

# 航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-1024

リニアセンサを用いたプッシュブルーム走査型放射計の特性

本間幸造・奥石 肇・中正夫

1989年6月

航空宇宙技術研究所  
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

# リニアセンサを用いたプッシュブルーム走査型放射計の特性\*

本 間 幸 造\*\* 興 石 肇\*\*\* 中 正 夫\*\*

## Characteristics of Pushbroom Scanning Type Radiometer Utilizing Linear Sensors

Kohzo HOMMA, Hajime KOSHIISHI  
and Masao NAKA

### ABSTRACT

It is anticipated that the pushbroom scanning scheme will be used very widely in future airborne and spaceborne imaging spectrometers for remote sensing, because of its potential capability for high resolution and high reliability. At NAL we have produced, for test purposes, two pushbroom imaging spectrometers, one for aircraft and the other for spacecraft. Both utilize a CCD linear array for the opto-electronic sensor elements. This is the first attempt to apply the pushbroom scan scheme to airborne spectrometers (customary spectrometers have used a mechanical scan scheme).

In our attempt, small refracting optics (lens system) were used to get a very wide viewing angle. The optics were able to collect sufficient radiative energy. The dimensions of this airborne spectrometer system are very small compared to the customary systems, which have to have very large dimensions. For the spaceborne spectrometer we applied a sort of cata-dioptic (reflect-refractive) optics, the so called Wright-Schmidt telescope, as the collecting optics. This telescope has not such a wide viewing angle, but has very high resolution and a planar focal plane (a usual Schmidt telescope has a spherical focal plane). This planar focal plane is a necessary condition for a CCD sensor arrangement. This utilization of cata-dioptic optics for imaging spectrometer is also the first attempt in a spaceborne imaging spectrometer. If we use the usual lens system for the collecting optics, the system dimension and weight will be huge because of the long focal length and large aperture.

The optical performances of collecting optics for these airborne and spaceborne imaging spectrometers, the opto-electronic characteristics of the CCD linear array, and the performances of the electronics were measured and analyzed. Then the total performances of the airborne and spaceborne spectrometers were measured. As a result, some problem areas for such future airborne and spaceborne pushbroom scanning radiometers were clarified. One of the most important points which affect system performances is the blur characteristics of the CCD linear sensor array. On the spaceborne spectrometer, degradation of the modulation transfer function of the collecting optics at the end of the viewing angle is a critical issue.

---

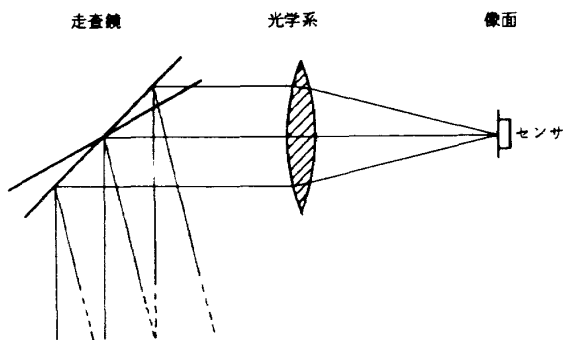
\* 平成元年 4 月 28 日 受付

\*\* 数理解析部

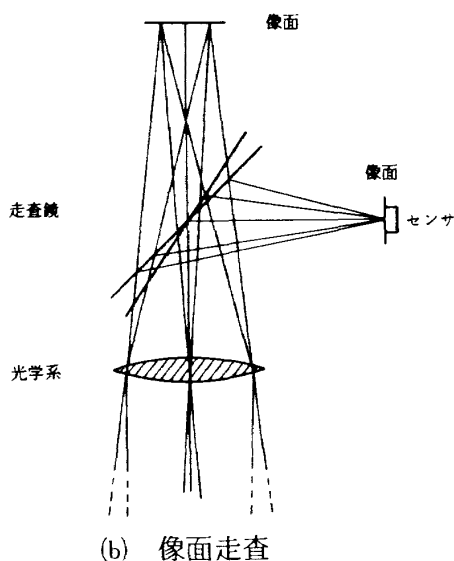
\*\*\* 制御部

## 1. ま え が き

人工衛星や航空機からのリモートセンシングに用いられるイメージング・スペクトロメータは、その画像情報を得るために何らかの走査を必要とする。走査方式は対物面走査と像面走査に分けられる。また別の観点から機械式走査と電子式走査に分けられるが、これは前者の分け方のそれぞれに密接に関連している。対物面走査は図1-1に示すように走査鏡の回転または振動によって走査を行うもので、機械的走査機構を必要とする。この場合には光軸附近のみを用いるので集光系の画角は極めて狭いものでよい。光学系は画角が広い程難しくなるので、機械式走査による対物面走査では集光系は、設計製作上大きな困難を与えるものではない。



(a) 対物面走査



(b) 像面走査

図1-1 走査方式

一方、像面走査では対称とする全域が像面上に結像していなければならないので、走査したい領域が広い場合には、それに応じて広い画角の光学系を必要とする。走査は図1-2に示すように、像面に画素数だけのセンサ素子を配列し電子的に行われる。この方式は、プッシュブルーム(Push-broom)方式とも呼ばれる。この方式ではプラットフォームの運動が画像の一軸方向の走査を受持ち、他方の軸は電子走査により行われる。プッシュブルーム方式はSPOTのHRV、MOS-1のMESSR、インドの地球観測衛星IRSのイメージング・スペクトロメータに用いられている。その他開発中のものは幾つか挙げられる。

プッシュブルーム方式のイメージング・スペクトロメータは、走査機構を必要としない代わりに広画角の光学系を必要とする。屈折光学系では、10[度]前後の画角を実現することは比較的容易であるが、反射光学系ではそれ程容易ではなく、反射屈折光学系を用いるのが一つの解決策である。屈折光学系では色収差を伴うのでその補正が困難になる場合もあり、広い波長域で働くスペクトロメータを製作することは難しくなる。またプッシュブルーム方式では一画素からのエネルギーを積分する時間は可成り長くなる(通常 msec のオーダー)

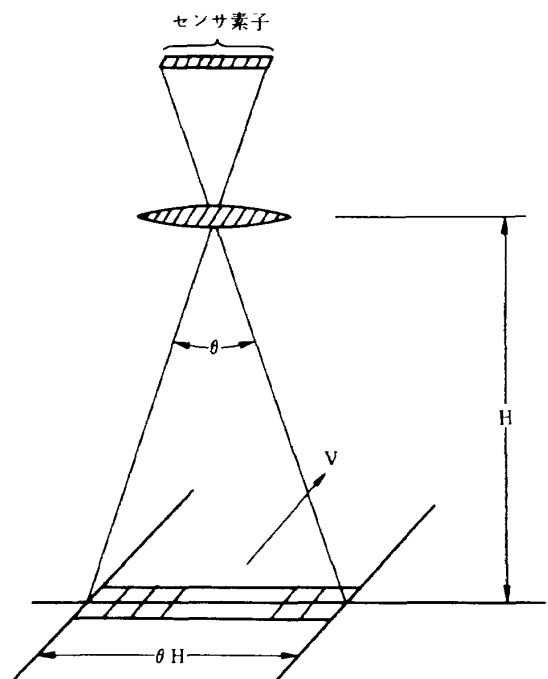


図1-2 プッシュブルームによる像面走査

ので、センサ素子の感度は機械的走査の場合に比して低くてもよい。一方、多数のセンサ素子の感度にはばらつきがあり、時には分光特性にもばらつきが見られ、このことから校正の困難さを生じる。

以上述べたようにプッシュブルーム方式による像面走査では、信号積分時間において従来の方式の  $\mu\text{sec}$  オーダから  $\text{msec}$  オーダへと格段に増大するので、開発上の種々の問題点はあるにしても、将来の高分解能のイメージング・スペクトロメータの走査方式としては集光される地上からの放射エネルギーが小さいために積分時間を長くすることが第一義的に重要になるのでそのことが最優先の技術課題になり、今後の宇宙からの光学的観測装置には広く用いられて行くものと思われる。

我々は航空機搭載と人工衛星搭載を考えて、光学系と CCD (Charge Coupled Device) センサ素子を組合せたプッシュブルーム走査型放射計を試作した。このプッシュブルーム走査型放射計の光学系としては各種考えられるが、画角が広く、集光能力が良く、小型、軽量で割合製作が容易と思われる屈折型と、画角は広くとれないが、収差の面ですぐれている反射屈折型の2種類を取上げてみた。試作放射計は、感度偏差、空間分解能、干渉等の各種特性を測定することにより評価を行った。

以下では、試作したプッシュブルーム走査型放射計の構成と光学系、CCD センサ素子、CCD 駆動装置について記し、その後特性の測定方法、評価結果について報告する。

## 2. プッシュブルーム走査型放射計

プッシュブルーム走査方式では信号積分時間が格段に大きいので、集光系の口径も原理的には小さくてすむが、将来、より高い分解能(波長・空間)を要求されるようになれば、それなりに大きな口径を必要とすることになる。このような要求が生じたとき、もはやレンズを重ねた屈折系でシステムを構成することは困難である。SPOTのHRVも初期設計では屈折系で考えていたが、色収差を解決するために大口径のレンズを多数重ねることになり、結局、後述の反射屈折光学系を用いるこ

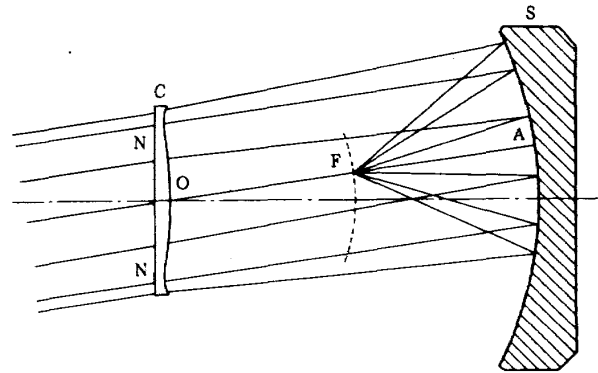


図2-1 シュミット光学系の原理

とになった。

反射鏡には色収差がないが、一般には画角は極めて小さい。この解決策として反射屈折光学系の一つ、シュミット (Schmidt) 光学系がある。これは図2-1に示すように、主鏡である球面鏡の曲率中心の位置に球面収差補正用の非球面レンズCを置いたものである。このCは補正板 (Correcting Plate : C.P.) と呼ばれ、同時に絞りの役目もしている。これにより斜めからの入射光線は主光線OAに対して上下対称になり、コマ収差も非点収差も生じさせない。焦点距離はOFで像面Fは球面である。この像面上では球面収差、コマ収差、非点収差のいずれもない理想的な像が得られる。画角も  $\pm 4$  [度] は比較的容易に得られる。SPOTのHRVはイメージング・スペクトロメータとしてこのシュミット光学系を用いた最初の例である。

航空機および人工衛星搭載を考慮したプッシュブルーム走査型放射計の試作に際しては、それぞれの基本的な仕様を決定し、それに基づいた構成をすることが必要である。以下にこれら放射計の基本仕様、そして構成と機能について概要を述べる。

### 2.1 放射計の基本仕様

プッシュブルーム走査型放射計を試作するに当たっては、航空機高度からの観測と人工衛星高度からの観測を念頭においた。そしてその基本要素として、従来用いられている放射計の仕様を参考にして観測高度、地上における瞬時視野、地上における走査幅などを次のように設定した。

表 2-1 プッシュブルーム走査型放射計の仕様

項 目		性 能 ・ 規 格	
光 学 部	光 学 系	形 式	35[mm] カメラレンズ
		焦点距離	100 [mm]
光 学 部	分 光 系	口径	49 [mm]
		画角	±12[度] 以下
C C D お よ び 駆 動 装 置	CCD センサ素子	明 る さ	F2.8
		重 量	265 [g]
C C D お よ び 駆 動 装 置	分 光 系	反 射 屈 折 (人工衛星用)	ライトシュミット
		方 式	多層薄膜フィルター
C C D お よ び 駆 動 装 置	CCD センサ素子	波 長 帯 域	バンド 1; 450~ 550 [nm] バンド 2; 700~ 800 [nm] バンド 3; 900~1000 [nm]
		型 名	CCD143ADC×2 個
C C D お よ び 駆 動 装 置	駆 動 ・ 増 幅 器	画 素 数	2048画素/バンド
		画素の受光面	8 [μm]×13 [μm]
C C D お よ び 駆 動 装 置	駆 動 ・ 増 幅 器	飽和露光レベル	0.67 [μJ/cm <sup>2</sup> ]
		積 分 時 間	1~ 30 [ms]
C C D お よ び 駆 動 装 置	駆 動 ・ 増 幅 器	読み出し速度	2.5 [μs/画素] 以下
		出力レベル	+0~+5 [V]
C C D お よ び 駆 動 装 置	駆 動 ・ 増 幅 器	周波数帯域	DC~ 4 [MHz] (-3db)
		出力チャンネル	2チャンネル

## 1) 航空機高度からの観測

観測高度	約10,000 [m]
地上における瞬時視野	1 [m]
地上における走査幅	約 2,000 [m]

## 2) 人工衛星高度からの観測

観測高度	約 900 [km]
地上における瞬時視野	約 20 [m]
地上における走査幅	約 100 [km]

以上の基本要件を光学系の面から考えると、先ず航空機高度からの観測では約±12[度]の画角を必要とし、人工衛星高度からの観測では約±3[度]の画角を必要とする。

センサ素子のアパーチャを13 [μm] (我が国で製作されている CCD センサ素子のアパーチャの平均値であり、ここで実際に用いる CCD センサ素子のアパーチャの寸法でもある) とすると、必要とされる光学系の焦点距離はおよそ、100[mm] と480[mm]になる。そこで、航空機高度からの

表 2-2 構想した放射計の観測能力

## 1) 航空機搭載用屈折型放射計

高度 [m]	瞬時視野 [m]	走査幅 [m]
5,000	0.65	1063
7,000	0.91	1488
10,000	1.30	2126

## 2) 人工衛星搭載用反射屈折型放射計

高度 [km]	瞬時視野 [m]	走査幅 [km]
500	13.3	52.4
700	18.7	73.4
900	24.0	94.3

観測用には屈折光学系を、人工衛星高度からの観測用には反射屈折光学系を用いることにし、表2-1に示すように具体的仕様を設定した。

ちなみに、この放射計を用いた場合の観測能力は表2-2のようになる。

## 2.2 構成と機能

試作したプッシュブルーム走査型放射計は、光学系と1次元配列リニアセンサである CCD センサ素子、CCD 駆動装置、マルチバンド化(2チャンネル同時)のためのバンドパスフィルターの4つの部分により構成されている。また光学系部分は、屈折型と反射屈折型がそれぞれ取替え可能とし、CCD センサ素子、CCD 駆動装置、バンドパスフィルター等は、両光学系共に同一のものを使用する。この試作したプッシュブルーム走査型放射計の概略構成図を図2-2に示し、各部分の概略を以下に示す。

### (1) 光学系

光学系は、航空機用としては広画角を要求されることから屈折型を、人工衛星用としては高分解能を要求されることから反射屈折型を用いることとした。そして、屈折光学系は市販されているカメラレンズを、反射屈折光学系はシュミット光学系の一つであるライトシュミット型を選定した。光学系の詳細については3章で述べる。

### (2) バンドパスフィルター

バンドパスフィルターは、マルチバンドの画像情報を光学的に同時に得る為に、3つの波長帯のなかから任意の2バンドを選択して用い、2チャンネル分の出力を同時に得るように構成した。但し特性測定では、3バンドのなかから単バンドのフィルターを選択し用いた。

マルチバンド用フィルターの形状は、半円形をしており2バンド合せて円形となる。これは具体的には図2-3(a)のように像面を半円形に二分し、

それぞれに各バンド用の CCD を配置する構成にした。一方特性測定用単バンドフィルターは図2-3(b)のように円形となっている。

3つの波長帯としては、可視近赤外域を対象とし、リモートセンシングなどでよく使用されている波長450~550[nm], 700~800[nm], 900~1000[nm]の3バンドとした。

### (3) リニア CCD センサ素子

リニアセンサである一次元 CCD センサ素子(以後 CCD センサ素子と略す)は、一般に使用されている2048画素のものを1個あるいは2バンド用として2個を図2-3のように配置して用いる。

### (4) CCD 駆動装置

CCD 駆動装置は、人工衛星や航空機の飛行速度とサンプリング周期の同期をとる基準クロック・分周部、CCD センサ素子の駆動制御と読取り制御を行うリード制御部、および CCD センサ素子のビデオ信号を増幅するビデオ出力加算増幅部の3部で構成され、それぞれ2チャンネル分から成る。

### (5) 機能

プッシュブルーム走査型放射計に入射した光は、概略構成図(図2-2参照)に示すように、屈折あるいは反射屈折光学系を通りバンドパスフィルターで2つのバンドに分割され、それぞれ対応する CCD センサ素子上に結像される。結像された光信号の輝度情報は、その後 CCD センサ素子で電気信号に変換され、2チャンネルのビデオ信号として外部に出力される。

ここで使用される CCD センサ素子の作動は、CCD 駆動装置により制御される。

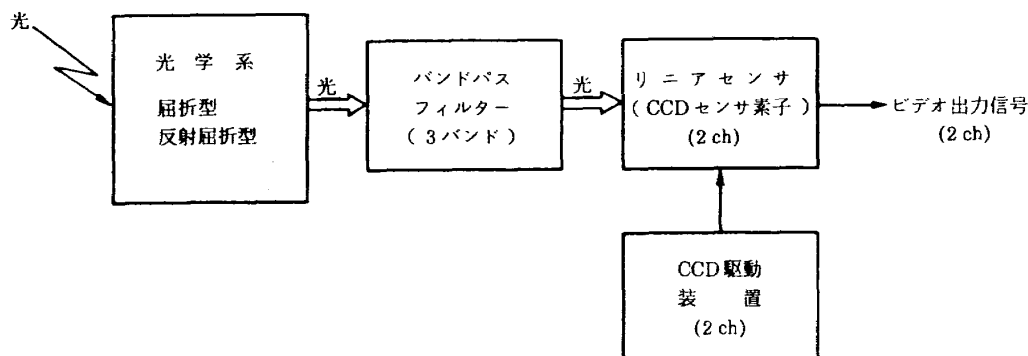


図2-2 試作プッシュブルーム走査型放射計概略構成図

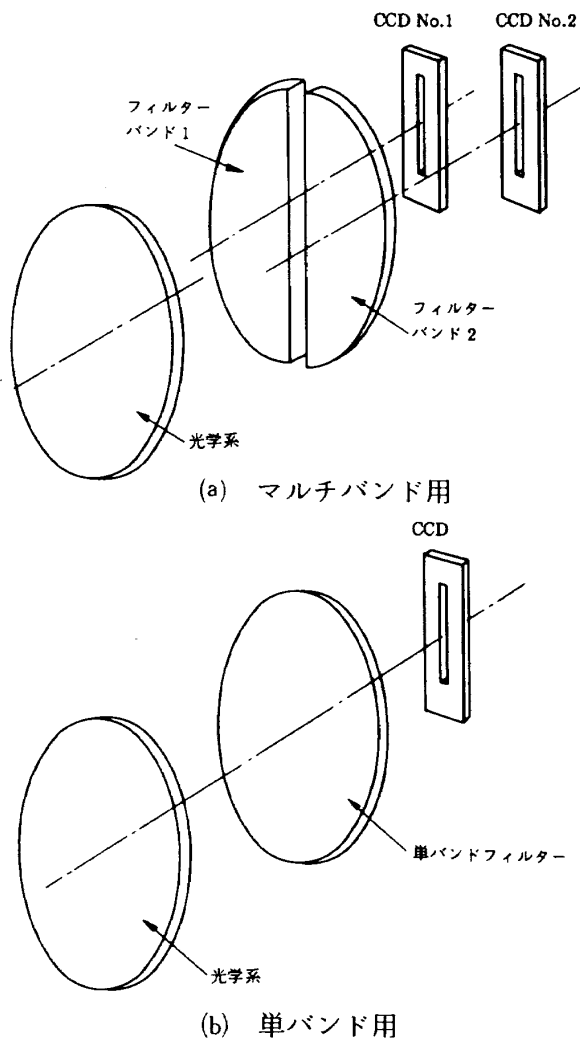


図 2-3 バンドパスフィルター構成図

### 3. プッシュブルーム走査型放射計の光学系

光学系は、基本仕様に基づき用意された交換可能な屈折型と反射屈折型の2種類の集光部とバンドパスフィルターとからなる。

一般に屈折光学系は、レンズの組合せにより構成され、重量が重くなる傾向があるが、ここでは、重量的には軽い市販の小型のカメラレンズを用いた。

一方反射屈折光学系の一つであるシュミット光学系は、レンズと鏡の組合せによる構成でレンズの屈折による色収差が少しあるがその他の収差は良く補正されており、集光能力も良く割合小型で、重量も軽い。しかし通常のシュミット光学系は、像面が球面をなし、プッシュブルーム走査用として CCD センサ素子のようなリニア・アレイを配

