火山専用空中赤外映像装置の開発研究（第３報）

著者	植原 茂次，熊谷 貞治，高橋 博，高橋 未雄，幾志 新吉，矢崎 忍，田中 厚，北村 慎一
雑誌名	国立防災科学技術センター研究速報
号	70
ページ	1-48
発行年	1985-09-20
URL	http://id.nii.ac.jp/1625/00002807/

火山専用空中赤外映像装置の開発研究（第３報）

植原茂次[*]・熊谷貞治[*]・高橋　博[**]・高橋未雄[***]・
幾志新吉[****]・矢崎　忍[****]・田中　厚[+]・北村慎一[++]
国立防災科学技術センター

Developmental Study of a New Airborne Multi-spectral Scanner System Specifically Oriented to Thermal Observation of Volcanoes (Third Report)

By
S. Uehara, T. Kumagai, H. Takahashi, M. Takahashi, S. Kishi and S. Yazaki
National Research Center for Disaster Prevention, Japan
And
A. Tanaka and S. Kitamura
FUJITSU LIMITED, Japan

Abstract

This report describes a developmental study of a new optical fiber system to be used for five visible and near infrared channels in a new airborne MSS (multi-spectral scanner system) which is planned to detect detailed thermal conditions on the surface of volcano bodies as mentioned in the previous report (NRCDP Research Notes No.62 in 1984).

The study covers design, trial manufacturing, experiment and evaluation of the optical transmissivity of the new fiber system.

As a result, the specified transmissivity for each channel of the optical fiber system with five visible and near infrared bands was satisfactorily secured.

The main features of the study are as follows:

1. The optical fiber system consists of the three parts; the first is a light incidence component from which the focused light through scanning and converging mirrors is taken into the five channels; the second is a light transmission component for each channel which is formed from line of a banded component optical fibers, and the third is a light focussing and detecting component for each channel which is composed of a series of two lenses, a band-pass filter and a detector.
2. To ensure full transmission of the light at an incidence angle of 58.2°, a multi-component optical fiber of 50 μm diameter, 50 cm length and 0.57 NA (Numerical Aperture) has been adopted.

[*] 第３研究部，[**] 所長，[***] 第２研究部，[****] 第４研究部，
[+] 富士通株式会社特機システム事業部技術部，[++] 富士通株式会社宇宙開発推進室

3. On the focal plane of the light incidence component; five square shaped sections of fiber bundle are arrayed linearly corresponding to each of the five visible and near infrared bands and the cross sectional area and the shape of fiber bundle has been adapted to IFOV (instanteneous field of view = 1.5mrd) and the size of detector element ($150\,\mu m^{\square}$) in order to secure the best S/N ratio.
4. The transmissivity experiment on each channel of the optical fiber system was conducted by using a spectroscope and a standard spectrophotometer, and the synthetic transmissivity of each part of the system was evaluated in the following way.
   (1) Synthetic transmissivity of the light focussing component of each channel: $\bar{S}a$ was caluculated from determined transmissivities of lenses and band-pass filter.
   (2) Synthetic transmissivity to each channel of the optical fiber system: $\bar{T}a$ was calculated from the determined spectral transmissivity of the channel.
   (3) Transmissivity to optical fiber bundle of each channel: $\bar{U}a$ is calulated as follow.

$$\bar{U}_a = \bar{T}_a / \bar{S}_a$$

5. As a consequence, the following results were obtained.

Channel No.	band	$\bar{T}_a$ (%)	$\bar{U}_a$ (%)	
		determined	specified	
1	400-500	29.1	25.0	45.0
2	500-600	30.2*	30.0	43.1*
3	600-700	54.6	29.0	73.5
4	700-800	55.5	28.0	73.4
5	800-1000	39.1*	27.0	51.4*

*these figures were affected by one of the 9 banded fibers breaking.
Thus, the results comply fully with the given specification if no fibers break.

6. Preventive measures against fibers breaking are as follows.
   (1) Improvement of the technique for manufacturing thin fiber bundles.
   (2) Making a firm holding structure for the optical fiber system so as not to put any stresses on it.
   (3) Converting the bundle of 9 thin fibers $50\,\mu m\phi$ to a thick fiber $150\,\mu m\phi$.

目　次

まえがき …… 3
第Ⅴ編　火山専用空中赤外映像装置のＭＳＳ部
　　光ファイバ光学系の設計・試作・試験
1. 設計 …… 4
　1.1 構想 …… 4
　　1.1.1 基本構想 …… 5
　　1.1.2 従来の光学系との比較 …… 6
　1.2 設計仕様 …… 7
　1.3 光学設計 …… 9
　　1.3.1 ファイバ部設計 …… 9

1.3.2 レンズ系の設計 …… 13
1.4 構造設計 …… 14
1.4.1 ヘッド部 …… 14
1.4.2 集光検知部 …… 15
1.5 電気設計 …… 15
1.5.1 検知素子寸法 …… 15
1.5.2 可視検知器の選定 …… 15
2. 試作 …… 16
2.1 構造 …… 16
2.2 光学仕様 …… 16
2.3 試作品 …… 16
3. 試験 …… 21
3.1 目的 …… 21
3.2 試験内容 …… 21
3.3 試験方法 …… 22
3.3.1 集光部の平均透過率($\bar{S}a$) …… 22
3.3.2 検知部の分光感度($Da(\lambda)$) …… 22
3.3.3 ヘッド部に光を集光した時の検知部の分光感度($D\acute{a}(\lambda)$) …… 23
3.3.4 ヘッド部～集光部間の分光透過率($Ta(\lambda)$) …… 25
3.3.5 ヘッド部～集光部間の平均透過率($\bar{T}a$) …… 25
3.3.6 ファイバ部の平均透過率($\bar{U}a$)… 27
4. 試験結果 …… 28
4.1 集光部の平均透過率($\bar{S}a$) …… 28
4.2 検知部の分光感度($Da(\lambda)$) …… 28
4.3 ヘッド部に光を集光した時の検知部の分光感度($D'a(\lambda)$) …… 35
4.4 ヘッド部～集光部間の分光透過率($Ta(\lambda)$) …… 42
4.5 ヘッド部～集光部間の平均透過率($\bar{T}a$) …… 42
4.6 ファイバ部の平均透過率($\bar{U}a$) …… 42
5. 評価 …… 42
6. まとめ …… 47

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)で報告した．航空機搭載ＭＳＳ部の詳細設計の内，可視近赤外部の光学系を，簡素化し改善するために，光ファイバ光学系に置換することを目的として，その設計・試作・試験を行い，技術的可能性を評価したものである．

ＭＳＳ部の詳細設計では，可視近赤外の光学系は，アフトオプティックとして，ダイクロイックミラ，リレーレンズ，集光レンズ，反射鏡，フィルタを組み合わせて，5バンドの分光チャンネルを形成することにしたが，このような複雑な光学系は，製造技術上から困難な点もあり，航空機搭載機器という面からみても，構造の簡素化，重量の軽減が望ましいと考えられた．

最近開発され実用化の進んでいる光ファイバに関する技術の適用は，上述の問題を解決するものと期待されたが，この種の光学系への利用について技術的経験がないため，設計・試作・試験を行い，その性能を確認すると共に，製造技術の確立を図るための研究を実施したものである．

本研究の実施は，第1報，第2報と同じく，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の審査・検討の下に，富士通株式会社の協力を得て行われた．

委員長，専門委員　加茂幸介　　京都大学防災研究所教授，桜島観測所所長
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

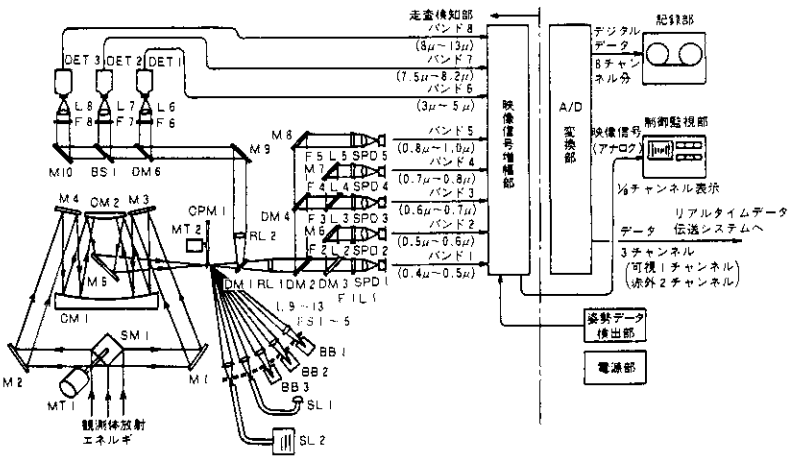
職　員　　所　　長　高橋　博
第３研究部　植原茂次，熊谷貞治
第２研究部　高橋末雄
第４研究部　幾志新吉，矢崎　忍

第Ⅴ編　火山専用空中赤外映像装置のＭＳＳ部光ファイバ光学系の設計・試作・試験

1.　設計

1.1　構想

航空機搭載ＭＳＳ部の詳細設計(第１報)においては，火山専用空中赤外映像装置の光学系は，図1.1に示すように可視近赤外域ともミラー，レンズ，フィルタの組合せを基本とし，所期の性能を得る見通しを得ている．しかし，本装置に要求される透過波長バンドは８バンドと従来の同種装置に比べて多いため，光学系が複雑かつ大規模なものとなり，航空機搭載機器として見た場合，装置の重量・寸法を低減する必要性があり，また，このような光学系を



SM 1	：走査鏡	DET 1～3	：赤外検知器
M 1～10	：反射鏡	MT 1～2	：モータ
CM 1～2	：集光鏡	CPM 1	：チョッパミラー
DM 1～6	：ダイクロイックミラー	BS 1	：ビームスプリッタ
RL 1～2	：リレーレンズ	BB 1～3	：ブラックボディー
F 1～8	：光学フィルタ	SL 1	：スカイライト集光系
L 1～13	：集光レンズ	SL 2	：標準光源
SPD 1～5	：SiPINダイオード	FS 1～5	：フィールドストップ

図 1.1　火山専用空中赤外映像装置系統図（従来方式）

Fig. 1.1　Functional diagram of planned MSS indicated in the first report (NR-CDP Research Note No.62 pp.31, Fig.4.2)

まとめ上げる製造技術面からも，今後解決すべき問題点も少なからず予想された．

以上から，光学系の簡素化という方向で継続的に検討を行って来た．

1.1.1　基本構想

簡素化の検討は，バンド数が多い(5バンド)可視近赤外域について重点的に行った．その結果，近年製造技術が安定し，産業，医用に実用され始めた光ファイバのバンドル(製品名イメージガイド，図1.2に示す)を検知端面として利用することとし，この検知端面を5バンドに対応して5チャンネル用意し，これをリニアアレイとして並べたものを集光系の結像点

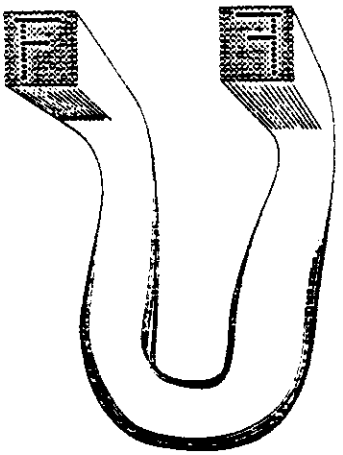


図1.2　イメージガイド概念

Fig. 1.2　Illustrated image guide

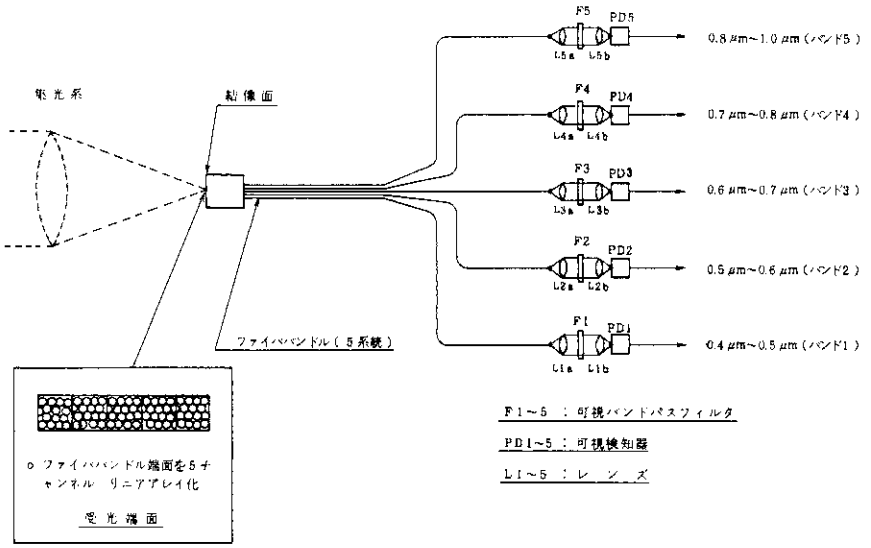


図1.3　可視・近赤外光ファイバ光学系基本構成

Fig. 1.3　Optical fiber system with 5 visible and near infrared bands.

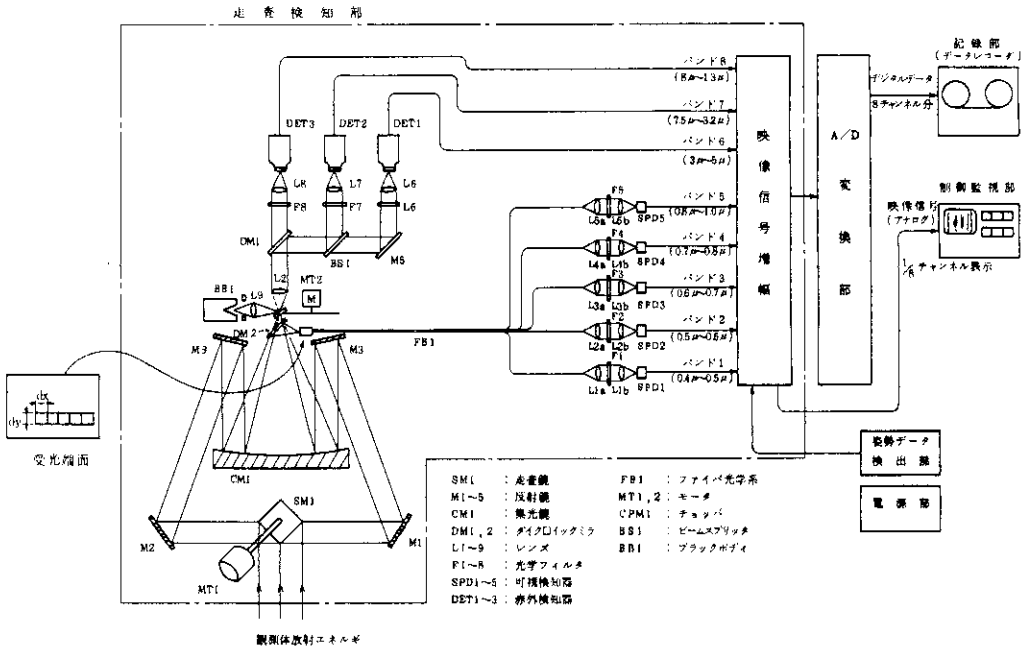


図 1.4　火山専用空中赤外映像装置（新方式）

Fig. 1.4　Functional diagram of improved MSS by introducing a optical fiber system.

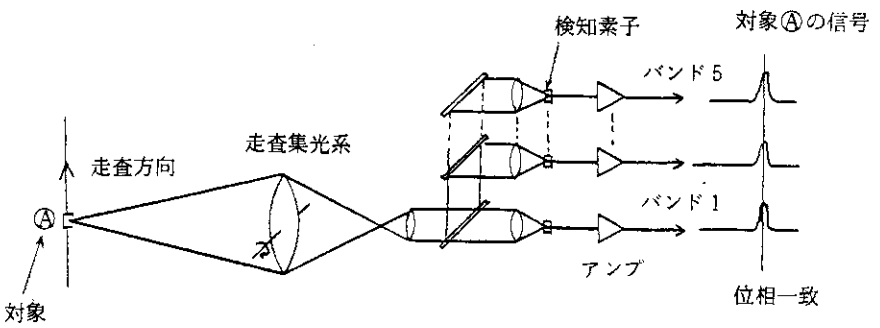


図 1.5　従来の可視・近赤外光学系統

Fig. 1.5　Functional diagram of former optical system with 5 visible and near infrared bands.

(焦点面)に置くことにより，図1.3に示すようにリレー，分光系が簡易な構造で得られる見通しを得た．

図1.4に，この光ファイバ光学系を組込んだ火山専用空中赤外映像装置の系統図を示す．

1.1.2　従来の光学系との比較

従来の光学系は，図1.5に示すように光軸上の1絵素に入る光を5波長に分けてこれらを

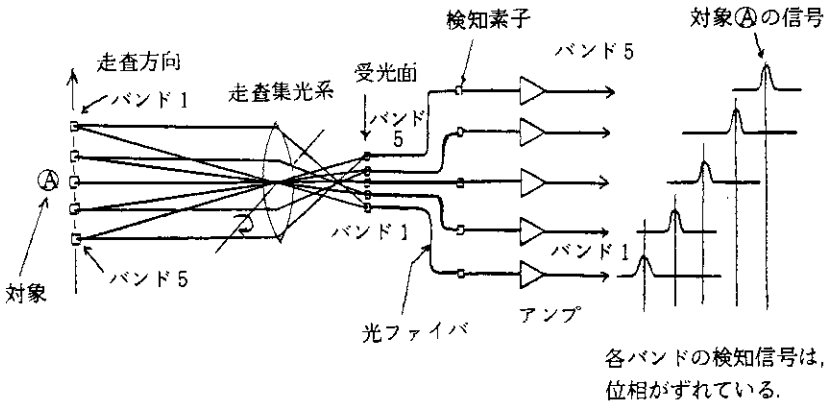


図1.6 光ファイバ化可視・近赤外光学系統

Fig. 1.6 Functional diagram of improved optical system with 5 visible and near infrared bands by introducing optical fiber.

