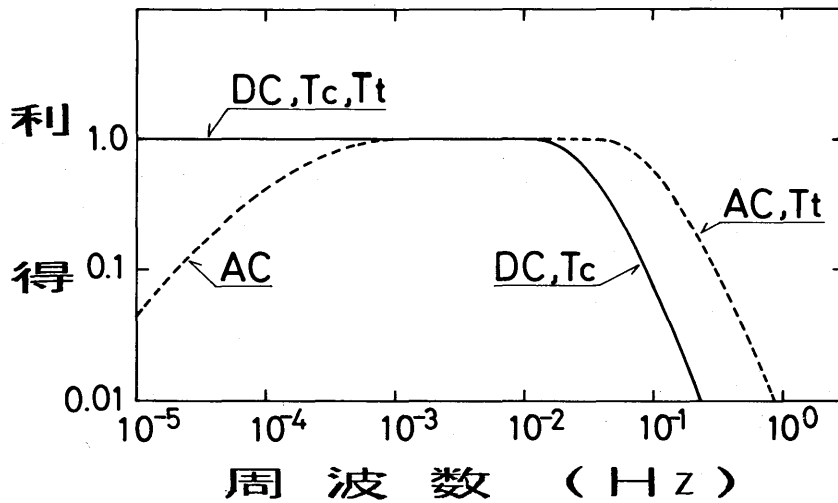


図1.3.2 総合周波数特性

AC、DC：体積歪計、 T_c ：体積温度計、 T_t ：半導体温度計

表1.3.1 火山用体積歪計（火山用）と埋込式体積歪計（地震用）の比較

開発対象項目	火山用	地震用
予想される歪変化 (辺長測量結果による)	10^{-5} /year	$10^{-6} \sim 10^{-7}$ /year
予想される温度	100°C以下	50°C以下
予想される温度変化	0.3°C/day	0°C
予想される有害ガス	有	無
体積歪測定範囲	$10^{-8} \sim 10^{-3}$ strain	$10^{-10} \sim 10^{-4}$ strain
最高感度	10^{-8} strain	10^{-9} strain
分解能	10^{-8} strain	10^{-10} strain
温度による見かけ歪消去対策	体積温度計を設ける	なし
孔内温度測定	半導体温度計を設ける	なし
感部の大きさ	長さ255cm 外径 5cm	長さ 374cm 外径11.4cm
重量	21kg	約150kg

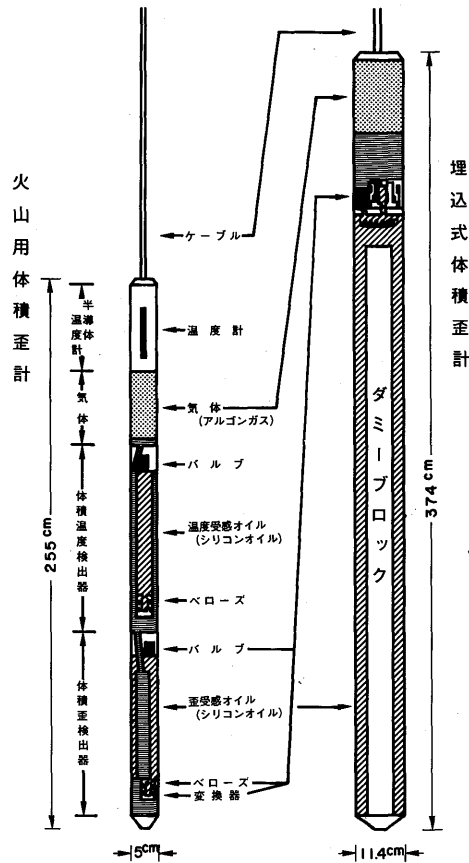


図1.3.3 火山用体積歪計地中変換部と埋込式体積歪計の比較

3. 装置各部の概要と性能

3.1 地中変換部 (図1.3.3)

3.1.1 体積歪検出器

地中変換部耐圧容器の最下部に収容されている。この検出器が占める長さは100cmである。

容器の内部には、その内壁に接して真空蒸溜したシリコンオイル (受感オイルとよぶ。名称SH200シリコンオイル、粘度10cSt) が充填してある。容器の外部から加わる圧力は受感オイルに体積変化を与え、これが伸縮自在な受感ペローズによって検出される。また、この受感オイルは電磁バルブを開閉することによって別室のオイルタンクに通じており、そのタンクの上部は不活性アルゴンガス (約200cc) で満たされた気体空間になっている。この気体空間は、受感オイルの体積変化を吸収するためのものである。

受感オイルの体積歪量は、電磁バルブを閉じた状態で 10^{-8} から 10^{-6} まで連続測定され、しかも体積歪量が 10^{-6} 以上になった時は、この電磁バルブは瞬時開放することにより、急激な歪変化に伴なうオイルの体積変化を解消させることができ、蓄積された体積歪量は零に戻る。零点を体積歪量 10^{-6} にする事で 10^{-6} 以上 10^{-4} までの連続測定が可能である。

電磁バルブを閉じ、密封状態にすると、体積歪量(ΔV)は非常に敏感な受感ベローズを変位させる。体積歪 ϵ_v は

$$\epsilon_v = \Delta V / V$$

と定義される。ここで ΔV : 体積歪量 (cm^3)

V : 受感部総体積 (cm^3)

である。受感ベローズの変位量を X (cm) とすると

$$X = \Delta V / A_e$$

となる。 A_e は受感ベローズの有効面積 (cm^2) である。

上式で明らかなように、体積歪量はそのまま受感ベローズの変位量となる。そこで、この受感ベローズに電気信号変換器(差動トランス)を取り付け、変位に比例した出力信号を取り出し、ケーブルにより地上増幅制御部に送り、増幅、記録させる。

作動状態における本器の性能は次のとおりである。

測定範囲	$10^{-8} \sim 10^{-3} \text{strain}$
最高感度 (60dBにおいて)	$0.1 \text{V} / 10^{-8} \text{strain}$
分解能	10^{-8}strain
出力	DC成分及びAC成分 (DC成分からの入力を1.5時間のフィルターでローカット) の2出力
バルブ開閉	自動及び手動
ベローズ	外径14.1mm、内径9.56mm、バネ常数180gr/mm
電源	AC100V、50/60Hz

記録紙上の歪量(60dBにおいて) $2 \times 10^{-8} \text{strain} / 1 \text{目盛}$ (記録紙の全幅=100目盛)

3.1.2 体積温度検出器

本器は体積歪検出器の上部に接して、地中変換部耐圧容器の中に収容されている。この検出器が占める長さは49cmである。

容器の中心部には、その容器の内壁から隔離させた状態の受感オイル(体積歪検出器と同じもの)が充填してある。したがって、容器に外圧がかかっても、この受感オイルの体積は変わらない。しかし、温度変化には敏感で、それによる体積変化を受感ベローズ(体積歪検出器のものと同一)が検出し、差動トランスを経て地上増幅制御部へ送る。

受感オイルは電磁バルブを開閉することによって別室のオイルタンクに通じており、そのタン

クの上部は体積歪検出器のものと共用の不活性アルゴンガスの気体空間室につながっていて、受感オイルの体積変化を吸収する。なお、電磁バルブは体積歪検出器のものと同一規格品が用いられており、体積歪検出器の場合に準じた作用をする。

作動状態における本器の性能は次のとおりである。

測定範囲	1°C以上
分解能	2/10000°C以上
感度 (60dBにおいて)	約 1 V/°C
バルブ開閉	自動及び手動
電源	AC100V、50/60Hz
記録紙上の温度 (60dBにおいて)	0.0002°C/1目盛

3.1.3 半導体温度計

本器は地中変換部耐圧容器内の最上部に收容されている。感部が占める長さは7.5cmである。半導体にはREF—02Jを使い、信号をOP—2Jで増幅して地上増幅制御部へ送る。

性能は次のとおりである。

測定範囲	0～100°C
分解能	2/1000°C
感度 (60dBにおいて)	100mV/°C
電源	AC100V、50/60Hz
記録紙上の温度 (60dBにおいて)	0.002°C/1目盛

3.1.4 耐圧容器

地中変換部耐圧容器は地中埋設のため、耐蝕性、耐久性に富んだ材質のものであり、周囲の圧力に十分耐えられ、岩盤の歪変動に追従できるものである。

材質	ステンレス・スチールSUS316		
寸法	外径	5cm、肉厚	3mm、長さ 255cm
耐圧	25kg/cm ²		
重量 (地中変換部全重量)	21kg		

3.2 地上増幅制御部 (図1.3.4)

3.2.1 増幅器

地中変換部の体積歪検出器、体積温度検出器及び半導体温度計から送られてくる電気信号を、それぞれに増幅し、出力信号に直す装置である。型式はいずれも差動増幅方式で、利得は、0、10、20、30、40、50、60dBに切換ができるようになっている。

なお、体積歪検出器はAC成分とDC成分が出力されているので、2台の増幅器があり、体積温度検出器及び半導体温度計ではそれぞれ1台の増幅器が用いられている。

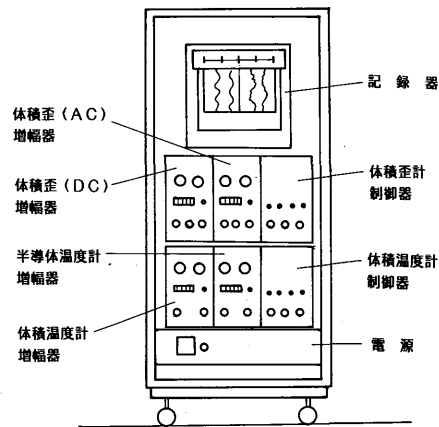


図1.3.4 火山用体積歪計地上増幅制御部

3.2.2 制 御 器

地中変換部の中の体積歪検出器及び体積温度検出器の電磁バルブの開閉を作動させるための回路が組み込まれている。

3.2.3 恒 温 槽

地中変換部の差動トランスに送る高周波電源 (オシレーター、4 kHz) の安定性と地上増幅器の温度変化による出力信号の変動を少なくするための装置である。

型 式 熱容量型恒温槽

設定温度 $60^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$

温度変化 $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ 以下

消費電力 100V、30W

3.2.4 記 録 器

6 打点記録計 (横河電機製ER186) が用いられている。

なお、性能試験中は次のように接続して使用した。

打点色	成 分
紫	体積歪検出器用 DC成分
赤	同 上 AC成分
緑	体積温度検出器用
青	半導体温度計
黒	気圧計 (自記水銀気圧計)
茶	ブランク

3.3 ケーブル

地中変換部と地上増幅制御部を接続し、各検出器、温度計の出力及び制御器の信号を送信する。また、観測孔内へ地中変換部を吊下げるのにも用いる。40芯のCVSケーブルを使用した。

4. 性能試験

地中変換部を気象研究所構内の観測孔内へ入れ、地上増幅制御部は別棟の地震重力棟に置いて、両者を接続し、いくつかの性能試験を実施した。なお地中変換部の容器は観測孔の壁に固定しない状態で実験した。

4.1 観測孔の状態

この観測孔は地震観測のために掘られた既設の孔で、孔径15cm、深さ100mあり、上から下までケーシングパイプを入れてある。内部は防錆剤を入れた水がつまっている。

1983年6月3日10時20分～20時30分に、サーミスター温度計を用いて孔内の温度を測定した。当日の孔内の水面は、地表から109cm下の所にあった。孔内に入れた温度計が安定するまでに要した時間は、1点につき約20分間であった。

測定結果は図1.3.5に示されている。地表からの深さが3m、10m、18m付近の所ではそれぞれに温度の逆転がみられる。さらに、深さ約60mの所には温度勾配が変わる所があり、60mより浅い所では温度勾配が $0.174^{\circ}\text{C}/10\text{m}$ と、ややゆるやかであるのに対して、それより深い所では $0.247^{\circ}\text{C}/10\text{m}$ と急勾配になる。

このように、地下の熱的構造はきわめて複雑である。図1.3.5の形状は、気象研究所地域の地下温度分布を示していると考えられる。この図から、温度が安定しているのは60mより深い所にあることがわかる。

4.2 温度・圧力変化の試験

図1.3.6は火山用体積歪計の地中変換部を観測孔の深さ45mに入れて得られた記録の一例である。この深さにおける温度は図1.3.5から 15.5°C と読みとれる。