置するには適さない。そこで像面を平坦にする目的で考えられた同じく反射屈折光学系の一つであるライトシュミット光学系を用いることにした(付録参照)。

この章では、屈折光学系、反射屈折光学系、バンドパスフィルターの特性の1部について記す。

#### 3.1 屈折集光系の特性

図3-1に示される明るさF2.8, 焦点距離 $f=100$  [mm], 写角24[度], 3群5枚, 重量265 [g]の市販カメラ用レンズを用いた。

光学系の集光部の特性は、空間分解能により表すことができ、変調伝達関数 MTF (Modulation Transfer Function) を測定することにより得られる。この測定は、日本写真機光学機器検査協会に依頼して行った。白色光の波長に対する測定結果として、絞りをF4からF8まで変化させた場合の空間分解能を図3-2に示し、図3-3では、絞りは開放(F2.8)で波長を435.8 [nm] (スペクトル線: g線), 546.1 [nm] (e線), 656.3 [nm] (c線) と変化させた場合の空間分解能を示す。CCD センサ素子の画素の受光面の大きさが13 [ $\mu\text{m}$ ] (CCD センサ素子のアパーチャ) であり、これに相当するナイキスト周波数  $f_n=38.5$  [lp/mm] でこれら MTF の値が約0.3であることから、センサ素子のこの周波数における MTF の理論値(素子のアパーチャを矩形と仮定したときの MTF) 0.63を乗じて、システム MTF として0.2位が得られることになる。従ってこのレンズは、放射計の集光系として使用し得る範囲内にあるといえる。

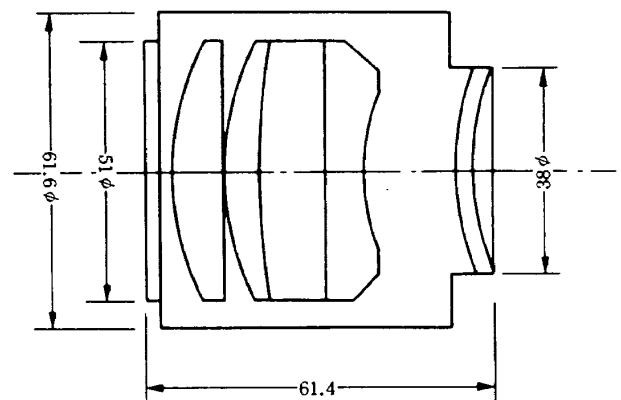


図 3-1 屈折光学系(カメラレンズ)

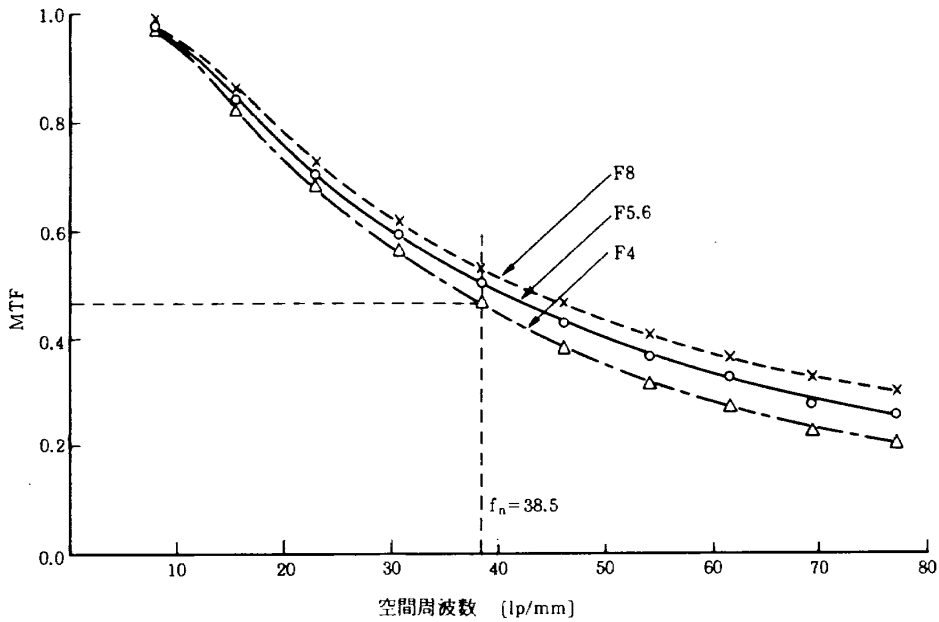


図 3-2 カメラレンズの MTF (測定値)

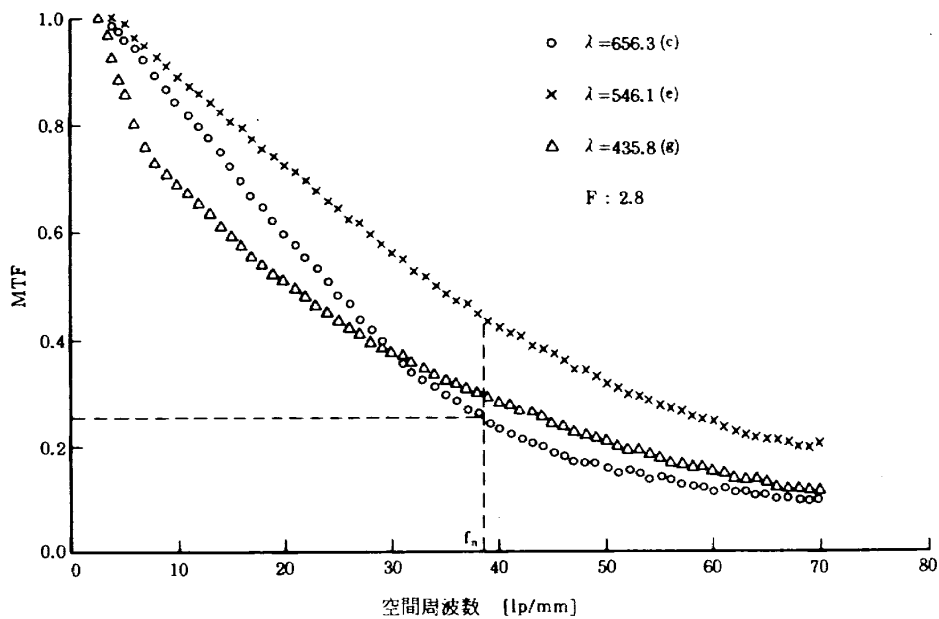


図 3-3 カメラレンズの MTF (測定値)

### 3.2 反射屈折型集光系の特性

反射屈折光学系は、ライトシュミット型、シュミット型、マクスツフ型など各種あるが、そのなかでライトシュミット型を採用した。このライトシュミット型は、補正板(C.P.)は通常のシュミット型の如く 4 次の非球面であるが、主鏡が通常の球面とは異なり偏球面で出来ており、これにより像面は、割合に平坦であるという特徴を有しているので、CCD センサ素子を像面に配置するのに好都合である。

主な仕様は、前章の表 2-1 に示されるように焦点距離 475 [mm]、明るさ F3.84、口径 125 [mm]、外寸法約 510 [mm]、直径 150 [mm] であり、補正板  $Z_1$  と偏球面  $Z_2$  の曲線は以下の式で示される(付録 B, C 参照)。

$$\begin{aligned} \text{補正板 ; } Z_1 = & -1.323588 \cdot 10^{-5} y^2 \\ & + 1.12946 \cdot 10^{-9} y^4 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{偏球面 ; } Z_2 = & 1.052632 \cdot 10^{-3} y^2 \\ & + 2.91588 \cdot 10^{-10} y^4 \end{aligned} \quad (2)$$

但し  $y$  は各々の光軸に垂直な距離であり、屈折率



( $n$ )=1.51633 (波長587.56 [nm] : d線) の場合の式である。

この光学系の構成は、通常のシュミットカメラと同じで図3-4に示されるように図の左より入射した光は補正板を通り右の主鏡で反射され平面鏡により90[度]角度を変えられ、光学フィルターを通した後 CCD センサ素子に結像される。

このように光軸が変化するため、反射屈折光学系の MTF 測定は、光軸の幾何学的位置の設定が難しく分解能に見合う高精度測定が不可能であったので行っていない。

そこで測定の代わりに各種の波長における MTF

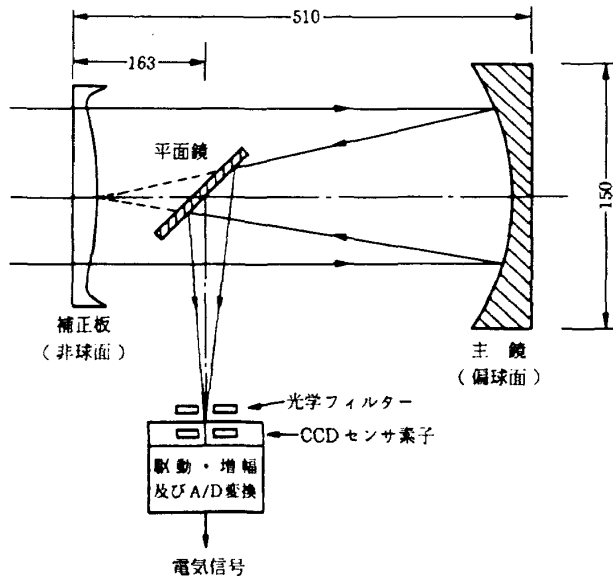


図 3-4 反射屈折光学系プッシュブルーム走査型放射計構成図

の波動光学的数値計算<sup>1)</sup>を行った。

計算式については付録を参照。軸上における MTF の計算結果を図3-5に示す。図から波長587.56 [nm], 706.52 [nm], 950.0 [nm] についてみると、ナイキスト周波数  $f_n = 38.5$  [lp/mm] における MTF は約0.7以上であり、十分高い空間分解能特性をもっていることが判る。次に波長587.56 [nm] において100[%], 60[%], 30[%], 0[%] の像高における MTF の計算結果を比較したものが図3-6である。この図からいえる事は、入射画角が大きくなるに従い (画角 0 [度]=0[%] から画角  $\pm 3.0$  [度]=100[%] まで) MTF は急激に低下する傾向を示している。特に像高が60[%] になるように入射した光 (画角  $\pm 1.8$  [度]) に対しては10 [lp/mm] で MTF が0.2であり、ナイキスト周波数では0.1まで低下している。また像高が100[%] になるように入射した光 (画角  $\pm 3.0$  [度]) に対しては10 [lp/mm] で MTF が0.02近くまで低下している。

### 3.3 バンドパスフィルターの特性

プッシュブルーム走査型放射計用バンドパスフィルターは、CCD センサ素子の前面に取り付けることを考慮して単バンドは直径49 [mm] の円形のもの、マルチバンド用は、同じ直径で半円形のもの、3バンドについてそれぞれ作成した。

これらは多層薄膜によるバンドパスフィルターで、その分光透過率特性を図3-7に示す。設計バ

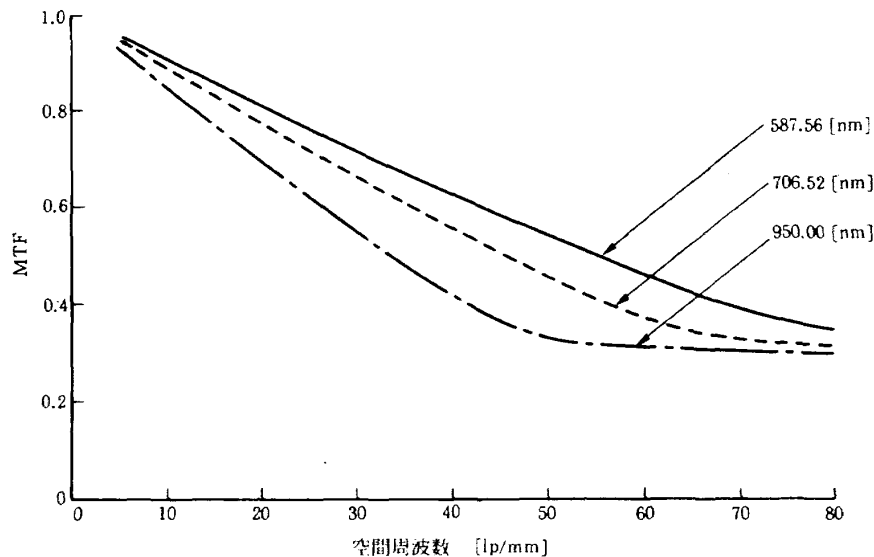


図 3-5 反射屈折光学系の軸上における MTF の数値計算結果 (波長別)

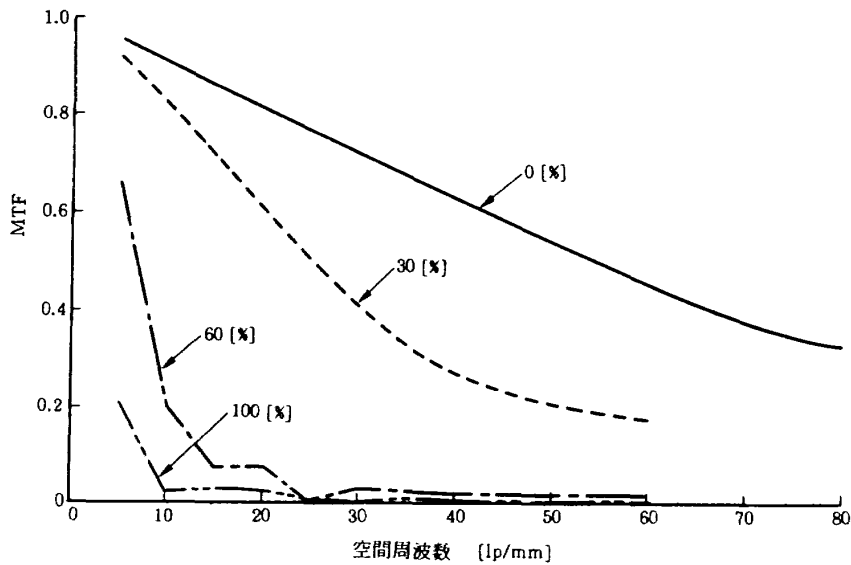


図 3-6 反射屈折光学系の軸上における MTF の数値計算結果 (入射画角別)

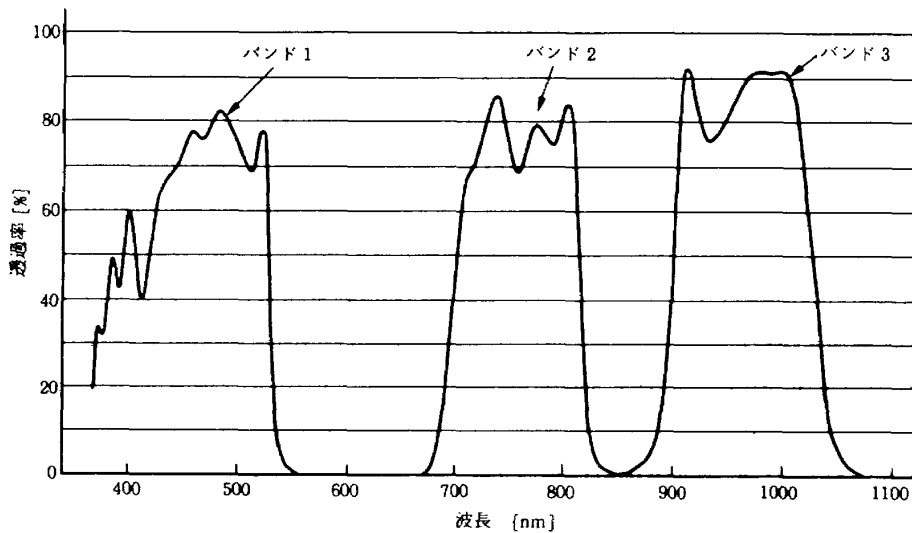


図 3-7 バンドパスフィルター分光透過率特性

バンド幅は、バンド 1 で、450~550 [nm]、バンド 2 で、700~800 [nm]、バンド 3 で、900~1000 [nm] である。各バンド共に約 70 [%] 以上の透過率を示している。バンド 1 の 400 [nm] 近傍では、蒸着物質 (TiO<sub>2</sub>) の吸収等により特性がやや悪い。

#### 4. CCD センサ素子と駆動装置

プッシュブルーム走査型放射計用の CCD センサ素子と駆動装置の回路構成は、図 4-1 の機能概略図に示されている。この図において CCD センサ素子のセンサエレメントに光が入射されるとキャリア (電子) が発生し、入射光量に比例した電荷が蓄積される。この電荷は CCD センサ素子の

2 個のシフトレジスタを通して電荷検出回路により対象の輝度レベルに対応したビデオ出力信号 A、B となり、それぞれアンプで増幅された後に外部へ出力される。その後 CCD 駆動装置のビデオ出力加算増幅部において A、B のビデオ出力信号が加算されアナログビデオ出力信号 (AVIDEO) となる。

CCD 駆動装置は、CCD センサ素子や外部とのタイミングをとる基準クロック分周部、アナログビデオ出力信号を読み取るリード制御部、ビデオ出力信号を加算するビデオ出力加算増幅部から構成されている。

