

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も、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。

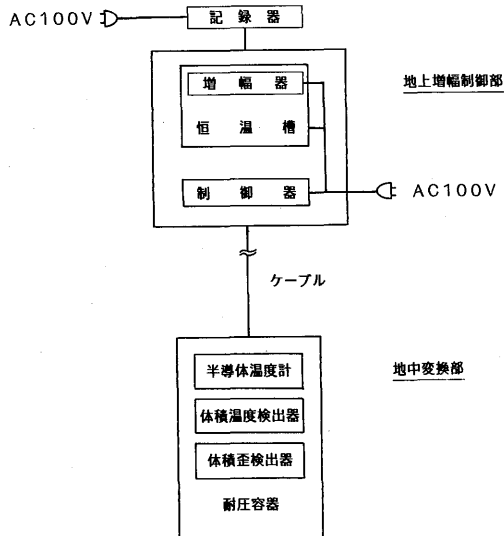


図1.3.1 火山用体積歪計ブロックダイアグラム

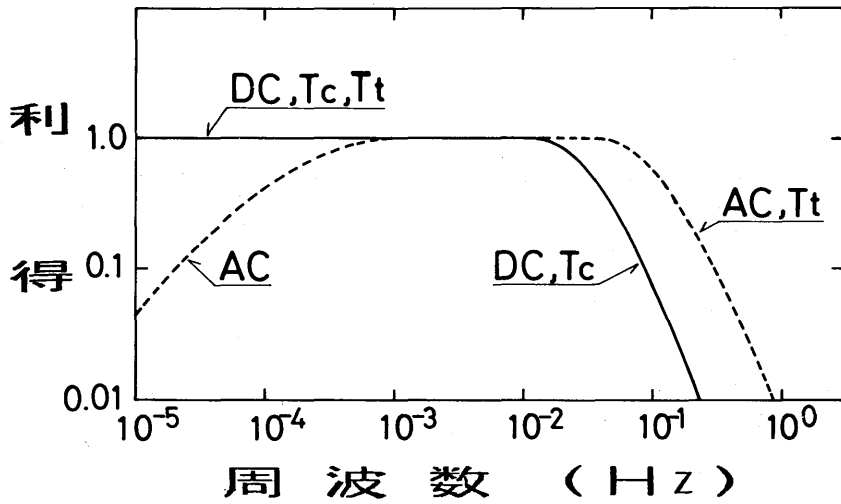


図1.3.2 総合周波数特性

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

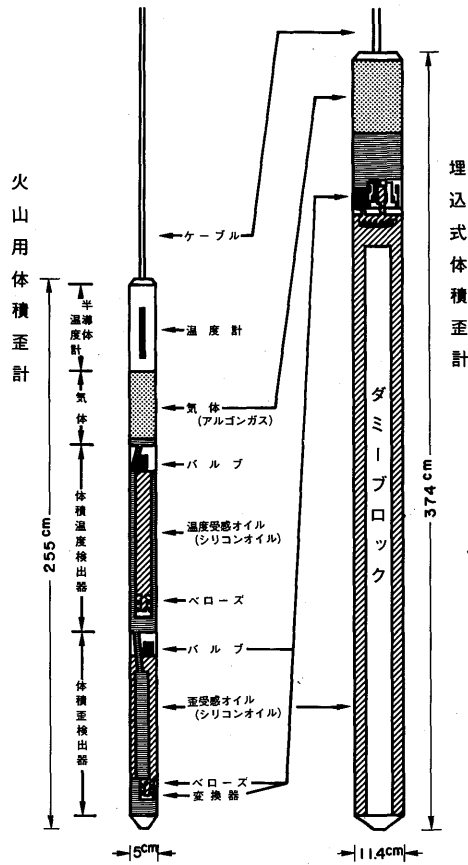


図1.3.3 火山用体積歪計地中変換部と埋込式体積歪計の比較

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。

上式で明らかのように、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	$10^{-8} \sim 10^{-3}$ strain
最高感度(60dBにおいて)	$0.1V / 10^{-8}$ 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) 2×10^{-8} strain/1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じ)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。

