

NAL TM-570

ISSN 0452-2982

UDC 621.383.5

535.243.2

# 航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-570

スターセンサ用CCDエリアセンサの評価試験

桜井善雄・木村武雄

1987年4月

航空宇宙技術研究所  
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

# スターセンサ用CCDエリアセンサの評価試験\*

桜井善雄\*\* 木村武雄\*\*

## 1. まえがき

スターセンサは人工衛星や宇宙船の姿勢を高精度で決定できるので既に使用されている。しかしながら従来のものはセンサとして光電子増倍管(真空管)を使用しているために重量や消費電力が大きくなる等の欠点がある。このために近年の半導体技術の発達と相まって、小型軽量、低消費電力、高精度、長寿命が期待されるCCDスターセンサの開発が強く求められるようになって来た。

CCDスターセンサの研究開発を進めるに当たっては、その眼の部分に相当するCCDエリアセンサ(以下センサと略す)の光電特性を十分に掌握しておくことが是非とも必要である。CCDスターセンサに使用されるセンサは感度を上げるために、その蓄積時間(カメラのシャッタースピードに相当するもの)が通常使用されているTVカメラよりも長く(数倍~数十倍)且つ冷却も必要とする。しかしながらこのような使われ方は、どちらかと言えば特殊な使われ方であるために、このような使用条件で測定されたセンサの光電特性に関しては報告が非常に少ない。

当所においてはCCDスターセンサの試作・試験に関する研究を、株式会社東芝との共同研究とも併せて、昭和57年より行ってきた。この中で人工衛星搭載用CCDスターセンサの設計・試作を行うための基礎資料を得ることを目的として、センサの光電特性に関する評価試験を行い有益な成果を得たので報告する。

## 2. センサの概要<sup>1)</sup>

ここで評価試験したセンサは写真2.1のような外

表 2.1 センサの概要

型 名	TCD203C(東芝製)
転 送 方 式	インタライン転送方式
走 査 方 式	2:1インタレース
有効画素数	380(H)×490(V)
画素サイズ	22(H)×13(V) $\mu\text{m}$
チップサイズ	9.9×8.0 mm
感 光 部	p-n接合型フォトダイオード
水平レジスタ	2相埋込みチャンネルCCD
垂直レジスタ	4相埋込みチャンネルCCD

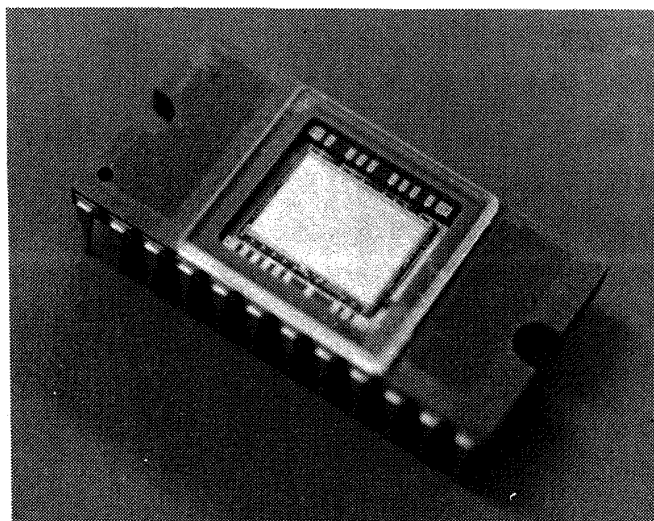


写真 2.1 センサの外観

観のものであり、その概要は表 2.1 の通りである。CCDスターセンサは観測した恒星の方向から自分の姿勢を精度良く決定するのに使用される。このためには得られた各星のデータがそれぞれの恒星に相当しているかを同定する必要がある、この同定のためには一般に3個以上の恒星をCCDスターセンサが同時に捕捉する必要がある。また天空のどちらの方向を見てもほとんど3個以上の恒星が得られるためには暗い恒星(例えば6等星程度の恒星)も観測できなければならない。したがってセンサはでき

\* 昭和62年2月20日受付  
\*\* 計測部

るだけ高感度であることが望ましく、このためにセンサの冷却も必要になってくる。このような観点から、ここではセンサをペルチェ素子を用いた電子冷却によって冷やし、センサに対する各種の評価試験を行った。なお冷却中はセンサの近傍に少量の窒素ガスを常時流してセンサ表面を覆い、センサに霜が付着するのを防止した。

### 3. センサの性能試験測定系

#### 3.1 センサの性能試験用データ処理系

センサの性能試験用データ処理系構成図を図 3.1 に示す。データの取得方法は 2 通りあり、1つの方法は任意の 1 画素からの出力電圧をデジタル電圧計（ヒューレット・パッカード製、3478A 型）により精度良く測定する方法であり、他の方法はセンサの 1 フレーム（1 画面）中、任意の行から 32 行分の画素出力電圧を逐次 A/D 変換（8 ビット）して一度に多数の画素出力を測定する方法であって、これらの選択は計測制御装置の選択スイッチにより行われる。後述するように、ここではセンサに関する 6 種類の試験を行っているが、ブルーミングに関する試験以外の試験に関してはすべて前者のデータ取得方法を用いている。1 画素からの出力電圧の測定は最初に計測制御装置のアドレス・スイッチを希望の画素にセットし、その後測定の度ごとに机上型計算機のキーボード上の操作により行われる。一方、32 行分（ $380 \times 32$  画素分）の A/D 変換器出力は（Direct Memory Access により）机上型計算機のメモリに一旦ストアされ、その後磁気テープ装置に送られて MT に書き込まれ、MT を通して大型計算機に入力

される。なおデジタル電圧計及び磁気テープ装置は机上型計算機と GP-IB インタフェースにより結合され、データの受け渡しがなされている。センサ出力の 1 画面全体の様子をつかむためには画像モニタ装置が使用される。この装置はデジタル画像メモリとこの内容を表示するモニタ用 TV とから成り立っている。この装置の取り込み用ボタンを押すことにより、その時点におけるセンサ 1 画面分のアナログ出力信号が 8 ビットで逐次 A/D 変換されてデジタル画像メモリに書き込まれ、その後その内容は常時モニタ用 TV に映し出される。

#### 3.2 センサの性能試験用光学系

センサの性能試験用光学系構成図を図 3.2 に示す。光ファイバの一端は顕微鏡筒内に置かれ、他端は①分光器の出力側あるいは②フィルタ側に置かれる。通常の測定には①を使用し、光の強さを定量的に増減させたいときには②を使用する（「光ファイバ受光端面上の放射照度は（模擬）点光源からの距離の二乗に反比例する」性質を利用して、光源を光学ベンチ上で左右に移動させ、放射照度の増減を行う）。なお試験に際しては光ファイバ受光端面上の放射照度が①②いずれの場合においても、できるだけ様になるよう（場所によって明るさにむらが無いよう）常に配慮した。光ファイバを通過して顕微鏡筒に導かれた光は対物レンズを通過して適当な大きさの光（直径  $2 \sim 210 \mu\text{m}$  のスポット）に絞られた後、その下に置かれたセンサに照射される。このセンサは XY ステージ（ $1 \mu\text{m}$  ピッチで移動可能）に載せられているので、センサには任意の波長及びスポット径を

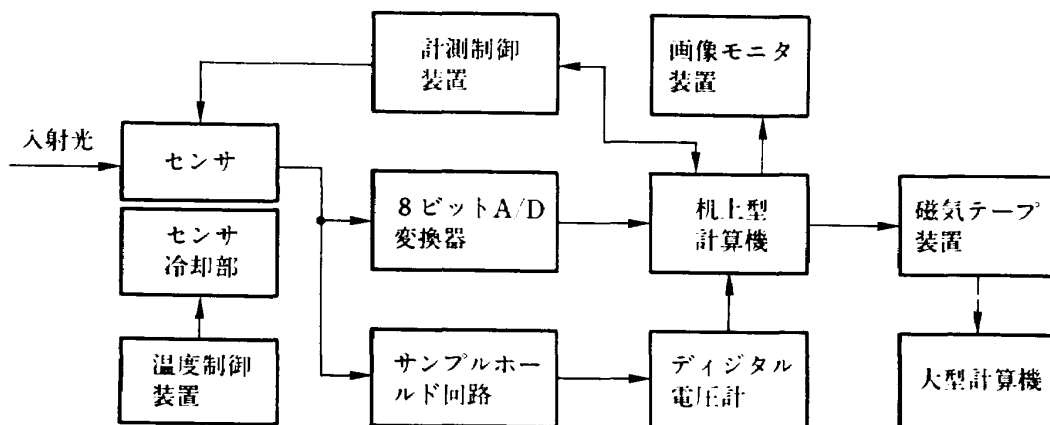


図 3.1 センサの性能試験用データ処理系構成図

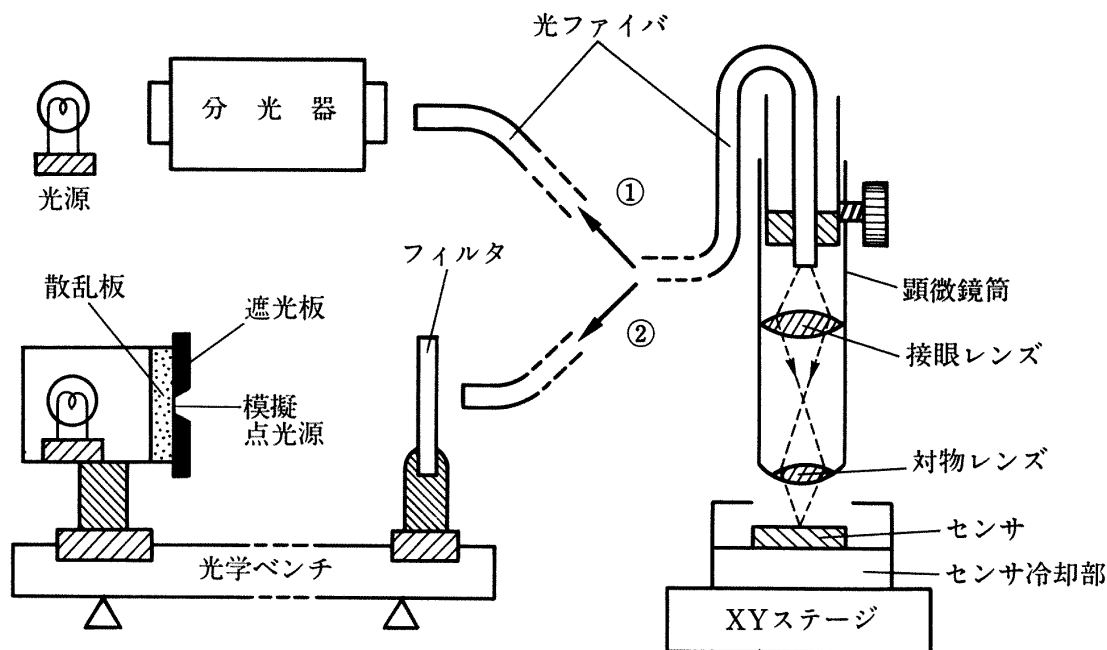


図 3.2 センサの性能試験用光学系構成図

もった光をセンサの希望する場所に照射することができる(ここでは分光器出力の波長範囲を  $0.4\sim 1.1\ \mu\text{m}$  とした)。一方、センサは電子冷却により所定の温度 ( $-25\sim 20^\circ\text{C}$ ) に保たれるようになっている。また直流安定化電源を用いて光源を点灯することにより時間的に安定した光を得るようにしている。