以下の節では、CCD センサ素子と駆動装置の

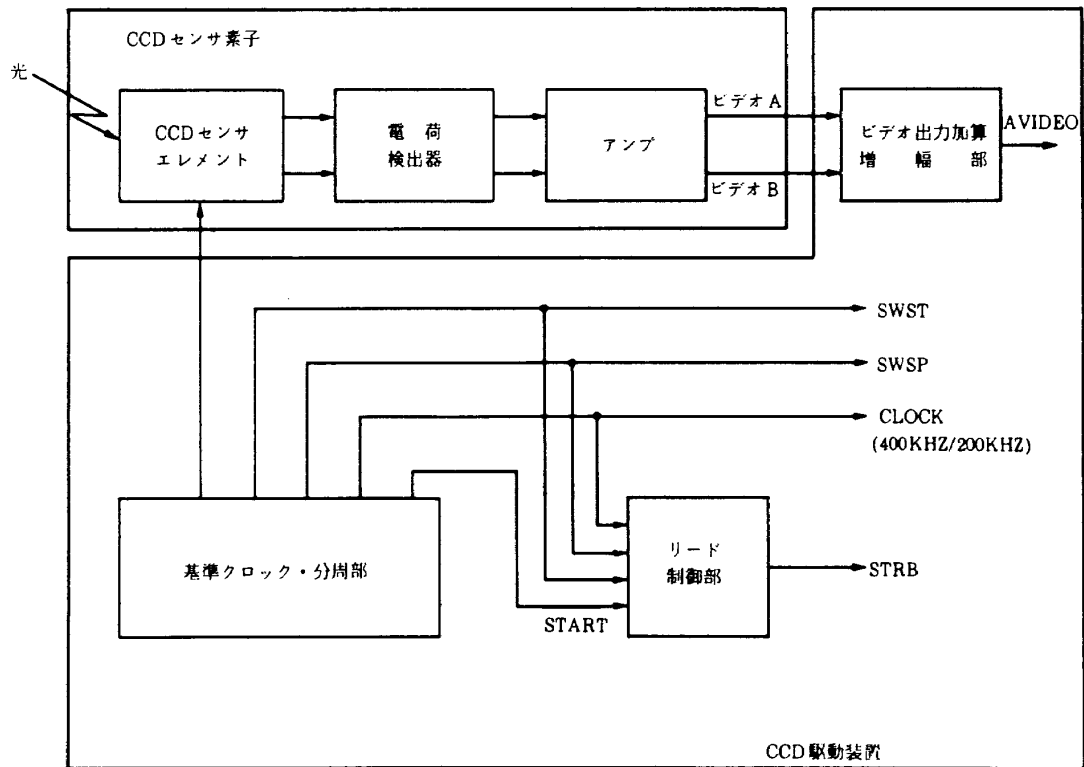


図 4-1 CCD センサ素子と駆動装置機能概略図

概要と特性について記す。

#### 4.1 CCD センサ素子の特性

CCD センサ素子は、2048画素の独立した CCD センサエレメントがシリコン基板上に並べられており、個々の画素の電気信号はシフトレジスタより時系列信号として出力される。CCD センサ素子の回路構成を図 4-2 に示す。

この図において CCD センサエレメントに照射された光のエネルギーは、積分時間の間、電荷として蓄積される。蓄積された電荷は、トランスファゲートを通して奇数番目と偶数番目の電荷信号が交互に 2 個あるアナログトランスポートシフトレジスタへ移される。トランスファゲートは、CCD センサエレメントの蓄積時間を制御している。その後各々アナログシフトレジスタで順次電荷検出器 / アンプへ移動される。

電荷検出器 / アンプは、アナログトランスポートシフトレジスタより電荷を受け、各信号電荷量に応じた電圧信号に変換して出力する。

図で  $\phi_r$  は、トランスファゲートに加えられたパルスにより蓄積された電荷信号を CCD センサエ

レメントからアナログトランスポートシフトレジスタへ転送するトランスファクロックである。

又  $\phi_T$  は、アナログトランスポートシフトレジスタが CCD センサエレメントから受けた電荷信号を電荷検出器 / アンプへ転送するトランスポートクロックである。

ここに示された CCD センサ素子の一画素の大きさは、縦横  $13[\mu\text{m}] \times 8[\mu\text{m}]$  であり画素と画素の間に  $5[\mu\text{m}]$  の絶縁領域があり、画素のピッチは  $13[\mu\text{m}]$  である。CCD センサ素子全体の大きさは、 $13[\mu\text{m}] \times 2048$  画素で約  $26.6[\text{mm}]$  である。

CCD センサ素子単体の特性測定は、光源や分光器あるいは分光微小点光源装置（白色光、分光器、光ファイバ、ファイバアダプタ、顕微鏡などより構成された装置）<sup>2,3)</sup> などにより、CCD センサ素子全体、または直径約  $2[\mu\text{m}]$  のスポット光を画素に直接入射し、直線性、感度偏差、干渉、分光特性などを測定した。

以下にそれぞれの測定方法の概略と結果を示す。

##### (1) 直線性

直線性の測定方法は、入力エネルギー（または入射信号レベル）に対する出力エネルギー（また

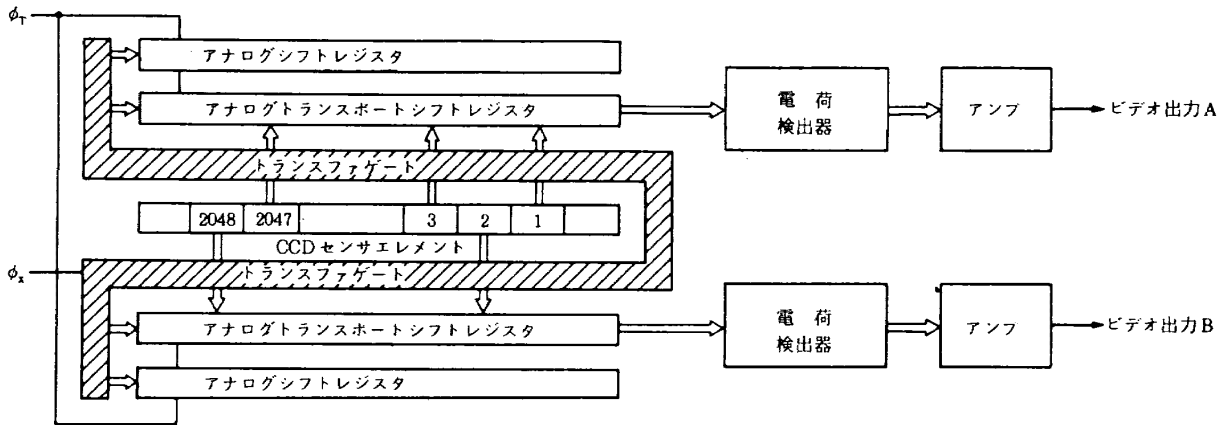


図4-2 CCDセンサ素子構成ブロック図

は出力レベル)で表わされるので、まず光源や光学系、CCDセンサ素子などの光軸を合せ、光源ランプの光をディフューザで拡散し、直径1[mm]のピンホールによりCCDセンサ素子の中心エレメントに照射する。ここでピンホールとCCDセンサ素子の距離は、CCDセンサ素子の出力レベル(飽和レベルで約2[V])が十分得られるように約18[cm]から180[cm]の間を移動可能とした。直線性の特性測定を行うには、光源の他にCCDセンサ素子、バンドパスフィルタ、フード、CCD駆動装置、計算機から構成され、CCDセンサ素子の出力データやコメント(注釈)はプリントアウトすると同時に磁気テープに記録する。

直線性の測定は、いくつかの画素番号について行ったがここではCCDセンサ素子の中心エレメントである画素番号1001を選択し、この画素で波長が白色光の場合について測定した結果を述べる。

CCDセンサ素子への入射信号レベルは、飽和レベル(約2[V])の直前の位置を基準とし、0[V]から飽和レベルまでを相対放射照度として10等分した。尚、相対放射照度の低い部分については、1/10(相対放射照度0~1)を更に10等分して細かく測定を行った。この測定において熱雑音による暗電流誤差を補正して得られた直線性を図4-3に示す。

図4-3(a)で実線は、0[V]から飽和レベルまでの相対放射照度とCCDセンサ素子の出力信号を正規化した相対出力レベルであり、相対放射照度8~9付近で約3.5[%]低下しているが直線性は良

いといえる。相対放射照度0~1の間は、図4-3(b)に示されるように最大誤差約1.6[%]でほとんど直線といって良い結果が得られた。

#### (2) 感度偏差特性(ばらつき特性)

感度偏差測定方法は、直線性の測定方法と同様な構成で行えるが、光軸と直交してX軸ステージをセットし、CCDセンサ素子をこれに乗せ、光源との直交精度を数100[ $\mu$ m]以内に設定した。またX軸ステージを2.6[mm](=13[ $\mu$ m] $\times$ 2 $\times$ 100)間隔で光軸と直角に移動することにより奇数、偶数番画素それぞれ100画素分ずつ同時に測定を行う。この測定は、各画素の感度のばらつきを測定するもので波長450~550[nm]、700~800[nm]、900~1000[nm]の3バンドについて画素番号1~2048まで行った。

感度偏差測定の結果の一例として、全画素のうち画素番号980~1079の100画素分同時に測定を行ったものを図4-4に示す。同図において奇数番画素と偶数番画素で感度の差が見られる。これは、CCDセンサ素子単体の電荷検出器とアンプやCCD駆動装置のビデオ出力加算増幅部の特性差が現れていると考えられる(図4-2、図4-7参照)。

また波長が短くなるに従い全体の画素(この場合100画素分)について相対出力レベル(感度)が約0.92から約0.84位まで少しずつ低下しているが、おそらく波長別に最良焦点位置を極くわずかわずか変化して測定した結果により、入出力レベルが低下したのではないと思われる(図4-4は900~1000[nm]のバンドで正規化した結果である)。分光

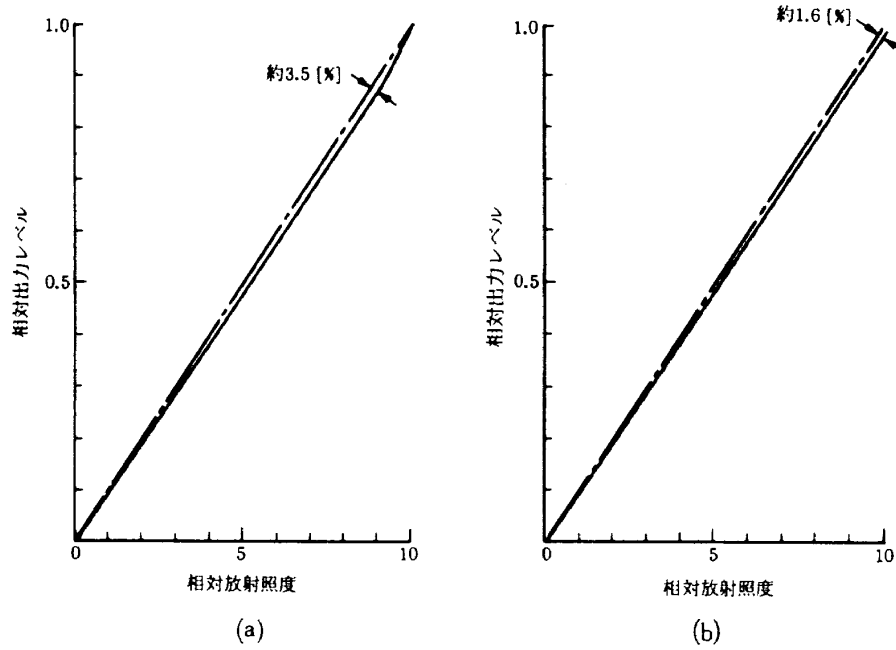


図 4-3 CCD センサ素子単体直線性 (白色光, 画素番号 = 1001)

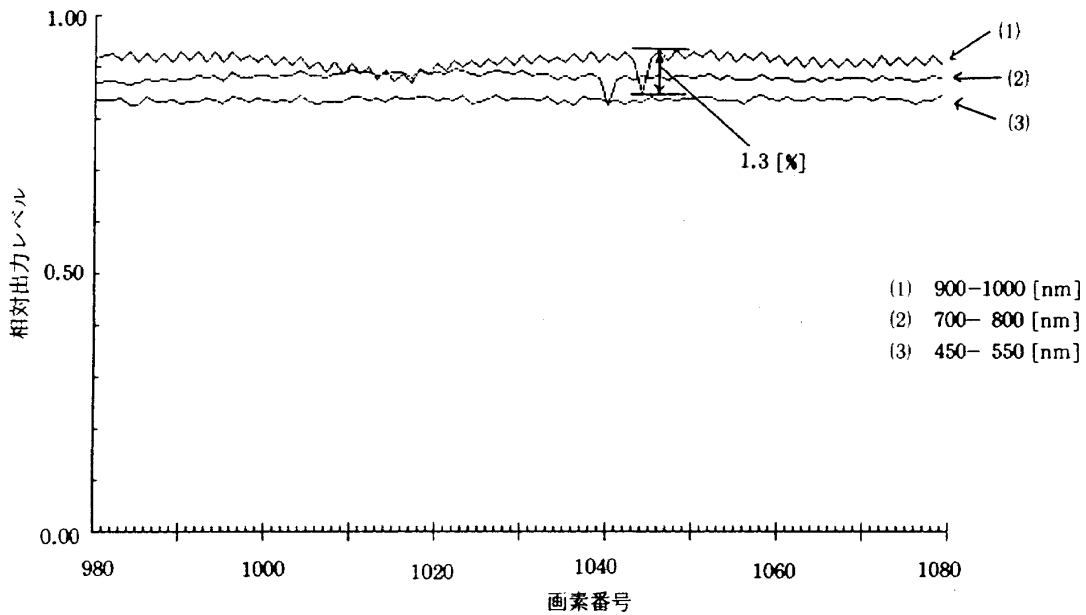


図 4-4 CCD センサ素子単体感度特性

感度からみると図4-6に示されるように波長700 [nm] 付近で最大になるはずである。感度のばらつきは、最大で1.3[%]位である。

(3) 干渉特性

画素間の干渉測定は、直線性の測定と同様に中心の元素である画素番号1001, 1002の2画素を選択し、分光器による波長550 [nm], 750 [nm], 950 [nm] の3種類の単波長について測定を行った。

測定は、分光微小点光源装置により CCD センサ素子単体の画素にそれぞれの波長で直径約 2

[ $\mu\text{m}$ ] のスポット光を直接入射し、CCD センサ素子を X 軸ステージにセットし、1 [ $\mu\text{m}$ ] 間隔で移動しながら行った。

測定したデータを最大値で正規化した結果が図4-5であり、図4-5(a)では、画素番号1001で波長550 [nm], 750 [nm], 950 [nm] の3波長についての比較を示す。この図から波長が長くなるに従って左右2~3画素分まで出力があり、干渉が大きくなることわかる。

次に画素番号1001, 1002の2画素について波長

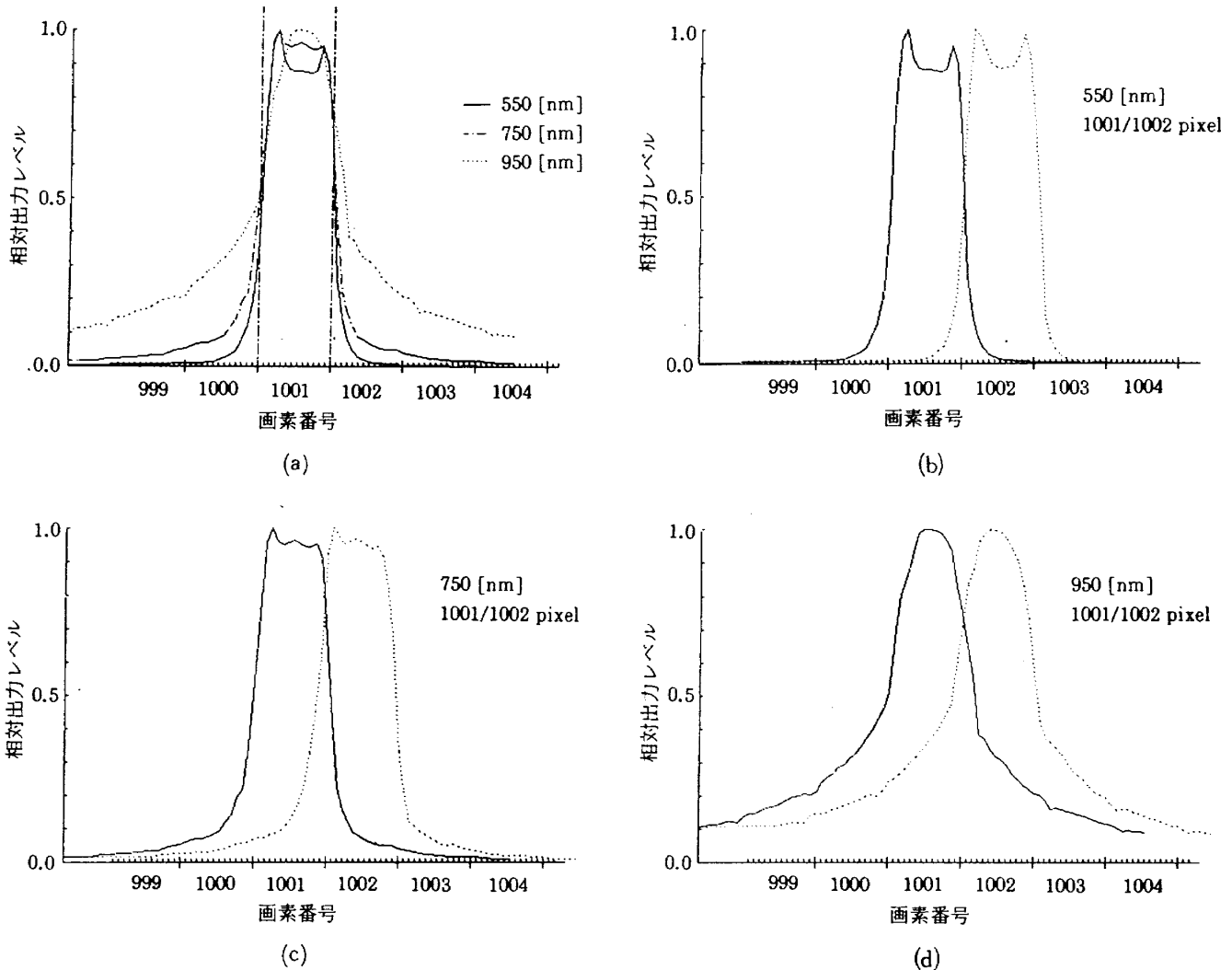


図 4-5 CCD センサ素子単体干渉特性

550[nm], 750[nm], 950[nm] の 3 波長の結果を 図 4-5(b)~図 4-5(d) に示す。図 4-5(b) の波長 550 [nm] では、両画素の干渉の度合いが相対出力レベルで約 0.55 位の点で交差するのに対し、図 4-5 (c), (d) の波長 750 [nm] と 950 [nm] では 0.75~0.80 になっている。

以上の結果より波長が長くなるに従い干渉の度合いが多くなっていくことがわかる。

#### (4) 分光特性

分光特性測定方法は、中心附近の画素番号 1001 と 1002 の 2 画素を選択し、分光微小点光源装置により 1 画素を十分照射するスポット径の光を当てて行った。波長は、分光器により 380~1100 [nm] の間を 10 [nm] 間隔に分割して測定した。

測定結果は、図 4-6(a), (b) に示され、それぞれ画素番号 1001 と 1002 について横軸に波長を縦軸に

相対出力レベルを示す。どちらもほとんど同じ特性を示しており、波長 700 [nm] 付近で最大出力レベルとなり、波長 400 [nm] の低い方と 1000 [nm] 以上で低下している。

#### 4.2 駆動装置の特性

CCD 駆動装置は、プッシュブルーム走査型放射計を 2 バンド化するために駆動回路を 2 チャンネルとし、CCD センサ素子 2 チャンネル同時駆動可能とする回路構成とした。

図 4-7 に示されるように基準クロック回路で発振し、分周回路で分周されたクロック (CLOCK) により、CCD センサ素子は任意に設定された積分時間 (1 [ms]~30 [ms]) で読み出される。次に照射された光は、スイープスタート (SWST) 信号からスイープストップ (SWST) 信号までの間積分し、

