

火山専用空中赤外映像装置の開発研究 (第5報)
—— 3～5 μm 帯域赤外線検知器による噴気温度
の現地計測実験——

植原茂次*・熊谷貞治**・高橋 博***

国立防災科学技術センター

竹村孝爾⁺・提 捨男⁺

京都工芸繊維大学

**Developmental Study on New Airborne Multi-spectral
Scanner System Specifically Oriented to Thermal Obser-
vation of Volcanoes(Fifth Report)**

By

S.Uehara, T.Kumagai and H.Takahashi
National Research Center for Disaster Prevention, Japan
K.Takemura and S.Tsutsumi
Kyoto Institute of Technology, Japan

Abstract

In order to evaluate the effectiveness of spectral bands of thermal detectors on the thermal observation of volcanic fumes and of correcting methods on the effect of atmospheric transmittance on observed data, a field observation experiment was conducted at Owakudani of Hakone Volcano, Kanagawa Prefecture, by using a portable scanning radiometer and three kinds of thermal detectors with different spectral bands, in which newly developed 3-5 μm band detectors indicated in the Second Report were included.

The experiment consists of two parts, the one is the short range observation (20 m) and the another is far range observation (263-604 m) of the fume temperatures.

The fume temperatures were calculated and corrected based on the observed data such as radiometric output powers of the fumes and black bodies, air temperatures and humidities.

The results obtained are as follows.

- (1) Two spectral bands of thermal detectors, 3-5 μm and 7-8 μm , are more effective than the one of 10-13 μm for detecting volcanic fume temperatures since the formers can detect higher fume temperatures than later.

* 第四研究部, ** 第三研究部, *** 所長

⁺ 京都工芸繊維大学工学部電子工学教室

- (2) Comparative Calculation Method for the correction of the effect of atmospheric transmittance on thermal observation, which was proposed by S. Tsutsumi is proved to be very effective by the comparison with the results obtained through ordinary correction method using observed data of air temperatures and humidities.

目 次

まえがき	3	4. 実験の方法及び観測結果	15
1. 実験の目的	4	4.1 近距離噴気の温度測定	15
2. 実験の場所及び日程	4	4.1.1 実験方法	15
2.1 概況	4	4.1.2 結果	17
2.2 実験場所の詳細	5	4.2 遠距離目標の温度測定	20
3. 実験機器	8	4.2.1 実験方法	20
3.1 検知器	8	4.2.2 結果	21
3.1.1 Aバンド(4.73~5.04 μ m)用検知器の基本性能	8	4.2.3 目標の同定	23
3.1.2 Cバンド(7.56~8.18 μ m)/Dバンド(10.4~13 μ m)用検知器の基本性能	9	4.3 検知器の液体窒素保持時間の測定	23
3.2 実験用放射計	10	4.4 遠距離目標の観測	26
3.3 基準熱源	10	5. 実験データの解析	27
3.3.1 標準黒体	10	5.1 解析手法	27
3.3.2 模擬黒体	11	5.1.1 近距離噴気の温度測定法	27
3.4 実験用機材の概括	12	5.1.2 遠距離目標の温度測定法	28
3.4.1 概説	12	5.2 解析結果	29
3.4.2 計測機器等	12	5.2.1 近距離噴気の温度測定結果	29
3.4.3 支援機材等	13	5.2.2 遠距離目標の温度測定結果	30
		6. 実験結果の評価	31
		6.1 検知器実用性能の評価	31
		6.2 測定方法の評価	31

まえがき

本報告は、国立防災科学技術センター研究速報第62号火山専用空中赤外映像装置の開発研究(第1報)以来、第63号、第70号、第71号に続く第5報である。

本研究の目的は、火山の噴気温度の観測に対する赤外線検知器のスペクトルバンドの有効性の評価と、観測温度に対する大気補正法の評価である。前者は従来用いられてきた10～13 μm帯に対し3～5 μm帯及び7～8 μm帯の比較であり、後者は堤の提案した比演算法との比較である。

火山噴気の地上における赤外放射計を用いた遠隔測定については、京都工芸繊維大学工芸学部電子工学教室に研究実績があり、縦型の赤外線検知器を装着できる可搬の簡易な走査放射計を保有している。

第2報で開発した航空機搭載用MSSの3～5 μm帯赤外線検知器は、上記放射計に装着可能であり、第1報の詳細設計で得られたMSSの機能と、上記放射計のそれとの違い、及び検知器仕様の違いはあるが、前述した火山噴気温度観測に関する赤外波長域の評価、並びに大気補正計算方式の評価という目的は、京都工芸繊維大学の保有する上記放射計及び赤外線検知器を使った観測結果と比較することにより、可能であると考えられた。

そこで、京都工芸繊維大学の協力の下に、昭和58年8月19日から8月22日にかけて、箱根火山大涌谷において火山噴気の現地計測実験を実施した。

本研究の実施は、財団法人地震予知総合研究振興会の協力を得て第1報以来審査・検討を進めてきた下記メンバーで構成する火山専用空中赤外映像装置に関する研究委員会により行われ、現地測定実験及び解析は、京都工芸繊維大学工芸学部電子工学教室の竹村孝爾、堤捨男が担当した。

委員長、専門委員	加茂幸介	京都大学防災研究所教授、桜島火山観測所長
専門委員	源田秀三郎	千葉大学名誉教授
専門委員	堤 捨男	京都工芸繊維大学工芸学部教授
専門委員	三輪卓司	千葉大学工学部教授
職 員	所長	高橋 博
	第2研究部	高橋末雄
	第3研究部	植原茂次(現第4研究部)、熊谷貞治
	第4研究部	幾志新吉、矢崎 忍

なお、本実験を実施するに当り、財団法人地震予知総合研究振興会、神奈川県小田原土木事務所、神奈川県箱根自然公園管理事務所、箱根温泉供給株式会社に御協力をいただいた。ここに記して感謝の意を表します。

追記

京都工芸繊維大学工芸学部教授堤 捨男先生は、去る昭和60年8月1日、食道ガン手術後急逝されました。

先生には、昭和54年度に火山専用空中赤外映像装置の開発研究が開始されて以来、6年間の長きに亘って当センターの専門委員として懇切なる御指導・御助言をいただきました。特に本報告の現地実験には、竹村助教授と共に学生を指導されつつ、直接御自身で参加されました。

このように、本研究委員会の中心となって本研究のために御協力を賜った堤先生を失ったことは、委員会にとっても、当センター担当職員にも大きな痛手となりました。

ここに、本研究会委員並びに当センター職員の堤先生に対する衷心よりの哀悼の意を表するとともに、先生の御冥福をお祈り申し上げる次第であります。

昭和61年5月30日

3～5μm帯域赤外線検知器による噴気温度の現地計測実験

1. 実験の目的

本現地実験は、火山専用空中赤外映像装置のMSS赤外検知部の一部として試作した、3～5μm帯域赤外線検知器を地上実験用放射計に装着し、実際の火山の噴気温度の測定実験を行って、検知器の実用性能を確認するとともに、測定手法の評価を行い、今後開発が予定されているMSSの測温機能に関する事前検証と測温手法を確立することを目的とするものである。

2. 実験の場所及び日程

2.1 概況

- 火山の噴気等の測定実験場所
神奈川県足柄下郡箱根町上湯場大涌谷
- 実験期間
昭和58年8月18日(木)～8月23日(火)
- 実験日程

表 2.1 実験日程
Table 2.1 Schedule of the experiment.

月日(曜)	天 候	場 所	作 業 内 容
8/18(木)	晴時々曇	京 都 ～ 箱 根	実験要員及び装置、機材等の搬送
19(金)	晴	大涌谷甲地点	近距離噴気の温度測定等
20(土)	曇 後 雨	大涌谷乙地点	遠距離目標の温度測定等
21(日)	雨	宿 舎	検知器の液体窒素保持時間の測定
22(月)	雨 後 曇	大涌谷乙地点	遠距離目標の観測
23(火)	曇時々晴	箱 根 ～ 京 都	実験要員及び装置、機材等の搬送

2.2 実験場所の詳細

火山噴気等の測定実験を行った大涌谷(大涌沢)全体の空中写真を写真2.1に示す。本写真は神奈川県土木部砂防課が昭和56年3月31日発行した「大涌沢地すべり」の資料を複写したもので、後述する大涌谷地図(合成)と同様に、必ずしも現状の大涌谷を正確に表現していないが、測定地点の特定、目標の特定、距離の算出等の作業の際に参考とした。

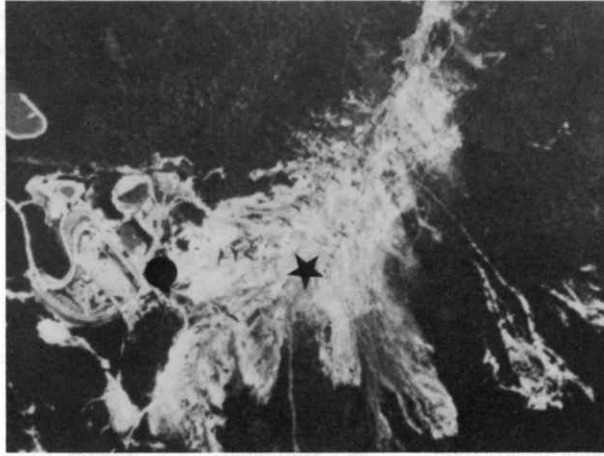


写真2.1 大涌谷空中写真
(甲及び乙測定器設置地点：★印, ●印)

Photo 2.1 Aerial photograph of Owakudani of Hakone Volcano, the location of measuring equipment :
★ : short range observation
● : far range observation