図1.3.6の記録紙の原形は幅20cmで、0～100の目盛が印刷された折りたたみ紙である。記録の方法は次のようになっている。

最上段（1ch）：

半導体温度計の出力を60dBで記録。記録紙に向って上方へペンが動くのは高温側へ変化したことを示す。

2段目（2ch）：

気圧変化を記録。気圧計（隔測自記水銀気圧計、東京鈴木製作所製品）の出力を940～1040mbの範囲で記録。記象紙の上方が高い気圧。

3段目（3ch）：

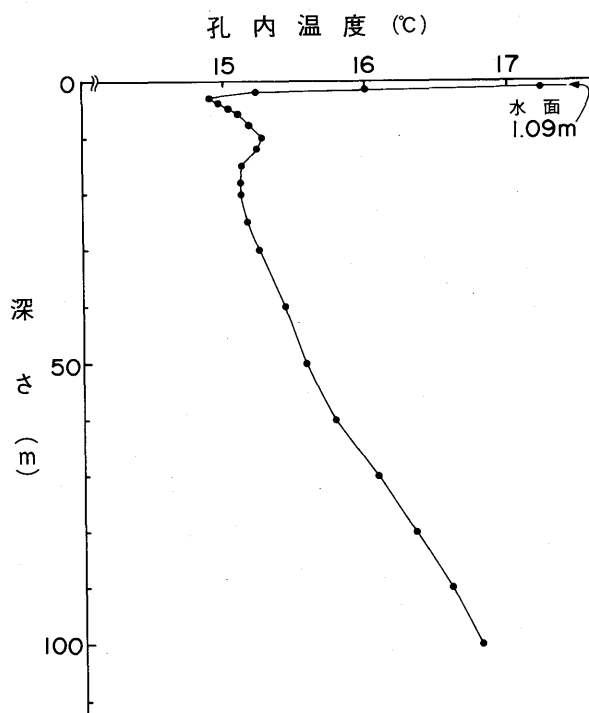


図1.3.5 気象研究所構内観測孔の温度

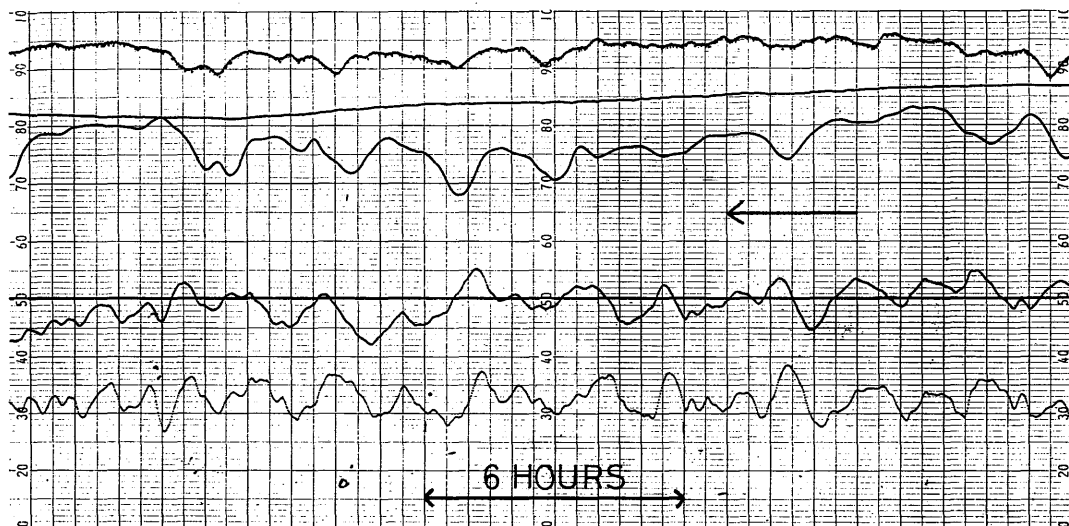


図1.3.6 火山用体積歪計の記録例（体積歪検出部は観測孔の壁に固定してない）

1 ch：半導体温度計、2 ch：気圧計、3 ch：体積温度検出器、4 ch：ブランク、5 ch：体積歪検出器DC成分、6 ch：体積歪検出器AC成分

体積温度検出器の出力を40dBで記録。記象紙の上方が高温、下方が低温。

4 段目 (4 ch) :

ブランク

5 段目 (5 ch) :

体積歪検出器のDC成分の出力を50dBで記録。記象紙の上方へペンが動くのが圧縮、下方が膨脹。

6 段目 (6 ch) :

体積歪検出器のAC成分の出力を50dBで記録。圧縮・膨脹方向は5 chと同じ。

この記録からわかるように、各チャンネルとも複雑な変動をしている。この実験では、体積歪検出器は観測孔の壁面に固定していないので、この図に見られる変動は歪によるものではない。多分、温度変化がそのおもな原因であろう。

各チャンネルにおける1日の変動幅は記録紙上で次のとおりである (ただし1983年冬期資料)。

1 ch : 4~6 目盛 (平均5 目盛、これは $0.01^{\circ}\text{C}/\text{日}$ に相当)

2 ch : 7 目盛以下 (これはほぼ14mb以下に相当)

3 ch : 8~15 目盛 (平均12 目盛、これは、 $0.02^{\circ}\text{C}/\text{日}$ の変化に相当)

5 ch : 11~19 目盛 (平均13 目盛、これは $8.2 \times 10^{-7}/\text{日}$ の変化に相当)

6 ch : 10~15 目盛 (平均12 目盛、これは $7.6 \times 10^{-7}/\text{日}$ の変化に相当)

なお、当然のことではあるが、温度計として作動している1 chと3 chの波形はよく似ているし、歪計として作動する5 chと6 chの波形もよく似ている。

また、半導体温度計で測る温度変化の現象は、体積温度計によるものより0~30分遅く現われるように見える。これは、前者の温度計が地中変換部の耐圧容器円筒の中心部に收容されているので、外部の温度を検知するのに時間を要するが、後者の装置の受感オイルは耐圧容器に接しているため、外部の温度を感じやすいためであろう。

一方、体積歪のDC成分の波形の出現も、AC成分のそれより0~30分くらい遅れることが多い。これはAC波形を積分してDC波形を得るための影響である。

地中変換部は最初観測孔内100mの深さの所に入れて実験を行った。その後、深さ45mの所まで漸次引き上げたが、引き上げるたびに、1 ch、3 ch、5 ch、6 chのペン先は記象紙上では下方へ顕著に動いた。このことは、地中変換部の位置が浅くなったために、観測孔内の水圧が減少したこと、並びに温度が下降したことを意味するものである。こうして零線の狂ったペン先の位置は、バルブの作用によって変換部内のシリコンオイルが移動することにより、徐々に元の位置近くに復帰した。この試験により、この装置は正常に働くことが確認できた。

一方、観測孔内に水を入れたり、汲み上げたりして水圧を変えることによって起こる歪変化を測定した (図1.3.7)。このような実験に対しての体積歪検出器の感度はきわめて良く、 $5.385 \times$

10^{-9} strain/cm(水位) となった。これは気圧変動に換算すると 5.491×10^{-9} strain/mbに相当する。
 なお、この実験は気象庁地震予知情報課の二瓶信一氏の協力を得た。

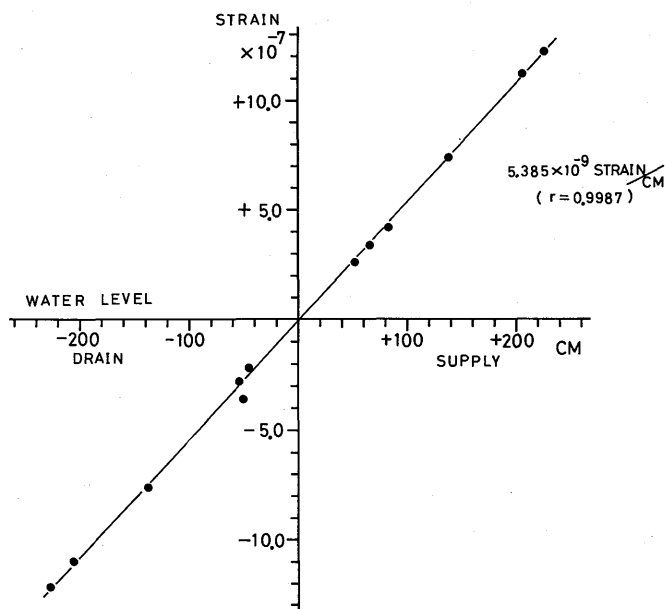


図1.3.7 体積歪検出器の水圧試験。rは相関係数。

また、体積歪検出器及び体積温度検出器のバルブを開いた状態における記録は、温度変化、DC成分、AC成分とも直線となることを確認した。これと図1.3.6の記録状態とから、温度変化並びに圧力変化の測定に関しては、この装置は良好に作動することが結論付けられた。

この温度変化の実験を始めて間もないころ、日射がケーブルに当たって、その影響が体積温度検出器だけに現われるという現象があった。このトラブルは検出器のバルブを開いた状態でも現われることから、その障害を起こしている場所は地中の変換部ではなく、地上の増幅制御部にあることがわかった。種々検討の結果、増幅制御部内の回路の調整、部品交換等により、障害を取り去ることができた。

なお、日射がケーブルに当たったり、ケーブルに大きな温度変化を与えることは望ましくないもので、1983年8月19日、ケーブルの地上露出部に、屋根を作って保護した。

ケーブルにあたった日射の影響で、体積温度検出器の出力が変化した状況と気温（気象研究所に隣接した高層気象台における観測値）との関係を図1.3.8に示す。なお、この図は、1983年6月30日に100mの深さにあった地中変換部を50mの深さまで引き上げた以降の記録であるが、零線がほぼ安定するのに約1ヶ月を要していることがわかる。試験観測初期のころは温度の影響が大

きく現われている。8月19日に露出ケーブルをおおう屋根を作ったが、それ以降は温度の影響はやや小さくなった。8月26日及び10月27日に回路の調整と部品交換を行い、温度変化による悪影響をほぼ除くことができた。

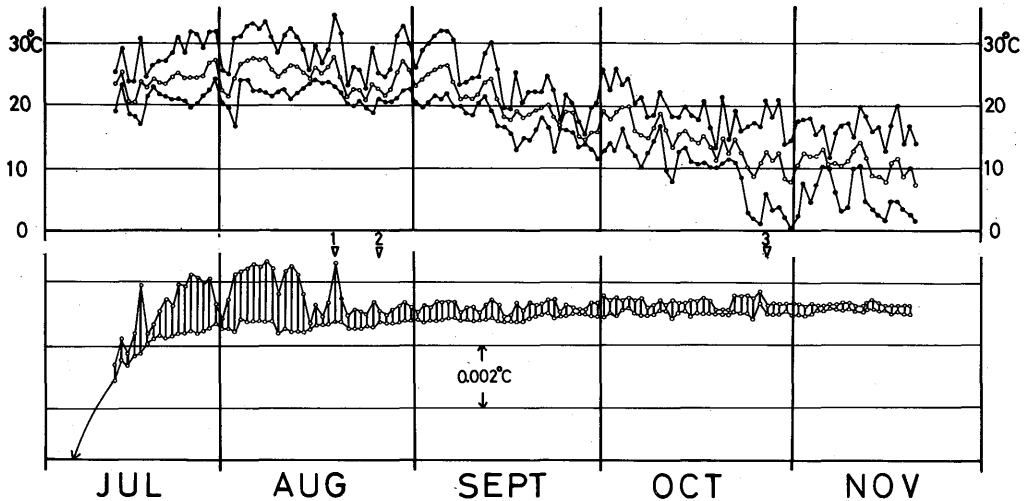


図1.3.8 ケーブルへの日照による体積温度検出器出力の変動（最下段）と気温（上から最高、平均、最低）との比較
1：ケーブルに屋根をつける。2、3：地上増幅制御部調整

5 ま と め

活火山近くでは、非活火山地帯の10～100倍の大きさの歪と、地中の温度変化などがあると考えられるので、それらに耐える装置として、体積歪検出器（測定範囲 $10^{-8} \sim 10^{-3}$ strain、分解能 10^{-8} strain）、体積温度検出器（分解能2/10000°Cの温度差）、半導体温度計（測定範囲0～100°C、分解能2/1000°C）等を一体として耐圧容器に納めた火山用体積歪計を開発した。

本装置は、気象研究所構内の観測孔内へ入れて、温度変化、圧力変化の試験を行ったが良好な結果が得られた。活火山へ移設し、火山噴火予知のために活用できる日の近いことを期待する。

第2編 阿蘇山・御岳山の噴火及び火山活動 に関する研究

第1章 阿蘇山の1979、1980年の熱的状态と火山活動*

1. ま え が き

阿蘇山の中岳第1火口の火山活動は1979年6月初旬から活気を呈し、1979年9月6日には近年ではまれな大きな爆発を起こした。この爆発では多量の噴石や火山灰を放出し、死傷者を生じ、山上の観光施設を破壊させた。その後、1980年1月まで降灰などを伴う活発な火山活動が続いた。

そこで、この時期の阿蘇山の熱的状态と火山活動との関係を求めるため1979年12月から1980年3月の間に火口及び火口周辺の地表温度をリモートセンシングによって観測し、その結果を解析するとともに、過去の観測資料と対比検討した。

2. 観 測 方 法

1) 空中赤外温度観測

1979年12月24日、1980年3月27日、1980年3月30日の3回にわたり、航空機(エアロコマンダー685型)に赤外線映像装置を搭載して、阿蘇山中岳火口の熱映像を撮影し、火山の熱的状态を解析した。

観測のための飛行コースは図2.1.1に示してある。また、観測装置の特性は表2.1.1に、観測日時・観測コース・飛行高度(海拔)等は表2.1.2に示してある。映像の撮影は火口縁上1000~1400mの高さから行った。この高さで赤外線映像装置のMSS (Multi Spectrum Scanner) の性能とから、この観測では直径3m程度の地表の平均温度が検知されていることになる。

なお、日中の地表温度は日射の影響があるので、空中赤外温度観測は夜間実施するのが普通である。したがって、これまでの空中赤外温度観測は、夜間に月明りを頼りに目視飛行で行った。しかし、1980年3月の観測には航空機にドップラーレーダーを搭載し、地形を電波でチェックしながら飛行するシステムを取り入れた。これは夜間の観測を容易にするシステムとして、その成