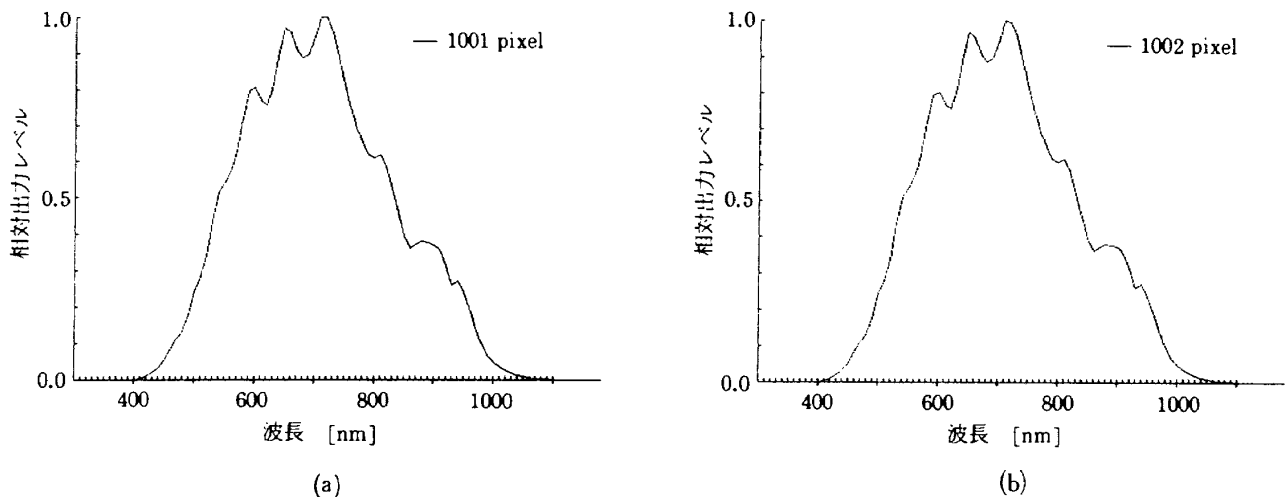


図 4-6 CCD センサ素子単体分光特性

電気信号に変換され、ビデオ出力加算増幅部のビデオバッファに格納された後加算増幅器を通してアナログビデオ出力信号(AVIDEO)として出力される。

基準クロック、分周部の基準信号は、CCD センサ素子用クロックとリード制御部へ入力するクロック (CLOCK)、スイープスタート (SWST)、スイープストップ (SWSP)、ストロブ (STRB) 信号として出力される。

一方リード制御部では、基準クロック、分周部で生成されたクロック (CLOCK)、スイープスタート (SWST)、スイープストップ (SWSP)、ストロブ (STRB) 信号を外部へ出力する。

これらの各信号と CCD センサ素子のタイミングチャートを図 4-8 に示す。この図では、基準クロック回路で 4 [MHz] を発振し、400 [KHz] に分周したクロックでビデオ信号の読み出しタイミングを取っている。よって 2048 画素分の出力に要する時間は最低 5.12 [ms] 必要である。

写真 1 に CCD センサ素子 2 チャンネル分 (左側の円筒の中) と駆動装置の外観を示す。

駆動装置について電気的特性を測定した。ビデオ出力加算増幅部の 4 チャンネル (図 4-7 で SENSOR の CH1, CH2 から VIDEO BUFFER へ入力する CH1A~CH2B の 4 チャンネル分) 別々に基準電圧を入力し、この入力電圧に対する出力電圧の比を増幅度が 5.0 と 2.5 の場合について測定

した結果を表 4-1 に示す。表から両方の増幅度共に良い直線性を示している。又 4 チャンネル全てについて入出力特性を求めた結果、基準入力電圧に対する出力電圧の誤差が最大  $\pm 0.2$  [%] 以内に収まっていることがわかった。

駆動装置は、CCD センサ素子 2 チャンネル分 (ビデオ A, B の合計 4 チャンネル (CH1A~CH2B)) の入力に対し、2 チャンネル (CH1, CH2) のアナログビデオ出力信号 (AVIDEO 信号 : 図 4-7 参照) を出力する。CCD センサ素子 2 チャンネル分の入力に対し、ビデオ出力加算増幅部の周波数特性を求め、特性の一番良いものと特性の悪いものの 1 例を図 4-9 に示す。どちらも 1 [MHz] において増幅度が  $-0.2 \sim -0.5$  [dB] 減衰しているが、周波数特性は十分良いといえる。

ビデオ出力加算増幅部のドリフト特性としては、時間変化と温度変化によるものについて測定した。時間変化によるドリフトは、図 4-10 に示すように 16 時間で  $\pm 5$  [mV] 以内であり、相対出力変動は 0.1 [%] 以内であった。一方温度変化によるビデオ出力加算増幅部のドリフト特性は恒温槽を用いて測定した。その結果を図 4-11 に示す。CH1 と CH2 で少々差があり、特に CH1 では  $-10$  [度]  $\sim +40$  [度] までの間で  $-30$  [mV] から  $+90$  [mV] の範囲で出力電圧が変化している。この結果より CH1 では、CH2 より温度変化による影響が少し大きいと言える。

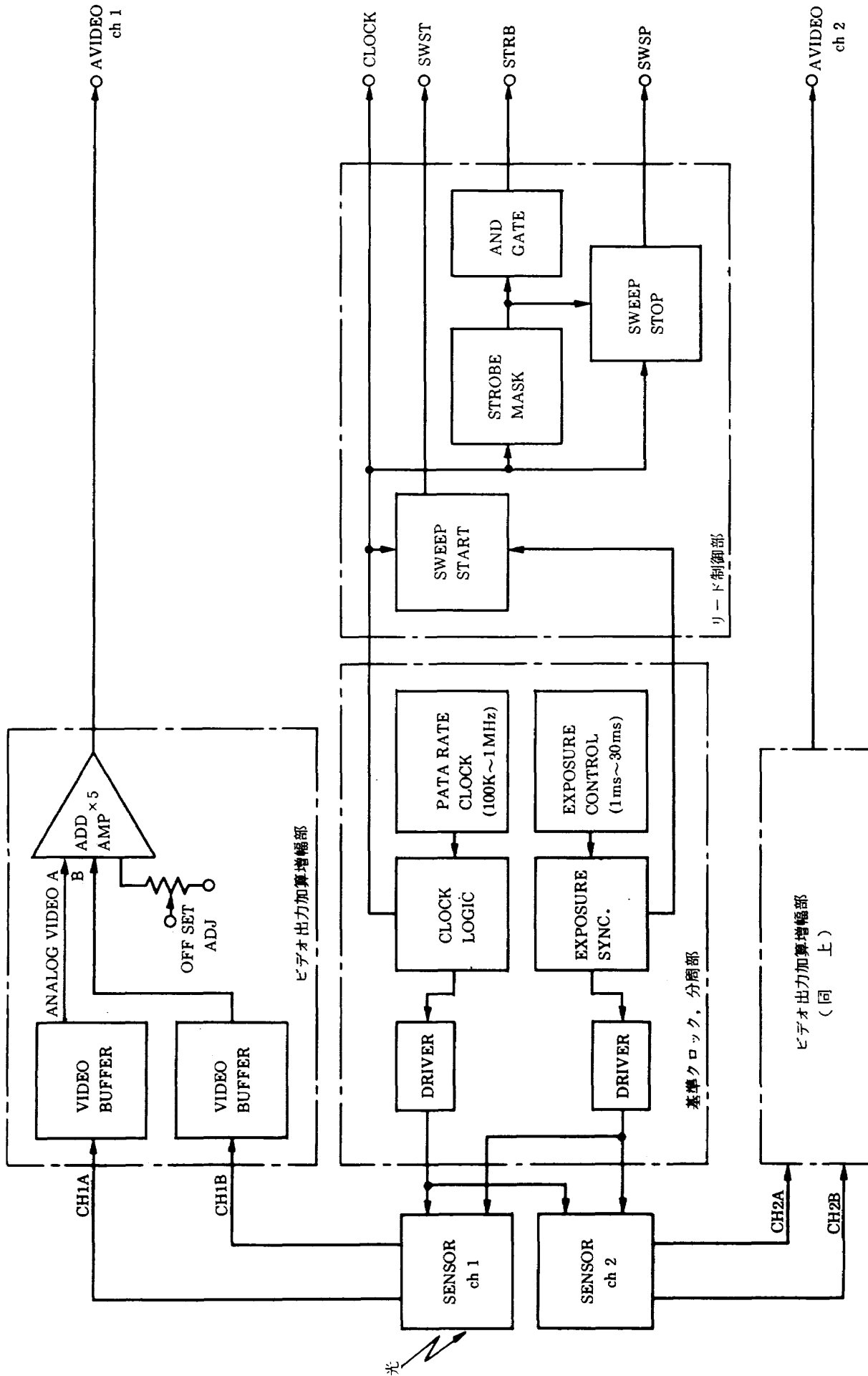


図 4-7 CCD 駆動装置ブロック図



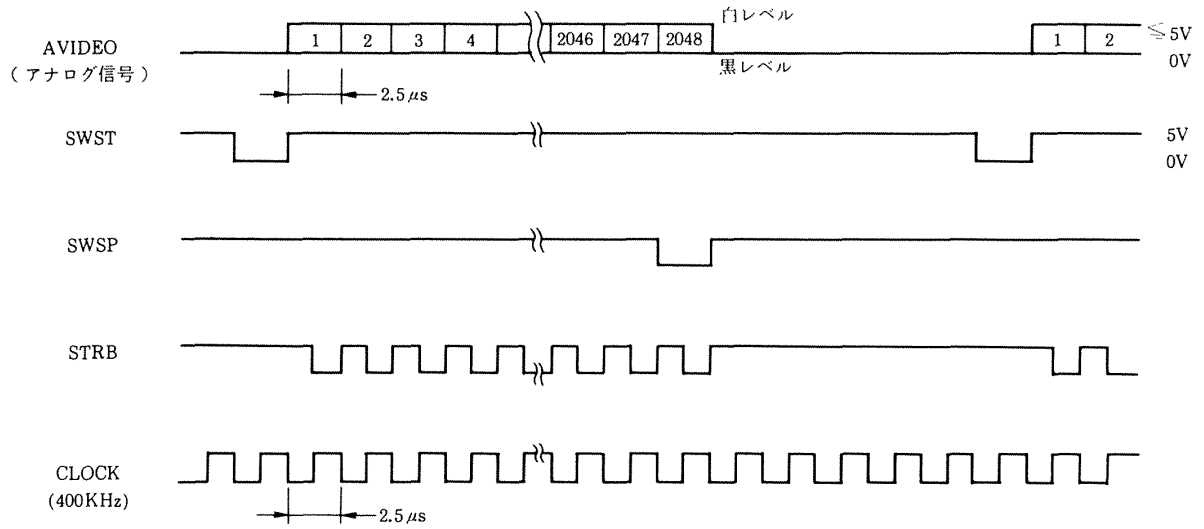


図 4-8 CCD 駆動回路タイミングチャート

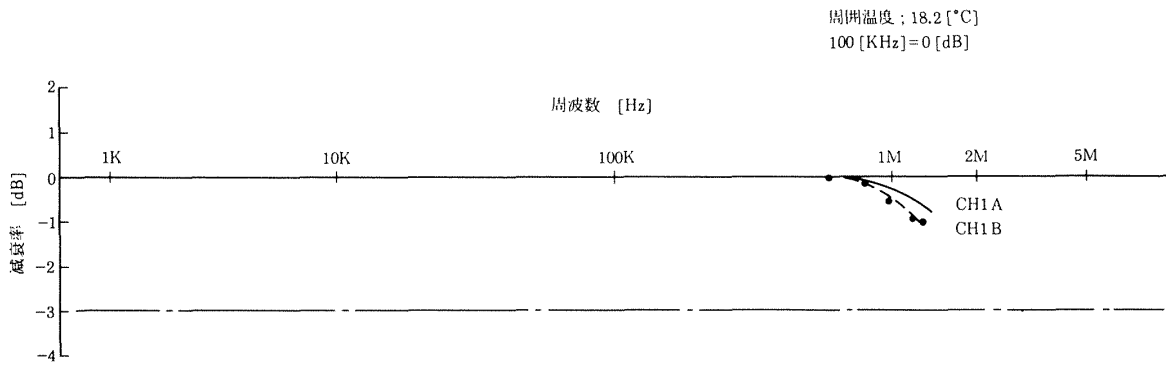


図 4-9 CCD 駆動装置周波数特性

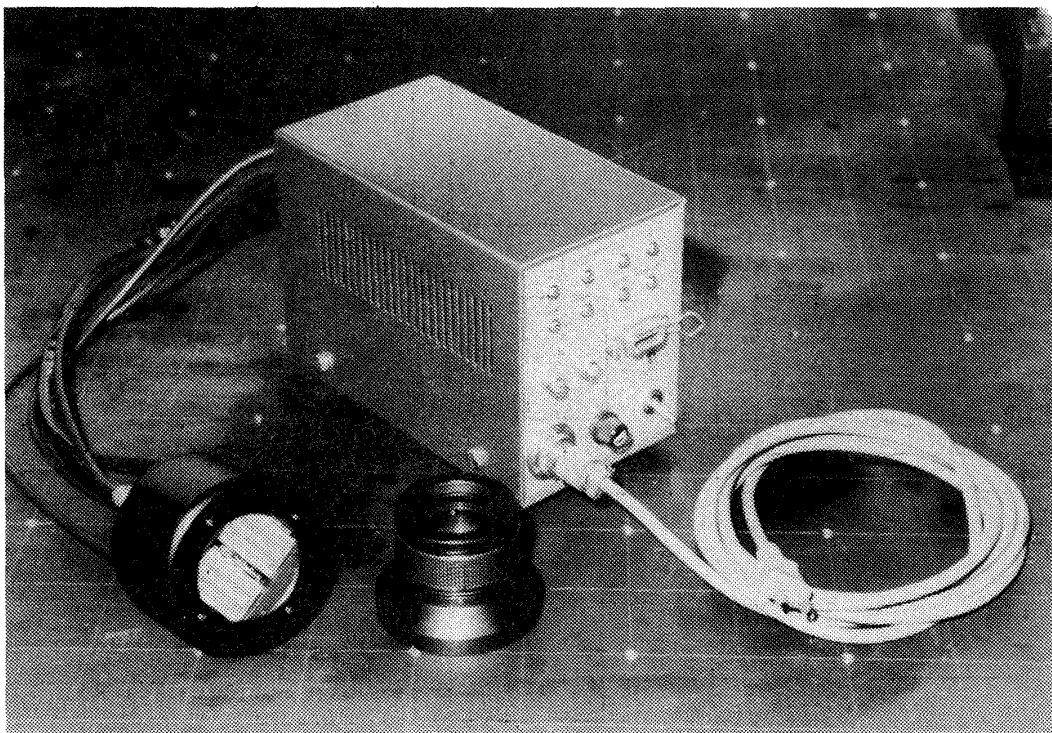


写真 1 CCD センサ素子と駆動装置

表 4-1 CCD 駆動装置入出力特性

(1) 増幅度 = 5 のとき

No	基準電圧		出力電圧・誤差							
	入力電圧 [V]	出力電圧 [V]	CH1A [V]	誤差 [%]	CH1B [V]	誤差 [%]	CH2A [V]	誤差 [%]	CH2B [V]	誤差 [%]
1	0.000	0.000	0.000	0.0	0.000	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0
2	-0.200	1.000	1.001	0.1	1.001	0.1	1.001	0.1	1.002	0.2
3	-0.400	2.000	1.999	-0.05	2.002	0.1	2.001	0.05	2.002	0.1
4	-0.600	3.000	3.000	0.0	3.003	0.1	3.003	0.1	3.003	0.1
5	-0.800	4.000	3.999	-0.025	4.003	0.075	4.002	0.05	4.002	0.05
6	-1.000	5.000	5.001	0.02	5.001	0.02	5.000	0.0	5.000	0.0

(2) 増幅度 = 2.5 のとき

No	基準電圧		出力電圧・誤差							
	入力電圧 [V]	出力電圧 [V]	CH1A [V]	誤差 [%]	CH1B [V]	誤差 [%]	CH2A [V]	誤差 [%]	CH2B [V]	誤差 [%]
1	0.000	0.000	0.000	0.0	0.000	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0
2	-0.200	0.500	0.500	0.0	0.499	-0.2	0.499	-0.2	0.499	-0.2
3	-0.400	1.000	1.001	0.1	1.001	0.1	1.002	0.2	1.002	0.2
4	-0.600	1.500	0.502	0.13	1.502	0.13	1.500	0.0	1.500	0.0
5	-0.800	2.000	2.003	0.15	2.003	0.15	2.001	0.05	2.001	0.05
6	-1.000	2.500	2.501	0.04	2.501	0.04	2.500	0.0	2.500	0.0

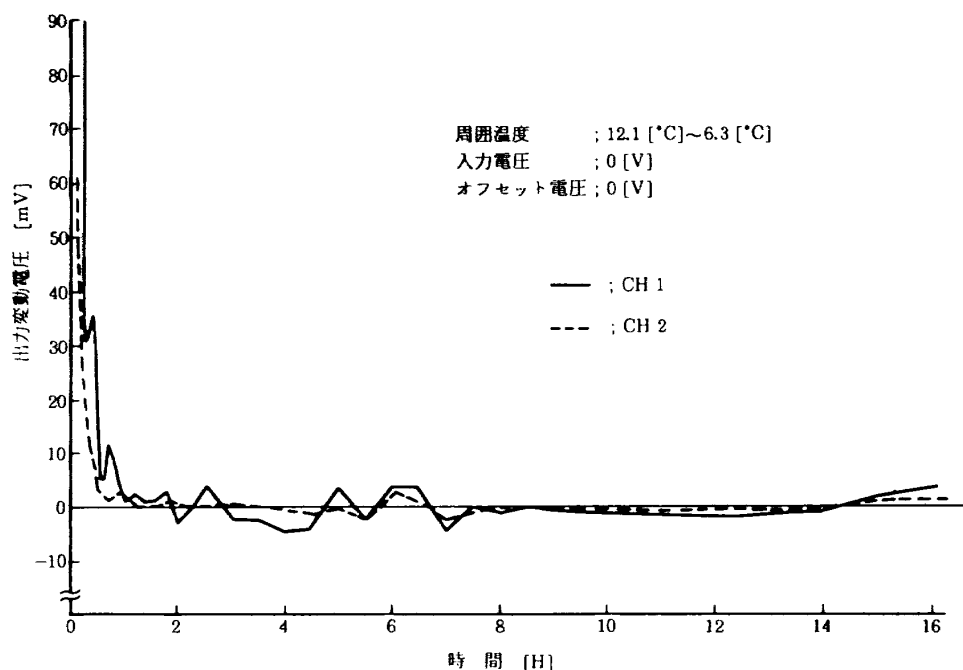


図 4-10 CCD 駆動装置ドリフト特性

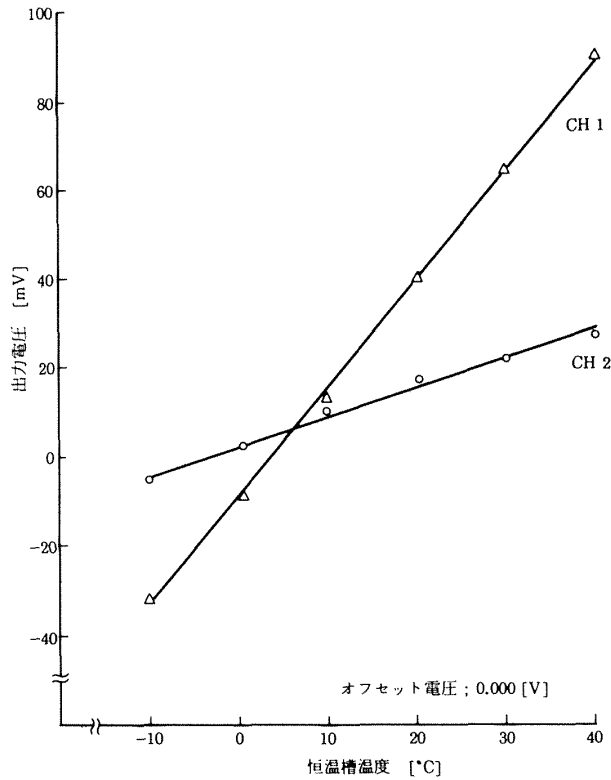


図 4-11 CCD 駆動装置温度ドリフト特性

## 5. プッシュブルーム走査型放射計の特性

前章までで、プッシュブルーム走査型放射計の光学系、CCD センサ素子、CCD 駆動装置などの各部分の単体の特性について述べたが、ここでは、これら各要素から成る試作プッシュブルーム走査型放射計のシステム概要ならびにシステム特性の測定結果について述べる。