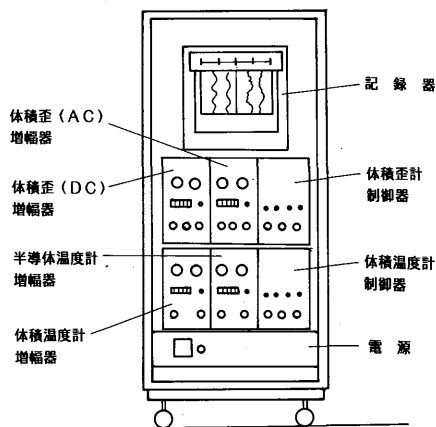


図1.3.4 火山用体積歪計地上増幅制御部

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）：

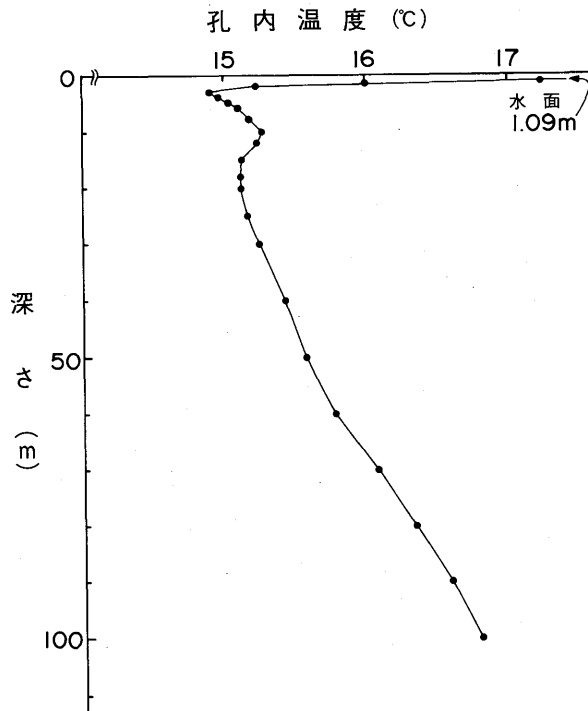


図1.3.5 気象研究所構内観測孔の温度

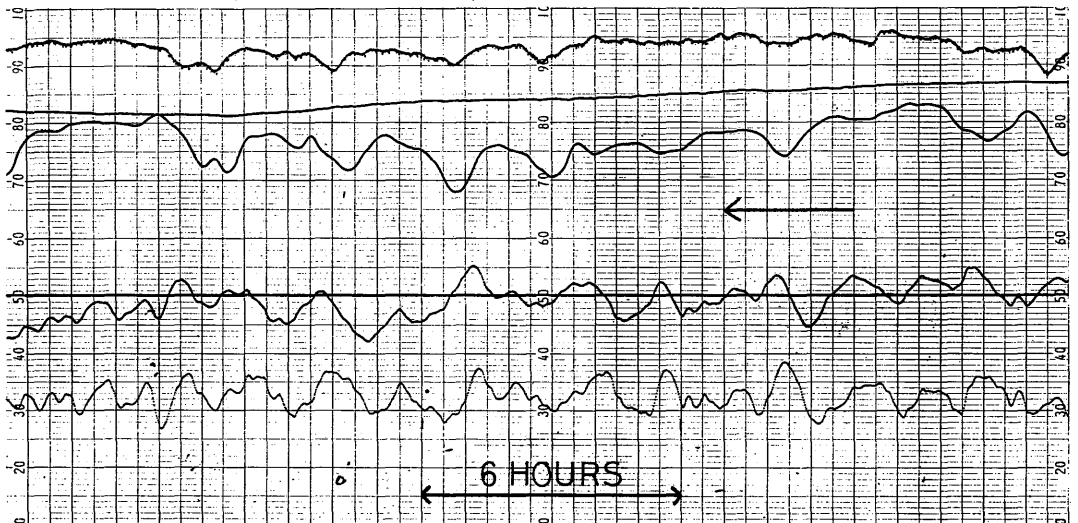


図1.3.6 火山用体積歪計の記録例 (体積歪検出部は観測孔の壁に固定してない)