同時に検知していた.

これに対しファイバ光学系では,図1.6に示すように焦点面に並んだ5絵素(5バンド相当)に同時に入る光を検知する.

このため,信号処理の段階で,データの位相をずらし絵素を一致させる必要がある.このような位相処理は,方式のアナログ,デジタルを問わず,現在の電子回路技術では実施上の問題点はない.

1.2 設計仕様

従来方式の光学系に光ファイバ光学系を導入するに当っての前提条件は,瞬時視野およびS/Nの確保である.

瞬時視野の確保のためには,各バンドの光入力端面を,これまで設計した検知素子サイズと同一とするか端面サイズに応じて,光学系の総合焦点距離を調整する.

また,S/N比の確保のためには,検知素子に入射する光パワーを従来と同水準に保つ必要があり,そのため,光学系の中で置換する部分の透過率を同等以上確保することを目標とする.

表1.1に従来の光学系の平均透過率を示す.

光学系は大別して走査集光部とアフトオプティックから成るが,この中で光ファイバ光学系と置換される部分はアフトオプティックである.従って,光ファイバ光学系の各バンド平均透過率は,表1.1のアフトオプティック平均透過率の値を目標とする.

表1.2に設計仕様を一覧にして示す.

コンポーネント＼バンド		バンド1 0.4～0.5μm	バンド2 0.5～0.6μm	バンド3 0.6～0.7μm	バンド4 0.7～0.8μm	バンド5 0.8～1.0μm	備考
走査鏡	SM1	0.8	同左	同左	同左	同左	走査
反射鏡	M1-5	0.86	〃	〃	〃	〃	集光部
集光鏡	CM1,2	0.86	〃	〃	〃	〃	
走査集合部総合		0.59	〃	〃	〃	〃	
ダイクロイックミラ	DM1	0.7	0.77	0.81	0.8	0.7	
〃	DM2	0.9	0.9	0.9	0.95	0.95	アフトオプティック
〃	DM3	0.8	0.	—	—	—	
〃	DM4	—	—	0.9	0.9	0.9	
〃	DM5	—	—	0.9	0.9	—	
リレーレンズ	RL1	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	
集光レンズ	L1	0.83	—	—	—	—	
〃	L2	—	0.83	—	—	—	
〃	L3	—	—	0.83	—	—	
〃	L4	—	—	—	0.83	—	
〃	L5	—	—	—	—	0.83	
反射鏡	M6	—	0.9	—	—	—	
〃	M7	—	—	—	0.9	—	
〃	M8	—	—	—	—	0.9	
フィルタ	F1	0.8	—	—	—	—	
〃	F2	—	0.8	—	—	—	
〃	F3	—	—	0.8	—	—	
〃	F4	—	—	—	0.8	—	
〃	F5	—	—	—	—	0.8	
アフトオプティック総合		0.25	0.30	0.29	0.28	0.27	
光学系総合		0.15	0.17	0.17	0.16	0.16	光学系総合

表 1.1 平均透過率（従来光学系）*

Table 1.1 Transmissivity of each optical component and synthetic transmissivity in each spectral band of planned MSS indicated in the first report (NR-CDP Research Note No. 62 pp.35 Table 4.3)

* 第1報(国立防災科学技術センター研究速報 第62号), pp.35. 表4.3 光学コンポーネントの透過率

項目	仕様	備考
チャンネル数	5チャンネル	バンド1～5に対応
透過波長	バンド1 ： 0.4 ～ 0.5 μm 〃 2 ： 0.5 ～ 0.6 μm 〃 3 ： 0.6 ～ 0.7 μm 〃 4 ： 0.7 ～ 0.8 μm 〃 5 ： 0.8 ～ 1.0 μm	
光入力端面形状	瞬時視野角 1.5 mrad, 及び検知素子サイズを考慮して決定	
光ファイバー	○構造 ： 光入力端面形状と適合した断面構造とする。 ○長さ ： 0.5m ±0.1m	ファイババンドル
フィルタ	各バンドに適合した分光フィルタ	
総合平均透過率	バンド1 ≧ 0.25 〃 2 ≧ 0.30 〃 3 ≧ 0.29 〃 4 ≧ 0.28 〃 5 ≧ 0.27	
検知器	○種類 ： Si フォトダイオード ○ディテクティビティ D_λ^* ($cm \cdot Hz^{\frac{1}{2}} \cdot W^{-1}$) D^* 1.0 μm (100Hz) ≧ 0.6×10^{12} D^* 0.8 μm (100Hz) ≧ 2.0×10^{12} D^* 0.4 μm (100Hz) ≧ 0.2×10^{12} ○素子サイズ ： 光学系仕様を勘案し、適切なサイズを選定する。	

表 1.2 光ファイバ光学系設計仕様

Table 1.2 Specifications for the design of optical fiber system.

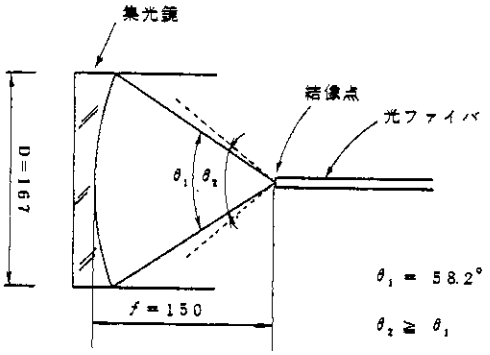


図1.7 光ファイバの入射部と受光角度
Fig. 1.7 Light incidence part and incidence angle of optical fiber

1.3 光学設計

光学設計は使用するファイバの設計と，ファイバより出射する光の集光を行うレンズ部および，フィルタの設計から成る．

1.3.1 ファイバ部設計

1）入射部

ファイバの入射部は，図1.7で示すようにF値($F = f / D = \frac{150}{167} = 0.9$)が0.9の集光鏡により集光された全光パワーを効率よく受光する必要があり，従って，図1.7において，光ファイバの有効受光角度(視野角)θ_2は集光鏡により集光された光パワーが，結像点に対して張る角度θ_1より大きくなければならない．

$\theta_1 = 58.2^\circ$であるから$\theta_2 \geqq 58.2^\circ$となり，この条件を満たすファイバ素線(単繊維)を使用

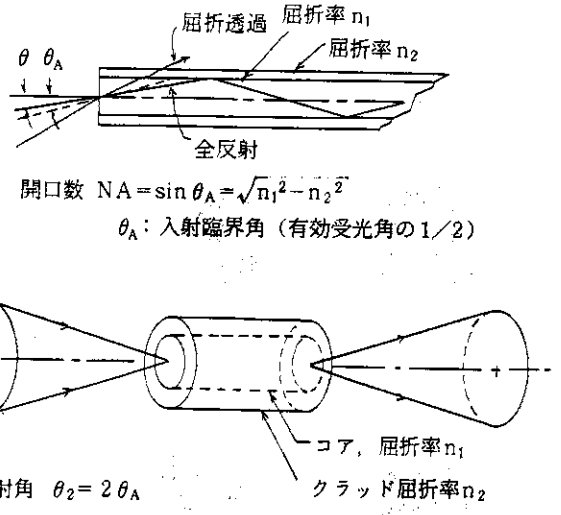


図1.8 開口数NAと有効入射角
Fig. 1.8 Numerical Apperture (NA) and effective incidence angle of optical fiber.

する.

2）ファイバ素線の選択

光は屈折率の異なった2つの媒体中を通過するとき，その境界面で屈折するが，臨界角より小さい角度で入射する光は全反射する.

光ファイバは，このように臨界角より小さい角度で入射した光の全反射を利用して光を伝搬しているため，有効入射角 θ_2 は図1.8に示すように臨界角 θ_A の2倍となる.

さて，光ファイバの入射角特性は，通常，開口数NA（Numerical apperture）により定義され，これは臨界角 θ_A，ファイバのコア屈折率 n_1 およびクラッド屈折率 n_2 から，式（1.1）のごとく定義される.

$$NA = \sin\theta_A = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \qquad (1.1)$$

従って，ファイバのNA値選択に当っては，前述のごとく

$$\text{有効入射角 } \theta_2 = 2\,\theta_A \qquad (1.2)$$

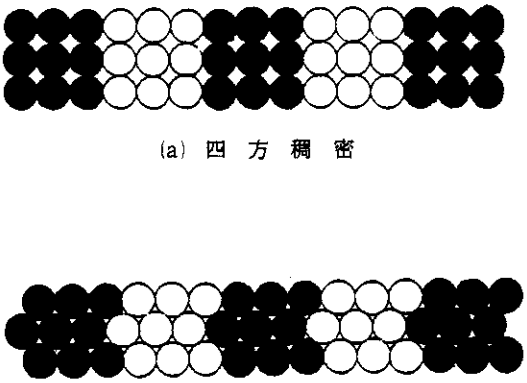
という関係から式（1.1）を用いて

$$\theta_2 = 2\,\theta_A = 2\,\sin^{-1}NA \qquad (1.3)$$

を満たすNA値を有すファイバを選択することになる.

以上の条件をもとに，製造実績等を加味して調査の結果，多成分系ファイバ(注)のNA= 0.57のものを採用することにした．このファイバは，式（1.3）より有効入射角 θ_2 は

$$\theta_2 = 2\,\sin^{-1}0.57 = 70^\circ \qquad (1.4)$$



(a) 四 方 稠 密

(b) 六 方 稠 密

図1.9　ファイバのバンドル化
Fig. 1.9　Banding types of fibers.

が得られ，先述の条件$\theta_2 > 58.2°$を十分に満たすものである．

（注１） 光ファイバの代表的なものには多成分系ファイバと石英系ファイバとがある．

多成分系ファイバは，主要ガラス材料としてSiO_2を用い，これにBaO_3，Na_2O, CaOなどを混合したもので，SiO_2は重量比で50～60%含まれている．

このファイバは，コア，クラッドの屈折率のバランスから比較的NAの値が大きい．例えば，NA＝0.57程度の値が実現可能であり，有効入射角に換算すると70°となる．

石英系ファイバは，主要ガラス材料としてSiO_2を用い，ドープ剤(屈折率制御用剤)としてGeO_2等を重量比で10～15%含んだものであり，これは比較的NAの値が小さい．例えばNA＝0.2程度であり，これは有効入射角に換算すると23°となり，今回の用途には適さない．

３）ファイバのバンドル化

以上述べた光ファイバ素線をバンドル化し，５つの受光面から成るリニアアレイを構成する．

１バンド当りの光入力端面が正しく150 $\mu m^{\square}$となり，かつ，透過損失を減らすには極力細いファイバを密に詰める方が望ましい．

さて，ファイバのバンドル配列には図1.9に示すように，四方稠密と六方稠密とがある．

端面寸法の正確さでは四方稠密が優り，反面，透過率を決定するバンドル化の密度は六方稠密が高く，各々一長一短であるが，現実的にはバンドル配列の決定は，今回の要求のごとく精密な加工が行えるかどうかという製造技術にかかっている．

バンドルを実現するには，配列の如何にかかわらず，製作治具として端面に相当する寸法の型枠を作り，これにファイバを挿入し接着固定するが，四方稠密の場合，正確な寸法を出すために150 $\mu m^{\square}$の型枠によって１チャンネルずつバンドル化した後，５チャンネル分をリニアアレイ化する．この工程においてはバンドル化の際，型枠が小さいため，挿入する際ファイバにストレスが加わり，断線の可能性が高い欠点がある．

これに対し六方稠密では，５チャンネル分を長方形状の型枠に入れて形成するが，ファイバ挿入の際，型枠内のファイバ総数が多く，互いにストレスを吸収するため断線の確率は低い．

また，イメージガイドとして製品化されている光ファイババンドルの多くは，この六方稠密が採用されており，その実績から製造技術上の問題点は基本的に少ないと思われる．

本光ファイバ光学系のバンドル配列決定に当っては，以上の検討に基づき，実際に製造実験を行い，その結果，配列は図1.9(ｂ)に示す六方稠密とし，用いるファイバ素線の直径を50 $\mu m\phi$とした．

4）瞬時視野

本光ファイバ光学系では，バンドル化の検討から1バンド当りの入射端面形状は図1.10の如く決定した．ここでは，この形状が瞬時視野にもたらす問題点について検討する．

図1.10の入射端面が従来方式の検知素子サイズに相当することになり，dx（＝175 μm)が走査幅方向の瞬時視野，dy（＝136 μm)が航空機進行方向の瞬時視野を支配する．

光ファイバ光学系設計仕様から瞬時視野角は1.5 mrad である．

よって，走査幅方向においてこの値を確保するには，集光系の焦点距離 f について検討する必要がある．

焦点距離 f は式（1.5）で与えられる．

$$f = \frac{dx}{\omega_x} = \frac{175 \cdot 10^{-6}}{1.5 \cdot 10^{-3}} = 116 \cdot 10^{-3}(m) \qquad (1.5)$$

ここに，ω_x ：走査幅方向瞬時視野

以上の通り集光系の総合焦点距離を116 mm とすれば，走査幅方向の瞬時視野の確保は可能である．

一方，焦点距離を116 mmとした時の航空機進行方向の瞬時視野 ω_y は，次の式で与えられる．

$$\omega_y = \frac{dy}{f} = \frac{136 \cdot 10^{-6}}{116 \cdot 10^{-3}} = 1.17 \cdot 10^{-3}(rad) \qquad (1.6)$$

となり，要求瞬時視野1.5 mrad に対し1.17 mrad と小さい値となる．

さて，実際の画像取得においては瞬時視野は基本的には小さい方がよいが，走査幅方向の瞬時視野を小さくするとビデオ帯域幅が広がり，データ記録上の問題が生じてくる．

これに対し，航空機進行方向の瞬時視野を小さくした場合，ビデオ帯域幅拡大という問題はないが，走査のオーバラップについて検討が必要となる．

これらのことは，第1報(防セ研究速報第62号)の第1編航空機搭載MSSの詳細設計の中で報告したところであるが，ここでは，走査幅方向の瞬時視野は要求仕様を満たす見通しであるため，同報告にもとづき航空機進行方向の瞬時視野縮小に伴う，走査オーバーラップに

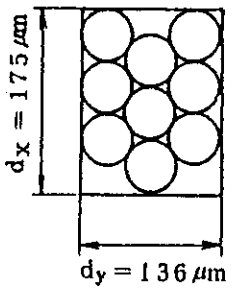


図1.10　入射端面（1バンド当り）

Fig. 1.10　Arrangement of fibers on the cross section of a bundle at the edge of light incidence part.

ついて検討を行う.

同報告では，走査周期10 mS(25 rps)の時ω_y＝1 mradで，オーバーラップ量が約30%確保され，その結果，通常観測時のヌケ率が0.2 %で，実用上の問題点はないとの結論を導びいている.

一方，本光ファイバ光学系を用いた場合，オーバーラップ量Pは式(1.7)により与えられるから

$$P = \left(1 - \frac{V}{H} \cdot \frac{1}{Rn\omega}\right) \times 100\ (\%) \qquad (1.7)$$

$\omega = 1.17 \cdot 10^{-3}$，V(飛行速度)＝71.5 m／S，H(対地高度)＝1000 m，

R(走査鏡回転数)25 rps，n(走査鏡面数)＝4の各値を代入すると，

$$P = 39\ \% \qquad (1.8)$$

となり，これは同報告のP＝30%におけるヌケ率0.2 %が更に少なくなる方向である．従って，航空機進行方向の瞬時視野は1.17 mradでも問題ないと判断できる.

以上検討の上，この後の光ファイバ光学系設計は，瞬時視野は，1.5 mrad×1.17 mradを前提にして進めることにする.

1.3.2　レンズ系の設計

ここでは，ファイバの光出射部と分光フィルタおよび検知素子との間のインターフェースを行うレンズ系について検討する.

レンズ系の基本的な考えは図1.11に示すようにファイバより入射角に等しい角度で出射される光パワーを余すところなく受光するリレーレンズにより平行束に変換し，分光フィルタを透過した後，集光レンズにより検知素子に集光するにある.

そのため，リレーレンズは図1.11においてファイバの出射角θ_3より大きい入射角θ_4を与

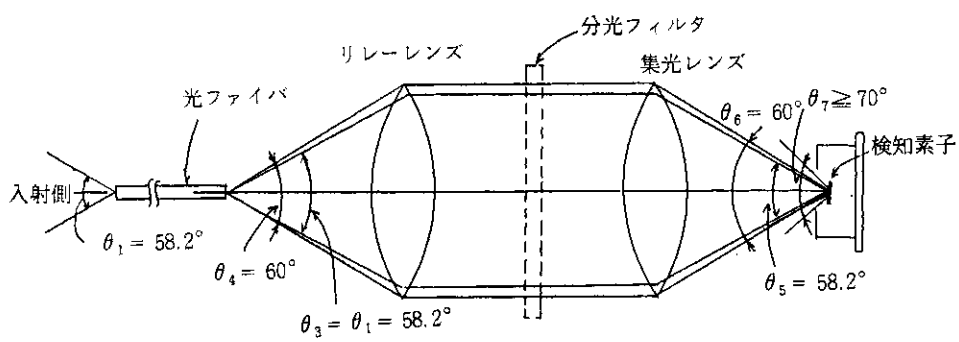


図1.11　レ　ン　ズ　系

Fig. 1.11　Optical structure of the light converging part of optical fiber system.