試作放射計は、既述のように屈折光学系を用いたものと反射屈折光学系を用いたものの2種類である。

屈折光学系を用いたプッシュブルーム走査型放射計の試作例を写真2に示す（CCD 駆動装置を除く）。写真には、カメラレンズとそのすぐ後方の円筒が見えるが、この円筒中に CCD センサ素子が収まっている。

反射屈折光学系を用いたプッシュブルーム走査型放射計の試作例を写真3に示す。写真では、左側に円筒形の反射屈折光学系であるライトシュミット型光学系が示され、右の黒い円筒の中にバンドパスフィルターと CCD センサ素子が収まっている。

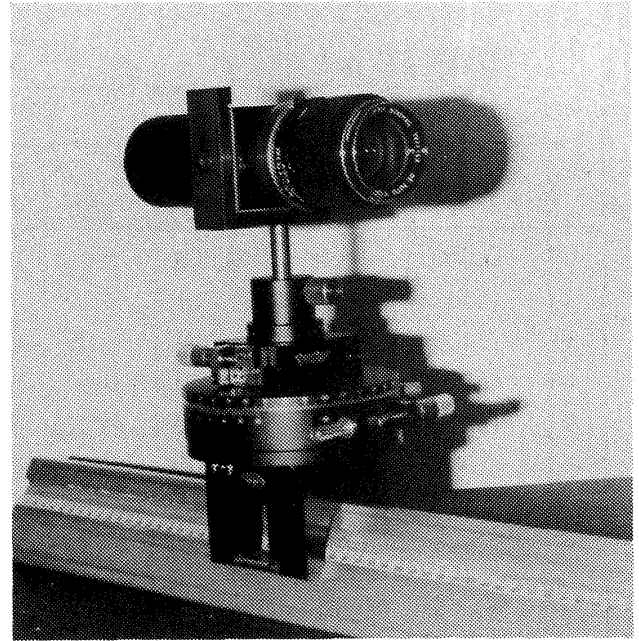


写真2 屈折光学系プッシュブルーム走査型放射計

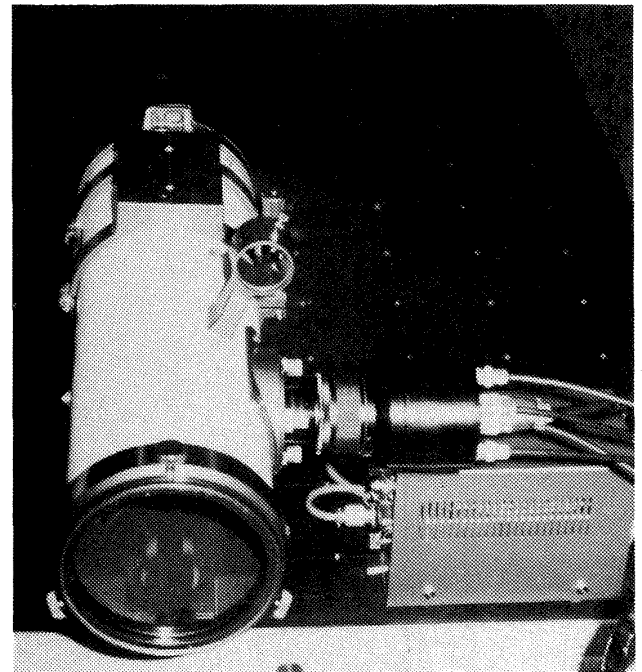


写真3 反射屈折光学系プッシュブルーム走査型放射計

る。その下の箱型が駆動装置である。

プッシュブルーム走査型放射計の特性の測定には、筆者らが以前に製作した固体画像センサ性能評価システム<sup>4)</sup>を使用した。このシステムで屈折光学系プッシュブルーム走査型放射計の場合と反射屈折光学系プッシュブルーム走査型放射計の場合のそれぞれについて特性の測定を行った。

またマルチバンドとして特性を同時に測定することを試みたが最良焦点位置が波長により異なり（色収差）、位置合せの精度に問題が生じた。そこでここでの測定は、基礎的なものであることからバンドパスフィルターを1個ずつ交換することにより各々の単バンドの最良焦点位置で特性を測定することにした。以下の節では、特性の測定方法、結果について、屈折光学系プッシュブルーム走査型放射計と反射屈折光学系プッシュブルーム走査型放射計のそれぞれの場合に分けてその概要を述べる。

### 5.1 特性測定方法<sup>5,6)</sup>

(1) 屈折光学系プッシュブルーム走査型放射計  
屈折光学系プッシュブルーム走査型放射計の特性測定は、図5-1に示す固体画像センサ性能評価システムを用いた構成で行った。図の左側に示されているようにパターン駆動制御装置のパターン部に対数濃度グレースケールパターン、分解能テストチャートパターンなど各種基準パターンをセットし、ハロゲンランプ、コンデンサレンズ、ディフューザより成るランプハウスの光源で照明す

る。このパターンを通った光は、コリメータを通り平行光線となり、図の右側のプッシュブルーム走査型放射計に入射される。このようにしてプッシュブルーム走査型放射計はパターンを無限遠にある対象物として見ることになり、その出力は、ビデオ信号として画像入力制御装置を介して画像処理計算機内メモリに収集される。この画像処理計算機を用いて測定したデータより屈折光学系プッシュブルーム走査型放射計の入出力（直線性）、感度偏差、空間分解能、干渉など各種特性を求める。

各特性の測定方法は以下の通りである。

(a) 入出力特性（直線性）は、白色光で対数濃度グレースケールパターンを照射し、バンドパスフィルターを併用することにより各種濃度に対応する波長別の出力値を求める。

(b) 感度偏差特性（ばらつき特性）は透過率約100[%]の素ガラスと、12[%]、1[%]の各々の透過率の異なるパターンや対数濃度グレースケールパターンを用いて、入出力特性と同様にバンドパスフィルターで各種波長の入射光を作り、任意の画素毎の出力値を求める。

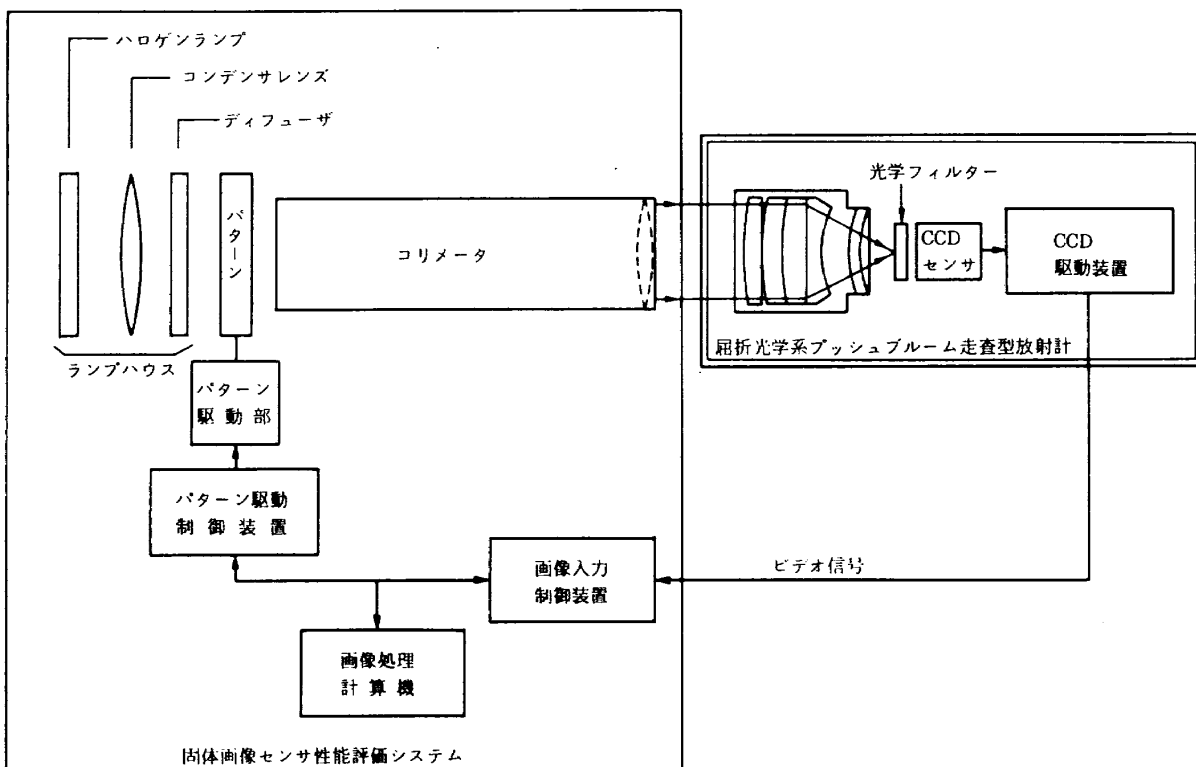


図5-1 屈折光学系プッシュブルーム走査型放射計評価試験構成図

(c) 空間分解能特性については、分解能テストチャートパターン(格子)とバンドパスフィルターを用いて夫々の波長における出力特性を測定することにより求める。

(d) ドリフト特性は、約 8 時間放射計を連続動作させ、その間の温度上昇と出力特性を測定する。

(e) 各画素間の干渉特性は、100[ $\mu\text{m}$ ]幅のスリットパターンを20[ $\mu\text{m}$ ]ピッチで移動し、結像面(CCDセンサ素子面)で5[ $\mu\text{m}$ ]幅のスリット光が1[ $\mu\text{m}$ ]ピッチで移動(カメラレンズ焦点距離 $f_1=100[\text{mm}]$ /コリメータ焦点距離 $f_2=2000[\text{mm}]=1/20$ )したことに相当するようにして出力を測定する。

## (2) 反射屈折光学系プッシュブルーム走査型放射計

この光学系の測定は、屈折光学系プッシュブルーム走査型放射計と同様に固体画像センサ性能評価システムを用いて図5-2に示される構成で行った。この光学系の場合は、大きさが約510[mm]あり屈折光学系よりかなり大きいため光源(ランプ

ハウス)、パターン駆動部、コリメータ(2000[mm])などの全長が3000[mm]以上になり、実験台(定盤の長さ2400[mm]、幅1200[mm])の大きさの制約を受け屈折光学系のように光軸を一直線にすることができず、図や写真4に示されるように鏡2枚を用いて90[度]ずつ2度反射して反射屈折光学系プッシュブルーム走査型放射計に光線を入射している。

入出力特性、感度偏差特性の測定方法は、屈折光学系プッシュブルーム走査型放射計とはほぼ同じである。但し、干渉特性では、20[ $\mu\text{m}$ ]幅のスリットパターンを用い結像面で5[ $\mu\text{m}$ ]幅以下となるようにした。また空間分解能特性は、3.2節でも述べたが反射屈折光学系プッシュブルーム走査型放射計の場合、特に高精度な光軸合せとレンズや鏡と CCD センサ素子の位置関係の設定が非常に困難であるために、性能に見合う高精度な測定が出来ないので行わなかった。代わりに波動光学による解析的な推定を行った。またドリフト特性に関しては屈折光学系プッシュブルーム走査型放射

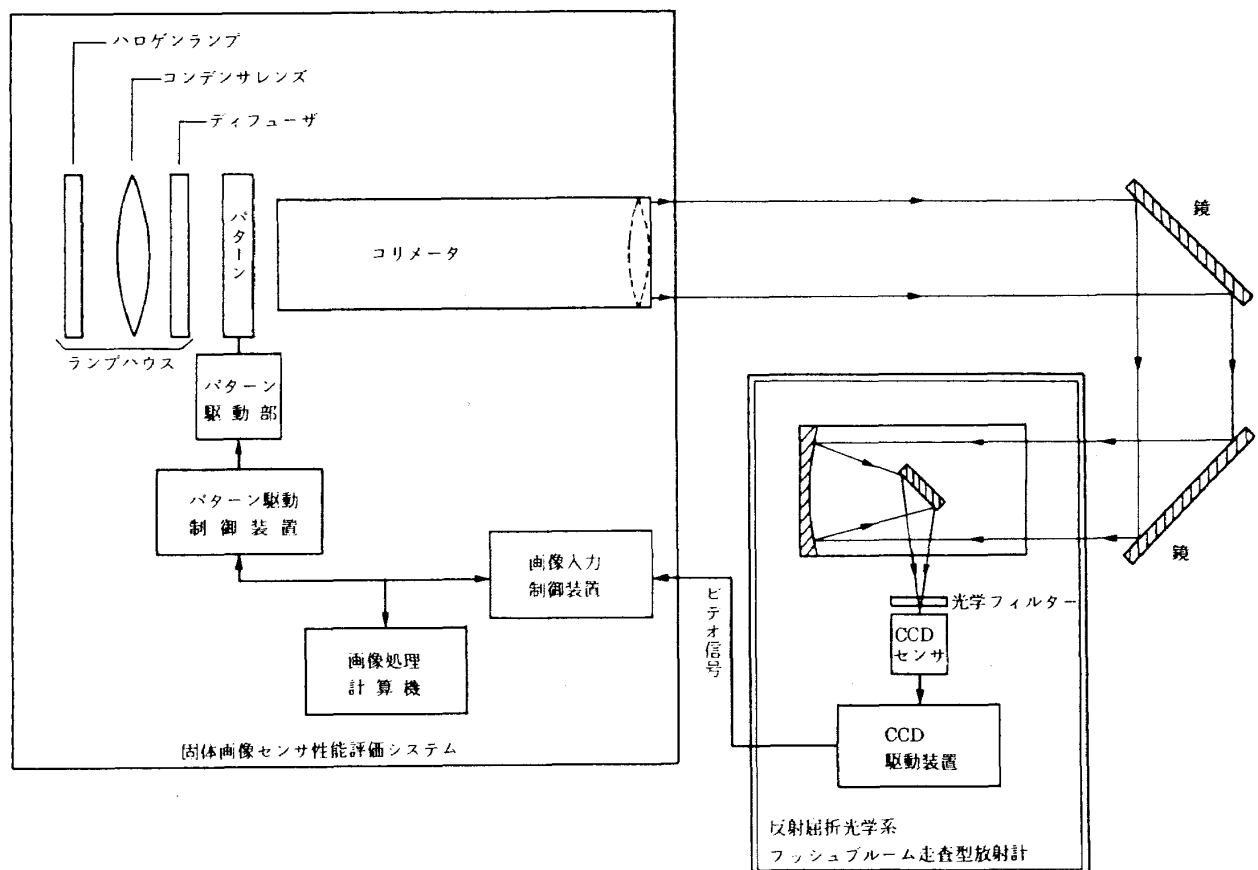


図 5-2 反射屈折光学系プッシュブルーム走査型放射計評価試験構成図

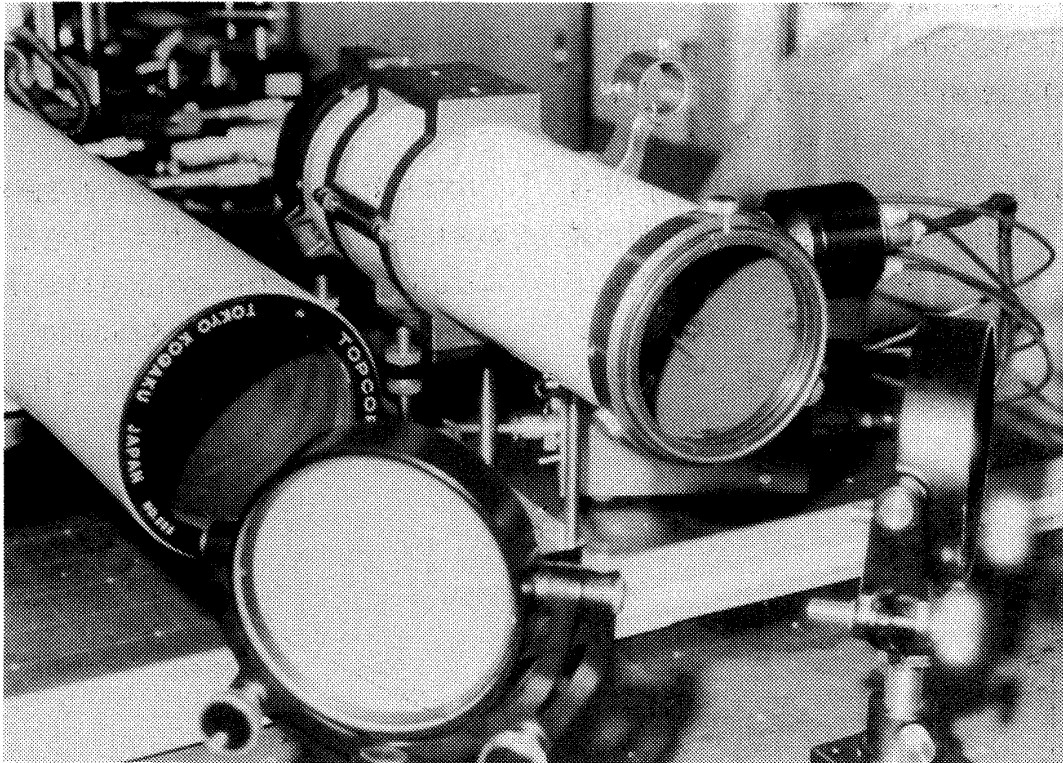


写真4 反射屈折光学系プッシュブルーム走査型放射計とコリメータ，鏡

計と同一であるために測定は省略した。

## 5.2 屈折光学系プッシュブルーム走査型放射計の測定結果

屈折光学系プッシュブルーム走査型放射計の特性を測定した結果について以下に示す。

### (1) 入出力特性（直線性）

屈折光学系プッシュブルーム走査型放射計の入出力特性は、測定した何れの画素（画素番号966, 1011, 1087）においても、図5-3(a)で示される如く理想とする直線（一点鎖線）に沿って良い直線性を示している。しかし画素により若干の誤差があるので最小二乗法による推定を行った。その結果特に誤差が大きいとみられる画素番号1087について図の点線で示す回帰直線に対して放射計の相対入射エネルギーのフルスケールに対する誤差率を求めると $-2.5\sim 3.6\%$ であった。この図は白色光での相対入射エネルギー（対数濃度グレースケールパターンの透過率に対応する）を横軸に、放射計の相対出力レベルを縦軸にとり相対入射エネルギーが100[%]の値の最大値で正規化した特性の測定結果である。次に画素番号966（偶数画素）、

1011（奇数画素）の2画素で波長450~550[nm]と700~800[nm]の2種類のバンドについて測定した結果をそれぞれ図5-3(b), (c)に示す。どちらのバンドにおいても低い相対出力レベルを細かく測定する為に相対入射エネルギー61.6[%]での最大出力値で正規化した。

図5-3(b)では、奇数、偶数画素両方共に41.6[%]ではほぼ直線であるがそれ以後61.6[%]までは少し折れ曲っている。この原因として、波長が短いため回折、屈折などによる測定誤差が多く生じた為と考えられる。ここでも白色光の場合と同様に画素番号966の回帰直線を図5-3(b)の点線で示す。図からは直線近似しているため曲線にみえるが誤差率は $-4.5\sim 6.0\%$ である。

図5-3(c)では、波長700~800[nm]の場合で非常に良い直線性を示す。誤差率でみると $-1.7\sim 2.1\%$ の範囲にあり、画素番号966の回帰直線を図5-3(c)の点線で示す。

### (2) 感度偏差特性

図5-4(a)では、画素番号700から1350付近のみに白色光で照射された透過率 $T=約100\%$ の素ガラスと $T=12\%$ 、 $T=1\%$ の各々の透過率の異な