8月19日(金)に行った近距離にある噴気为目标とする温度測定実験における測定装置(放射計本体)の設置場所を便宜上、甲地点と呼び、空中写真上に星印で表したものを写真2.1に示す。同様に8月20日(土)に行った遠距離にある噴気等为目标とする温度測定実験における測定装置(放射計本体)の設置場所を、乙地点と呼び、黒丸印で写真に示す。8月22日(月)に実施した観測も同一地点である。

図2.1は、神奈川県小田原土木事務所・所有の1/500測量地図(複数)を合成し、さらに1/2000に縮小したものである。同図上に甲地点を星印で、またそのときの測定対象位置を三角印で表す。同様に乙地点を黒丸印及びそのときの測定対象位置を白丸印で表し、1~15の番号を付けている。

甲地点は、写真2.2(a)で示したように、地すべり防止工事用作業道(山道)上に設け、目標はここから南々東方向に20m離れた位置にある噴気であり、同写真(b)中の矢印で示したものである。(b)の上部写真において、噴気の左側に見えるのが、長方形の模擬黒体で、さらにその左側に見えるのが熱湯を多量に含む噴気で、本実験では模擬黒体への熱湯供給源として

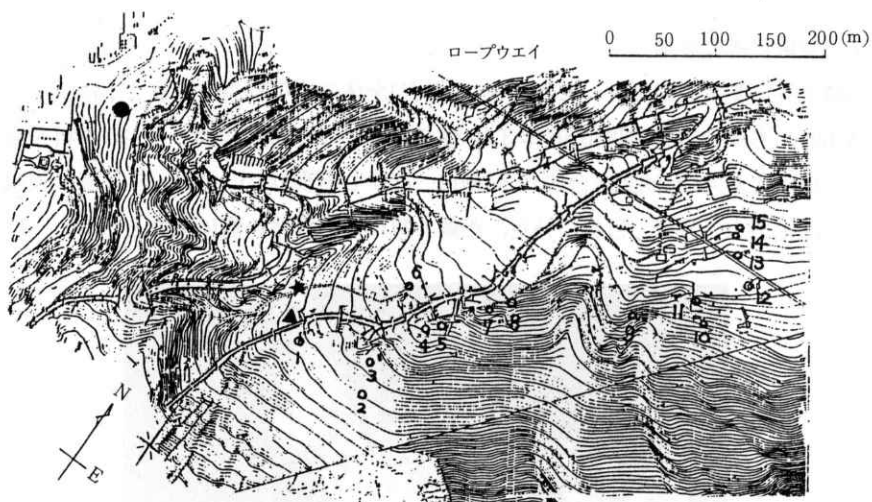


図 2.1 大涌谷内における測定器設置地点及び測定対象位置図

甲地点とその測定対象：★印及び▲印

乙地点とその測定対象：●印及び○印(1～15)

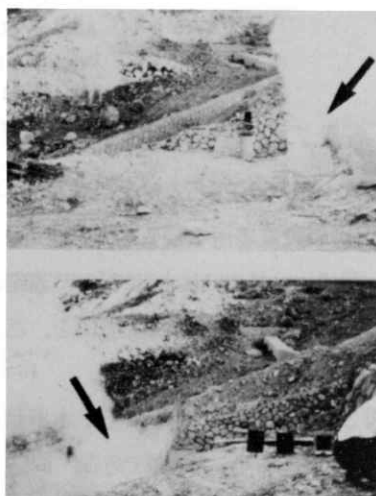
Fig. 2.1 Locations of setted measuring equipment and target fumes in the Owakudani of Hakone Volcano.

short range observation : ★ : equipment ▲ : target fume

far range observation : ● : equipment ○ : target fumes (1 - 15)



(a) 測定装置及び測定状況
(a) equipment and measuring.



(b) 測定対象(噴気を矢印で示す.甲地点より20m).
(b) measuring targets (the fume indicated by an arrow of which distance from the equipment is 20m).

写真 2.2 近距離噴気温度測定(甲地点)

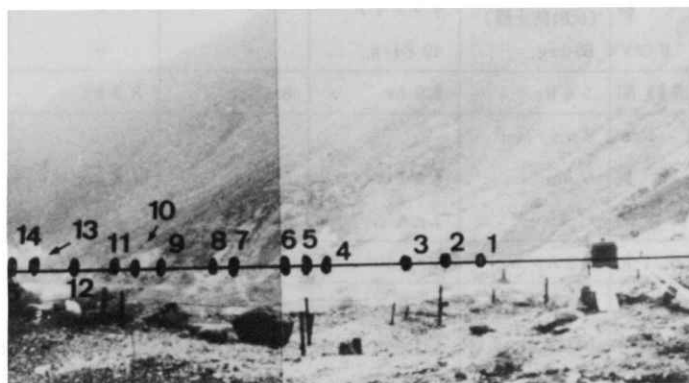
Photo 2.2 Short range observation of a fume temperature.

利用した。(b)の下部写真の右側に、甲地点から測定して6.0mの位置にある模擬黒体2個および標準黒体が見える。

乙地点は、写真2.3(a)で示したように、大涌谷全体が見おろせる山腹斜面であり、目標はここから東南東方向263m離れた位置にある熱噴水を始めとして東北東方向604m離れた位置にある噴気を終りとする一連の高温対象であり、同写真(b)の走査線上の番号1~15で示したものである。走査方向は左から右である。なお、写真2.3は8月22日(月)に撮影したものである。



(a) 測定装置及び測定状況
(a) equipment and measuring.



(b) 測定対象(複数の目標を番号1~15で示す。乙地点から目標までの距離263~604m)
(b) measuring targets (the targets are numbered in the order of shorter distance from the equipment, 263 - 604 m)

写真2.3 遠距離目標温度測定(乙地点)

Photo 2.3 Far range observation of fume temperatures.

3. 実験機器

3.1 検知器

3.1.1 Aバンド(4.73~5.04 μm帯)用検知器の基本性能

表 3.1 Aバンド(4.73~5.04 μm帯)用検知器の基本性能
Table 3.1 Basic performances of A-band (4.73-5.04 μm) detectors.

性能規格項目	略称	InSb	PH1	PH2	PH3	PH4
形 名		IV100C3	MCI-0150 -A-PH1	MCI-0150 -A-PH2	MCI-0150 -A-PH3	MCI-0150 -A-PH4
所 属		京 工 大	国立防災科学 技術センター	"	"	"
メ - カ - 名		富 士 通	"	"	"	"
材 料 ・ 動 作 機 構		InSb- 光起電力形	HgCdTe- 光伝導形	"	"	"
検知面積(素子寸法)		1mm φ	0.149×0.15mm ²	0.149×0.15mm ²	0.15×0.15mm ²	0.15×0.15mm ²
有 効 波 長 領 域		1.2~5.5 μm	(3~5 μm)	(")	(")	(")
動 作 温 度		77K	"	"	"	"
分 光 レスポンス R _{sp}			2.9 × 10 ⁴ V/W	4.3 × 10 ⁴ V/W	1.3 × 10 ⁴ V/W	2.3 × 10 ⁴ V/W
比検出能(黒体感度) D* [cmHz ^{1/2} W ⁻¹]		≥ 1.5 × 10 ¹⁰	7.3 × 10 ⁹	1.1 × 10 ¹⁰	7.8 × 10 ⁹	7.7 × 10 ⁹
D*(500K,1000Hz,1Hz,60°)						
最大波長感度 D* _{max}		≥ 7.5 × 10 ¹⁰	2.9 × 10 ¹⁰	4.2 × 10 ¹⁰	3.1 × 10 ¹⁰	3.1 × 10 ¹⁰
暗 抵 抗 (インピーダンス) 10 K Ω			79.9 Ω	63.2 Ω	63.9 Ω	82.7 Ω
時 定 数		< 5 μs	0.7 μs	0.9 μs	0.7 μs	0.7 μs
窓 材 料		Si (反射防止膜)	サファイア	"	"	"
視 野 FOV		60 deg.	49.8 deg.	"	"	"
液体窒素保持時間		> 4 hr	8.0 hr	8.17 hr	8.2 hr	8.25 hr
短 絡 電 流 I _{sc}		8 μA/mm ²				
最 大 感 度 波 長		5 μm	5.0 μm	5.1 μm	4.8 μm	5.1 μm
最 適 バ イ ア ス 電 流		-	7 mA	9 mA	4 mA	3 mA
レ ス ポ ン シ ビ テ ィ R		0.3 A/W	7.3 × 10 ³ V/W	1.2 × 10 ⁴ V/W	3.3 × 10 ³ V/W	5.8 × 10 ³ V/W
本データ・規格の典拠		富士通カタログ P 276-612 M (規格値)より	国立防災科学技術センター研究速報第 63号 火山専用空中赤外映像装置の開発研究(第2報)(昭59年10月) P.26,表3.5 基本性能試験結果より			

3.1.2 Cバンド(7.56~8.18 μm) / Dバンド(10.4~13 μm)用検知器の基本性能

表 3.2 Cバンド(7.56~8.18 μm 帯) / Dバンド(10.4~13 μm 帯)用検知器の基本性能
Table 3.2 Basic performances of C-band (7.56-8.18 μm) and D-band (10.4-13 μm) detectors.