えるものが必要となる．

入射角θ_1と出射角θ_3およびθ_4の各々の関係は

$$\theta_1 = \theta_3 = 58.2^\circ \leqq \theta_4 \qquad (1.9)$$

であるから，若干の設計マージンを見て

$$\theta_4 = 60^\circ \qquad (1.10)$$

としてレンズ設計を行う．

その結果，集光レンズを納めるハウジングサイズ，製造の実現性等の検討から，焦点距離f＝8.66mm，開口径10mmφ，F値換算で0.866のレンズの採用により$\theta_4 = 60^\circ$を満たすこととした．

また，検知素子とインタフェースする集光レンズは，検知素子側の入射角θ_7が通常70°以上あることから，出射角θ_6が60°であっても光パワー損失は生じないため，リレーレンズと同一のレンズを使用することにした．

この時，検知素子に入射する角度θ_5は，リレーレンズに入射する角度$\theta_3 = 58.2^\circ$と等しくなる．（$\theta_1 = \theta_3 = \theta_5 = 58.2^\circ$）

1.4　構造設計

構造設計は，ファイバの入射端面を設けたヘッド部と，レンズ，フィルタおよび検知器を設けた集光検知部について行う．

1.4.1　ヘッド部

ヘッド部に対する条件は，次のとおりである．

1）小形であること．（装置への取付上の配慮）

2）内部でファイバにストレスが加わらないこと．（ファイバ断線防止）

3）取付用フランジを有すること．（装置への取付，および評価試験治具への取付上の配慮）

以上検討の上，図1.12に示す構造とした．

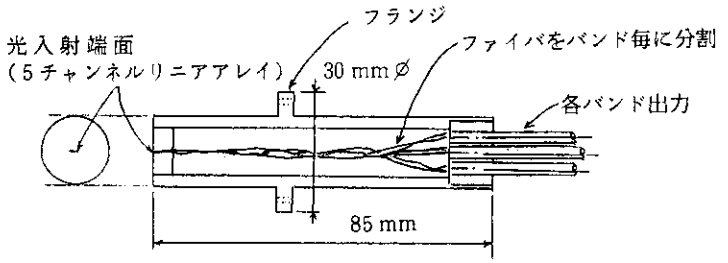


図1.12　ヘッド部構造

Fig. 1.12 Structure of the light incidence part of optical fiber system.

1.4.2　集光検知部

集光検知部に対する条件は，次のとおりである．

1）小形であること．(装置への取付上の配慮)

2）ファイバ，レンズ，フィルタ，検知器等のコンポーネントが適確に取付き，保守が容易であること．

3）取付用フランジを有すること．(装置への取付，および評価試験治具への取付上の配慮)

以上検討の結果，図1.13に示す基本構造とした．

この集光検知部は，保守のため3分割可能な構造とし，また，可能な限り光学アライメント調整もできるよう配慮する．

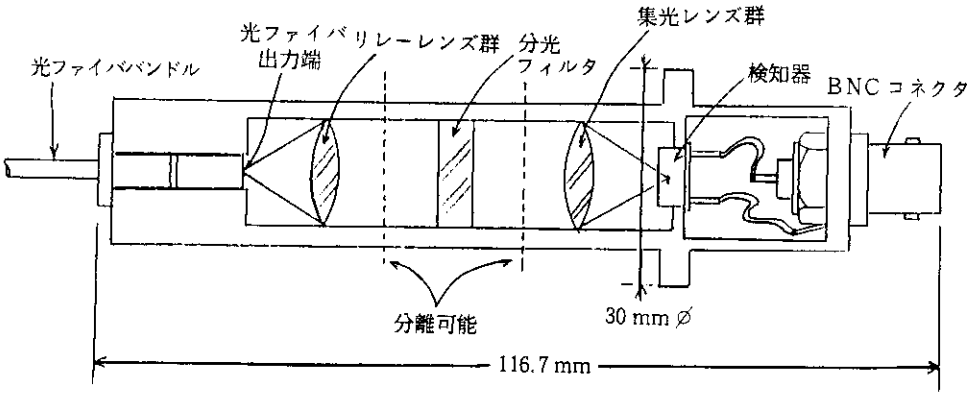


図1.13　集光検知部構造概念（1チャンネル分）

Fig. 1.13　Structure of the light converging and detecting part in each channel of optical fiber system.

1.5　電気設計

ここでは，集光検知部に用いる電気コンポーネントである検知器について検討を行う．

1.5.1　検知素子寸法

検知素子面に結ぶ像の寸法は，リレー，集光レンズ間の倍率が1倍であることから，基本的には受光端面寸法，すなわち175 μm × 136 μmであればよい．

しかし，本光ファイバ光学系のように構造上，光学アライメント調整の自由度が小さい場合，検知素子サイズは大き目の方が，受光守備エリアが広いため光パワー損失の可能性が低く，有利である．

1.5.2　可視検知器の選定

ここでは素子サイズの他，波長特性，D^* 及びレスポンシビティの検討から，浜松フォトニクス製Siフォトダイオード S 1336－5BQを採用することにした．この検知器の素子サイズは2.5 × 2.4 mm^{2}である．同検知器はデイテクティビティ $D^*_{\lambda p} \sim 10^{13}$cm・Hz$^{1/2}$・W^{-1} レスポンシビティ $R_{\lambda p} \sim 0.5$ A／Wの性能を有する．また，分光感度特性は図1.14の通りである．

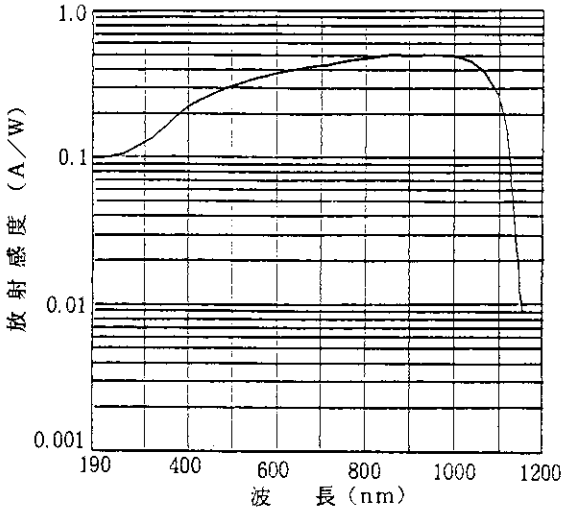


図 1. 14　検知器分光感度特性

Fig. 1.14 Spectral characteristics of sensitivity of standard spectrophotometer.

なお，本光ファイバ光学系においては，検知素子サイズ変更による瞬時視野の変化はない（瞬時視野は光ファイバ受光端面寸法に支配される）.

2.　試作

本章では，試作した可視近赤外域光ファイバ光学系の構造，性能について述べる他，試作品の外観を示す.

2.1　構造

図 2. 1 に可視近赤外光ファイバ光学系の全体構造を示す.

同図では，後の評価試験に用いるプリアンプおよび接続ケーブルも併せて示した.

図 2. 2 に集光検知部の詳細構造を示す.

同図では部品番号⑬～⑰に示すネジにより，ファイバ出射部，リレーレンズ部，分光フィルタ部，集光レンズ部，検知器の分離および，光学アライメント調整が可能となっている.

2.2　光学仕様

表 2. 1 に試作した可視近赤外光ファイバ光学系の光学仕様を示す.

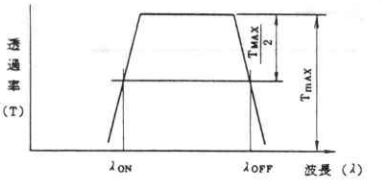
なお，総合性能は評価試験において明らかにする

2.3　試作品

試作品の外観を写真 2. 1，写真 2. 2，写真 2. 3 に示す.

表 2.1　可視・近赤外光ファイバ光学系光学仕様

Table 2.1 Specifications of the optical components to be used for the optical fiber system with 5 visible and near infrared bands.

番号	項目	仕様	備考
1.	受光部形状	5CHリニアアレイ	図2.1 参照
2.	光ファイバー	単繊維直径 φ50μm コアーガラス屈折率 nd=1.619 クラッドガラス屈折率 nd=1.515 開口数 0.57 受光角度 70° 伝送損失 130dB/km (800nm)	○5チャンネルファイバハンドル ○1チャンネル当り単繊維 9本 ○多成分系
3.	平均透過率	Tave. ≧ 48% (バンド 1～5) 集光，検知部間	集光，検知部間
4.	光学系性能	焦点距離 f=8.66 (FNo=0.866) バックフォーカス P'=4.089 レンズの透過率 T≧92% (片側)	d線において (λ=587.56nm)
5.	フィルタ 分光透過特性		

バンドNo.	カットオン波長 λON	カットオフ波長 λOFF	Tmax(%)	構成
1	410±15nm	490±15nm	60	3枚
2	500±15nm	600±15nm	80	3枚
3	590±15nm	710±15nm	75	3枚
4	680±20nm	820±20nm	75	3枚
5	815±20nm	980±20nm	85	3枚

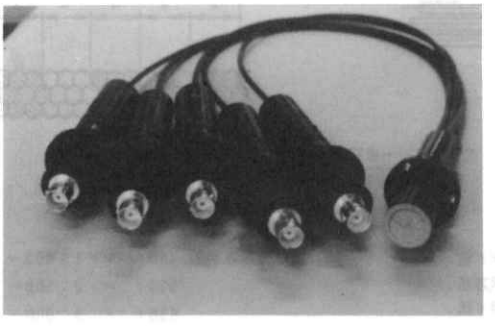


写真 2.1　可視・近赤外光ファイバ光学系全景

Photo. 2.1 Outlook of optical fiber system with five visible and near infrared bands.

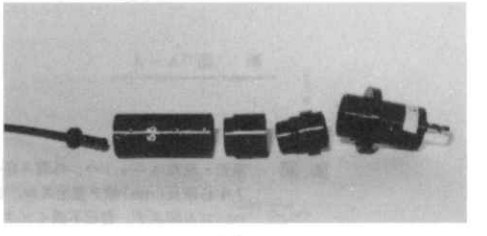
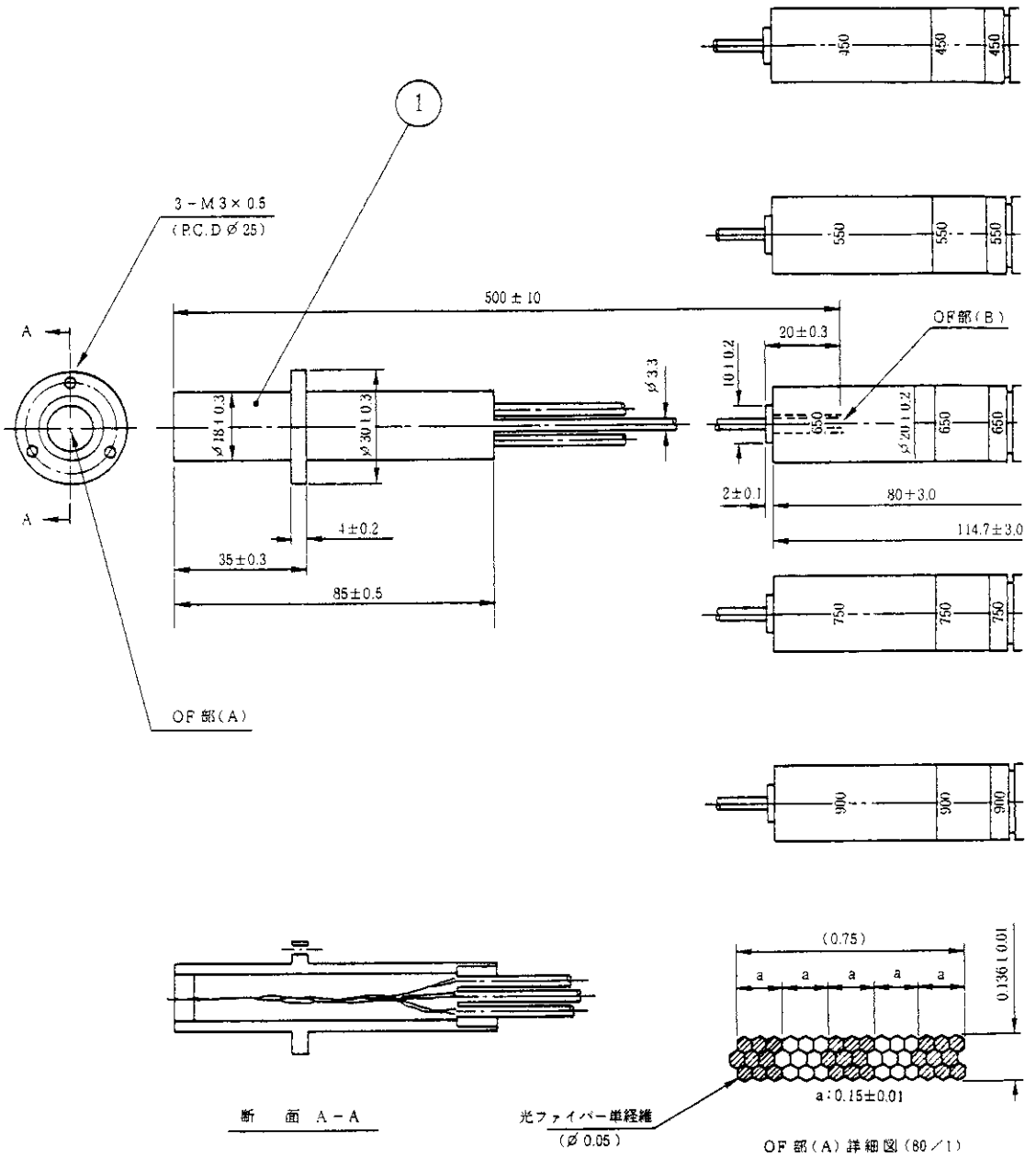


写真 2.2　集光検知部

Photo. 2.2 Outlook of light converging and detecting part (series of the components).

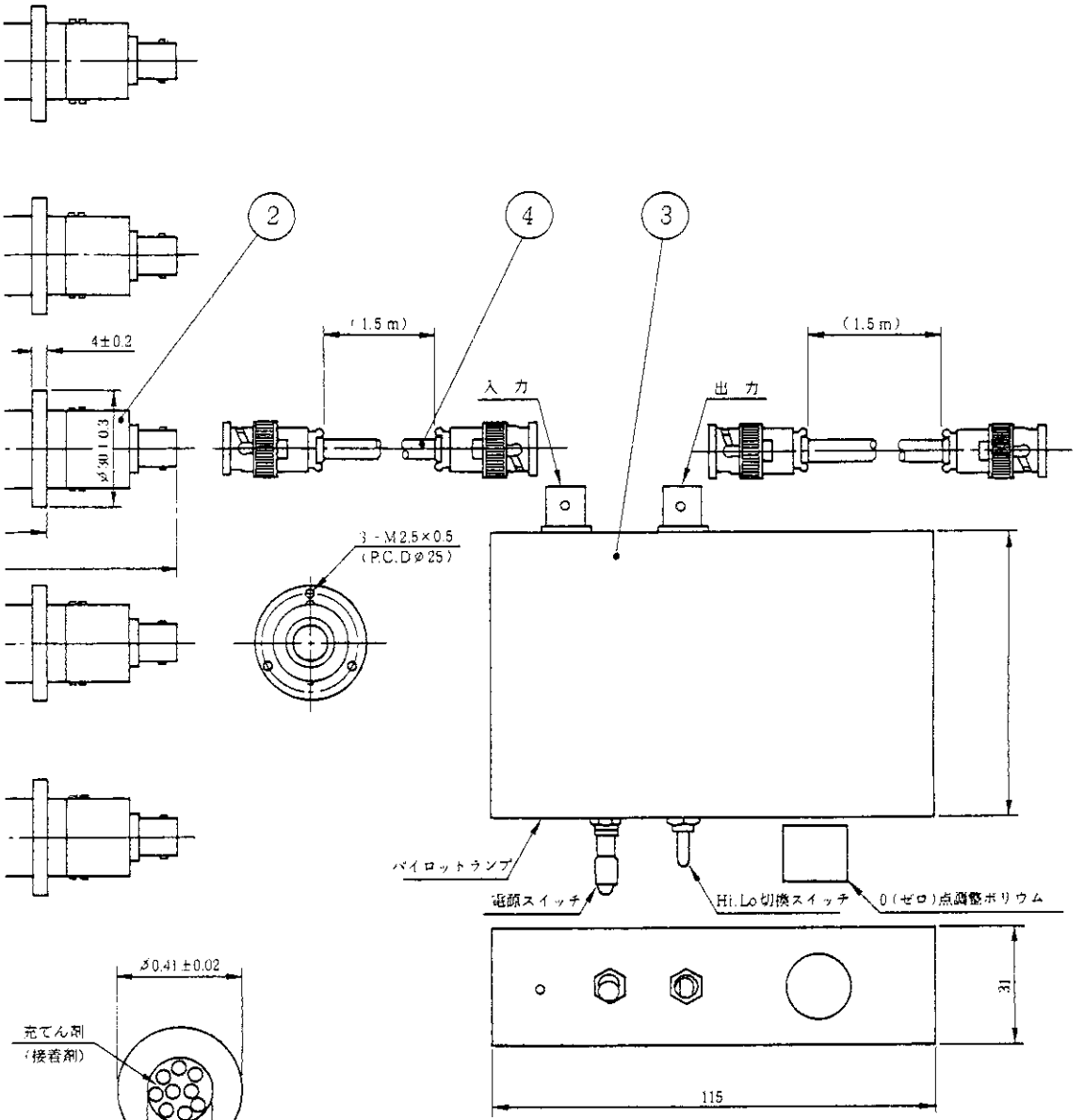


断　面　A－A

OF部(A)詳細図(80／1)

注　記　集光・検知ユニットハ，外周ニ各バンド毎ノ中心波長(nm)数ヲ表示スル．表示方法ハ，ゴム印ニテ，自己不滅インクヲ用イ捺印スル．

表示数字　450(バンド1：400～500nm)
550(〃　2：500～600nm)
650(〃　3：600～700nm)
750(〃　4：700～800nm)
900(〃　5：800～1000nm)

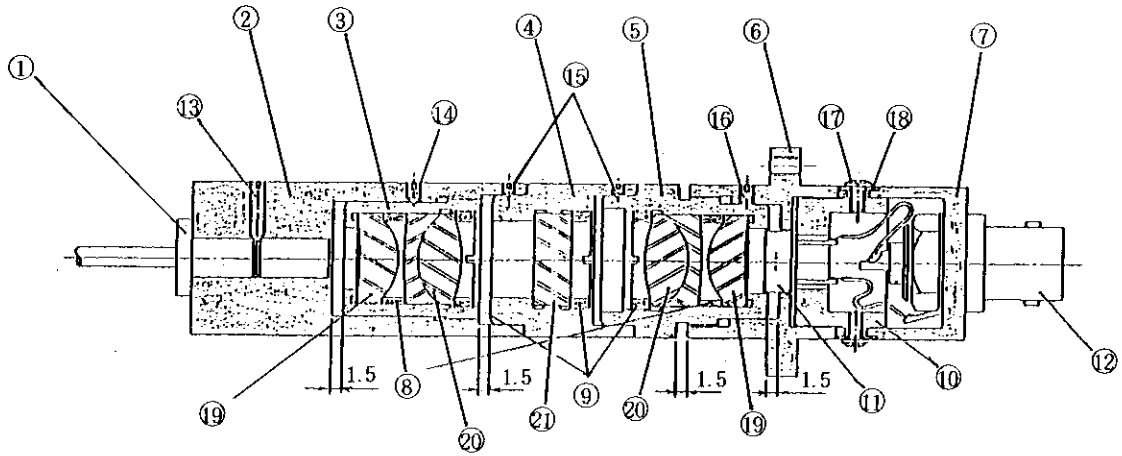


OF部(B)詳細図(80/1)

部品番号	部品名称	数量	備考
1	ヘッド部	1	外周ブラッククロムメッキ処理
2	集光・検知部	5	5バンドフィルター内蔵, 外周ブラックアルマイト処理
3	プリアンプ	1	フォトセンサアンプ(浜松フォトニクス(1837))
4	接続ケーブル	5	BNCPラグ付接続ケーブル

図2.1 可視・近赤外光ファイバ光学系構造

Fig. 2.1 Dimention of the components of optical fiber system with 5 visible and near infrared bands.