写真 3.1 は防振台に乗せられたセンサの性能試験装置の概観である。ここで①は光源(ハロゲンランプ,  $12\text{V}$ ,  $100\text{W}$ )、②は分光器(日本光学工業製, G-250 型)、③は光ファイバ(オリンパス光学工業製, LG-2-15型, 直径  $50\ \mu\text{m}$  の単繊維を束ねた光ファイバの直径:  $2\text{mm}$ , 長さ:  $1.5\text{m}$ )、④は顕微鏡筒、⑤はXYステージ(日本光学工業製, A3 型, ストローク:  $50\times 50\text{mm}$ , 光電式マイクロメータ付, 最小目盛:  $1\ \mu\text{m}$ )、⑥はXYステージの移動距離の表示器、⑦は計測制御装置、⑧は画像モニタ装置のモニタ用TV、⑨は画像モニタ装置のデジタル画像メモリ、⑩は測定画素の近傍をリアルタイムで観測するための残光性の強い(約5秒)オシロスコープ(切り換えてメモリスコープにも使用できる)、⑪は窒素ガスを供給するためのビニールホース、⑫は防振台( $1.5\times 3.0\text{m}$ )である。写真 3.2 は写真 3.1 の中央部分を拡大したものである。ここで⑬は顕微鏡に取り付けられた対物レンズであり、⑭はセンサであり(写真では見えないが穴の下にセン

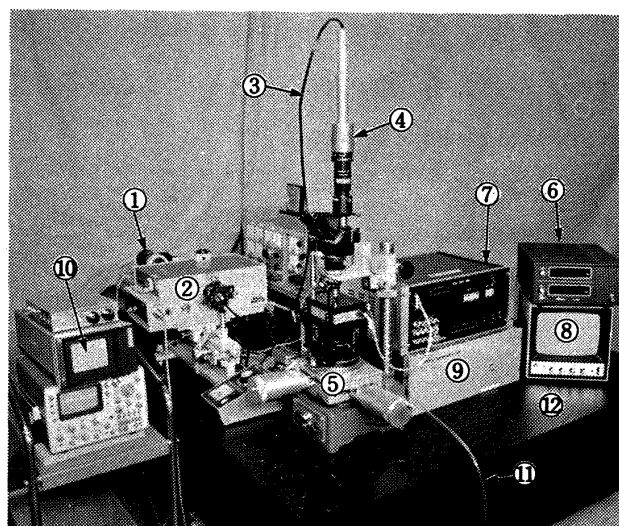


写真 3.1 センサの性能試験装置の概観

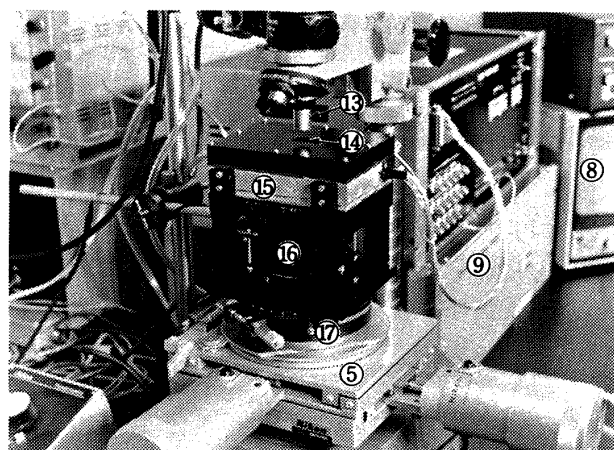


写真 3.2 写真 3.1 のセンサ周辺の拡大

サがある), ⑮はセンサ冷却部である。なおセンサ冷却部の下側には冷却用ファン⑯が置かれており, これはセンサに直接振動が伝わらないようにセンサ冷却部の左側に見える防振台に固定された支柱により支えられている。⑰は回転ステージで⑤の上に乗せられている。

#### 4. センサ諸特性の試験方法<sup>2)</sup>

##### 4.1 直線性の試験方法

図 3.2 における光学ベンチ(長さ 2 m)を用い, 光ファイバの受光端を②側に配置してセンサの直線性の試験を行った。直径約 70  $\mu\text{m}$  のスポットの中心がセンサの測定画素の中心に照射されるように顕微鏡及び X Y ステージをそれぞれ調整し, 固定する(スポット径を 70  $\mu\text{m}$  にした理由は 5.2 で述べる)。光ファイバの受光端面の入射光は入射角が一定(光軸が受光端面にはほぼ垂直)で且つ受光端面上の放射照度も一様である(面の明るさが一様)と仮定する。入射光の波長を固定すると光ファイバの受光端面の放射照度とセンサ上のスポットの放射照度との比は一定(光の減衰率は一定)と考えられる。図 3.2 において模擬点光源の直径を 1.5 mm とし, これより光ファイバ受光端面までの距離を 180~1800 mm の範囲で変える。このことにより光ファイバ受光端面の放射照度, すなわちセンサ上の放射照度を変えて, 直線性(センサの入射光量と画素出力との関係)の試験を行った。センサの直線性は波長に依存しないと考えられるので, 図 3.2 のフィルタを除きセンサの照射光には主として白色光を用いて試験を行ったが, 参考のために図 3.2 のようにバンドパスフィルタ(半値幅が 505~593 nm)を通して緑色光による試験も行った。

##### 4.2 分光感度特性の試験方法

図 3.2 において光ファイバの受光端を①側に配置し, 分光器の出力光を顕微鏡筒を通してセンサに導く。4.1 の場合と同様にして直径約 70  $\mu\text{m}$  のスポットの中心がセンサの測定画素の中心に照射されるように顕微鏡及び X Y ステージをそれぞれ調整し, 固定する。次に分光器入力光源(白色光源)を一定にして, 最大感度における測定画素出力が約 250 mV

になるように分光器のスリット幅を調整して固定する。次に波長を 0.4~1.1  $\mu\text{m}$  まで 0.01  $\mu\text{m}$  間隔で変えながらその都度スポットのピントを合わせ, 測定画素出力  $V_c(\lambda)$  を測定する( $\lambda$ : 波長)。次にセンサの代わりに基準センサ(1  $\text{cm}^2$  の円形受光面を有するシリコンセンサ)を置き, 同様にして 0.4~1.1  $\mu\text{m}$  まで 0.01  $\mu\text{m}$  間隔で基準センサ出力  $V_r(\lambda)$  を測定する。この場合には最初に適当な波長(例えば 550 nm)でピントを合わせておけば, その後測定波長を変える度ごとにピントを合わせる必要がない。なぜならば基準センサの受光面はスポットの大きさに比べて十分大きいので, ピントが少しぐらい外れても結局は全部の光が基準センサに照射されることになるので, 基準センサ出力に対するピントぼけの影響はほとんど無いからである。基準センサの相対分光感度を  $S_r(\lambda)$ , センサの相対分光感度を  $S_c(\lambda)$  とすれば

$$S_c(\lambda) = K \frac{V_c(\lambda)}{V_r(\lambda)} S_r(\lambda) \quad (4.1)$$

となってセンサの相対分光感度特性を求めることができる。ここに  $K$  は  $S_c(\lambda)$  を正規化するための定数である。スポット光の放射照度分布(面の明るさの分布)を正確に求めることは難しいために, 上述の方法で精度良くセンサの絶対感度を求めることは難しい。このために絶対感度を図 4.1 のような方法で求めた。すなわち分光器の出力側に散乱板を置き, その前面に直径 5 mm の穴の開いた遮光板を置き, その前方で放射照度分布ができるだけ一様になるよう十分離れた所(この場合 24 cm とした)にセンサをその受光面が光軸に垂直になるように配置する。また分光器の入力光源を一定にし, 且つ分光器の波長を

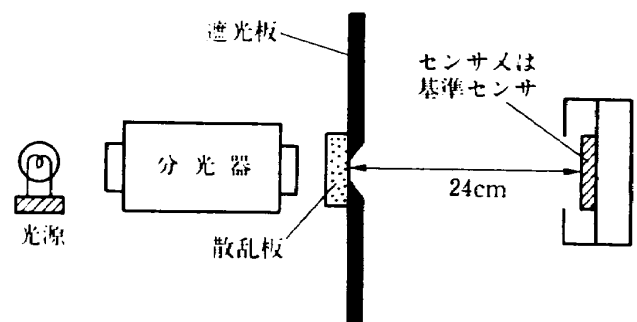


図 4.1 絶対感度の測定

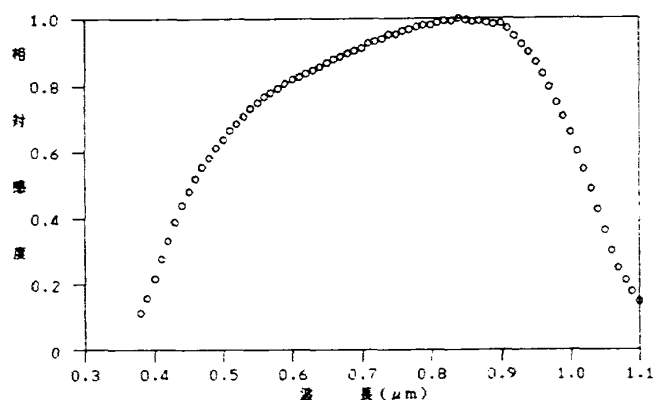


図 4.2 基準センサの相対分光感度特性

550nmにセットして測定画素出力が例えば250mVになるように分光器のスリット幅を調整して固定する。次にセンサの代わりに基準センサを置き換えて、基準センサ出力を測定する。基準センサにはほぼ一樣な(面の明るさの)光が照射されていると考えられるので、センサの置かれた面の放射照度を求めることができる。測定画素出力を例えば250mVに選んだという理由は、測定誤差をできるだけ少なくするためにセンサの直線性が良く且つ画素出力の大きい値を選んだということである。また波長を550nmに選んだ理由は後の試験結果からも分かるように、画素間の干渉ができるだけ少なく且つセンサの分光感度の高い波長を選んだからである。なお基準センサの絶対感度は工業技術院電子技術総合研究所にて校正されたもの(0.38~1.10 $\mu\text{m}$ まで0.01 $\mu\text{m}$ 間隔で校正)を用いている<sup>3)</sup>。この基準センサの相対分光感度特性を図4.2に示す。

#### 4.3 分光感度分布特性の試験方法

4.2の場合と同様に図3.2において光ファイバの受光端を①側に配置し、分光器の出力光を顕微鏡筒を通してセンサに導く。センサ上に直径約2 $\mu\text{m}$ のスポットが照射されるように顕微鏡を調整するとともに、センサのX軸Y軸がそれぞれXYステージのX軸Y軸と一致するように回転ステージの調整も行う。その後はXYステージを動かすことによりセンサの任意の場所にスポットを照射することができる。ここでは特定波長(例えば550nm)のスポットが測定画素の中心に照射されるよう調整した後に、XYステージをX軸上またはY軸上に沿って-50~50

$\mu\text{m}$ の範囲を1 $\mu\text{m}$ ピッチで動かし分光感度分布特性を測定した。なお顕微鏡を高倍率(約1000倍)で使用しているために、対物レンズと測定画素との距離が僅かでも変化するとスポットのピントが急にはずれてくる。センサの受光面はスポットの光軸と完全に直交するには配置されていないので(実際にそのように配置・調整するのは難しい)、例えばスポットを数百 $\mu\text{m}$ 以上動かすとピントがはずれてくる。また温度変化による材料の伸縮によっても対物レンズと測定画素との距離が変化するので同様にしてスポットのピントがはずれてくる(特にセンサ系が熱平衡に達していない時には、この現象が顕著である)。また振動の影響も受けやすい。したがって試験に際してはこれらの点に十分注意を払う必要があった。