性能規格項目	略称	HgCdTe-1			
形 名		HC 1100D-MYSI			
所 属		京 工 大			
メ - カ - 名		富 士 通			
材 料 ・ 動 作 機 構		HgCdTe- 光伝導形			
検知面積(素子寸法)		1.0 × 1.0 mm ²			
有 効 波 長 領 域		(~ 12.6 μm)			
動 作 温 度		77K			
D^* [cmHz ^{1/2} W ⁻¹]		1.2 × 10 ¹⁰ (I _b = 6mA)	1.3 × 10 ¹⁰ (I _b = 12mA)	1.7 × 10 ¹⁰ (I _b = 18mA)	2.0 × 10 ¹⁰ (I _b = 24mA)
$D^* \lambda_{\text{max}}$ [cmHz ^{1/2} W ⁻¹]		1.5 × 10 ¹⁰ (I _b = 6mA)	1.7 × 10 ¹⁰ (I _b = 12mA)	2.2 × 10 ¹⁰ (I _b = 18mA)	2.5 × 10 ¹⁰ (I _b = 24mA)
暗 抵 抗		30 Ω			
窓 材 料		ゲルマニウム			
視 野 FOV		45 deg.			
レスポンスビティ R [V/W]		8.9 × 10 ² (I _b = 6mA)	1.8 × 10 ³ (I _b = 12mA)	2.9 × 10 ³ (I _b = 18mA)	4.0 × 10 ³ (I _b = 24mA)
本データ・規格の典拠		京工大卒論「赤外による温度のリモートセンシングに関する研究」 白井達朗(昭56年2月)より			

3.2 実験用放射計

図3.1に放射計の構成を示す。回転軸に対して45°傾けて取り付けられた直径150mmφのスキャナーに入射した放射は、焦点距離600mmのカセグレン光学系により、液体窒素冷却された赤外線検知器面上に集められる。検知器直下にある光学フィルタ部には4種類の異ったフィルタを装着できるマガジンがあり、挿入方向及び挿入深さを変えて、適宜、フィルタを選択できるようにしてある。

スキャナーの回転数は1 rpsが標準で、回転方向はスイッチにより選択ができ、且つ、照準を合わせられるように、微速度回転の可能な乾電池式電源も内蔵している。

波形観測用シンクロスコープのトリガー信号を発生させるために、モータ部の直上に同期信号発生器を備えている。写真3.1は本放射計の写真である。

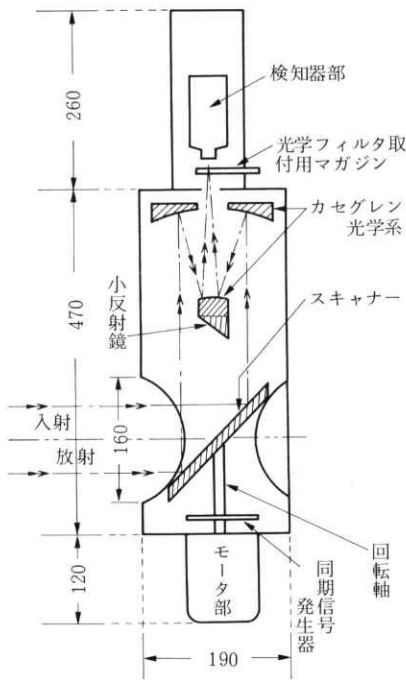


図3.1 放射計の構造図

Fig. 3.1 Schematic representation of the mechanism of scan radiometer.

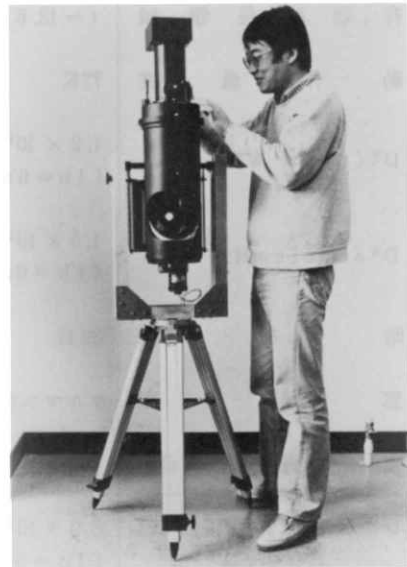


写真3.1 放射計の外観

Photo 3.1 Outlook of the scan-radiometer.

3.3 基準熱源

3.3.1 標準黒体

放射計に入射する赤外放射パワーの絶対量を測定するには外部に放射量が既知の基準放射源が必要であり、これを放射計の近傍(数m程度)に設置する。写真3.2はこの基準放射源と

して使用する面状の標準黒体である。この黒体の有効面積は $160\text{mm} \times 160\text{mm}$ である。右側に見えるのは、温度制御と表示を行うための表示器である。制御できる温度は、室内においては室温～ $70\text{ }^\circ\text{C}$ であり、黒体面の放射率は 0.95 以上の性能を有する。黒体面の温度測定分解能は $0.1\text{ }^\circ\text{C}$ であり、設定温度に対する応答速度は、気温 $20\text{ }^\circ\text{C}$ に於いて、同温度から $50\text{ }^\circ\text{C}$ の設定温度に上げるような場合、約 20 分程度である。

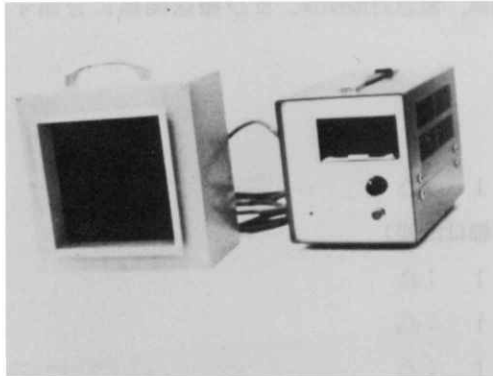


写真 3.2 標準黒体と表示器。
Photo 3.2 Standard black body and its indicator.

3.3.2 模擬黒体

プリアンプを含めた放射計全体のレスポンスは必ずしも安定しているわけではなく、変化要因が多い。特に環境温度変化によるプリアンプ利得の変化、検知器Rの変化、放射計ミラー反射率の変化、光学フィルタの実効透過率の変化等である。そのため、可能な限り、放射計全体としてのレスポンスを本測定の前後に実測しておくことが望ましい。このための模擬黒体として用意したのが写真 3.3 に矢印で示した石油缶である。これはエンジンオイルの $4\text{ }l$ 缶の表面を黒化(黒く塗装)したもので、黒化面は $24\text{ cm} \times 18\text{ cm}$ 底面は $10.5\text{ cm} \times 18\text{ cm}$ で、上部より熱湯または水を入れて熱源とする。内部の湯温とその表面温度は屋外の場合かなり差異を生じるので、表面温度は放射温度計で測定する必要がある。



写真 3.3 模擬黒体 (矢印で示す)
Photo 3.3 Supplemental black bodies (indicated with arrows)

3.4 実験用機材の概括

3.4.1 概説

実験機器のうち、極めて重要な機器については前節までに述べた。これ以外にも重要な機材または必要な機材があり、本節では既述のものを含め、それらについて述べる。主要な計測機器等は性能、仕様を付記するが、そうでないものは名称を挙げるにとどめる。機材のうち、計測機器は、放射計関係、電気測定関係、温度測定関係、及び測量関係に分類し、支援機材は、熱源関係、電源関係、計算・記録関係、緊急対策関係、及び搬送関係に分類する。なおケーブル類は省略した。

3.4.2 計測機器等

① 放射計関係

放射計本体(三脚を含む)	× 1	: △
		(△:仕様詳細は既述)
検知器 InSb	× 1	: △
PH-1 (8/21以後)	× 1	: △
PH-2 (")	× 1	: △
PH-3 (8/20以前)	× 1	: △
PH-4 (")	× 1	: △
HgCdTe-1	× 1	: △
HgCdTe-2	× 1	: 予備
光学フィルタ Aバンド用	× 1	: 4.73 ~ 5.04 μm
A'バンド用	× 1	: 4.7 ~ 5.4 μm
Cバンド用	× 1	: 7.56 ~ 8.18 μm
Dバンド用	× 1	: 10.4 ~ 13 μm
放射計フード	× 1	:
液体窒素容器(含N ₂)	× 1	: 5ℓ
窒素注入用具(カップ, ジョウゴ, 軍手)	× 1	:
イス(N ₂ 注入用台)	× 1	:
② 電気測定関係		
電気フィルタ(50W)	× 1	: NF, FV-624, 0.1Hz~200KHz, 24dB/Oct, fc可変型, 11kgr
シンクロスコープ(ディレイスコープ型, 120W)	× 1	: 岩崎通, SS8120, 3ch
同上用カメラアタッチメント	× 1	: ポラロイドカメラ用

同上用専用ポラロイドカメラ(含フィルム)	× 1	:
同上用専用台車	× 1	:
③ 温度・湿度測定関係		
赤外放射温度計(携帯型)	× 1	: 千野, IR-HP 2, 50°C-500°C, 0.2 ≤ ε ≤ 1.0
熱電対型温度計	× 1	: タケダ, TR 6824
同上用熱電対プローブ	× 2	: タケダ, TR 1101-130
低温用放射温度計(40 W)	× 1	: バーンズ, -20°C~60°C
同上用三脚, 表示器	× 1	
接触型面温度計	× 2	
乾湿温度計(含水容器, ジョーゴ)	× 1	
④ 測量関係		
長尺メジャー	× 1	
36mm用カメラ(含フィルム)	× 1	
露出計	× 1	
ポラロイドカメラ(含フィルム)	× 1	
地図	× 1	
分度器	× 1	
3.4.3 支援機材等		
① 熱源関係		
標準面黒体(含表示器)	× 1	: Δ, 120 W
模擬黒体(含予備)	× 4	: Δ
同上用熱湯運搬用バケツ	× 2	
“ “ ひしゃく	× 1	
“ 補修ラッカー Sprey	× 1	
照準用高温熱源セット	× 1	
(ラス, ラス容器, オプティマス, ゲルネン, ホエーブス)		
② 電源関係		
ガソリン運搬容器	× 1	: 10ℓ
発電発動機	× 1	: 800 W, AC 100 V
交流安定化器	× 2	
放射計モータ用 DC 安定化電源	× 1	: 400 V, Amax
コードリール(30m)	× 2	