部品番号	部品名称	数量	材質（処理）	備考
1	ファイバ出射部	1	—	
2	ファイバ側取付金	1	A5056B（BAℓ）	
3	リレーレンズ枠	1		
4	フィルター枠	1		
5	集光レンズ枠	1		
6	検知器取付金	1		
7	カバー	1		
8	間隔環	2		
9	押上環	3		
10	押上環	1		
11	検知器	1	—	シリコンフォトダイオード
12	BNCレセプタクル	1	—	—
13	スリ割付止めネジ 112×8ℓ	1	鋼材（BZ11）	JIS B 1117
14	スリ割付止めネジ 112×3ℓ	3		
15	スリ割付止めネジ 111.7×2ℓ	2		
16	スリ割付止めネジ 112×2.5ℓ	3		
17	丸平小ネジ M2×3.5ℓ	2		JIS B 1101
18	小形丸平座金	2		JIS B 1256
19	レンズ	2	光学ガラス	
20	レンズ	2		
21	フィルター	1		

図 2.2　集光検知部構造

Fig. 2.2　Detailed structure of the light converging and detecting part of optical fiber system.

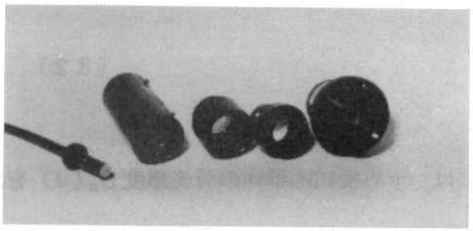


写真 2.3 集光検知部
Photo. 2.3 Outlook of light converging and detecting part (cross sectional outlook of the components)

3. 試験

3.1 目的

本試験は，火山専用空中赤外映像装置のＭＳＳ本体に使用予定である多チャンネル可視近赤外光ファイバ光学系の実用化のため試作した光ファイバ光学系の分光透過特性を確認し，設計・製作技術を確立することを目的とする．

3.2 試験内容

本試験では，各バンドのヘッド部～集光部間総合平均透過率試験が最終目標であるが，光ファイバ部のみの透過率試験についても総合評価を行う上で必要と考えられるため，併せ試験を実施することとした．

ヘッド部～集光部間総合平均透過率の試験においては，先ず総合分光透過率を測定する必要がある．この際，図3.1の如く，分光器からの光をヘッド部に入射し検知部出力を測定することとなる．今，この測定結果を$D'_a(\lambda)$(a はバンドを示す．以下同)，検知部の分光感度を$D_a(\lambda)$，求めるべきヘッド部～集光部間総合分光透過率を$T_a(\lambda)$とすると，次式の関係が成立する

$$D'_a(\lambda) = D_a(\lambda) \cdot T_a(\lambda) \qquad (3.1)$$

式(3.1)より総合分光透過率$T_a(\lambda)$は

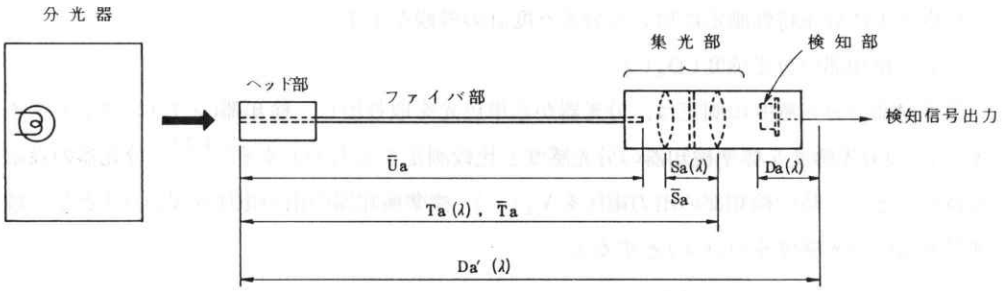


図 3.1 光ファイバ光学系試験概念
Fig. 3.1 Experimental concept for determining transmissivity of optical fiber system.

$$T_a(\lambda) = \frac{D_a'(\lambda)}{D_a(\lambda)} \qquad (3.2)$$

となる.

従って，総合分光透過率$T_a(\lambda)$を得るためには，予め検知部単体の分光感度$D_a(\lambda)$を測定しておく必要がある.

総合平均透過率($\overline{T_a}$とする)は，式(3.2)により求めた総合分光透過率$T_a(\lambda)$を各波長バンドに与えられた波長域でサンプリングした値を平均して求めることができる.

ファイバ部の平均透過率($\overline{U_a}$とする)に関しては，以上求めた，ヘッド部～集光部間総合平均透過率$\overline{T_a}$，および集光検知部(リレーレンズ，フィルタ，集光レンズより構成される)の平均透過率$\overline{S_a}$とすると，次式の関係が成立する.

$$\overline{T_a} = \overline{U_a} \cdot \overline{S_a} \qquad (3.3)$$

式(3.3)よりファイバ部の平均透過率$\overline{U_a}$は

$$\overline{U_a} = \frac{\overline{T_a}}{\overline{S_a}} \qquad (3.4)$$

となり，予め集光部の平均透過率を測定しておくことにより，ファイバ部の平均透過率$\overline{U_a}$の導出が可能である.

図3.2に，以上述べた試験過程のフローを図示する.

3.3　試験方法

3.3.1　集光部の平均透過率($\overline{S_a}$)

集光部の平均透過率の試験に当っては，各バンドとも集光部を構成するレンズ(リレーレンズおよび集光レンズで一組)，およびフィルター個々について，先ず分光透過率を測定した上，それぞれ平均透過率を算出し，各平均透過率を乗じて集光検知部の平均透過率$\overline{S_a}$を求める.

表3.1に集光部の試験実施要領を示す.

写真3.1に分光特性測定に用いる分光々度計の外観を示す.

3.3.2　検知部の分光感度($D_a(\lambda)$)

各検知部の分光感度の測定は，分光器から単色光を取り出し，検知部(シリコンフォトダイオード)の分光感度を標準検知器の分光感度と比較測定するものとする(注2)．分光器の設定波長をλとした時の検知部の出力電圧を$V_a(\lambda)$，標準検知器の出力電圧を$V_s(\lambda)$とし，標準受光器の分光感度を$D_s(\lambda)$とすると，

$$D_a(\lambda) = \frac{V_a(\lambda)}{V_s(\lambda)} \times D_s(\lambda) = V_a(\lambda) \times \sigma_s(\lambda) \qquad (3.5)$$

となり，図3.3に示す測定系で，式(3.5)の各パラメータを$\lambda = 300 \sim 1100$ nmまで$\Delta\lambda =$

10nm(分光特性のピーク近傍では5nm)間隔で測定し$D_a(\lambda)$を求める.

なお,標準検知器の$D_s(\lambda)$は既知であり,$V_s(\lambda)$は同測定系において実際に取得した値を用いる.従って,実際の計算に取得した値を用いる.従って,実際の計算では式(3.5)における$\sigma_s(\lambda)=D_s(\lambda)/V_s(\lambda)$を予め算出しておき用いるものとする.写真3.2にテストベンチを示す.写真3.3に測定系を示す.これらは,3.3.3"ヘッド部に光を集光した時の検知器の分光感度測定"にも共通である.

(注2) 分光器出力の波長依存性およびインターフェースレンズ(図3.3)の分光透過率の影響を除去するため,

3.3.3 ヘッド部に光を集光した時の検知部の分光感度($D'_a(\lambda)$)

$D'_a(\lambda)$は$D_a(\lambda)$と同様に次式で与えられる.

$$D'_a(\lambda)=\frac{V'_a(\lambda)}{V_s(\lambda)}\times D_s(\lambda)=V'_a(\lambda)\times\sigma_s(\lambda) \qquad (3.6)$$

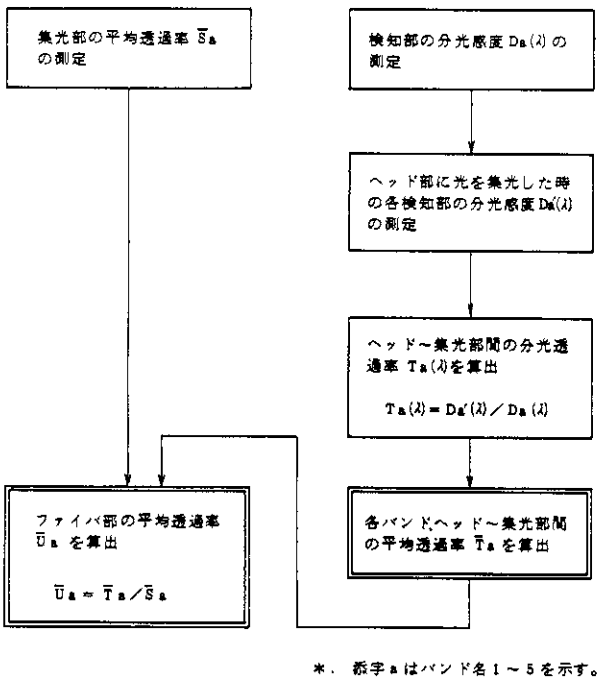
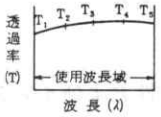
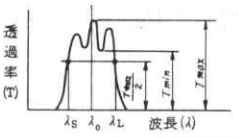


図3.2 可視・近赤外光ファイバ光学系試験フロー

Fig. 3.2 Flow diagram of experiment for determining transmissivity of optical fiber system.

表 3.1　集光部試験実施要領

Table 3.1 Experimental procedures for determining transmissivity of the light converging part of optical fiber system.

	項　　目	試　　験　　方　　法	測 定 具
1	レンズの分光透過率および平均透過率	分光々度計で分光透過率を測定し、下記方法により平均値を求める。  各バンド使用波長域を均等割りした5点の透過率の和の平均とする。 平均透過率 $= \frac{T_1+T_2+T_3+T_4+T_5}{5}$	分光々度計
2	フィルタ分光透過率および平均透過率	分光々度計で各フィルタの分光透過率を測定したチャートより、下記により各性能を求める。  Tmax ： 最大透過率 Tmin ： 最少　〃 Tmax／2 ：半値透過率 λ_S及びλ_L ：半値透過率波長 λ_0 ：中心波長 $= \frac{\lambda_S+\lambda_L}{2}$ Tave ：平均透過率 $= \frac{Tmax+Tmin}{2}$	分光々度計
3	集光部平均透過率	1項および2項で測定したレンズ（1組）、およびフィルターの平均透過率の積で算出	——

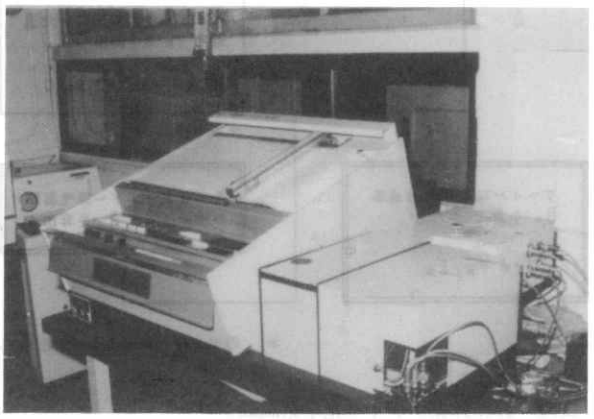


写真 3.1　分光々度計外観（リツー応用化学(株) MC－1ON型）

Photo. 3.1　Outlook of spectrophotometer.

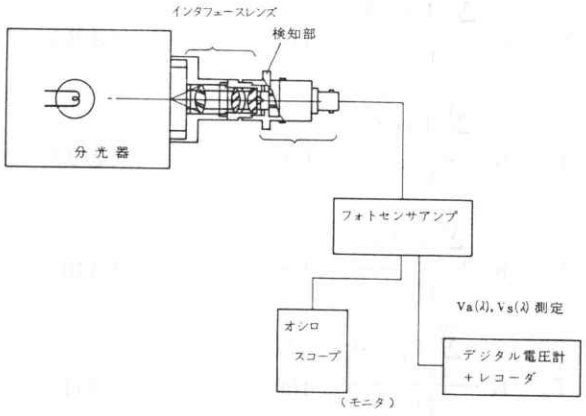


図3.3 $D_a(\lambda)$ 測定系
Fig. 3.3 Determining system for Da (λ).

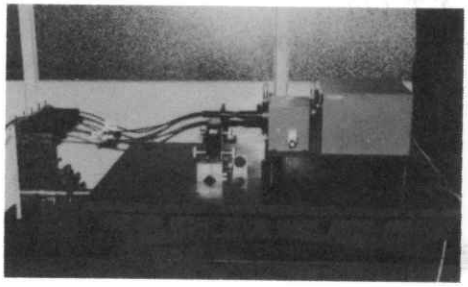


写真3.2 テストベンチ
Photo. 3.2 Test bench.

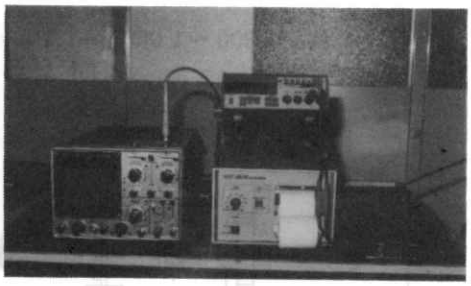


写真3.3 測定系(右よりフォトセンサアンプ, デジタル電圧計およびレコーダ, オシロスコープ)
Photo. 3.3 Measurement system right: photo-sensor amplifier, middle: digital voltmeter and recorder, left: Oscilloscope

ここに, $V'_a(\lambda)$は検知部の出力電圧であり, これを図3.4に示す測定系で各バンドごとに$\Delta\lambda = 10$ nm(分光特性のピーク近傍では5 nm)間隔で測定することにより, 式(3.6)を用いて$D'_a(\lambda)$を求める.

なお, 各バンドに対応する測定波長範囲は余裕をみて表3.2の通りとした.

3.3.4 ヘッド部～集光部間の分光透過率($T_a(\lambda)$)

検知部の分光感度$D_a(\lambda)$およびヘッド部に光を集光した時の検知部の分光感度$D'_a(\lambda)$を次式に代入し$T_a(\lambda)$を求める.

$$T_a(\lambda) = \frac{D'_a(\lambda)}{D_a(\lambda)} \times 100\ (\%) \qquad (3.7)$$

3.3.5 ヘッド部～集光部間の平均透過率($\overline{T}_a$)

次式に示すごとく, 各バンドの波長域において分光透過率の平均をとる.

バンド1，波長域400～500nm：$\overline{T}_1 = K \dfrac{\sum_{n=0}^{10} T_1(\lambda)}{11} \times 100$　　(3.8)

バンド2，波長域500～600nm：$\overline{T}_2 = K \dfrac{\sum_{n=10}^{20} T_2(\lambda)}{11} \times 100$　　(3.9)

バンド3，波長域600～700nm：$\overline{T}_3 = K \dfrac{\sum_{n=20}^{30} T_3(\lambda)}{11} \times 100$　　(3.10)

バンド4，波長域700～800nm：$\overline{T}_4 = K \dfrac{\sum_{n=30}^{40} T_4(\lambda)}{11} \times 100$　　(3.11)

バンド5，波長域800～1,000nm：$\overline{T}_5 = K \dfrac{\sum_{n=40}^{60} T_5(\lambda)}{21} \times 100$　　(3.12)

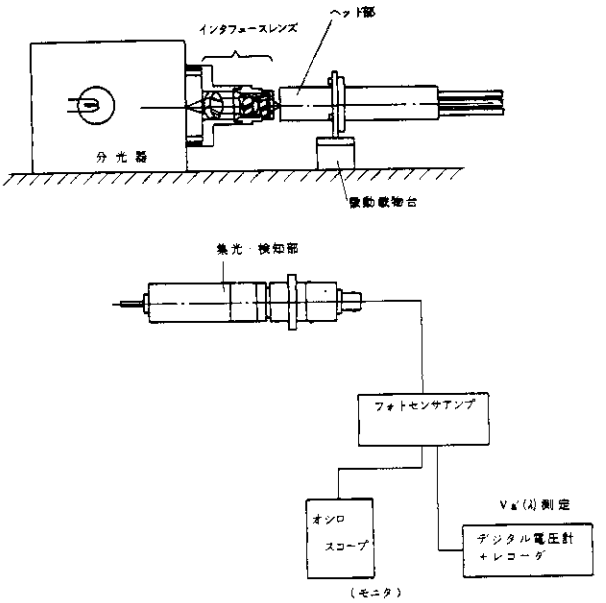


図3.4　$D'_a(\lambda)$ 測定系
Fig. 3.4　Determining system for $D'_a(\lambda)$.