*田中康裕・澤田可洋・中禮正明；地震火山研究部

田 望；東海大学

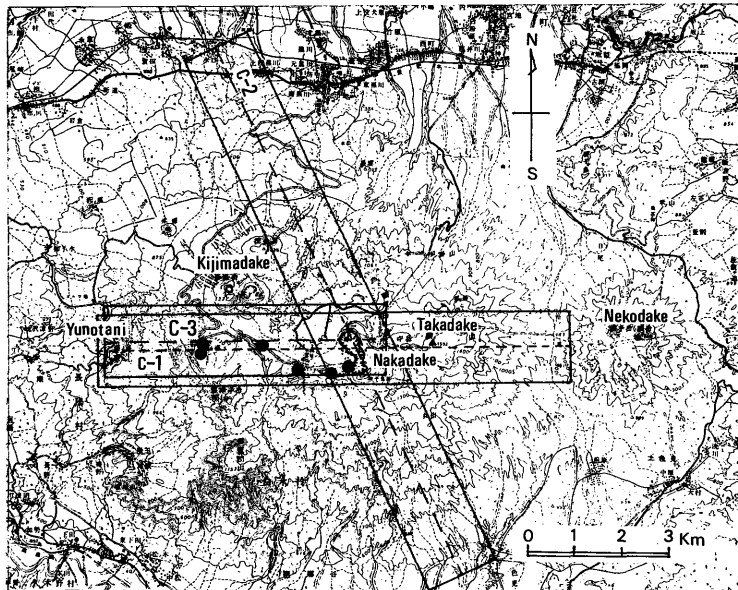


図2.1.1 阿蘇山中岳の空中温度観測のための飛行コース（C-1、C-2、C-3）とグランドトルース実施地点（黒丸6地点）

表2.1.1 使用した赤外線映像装置

機 種	DS-1250型MSS（米国Deadalus社製）
検 出 器	CdHgTe 液体窒素冷却
波 長 帯 域	8～14 μ m
瞬 間 視 野	2.5mrad
温 度 分 解 能	0.2°C
走 査 本 数	80本/sec
走 査 角 度	77°20′
記 録 方 式	FMテープ
動 揺 補 正	±5°

表2.1.2 飛行記録

撮影年月日	コースNo.	高度(m)	時刻
1979. 12. 24	C-3	2700	1721~1722
	C-1	2700	1729~1731
	C-1	2700	1747~1749
	C-1	2700	1833~1836
	C-1	2700	1842~1845
	C-1	2700	1910~1912
	C-1	2700	1919~1922
1980. 3. 27	C-1	2300	1855~1858
	C-2	2300	1904~1907
	C-1	2300	1930~1934
	C-2	2300	1940~1943
	C-1	2300	1949~1952
	C-2	2300	1956~2000
1980. 3. 30	C-1	2400	1844~1847
	C-2	2400	1856~1858
	C-1	2400	1935~1937
	C-2	2400	1943~1945
	C-1	2400	1955~1957
	C-2	2400	2002~2005

功は高く評価される。

航空機からリモートセンシングによって測る地表温度をチェックするため、観測時刻にあわせて飛行コース下の地面の6地点でグラントルースを行った。それらの位置は図2.1.1の中に記載してある。また、火口周辺の7地点に映像と地図とを合わせるための対空標識(6m×10mのアルミ箔板)を設置した。その位置は図2.1.2に示してある。地上の土と対空標識のアルミ箔とは放射率が違うので、たとえ両者の温度が同じであっても標識は夜間の映像に写し出され、その位置が確認できる。

2) 地上赤外温度観測

阿蘇山中岳火口の熱的状态を一層確実に把握するため、上記の空中赤外温度観測とは別に、1980年3月27日、火口縁から噴煙の状況を観測するとともに、放射温度計を用いて火口内の地表温度・噴煙温度を観測し、空中赤外温度観測の結果と比較検討した。この観測に用いた放射温度計の特性は表2.1.3に示してある。

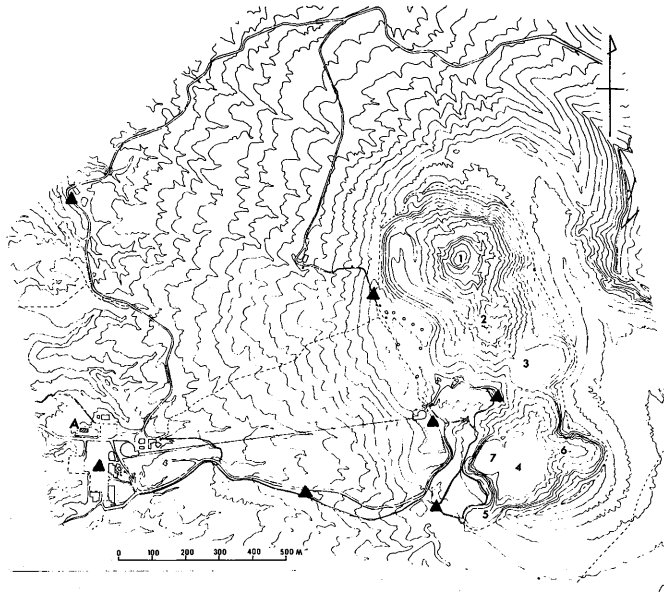


図2.1.2 阿蘇山中岳の空中温度観測のための対空標識設置点（黒三角印7地点）。1、2、……7はそれぞれ第1火口、第2火口、……第7火口

表2.1.3 使用した放射温度計

機 種	ER-2002/SD (松下技研株式会社製)
検 出 器	焦電型検知素子 (PbTiO ₃)
集 光 機 構	ゲルマニウム集光レンズ
測 定 距 離	2 m～∞
波 長 帯 域	8.5～12μm
視 野 角	0.5°
精 度	± 1°C
測定温度範囲 と分解能	$\left\{ \begin{array}{l} 0^{\circ}\sim 80^{\circ}\text{C} \text{において} 0.5^{\circ}\text{C} \\ -40^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{C} \text{において} 1^{\circ}\text{C} \end{array} \right.$
重 量	2.8kg

3. 空中赤外映像の処理

1) 解析方法

赤外線映像装置のMSSによる映像撮影から温度分布図を作るまでの一連の解析作業の概要を

図2.1.3に示す。作業の主流は図中のⅠ→Ⅱ→Ⅲ→Ⅳ→Ⅴの順であって、他は主流の値を補正するための作業である。

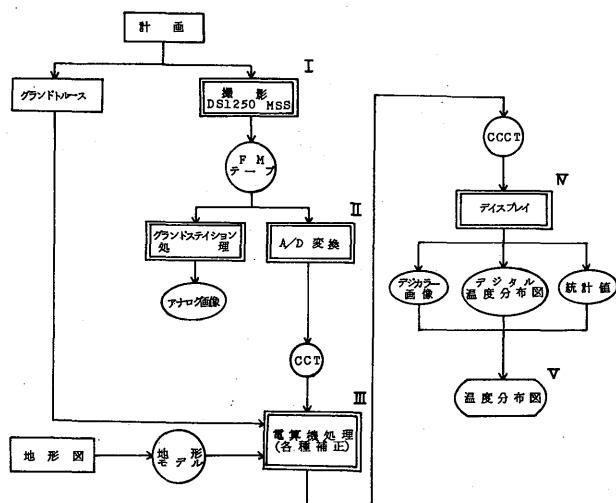


図2.1.3 映像解析処理のフローチャート

図中の二重枠で示した作業では、それを行うための専用または相応の機器が使われる。丸枠の所では電子計算機へ入力させるための磁気テープが作製される。また、楕円枠の所では、ある程度に解析処理された成果品が出力される。最後にできる温度分布図は、見やすくするため手書きである。なお、地形補正の方法については第2章の御岳山の項で述べる。

2) 解析結果

1979年12月～1980年3月の間に行った3回の温度観測時における阿蘇山の火山活動状況は次のとおりであった。

第1回目の観測時（1979年12月24日）：

1979年6月以来続いていた活発な噴煙活動は、このころから衰え始めたが、なお、噴煙は時々第1火口をおおう程度にあがっていた。しかし、降灰はなかった。

第2回目、第3回目の観測時（1980年3月27日、30日）：

噴煙活動は衰え、火口から微量の噴煙をあげる程度の活動が続いていた。第1火口底には湯溜りがあって、湯面からわずかに蒸気をあげていた。

上記3回の観測に基づいて作った温度分布図を図2.1.4、図2.1.5、図2.1.6に示す。また、図2.1.7には各温度観測時における中岳第1火口の東西の温度プロファイルを熱映像から読み取って示してある。この図から火口周辺におせるバックグラウンドの温度レベルは、第1回目、第

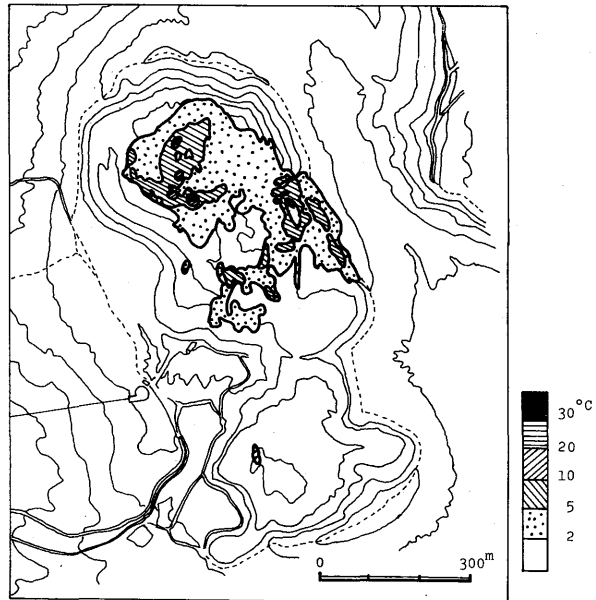


図2.1.4 阿蘇山中岳火口の温度分布 (1979年12月24日)

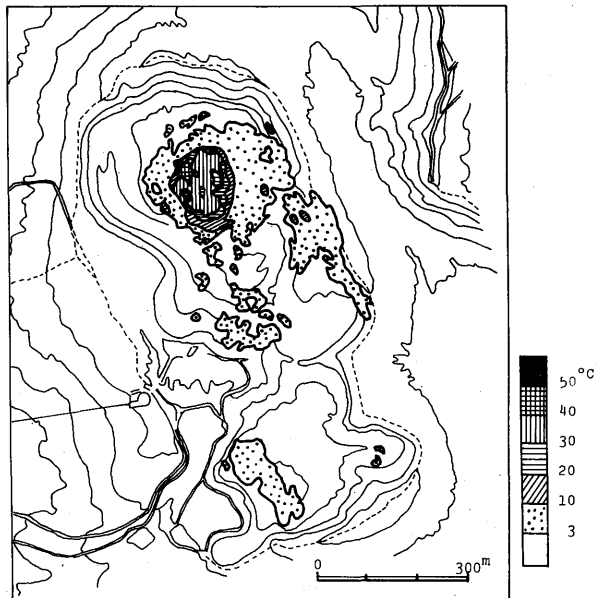


図2.1.5 阿蘇山中岳火口の温度分布 (1980年3月27日)

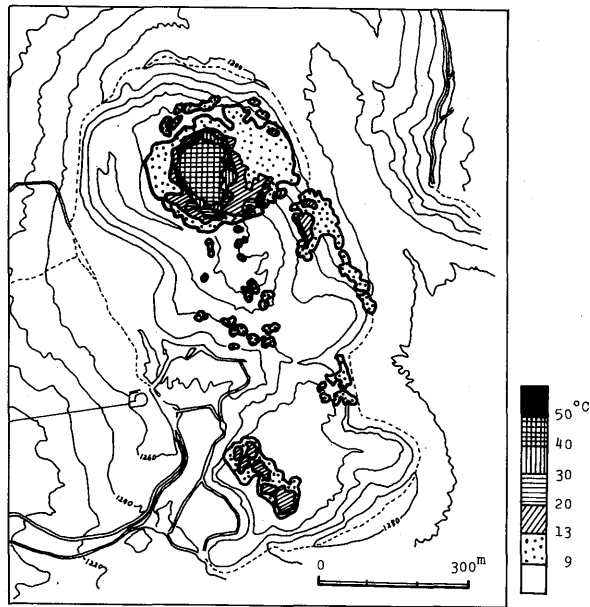


図2.1.6 阿蘇山中岳火口の温度分布 (1980年3月30日)

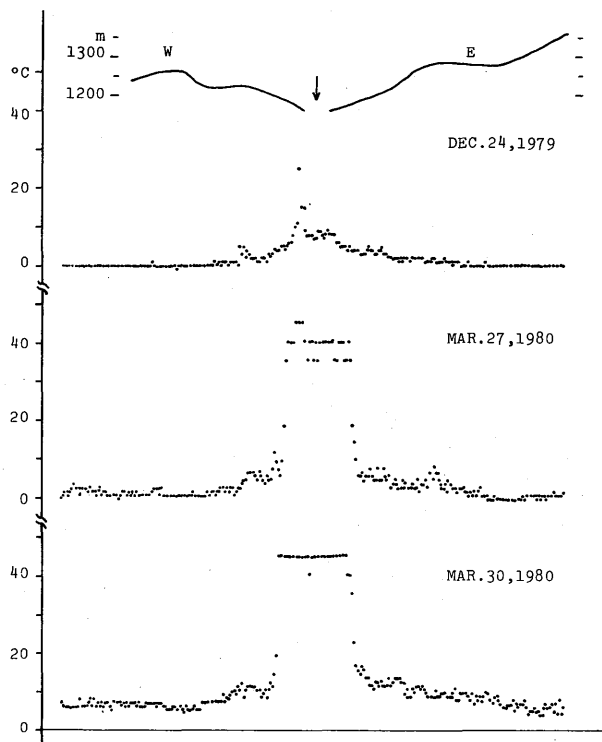


図2.1.7 阿蘇山中岳第1火口の東西の地形及び温度プロファイル。中央の矢印は中岳第1火口の位置

2回目、第3回目の観測時で、それぞれ、2°C、3°C、9°Cであったことがわかる。したがって、図2.1.4、図2.1.5、図2.1.6の温度分布図には、それらの温度以上の高温域が記載してある。