#### 4.4 画素間の不均一性の試験方法

4.2の場合と同様にして図3.2における光ファイバの受光端を①側に配置し、分光器の出力光を顕微鏡筒を通してセンサに導く。また直径約120 $\mu\text{m}$ のスポットの中心がセンサの測定画素の中心に照射されるように顕微鏡及びXYステージをそれぞれ調整するとともに、センサのX軸Y軸がそれぞれXYステージのX軸Y軸と一致するように回転ステージの調整も行う。4.1, 4.2においてスポットの直径を約70 $\mu\text{m}$ としていたのに対してここで120 $\mu\text{m}$ と広げた理由は、測定画素にできるだけ均一な光を照射して測定精度を上げるためである。4.1, 4.2においては測定画素面上に多少照射むらがあっても、スポットの位置はそのままである(XYステージは動かさない)ので測定精度低下に対する影響は少ない。これに対して画素間の不均一性の試験においてはスポットの位置を22 $\mu\text{m}$ (X軸方向に動かす場合)または13 $\mu\text{m}$ (Y軸方向に動かす場合)ピッチで動かすので、測定画素面上に照射むらがあると(XYステージの誤差のためにXYステージを動かす度に測定画素に照射されるスポットの照射分布が多少異なってくるので)それによって測定に誤差を生ずる。

#### 4.5 暗電圧に関する試験方法

センサの入射光を遮断してセンサの温度、蓄積時

間、測定画素をパラメータとした暗電圧測定を行った。

#### 4.6 ブルーミングに関する試験方法

一つの画素に飽和レベル以上の強い光が照射された場合、その周辺画素出力にどのような影響が現れるか、その概要をここでは調べた。4.3の場合と同様に図 3.2 において光ファイバの受光端を①側に配置し、分光器の出力光を顕微鏡筒を通してセンサに導く。センサ上に直径約  $2\ \mu\text{m}$  のスポットが照射されるように顕微鏡を調整し、また希望する画素の中心にスポットが来るように X Y ステージを動かし固定する。スポットの強さは分光器の入射スリット幅及び射出スリット幅を変えて行った。なおここにおける入射出スリット幅の最大値はいずれも  $2\ \text{mm}$  であり、分光器の逆線分散は約  $6\ \text{nm/mm}$  である。31 (X)  $\times$  31 (Y) 画素出力の画面データを各測定ごとに計算機に取り込み、試験を行った。ここで画面の中心画素はスポット照射の画素である。

### 5. センサの性能試験結果

以下に述べるセンサの性能試験結果は次の様な共通の測定条件の下で試験された結果である。

(1) センサの蓄積時間は  $2133\ \text{mS}$  である。但し暗電圧に関する試験結果の場合のときのみ  $2133, 4266, 8533\ \text{mS}$  のいずれかである。

(2) センサ温度は  $-20, 0, 20^\circ\text{C}$  のいずれかである (主として  $-20^\circ\text{C}$ )。但し暗電圧に関する試験結果の場合のときのみ  $-20, -10, 0, 10, 20^\circ\text{C}$  のいずれかである。

図 5.1 の白丸印は代表的な測定画素を示す。ここで X 軸はセンサの水平方向 (走査方向) であり、また Y 軸は垂直方向である。

#### 5.1 直線性の試験結果

直線性の試験結果を付図 1.1 ~ 1.8 に示す。ここにおいて縦軸は暗電圧を基準としたセンサの出力電圧であり、横軸は相対光量 (相対放射照度) である。付図 1.1 はセンサの照射光を白色光とし、センサ温度を  $-20^\circ\text{C}$  としたときの図 5.1 (C) に示すような 3 画素に対する試験結果である。左側寄りにプロット

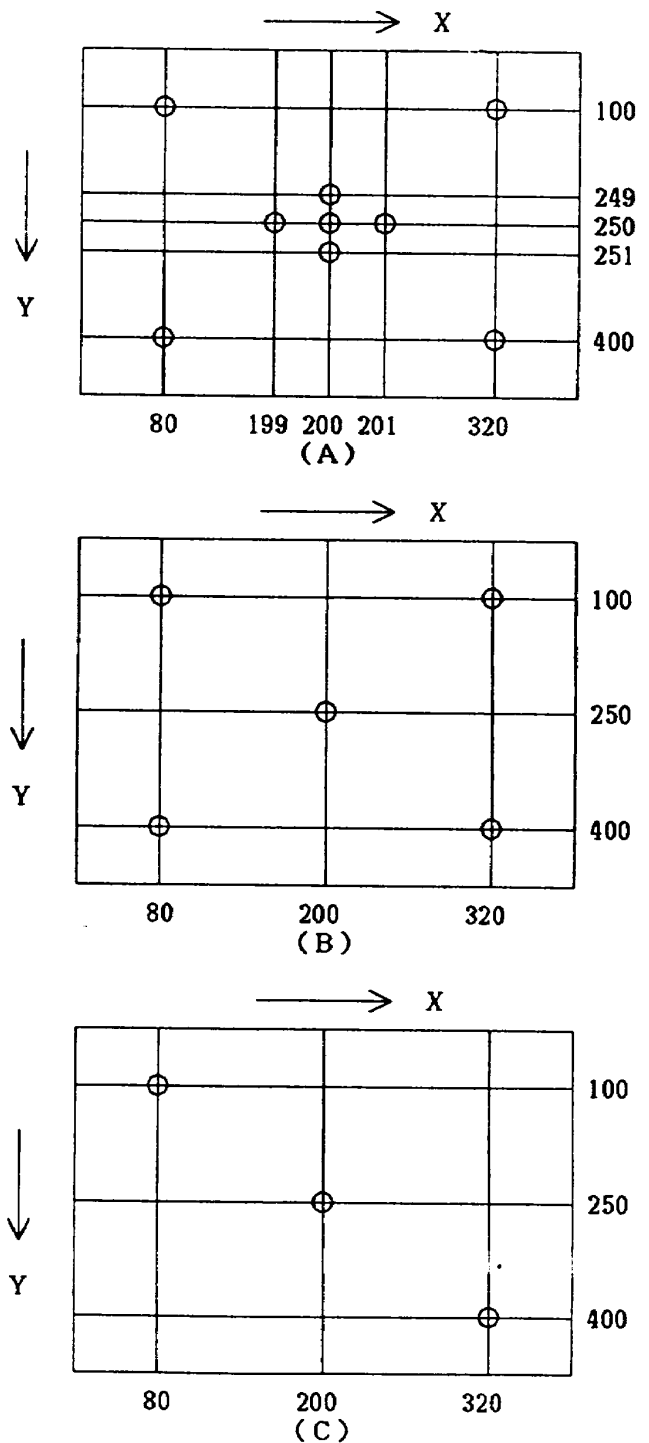


図 5.1 測定画素

されている 3 本のグラフに対しては左側の縦軸 ( $0 \sim 500\ \text{mV}$ ) を使用する。また横軸に関しては、一番左側のグラフに対して一番上側の  $0 \sim 1.0$  の目盛を使用し、左側から二番目、三番目のグラフに対しては、それぞれ上から二番目、三番目の目盛を使用する。各グラフの最大光量 (最大放射照度) はそれぞれ等しく、また各測定点は最大光量を 10 等分した点である。一方、右側寄りにプロットされている 3 本のグラフはそれぞれ左側寄りにプロットされてい

る3本のグラフの相対光量0～0.1の間を更に細かく(10等分)測定したもので、これらのグラフに対しては右側の縦軸(0～50mV)を使用する。また横軸に関しては同様にして、左側のグラフに対しては上から四番目の0～0.1の目盛を使用する。以下同様である。左側寄りに引かれた3本の直線は、それぞれ左側寄りにプロットされている250 mV以下の測定データを用いて最小二乗法により求めたものである。また右側寄りに引かれた3本の直線は左側寄りに引かれた各直線をそのまま右側寄りの座標系に移したものである。なお付図1.1の右上に示したDATA NO.の順序はグラフの並んでいる順序と同じである。

付図1.2～1.5は付図1.1よりも最大光量を少し減らして、図5.1(A)に示す9画素について試験した結果である。ここにおいてセンサの照射光は白色光、センサ温度は-20℃であり、また各グラフの最大光量はすべて同じである。なお各グラフに対応する縦軸・横軸の見方は、付図1.1の場合と同じであり、また直線の引き方も同様である。

付図1.6はセンサの照射光を白色光とし、最大光量を一定とし、センサ温度を-20、0、20℃と変えて、同一画素(X=200, Y=250の画素)の直線性を試験した結果である。温度が上昇するとセンサの暗電圧が増加し、ダイナミックレンジ(センサの飽和電圧-暗電圧)が小さくなってきている(付図1.6において、-20℃におけるダイナミックレンジが411mVであるのに対して20℃では348mVに減少している)。

付図1.7はセンサ温度を-20℃、センサの照射光を緑色光(白色光に半値幅が505～593 nmのバンドパスフィルタを通した光)とし、かつ光源の明るさを3通りに変えて、同一画素(X=200, Y=250の画素)の直線性を試験した結果である。一番左側のグラフは3通りのなかで光源を最も明るくした場合であり、左側から三番目のグラフは光源を最も暗くした場合であり、真ん中のグラフはこれらの中間の明るさの場合である。

付図1.8は照射光を緑色光(左側のグラフ)にした場合と白色光(右側のグラフ)にした場合との特性の差を比較するためのもので、2つの直線の傾き

がほぼ同じになるように各グラフの最大光量を選んでいる。なおセンサ温度は共に-20℃である。

表5.1は上述した付図1.1～1.8の各測定データに対する直線性を求めたものであり、標準偏差は付図の左側寄りに引かれた直線に対する250 mV以下のデータより求めた値(250 mVで正規化し、%で表わしたものである。また偏差は相対光量が0～0.1の間の各測定データ(11点)の直線からのずれの二乗の和の平均値の平方根を標準偏差の場合と同様に250 mVで正規化し、%で表わしたものである。すなわち

$$\text{偏差} = \frac{\sqrt{\left(\sum_{n=1}^{11} \epsilon_n^2\right) / 11}}{250} \times 100 (\%) \quad (5.1)$$

ここにおいて $\epsilon_n$ は各測定データの直線からのずれである。

写真5.1は白色光のスポット(直径約70 $\mu$ m)をセンサに照射したときのX軸方向に隣接する11画素からのセンサ出力信号をオシロスコープで観測した結果の一例である。ここで縦軸はセンサ出力であり(実際にはセンサ出力を11.5倍に増幅した信号を測定しているが、ここでは便宜上、縦軸目盛をセンサ出力に換算して示す)、縦軸目盛の0 mVは暗電圧に相当している。横軸はY=250一定、X=195～205の11画素の並びであり、これらの画素間のピッチは22 $\mu$ mである。写真中央のセンサ出力はX=200, Y=250の画素出力である(センサ温度は-20℃、蓄積時間は2133mS)。