バンドa	波長域	測定範囲
1	400～500nm	300～600nm
2	500～600 〃	400～700 〃
3	600～700 〃	500～800 〃
4	700～800 〃	600～900 〃
5	800～1000 〃	700～1100 〃

表3.2　測定波長範囲
Table 3.2　Spectral range for determining spectral transmissivity in each channel.

ここに，$\lambda = 400 + n\Delta\lambda$，$\Delta\lambda = 10$ nm とする．

なお，Kは分光器の光出力部スリット形状と，ファイバ端面形状との差異から生ずる測定上誤差を補正する係数である．

すなわち，3.3.2における“検知部の分光感度の試験”の場合は，図3.5に示すように分光器のスリット像がそのまま，十分大きな検知素子面に入射するため，光パワーのロスはない．

これに対し，3.3.3における“ヘッド部に光を集光した時の検知部の分光感度の測定”の場合は，図3.6に示すようにスリット像の光パワーの一部がヘッド部の光ファイバ端面で受光されることになり，ここで光パワーのロスが生ずる．

従って，本来ならば，検知部の分光感度試験においてファイバ端面と同一のピンホールを用意すれば，ヘッド部に光を集光した時と同一条件となり好ましいが，この様な形状のピンホールの製作は困難であるため，ここではヘッド部～集光部間の平均透過率$\overline{T}_a$を求める際に補正係数Kを導入することにした．Kの値は図3.7に示すようにK = 4.56となる．

3.3.6　ファイバ部の平均透過率($\overline{U}_a$)

次式により算出する．

$$\overline{U}_a = \frac{\overline{T}_a}{\overline{S}_a} \times 100 \quad (\%) \qquad (3.13)$$

ここに，$\overline{U}_a$：ファイバ部各バンドの平均透過率

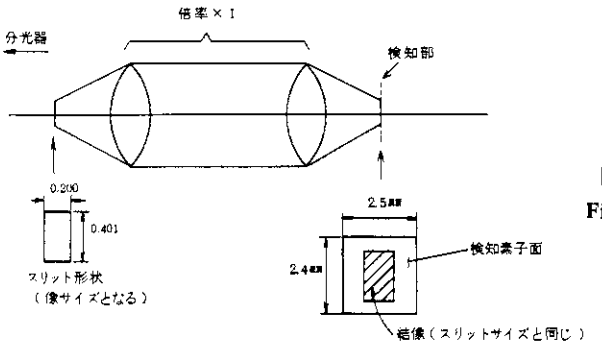


図3.5　検知部の分光感度試験

Fig. 3.5　Determination of spectral sensitivity of the detector in each channel without optical fiber system.

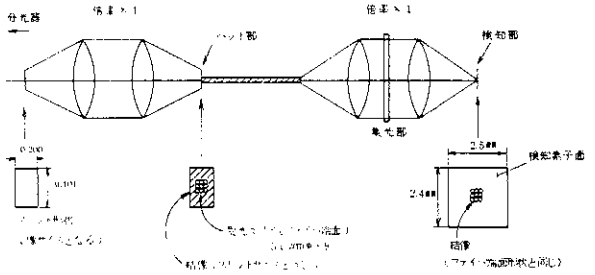


図3.6　ヘッド部に光を集光した時の検知部分光感度試験

Fig. 3.6　Determination of spectral sensitivity of detector in each channel with optical fiber system.

$\overline{T}_a$：ヘッド部～集光部間各バンドの平均透過率

$\overline{S}_a$：集光部の平均透過率

4. 試験結果

4.1 集光部の平均透過率（$\overline{S}_a$）

表3.1に示したように，集光部の平均透過率はレンズおよびフィルタの透過率試験結果から算出した．

表4.1に各バンドの平均透過率の試験結果を示す．

なお，参考まで，図4.1～4.5に平均透過率算出に用いた各バンドのレンズ(リレーレンズと集光レンズの対)の分光透過率試験結果を示す．

また，図4.6～4.10に各バンドのフィルタの分光透過率試験結果を示し，図4.11に各バンドのフィルタ特性を一覧にして示した．

4.2 検知部の分光感度$D_a(\lambda)$

検知部の分光感度は3.3.2で述べたように，標準検知器の既知の分光感度$D_s(\lambda)$と信号出力の実測地$V_s(\lambda)$から補正係数$\sigma_s(\lambda)$を予め算出しておき，被試験検知器の信号出力$V_a(\lambda)$

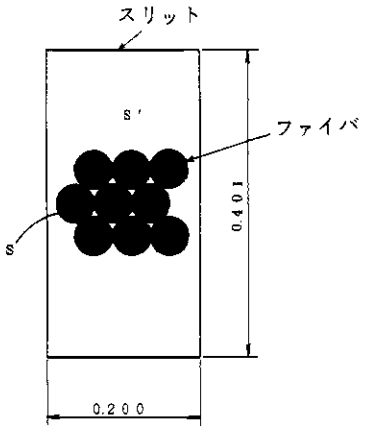


図3.7　光パワー誤差補正係数

Fig. 3.7　Corrective coefficient for light power according to the ratio of cross sectional areas of light incidence and a fiber bundle at focal plane.

ファイバ面積 S ＝

$$\frac{\pi D^2}{4} \times 9 = \frac{9}{4} \times \pi \times (0.05)^2 = 0.0176\ \text{mm}^2$$

受光面積 S′＝

$$0.401 \times 0.200 = 0.0802\ \text{mm}^2$$

従って，

$$K = \frac{S'}{S} = \frac{0.0802\ \text{mm}^2}{0.0176\ \text{mm}^2} = 4.56$$　（光パワー損失 78％）

表 4.1 集光部平均透過率

Table 4.1 Synthetic transmissivity of the light converging part in each channel.

バンドa	使用周波数〔nm〕	平均透過率(%)		
		レンズ	フィルタ	総合 $\bar{T}a$
1	400 ～ 500	88.0	73.5	64.7
2	500 ～ 600	89.4	78.5	70.1
3	600 ～ 700	89.5	83.0	74.3
4	700 ～ 800	91.1	83.1	75.7
5	800 ～ 1000	90.0	84.6	76.1

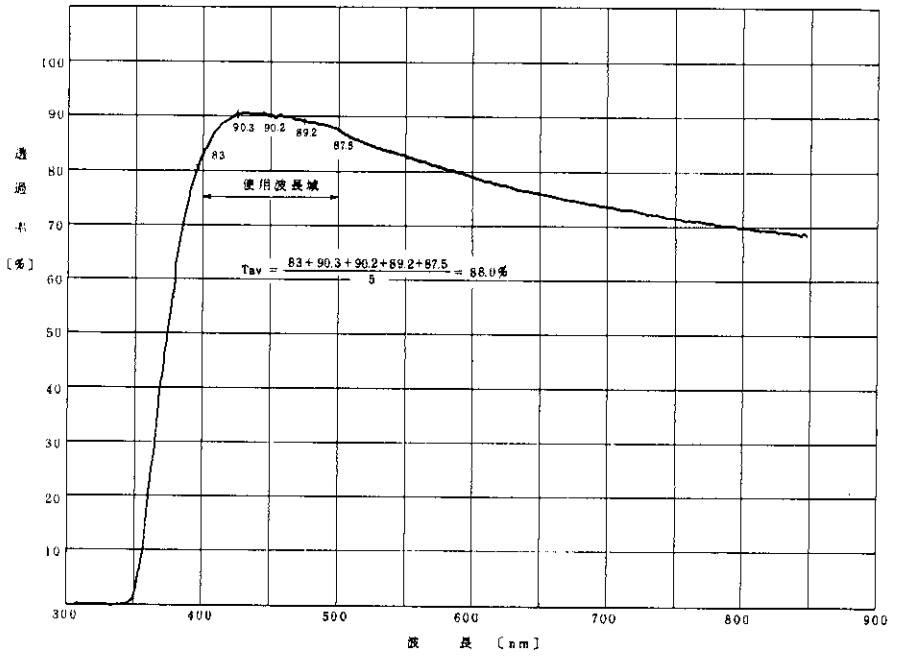


図 4.1 バンド1，レンズ分光透過率

Fig. 4.1 Spectral transmissivity of lenses in light converging part, band 1.

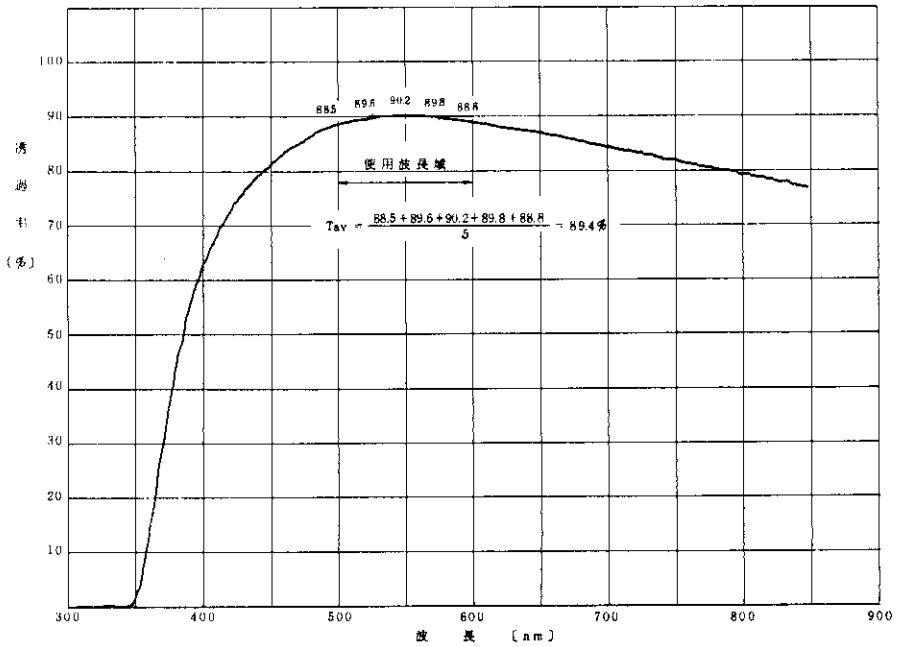


図 4.2　バンド 2，レンズ分光透過率

Fig. 4.2　Spectral transmissivity of lenses in light converging part, band 2.

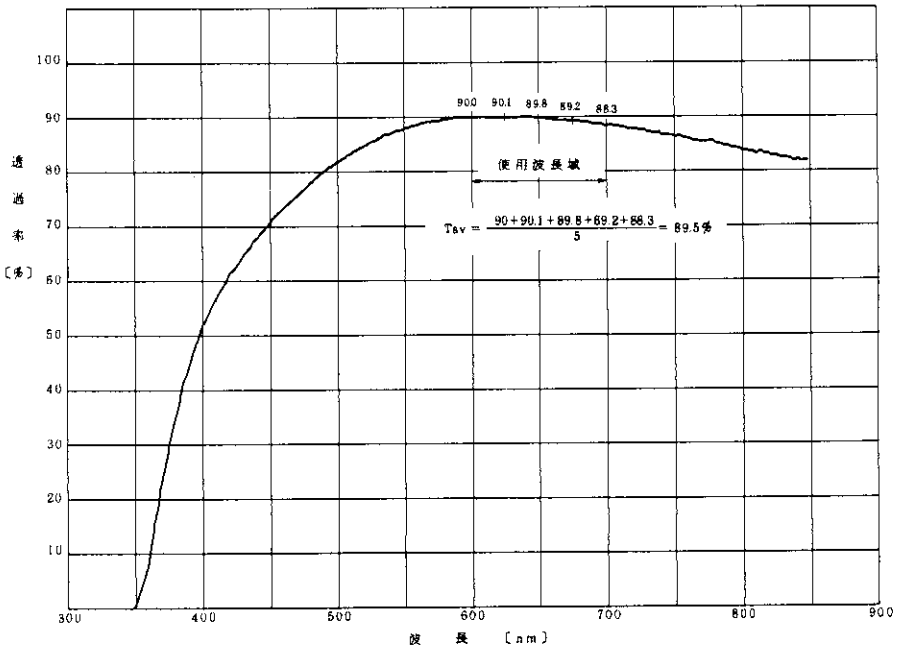


図 4.3　バンド 3，レンズ分光透過率

Fig. 4.3　Spectral transmissivity of lenses in light converging part, band 3.

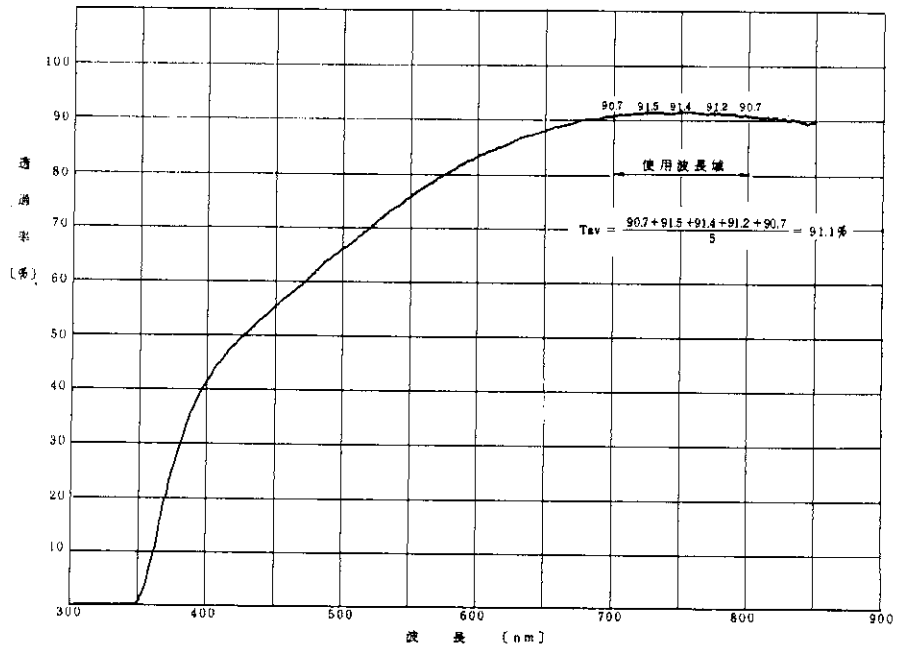


図 4.4 バンド4，レンズ分光透過率
Fig. 4.4 Spectral transmissivity of lenses in light converging part, band 4.

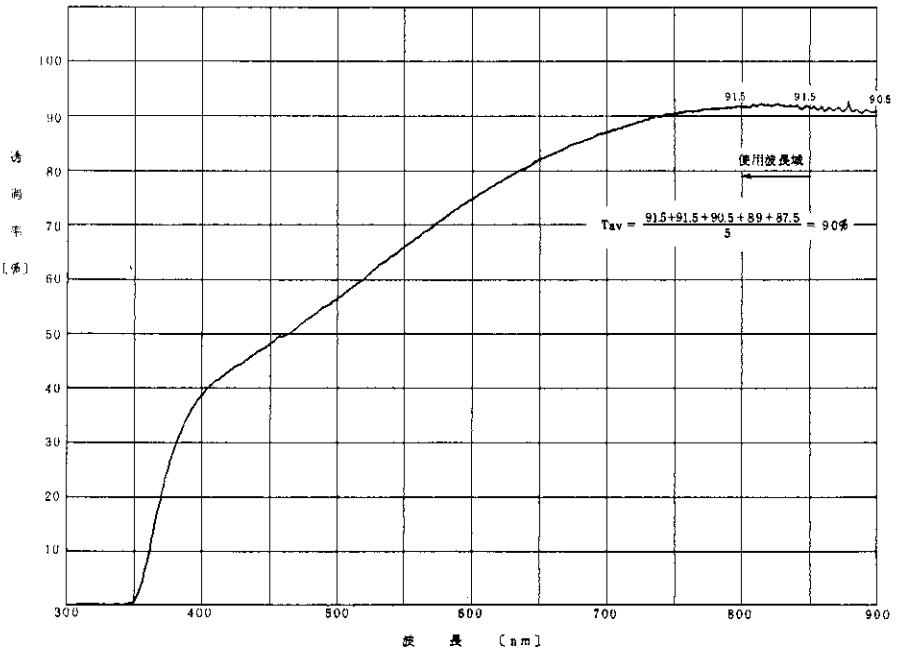


図 4.5 バンド5，レンズ分光透過率
Fig. 4.5 Spectral transmissivity of lenses in light converging part, band 5.