3回の温度観測を通じて、高温地域は第1火口底と第1火口壁、第2火口底と第2火口壁、第3火口壁、第4火口底、第6火口底、第7火口底等で検知された。このうち第1火口、第2火口、第3火口の温度は顕著に高いので、火山内部から放出している地熱によるものと思われる。第4火口底及び第7火口底の温度がやや高いのは雨水が浅くたまっていたためで、これが昼間の日射によって暖められてやや高温を示したのである。また第6火口底は第2回目の観測時だけ高温な所が点在しているが、これは前日までの降雨による水溜りが日射のためやや温かくなっているためだと思われる。

第2回目及び第3回目の観測時には第1火口底に大きな湯溜りができていたが、熱映像によると、湯面はほぼ一定温度で、南北に長軸をもった楕円形をしている様子がよく現われていた。

3回の温度観測を通じて最高温度が現われた場所は、いつも第1火口底であり、この火口が他のいずれの火口よりも活動的であることを示している。

口絵写真6の上部3枚の映像は、上からそれぞれ第1、2、3回目の観測による赤外熱映像をデジタルカラーで表わしたものである。

4. 地上からの赤外温度観測*

1980年3月27日15時～16時、放射温度計により、火口縁から火口内の地表温度、噴煙温度、噴煙の状況などを観測した。当日の天気は晴時々曇であった。

図2.1.8は中岳第1火口の南西火口縁から観測した火口内のスケッチ及び熱的状态である。観測者のいる火口縁付近の地表温度は17～20°C程度あり、日射の影響がかなりあった。

第1火口の火口底には湯が溜っており、温度は47～51°Cであった。第1火口と第2火口の間谷間状の、40m×5m程の範囲の所から白色の噴煙を約100mの高さにあげていた。噴煙の噴出速度は約5m/sec、噴出後約10m上の噴煙の温度は19～20°Cであった。噴煙噴出孔のまわりの地表では最高80°C（中岳火口内で最高）の温度が観測された。この観測当時は、上述の噴煙のほかには、中岳火口内で顕著な噴煙活動をしている所はなく、阿蘇山としてはまれに見る程の噴煙活動の弱い時期であった。

火口内で20°C以上の高温が検知された地域は第1火口の火口底と火口壁、第2火口の火口壁で、その位置は図2.1.8に点を密度濃く打った範囲で示してある。高温域の温度は大部分の所で20～24°Cであった。高温域の位置及び形は同じ日の夜実施した空中赤外温度観測で検知されたもの（図2.1.5）とほぼ一致している。

*観測者：田中康裕・中禮正明（以上は気象研究所）・高橋 計・池田 滋（以上は阿蘇山測候所）

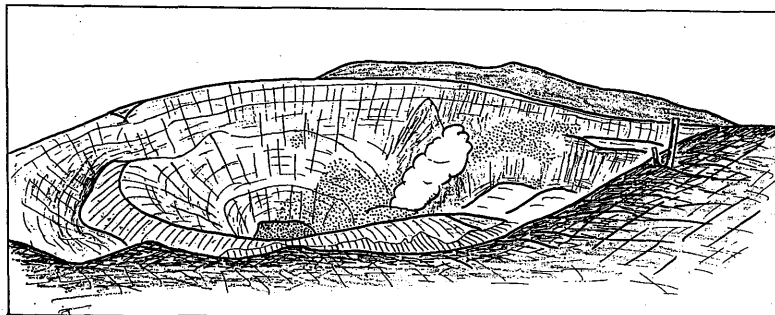


図2.1.8 阿蘇山中岳第1火口の南西火口縁から第1、第2、第3火口を望む。打点地域は高温
(1980年3月27日)

図2.1.8の範囲外で、中岳火口縁から測ったおもな地点の地表温度は次のとおりであった。

第2火口底：18℃

第2火口西側火口壁：18℃

第3火口底：15℃

第3火口東側火口壁：21℃

第4火口底：15℃、水溜りは12℃

第7火口底：15℃

5. 放出熱量

空中赤外温度観測から求めた火口の温度分布図と地上における気象観測値(表2.1.4)とを用いて高温域から放出している熱量を求めた。ただし、温度分布図には噴煙及びその温度の状況は表現してないので、噴煙からの放出熱量は地上からの観測値により別途求めた。

表2.1.4 空中赤外温度観測時の気象状況

年 月 日	雲 量	気 圧	気 温	湿 度	風 速
1979. 12. 24	0	888mb	-2℃	60%	0.0m/sec
1980. 3. 27	5	880	5	70	0.2
1980. 3. 30	0	888	12	80	0.2

熱収支法に基づき地熱地帯の放出熱量を求めるSekioka—Yuhara (1974) の式では、単位面積内の放出熱量 ΔG は

$$\Delta G = e(1 - 0.09m)(0.52 + 0.065\sqrt{e_w})\sigma\Delta T_0^4 + \rho_a C_p D(1 + r)\Delta\theta$$

で表わされる。ここで、

e : 噴煙の放射率 (= 1 とする)、 m : 雲量、 e_w : 大気中の水蒸気圧 (表2.1.4 から12月24日は4 mb、3月27日は7 mb、3月30日は10 mb)、 σ : Stefan-Boltzmann定数 ($= 1.36 \times 10^{-12}$ cal/cm²deg⁴sec)、 T_0 : 地表温度 (K)、 θ_0 : 地表温度 (°C)、 ρ_a : 空気の密度 ($= 1.1 \times 10^{-3}$ gr/cm³ とする)、 C_p : 空気の定圧比熱 ($= 0.239$ cal/gr deg)、 D : 水蒸気の空気中への拡散係数 ($= 0.22$ とする)、 r : Bowen比の逆数 ($= 0.06$ とする)

である。これは地熱地帯について適用される式及び各係数であるが、便宜上火口湖の熱にもあてはめてみる。

温度分布図から地表温度を求め、上式に代入すると、

第1回目の観測では $\Delta G = 1.33 \times 10^{-4} \Delta\theta$ cal/sec cm²

第2回目 " $\Delta G = 1.03 \times$ "

第3回目 " $\Delta G = 1.42 \times$ "

となる。さらに温度分布図から求めた $\Delta\theta$ と高温域の面積とから3回の観測における放出熱量 $\dot{Q}$ は

第1回目の観測時は $\dot{Q} = 1.60 \times 10^5$ cal/sec

第2回目の " $\dot{Q} = 4.39$ "

第3回目の " $\dot{Q} = 4.49$ "

と求められた。

第2回目 (3月27日) と第3回目 (3月30日) の観測は、その時期が接近していたが、高温域の面積はかなり違っていた (第6節)。しかし、両者の放出熱量はほぼ等しく求められたことは、この間に火山活動に変動がなかったことを示すものであろう。

一方、1980年3月27日の地上からの観測に基づき、噴煙の放出熱量を次式で求めた。

$$\dot{Q} = a\bar{v}\rho i$$

ここで、

a : 噴煙の断面積、 $\bar{v}$: 噴煙の平均上昇速度、 ρ : 水蒸気の密度、 i : 水蒸気のエンタルピー

である。第4節で述べた地上観測により、 $a = 100\pi$ m²、 $\bar{v} = 5$ m/sec、 $\rho = 1.72 \times 10^{-5}$ gr/cm³ (噴煙が火孔から約10m上昇した付近の噴気温度 (19~20°C) を噴煙の代表温度とし、その温度に相当する ρ である)、 $i = 680.0$ cal/gr、として、これらの値を上式に代入すると

$$\dot{Q} = 1.64 \times 10^7 \text{ cal/sec}$$

となった。

なお、第1火口で噴煙をあげている火孔付近の地表温度は80°Cだったので、この温度が噴気温度に等しいとすると、 $\rho = 29.33 \times 10^{-5}$ gr/cm³ となり、したがって

$$\dot{Q}=1.95 \times 10^8 \text{ cal/sec}$$

となる。

このように、噴煙から放出する熱量は、高温地表からのそれと比べて2～3桁も大きく求められた。噴煙の放出熱量を求めた1980年3月27日の噴煙活動は、第4節で述べたように、阿蘇山としてはまれに見る程の小規模な活動であった。したがって、第1火口全域から噴煙をあげるような従来程度の大規模の噴煙であるならば、放出熱量はかなり大きくなることであろう。

6. ま と め

1979年12月24日、1980年3月27日、1980年3月30日の3回にわたり、阿蘇山中岳火口の空中赤外温度観測を実施した。また、1980年3月27日には地上からも火口の赤外温度観測を実施した。

顕著な高温域が中岳第1火口、第2火口、第3火口で検知された。最高温度を示す地点はいつの観測でも第1火口底にあり、50～90℃が検知された。1980年に観測した赤外線熱映像には、第1火口底にできた大きな湯溜りが明瞭に写し出されていた。湯面の温度は47～51℃であった。

空中赤外温度観測の資料から火口内の高温地域からの放熱量を求めると

1979年12月24日が $1.60 \times 10^8 \text{ cal/sec}$

1980年3月27日が $4.39 \times 10^8 \text{ cal/sec}$

1980年3月30日が $4.49 \times 10^8 \text{ cal/sec}$

となった。

また、1980年3月27日の地上赤外温度観測から求めた噴煙の放出熱量は $1.64 \times 10^7 \text{ cal/sec}$ (または $1.95 \times 10^8 \text{ cal/sec}$) となった。噴煙からの放出熱量は高温地表からのそれより2～3桁も大きい。

1980年3月末における中岳火口の熱的状态はかなり高いレベルにあり、その様子は1974年の噴火活動時(次章参照)と同程度もしくはそれをやや上回る。

1979～1980年の空中赤外温度観測は科学技術庁の特別研究促進調整費(田・他1979、気象研究所地震火山研究部1980、科学技術庁研究調整局1982)によるものである。観測のための航空機及び赤外線映像装置はアジア航測株式会社のものを使った。

〔付〕1979年9月6日の阿蘇山爆発による中岳火口内の地形変化

1979年の大爆発以前の中岳火口の地形測量は1975年10月21日に気象研究所(田中1979)によって実施されたものがあり、1979年9月6日の大爆発前の地形を知るのに都合がよい。

この地形図によると、中岳第1火口底南西部には火口底から約30m盛り上った小高い山があった。この山は火口縁からはほとんど見えなかったが、上述の測量で明らかにされたものである。

ところで、1979～1980年に実施した空中赤外温度観測の際の映像を判読したところ、この山が

無くなっていることがわかった(田中・他1980)。1975年の測量以後1979年の大爆発までの間には、地形を変えるような大きな火山活動はなかったので、火口底の小山は1979年9月6日の大爆発で噴き飛ばされたものと考えられる。ちなみに、この大爆発の噴出物は火口の北東方へ多量に放出されたが、爆発源をこの小山の下におくと、火口の北東側が広く開放されているので、小山を破壊した噴出物が火口の北東方へ容易に放出されることになり、噴出物の分布状態がよく説明できる。この大爆発の噴出物は阿蘇山測候所(1980)によれば、火口付近の噴石及び火口から北東約45kmの範囲に分布した火山灰を含めて総量約30万tonとされている。また、和田等(1980)によれば、火口付近の噴出物だけで約8万tonもあった。

1981年10月11日には国土地理院(土肥・大田1983)により火口の地形測量と赤外映像撮影がなされたが、これによると、湯面は海拔1154.7m、湯面の面積は20,450m²となっている。

この湯溜りは、1979年末ないし1980年初めに発生したが、以来4年余を過ぎた1984年3月現在でもなお存続し、その面積が縮少するような気配はない。また、湯面の温度は阿蘇山測候所により時々観測されているが、現在まで50~70℃を保っている。

1979年9月6日の大きな爆発の火山灰砂による火口縁の観光施設の埋没被害状況を写真2.1.1、写真2.1.2に、また、火口底の湯溜りの様子を口絵写真1に示す。



写真2.1.1 阿蘇山の1979年9月6日の大きな爆発により、火山灰で埋った火口縁の待避所(1980年3月27日)