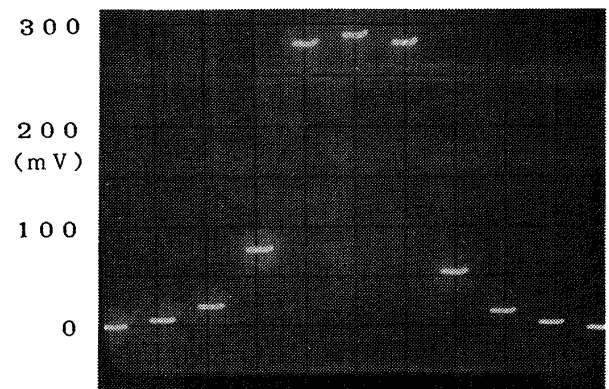


写真5.1 スポット照射時のセンサ出力



表 5.1 センサの直線性

付図番号	DATA NO.	画素アドレス (X, Y)	照射光	センサ温度 (°C)	標準偏差 (%)	偏差 (%)
1.1	520	80, 100	白色	-20	0.31	0.21
1.1	521	200, 250	白色	-20	0.37	0.29
1.1	522	320, 400	白色	-20	0.57	0.29
1.2	523	80, 100	白色	-20	0.30	0.19
1.2	524	200, 250	白色	-20	0.19	0.27
1.2	525	320, 400	白色	-20	0.34	0.16
1.3	526	320, 100	白色	-20	0.27	0.20
1.3	524	200, 250	白色	-20	0.19	0.27
1.3	527	80, 400	白色	-20	0.42	0.16
1.4	528	199, 250	白色	-20	0.33	0.16
1.4	524	200, 250	白色	-20	0.19	0.27
1.4	529	201, 250	白色	-20	0.36	0.17
1.5	530	200, 249	白色	-20	0.23	0.20
1.5	524	200, 250	白色	-20	0.19	0.27
1.5	531	200, 251	白色	-20	0.36	0.19
1.6	538	200, 250	白色	-20	0.28	0.15
1.6	537	200, 250	白色	0	0.24	0.19
1.6	536	200, 250	白色	20	0.97	0.65
1.7	535	200, 250	緑色	-20	0.37	0.22
1.7	534	200, 250	緑色	-20	0.47	0.17
1.7	533	200, 250	緑色	-20	0.26	0.17
1.8	535	200, 250	緑色	-20	0.37	0.22
1.8	521	200, 250	白色	-20	0.37	0.29

## 5.2 分光感度特性の試験結果

相対分光感度特性の試験結果を付図 2.1～2.7 に示す。ここにおいて縦軸はセンサの相対出力電圧であり、横軸は波長 (0.4～1.1  $\mu\text{m}$ ) である。付図 2.1 は図 5.1 (C) に示すような 3 点の測定画素の選り、センサ温度を 20°C にした場合の試験結果であり、また付図 2.2, 2.3 はそれぞれ付図 2.1 のセンサ温度のみを 0°C 及び -20°C に変えた場合の試験結果である。付図 2.3, 2.4 はセンサ温度を -20°C 一定にした場合に測定画素を図 5.1 (B) のように選んだ場合の試験結果である。付図 2.5～2.7 は測定画素を図 5.1 (C) のように選んだ場合のセンサ温度をパラメータ (-20, 0, 20°C) にした試験結果である。

これらの試験結果から各画素の相対分光感度特性はほとんど同一であり、また 20°C の場合を除けば温度によってもほとんど変わらないと言える。

4.2 で述べた基準センサを基にして求めたセンサの絶対感度について以下に述べる。

センサ温度を -20°C、測定画素を  $X = 200$ ,  $Y = 250$ 、波長を 550 nm としたときに、蓄積時間 (2133 mS) の間のエネルギー密度が 1  $\text{cm}^2$  当たり  $1 \times 10^{-9}$  ジュール (1 nJ/ $\text{cm}^2$ ) の光量を照射すると 2.76 mV のセンサ出力が得られた。したがって上記画素に対する分光感度特性は、例えばエネルギー密度が 100 nJ/ $\text{cm}^2$  の光量を照射した場合には付図 2.3 の縦軸の最大値を 1.0 から 276 mV に置き換えたものとなる。

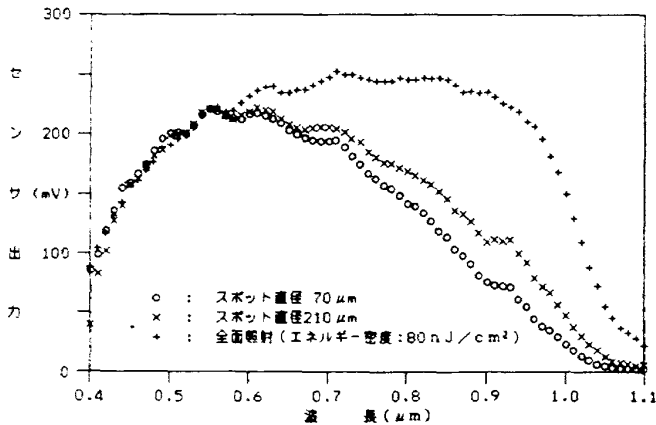


図 5.2 分光感度特性と測定条件

他の画素に対する分光感度特性（絶対感度）も上述のものと同様であるが、画素間の感度差の詳細については 5.4 で述べる。

以上はスポットの直径を70 μmにした場合の試験結果であるが、何故70 μmのスポットを選んで試験したかの理由を以下に示す。センサ全面に様な光を照射した場合の試験結果を図 5.2 に示す。ここでセンサ温度は-20℃、測定画素は X=200, Y=250 であり、また蓄積時間の中にセンサ全面に照射されるエネルギー密度は1 cm<sup>2</sup>当たり80×10<sup>-9</sup>ジュール（80 nJ/cm<sup>2</sup>）である。センサ温度及び測定画素を同じにしてスポットの直径を70及び210 μmにした場合の試験結果も併せて図 5.2 に示す。なおスポットを用いた測定では絶対感度は求められないので、これらの分光感度は550 nmにおいて全面照射の分光感度と等しいものと仮定している。本来はこれら3本のグラフは一致すべきものであるが、実際には画素間の干渉や迷光等のために、ここに示すように異なった値で測定されている。測定画素のみに様な光を照射し、他の場所には光を全然照射しないで測定するのが理想的ではあるが、実際にそのようなスポットを作ることは難しい。そこでここでは70 μmのスポットで代用した。そこで図 5.2 においては70 μmのスポットの場合が最も真の値に近いと思われる。5.4でも述べるように画素間の干渉は波長が長くなるにしたがって顕著になってくる（例えば550 nmではほとんど干渉が見られないが650 nm以上になると、だんだん干渉が大きくなっていく）。測定波長が短くなっていくとセンサ出力はだんだんと減少してくるので測定精度も悪くなっていく。そ

こでセンサ出力が大きく且つ画素間の干渉も少ない550 nmの波長を絶対感度を求める波長に選んだ。

### 5.3 分光感度分布特性の試験結果

相対分光感度分布特性の試験結果を付図 3.1～3.24に示す。同一頁の上側の図はある特定画素の中心からX軸に沿って±50 μmの範囲にわたり、1 μmピッチでスポットを移動させたときの試験結果であり、また下側の図は上記画素の中心から同様にしてY軸に沿ってスポットを移動させたときの試験結果である。付図 3.1～3.2は測定画素を X = 200, Y = 250とし、波長を550 nmとしてセンサ温度を20, 0, -20℃と変えた場合の試験結果である。付図 3.3～3.10は同様にして波長のみを650, 750, 850, 950 nmと変えた場合の試験結果である。付図 3.1～3.10の結果から相対分光感度分布特性は、ほとんど温度に依存しないと考えられるので、以下はセンサ温度を-20℃一定とした場合の試験結果を示す。付図 3.11～3.20は測定画素を図 5.1 (C)のような3画素とした場合における波長を550, 650, 750, 850, 950 nmと変えた場合の試験結果である。これらの試験結果から相対分光感度分布特性はどの画素でもほとんど同一であると思われる。以上のことから相対分光感度分布特性は、ほとんど波長のみ依存すると思われるので、測定画素を X = 200, Y = 250とし、波長を550, 650, 750, 850, 950 nmと変えた場合の試験結果を付図 3.21～3.24に示す。これらの試験結果から波長が長くなっていくと画素間の干渉が大きくなっていくことが分かる。付図 3.23において干渉のために生ずるピークが±22, ±44 μm付近にあるのはX軸方向の画素ピッチが22 μmだからである。また同様にして付図 3.24において干渉のために生ずるピークが±13, ±26, ±39 μm付近にあるのはY軸方向の画素ピッチが13 μmだからである。

### 5.4 画素間の不均一性の試験結果

画素間の不均一性の試験結果を付図 4.1～4.9に示す。これらは図 5.1 (C)に示すような測定点を中心にして±30画素の範囲についてX軸またはY軸に沿って画素間の不均一性（感度むら）を試験した結

果である。付図の(A)はYを固定してX軸方向の感度むらを表わしたものであり、(B)はXを固定してY軸方向の感度むらを表わしたものである。付図4.1～4.3は波長を550nmとした場合であり、付図4.4～4.6は波長を750nmとした場合であり、また付図4.7～4.9は波長を950nmとした場合である。各グラフにおける感度むらの0%は各グラフにおけるデータの平均値を示す。なお各グラフにおける全体的なバラツキを見るために、それぞれグラフの右上には標準偏差を示した。試験結果から(波長が950nmになると若干感度むらが大きくなっているが)、感度むらは波長にほとんど依存しないと言える。また例えば付図4.1(A)と付図4.4(A)のように波長のみを変えて同じ画素間の感度むらと比較した場合に、波長が550nmの場合と750nmの場合との間にはある程度の相関関係が見受けられるが(550nmで感度の高い画素は750nmでも比較的感度が高く、550nmで感度の低い画素は750nmでも比較的感度が低いと言うこと)、その他の組合せの場合(550nmと950nmまたは750nmと950nmとの組合せの場合)にはほとんど相関関係は見受けられない。

図5.1(C)に示すような3画素間の感度差について調べた結果を表5.2に示す。ここにおいて各波長ともX=200, Y=250の画素の感度を基準(100%)として示した。

### 5.5 暗電圧に関する試験結果

センサの暗電圧とセンサ温度及び蓄積時間に関する試験結果を付図5.1～5.3に示す。これらは図5.1(C)に示すような測定点に関して試験した結果であるが、いずれもほとんど同じ結果であり、センサ温度が約6.2～9.0℃上昇するごとに暗電圧は2倍に増加している。なおいずれの出力も飽和レベルにはまだ達していない。

### 5.6 ブルーミングに関する試験結果

ブルーミングに関する試験結果を付図6.1～6.5に示す。ここにおいてスポットが照射されている画面の中央画素はX=200, Y=250の画素であり、またセンサ温度は-20℃一定である。付図6.1は波

表5.2 画素間の感度差

波 長 (nm)	画素アドレス(X, Y)		
	80,100	200,250	320,400
550	102.0	100.0	99.3
750	102.0	100.0	101.5
950	100.3	100.0	98.1

長を550nmとした場合であり、(1)はスポット照射画素出力がちょうど飽和レベルになるような強さの光を照射した場合の各画素の出力状況を示したものであり、(2), (3), (4), (5), (6)は照射した光の強さを飽和レベルのそれぞれ3, 10, 30, 100, 300倍にした場合の各画素の出力状況を示したものである。付図6.2～6.5は付図6.1と同様であるが、波長だけが650, 750, 850, 950nmと異なっている。なお付図6.4, 6.5には(6)の画面が抜けているが、これは光源の光量不足のために試験が出来なかったためである。波長が長くなるにしたがってブルーミングの影響が強く現れていることがわかる。センサ温度が上昇すると各画素の暗電圧が増加するとともに画面全体に乗っている雑音も増加して来る。しかしながらこれはブルーミングに直接関係するものではないので、ここではセンサ温度を-20℃としたときの試験結果のみを示す。

## 6. まとめ

CCDエリアセンサはTVカメラを主目的として製作されている。これをCCDスターセンサという特殊な使用条件で使用した場合に、その基本的な光電特性がどのようになり、またどのような点が問題になるかを調べた。その結果次のようなことが明らかになった。

(1) センサの直線性、分光感度特性、分光感度分布特性、画素間の不均一性、ブルーミングに関しては、センサ温度にほとんど依存しないと考えてよい。しかしながらセンサ温度が上昇してくると雑音が増加してくるので、そのために直線性は悪くなったように見える。