テーブルタツプ(3m)	× 1	
テーブルタツプ(10m)	× 2	
" (20m)	× 2	
乾電池(各種機器用一式)	× 1	
テスター	× 1	: タケダ, TR 6824
③ 記録・計算関係		
ポケットコンピュータ	× 1	: カシオ
同上用プリンタ(テレコ含)	× 1	
電卓	× 1	
データシート	× 1	
事務用品	× 1	
④ 緊急対策関係		
雨天用品(レインコート, ビニールシート, ポリ袋)		
	× 1	
医薬品(やけど薬, バンソーコ, 他)	× 1	
故障修理用品(取扱説明書, ヒューズ等)		
	× 1	
⑤ 搬送関係		
レンタカー(バン)	× 1	: マツダファーゴ 2tmax, 5人max, 1600cc
同上用ロードマップ	× 1	
同上用三角反射板	× 1	
重量品キャリアー	× 1	
背負子	× 4	
機材収納用ダンボール箱	× 31	
収納点検表	× 1	
梱包用品(各種テープ類, 緩衝材)	× 1	
ロープ類	× 1	
作業用軍手	× 10	
サインペン	× 10	
懐中電灯	× 2	
工具類	× 1	

4. 実験の方法及び観測結果

4.1 近距離の噴気温度測定

昭和58年8月19日(金), 大涌谷甲地点で行った近距離噴気の測定方法と観測結果(直接的な生データ)は以下のとおりである.

4.1.1 実験方法

先ず, 噴気を目標として実験できる場所として, 模擬黒体に供給されるべき熱湯が付近で連続的に確保できる甲地点が選定された. 写真4.1に甲地点から20m離れたところにある目標としての噴気を示す. 同写真左側に同一距離に設置した模擬黒体が見える.



写真4.1 甲地点で測定した噴気(中央上向きの噴出孔の直上部分)とその左側に設置した模擬黒体

Photo 4.1 Target fume and a supplemental black body in short range observation (The fume ejects from a nozzle which opens upward at the center of photograph. The supplemental black body is setted on the left side of the nozzle.)

写真4.2はそれを放射計設置位置(甲地点)から見たもので, 右側に, 甲地点から6m離れた位置に設置した模擬黒体2個と標準黒体が見える. それらの前後位置を調節して, 写真4.3のように放射計の走査線上に1列に並ぶようにする. これらの照準合せを終えると, 次に模擬黒体に熱湯を注入し, 電気信号を観測しながら, 再度, 照準の微調節を行う.

正式測定を行う検知器, 光学フィルタ(波長バンド), 実験順序は次のとおりである.

- (1) Dバンド: HgCdTe-1 (PCタイプ)
- (2) Aバンド: InSb (PVタイプ)
- (3) Cバンド: HgCdTe-1 (PCタイプ)

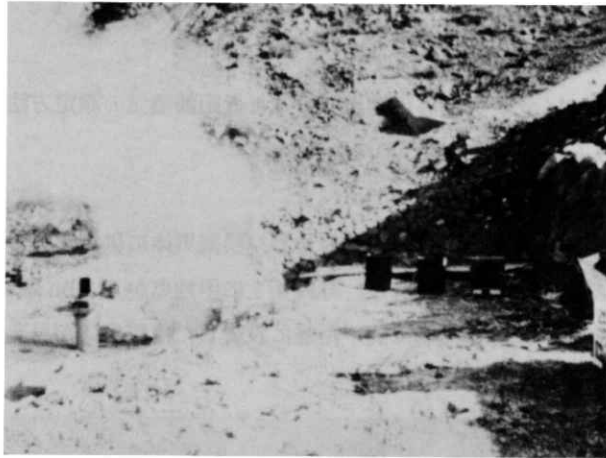


写真 4.2 放射計から見た(左側から順に)模擬黒体, 噴気, 模擬黒体(1対)及び標準黒体

Photo 4.2 Target fume and black bodies looking from the setting point of the radiometer in short range observation (from left to right, the 1st, 3rd and 4th are supplemental B.B., the 2nd is the fume and 5th is a standard B.B.)

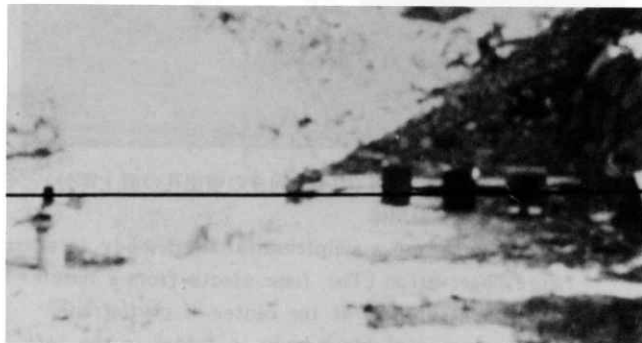


写真 4.3 甲地点放射計の走査線

Photo 4.3 Scan-line of the radiometer in short range observation.

(4) Aバンド: PH-4 (PCタイプ)

このように検知器が3種類の異なるタイプを順番に変えていかねばならないので, 電気測定系は次のような構造から成るプリアンプを用いて構成した.

図 4.1 は構成のブロック図である. PCタイプの検知器を使用するときは, 検知器からのコネクタをPC側入力に入れると共に, HgCdTe-1とPH1~4のバイアス電流が大幅に異なるためバイアス回路1,2を切り替える. 電気フィルタの入力コネクタも同時にPC側に差し替える必要がある. これらの差し替えを行う場合, プリアンプ電源を切る必要があり, プリ

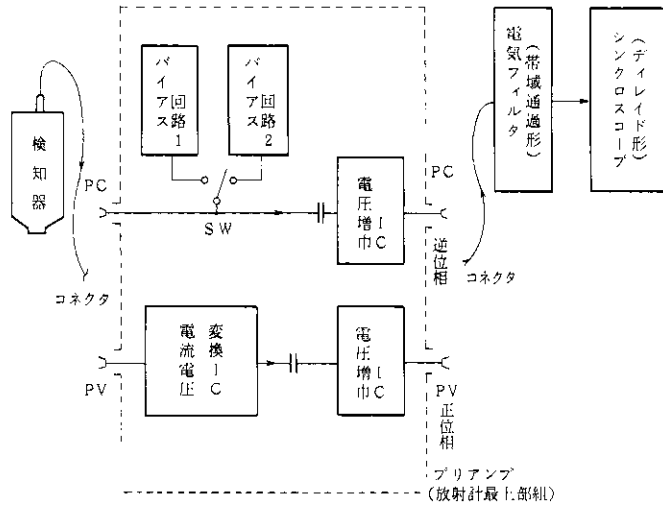


図 4.1 電気測定系の構成図
 Fig. 4.1 Block diagram of electric measuring system of the radiometer.

アンプ回路が非常に大きな時定数を有するため、電源ON-OFF後は1分間程度の緩和時間を置いて電気フィルタ、検知器のコネクタ接続を行う必要がある。この欠点は、回路が非常に広帯域で且つ低雑音設計となっていることと、電気フィルタの入力許容電圧が振幅で±3Vに制限されていることに拠る。

次に目標とする噴気の温度は熱電対型温度計で測定し、他の標準黒体、模擬黒体の表面温度は携帯型の放射温度計でその近傍において直読したものを採用する。これらの測温は電気測定の後に行うものとする。目標、目標近傍の模擬黒体、標準黒体、標準黒体近傍の模擬黒体B₁及びB₂のそれぞれの温度をT_s、T_m、T_{BB}、T_{B1}、T_{B2}とし、気温をT_a、相対湿度をH_aとする。

4.1.2 結果

(1) Dバンド：HgCdTe-1 (PC)

T_a = 30 °C, H_a = 60 %

T _m	T _s	T _{B1}	T _{B2}	T _{BB}
55 °C	103 °C	45 °C	40 °C	57 °C

T_sは熱電対温度計、その他は放射温度計による測定値

BPF : 0.1 Hz ~ 5 KHz

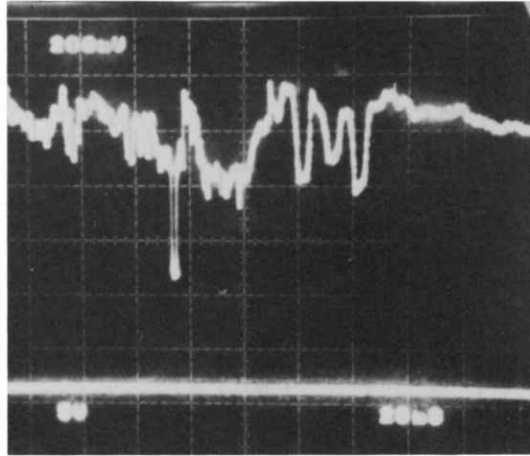


写真 4.4 出力電気信号波形(D : HgCdTe - 1 : 遠ピント)
 Photo 4.4 Wave form of output electric signals.
 (D : HgCdTe - 1 : far focussing)