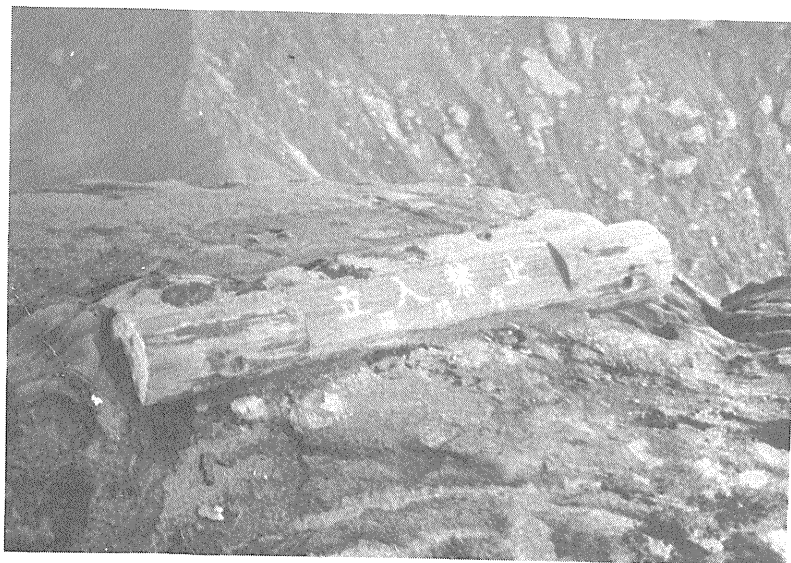


写真2.1.2 阿蘇山の1979年9月6日の大きな爆発により、火山灰で埋った火口縁のくい(1980年3月27日)

参考文献

- Sekioka, M and K. Yuhara (1974): Heat Flux Estimation in Geothermal Areas Based on the Heat Balance of the Ground Surface, J. Geophy. Research. 79, 2053-2085.
- 阿蘇山測候所 (1980): 1979年の阿蘇山の火山活動、火山噴火予知連絡会会報、17、17-20.
- 田望・田中康裕・澤田可洋・中禮正明 (1979): 1979年の御岳山・阿蘇山噴火に関する特別研究——噴火活動と地表温度分布変化の研究、気象研究所年報、昭和54、84-85.
- 土肥規男・大田安雄 (1983): 1979年9月の噴火前後に作成された地形図の比較による阿蘇山中岳第1火口の地形変化、火山噴火予知連絡会会報、27、39-44.
- 科学技術庁研究調整局 (1982): 1979年の御岳山・阿蘇山噴火に関する研究報告書、1-189.
- 気象研究所地震火山研究部 (1980): 御岳山・阿蘇山における空中赤外映像による温度測定、火山噴火予知連絡会会報、19、12-20.
- 田中康裕 (1979): 阿蘇山 (活動火口の空中地形測量)、気象研究所技術報告、2、17-21.
- 田中康裕・澤田可洋・中禮正明 (1980): 阿蘇山の放熱量の測定、火山II、25、299.
- 和田卓彦・菊池茂昭・小野博尉 (1980): 1979年9月6日の阿蘇火山爆発について、火山II、25、245-253.

第2章 阿蘇山中岳火口の熱的狀態の変遷*

1. ま え が き

阿蘇山中岳火口の空中赤外温度観測は、1974年に気象研究所によって初めて実施されて以来、京都大学や国土地理院などによっても行われたことがあり、これらを総合すると、1983年までの10年間に8回の観測がくり返されている。

ここでは、それらの観測結果を比較検討することによって、中岳火口の熱的狀態並びに火山活動の変遷を調べた。

なお、この章では、本書第2編第1章の観測成果にもふれる所があるが、記述の重複はなるべく避けることにする。

2. 空中赤外温度観測実施状況

1974～1983年に阿蘇山で空中赤外温度観測を実施した年月日、機関名、観測装置名及び観測成果が発表されている文献を表2.2.1に示す。

表2.2.1 阿蘇山の空中赤外温度観測実施状況

	観測年月日	実施機関	観測装置	文献
1	1974、12、25	気象研究所	IRA—301	I
2	1975、11、17	気象研究所	DS—1250MSS	I
3	1977、12、18	京都大学理 学 部	DS—1250MSS	II
4	1979、12、24	気象研究所	DS—1250MSS	III
5	1980、3、27	気象研究所	DS—1250MSS	III
6	1980、3、30	気象研究所	DS—1250MSS	III
7	1981、10、11	国土地理院	DS—1250MSS	IV
8	1983、11、9	気象研究所	DS—1250MSS	V

I：気象研究所技術報告2号（1979年）

II：阿蘇火山の集中総合観測（第1回1977年）

III：1979年の御岳山・阿蘇山噴火に関する研究報告書
（1982年）及び本書第2編第1章

* 田中康裕・澤田可洋・中禮正明・福井敬一；地震火山研究部

IV：国土地理院1982年発行火山基本図（阿蘇山1/5000）

V：本書の本章

この表の8回の観測で得られた温度分布図のうち、第1回目～第7回目のものは、表に示した文献にくわしく発表されているので、ここでは詳細な温度分布図は第8回目のものだけを記載する。

なお、第8回目の観測は、本書第1編第1章に関連した気象研究所の特別研究の一環として実施したものであるが、本書第2編の内容に関連が深い部分についてはこの章で述べることにする。

3. 1983年11月9日（第8回目）の空中赤外温度観測

飛行コースを図2.2.1に、観測日時、飛行高度（海拔）を表2.2.1に示す。なお、観測装置は前回までのものと同じDS-1250型MSSである。

この観測で得られた熱映像をカラー表示して口絵写真6の最下段に、また、温度分布図を図2.2.2に示す。高温域は第1火口の火口底と火口壁、第2火口の火口壁にある。第3、第4火口壁のやや高い地温は雨水がたまっていたり、地層が露出している所があって、日中の日射の影響

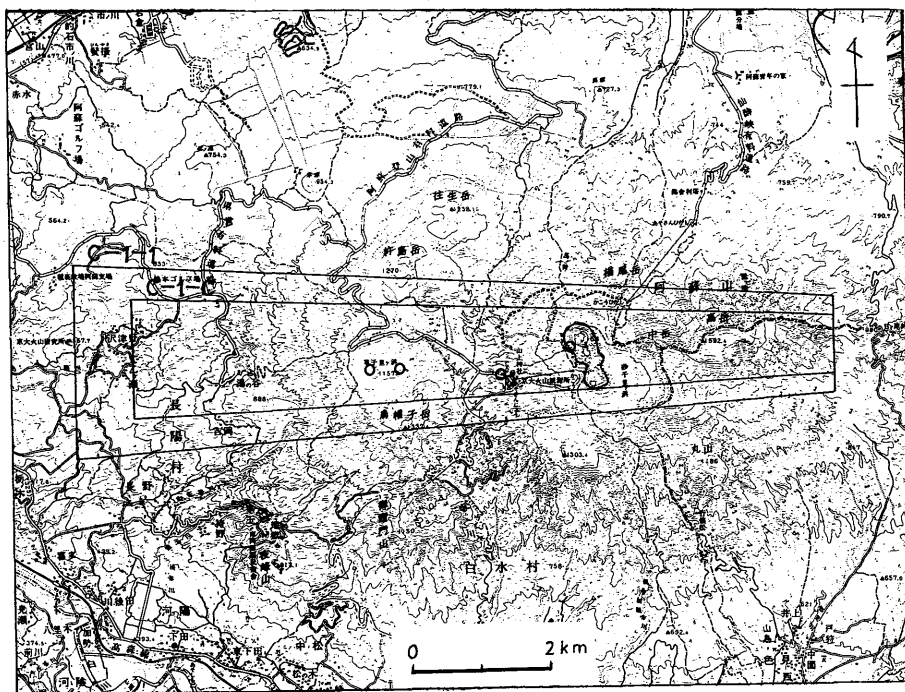


図2.2.1 阿蘇山中岳火口温度観測のための飛行コースとグラントルース実施点（丸印）

が残っている所かもしれない。第1火口底の高温部は湯溜りの形をそのまま現わしている。最高温度は湯溜りの南部に近い所で65°Cが検知された。

表2.2.2 飛行記録
(1983年11月9日)

コースNo.	高 度	時 刻
C-1 a	1800m	1722~1724
C-1 b	1800m	1727~1729
C-1 c	1800m	1735~1737
C-1-1	2400m	1742~1744
C-1-2	2400m	1750~1752
C-1-3	2400m	1759~1801

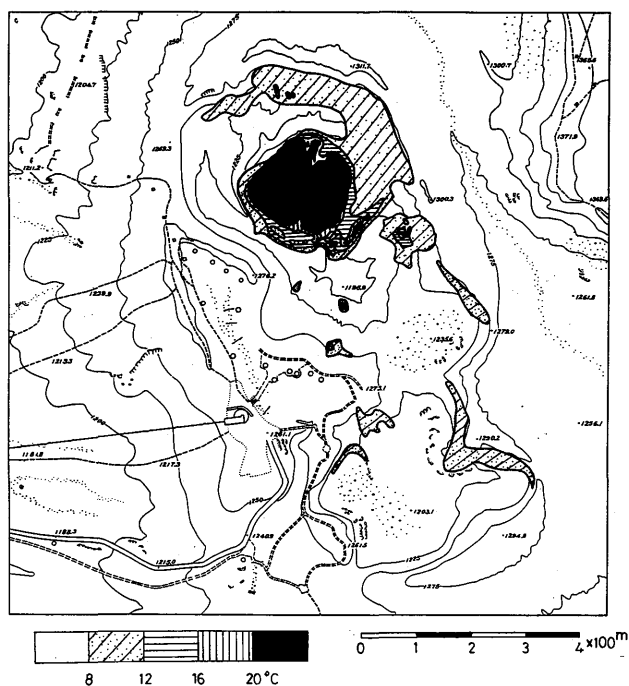


図2.2.2 阿蘇山中岳火口の温度分布 (1983年11月9日)

4. 温度分布図の比較

図2.2.3は表2.2.1に示した8回の観測で得られた温度分布図から中岳火口内のバックグラウンドの温度より高温な地域を抜き書きしたもので、高温域の面積・形等を示してある。この図及びさらにくわしく示した図2.2.2などの温度分布図から、中岳火口内の最高温度と高温域の面積を

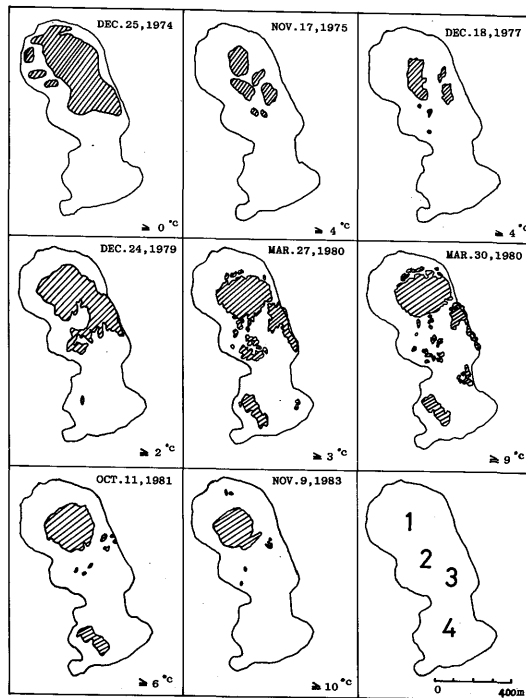


図2.2.3 阿蘇山中岳火口の高温度地域の比較

求めて表2.2.3にまとめ、比較してある。ただし、第3、第4火口の高温度部は日射の影響で温められた溜り水が残っているもので、表中の高温度面積には入れてない。最高温度は各観測時とも、第1火口底で検知されており、30～90℃を示している。ただし、この最高温度は2.5mradの瞬間視

表2.2.3 中岳火口の地表温度
(第3、第4火口の高温度域を除く)

	観測年月日	最高温度	高温域の面積 ($\times 10^2 \text{m}^2$)
1	1974、12、25	>60℃	1197 (0℃以上)
2	1975、11、17	>45	308 (4℃以上)
3	1977、12、18	>34	233 (4℃以上)
4	1979、12、24	55	832 (2℃以上)
5	1980、3、27	50	886 (3℃以上)
6	1980、3、30	90	833 (9℃以上)
7	1981、10、11	50	478 (6℃以上)
8	1983、11、9	65	414 (10℃以上)

野を持った観測装置で、火口から1300mもの高さから測ったものであるから、その温度は直径約3mの地域の平均温度であることに留意する必要がある。したがって、これらの最高温度が検知された場所で接触型温度計を用いて観測すれば、さらに高温を示すと考えられる。

5. 火口の温度と火山活動の比較

阿蘇山測候所の観測による阿蘇山の噴煙の変遷と噴火の時期を図2.2.4に示す。この図には噴煙の高さと量（0～7段階に分ける）の月別平均値の推移が示してある。噴火活動期の噴煙は高さ、量ともに大きな値となり、火山活動の消長をよく表わしていると思われる。

また、この図の上部には空中赤外温度観測を実施した時（菱形）を記入してある。

温度観測で得られた温度分布図を火山活動と対応させて比較検討すると次のようである。

1974年12月25日の観測：噴火活動中

第1火口は同年7月頃から活発な噴火活動を繰り返すようになり、12月の観測日当時も多量の火山灰の噴出が続いていた。温度分布図から火口内の高温域はかなり広いことがわかる。