(2) 分光感度特性、分光感度分布特性はどの画素でもほとんど同一である。また直線性についても飽

和レベル付近を除けば同様のことが言える。

(3) 画素間の不均一性(感度むら)は全画素に対しておよそ1.5%(標準偏差)以下である。

(4) 分光感度分布特性から分かるように各画素は面一様な感度分布を持っているわけではなく、場所によっては不感帯が存在する。このために画素の大きさよりも十分小さな拡がりを持つ星像(良くピントの取れた星像)がセンサに結像されると、その結像場所によって画素出力に大幅な変動を生ずる。これはスターセンサとして使用する場合には好ましくない現象である。この影響をできるだけ緩和するためには、故意に星像をぼかす(例えば星像の拡がりを画素の大きさと同程度にする)必要がある。

(5) 分光感度分布特性から分かるように波長が長くなってくると画素間の干渉が増加してくる。このことはスターセンサに使用した場合に、ある1つの画素に星像が結像されていたとしても、その周辺画素にもその出力の一部が漏れて現れるということであり、ぼけた星の画像が得られるということである。しかしながらこのことは画像処理でほぼ対応できることなのでスターセンサとして使用するときにはあまり障害にならない。

(6) 評価試験結果からセンサはスターセンサとして使用するために必要とする光電特性を十分備えていることが分かった。しかしながら以上のことから考えてセンサをスターセンサとして使用する場合にセンサの雑音を出来るだけ少なくすることが必要

であり、センサを冷却する主目的はここにあると言える。

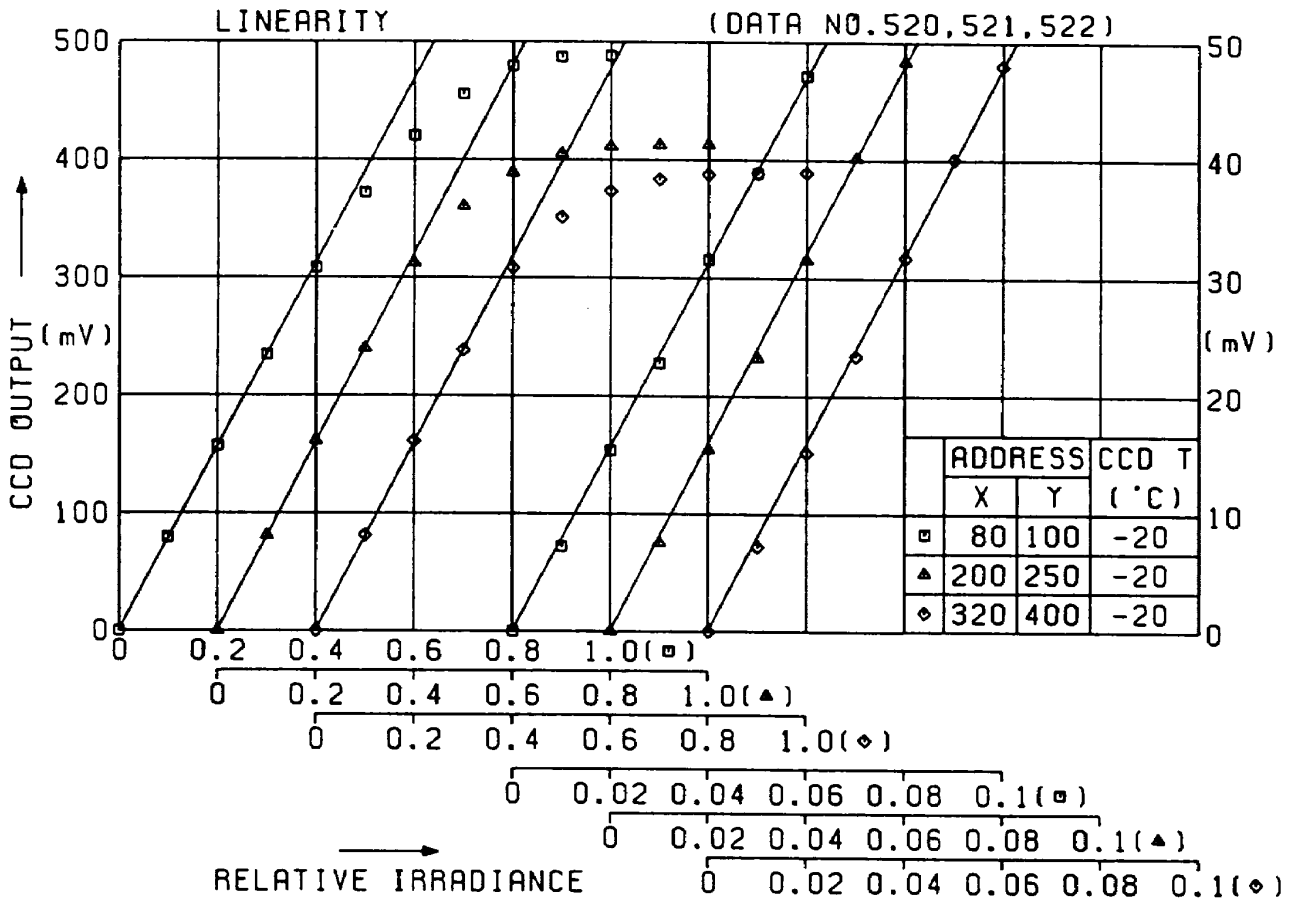
以上のようにCCDスターセンサの設計・試作を行うための基礎資料を得ることができたが、これらの資料を基にして開発された人工衛星“じんだい”搭載用CCDスターセンサに関しては改めて報告する予定である。

なお本評価試験を行うに当たりCCDエリアセンサ及びこれを作動させるために必要な駆動回路部・出力信号処理回路部・冷却部、計測制御装置、画面モニタ装置に関しては株式会社東芝より提供を受けた。

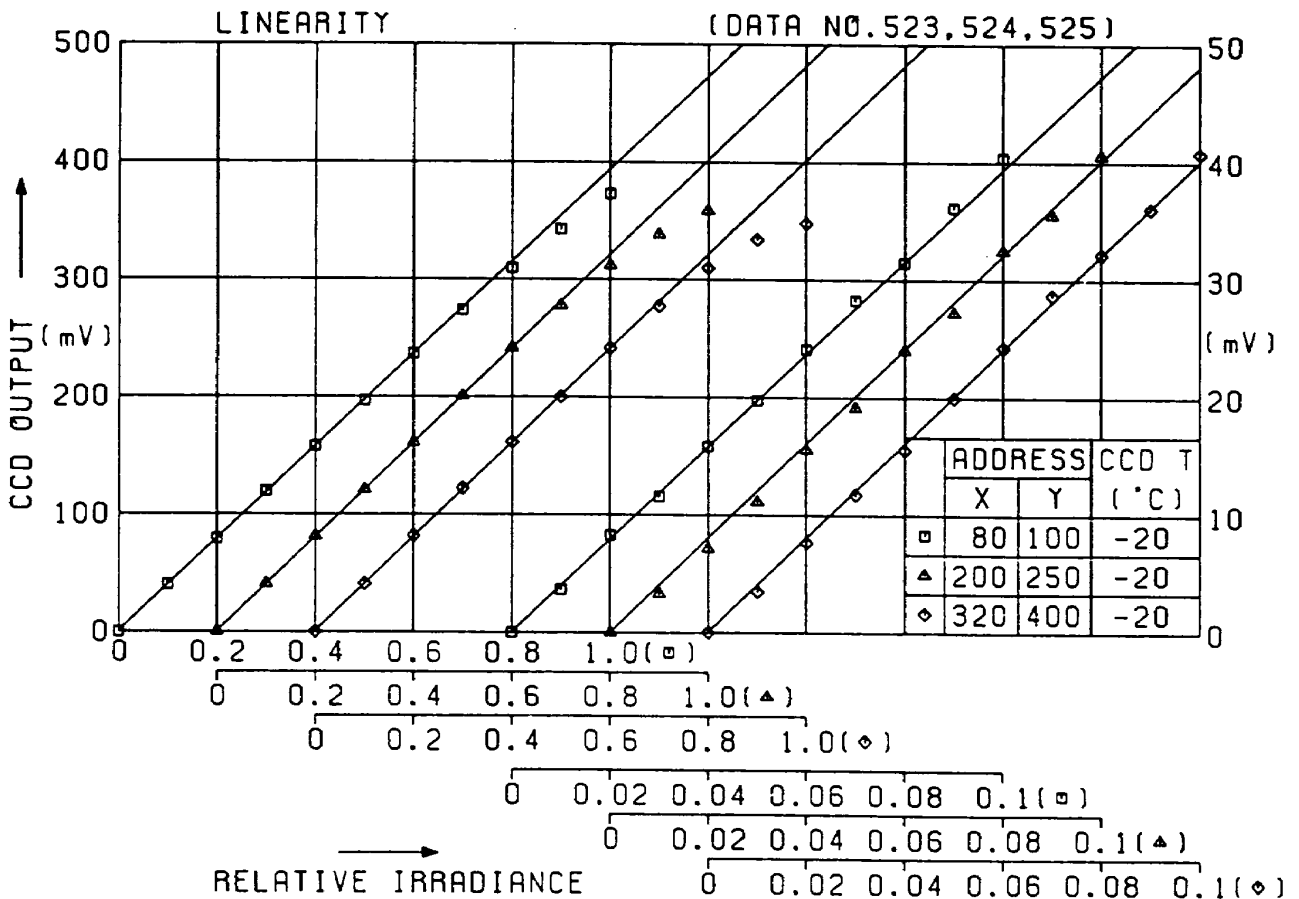
最後に本評価試験を促進するに当たり、いろいろと試験の便宜を図りまた有益な助言をいただいた株式会社東芝・宇宙航空機器第一部の亀田芳彦氏、小松晃一氏、浜田秀夫氏、岡本二彦氏並びに関係者各位に深く感謝の意を表する。