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°C/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°C/日の変化に相当)

5 ch : 11~19 目盛 (平均13 目盛、これは 8.2×10^{-7} /日の変化に相当)

6 ch : 10~15 目盛 (平均12 目盛、これは 7.6×10^{-7} /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収容されているので、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。

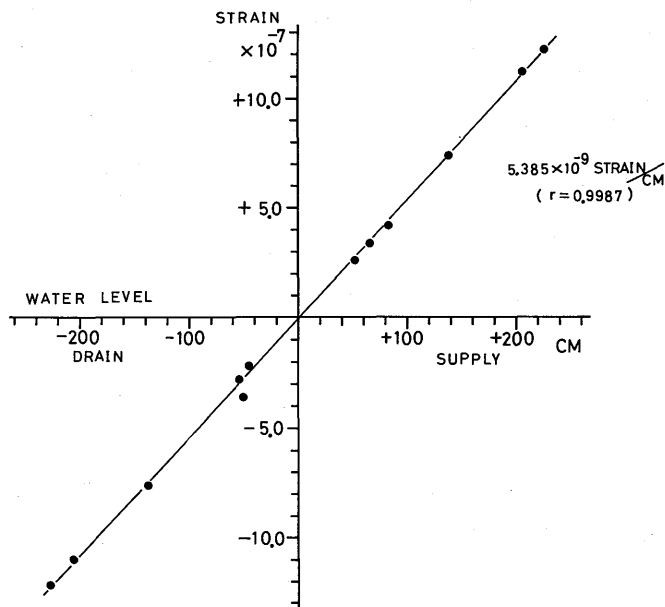


図1.3.7 体積歪検出器の水圧試験。rは相関係数。

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

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。

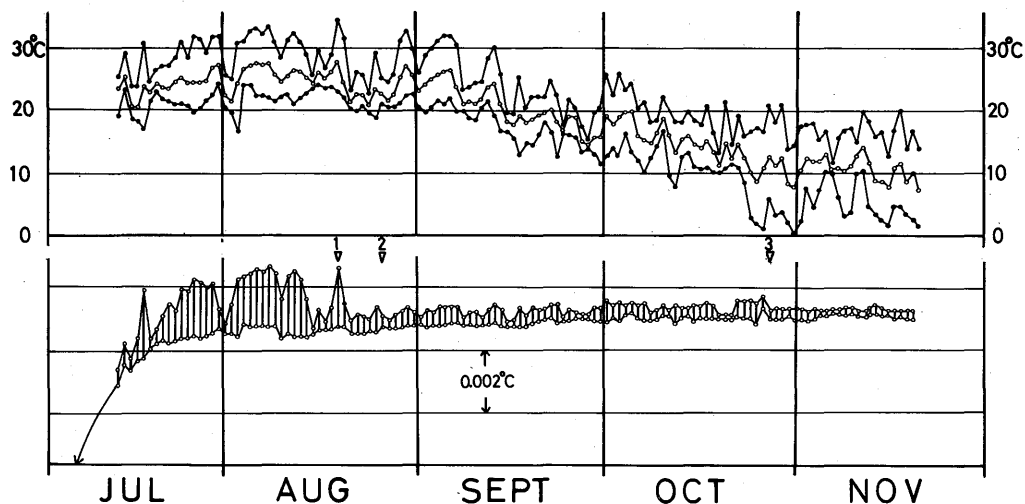


図1.3.8 ケーブルへの日照による体積温度検出器出力の変動（最下段）と気温（上から最高、平均、最低）との比較
1：ケーブルに屋根をつける。2、3：地上増幅制御部調整

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} ~ 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。