1975年11月17日の観測：小活動期

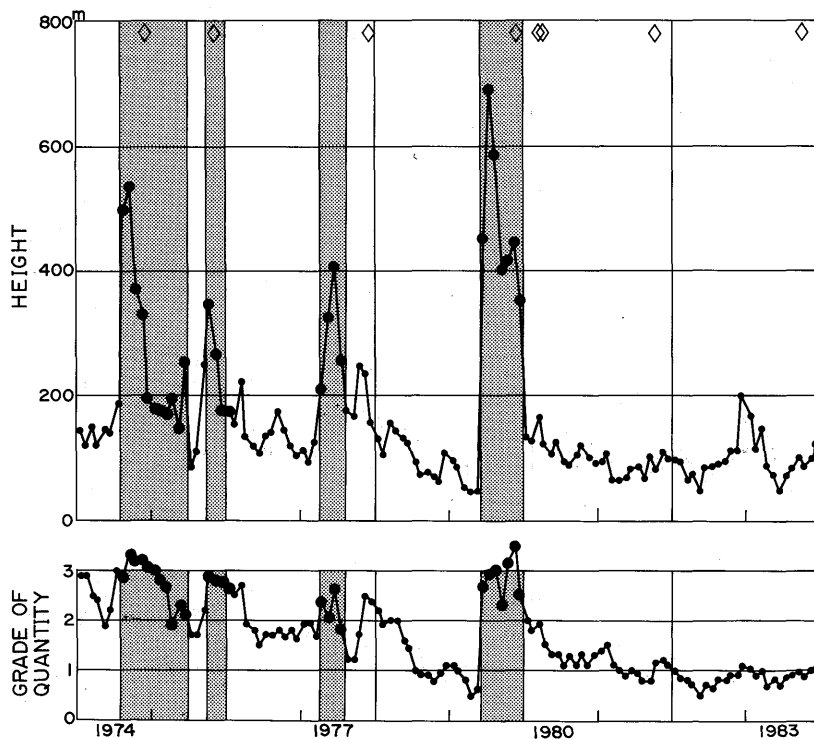


図2.2.4 阿蘇山中岳火口の火山活動。
噴煙の高さと量の変遷。メッシュは噴
火活動期。菱形は赤外温度観測時

この頃の火山活動は、第1火口の噴煙に少量の火山灰を含む程度の小規模な噴火をときどき起こす状態であった。火口内の高温域は前年のものに比べてかなり縮小している。

1977年12月18日の観測：静穏期

第1火口は少量の噴煙を静かにあげる程度。火口内の高温域は前2者と比べてはるかに縮小している。

1979年12月24日の観測：大爆発後

大爆発後2.5ヶ月を経ていたが、なお小規模な降灰などがあった時期である。火口内の高温域はかなり広い。

1980年3月27日の観測：大噴火活動後

第1火口底に大きな湯溜りがあった。火山活動は見かけ上穏やかだったが、火口内の高温域はかなり広い。

1980年3月30日の観測：火山活動は前回と同じ

高温域の広さは1974年12月25日に観測した噴火活動中のものに近い。

1981年10月11日の観測：火山活動は静穏。

第1火口底に湯溜りがあった。湯溜りの温度は約50°C。そのまわりの狭い地帯がやや高温。

1983年11月9日の観測：火山活動は静穏。

第1火口底には大きな湯溜りがあって、盛んに湯気をあげていた。高温地域は湯溜りと第1火口の火口壁にあって、高温域の面積は1981年とくらべ狭くなってきた。

これらの温度観測結果から、火口内の高温域の広さは火山活動の強度と深い関係があり、活動度が高いほど高温域の面積は広くなることがわかる。

6. ま と め

1974～1983年に阿蘇山で空中赤外温度観測が8回行われた。この観測によって得られた中岳火口内の地表温度分布図と、各観測時期の火山活動とを比較検討した。

火口内の高温域は顕著な噴火活動時には非常に広くなるが、火山活動の静穏期には狭い。

参 考 文 献

科学技術庁研究調整局 (1982) : 1979年の御岳山・阿蘇山噴火に関する研究報告書、1-189.

国土地理院 (1982) : 火山基本図、阿蘇山.

久保寺章・須藤靖明・太田一也 (1978) : 空中赤外熱映像による阿蘇山及び雲仙火山の熱的調査、阿蘇火山の集中総合観測 (第1回1977) 報告、文部省、40-50.

田中康裕 (1979) : 阿蘇山 (リモートセンシングによる火口及び火口周辺の地表温度の観測)、気象研究所技術報告、2、161-169.

第3章 御岳山の1979年噴火後の熱的状态*

1. ま え が き

1979年10月28日、御岳山(3063m、35°53'N、137°29'E)が有史以来初めて噴火し、山頂に近い地獄谷上部の北西から南東にかけた直線状の地帯に多数の火口を生じた。そのうちの大部分の火口は約1日間活発な噴煙活動を続けたが、その後活動は急速に衰えた。そして、3つの地区の火口では、現在(1984年)もなお噴煙活動を続けている。

一般に、火山活動は火山の地熱と密接な関係があり、噴火に前駆したり、顕著な火山活動に伴って火口付近の地表温度が変化した例は古来多数記録されている。ところで、御岳山では、これまでに山頂付近の地熱地帯の調査がなされたことは一度もなく、地熱温度に関する情報は全くわからなかった。そこで、同火山の噴火後の熱的状态を把握して今後の火山活動監視に役立てるため、リモートセンシングにより、火口及びその周辺の温度観測を実施した。

2. 空中赤外温度観測

航空機に赤外線映像装置(DS-1250型MSS)を搭載し、火山の上空からリモートセンシングにより地表温度を観測した。航空機及び観測装置は、前述の阿蘇山の温度観測で使用したものと同一である。

御岳山の噴気地帯は、1979年の噴火で生成した新火口とその周辺、地獄谷内とその中腹の噴気孔などがあるので、これらの地帯を観測できるような飛行コースを計画した。図2.2.1がそのコースである。コース内の山腹と山麓では、飛行時刻に合わせてグランドトルースを実施した。その位置は御岳高原(4地点)と御岳湖畔(2地点)で、図2.3.1の中に黒丸で示してある。

グランドトルースには棒状温度計及び放射温度計(ER-2002/SD)を用いて地表温度、水面温度等を測った。

空中赤外温度観測は1979年12月13日、1980年2月29日、1980年3月19日の3回実施した。観測時刻・観測コース・飛行高度(海拔)等は表2.3.1に示してある。飛行高度は山頂上約1000mとしたので、これと赤外線映像装置のMSSの性能を加味すると、この観測では直径2.5~3m程度の地表の平均温度を検出したことになる。

* 田中康裕・澤田可洋・中禮正明；地震火山研究部

田 望；東海大学

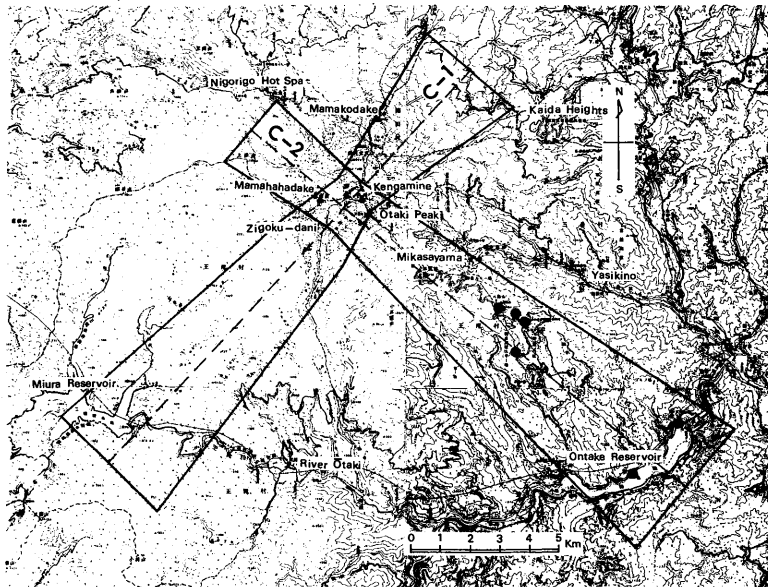


図2.3.1 御岳山空中温度観測のための飛行コース（C-1、C-2）とグランドトルース実施点（黒丸6地点、御岳高原と御岳湖畔）

表2.3.1 飛行記録

撮影年月日	コース	高度(m)	時刻
1979. 12. 13	C-2	4080	0839~0843
	C-2	4080	0846~0851
	C-1	4080	0856~0900
	C-1	4080	0909~0913
1980. 2 29	C-2	4100	1900~1905
	C-2	4100	1918~1924
	C-1	4100	1932~1936
	C-1	4100	1948~1952
	C-1	4100	2005~2009
1980. 3 . 19	C-1	4000	1810~1814
	C-2	4000	1821~1832
	C-2	4000	1839~1848
	C-1	4000	1856~1900
	C-1	4000	1916~1920
	C-2	4000	1920~1937

3. 空中赤外映像の解析

MSSの映像処理手順は前述の阿蘇山の空中赤外温度観測で述べた方法と同じである。ただし、阿蘇山の場合と大きく異なる所は、御岳山では地熱地帯付近の地形が険しい上に、噴火直後のため、防災上火口付近へは接近できなかったため、映像処理の際に必要な対空標識は設置しなかったことである。そのため、熱映像画面の地形補正には若干の工夫を凝らした。

すなわち、まず、第1回目の観測を地形の見える昼間に実施することにより、MSSの赤外及び可視チャンネルで同時に画像を撮り、その映像上に熱映像画を重ねて地熱地帯の概要を把握した。この段階では実際の地形図に対して画面は歪んでいるが、地形のわかる写真上に地熱地域の位置、形を重ねることができる。次に地形補正を行うのであるが、それには次のようにした。

まず、地形図に縦横多数のメッシュを描き、各メッシュの海拔高度を読み取る。次に、その地形図の各メッシュの高度と位置を用いて、飛行コース上から斜めに見下した地形モデルを作る。これが図2.3.2に示したメッシュ透視図である。メッシュ透視図は熱映像画面及びMSSの可視チャンネル画像とも一致するはずのものである。そこで、メッシュ透視図に熱映像を重ね、各メッシュ内の温度を読み、各メッシュを方形に転回すれば地形の補正された温度分布図ができあがる。

第2回及び第3回目の観測では、第1回目の観測で求めた目ぼしい地形や地熱高温部の位置を映像画面に見出すことによって、地形補正は簡単になる。

なお、第1回目の観測による赤外熱映像は昼間のものであったが、夜が明けて間もない時刻の観測だったのが幸いし、山の西斜面にある地獄谷ないし新火口一帯は丁度山体の陰になって太陽の直射がなかった。それゆえ、地熱に対する日射の影響は少なかった。

第1～3回目の観測による赤外熱映像は、デジタルカラーになおして口絵写真7の3枚の画像として示してある。

4. 地表温度分布図

3回の温度観測を通じて、高温地域は地獄谷の上部から中部にかけての地域で検知された。それらの位置は3回の観測とも大差なかったため、第1回目の観測で求めた位置と形だけを図2.3.3に示しておく。なお、新生火口の位置は図2.3.4のとおりである。

3回の温度観測を通じて、高い温度の地域が地獄谷上部の3つの地区で検知された。それらは、いずれも1979年の噴火で生成した新火口である。最北西の高温域をⅠ地区、その東方のものをⅡ地区、最南東のものをⅢ地区と呼ぶことにする(図2.3.3)。

また、上記の地区よりやや低温だが、まわりの山肌の温度より明らかに高温な所としてはⅠ地区の南西約300mの地獄谷内(これをⅣ地区と呼ぶ)、Ⅳ地区からさらに南西へ約700m下った所の古くからあった噴気孔地域(これをⅤ地区と呼ぶ)、及び濁川の所々で検知された。濁川は