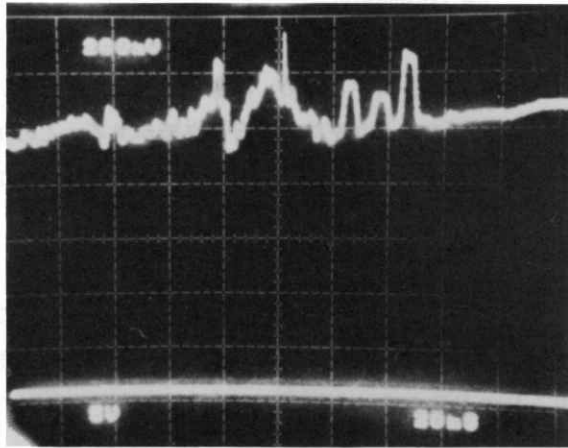


写真 4.5 出力電気信号波形(A : InSb : 遠ピント)
 Photo 4.5 Wave form of output electric signals.
 (A : InSb : far focussing)

(2) Aバンド : InSb (PV)

T_m	T_s	T_{B1}	T_{B2}	T_{BB}
51 °C	103 °C	44 °C	40 °C	57 °C

BPF : 0.1Hz ~ 5KHz

(3) Cバンド：HgCdTe-1 (PC)

T_m	T_s	T_{B1}	T_{B2}	T_{BB}
66 °C	104 °C	64 °C	63 °C	57 °C

BPF : 0.1 Hz ~ 5 KHz

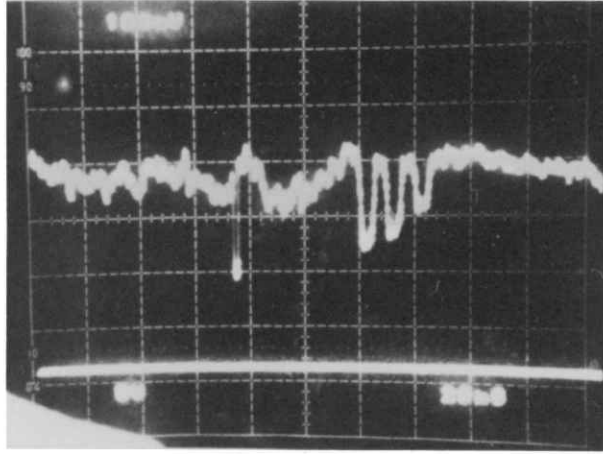


写真 4.6 出力電気信号波形 (C : HgCdTe-1 : 遠ピント)
 Photo 4.6 Wave form of output electric signals
 (C : HgCdTe-1 : far focussing)

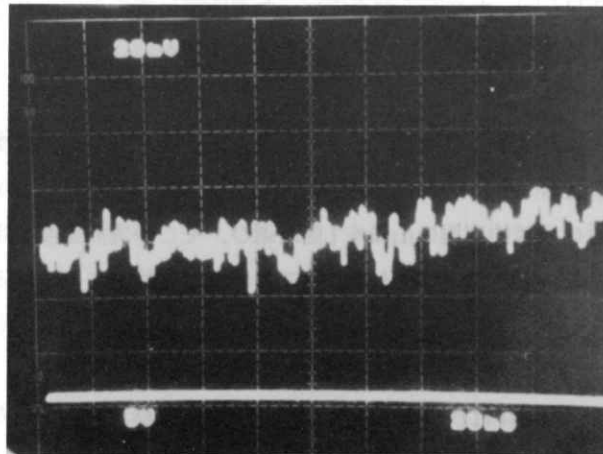


写真 4.7(a) 出力電気信号波形 (A : PH-4 : 遠ピント)
 Photo 4.7(a) Wave form of output electric signals.
 (A : PH-4 : far focussing)

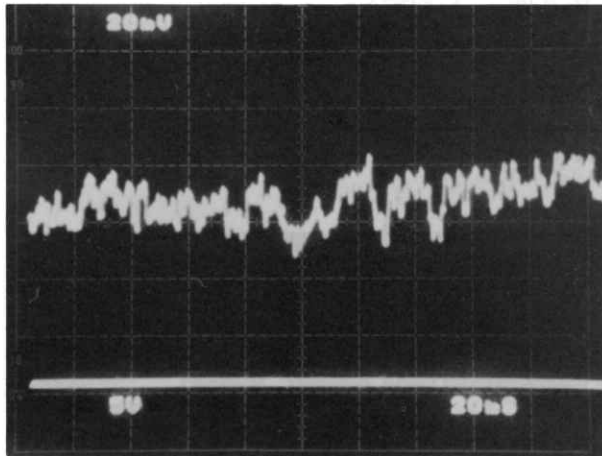


写真 4.7(b) 出力電気信号波形 (A : PH - 4 : 近ピント)
 Photo 4.7(b) Wave form of output electric signals.
 (A : PH - 4 : near focussing)

(4) Aバンド : InSb (PC)

T_m	T_s	T_{BI}	T_{B2}	T_{BB}
76.7 °C	106 °C	54 °C	49 °C	58 °C

BPF : 0.5Hz ~ 1KHz

4.2 遠距離目標の温度測定

昭和 58 年 8 月 20 日(土), 大涌谷乙地点で行った遠距離目標の測定方法と観察結果は, 以下のとおりである.

4.2.1 実験方法

実験方法は, 前途 4.1 の場合とほぼ同じであるが, 異なる点をあげれば次のとおりである.

- (1) 目標付近の模擬黒体を使用せず(瞬時視野の大きさの制限から, 用いたくても使用できないので), 付近の比較的高温の山肌を1箇所選び, その実測温度を用いた(T_m)こと.
- (2) 目標を多数個補捉できるが, 殆んどすべての場合, 直接アクセスすることが困難, かつ, 現地においては目標の確定(同定)が困難なため, 目標の実測温度(T_{si})は得られなかったこと.
- (3) 乙地点では, 標準黒体近傍に置く模擬黒体への温水補給がやや困難なので, 模擬黒体は使用しなかったこと.
- (4) 天候が曇後雨であったので, 実験に用いるバンド及び検知器を制限したこと. なお PH - 3, 4 は甲地点での測定の際結露を生じ, 使用不能となった為, 削除したこと. 正式測定を行った検知器, 光学フィルタ(波長バンド), 実験順序は次のとおりである.

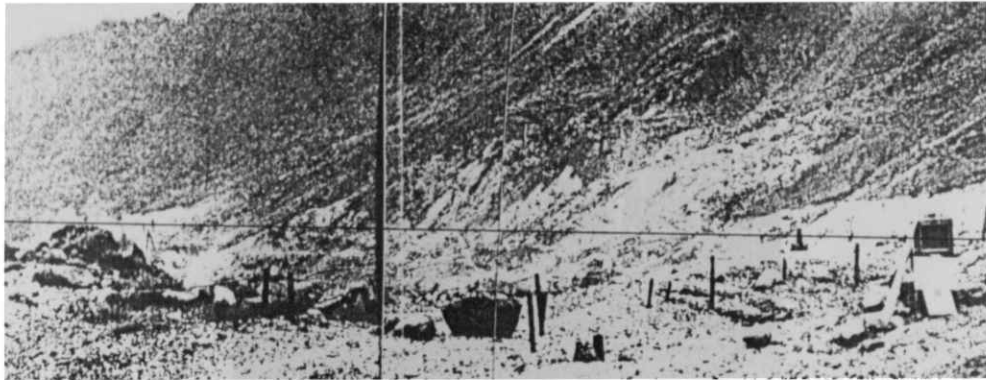


図 4.2 乙地点遠距離目標温度測定 of 放射計の走査線(図中の水平黒線で示す)
Fig.4.2 Scan-line of the radiometer in far range observation of target fumes
 (the scan-line is indicated as a black horizontal line).

- (1) Dバンド：HgCdTe - 1 (PCタイプ)
- (2) Aバンド：InSb (PVタイプ)

なお8月20日(土)においては、本地点(乙地点)から、間欠泉の吹き出した湯煙が見えるので、これは目標の1つに加えられた。

図4.2は本実験における放射計の走査線を示す。但し走査方向は左から右である。また、本図に用いた写真は8月22日(月)に撮影したものをを用いた。従って噴気の状態等は20日(土)とはかなり異なっている(例えば間欠泉の噴水は止っている)。20日(土)は実験中に降雨に遭遇し、写真撮影が不可能だったためである。

標準黒体と放射計との間の距離は6.7mである。また放射計の設置の際の俯角は11.2°とした。

4.2.2 結果

- (1) Dバンド：HgCdTe - 1 (PC)

$$T_a = 26 \text{ }^\circ\text{C}, \quad H_a = 69 \%$$

T_m	T_{BB}
33 ~ 34 $^\circ\text{C}$	61 $^\circ\text{C}$

BPF : 0.5Hz ~ 10KHz

- (2) Aバンド：InSb (PV)

T_m	T_{BB}
33 ~ 34 $^\circ\text{C}$	61 $^\circ\text{C}$

BPF : 0.5Hz ~ 10KHz

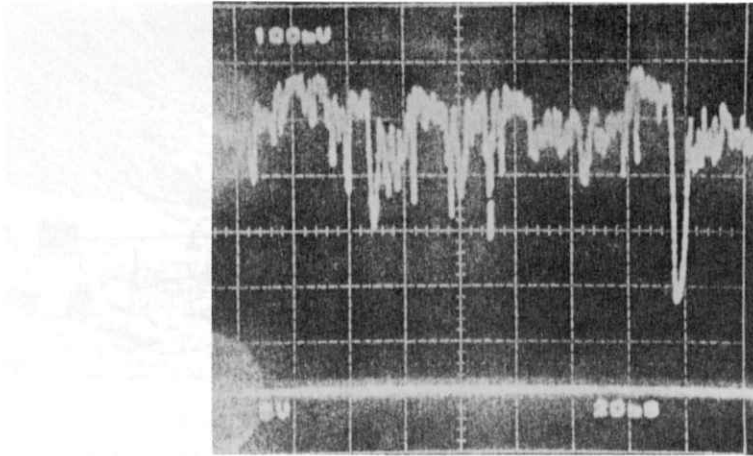


写真 4.8 出力電気信号波形 (D : HgCdTe : 遠ピント, 間欠泉の噴水が見えているとき)