るパターンによる屈折光学系プッシュブルーム走査型放射計の感度を比較したものである。図において100[%]と12[%]共にシェーディングの影響と光源面パターン特性(参考文献4)の図4-3参照)がそのまま表れている。特に透過率100[%]の場合は、これらの影響で画素番号900~1000付近の最大レベルに対し画素番号700付近では25[%]程低下している。次に透過率を一定にし、放射計のレンズの絞りをF2.8からF8迄変化させて25画素おき

に表示してみた結果が図5-4(b)である。この図から絞りに関係なく各画素間で感度のばらつきがあることがわかる。図の感度の高い方が奇数番画素である。

次に相対出力レベルが最大である画素番号980から1030までを透過率を替え、白色光と波長450~550[nm]、波長700~800[nm]における1画素ずつの各画素間の感度偏差を図5-5(a), (b), (c)に示す。白色光では、暗電流の補正を行っていないか

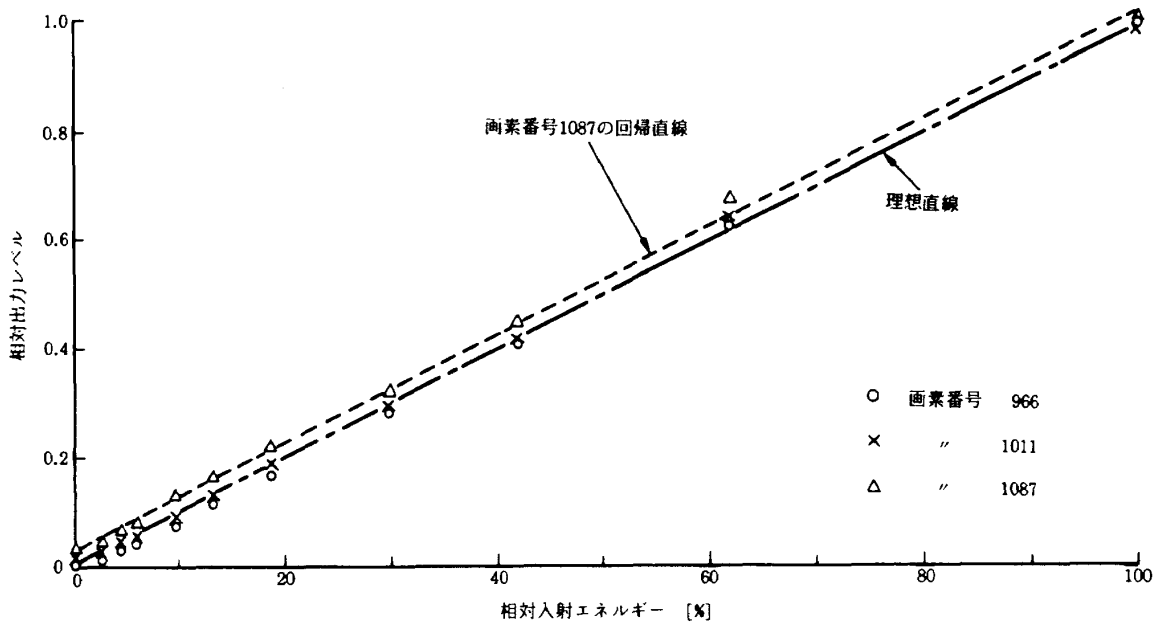


図5-3(a) 屈折光学系を用いた放射計の入出力特性(白色光)

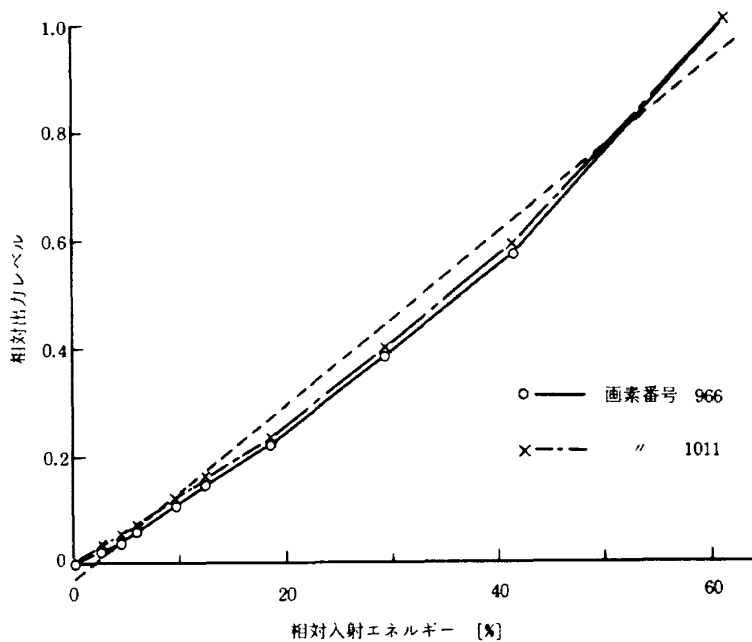


図5-3(b) 屈折光学系を用いた放射計の入出力特性(450~550 [nm])

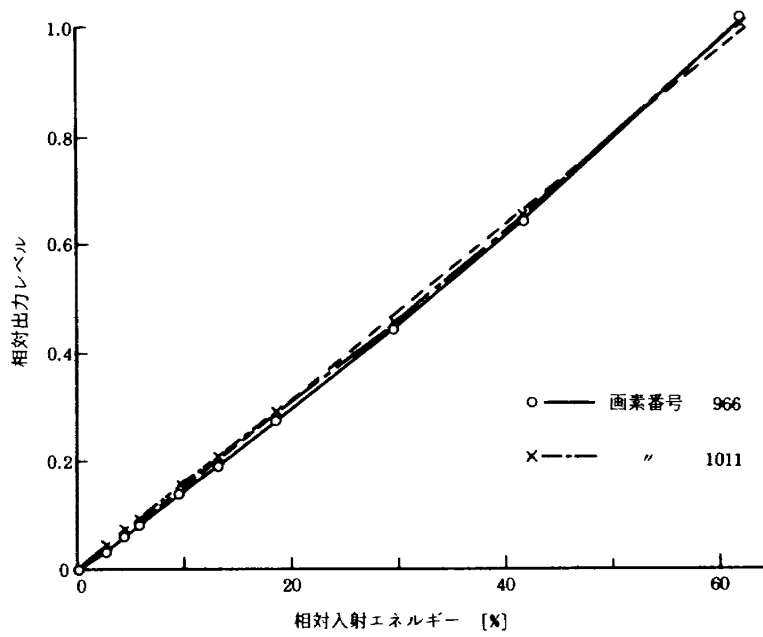


図 5-3(c) 屈折光学系を用いた放射計の入出力特性 (700~800 [nm])

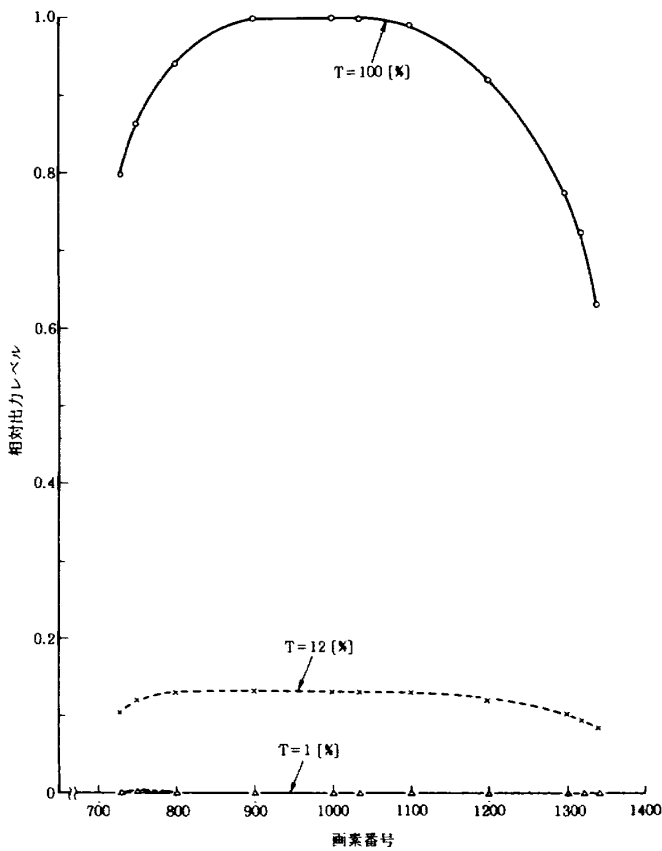


図 5-4(a) 屈折光学系を用いた放射計の画素間感度偏差 (透過率を変化させた場合)

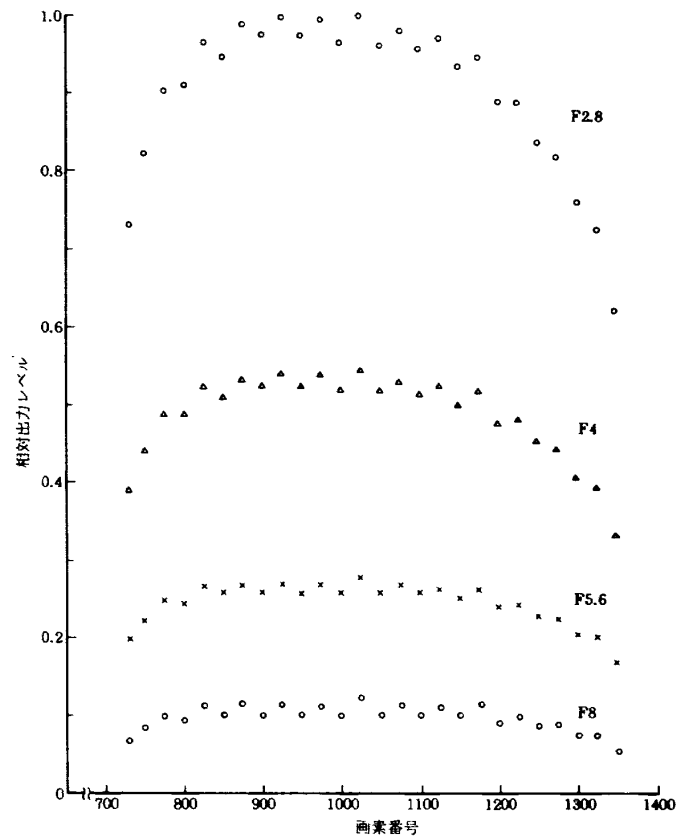


図 5-4(b) 屈折光学系を用いた放射計の画素間感度偏差 (絞りを变化させた場合)



った為各透過率とも感度のばらつきがある。しかし波長450~550[nm], 波長700~800[nm]では暗電流の補正を行っているので, 図5-5(b), (c)どちらの図においても, 透過率が低くなるにしたがい各画素間に感度の偏差が少しみられるが, 白色光よりは良い特性となっている。特に透過率  $T=18.6[\%]$  の画素番号の奇数と偶数の間では, 白色光の場合と同様に大きな出力偏差が生じていることがわかる。これは, CCD センサ素子単体の感度偏差特性 (図4-4参照), バイアス値と CCD 駆動装置における加算増幅器の奇数チャンネルと偶数チャンネルのバイアス値の差異が影響していると思われる。つまり絞りや透過率, 波長に関係なく奇数番目と偶数番目の画素間で感度の偏差があり, CCD センサ素子単体の感度特性が直接あらわれているといえる。

### (3) 空間分解能 (MTF) 特性

白黒の格子状になった分解能テストチャートパターンで白色光による屈折光学系プッシュブルーム走査型放射計の出力を求め, その結果よりコントラスト比 (MTF) を計算することができる。分解能テストチャートパターンの格子状線の最も白い部分の明るさを  $a$ , 最も暗い部分の明るさを  $b$  とするとコントラスト比 (MTF)  $C$  は,

$$C = (a - b) / (a + b) \quad (3)$$

で示される。

分解能テストチャートパターンによる空間分解能の測定結果の1例を図5-6に示す。この図においてレベルの高い方が白, 低い方が黒の部分で, 格子の幅が3000, 1200, 600, 480, 300[ $\mu\text{m}$ ]と狭くなるにつれ白黒の差が小さくなる。このような白黒レベルの差から(3)式によりコントラスト比

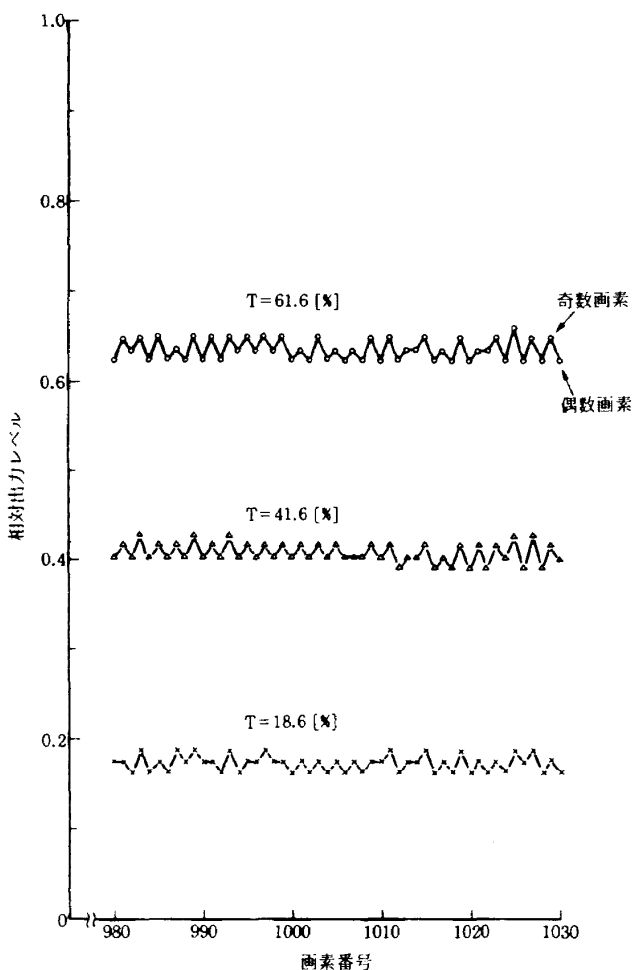


図5-5(a) 屈折光学系を用いた放射計の画素間感度偏差 (白色光)

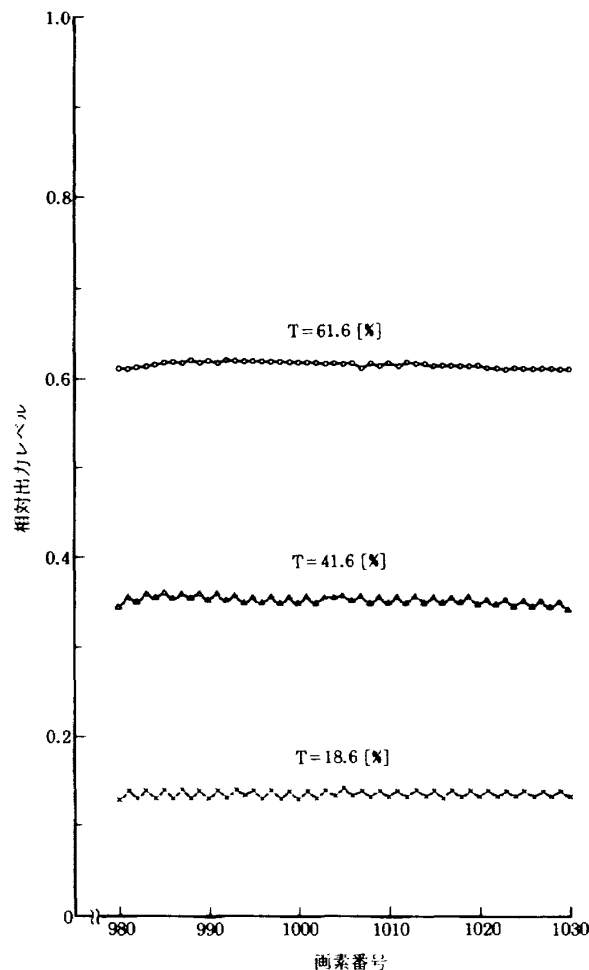


図5-5(b) 屈折光学系を用いた放射計の画素間感度偏差 (450~550 [nm])

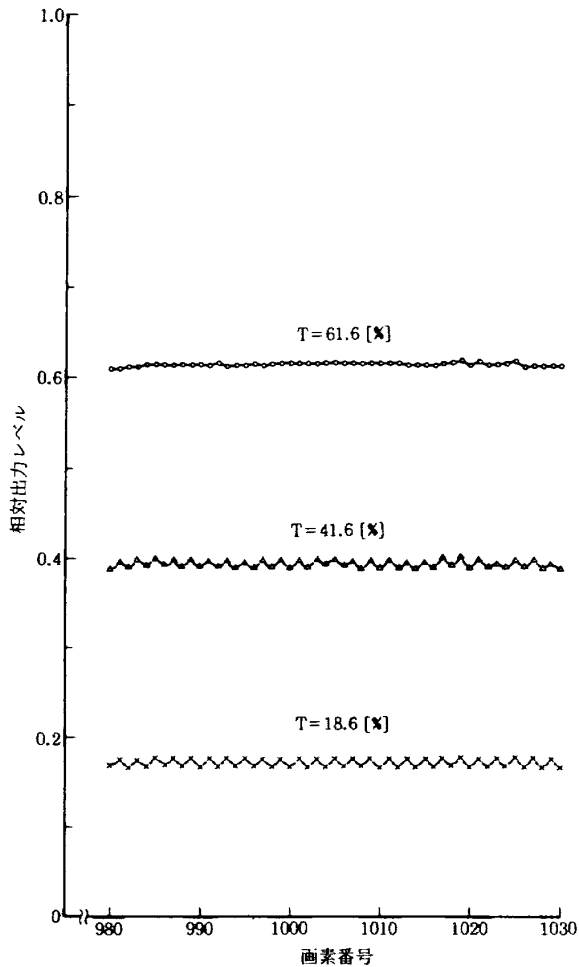


図 5-5(c) 屈折光学系を用いた放射計の画素間感度偏差 (700~800 [nm])

(MTF) を計算すると図5-7が得られる。図で、10[lp/mm]でMTFが0.9であったものが30[lp/mm]で約0.25に低下している(但し図5-6で示した測定結果と図5-7で用いた測定結果とは異なる)又図には点線で、屈折光学系プッシュブルーム走査型放射計のレンズ単体の空間分解能(図3-3の測定値)と CCD センサ素子の PSF (点像広がり関数)を矩形と仮定したときの空間分解能(これは MTF としては周知のように図5-8に示す Sinc 関数となる)との積より推定したプッシュブルーム走査型放射計の MTF も示されている。高周波領域では、実測値のほうが落込んでいるがこれは CCD 素子の PSF が矩形ではなく図4-5に示したような形をもつために空間分解能が理論値(Sinc 関数)より悪いこと、および測定誤差から生じていると推定される。

図5-7では白色光による空間分解能特性の計算値と実測値の比較を示したが、図5-9ではバンド別の実測値による空間分解能特性を示す。ここでは、各波長における空間周波数により空間分解能を表しているが波長 450~550 [nm] と 700~800 [nm] のどちらのバンドにおいてもさほど大きな差はない。またレンズ単体で波長別の MTF と