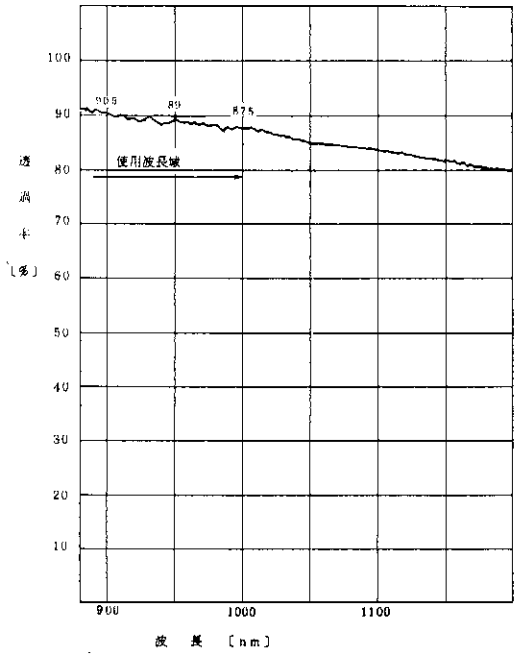


図4.5　つづき

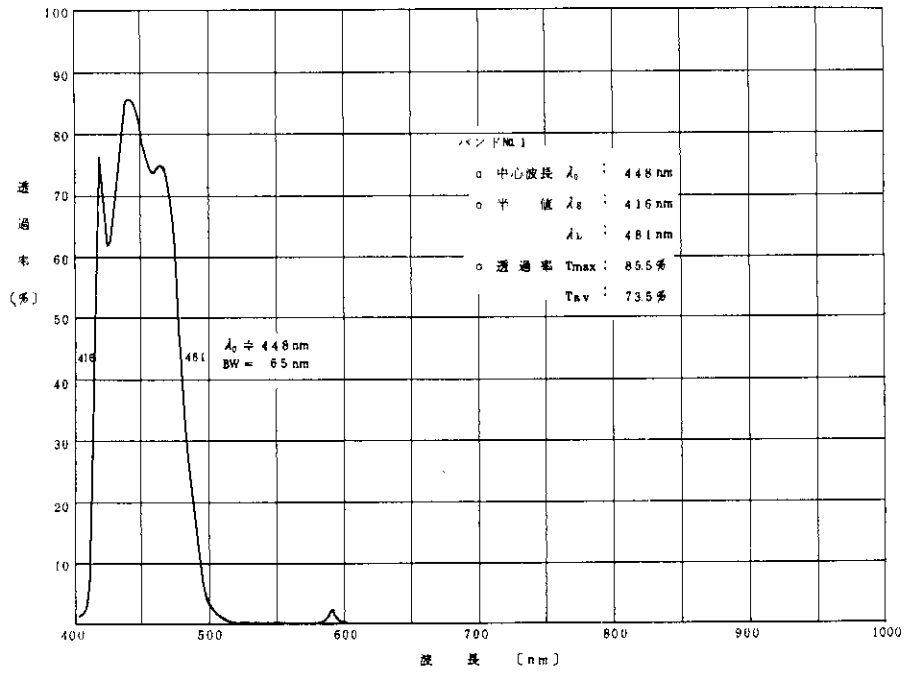


図4.6　バンド1，フィルタ分光透過率

Fig. 4.6　Spectral transmissivity of a band-pass filter in light converging part, band 1.

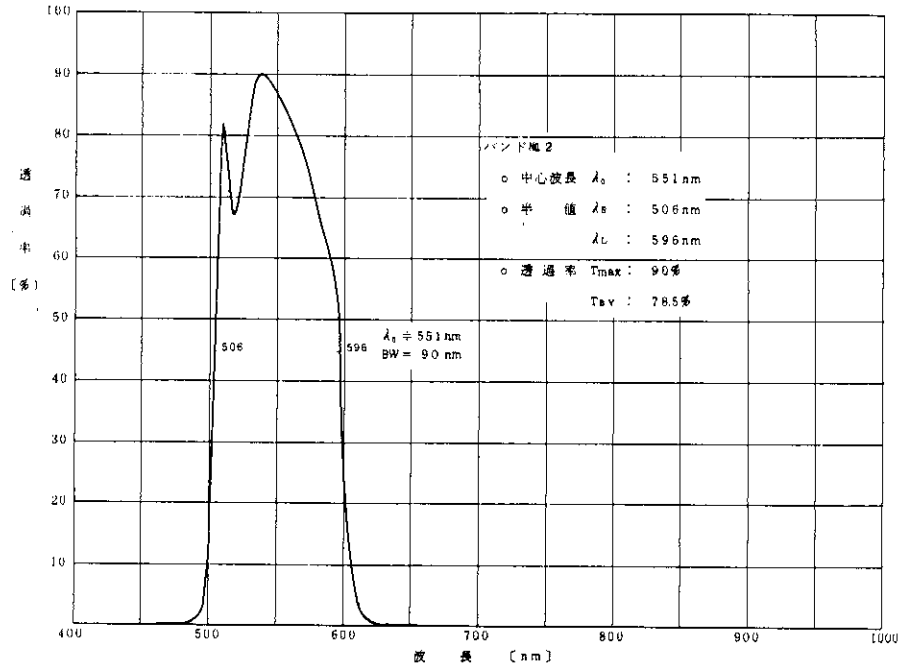


図 4.7 バンド2，フィルタ分光透過率

Fig. 4.7 Spectral transmissivity of a band-pass filter in light converging part, band 2.

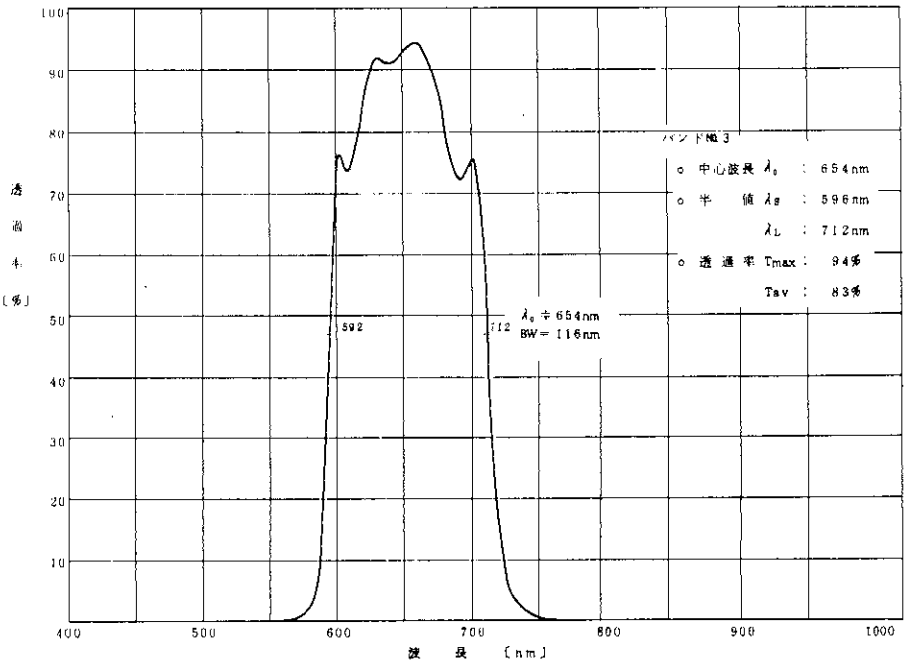


図 4.8 バンド3，フィルタ分光透過率

Fig. 4.8 Spectral transmissivity of a band-pass filter in light converging part, band 3.

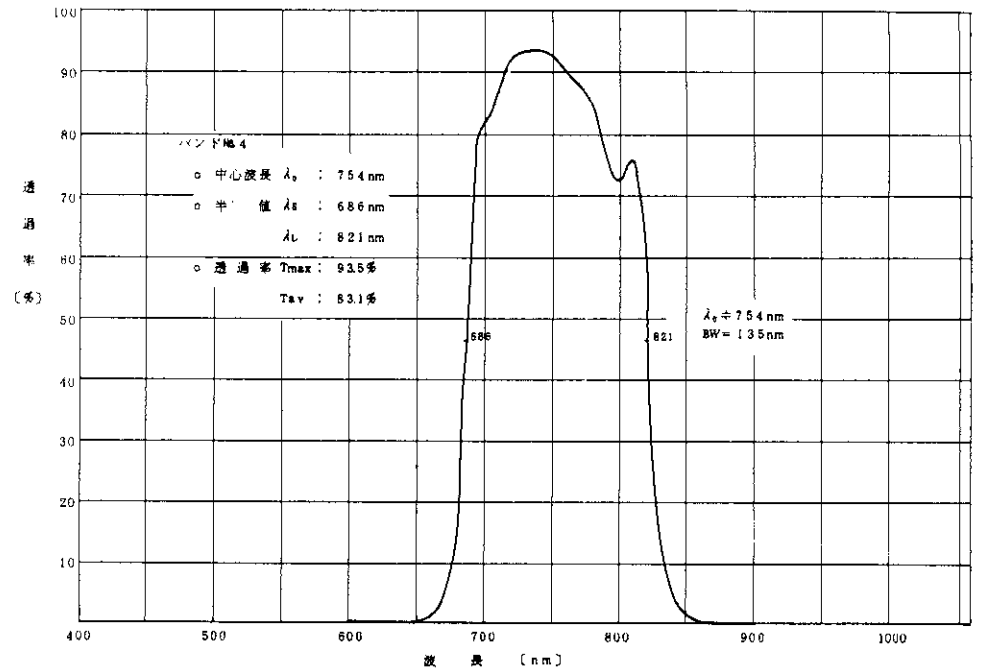


図 4.9　バンド 4，フィルタ分光透過率

Fig. 4.9　Spectral transmissivity of a band-pass filter in light converging part, band 4.

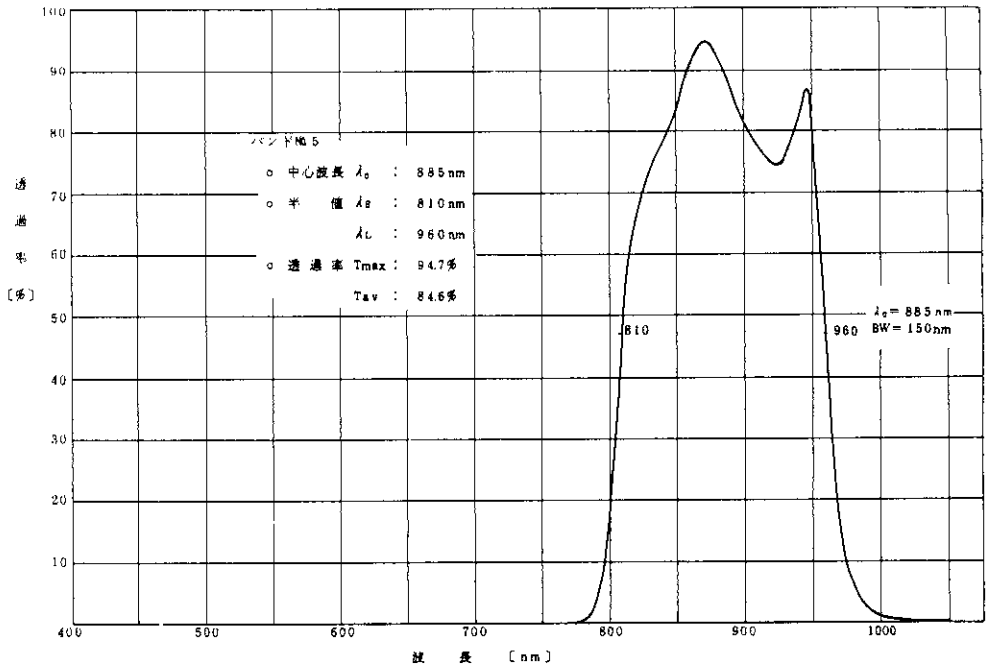


図 4.10　バンド 5，フィルタ分光透過率

Fig. 4.10　Spectral transmissivity of a band-pass filter in light converging part, band 5.

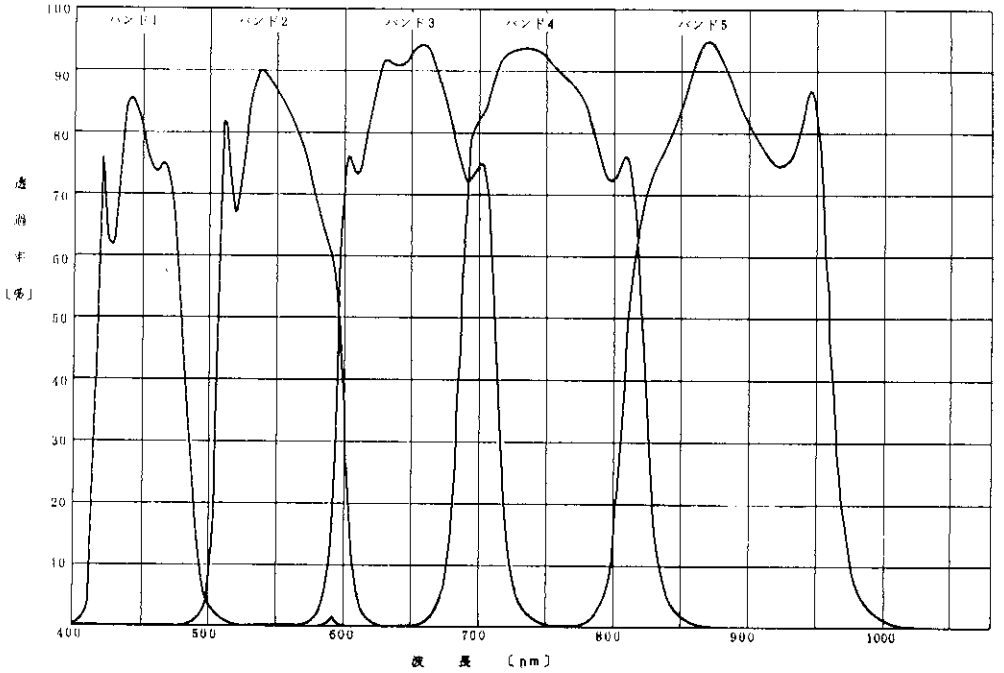


図 4.11 各バンドフィルタ分光透過率

Fig. 4.11 Spectral transmissivity of each band-pass filter of five spectral bands.

の測定結果を式(3.5)に代入して求める.

なお, このようにして得た検知器の分光感度$D_a(\lambda)$は, 標準検知器の分光感度$D_s(\lambda)$のピークを1とする相対分光感度となるが, 式(3.7)における$D_a(\lambda)$, $D_a(\lambda)$は, 同一検知部出力により得たものであり, 各々を除することによりヘッド部～集光部間の分光透過率$T_a(\lambda)$の値が求まることから, $D_a'(\lambda)$, $D_a(\lambda)$は絶体値, 相対値の何れでもよいことがわかり, 問題はない.

図4.12～図4.16に各バンド検知部の分光感度 $D_1(\lambda)$, $D_2(\lambda)$, $D_3(\lambda)$, $D_4(\lambda)$, および$D_5(\lambda)$を示す.

なお, 参考までに標準検知器の相対分光感度$D_a(\lambda)$を図4.17に示す.

また, 標準検知器による補正係数$\sigma_s(\lambda)$を表4.2に示す.

4.3 ヘッド部に光を集光した時の検知部の分光感度($D_a'(\lambda)$)

3.3.3に述べた要領で, 検知器の出力電圧$V_a'(\lambda)$を測定し, これに補正係数$\sigma_s(\lambda)$を乗じて求める.

図4.18～4.22にバンド1～5のヘッド部に光を集光した時の検知部の分光感度$D_1'(\lambda)$, $D_2'(\lambda)$, $D_3'(\lambda)$, $D_4'(\lambda)$および$D_5'(\lambda)$を示す.

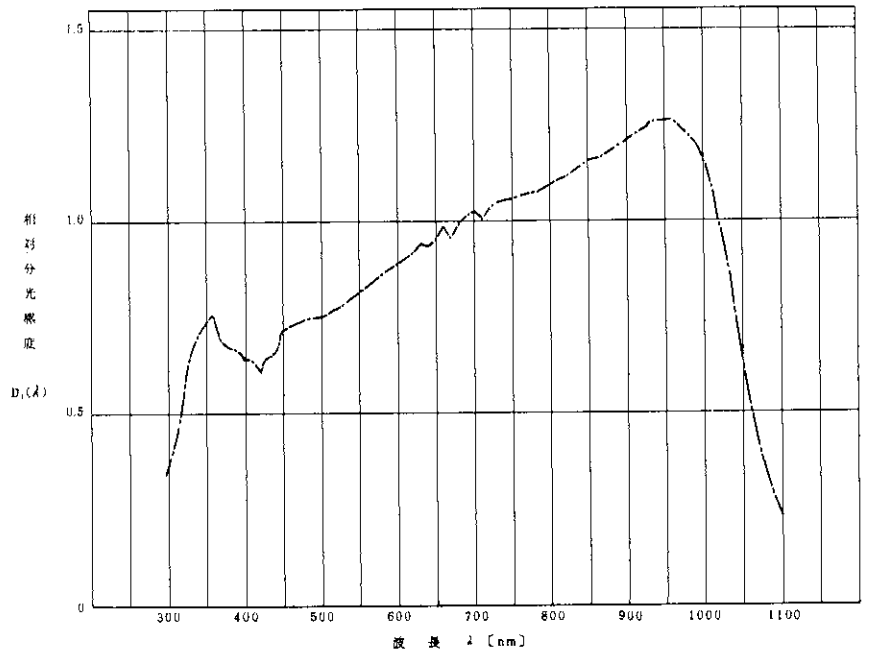


図 4.12　バンド 1，検知部分光感度 $D_1(\lambda)$

Fig. 4.12　Spectral sensitivity of the detector of band 1 : $D_1(\lambda)$.

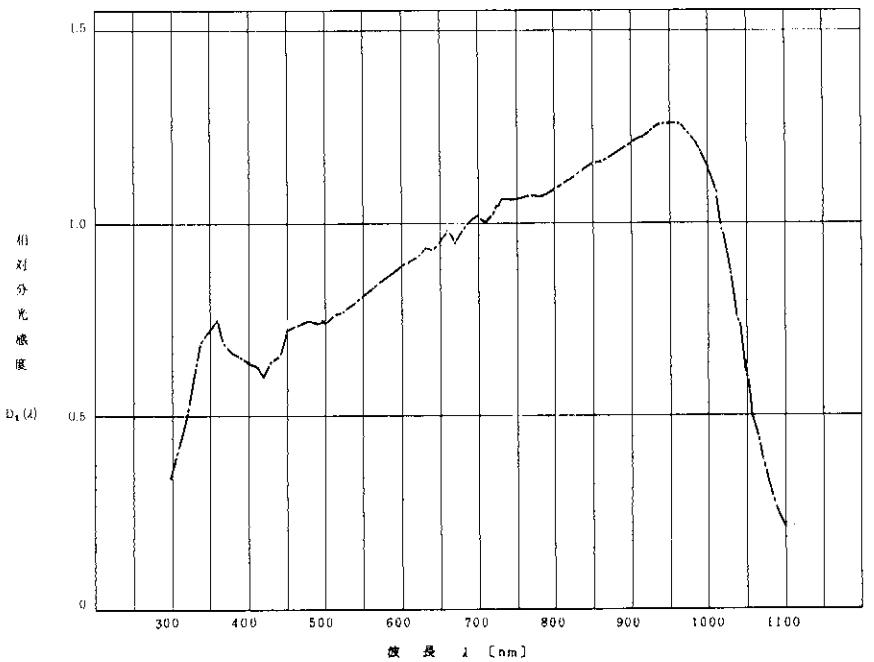


図 4.13　バンド 2，検知部分光感度 $D_2(\lambda)$

Fig. 4.13　Spectral sensitivity of the detector of band 2 : $D_2(\lambda)$.