Photo 4.8 Wave form of output electric signals.
(D : HgCdTe - 1 : far focussing, in the case of ejecting an intermittent hot spring)

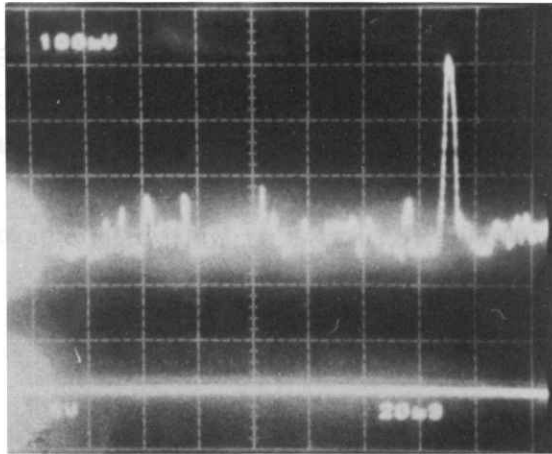


写真 4.9 出力電気信号波形 (A : InSb : 遠ピント, 間欠泉の噴水が見えているとき, 中央縦スケール線の直ぐ右にその信号が出ています)

Photo 4.9 Wave form of output electric signals.
(A : InSb : far focussing, in the case of ejecting an intermittent hot spring of which signal appears just right side of a vertical scale-line in the center of the photograph)

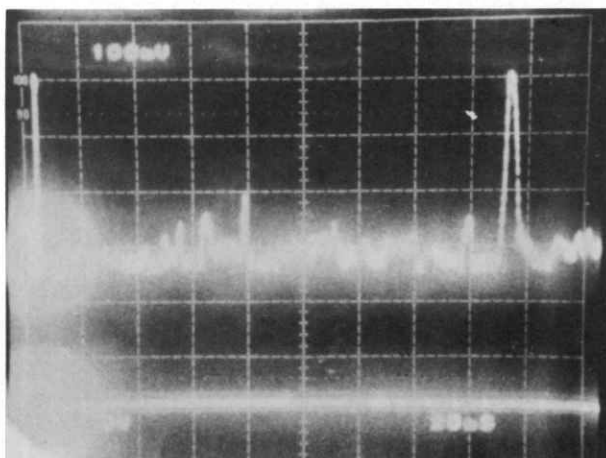


写真 4.10 出力電気信号波形(A : InSb : 遠ピント, 間欠泉の噴水が見えてないとき)

Photo 4.10 Wave form of output electric signals
(A : InSb : far focussing, in the case of setting an intermittent hot spring)

4.2.3 目標の同定

上記に述べた観測結果のうち、写真 4.8 および写真 4.9 に現われた信号の中から比較的振幅の大きいもので、かつ、共通して捕捉できているものを選び、図 4.2 の放射計から見た写真とを対応づけた結果を図 4.3 に示す。同図を中心にして、図 4.2 及び地図、その他の写真、メモより、目標位置を同定したのが、図 2.1 である。さらに目標の同定を行い、図 4.4 (特にその下の表)を得た。このうち、番号 10 ~ 15 は遠方のため、目標の種類は必ずしも明確でない。

4.3 検知器の液体窒素保持時間の測定

前述 4.1 で述べた大涌谷甲地点での測定に際し、検知器 PH-3, PH-4 が実験途中で結露を始め、実験続行不能となったため、8月21日(日)は筑波より携行の同型検知器 PH-1, PH-2 の真空度点検を、宿舎において雨天待機を兼ね行った。

その結果、PH-2 については、9 : 50 (AM) 注入開始、3 : 20 (PM) 残量少しで、結局 5 時間 30 分以上、で異常なし。PH-1 については、10 : 05 (AM) 注入開始、2 : 50 (PM) 残量少しで、結局 4 時間 55 分以上の液体窒素保持時間を有することを確認した。いずれの検知器も、その間、雨天にも拘らず、結露はみられなく、真空度に異常は見られなかった。なお、宿舎における室温は 30 °C であった。

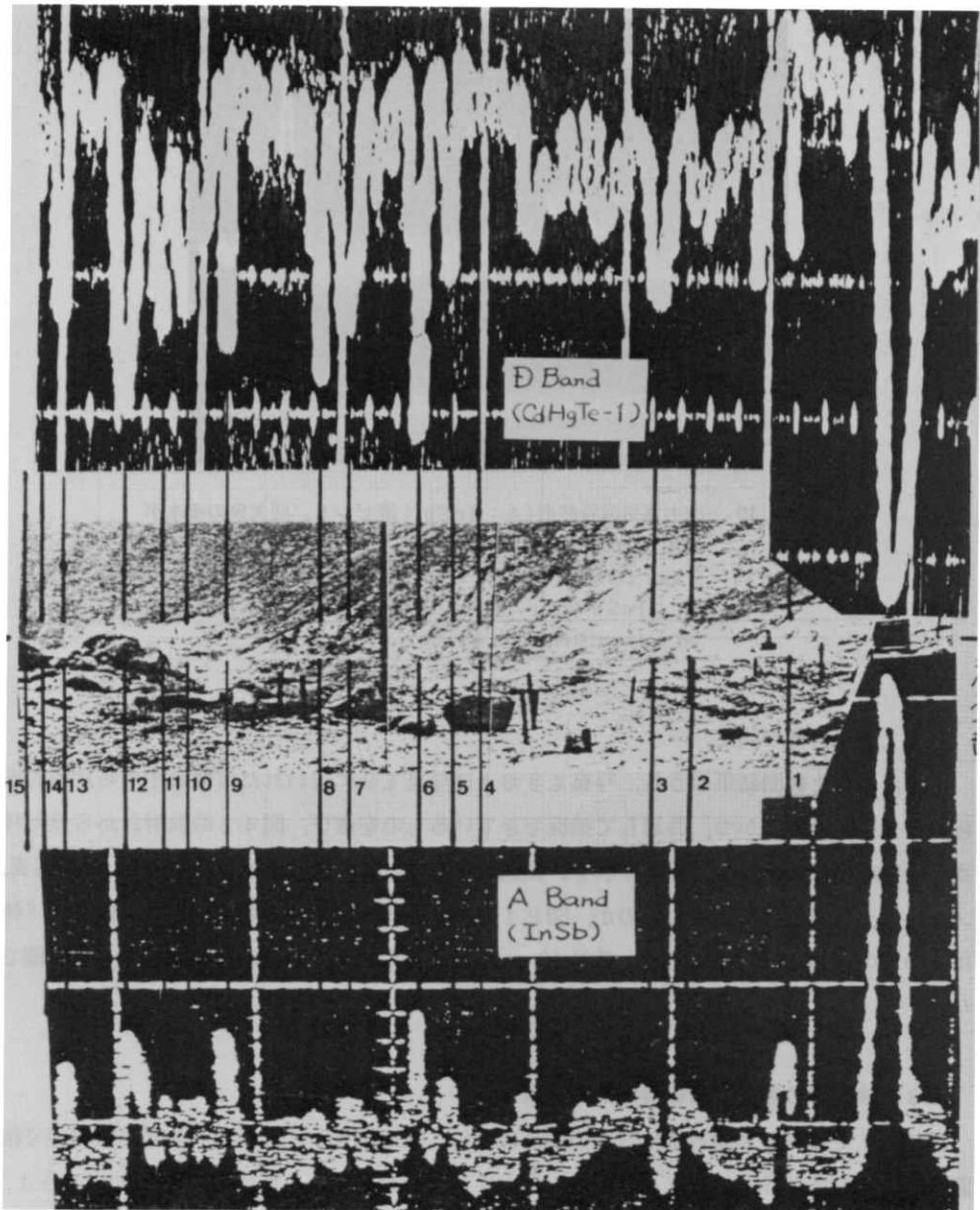


図 4.3 乙地点放射計の出力電気信号に対応する測定目標の位置
Fig. 4.3 Locations of measuring targets corresponding to the output electric signals of the radiometer in far range observation.