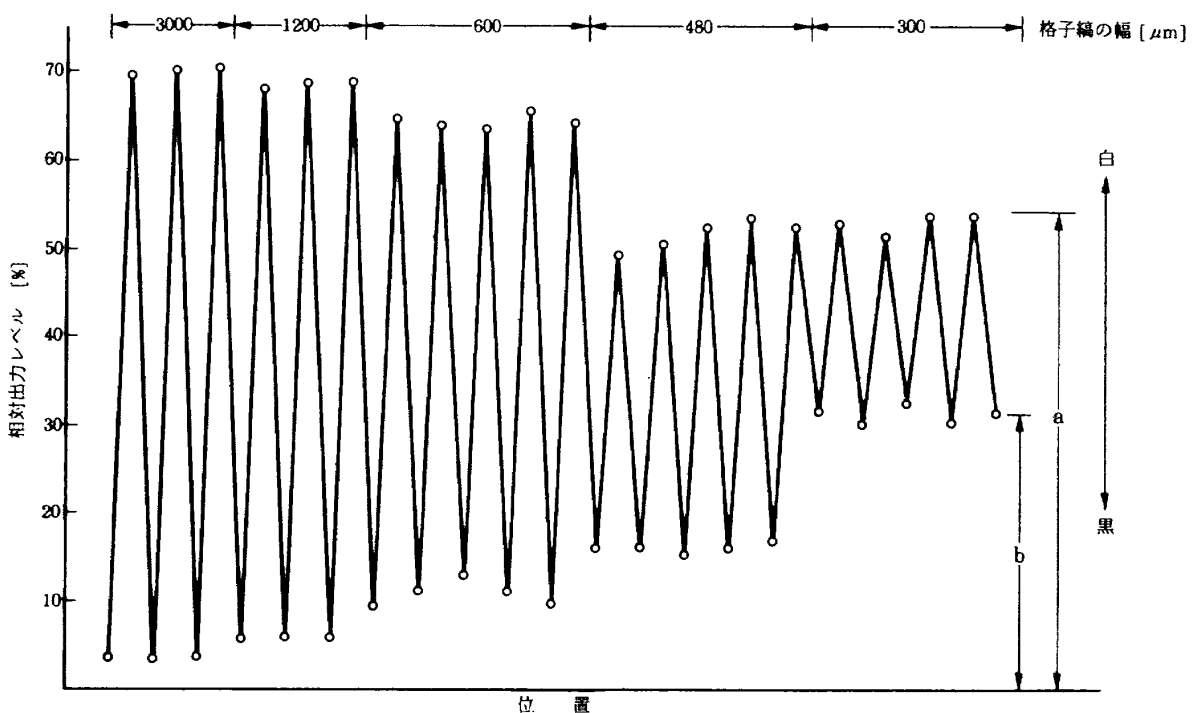


図 5-6 屈折光学系を用いた放射計の空間分解能の測定例

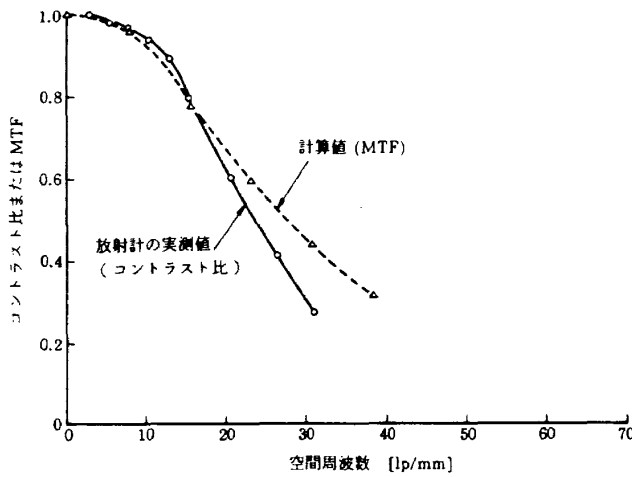


図 5-7 屈折光学系を用いた放射計の空間分解能特性 (白色光)

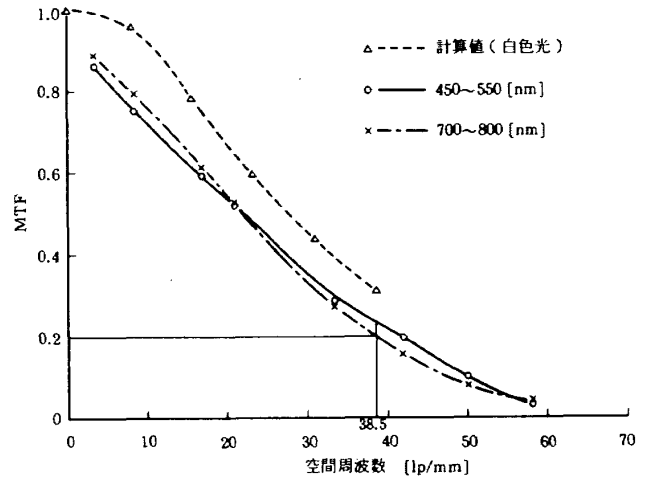


図 5-9 屈折光学系を用いた放射計の空間分解能 (バンド別)

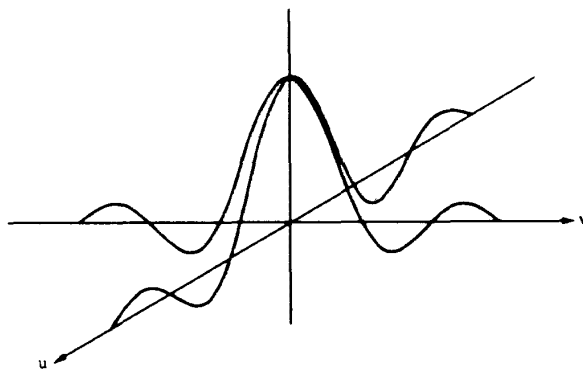


図 5-8 sinc (u, v)

CCD センサ素子の PSF による MTF の積として求めたものを計算値特性としても示した。実測値は、計算値より全周波数にわたって低い MTF の値を示している。しかし両バンド共に CCD センサ素子のアパーチャより決まるナイキスト周波数 ( $f_n=38.5$ [lp/mm])での MTF の実測値は 0.2 以上あり、放射計として十分とは言えないまでも、実用的には足るものと考えてよい。

(4) ドリフト特性

屈折光学系プッシュブルーム走査型放射計出力の長時間ドリフト特性は、図 5-10 に示す通りである。ドリフトの大部分は、駆動装置の加算増幅器によると考えられる。屈折光学系プッシュブルーム走査型放射計の温度上昇は、図に示されるように約  $30^{\circ}\text{C}$  で殆ど無い。

ドリフトは、出力カウント数で 4 程度であり、最大カウント数 (10 ビット A/D 変換で 1023) に対し 0.39 [%] である (但し積分時間 30.5 [ms])。

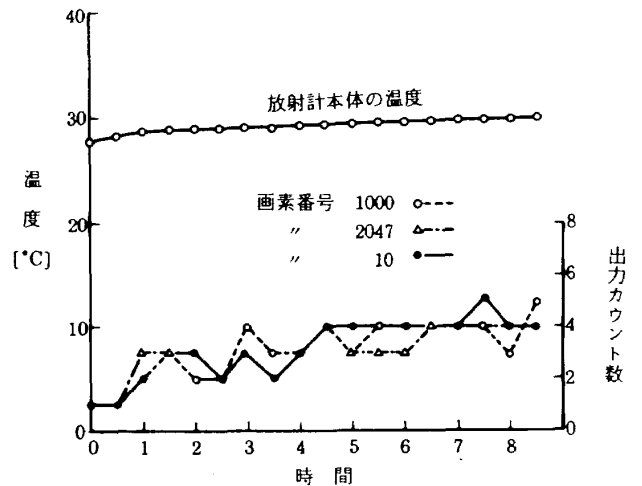


図 5-10 放射計のドリフト特性 (積分時間 = 30.5ms)

(5) 干渉特性

画素間の干渉の度合は、図 5-11(a), (b) で示すように画素番号 1033, 1034, 1035, 1036, 1037 において横軸に移動距離を、縦軸に相対出力レベルをとると波長 450~550 [nm] で相対出力レベルで約 0.7, 波長 700~800 [nm] で約 0.8 の点で交わっていることが判る。但し厳密な意味では、両波長の画素番号が 3 画素ずれて測定されたものであるが、傾向を把握するには十分である。図 5-11(a) に示される波長 450~550 [nm] の方は、輝度レベルが高い (相対出力レベルの大きい方) とところで少々平坦に近い特性を示しているが、図 5-11(b) の波長 700~800 [nm] では、山形となっている。

また波長 700~800 [nm] のバンドでは、画素番号 1035 の影響が画素番号 1033 に相対出力レベルで

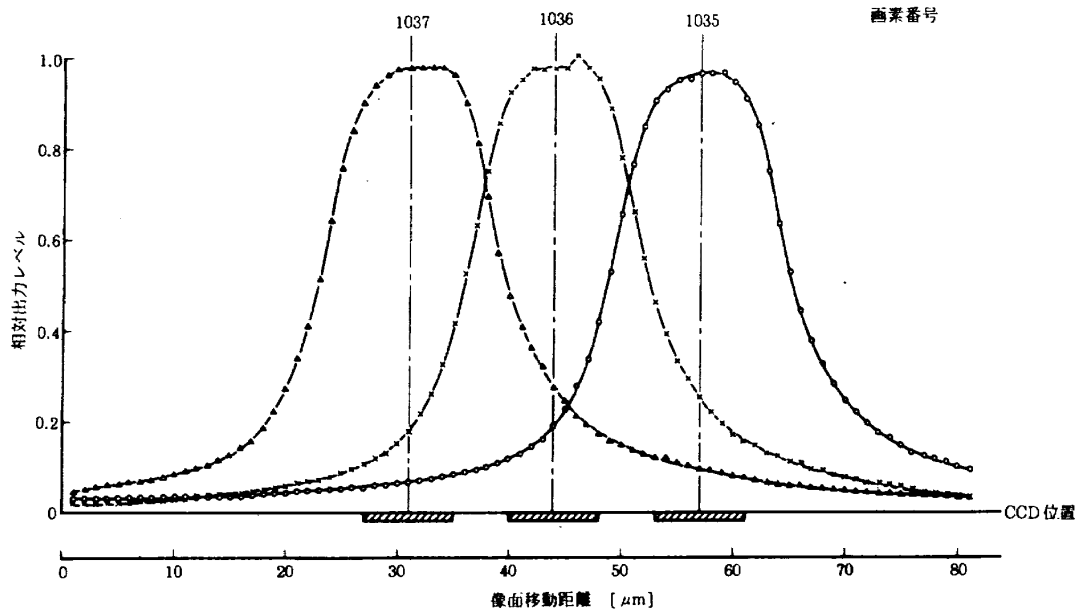


図 5-11(a) 屈折光学系を用いた放射計の画素間干渉特性 (450~550 [nm])

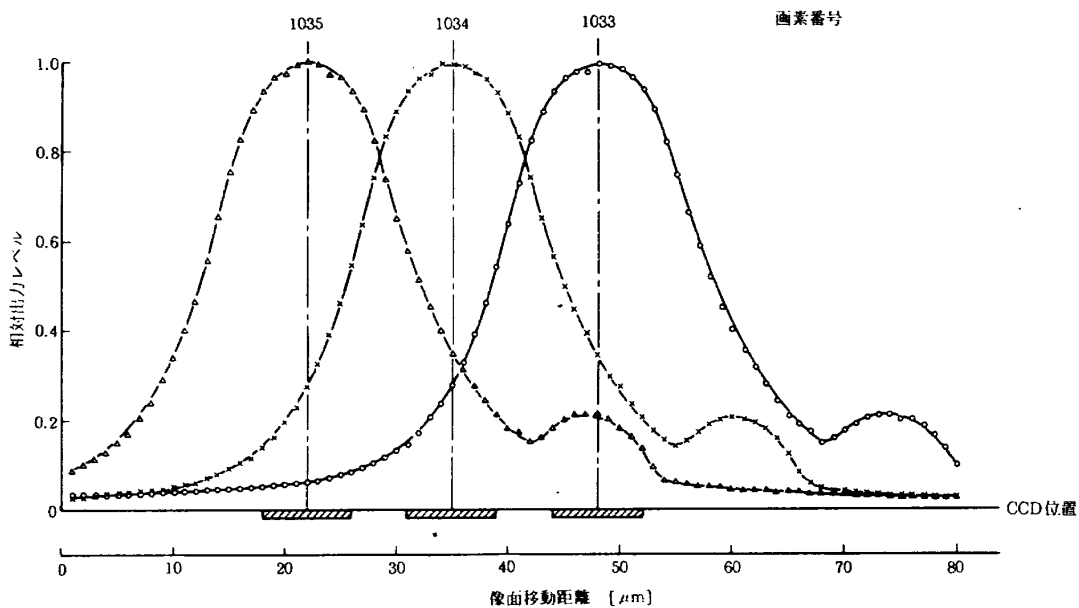


図 5-11(b) 屈折光学系を用いた放射計の画素間干渉特性 (700~800 [nm])

約0.2程度出力としてみられる。つまり偶数、奇数夫々の画素の隣同志の干渉も少しあるといえる。

(6) その他

画素によっては、相対出力レベルが波長により異なるものがあるが、同一画素(この場合画素番号1035を取上げた)における波長450~550[nm]と700~800[nm]のバンドによる相対出力特性を比較したものを図5-12に示す。この図から言える

ことは、波長が長いほう(700~800[nm])が若干末広がりとなり、干渉の度合いが少し多く、図4-5(a)と同じ傾向を示す。CCDセンサ素子単体の干渉特性が屈折光学系プッシュブルーム走査型放射計にもあらわれていることを示している。

これら干渉特性では、いずれも相対出力レベルの最大値で正規化を行っている。

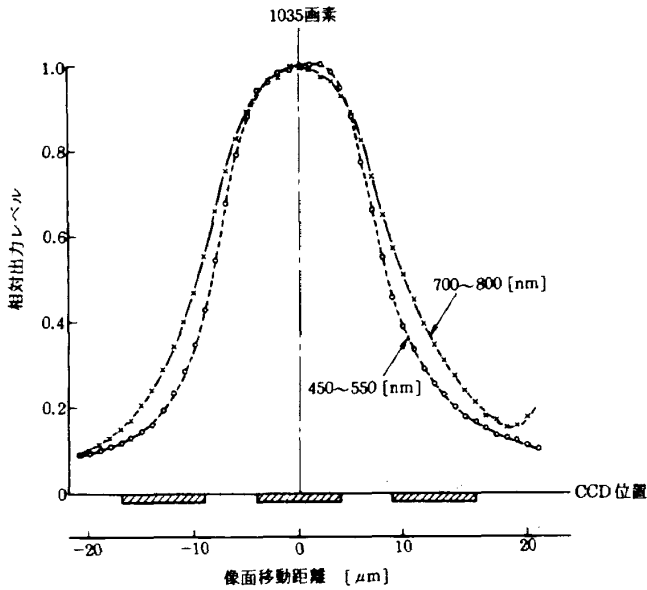


図 5-12 屈折光学系を用いた放射計の画素間干渉特性 (バンド比較)

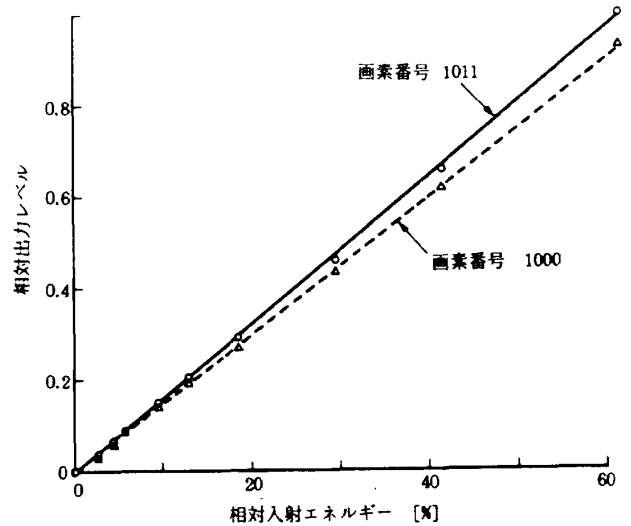


図 5-13 反射屈折光学系入出力特性 (700~800 [nm])

### 5.3 反射屈折光学系プッシュブルーム走査型放射計の測定結果

この光学系に前節と同じ CCD センサ素子や駆動装置を組合せて反射屈折光学系プッシュブルーム走査型放射計を構成し、図5-2に示す試作システム構成で性能評価試験を行った。

対数濃度グレースケールパターンを用いて測定した入出力特性を、図5-13に示す。ここでは、偶数画素と奇数画素について相対入射エネルギーに対する出力値を比較したものであり、画素番号1011の最大値で正規化したものを示す。入出力特性は奇数画素番号と偶数画素番号のどちらも良い直線性を示している。また奇数画素と偶数画素の差は画素番号1011を基準としてフルスケールで最大6.7[%]である。これは画素による感度差があり入出力特性の違いを表している。

つぎに波長700~800[nm]の各透過率における画素間感度偏差を測定した結果を図5-14に示す。但しこの測定結果では暗電流の補正を行っていない。よって図からわかるように屈折光学系プッシュブルーム走査型放射計の白色光(図5-5(a)参照)と同様に画素間の感度差がある。

図5-15は、画素番号1033, 1034, 1035の3画素のみについての干渉特性であり、画素番号1034の中心付近では相対出力レベルで約0.7、画素の端

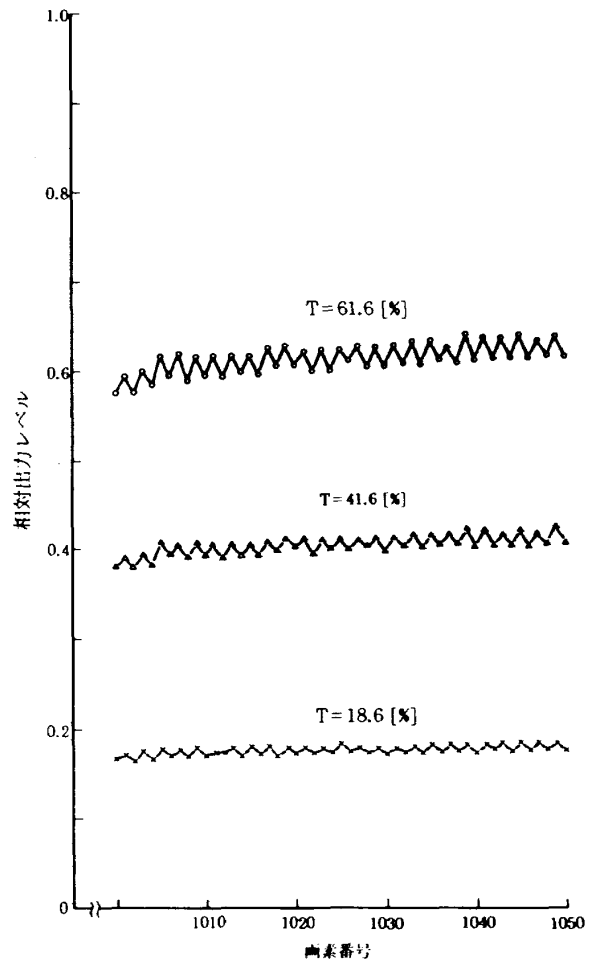


図 5-14 反射屈折光学系を用いた画素間感度偏差特性 (700~800 [nm])