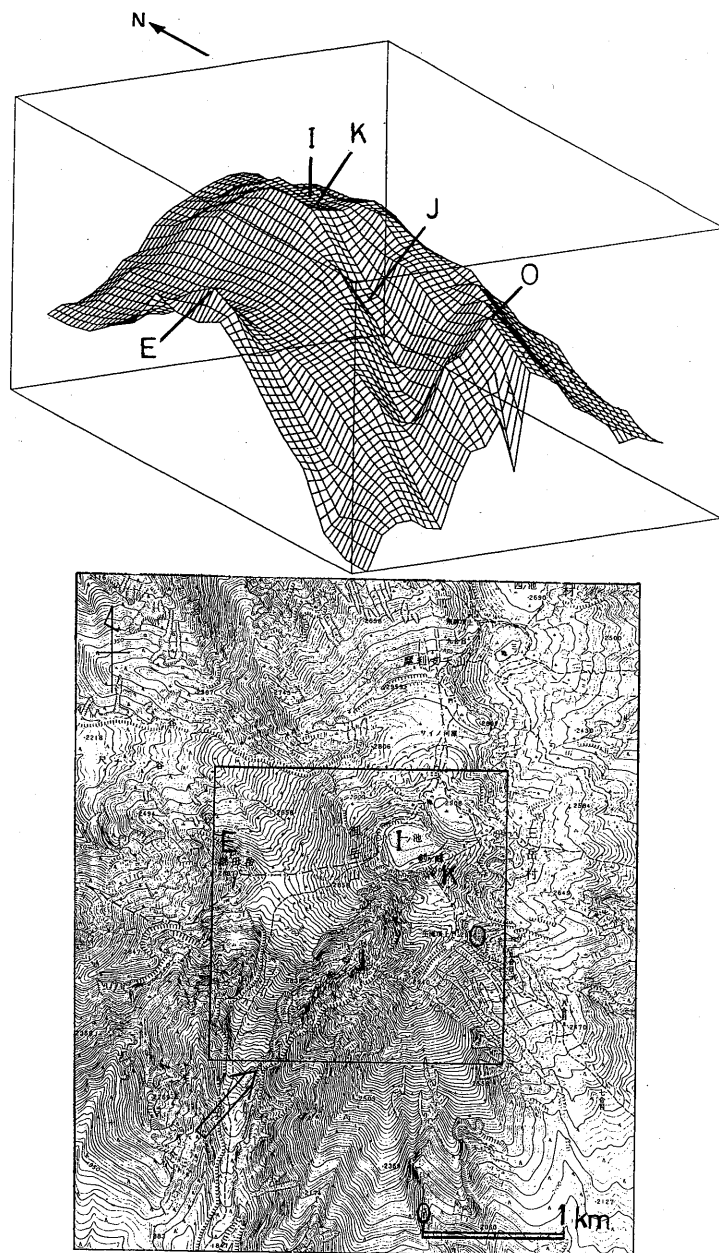


図2.3.2 御岳山頂付近の地形補正用メッシュ
透視図（上）とその範囲（下）。下図
の矢印は透視方向。

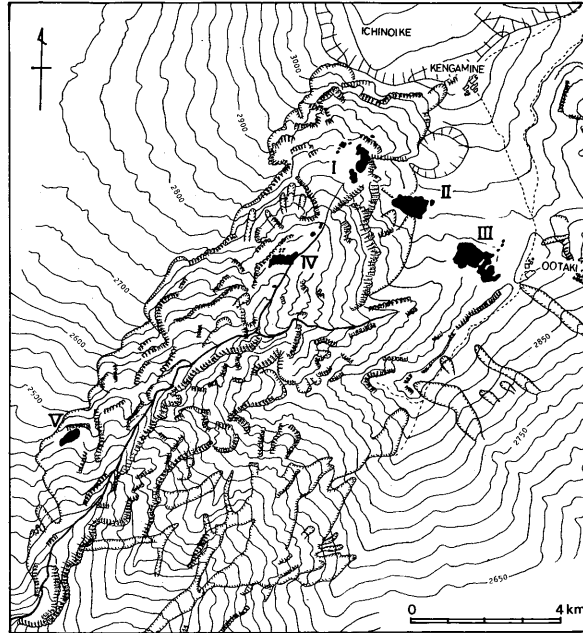


図2.3.3 御岳山の高温地域

I、II、III、IV、V一地区が高温（1979年12月13日の状況）

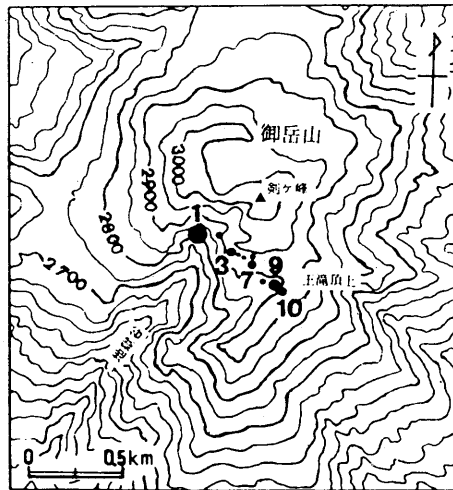


図2.3.4 御岳山1979年の噴火口の位置（1～10）
（気象庁1981による）

地獄谷に沿って流れ下りているが、その高温部をたどって行くと泉源はⅠ地区の新火口に通づる（図2.3.3）。

図2.3.5はⅠ～Ⅳ地区の詳細な温度分布図である。高温域として、周辺の温度より高い部分が画かれている。大勢としては、Ⅰ地区、Ⅱ地区、Ⅲ地区の順に温度が高くなり、かつ、高温域の面積も広がっている。ただし、この観測時点では各火口とも多量の噴煙をあげていたもので、ここに示した高温域には噴煙の温度もかなり含まれていると思われる、高温域の形は風になびいた噴煙の姿を表わしているようである。しかし、より高温部の形は火口そのものの形を示しているように考えられる。

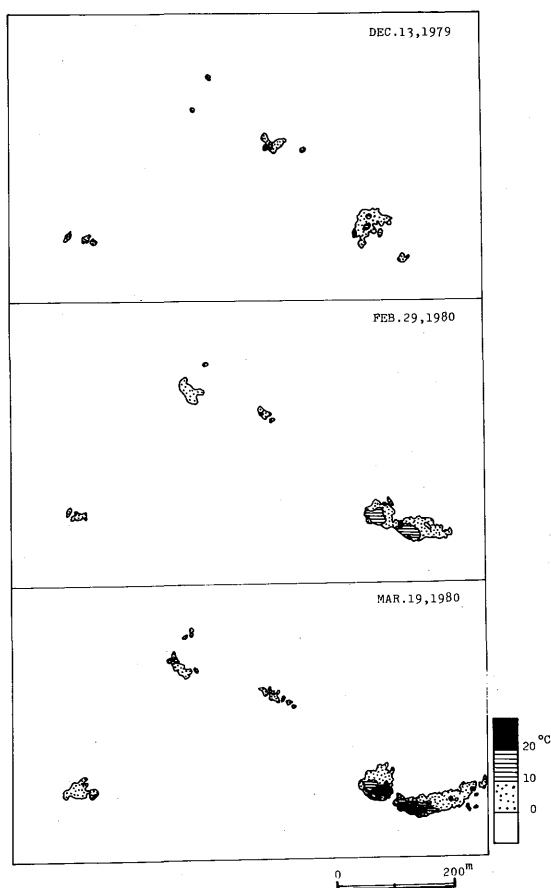


図2.3.5 御岳山の高温地域（図2.2.3におけるⅠ、Ⅱ、Ⅲ地区）の温度分布。
上から1979年12月13日、1980年2月29日、1980年3月19日の状況。

表2.3.2 御岳山の熱的狀態

位 置	観 測 時	最 高 温 度	高 温 域 面 積 ($0^{\circ}\text{C}<$)
I 地 区	第 1 回	3°C	$0.17 \times 10^2 \text{m}$
	第 2 回	9	9.38
	第 3 回	10	4.67
II 地 区	第 1 回	29	6.77
	第 2 回	11	2.73
	第 3 回	8	3.83
III 地 区	第 1 回	17	18.33
	第 2 回	26	42.95
	第 3 回	35	56.63
IV 地 区	第 1 回	9	2.92
	第 2 回	5	3.47
	第 3 回	11	9.61
V 地 区	第 1 回	-2	9.50
	第 2 回	-2	2.25
	第 3 回	-2	7.75
濁 川	第 1 回	-2	—
	第 2 回	-2	—
	第 3 回	-2	—
山肌の地温	第 1 回	-10~-15°C (平均-12°C)	
	第 2 回	-6~-12	(- 9)
	第 3 回	-4~-12	(- 9)

各高温地区の温度の狀態は表2.3.2にまとめてある。

3回の温度観測による各地区の熱的狀態を比較すると、I一地区とIII一地区の温度は次第に上昇し、II一地区では次第に下降した。また、III一地区の面積は顯著に生長しており、第1回目の観測時は不明瞭な2つの小火口だったのが、第2回目の観測では明瞭な2つの火口に拡大していることがわかった。

IV一地区は火口ではないが高温である。これは、濁川の高温水が作用しているためだと考えられる。V一地区の温度及び面積には大きな変化はなかった。また、濁川の最高温度は3回の観測を通じてほとんど変わっていなかった。

なお、気象庁（気象庁1980、気象庁観測部1981）によれば、1979年の噴火で新生した火口の数には明瞭なものだけでも10個ある。このうち、上述のI、II、III一地区の火口を除いては、噴火後

2～3日間に噴煙活動を止めてしまったが、それらの火口の温度は、まわりの山肌の温度と同程度に低温であった。高温地区以外の山肌の温度も参考のため表2.3.2に記載してある。

5. ま と め

御岳山は1979年10月28日に有史以来初めて噴火し、山頂に近い地獄谷の中に多数の火口を生じた。大部分の火口は同月末までには噴煙活動を停止したが、3つの地区の火口では後日まで長期にわたり噴煙活動を続けている。

御岳山噴火後の熱的状态を把握するため、1979年12月、1980年2、3月の3回にわたり火口及びその周辺の地表温度を航空機からリモートセンシングにより観測した。

高温地熱地帯は地獄谷上部で噴煙活動を続けている3つの地区の火口、地獄谷中部の古くからある噴気孔、地獄谷内を流れている濁川などで検知された。

地獄谷上部の3つの地区の高温な火口では、最南東寄りにあるものの高温部の面積が最も広く、かつ高温であり、火山活動が最も活発であることを示している。一方、地獄谷中部の噴気孔及び濁川の熱的状态は変化がなく、温度も余り高くない。

この研究は科学技術庁の特別研究促進調整費（田・他1979、気象研究所地震火山研究部1980、科学技術庁研究調整局1982）によるものである。航空機及び赤外線映像装置はアジア航測株式会社のものを使用した。

参 考 文 献

科学技術庁研究調整局（1982）：1979年の御岳山・阿蘇山噴火に関する研究報告書、1-89.

気象庁（1981）：火山報告、19、No.14、111-113.

気象研究所地震火山研究部（1980）：御岳山・阿蘇山における空中赤外映像による温度測定、火山噴火予知連絡会会報、19、12-20.

田 望・田中康裕・澤田可洋・中禮正明（1979）：1979年の御岳山・阿蘇山噴火に関する特別研究——噴火活動と地表温度分布変化の研究、気象研究所年報、昭和54、84-85.

第4章 御岳山の1979年噴火による降灰分布と山麓の 川水のpH*

1. ま え が き

1979年10月28日早朝、御岳山が有史以来初めて噴火した。この噴火による降灰は山の北東方面で観測され、降灰量は20数万トン（気象庁1981）に達したといわれる。

ここでは降灰分布と上空の風との関係を調べた。また、火山灰が降雨などに溶けて河川に流れ込むと水質を変え災害に結びつくこともあると思われたので、火山周辺の川水のpHを測り降灰域との関係を調べた。

2. 噴火開始時刻の推定

一般に、長期間活動を休んだ火山の次期爆発は、かなり大きく、かつ、顕著な前兆現象を伴いやすいというのが通説である。しかし、御岳山の1979年の噴火は有史以来初めてのものであったにもかかわらず、前兆現象はほとんどなく、かつ、噴火は開始時刻がわからない程に静かに始まった。もっとも、この火山に火山観測所があつて火山監視を続けていたならば、噴火の前兆現象が見出されていたかもしれないし、噴火開始時刻も明確に観測されたことだろう。

噴火を目撃した地元の王滝村役場の職員の話（中日新聞1979）によると、1979年10月28日5時頃、御岳山の山頂からは、高さ約150mの白色の噴煙があがっていた。近年の御岳山の山頂には噴煙をあげるような活動的な火口は存在していなかったため、この現象は噴火だと考えられる。

また、10月27日の夜、山上で宿泊した登山者の話し（中日新聞1979）によると、10月28日の6時前に起きたところ、山頂にはかなり噴煙が漂っていた。この登山者は6時より前には噴火に気付いていなかったことから、噴火は静かに始まったものと考えられる。山上で見た噴煙活動は8時ごろから激しくなったそうである。

一方、気象庁地震観測所（御岳山の北東約100km）、飯田測候所（御岳山の南東約55km）、名古屋大学理学部付属の付知地震観測点（御岳山の南方約26km）などの地震計は、10月28日5時20分頃から5～10分間にわたって御岳山の火山性微動を記録したので、この時刻に御岳山の地下で大きな変動が起つたと考えられる。

以上のことを総合して、噴火は28日5時頃に始まったと推定される。

*田中康裕・澤田可洋・中禮正明；地震火山研究部

3. 噴火活動の経緯

噴火は静かに始まったので、噴火初期には火山灰は余り多くは降らなかったと思われる。多量の噴煙をあげて火山灰を遠方まで飛ばすようになったのは、噴煙活動が活発化した10月28日8時すぎからだと考えられる。

噴火による噴煙は西ないし南西の風に流された。山頂から10km北東の開田村役場付近では、28日10時頃火山灰の降るのがわかるようになった。以後、同村では28日夜まで降灰が続いた。降灰の最盛期は14～15時で、そのころ屋外は降灰のため薄暗くなり、自動車はヘッドライトを必要とした。噴煙は山頂上約1000mの高さに達した。

御岳山の北東約60kmの松本測候所では13時頃から降灰が始まり、うっすらと積った。また、東北東約63kmの諏訪測候所では16時30分頃ごく少量の降灰を認めた。降灰は御岳山の北東200km近くまで達したと考えられ、図2.4.1の黒丸で示した地点では、いずれも28日13時すぎから夕刻までの間に降灰を観測した。

噴火活動は10月28日夜には顕著に衰え、翌29日以後は噴煙の色は白色に変わり、量も減った。

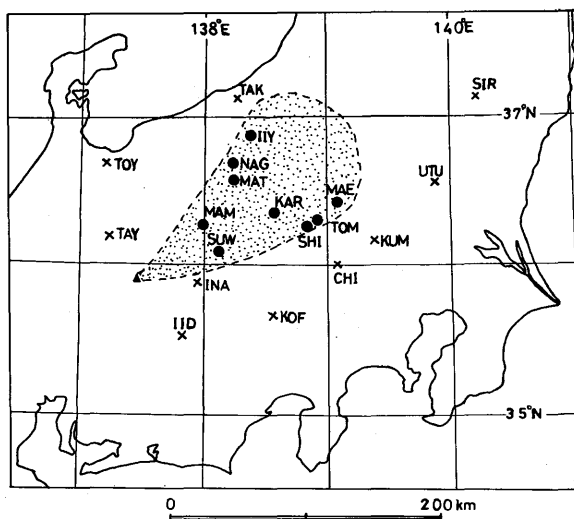


図2.4.1 御岳山噴火による降灰分布。

●降灰を観測

×降灰なし

SUW	諏訪	MAM	松本	KAR	軽井沢	MAT	松代
NAG	長野	IYI	飯山	SHI	下仁田	TOM	富岡
MAE	前橋	TAK	高田	SIR	白河	UTU	宇都宮
TOY	富山	TAY	高山	KUM	熊谷	CHI	秩父
INA	伊那	KOF	甲府	IID	飯田		