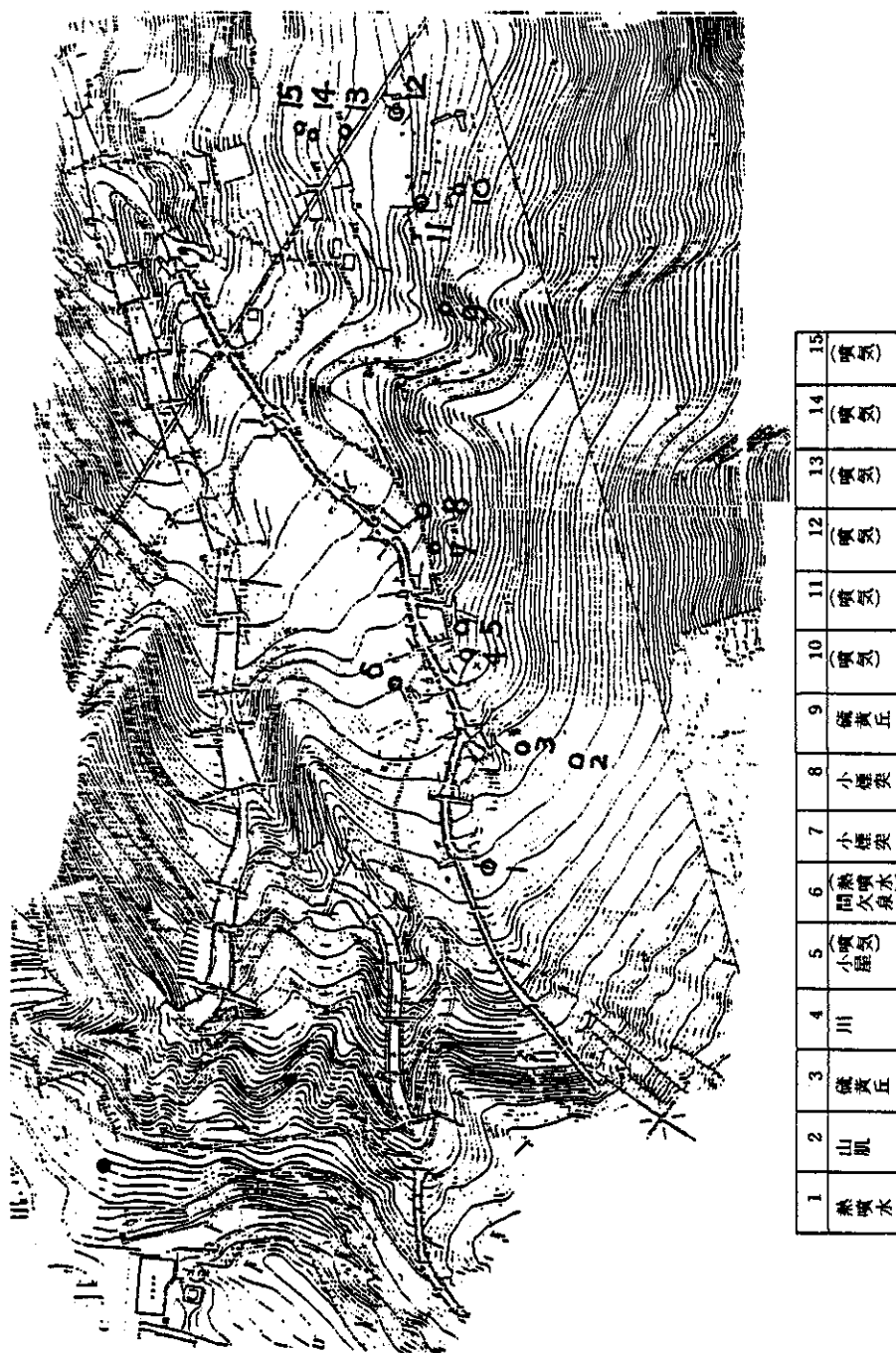


図 4.4 遠距離目標の位置とその種類

Fig. 4.4 Locations and types of the targets in far range observation.

4.4 遠距離目標の観測

昭和58年8月22日(月)午後より霧が去り始めたので、再び大涌谷乙地点にて行った標記観測の結果について述べる。ただし、検知器PH群が8月19日(金)甲地点で行った測定でS/N比が悪かった(結露以外にも)ため、本観測では単にS/N点検を行う意味で、Aバンド(InSb)との比較観測を行ったわけで、温度測定等を行わないものとする。

気温は22℃、相対湿度は91%、 T_{BB} は64～65℃であった。

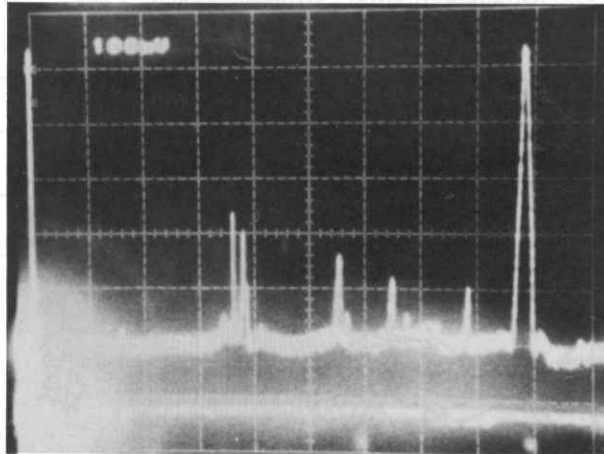


写真 4.11 出力電気信号波形(A : InSb : 遠ピント)
Photo 4.11 Wave form of output electric signals.
(A : InSb : far focussing)

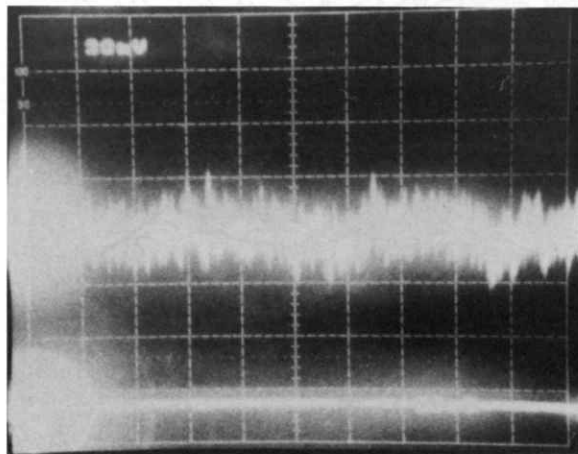


写真 4.12 出力電気信号波形(A : PH-1 : 遠ピント)
Photo 4.12 Wave form of output electric signals.
(A : PH-1 : far focussing)

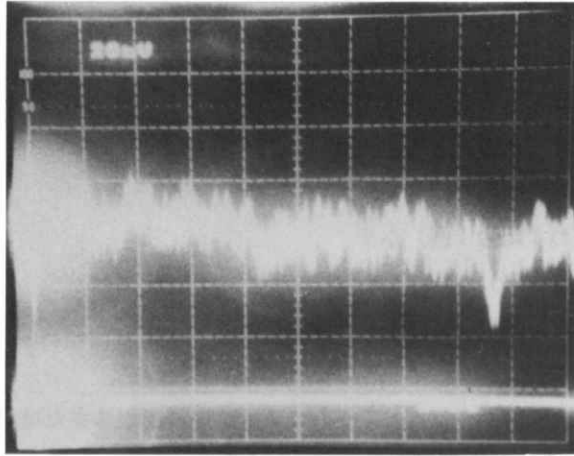


写真 4.13 出力電気信号波形(A : PH-2 : 遠ピント)
Photo 4.13 Wave form of output electric signals.
(A : PH-2 : far focussing)

5. 実験データの解析

5.1 解析手法

5.1.1 近距離噴気の温度測定法

昭和58年8月19日(金)大涌谷甲地点で実施した近距離の噴気温度測定に関する解析手法について述べる。

使用する記号は次のような定義によるものとする。(後述の5.1. の場合も同じ.)

N : 放射輝度 [W / sr, cm²]

V : 出力信号電圧 [V]

\bar{K} : 放射計の光学利得, 検知器のレスポンスビリティ, プリアンプ利得, 光学フィルタの透過率をすべて含めた測定系全体の変換率.

$$\bar{K} \equiv V / N. [V \cdot sr \cdot cm^2 / W]$$

τ : 大気の光路長に拠る透過率 [1]

M : 大気が黒体と見做せる程, 十分長距離に巨り見たときの大気の放射輝度 [W / sr · cm²]

ϵ : 放射率 [1]

T : 温度 [°C]

s : 目標であることを示すサフィクス.

m : 比較目標であることを示すサフィクス.

Bi : \bar{K} を実測するために設けた模擬黒体または目標を示すサフィクス.

x : 光路長 [m]

- X₀ : 大気圧を考慮した等価光路長 [m]
- \hat{T} : 計算結果として得られた温度 [°C]
- a : 周囲温度であることを示すサフィクス.
- BB : 標準黒体であることを示すサフィクス.
- B : 波長帯域を表わす記号: 例) A, C, D, A'バンド.
- Δ : 差を表わす記号: 例) ΔV
- H : 相対湿度 [%]

ただし、特に断らない限り、 ϵ は 1.0 と仮定しておく.

解析手順を次に示す.

- (1) 信号電圧または温度が有意な差を有する2つの模擬黒体または目標(温度および距離は既知とする)から \bar{K} を算出する.

$$\Delta V = \bar{K} \cdot \tau_{x1} N_{B1}(T_{B1}, x_1) - \bar{K} \tau_{x2} N_{B2}(T_{B2}, x_2)$$

より

$$\bar{K} = \frac{\Delta V}{\tau_{x1} N_{B1}(T_{B1}, x_1) - \tau_{x2} N_{B2}(T_{B2}, x_2)} \quad \dots\dots\dots (1)$$

- (2) 直接法

(2-1) 距離補正をしない場合(無補正)

$$N_s(\hat{T}_s) = \frac{V_s}{\bar{K}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

(2-2) 距離補正をする場合(補正)

$$N_s(\hat{T}_s) = \frac{1}{\bar{K} \cdot \tau_s} \{ V_s - (1 - \tau_s) \bar{K} M \} \quad \dots\dots\dots (3)$$

式(2), または(3)を用いて $N_s(\hat{T}_s)$ を求め、 \hat{T}_s を計算する.