で約0.3の干渉が認められる。

最後に同一画素(画素番号1034)と同一波長(700~800[nm])における屈折光学系プッシュ

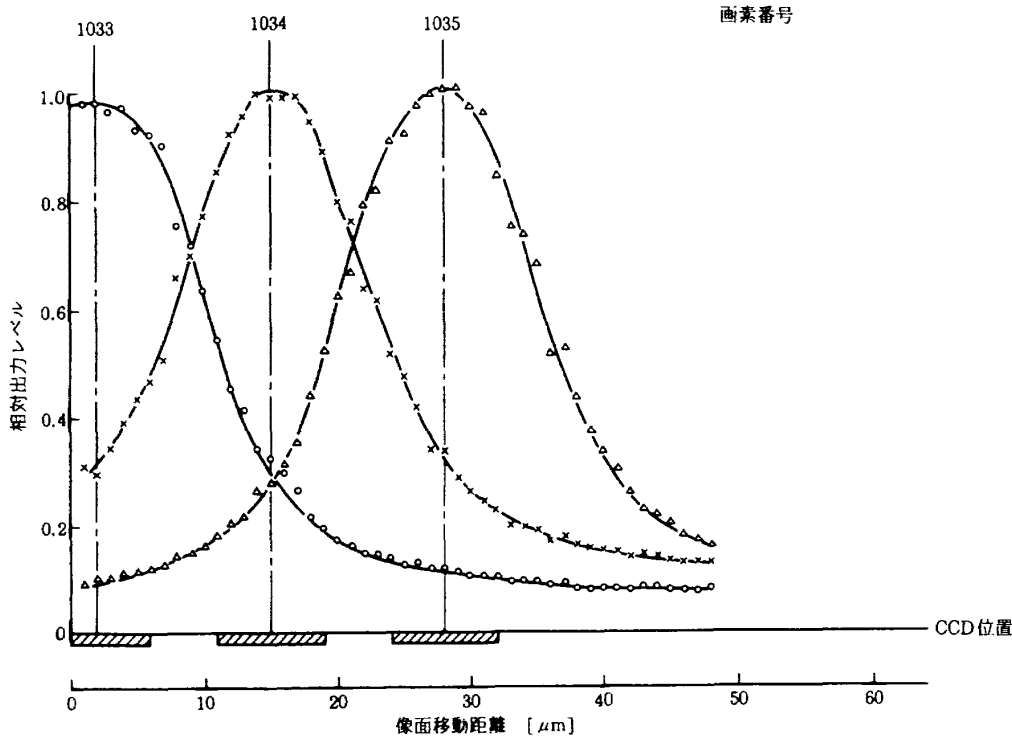


図 5-15 反射屈折光学系を用いた放射計の画素間干渉特性 (700~800 [nm])

ルーム走査型放射計と反射屈折光学系プッシュブルーム走査型放射計の出力特性を比較したものを図5-16に示す。図において反射屈折光学系プッシュブルーム走査型放射計のほうが屈折光学系プッシュブルーム走査型放射計より少しシャープな特性となっている。

### 6. まとめ

屈折光学系を集光部に用いた放射計については、航空機搭載用として10,000[m]の高度から地上を観測するとした場合

- 1) 十分の直線性をもって地上対象物の放射輝度を測定することができる。
- 2) 画素間のばらつきは最大1.3[%]あり、画像センサとして用いる場合、十分な較正を必要とする。
- 3) 空間分解能としては、ナイキスト周波数(地上における1[m]幅の黒白の縞)においてMTF0.2が得られる。

以上によりここで試作したプッシュブルーム走査型放射計は、航空機搭載用の放射計として十分な性能を有するものである。

反射屈折光学系を集光部に用いた放射計につい

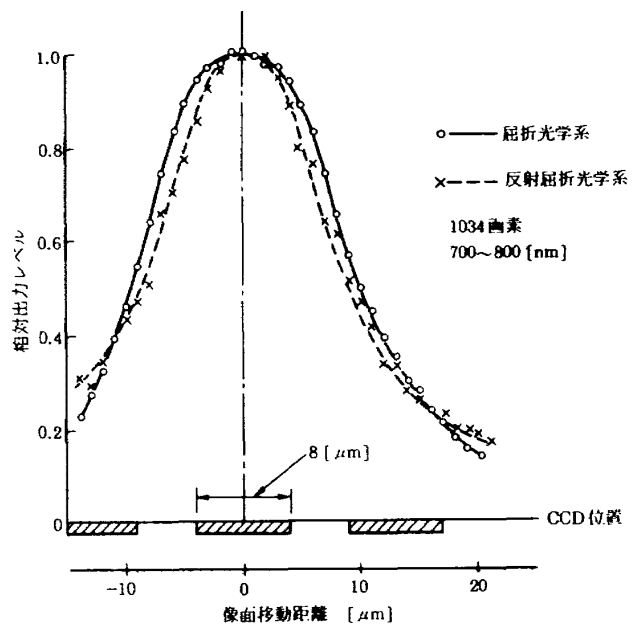


図 5-16 屈折光学系と反射屈折光学系の比較

ては、人工衛星搭載用として900[km]の高度から地上を観測するとした場合、直線性と画素間のばらつきについては、航空機搭載用のものと同一の結論を与えることができる。空間分解能としては、ナイキスト周波数(この場合は地上における20[m]幅の黒白の縞)において、画角の中心においては0.5以上のMTFが得られることが判った。直

下点を中心とした 30[km] の幅の中でも約 0.5 の MTF が得られる。

以上により、この特殊な反射屈折光学系（ライトシュミット光学系）を用いたプッシュブルーム走査型放射計は、人工衛星搭載用として地上 30[km] の幅の走査（画角で約 ±1[度] の場合には、非常によい空間分解能をもつ放射計になることが判る。

## 7. 謝 辞

CCD センサ素子の特性測定に際し、色々と御指導戴いた当所制御部の桜井善雄室長ならびに木村武雄主任研究官に感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 米国 SC 社 (Scientific Calculations, Inc.) 「TSS 用光学計算プログラム ACCOSV」, CRC センチュリリサーチセンタ株式会社.
- 2) 桜井善雄, 木村武雄, 輿石 肇, 倉益凌一: 「可視近赤外放射計 CCD イメージسنサの評価試験」, 航技研資料 TM-398, 1979.11.
- 3) 桜井善雄, 木村武雄, 輿石 肇: 「可視近赤外放射計用イメージセンサの評価試験」, 航技研資料 TM-438, 1981.6.
- 4) 本間幸造, 中 正夫, 輿石 肇: 「固体画像センサ性能評価システムの試作」, 航技研資料 TM-591, 1988.7.
- 5) 本間幸造他: 「CCD 画像センサの性能評価システム」第 25 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 2C3, 昭 56.
- 6) 本間幸造他: 「電子走査式擬似放射計の試作」第 27 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 1E2, 昭 58.

## 付 録

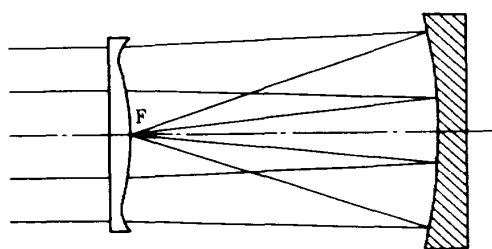
### A. ライトシュミット望遠鏡

通常、反射望遠鏡でシャープな像が得られる画角は極めて小さく、例えばパロマー山の反射望遠鏡（主鏡は放物面で口径 508[mm], F 値 3.3）では、シャープな星像が得られる像面の直径は 15[mm] で、画角に直すと僅かに 0.05[度] である。この様に、広い画角を必要とするときには放物面鏡を用いた望遠鏡を用いることは出来ない。

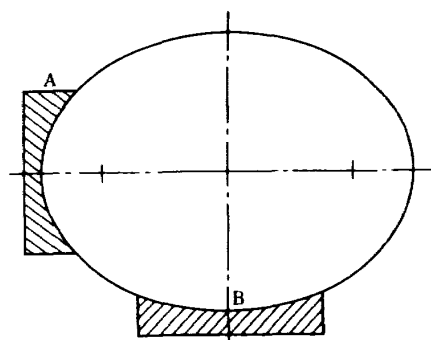
一方、屈折光学系は比較的容易に広い画角が得られることはよく知られている。この屈折光学系の広画角特性と、反射光学系の色収差の無い点とを組合せたものがシュミット望遠鏡に代表される反射屈折望遠鏡である。シュミット望遠鏡は図 2-1（2 章参照）に示されるように、球面主鏡の曲率中心 O に補正板 C（Correcting Plate: 通常 C.P. と略称する）を置いたもので、像面は主鏡と C.P. の中点に来る。C.P. は中心部が凸レンズで外側が凹レンズになった非球面レンズで、これにより球面収差を完全に除去している。C.P. の曲線は通常 4 次曲線でその形状は色収差が最小になるように決められる。この C.P. の曲線を適当に決めることによって、図の斜めから入射する光線束に対しても、その中心光線 OA（主光線）に対して上下対称になり、結果としてコマ収差も非点収差も除去できることになる。但し、それは図に示される曲った像面上においてのみ成立する。この像面も球面であるが、これを一寸でもはずれると途端に像の性質は悪くなる。この球面像面をそのまま用いる限り、±数度ぐらいまで非常にシャープな像が得られる。

シュミット望遠鏡の短所は全体の長さが焦点距離の 2 倍になることと、像面が曲っていることである。特に後者の欠点は CCD 等の撮像素子を像面に用いる場合には決定的な欠陥になる。これらの短所を克服しようとした試みがライトシュミット望遠鏡である。

ライトシュミット望遠鏡は主鏡に特殊な非球面を用いることによって付図 1 に示す様に C.P. の位置を焦点位置にまで前進させ、かつ像面を平坦に

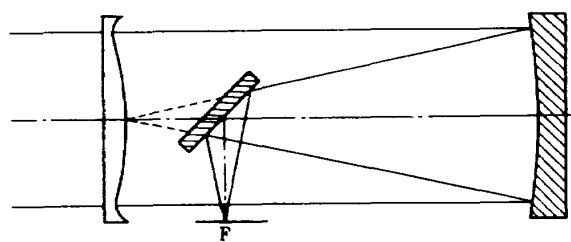


付図1 ライトシュミット望遠鏡



付図2 楕円面と偏球面

したものである。この主鏡に用いられる非球面は偏球面と呼ばれるもので、付図2のBに示す様に楕円をその短軸まわりに回転して出来る曲面である（因みにAに示す様に長軸まわりに回転して出来るのが楕円面である）。この焦点の前に斜鏡を入れて付図3の様に像面を鏡筒の外に取り出したものが今回用いたライトシュミット望遠鏡である。球面収差はC.P.と偏球面の主鏡により完全に除去されているが、コマ収差と非点収差が平坦な像面上で完全に除去されているとは言い難い。通常±2[度]位までの画角が使用できる範囲で、それ以上になると急激に像の性質が悪くなる。



付図3 今回用いたライトシュミット望遠鏡

### B. 偏球面およびC.P.の式

ここで考えている光学系は、光軸に関して回転対称である。通常、光軸をz軸にとり入射方向を正にとる。そしてx, y軸はこれに対して右手系をなす様にとる（付図4参照）。z軸に対して回転対称であるから、この光学系のどの面も次式の様なzとyのみの式で規定できる。

$$z = (c \cdot y^2) / \{1 + \sqrt{1 - (k+1)c^2 \cdot y^2}\} + dy^4 + ey^6 + fy^8 + gy^{10} + \dots \quad (B-1)$$

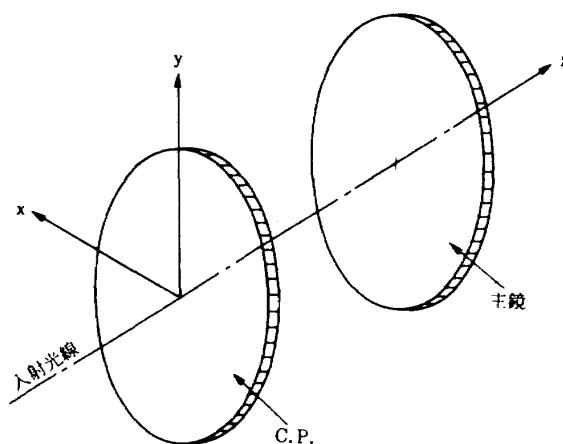
d, e, f, g, …等は高次非球面を定義するときには必要になるが、偏球面を含む通常の円錐曲面には必要ない。このことを以下に示す。

今  $d=e=f=g=\dots=0$  とすると、

$$z = (c \cdot y^2) / \{1 + \sqrt{1 - (k+1)c^2 \cdot y^2}\} \quad (B-2)$$

$y=0$  (軸上)における曲率半径をrとすると、

$$r = \{1 + (dz/dy)^2\}^{3/2} / (d^2z/dy^2) |_{y=0}$$



付図4 座標軸系

であるが(B-2)式から、

$$(dz/dy) |_{y=0} = 0, \quad (d^2z/dy^2) |_{y=0} = c$$

となるから、

$$r = 1/c \quad (B-3)$$

が得られる。

(B-2)式を変形すると、

$$c(k+1)z^2 - 2z + cy^2 = 0$$

(B-3)式を用いて更に変形すると、

$$\{z - r/(k+1)\}^2 / \{r/(k+1)\}^2 + y^2 / [(k+1) \cdot \{r/(k+1)\}^2] = 1 \quad (B-4)$$



すなわち円錐曲線の式が得られる。この式の離心率は $\sqrt{1-(k+1)}$ となる。従って(B-2)式は円錐曲線をあらわしそれを光軸(z軸)のまわりに回転して出来る円錐曲面はkの値によって次のように分類される。

$k < -1$  ; 双曲面

$k = -1$  ; 放物面

$-1 < k < 0$  ; 長軸に回転対称な楕円面

$k = 0$  ; 球面

$0 < k$  ; 短軸に回転対称な偏球面

ここで(B-2)式にもどって $\sqrt{\quad}$ の部分を展開して、yが小さいとして第3項までとると、

$$z \approx c/2y^2 + \{c^3(k+1)/8\} \cdot y^4$$

$$= (1/2r) \cdot y^2 + \{(k+1)/8r^3\} \cdot y^4 \quad (B-5)$$

すなわちyが小さい範囲では(B-5)式が円錐曲線をあらわし、そのときのkの値と円錐曲線の種類との対応は前述の通りである。

次にC.P.の数式はライトシュミット望遠鏡を含むシュミット望遠鏡では次式で与えられる。

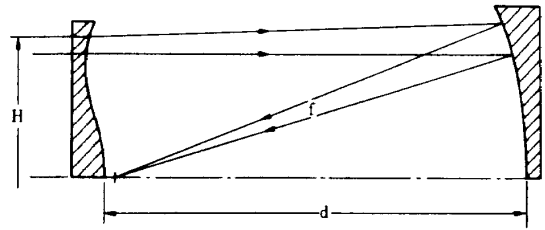
$$z = [(-k \cdot H^2) / \{4(n-1)d \cdot r^2\}] \cdot y^2$$

$$+ [1 / \{4(n-1)d \cdot r^2\}] \cdot y^4 \quad (B-6)$$

ここに、kは中性帯の高さをきめる定数、Hは口径の1/2、rは軸上における曲率半径、nは硝材の屈折率、dはC.P.と主鏡との距離である。

### C. 試作ライトシュミット望遠鏡の主鏡およびC.P.

ライトシュミット望遠鏡のパラメータを付図5に示す。



付図5 ライトシュミット望遠鏡のパラメータ  
 $d = f, r = 2d$

#### (1) 主鏡

主鏡の形状は(B-5)式で与えられる。試作したライトシュミット光学系では、

$$r = 950[\text{mm}], d = f = 475[\text{mm}], k = 1.0$$

これらを(B-5)式に代入して次式を得る。

$$z = 1.052632 \cdot 10^{-3} \cdot y^2$$

$$+ 2.91588 \cdot 10^{-10} \cdot y^4 [\text{mm}] \quad (C-1)$$

#### (2) C.P.

C.P.の形状は(B-6)式で与えられる。試作したライトシュミット光学系では、

$$r = 950[\text{mm}], d = 475[\text{mm}], H = 62.5[\text{mm}],$$

$$k = 1.5, n = 1.51633 (\lambda = 587.56[\text{nm}])$$

これらを(B-6)式に代入して、

$$z = -1.323588 \cdot 10^{-5} \cdot y^2$$

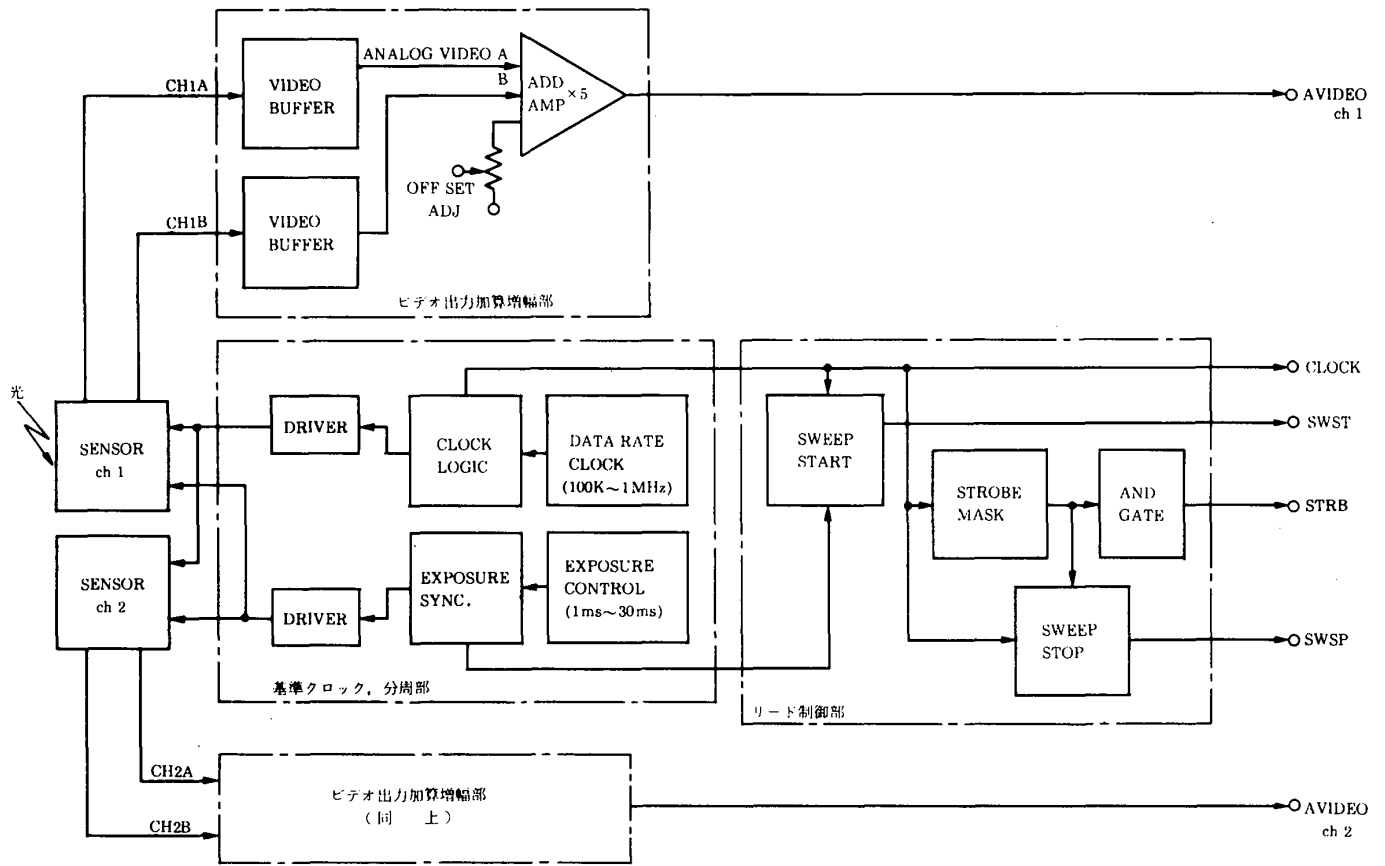
$$+ 1.12946 \cdot 10^{-9} \cdot y^4 [\text{mm}] \quad (C-2)$$

となる。

波動光学的MTFの計算は(C-1)、(C-2)式を用いて行った。

# 正 誤 表

P15 図4-7 添付の図と差替え



---

## 航空宇宙技術研究所報告1024号

平成元年6月発行

発行所 航空宇宙技術研究所  
東京都調布市深大寺東町7丁目44番地1  
電話三鷹(0422)47-5911(大代表)〒182  
印刷所 株式会社三興印刷  
東京都新宿区西早稲田2-1-18

---

**Printed in Japan**