4. 降 灰 域

御岳山は海拔3063mの高さがある。山頂近くの新生火口からあがった噴煙は上層風の影響を受け、風下になびきながら火山灰を降らせた。

噴火前後の高層天気図及び地上天気図（1979年10月27日21時、28日9時、28日21時）から御岳山付近ないし日本の中部地方、とくに長野県北部における風向と風速を推測すると表2.4.1のようになる。この表により、噴火のあった10月28日早朝から夜までの間の上層及び地上における風の状態を推測すると次のようになる。

表2.4.1 1979年10月27～28日の御岳山付近における風

高 さ	27日21時		28日9時		28日21時	
	風 向	風 速	風 向	風 速	風 向	風 速
300mb (9000m)	西 南 西	40m/sec	西 南 西	40m/sec	南 西	50m/sec
500mb (4650m)	西 南 西	15 //	西 南 西	18 //	南 西	25 //
700mb (2880m)	西 南 西	10 //	西 南 西	10 //	南 西	13 //
850mb (1440m)	西	10 //	西	8 //	南 西	10 //
地上	不 明	2 //	不 明	2 //	不 明	2 //

地上では非常に弱い風が吹いていた。火口付近ないし火口の上空1000mの高さでは、初め10～18 m/secの西南西の風が吹いていたが、後に風速がやや強くなって13～25m/secとなり南西の風に変わった。このように、風向、風速が変わったのは日本上空に張り出していた中国大陸の高気圧が急速に移動してきたためで、その変わり目の時刻は10月28日の午前であったと思われる。

このような気象の影響を受けて、噴火の前半における噴煙は火口の東北東側に流れ、また、噴火の後半に噴出した噴煙は火口の北東側に流されてそれぞれの風下に火山灰を降らせた。

図2.4.1の降灰分布図において、御岳山から約10kmの地帯の降灰域の主軸は火口の東北東にあり、それ以上離れた地帯における主軸は北東方向に偏している。これは上述のような風向の変化によって生じた現象と考えられる。

噴火後、山頂から山腹にかけての降灰分布の調査は小林（1980）によって行なわれたものである。その概要を図2.4.2に示す。これによると、降灰域の主軸は火口近くでは東側にあるが、火口を離れると東北東に曲っていて図2.4.1の降灰分布図の火山付近の状態とよく調和している。

一方、ランドサットの映像から判読した御岳山の山頂から山腹にかけての降灰分布図（Tsuchiya et al. 1981、科学技術庁研究調整局1982）においても、降灰の主軸は火口の東から東北東に曲っていて、上述の調査結果とよく合う。

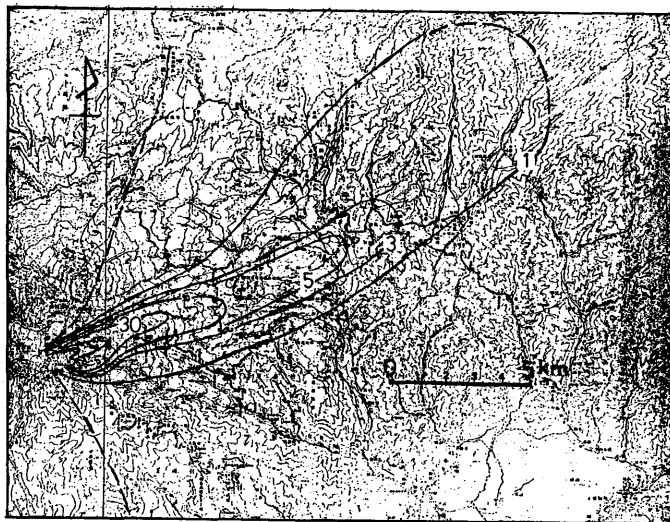


図2.4.2 御岳山噴火による降灰分布。小林 (1980) による

5. 火山灰の特徴

今回の噴火による降灰は、いずれの地域でも微細な粉状のものが観測された。この火山灰は発泡が進んでいないので、地下深所の高温なマグマから直接由来したものではなく、地下浅所の既存の低温な岩石から由来したものだといわれている (荒牧1980)。

山麓の王滝村の調査によれば、降灰の厚さは、火口付近で数10cm、風下の8合目付近で数cm、山麓の開田村中心部 (火口の東北東約15km) で1～3mm程度であった。噴石は少なかった。

開田村が積算した降灰量は20～25万トン、木曽福島町の木曽地方御岳山噴火対策班が発表した降灰量は18万トン、気象庁 (1981) によると約20数万トンと見積られている。

6. 山麓の川水のpH

山腹に積った降灰は、ときに二次泥流の原因になったり、植生を変え、被害を及ぼすことがしばしばある。降灰が雨水に溶けて流れ出すならば、山麓の河川の水質が変化するかもしれない。そこで、御岳山から流れ出ている川の水のpHを測った。観測は1979年11月13～15日及び1980年3月10～11日に行い両者を比較した。測定には東亜電波株式会社製DM-1A型pH計を用いた。なお、1979年11月中旬の現地の状況を口絵写真8に示す。

観測地点と降灰が多量にあった地帯を図2.4.3に示す。観測点1～9、17、18番は多量に降灰があった地帯内を通るか、または、その地帯内を水源として流れ出している川のpHを測った地点である。このうち、2、3番は2回目の観測がなく、また、17、18番目は新井 (1979) によるも

のであるが参考のため記載した。観測点10、12、13番は降灰が少なかったと思われる地帯に水源を持つ川の観測点である。11、14番は噴火口付近から流れ出している濁川の本流にある。観測点11番は気象庁の火山機動観測班（気象庁観測部1981）が1979年12月22日に行ったものを参考のため記載した。観測点15、16番は降灰がほとんどなかった地帯を水源とする川に設けた観測点である。観測値は表2.4.2に示してある。

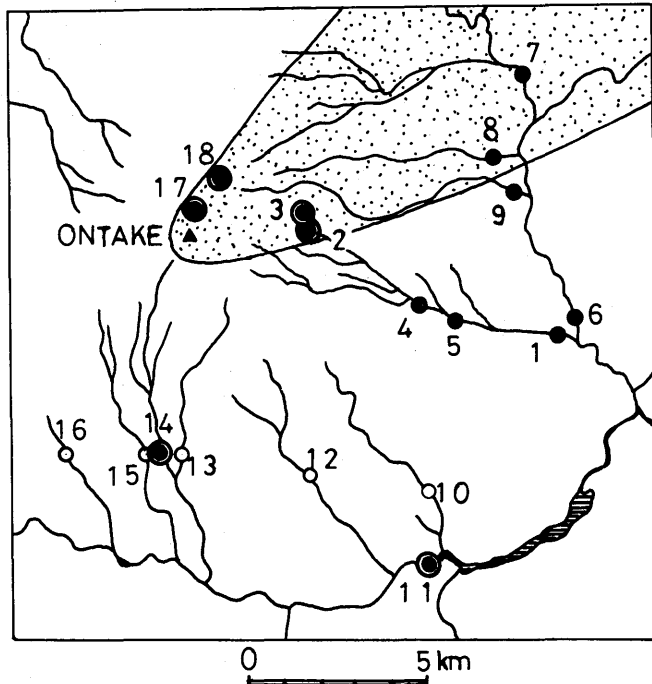


図2.4.3 降灰域とpH観測点。

○酸性、●降灰地域に水源を持つ、○その他

2度の観測値を比較すると、pHはほとんど変化していないことがわかる。しかし、地域ごとに、系統的な特徴が現われている。すなわち、山頂に近い所（観測点2、3、17、18番目）のpHは5付近、多量の降灰があった火山の東側山腹を流れる川（観測点1、4～9番）のpHは7.0～7.3、少量の降灰地帯に関係した川（観測点10、12、13番）ではpHが7.1～7.4、ほとんど降灰がなかった所の川ではpHが7.3～7.6となっている。また、濁川本流のpHは3付近である。

山頂近くの水、及び濁川の水を除くと、pH値はどの川でも7前後であることから、降灰による河川の水質への影響はなかったか、または、影響はあったが噴火後2週間たった観測時までには、その影響が消滅していたと考えられる。

表2.4.2 pH。第1回観測は1979年11月13～15日、第2回観測は1980年3月10～11日

地点	地 名	第 1 回	第 2 回	備 考
1	白 川	7.1	7.6	(1979. 12. 22測定)
2	中 の 湯	5.5	—	
3	中の湯付近	5.3	—	
4	大 滝	7.3	7.2	
5	中の湯本館	7.1	7.2	
6	西 野 川	6.3	6.8	
7	冷 川	7.1	7.0	
8	鹿の瀬川	7.2	7.1	
9	湯 の 川	7.2	7.2	
10	大 又 川	7.3	7.1	
11	大 滝 川	(4.9)		
12	鈴 ケ 沢	7.4	7.4	
13	伝 上 川	7.4	7.3	
14	濁 川	3.1	3.1	
15	下 黒 沢	7.6	7.3	
16	上 黒 沢	7.6	7.3	
17	二 の 池	(4.9～5.1)		新井 (1979)
18	三 の 池	(5.3)		同 上

7. ま と め

この調査により次のことを明らかにした。

- 1) 噴火は10月28日5時頃静かに始まり、同日夜まで続いた。
- 2) 噴火初期には火山灰の噴出は少なかった。10月28日8時頃から本格的な降灰が始まり、降灰の最盛期は同日14～15時頃であった。
- 3) 火山灰は初め西南西の風に流され、後に南西の風に流された。そのため、降灰域の主軸は東北東から北東方向に曲った。
- 4) 降灰は火口の北東方200km近くまで達した。
- 5) この火山灰は地下浅所で生成され、降灰量は20数万トン、噴石は少なかったとされている。
- 6) 降灰が山麓の川水のpHに与えた影響は少なかったと考えられる。
- 7) 山頂付近の川水のpHは5付近、濁川では3付近で酸性が強いが、山腹を流れる一般の川では7付近の中性である。

参考文献

- Tsuchiya, K., U. Uehara, Y. Tanaka, H. Ohnuki and H. Ochiai (1981) : Detection of Volcanic Ash
Coverrage From Landsat MSS Data, COSPAR Space Res, 1, 121-128.
- 新井 清 (1979) : 御岳、山と高原地図 7、昭文社、52-56.
- 荒牧重雄 (1980) : 木曾御岳山1979年噴火、噴火の観察と火山灰、御岳山1979年火山活動及び災害の調査研究、文部省特定研究No.B-54-3、1-2.
- 中日新聞 (1979) : 昭和54年10月29日刷.
- 科学技術庁研究調整局 (1982) : 1979年の御岳山・阿蘇山噴火に関する研究報告書、1-189.
- 気象庁 (1981) : 火山報告、19、No.4、111-113.
- 気象庁観測部 (1981) : 恐山・御岳山火山機動観測実施報告、16、23-27.
- 小林武彦 (1980) : 御岳山1979年火山活動、御岳山1979年火山活動及び災害の調査研究、文部省特定研究
No.B-54-3、4-12.

気 象 研 究 所

1946 (昭和21年) 設立

所 長 : 理 博 竹 内 清 秀

予 報 研 究 部	部 長 :	吉 田 泰 治
台 風 研 究 部	部 長 :	理 博 相 原 正 彦
物理気象研究部	部 長 :	理 博 岡 林 俊 雄
応用気象研究部	部 長 :	真 島 恒 裕
気象衛星研究部	部 長 :	工 博 内 藤 恵 吉
地震火山研究部	部 長 :	理 博 市 川 政 治
海 洋 研 究 部	部 長 :	理 博 飯 田 隼 人
高層物理研究部	部 長 :	理 博 嘉 納 宗 靖
地球化学研究部	部 長 :	秋 山 勉

気象研究所技術報告

編集委員長 : 真 島 恒 裕

編集委員 : 山 崎 孝 治 近 藤 洋 輝 伊 藤 朋 之
木 村 富士男 青 柳 二 郎 岡 田 正 實
遠 藤 昌 宏 小 寺 邦 彦 伏 見 克 彦

事 務 局 : 西 田 圭 子 湯 原 有 哉

気象研究所技術報告は、気象学、海洋学、地震学、その他関連の地球科学の分野において、
気象研究所職員が得た研究成果に関し、技術報告、資料報告及び総合報告を掲載する。

気象研究所技術報告は、1978年 (昭和53年) 以降、必要の都度刊行される。

昭和59年7月30日発行 I S S N 0386-4049

編集兼発行所 気 象 研 究 所

茨城県筑波郡谷田部町長峰1-1

印 刷 所 東京都文京区湯島1-1-12

株式会社 高 山

正 誤 表

頁	誤	正
123	7.まとめの上から12行目、1 行分ヌケ	この地震計を阿蘇山測候所 に設置し、1982年10月から観 測を行ったところ、Sassa (前出)の分