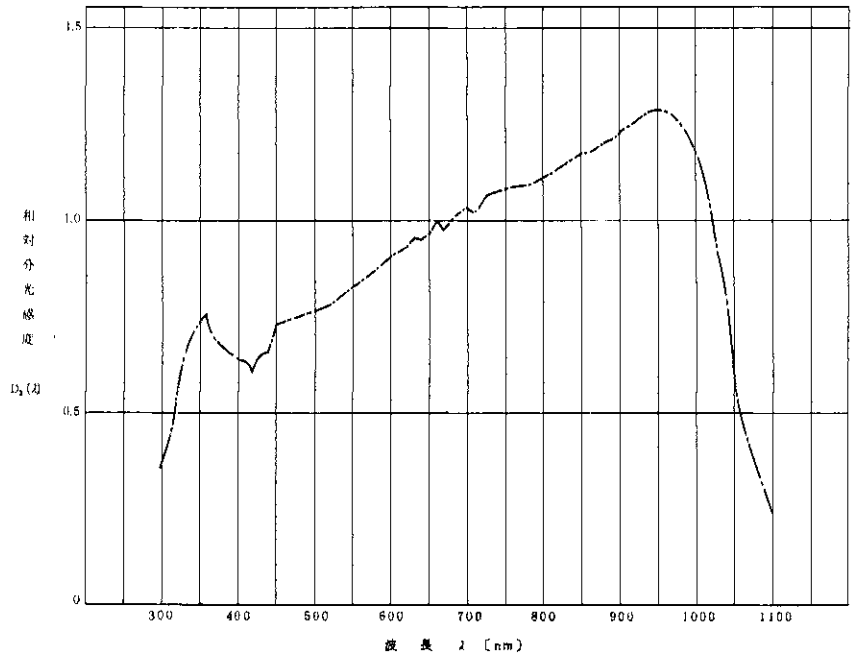


図 4.14　バンド 3，検知部分光感度 $D_3(\lambda)$

Fig. 4.14　Spectral sensitivity of the detector of band 3 : D_3 (λ).

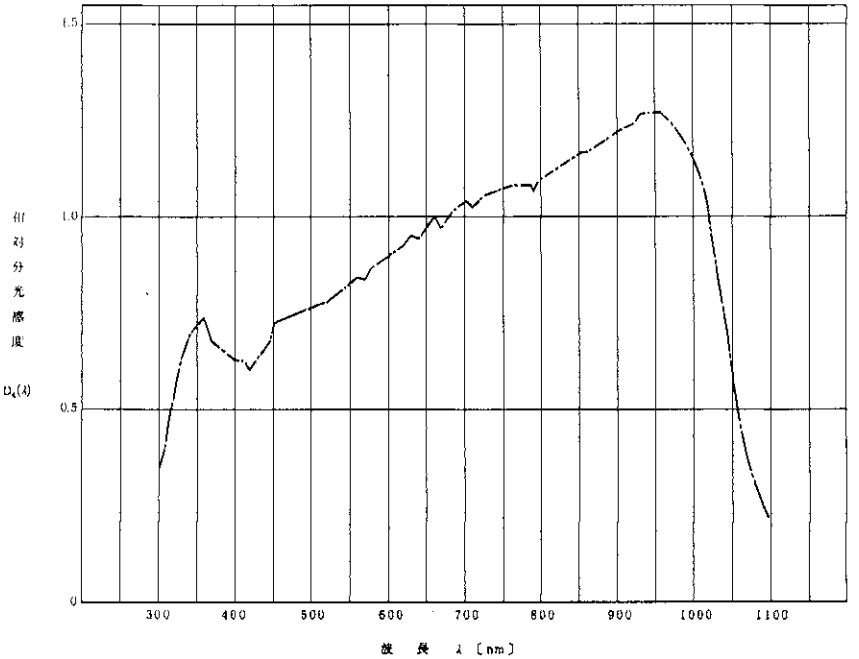


図 4.15　バンド 4，検知部分光感度 $D_4(\lambda)$

Fig. 4.15　Spectral sensitivity of the detector of band 4 : D_4 (λ).

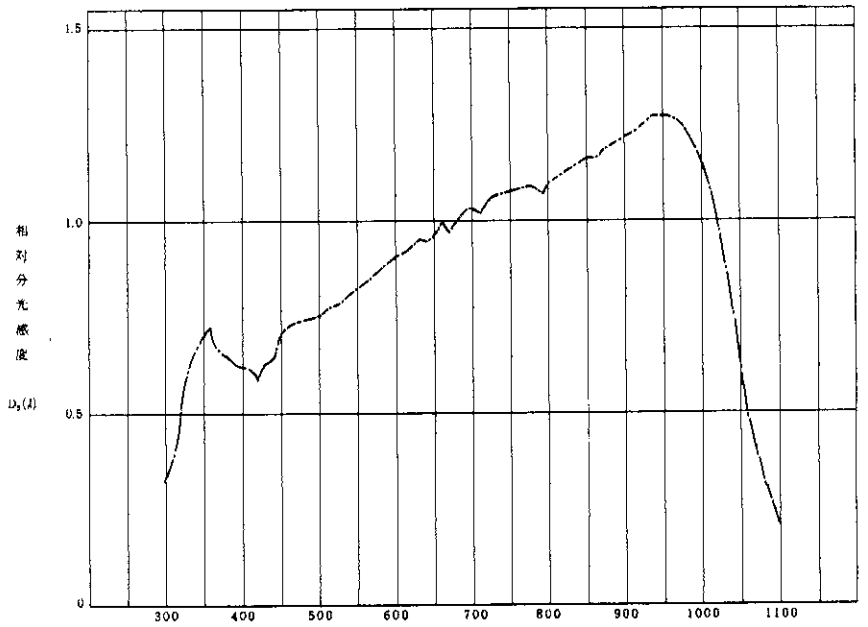


図 4.16　バンド 5，検知部分光感度 $D_5(\lambda)$

Fig. 4.16　Spectral sensitivity of the detector of band 5 : D_5 (λ).

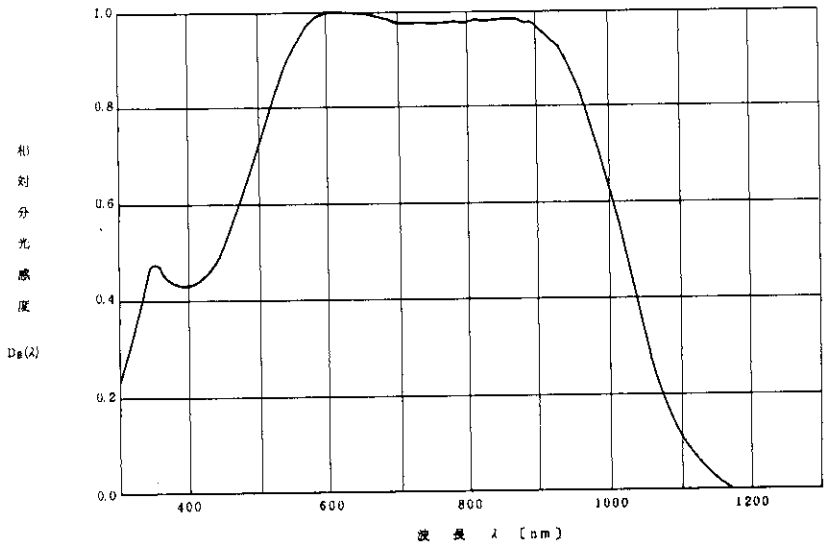


図 4.17　標準検知器分光感度

Fig. 4.17　Spectral sensitivity of the detector of standard spectrophotometer.

表 4.2 補正係数 $\sigma_s(\lambda)$

Table 4.2 Corrective coefficientσs (λ) used for determining spectral sensitivity of the detector in each channel.

λ〔nm〕	$\sigma_s(\lambda)$〔1/mV〕	λ〔nm〕	$\sigma_s(\lambda)$〔1/mV〕	λ〔nm〕	$\sigma_s(\lambda)$〔1/mV, 1/V〕	λ〔nm〕	$\sigma_s(\lambda)$〔1/mV, 1/V〕
300	0.0996	510	0.0453	720	0.0015	930	0.4212 1/V
310	0.1145	520	0.0347	730	0.0015	940	0.3974
320	0.1294	530	0.0271	740	0.0014	950	0.3786
330	0.1532	540	0.0215	750	0.0013	960	0.3633
340	0.1664	550	0.0172	760	0.0012	970	0.3476
350	0.1738	560	0.0139	770	0.0011	980	0.3348
360	0.1806	570	0.0114	780	0.0011	990	0.3249
370	0.1673	580	0.0094	790	0.0010	1000	0.3185
380	0.1671	590	0.0078	800	0.00098	1010	0.3119
390	0.1656	600	0.0065	810	0.00094	1020	0.00030 1/mV
400	0.1692	610	0.0055	820	0.00090	1030	0.000296
410	0.1964	620	0.0047	830	0.00086	1040	0.000289
420	0.1720	630	0.0041	840	0.00081	1050	0.000279
430	0.1818	640	0.0035	850	0.00076	1060	0.000269
440	0.1696	650	0.0031	860	0.00070	1070	0.000271
450	0.1593	660	0.0028	870	0.00065	1080	0.000269
460	0.1338	670	0.0024	880	0.00060	1090	0.000269
470	0.1143	680	0.0022	890	0.00055	1100	0.000270
480	0.0932	690	0.0020	900	0.00051		
490	0.0730	700	0.0018	910	0.4728 1/V		
500	0.0558	710	0.0016	920	0.4425		

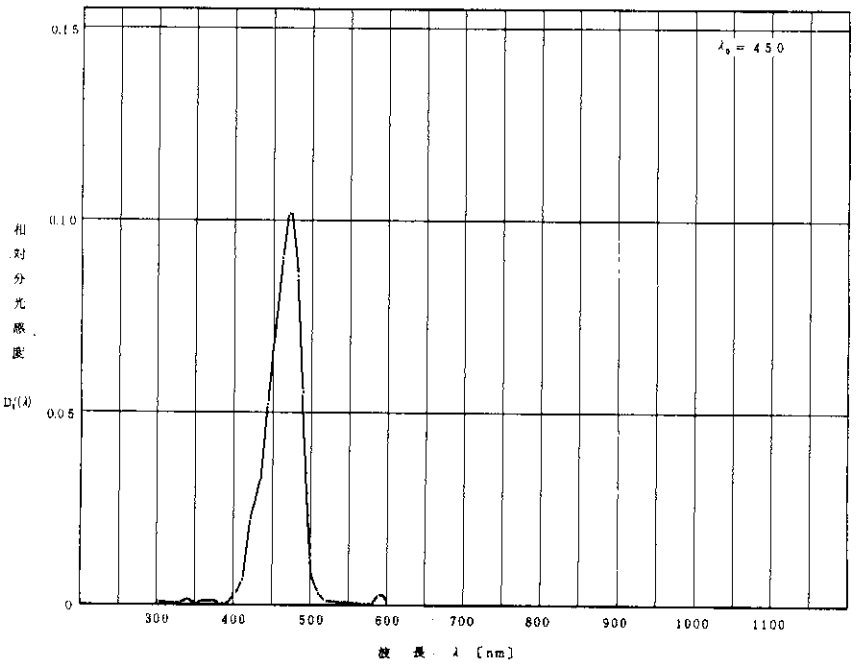


図 4.18 バンド1，ヘッド部に光を集光した時の検知部の分光感度 $D_1'(\lambda)$

Fig. 4.18 Spectral sensitivity of the detector of band 1 determined through optical fiber system : D'_1 (λ).

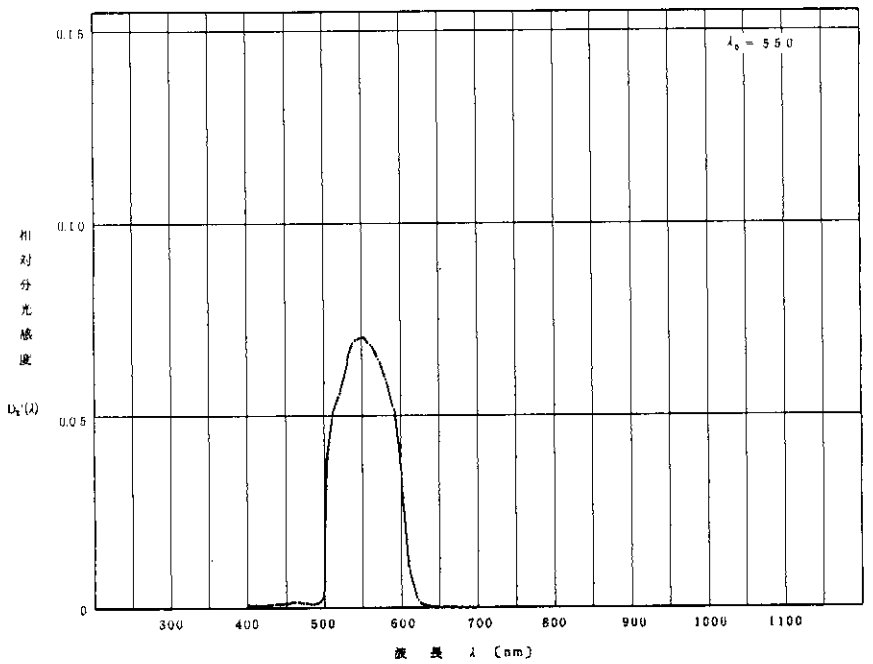


図 4.19　バンド 2，ヘッド部に光を集光した時の検知部の分光感度 $D_2'(\lambda)$

Fig. 4.19　Spectral sensitivity of the detector of band 2 determined through optical fiber system : D'_2 (λ).

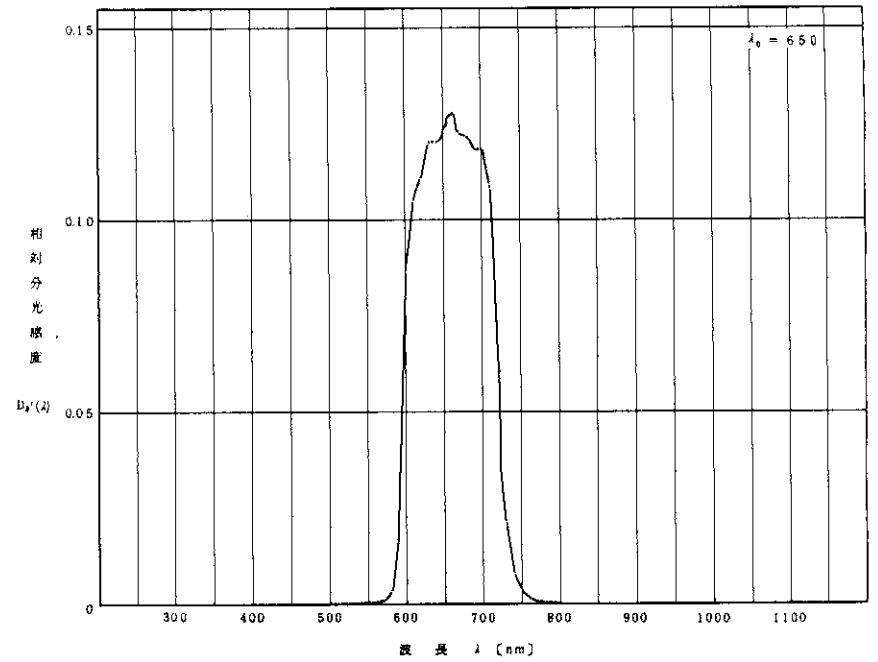


図 4.20　バンド 3，ヘッド部に光を集光した時の検知部の分光感度 $D_3'(\lambda)$

Fig. 4.20　Spectral sensitivity of the detector of band 3 determined through optical fiber system : D'_3 (λ).

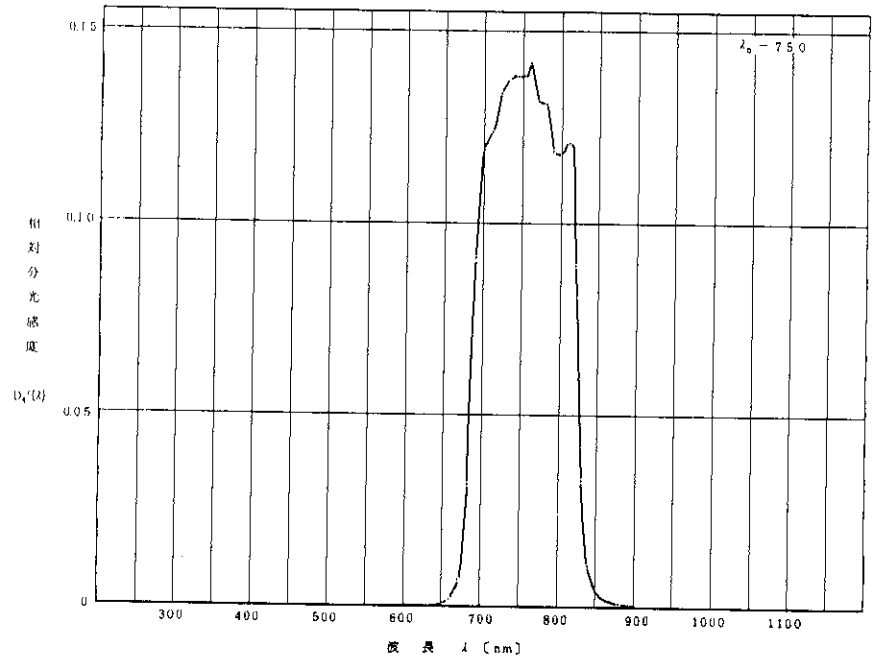


図 4.21　バンド4，ヘッド部に光を集光した時の検知部の分光感度 $D_4'(\lambda)$

Fig. 4.21　Spectral sensitivity of the detector of band 4 determined through optical fiber system : D'_4 (λ).