## 参 考 文 献

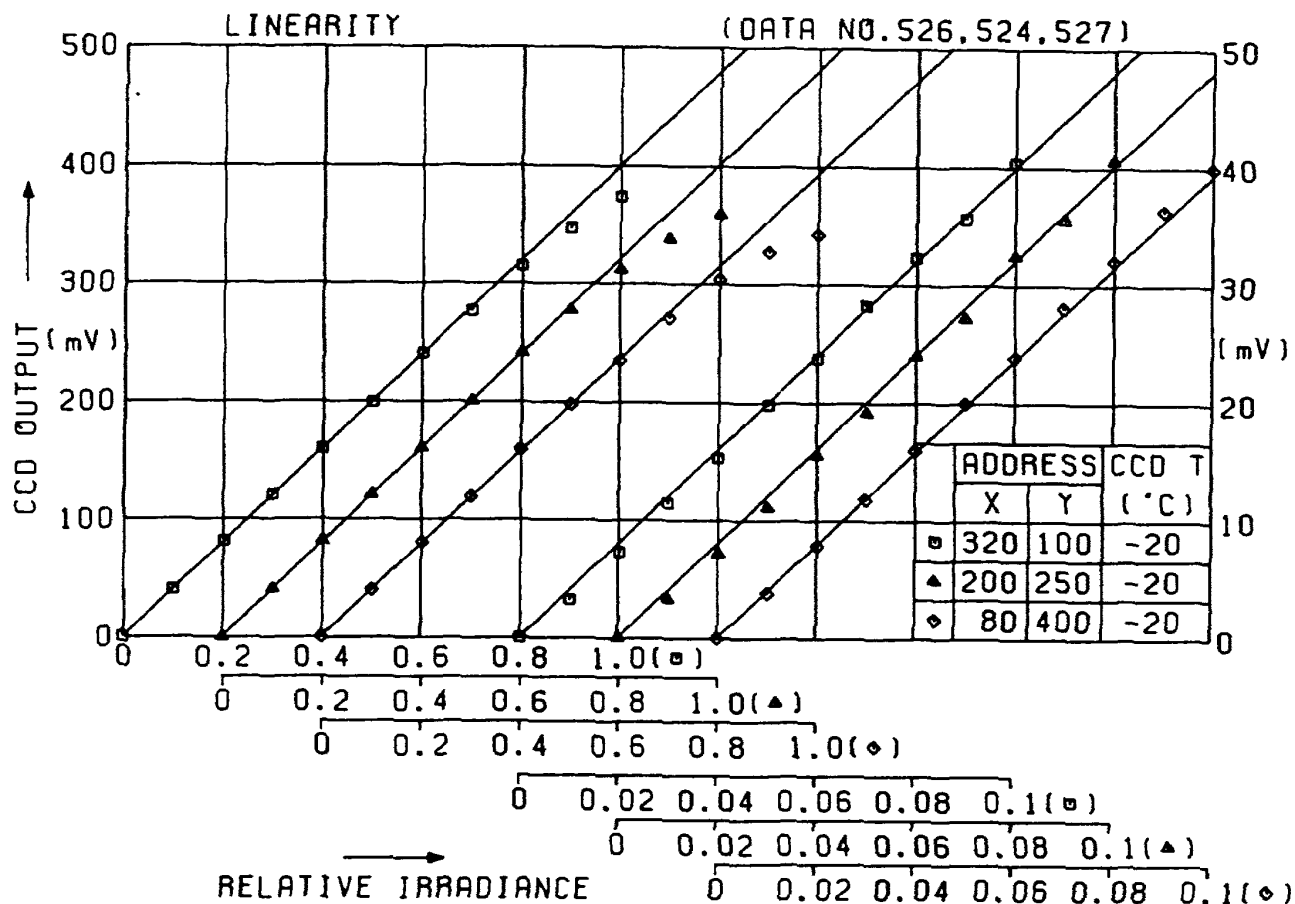
- 1) 高野, 遠藤, 中山; CCDテレカメラ TM 1300, 東芝レビュー (1982/4)
- 2) 桜井, 木村, 輿石; 可視近赤外放射計用イメージセンサの評価試験, 航技研資料, TM-438 (1981/6)
- 3) 斉藤; 受光器による実用測光標準の設定に関する研究, 電子技術総合研究所研究報告, 第803号 (1979/10)