- (3) 比演算法(噴気近傍の模擬黒体を m とする)

$$N_s(\hat{T}_s) = \frac{V_s - (1 - \tau_s) \bar{K} \cdot M}{V_m - (1 - \tau_m) \bar{K} \cdot M} N_m(T_m) \quad \dots\dots\dots (4)$$

式(4)を用いて、 $N_s(\hat{T}_s)$ を求め、 \hat{T}_s を計算する.

5.1.2 遠距離目標の温度測定法

昭和58年8月20日(土)大涌谷乙地点で実施した遠距離目標の温度測定に関する解析手法について述べる.

- (1) \bar{K} の値は前項5.1.1の方法と同様にして求める.

- (2) 直接法

前項5.1.1で述べた補正直接法式(3)を用い \hat{T}_s を計算する.

(3) 比演算法

この場合には、比較目標として図4.4の番号2の山肌を m とし、それ以外の目標はすべて s として計算するので、一般に距離が異なり、従って式(4)の代りに、次式を用いる。

$$N_s(\hat{T}_s) = \frac{\tau_m}{\tau_s} \cdot \frac{V_s - (1 - \tau_s) \bar{K} \cdot M}{V_m - (1 - \tau_m) \bar{K} \cdot M} N_m \dots\dots\dots (5)$$

5.2 解析結果

5.2.1 近距離噴気の温度測定結果(\hat{T}_s)(表5.1)

表 5.1 近距離噴気の温度測定結果(\hat{T}_s)

Table 5.1 Results of short range observation of volcanic fume temperatures (\hat{T}_s).

バンド	A			C	D
検知器	InSb	PH-4 (1回目)	PH-4 (2回目)	HgCdTe-1	HgCdTe-1
無補正直接法	41.8°C	67.1°C	25.5°C	59.9°C	57.5°C
		平均	46.3°C		
補正直接法	43.9°C	71.8°C	24.5°C	60.9°C	57.7°C
		平均	48.2°C		
比演算法	40.0°C	55.7°C	72.4°C	59.5°C	52.7°C
		平均	64.1°C		

5.2.2 遠距離目標の温度測定結果(\hat{T}_s) (表5.2)

表5.2 遠距離目標の温度測定結果(T_s)
Table 5.2 Results of far range observation of volcanic fume temperatures (T_s).

番号	X (m)	$X_{H_2O} = X(\frac{P}{P_0})_{H_2O}$ (m)	$X_{CO_2} = X(\frac{P}{P_0})_{CO_2}$ (m)	$\tau_{CO_2, A}$ バンド	$\tau_{CO_2, D}$ バンド	凝結水 (mm)	(Aバンド) τ_{H_2O} (26°C, 69%)	(Dバンド) τ_{H_2O} (26°C, 69%)	(Aバンド) $\tau = \tau_{H_2O} \tau_{CO_2}$	(Dバンド) τ	($\frac{A}{\ln S_b}$) \hat{T}_s	($\frac{D}{\ln S_b}$) \hat{T}_s
1	263.0	248	221	0.982	0.997	4.17	0.543	0.941	0.533	0.938	40.4	34.6
2	330.0	311	277	0.980	0.996	5.22	0.497	0.928	0.487	0.924	33.5	33.5
3	318.0	300	267	0.980	0.990	5.04	0.504	0.932	0.494	0.928	33.4	38.8
4	338.4	318	284	0.979	0.996	5.34	0.492	0.927	0.482	0.923	16.8	23.9
5	348.6	329	293	0.979	0.996	5.53	0.483	0.922	0.473	0.918	37.3	37.2
6	301.7	285	254	0.981	0.996	4.79	0.518	0.934	0.508	0.930	44.4	47.7
7	377.2	355	317	0.978	0.996	5.96	0.468	0.918	0.458	0.914	31.5	40.9
8	387.4	365	325	0.978	0.996	6.13	0.462	0.917	0.452	0.914	30.7	44.5
9	493.4	464	414	0.975	0.995	7.80	0.408	0.890	0.398	0.891	45.6	42.2
10	562.7	529	472	0.973	0.994	8.89	0.376	0.880	0.366	0.875	32.8	40.2
11	548.4	516	460	0.974	0.994	8.67	0.385	0.884	0.375	0.879	32.6	41.4
12	593.3	559	498	0.972	0.993	9.39	0.366	0.876	0.356	0.870	47.4	47.5
13	595.3	561	500	0.972	0.993	9.43	0.363	0.874	0.353	0.869	43.0	41.6
14	595.3	561	500	0.972	0.993	9.43	0.363	0.874	0.353	0.869	26.2	31.1
15	603.5	568	507	0.972	0.993	10.14	0.345	0.862	0.335	0.860	36.5	35.7
											補正 直接法	補正 直接法
											比 演算法	比 演算法

* 現地の湿度、気温データに基づき計算

** 海面上の高度に距離を加味して計算

6. 実験結果の評価

6.1 検知器実用性能の評価

ここでは、主にPHシリーズ検知器について述べる。本実験に先立ち京都工芸繊維大で行われた予備測定の結果から予想されたことであるが、 S/N 比が悪く、比較のために用いた検知器で得られた写真4.4～4.6と比べると、写真4.7(PH-4)の場合は10倍程度以上信号が弱いことがわかる。これは本文3.1.1項の表(検知面積の欄)を参照して明らかなように、他の検知器と比べて素子面積が $1/40$ 程度であり、そのために素子の電気雑音とコンパラブルとなってしまっていると考えられる。即ち、本検知器はこの実験に使用した走査型広帯域タイプの放射計には向いていないということである。摂氏数百度程度の高温度対象には、特に支障は無いけれども、数十度レベルの対象にはやや困難である。

以下に対策として考えられる点を列記する。

- (1) 本実験で使用した放射計の光学利得より高い利得を有する放射計を設計すること：

使用した放射計のFナンバー(実効値)は約6.0であり、集光効率が悪い。従って、例えば、Fナンバー(実効値)が約2.0程度の放射計ならば、検知器素子に入射する赤外線パワーは現状より9.0倍増加し、 S/N の増加が可能である。

- (2) 放射計の構造をチョッピング方式にし、現状の走査速度より遅い速度のものを設計すること：

使用した放射計の場合、プリアンプが0.1Hz～100KHzと非常に広帯域である。広帯域特性と低雑音特性とは相入れない特性であり、本実験のような場合、BPFで f_{CH} を1KHz位まで狭帯域に選び、雑音を低減させてみた。これ以上上げると信号の形状が変化し、分解能が大幅に低下してしまうので、これ以上は困難である。従って走査速度をもっと遅くすればよい訳であるが、これ以上に低周波通過特性を有するプリアンプを設計すれば、応答速度が異常に長くなり、電源スイッチのON-OFF後、数分以上、待たなくてはならず、実用性に欠ける。従って、チョッピング方式と超狭帯域トラッキングフィルタ(ロックインアンプ)方式の併用を計り乍ら、低走査速度方式の放射計を設計することができれば、そのような欠点がある程度避けられるであろう。

6.2 測定方法の評価

- (1) 近距離の噴気測定結果(5.2.1項)から判断すると、噴気に関しては、AまたはCバンドが一般に高い温度を検出しており、適しているようである。なお、AバンドのInSbの場合、40℃前後とかなり低い温度を示しているが、これはこのときの噴気に最も近い比較目標 T_m の実測温度が、目標の寸法が放射計の視野に対して、十分な大きさでなかったため、うまく測定できなかったことが主な原因であり、例えば、PH-4の1回目のように十分高温度で測定できているのでバンドそのものに影響されたものではないと考

えられる。

どのバンドも 50～60℃程度で T_s の実測温度 100℃とかけ離れているように見えるが、これは噴気の中心部の温度であって、周囲部分の気温近くに冷却された噴気との合成温度を測定すべきところを中心部だけの実測温度のみを比較する結果生じることであって、妥当な結果であると考えられる。

比演算法による結果は、直接法による結果とほぼ一致しており、比演算法の妥当性を示している。

- (2) 遠距離目標の温度測定結果(5.2.2項)については、両法の結果がよく一致している。このことは、本実験のように距離測定がかなり正確に行え、且、温度及び湿度がかなり正確に推定できるような場合、いわば当然の帰結であり、比演算法の有効性を実証するものである。

距離、温度及び湿度が未知であるような一般の条件下では、直接法による結果は数十度以上の誤差を与えることは、データ処理を少しでもして見れば容易にわかることである。

参 考 文 献

- 1) 竹村孝爾・堤捨男(1984):「噴煙・噴気等の温度のリモートセンシング」照明学会光放射の応用関連計測研究会資料, AR84-18.
- 2) 堤捨男・板倉安正・竹村孝爾(1980):「噴煙・噴気温度リモートセンシング」赤外線技術研究会資料, No.101.
- 3) 堤捨男・竹村孝爾・板倉安正(1980):「温度のリモートセンサの装置設計」赤外線技術研究会資料, No.103-1.
- 4) 堤捨男・竹村孝爾・板倉安正(1986):「比演算法による噴気および噴気孔の温度の遠隔測定の結果」電気学会光応用・視覚研究会資料, LAV-81-5.
- 5) 植原茂次・熊谷貞治・高橋博・高橋末雄・幾志新吉・矢崎 忍・田中 厚・北村慎一(1984):「火山専用空中赤外映像装置の開発研究(第1報)」国立防災科学技術センター研究速報, 62.
- 6) 植原茂次・熊谷貞治・高橋 博・高橋末雄・幾志新吉・矢崎 忍・田中 厚・北村慎一(1984):「火山専用空中赤外映像装置の開発研究(第2報)」国立防災科学技術センター研究速報, 63.

(1986年7月23日 原稿受理)