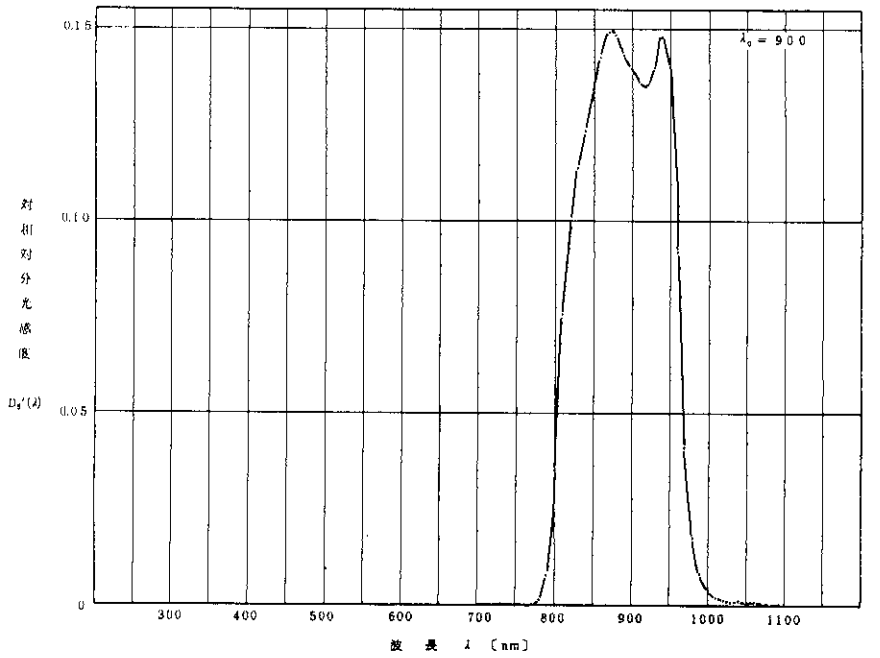


図 4.22　バンド5，ヘッド部に光を集光した時の検知部の分光感度 $D_5'(\lambda)$

Fig. 4.22　Spectral sensitivity of the detector of band 5 determined through optical fiber system : D'_5 (λ).

4.4　ヘッド部～集光部間の分光透過率（$T_a(\lambda)$）

3.3.4の要領に基づき算出したバンド1～5の分光透過率T_1，T_2，T_3，T_4及びT_5を表4.3～4.7に示す．

4.5　ヘッド部～集光部間の平均透過率（$\overline{T}_a$）

3.3.5の要領にもとづき算出したバンド1～5のヘッド部～集光部間の平均透過率$\overline{T}_1$，$\overline{T}_2$，$\overline{T}_3$，$\overline{T}_4$および$\overline{T}_5$を表4.8に示す．

また，表4.3～4.7に$\overline{T}_a$算出に当って用いた検知部の分光感度$D_a(\lambda)$およびヘッド部に光を集光した時の検知部の分光感度$D_a'(\lambda)$のサンプリング値から$\overline{T}_a$に至る算出過程を示す．

4.6　ファイバ部の平均透過率（$\overline{U}_a$）

4.1における集光部の平均透過率$\overline{S}_a$，および4.5におけるヘッド部～集光部間の平均透過率$\overline{T}_a$の各試験結果を式(3.13)に代入し，ファイバ部の平均透過率$\overline{U}_a$を算出する．算出結果を表4.9に示す．

5.　評価

以上示した過程により，可視近赤外域光ファイバ光学系の平均透過率の試験を行った．

n	λ〔nm〕	$D_1(\lambda)$	$D_1'(\lambda)$	$\frac{T_1(\lambda)}{(=D_1'/D_1)}$
0	400	0.6413	0.0027	0.0042
1	410	0.6363	0.0063	0.0099
2	420	0.6054	0.0214	0.0353
3	430	0.6699	0.0311	0.0464
4	440	0.6747	0.0476	0.0705
5	450	0.7337	0.0731	0.0996
6	460	0.7235	0.0839	0.1160
7	470	0.7424	0.1022	0.1377
8	480	0.7470	0.0839	0.1123
9	490	0.7479	0.0418	0.0559
10	500	0.7481	0.0113	0.0151

表4.3　バンド1，ヘッド部～集光部間の分光透過率$T_1(\lambda)$

Table 4.3　Spectral transmissivity of band 1 (400-500μm) : $T_1(\lambda)$.

但し，$\lambda = 400 + n\triangle\lambda$，$\triangle\lambda = 10$nm

平均透過率：

$$\overline{T}_1 = K \cdot \frac{\sum_{n=0}^{10} T_1(\lambda)}{11} \times 100$$

$$= 4.56 \times 6.38 = 29.09 \quad (\%)$$

n	λ[nm]	$D_2(\lambda)$	$D_2'(\lambda)$	$T_2(\lambda)$ $(=D_2'/D_2)$
10	500	0.7451	0.0095	0.0127
11	510	0.7588	0.0498	0.0656
12	520	0.7658	0.0552	0.0721
13	530	0.7794	0.0634	0.0813
14	540	0.7951	0.0692	0.0870
15	550	0.8118	0.0697	0.0859
16	560	0.8257	0.0680	0.0824
17	570	0.8435	0.0645	0.0765
18	580	0.8581	0.0586	0.0683
19	590	0.8750	0.0516	0.0590
20	600	0.8874	0.0343	0.0387

表 4.4 バンド2，ヘッド部～集光部間の分光透過率 $T_2(\lambda)$

Table 4.4 Spectral transmissivity of band 2 (500-600μm) : $T_2(\lambda)$.

但し，$\lambda = 400 + n\triangle\lambda$，$\triangle\lambda = 10\,nm$

平均透過率：

$$\overline{T}_2 = K \cdot \frac{\sum_{n=10}^{20} T_2(\lambda)}{11} \times 100$$

$$= 4.56 \cdot 6.63 = 30.23 \quad (\%)$$

n	λ[nm]	$D_3(\lambda)$	$D_3'(\lambda)$	$T_3(\lambda)$ $(=D_3'/D_3)$
20	600	0.9042	0.0860	0.0951
21	610	0.9161	0.1055	0.1152
22	620	0.9293	0.1112	0.1197
23	630	0.9537	0.1206	0.1265
24	640	0.9471	0.1202	0.1269
25	650	0.9622	0.1233	0.1281
26	660	0.9982	0.1277	0.1280
27	670	0.9701	0.1223	0.1261
28	680	1.0023	0.1216	0.1213
29	690	1.0232	0.1182	0.1155
30	700	1.0343	0.1185	0.1146

表 4.5 バンド3，ヘッド部～集光部間の分光透過率 $T_3(\lambda)$

Table 4.5 Spectral transmissivity of band 3 (600-700μm) : $T_3(\lambda)$.

但し，$\lambda = 400 + n\triangle\lambda$，$\triangle\lambda = 10\,nm$

平均透過率：

$$\overline{T}_3 = K \cdot \frac{\sum_{n=20}^{30} T_3(\lambda)}{11} \times 100$$

$$= 4.56 \cdot 11.97 = 54.58 \quad (\%)$$

n	λ〔nm〕	$D_4(\lambda)$	$D_4'(\lambda)$	$T_4(\lambda)$ $(=D_4'/D_4)$
30	700	1.0381	0.1191	0.1147
31	710	1.0200	0.1235	0.1211
32	720	1.0475	0.1333	0.1273
33	730	1.0610	0.1379	0.1300
34	740	1.0721	0.1398	0.1304
35	750	1.0705	0.1379	0.1288
36	760	1.1002	0.1390	0.1263
37	770	1.0702	0.1330	0.1243
38	780	1.0821	0.1291	0.1193
39	790	1.0667	0.1183	0.1109
40	800	1.1018	0.1175	0.1066

表 4.6　バンド4，ヘッド部～集光部間の分光透過率 $T_4(\lambda)$

Table 4.6　Spectral transmissivity of band 4 (700-800μm) : $T_4(\lambda)$.

但し，$\lambda = 400 + n\triangle\lambda$，$\triangle\lambda = 10$ nm

平均透過率：

$$\overline{T}_4 = K \cdot \frac{\sum_{n=0}^{40} T_4(\lambda)}{11} \times 100$$

$$= 4.56 \cdot 12.18 = 55.54 \quad (\%)$$

n	λ〔nm〕	$D_5(\lambda)$	$D_5'(\lambda)$	$T_5(\lambda)$ $(=D_5'/D_5)$
40	800	1.1011	0.0344	0.0312
41	810	1.1116	0.0754	0.0678
42	820	1.1236	0.0999	0.0889
43	830	1.1408	0.1136	0.0996
44	840	1.1508	0.1232	0.1071
45	850	1.1648	0.1338	0.1149
46	860	1.1605	0.1427	0.1230
47	870	1.1805	0.1488	0.1260
48	880	1.1942	0.1481	0.1240
49	890	1.2040	0.1431	0.1189
50	900	1.2209	0.1395	0.1143
51	910	1.2307	0.1361	0.1106
52	920	1.2421	0.1349	0.1086
53	930	1.2653	0.1397	0.1104
54	940	1.2673	0.1477	0.1165
55	950	1.2683	0.1402	0.1105
56	960	1.2665	0.0916	0.0723
57	970	1.2496	0.0406	0.0325
58	980	1.2254	0.0164	0.0134
59	990	1.1921	0.0071	0.0060
60	1000	1.1491	0.0035	0.0030

表 4.7　バンド5，ヘッド部～集光部間の分光透過率 $T_5(\lambda)$

Table 4.7　Spectral transmissivity of band 5 (800-1000μm) : $T_5(\lambda)$.

但し，$\lambda = 400 + n\triangle\lambda$，$\triangle\lambda = 10$ nm

平均透過率：

$$\overline{T}_5 = K \cdot \frac{\sum_{n=40}^{60} T_5(\lambda)}{21} \times 100$$

$$= 4.56 \cdot 8.57 = 39.08 \quad (\%)$$

バンドa	使用波長域〔nm〕	平均透過率 Ta(%)
1	400～500	29.09
2	500～600	30.23
3	600～700	54.58
4	700～800	55.54
5	800～1000	39.08

表 4.8 ヘッド部～集光部間平均透過率 ($\overline{T}_a$)

Table 4.8 Synthetic transmissivity in each channel of the optical fiber system : $\overline{T}a$.

バンドa	使用波長域〔nm〕	$\overline{S}a$〔%〕	$\overline{T}a$〔%〕	$\overline{U}a$〔%〕
1	400～500	64.7	29.09	44.96
2	500～600	70.1	30.23	43.12
3	600～700	74.3	54.58	73.46
4	700～800	75.7	55.54	73.37
5	800～1000	76.1	39.08	51.35

表 4.9 ファイバ部の平均透過率 ($\overline{U}_a$)

Table 4.9 Transmissivity of fiber bundle in each channel of the optical fiber system : $\overline{U}a$.

但し, $\overline{U}a = \overline{T}a / \overline{S}a \times 100$

表 5.1 可視・近赤外域光ファイバ光学系の平均透過率

Table 5.1 Summarized results on transmissivities of the optical fiber system with 5 visible and near infrared bands.

バンドa	使用波長域〔nm〕	ファイバ部平均透過率 $\overline{U}a$〔%〕	集光部平均透過率 $\overline{S}a$〔%〕	光ファイバ光学系総合平均透過率 $\overline{T}a$〔%〕	
				試験結果	設計目標
1	400～500	44.96	64.7	29.09	25.0
2	500～600	43.12 (48.51)	70.1	30.23 (34.01)	30.0
3	600～700	73.46	74.3	54.58	29.0
4	700～800	73.37	75.7	55.54	28.0
5	800～1000	51.35 (57.77)	76.1	39.08 (43.97)	27.0

○ $\overline{T}a = \left(\frac{\overline{U}a}{100} \cdot \frac{\overline{S}a}{100}\right) \times 100$ 〔%〕

○ ( ) 内はファイバ断線 (バンド2,5) なき場合の平均透過率推定値。

表5.1に各バンドの可視近赤外光ファイバ光学系平均透過率 $\overline{T}a$ の結果および設計目標値と, 構成要素である光ファイバ部の平均透過率 $\overline{U}a$ および集光部の平均透過率 $\overline{S}a$ を示す.

表5.1に示すように, 光ファイバ光学系総合平均透過率は, 当初ファイバ素材が多成分系であるため短波長側での特性確保に不安があったが, 各バンドとも設計目標値を上まわる結果を得ることができた.

これは各バンドの集光部におけるレンズ表面に波長域に応じて最適な無反射コーティングを施した結果, 図4.18～図4.22に示したように, 各バンドの波長域において高い透過率を得ることができたためと思われる.

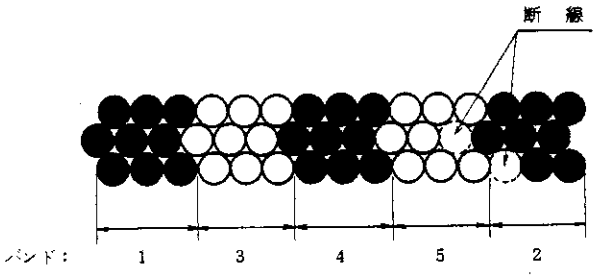


図 5.1　ファイババンドルの断線状況とバンド割当て
Fig. 5.1　Fiber breaking condition in the arrayed five bundles and assignment of the breaked fibers to the channels of band 2 and band 5.

なお，1及び2項の光ファイバ光学系設計・試作においても触れたように，光ファイババンドル製造に当っては，ファイバ素線が細いため断線し易く，そのためファイバのバンドル配列を六方稠密とし，細心の注意を払って製造を行った(6回試作)がそれでもなおファイバ断線は皆無とはならず，ファイバ素線9本×5バンド＝45本中2本断線の止む無きに至った．

この断線の様子は図5.1の如くであり，これは今回の試験に先立ち，予め確認することができたため，ファイバ部での減衰が予想された波長域400～500 nmのバンド1を断線のないチャンネルに割当てることにした．

この結果，表5.1に示すようにバンド1において，総合平均透過率の設計目標25.0％であるところ試験結果29.09％となり，設計目標を達成することができたが十分な余裕をもってクリアしたとはいい難く，仮にバンド1を断線のあるチャンネルに割当てた場合，本来9本あるべき素線が8本となるため，平均透過率の試験結果29.09％は，29.09×8／9＝25.86％となることが予想され，設計目標をやっと達成するクリティカルな状況であることが明らかとなった．

本来ならば，ファイバの断線は皆無であることが前提であるため，以上の議論は無用であるが，図らずもファイバ断線の影響がクリティカルに現われる状況が確認できた点で意義あると思われ，あえて取上げた．

写真5.1にヘッド部入射側光ファイババンドル端面の顕微鏡写真を示す．

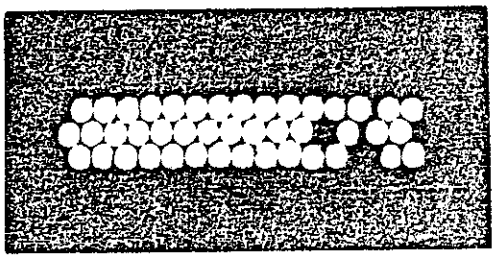


写真 5.1　光ファイババンドル端面
Photo. 5.1　Cross section of an optical fiber bundle.

また，参考まで断線なき場合の各平均透過率の推定値を表5.1に併記した．

6. まとめ

以上報告したように，可視近赤外域光ファイバ光学系の試験を行って，平均透過率の評価を行い，所期の設計目標値の達成を確認することができた．

その結果，火山専用空中赤外映像装置の可視近赤外光学系を光ファイバ化できる見通しを得ることができた．

また，以上から本光ファイバ光学系の設計が適切なものであったことも確認することができた．

しかしながら，光ファイバの製造においては，6回に及ぶ試作を繰り返したにもかかわらず，ファイバ素線の断線が皆無にならなかったという事実も今回の試験で明らかになり，手作業によるファイバのバンドル化作業の限界を知ることにもなった．

今回の試験においては，ファイバ素線の断線のあったチャンネルをファイバの透過率の高い波長バンドに割り当て，切断による透過損失をカバーしたため，実害はなく，また，このまま装置に使用することも可能であると思われるが，製造技術的にはいま一歩の改善要素を残すことになった．

火山専用空中赤外映像装置実機への採用に当っては，性能の他部品の安定供給も重要な要素であり，そのため今後，実機製作までに基本的に，歩留の高い，すなわちファイバ素線の断線確率の低い製造プロセスについて製造治具の開発をも含めた見直しをする必要があり，また実機の運用時の断線に対する検討もする必要がある．従って，実機製作の段階で次の点も更に検討すべき課題と考えられる．

(1) 細いファイバのバンドルに替えて，単繊維のファイバによる信頼度の向上，但しこの場合(φ 150 cm のファイバを用いる)瞬時視野の地上投影像は円形となる．

(2) 光ファイバ光学系の単体の機械強度試験．

(3) 実機に組み込んだ状態でファイバ部にストレスの加わらないような保持構造の設計．

一方，1及び5チャンネルのバンドパスフィルタの分光帯域が指定帯域より少し狭小であった点について補足説明を加える．本光学系に使用するバンドパスフィルタは，シャープな特性を得るため，高屈折率膜と低屈折率膜を多層に組合せ，対称形に配置した多層膜をガラスに蒸着するファブリーペロー形フィルタを採用している．今回は多層膜の組合せを共通化し，各バンドの中心波長に合わせて膜厚を変えたために，帯域は理論上，1及び5バンドで約14%と若干狭くなっていたが，製造上のバラツキが加わり，実測としては，1バンドで35%，5バンドで25%減という結果となった．

この問題は各バンド毎の最適設計により改善できる．

参　考　文　献

1）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(1984a)：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**，1～106.

2）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(1984b)：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**，1～40.

(1985年7月22日　原稿受理)