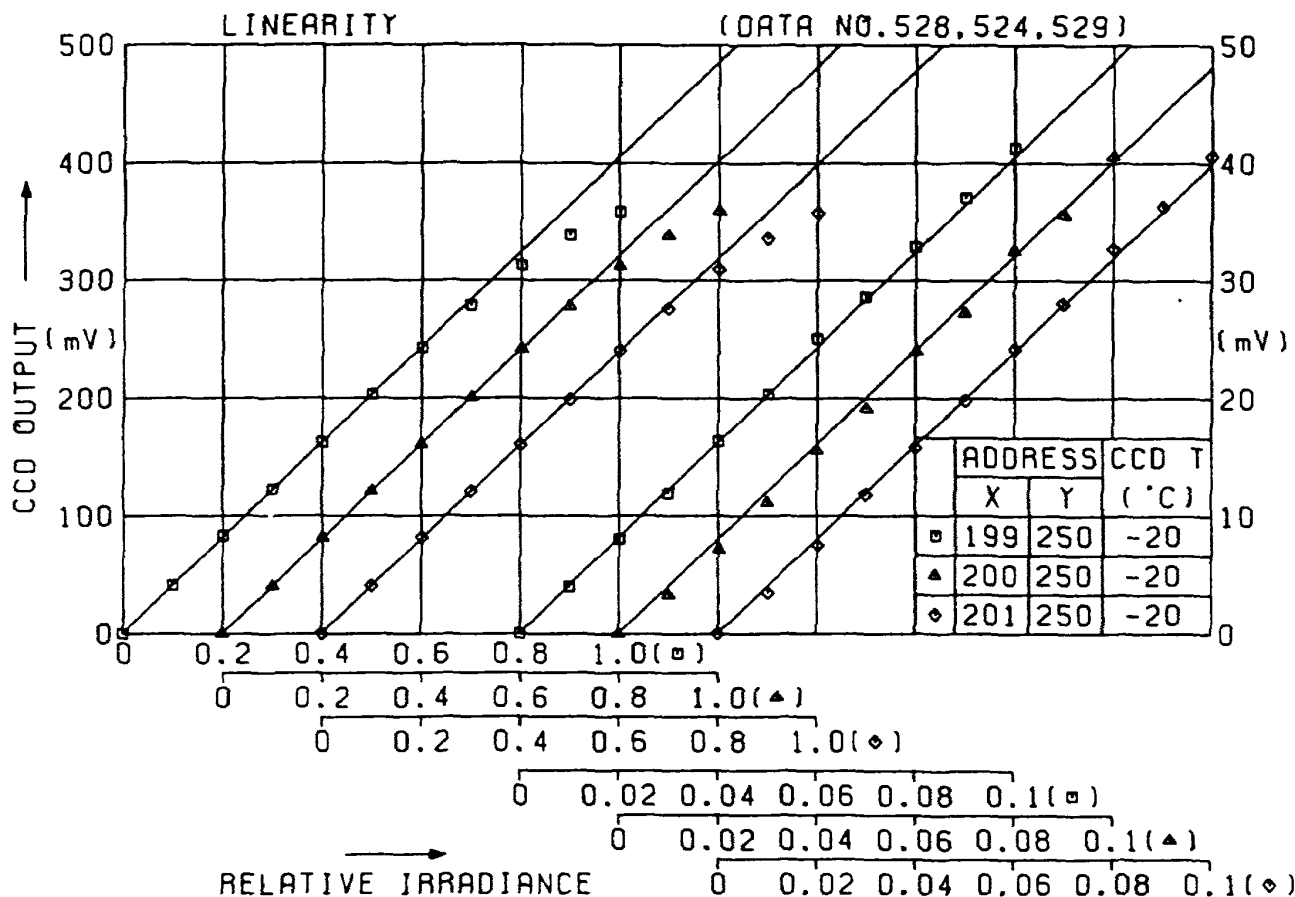
付図 1.1 直線性



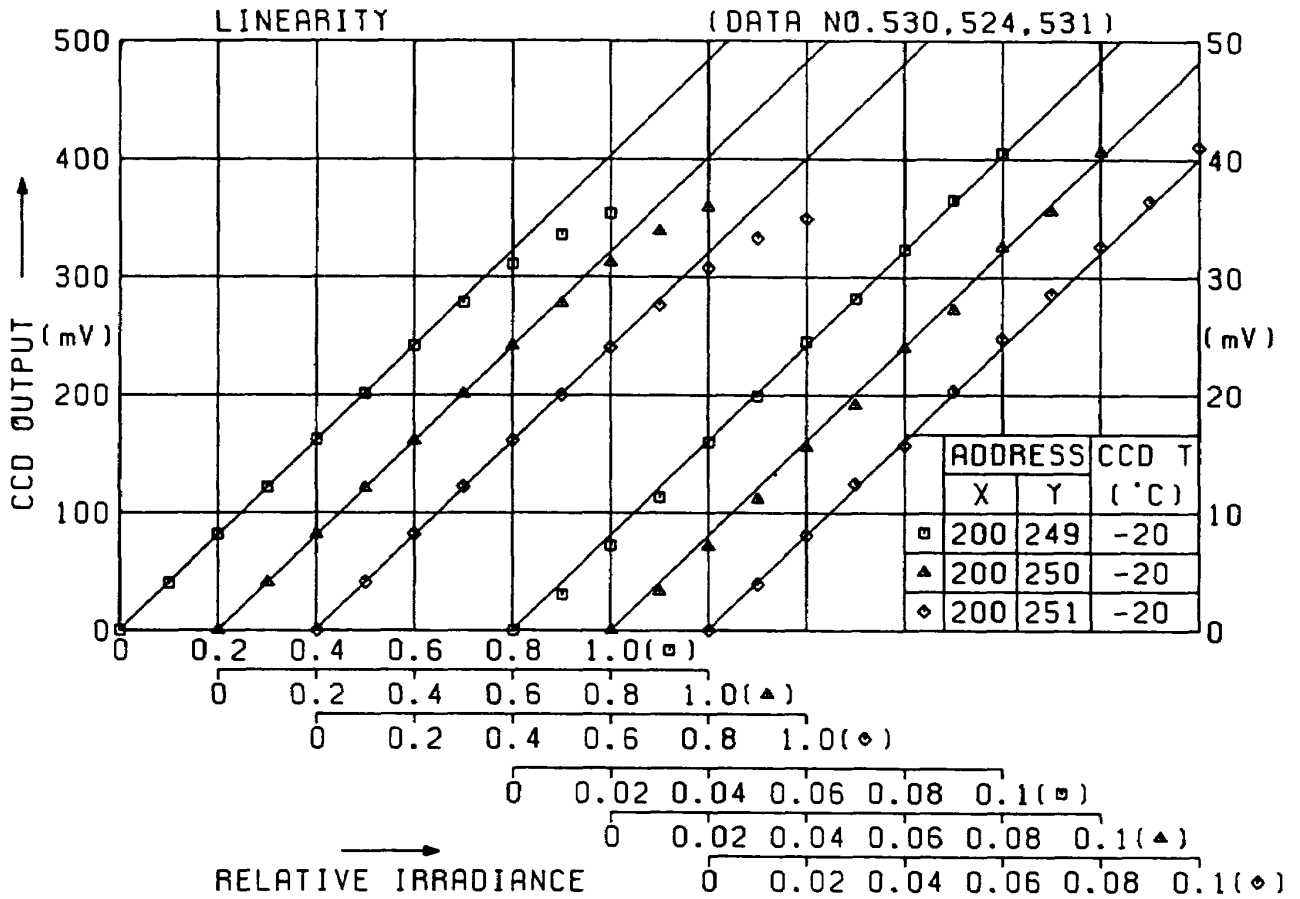
付図 1.2 直線性



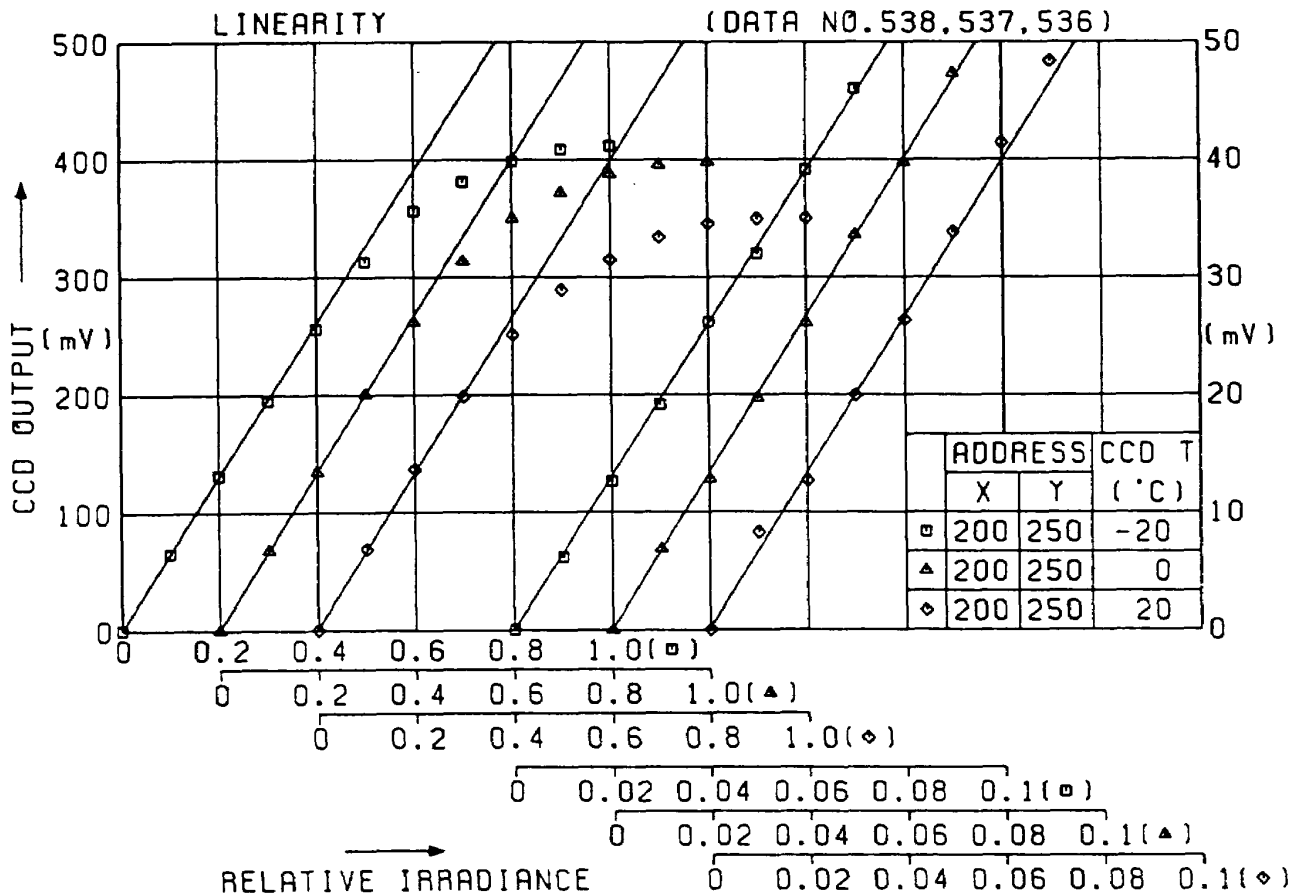
付図 1.3 直線性



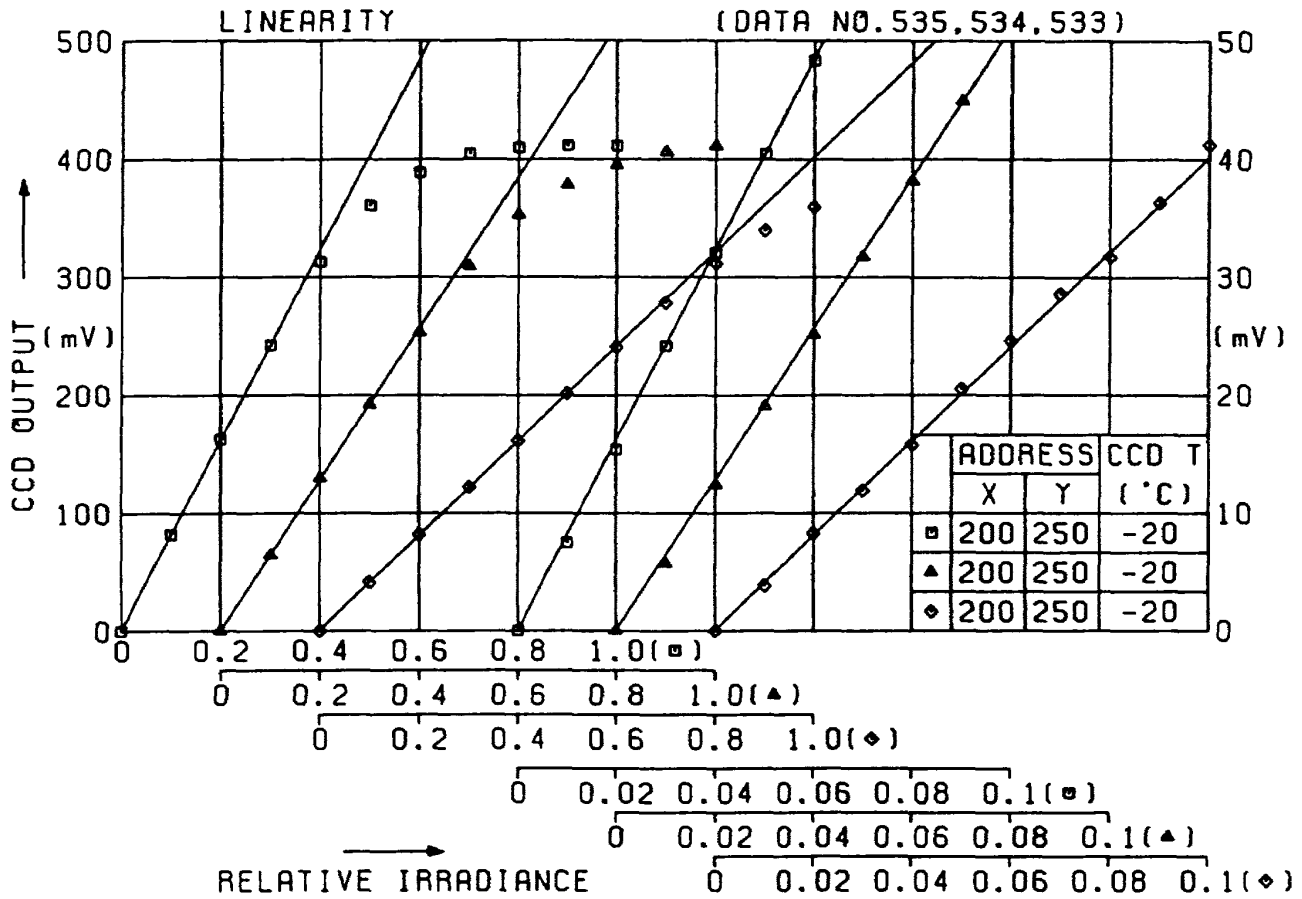
付図 1.4 直線性



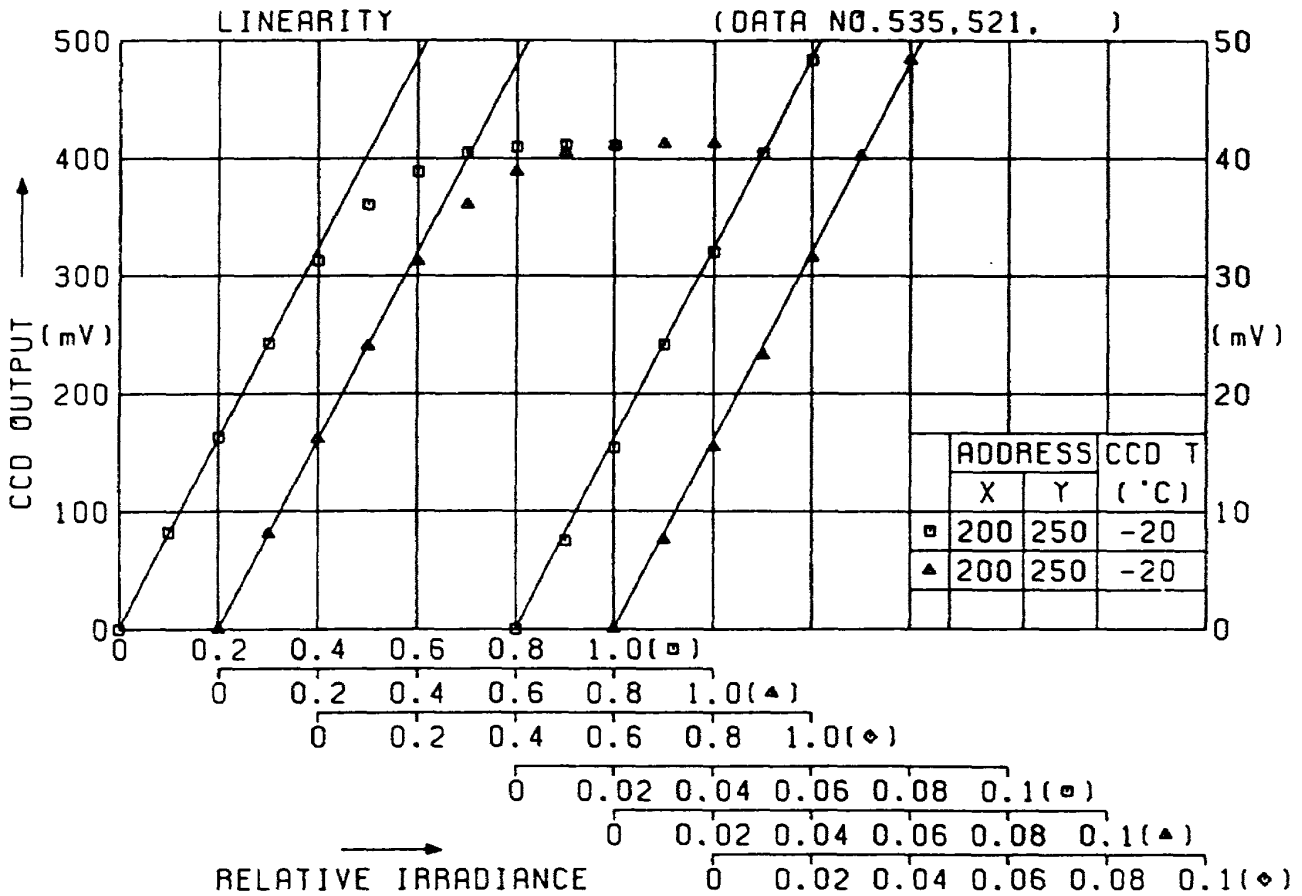
付図1.5 直線性



付図1.6 直線性

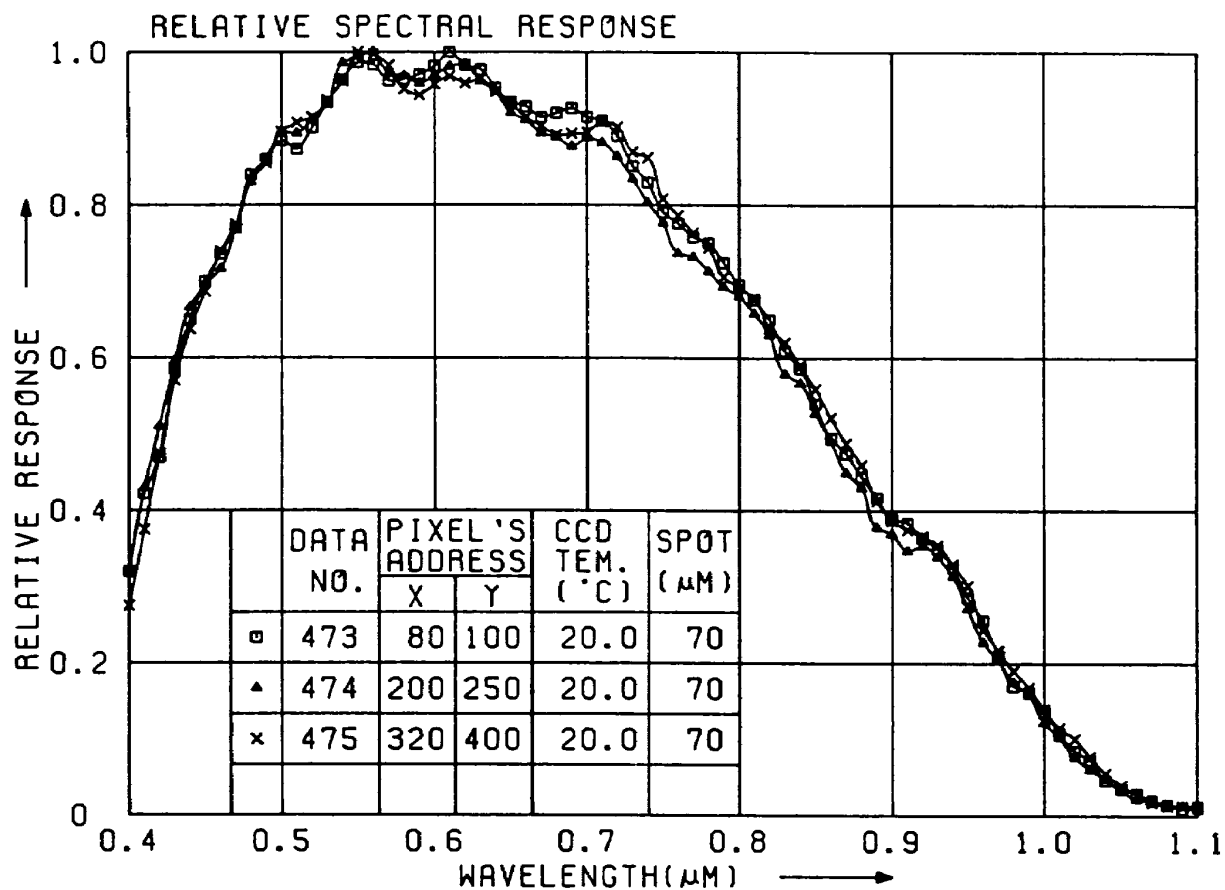


付図1.7 直線性

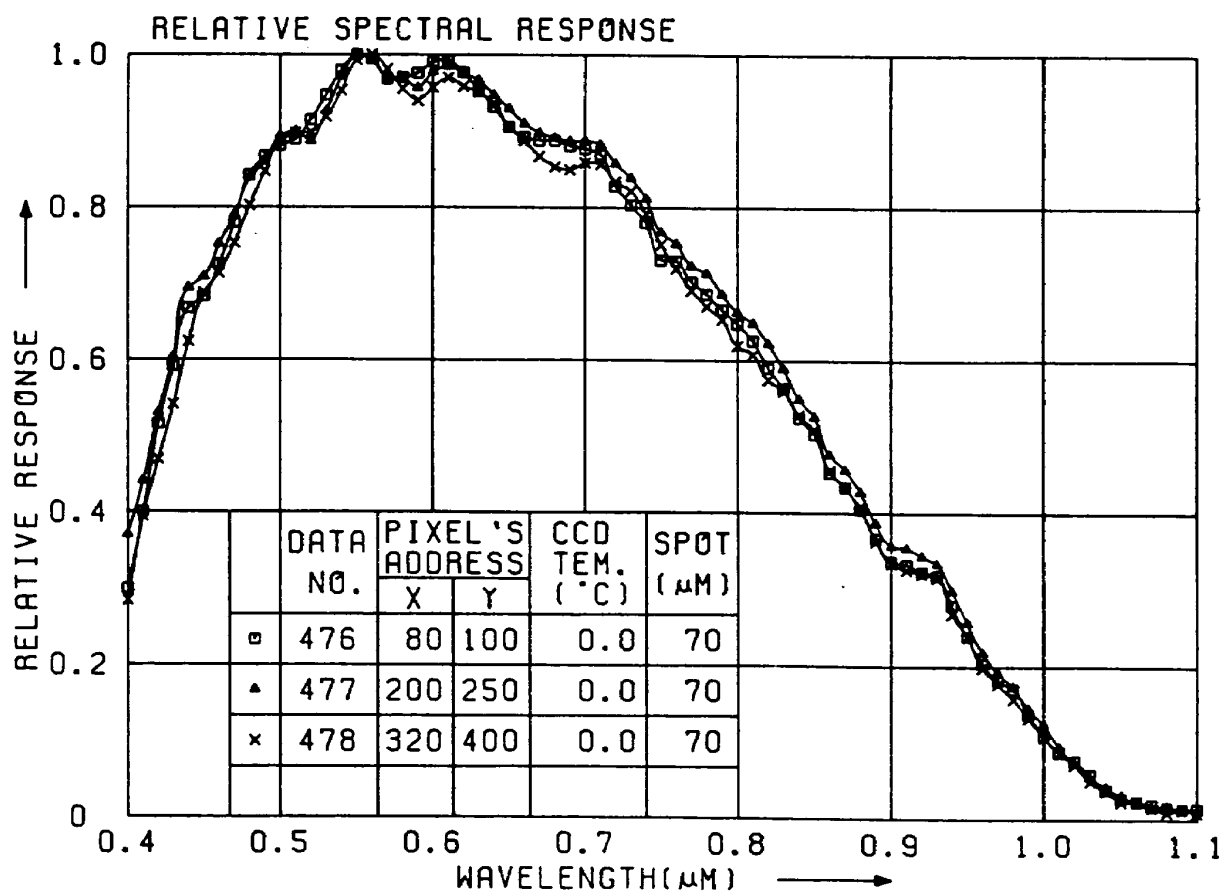


付図1.8 直線性

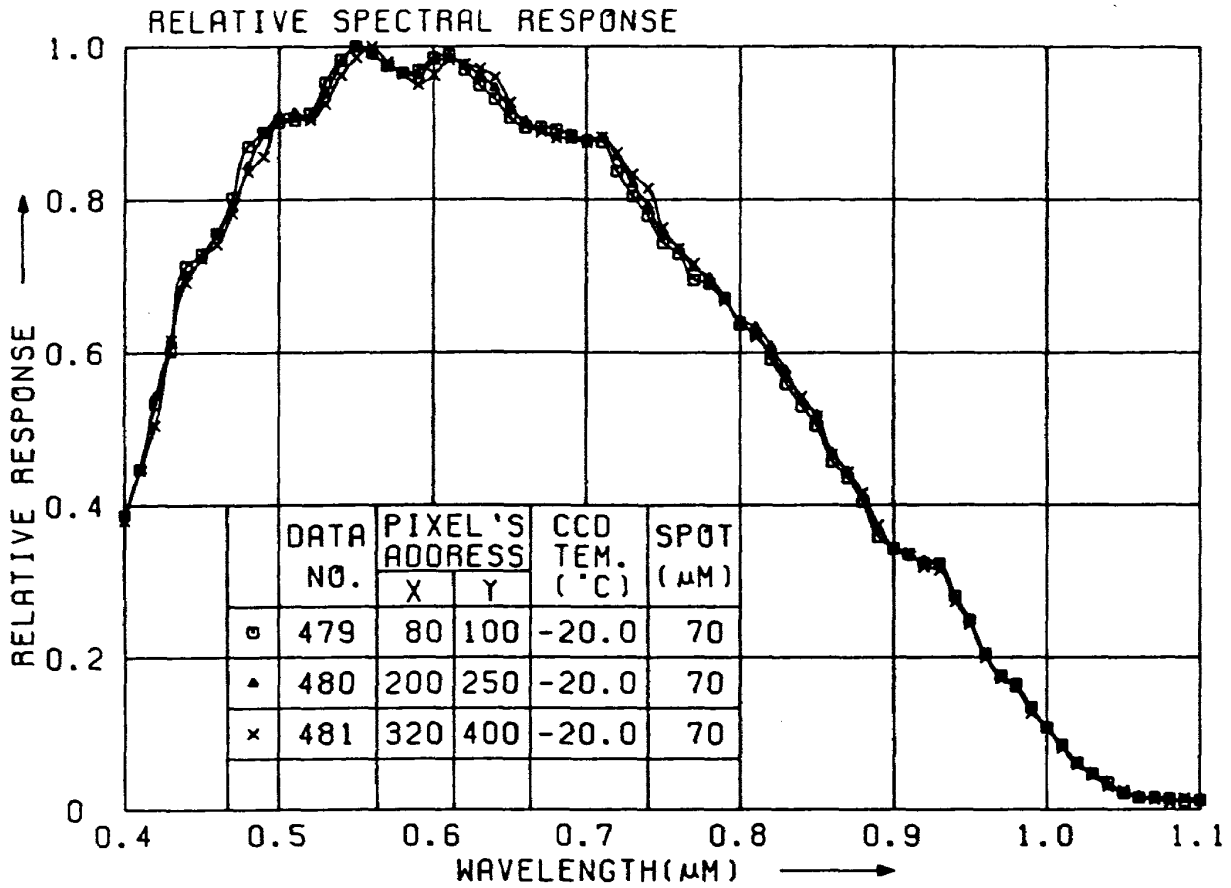




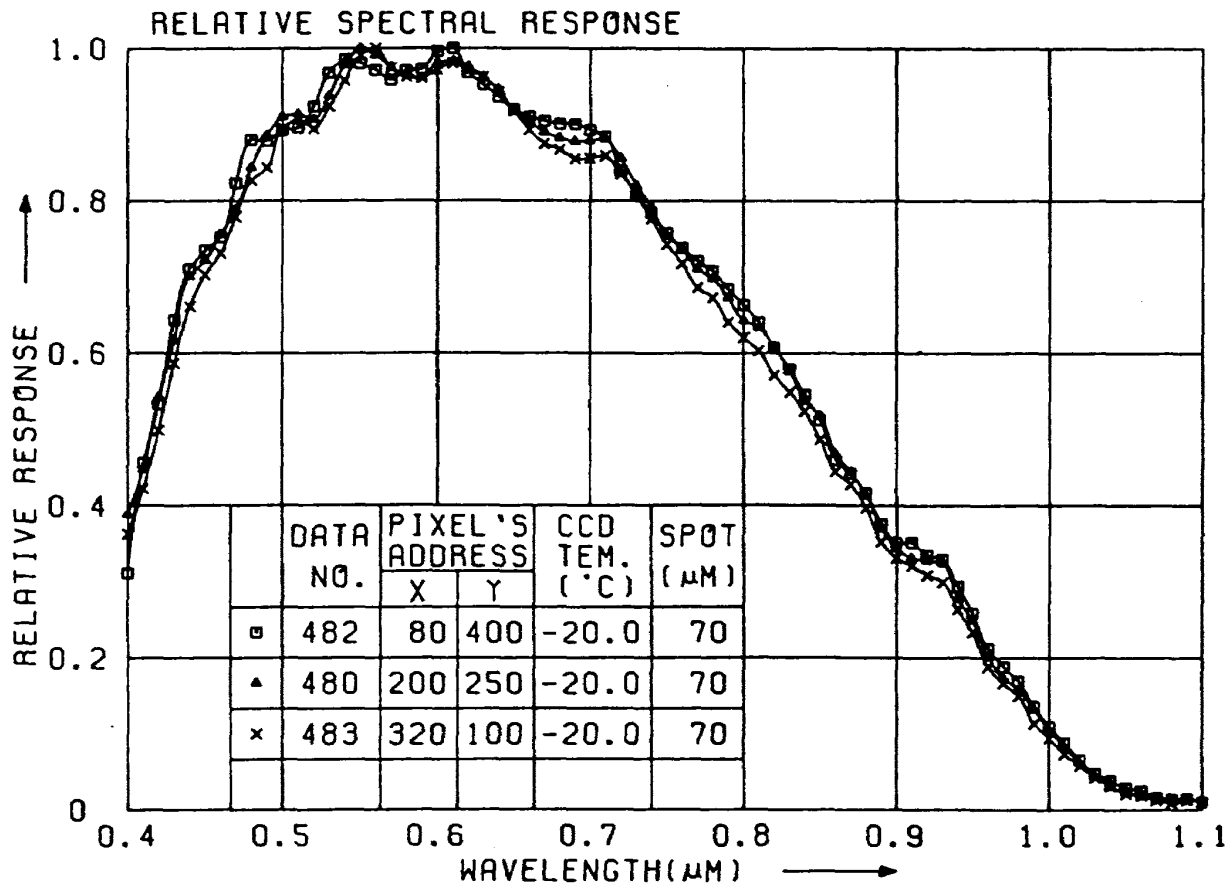
付図 2.1 相对分光感度特性



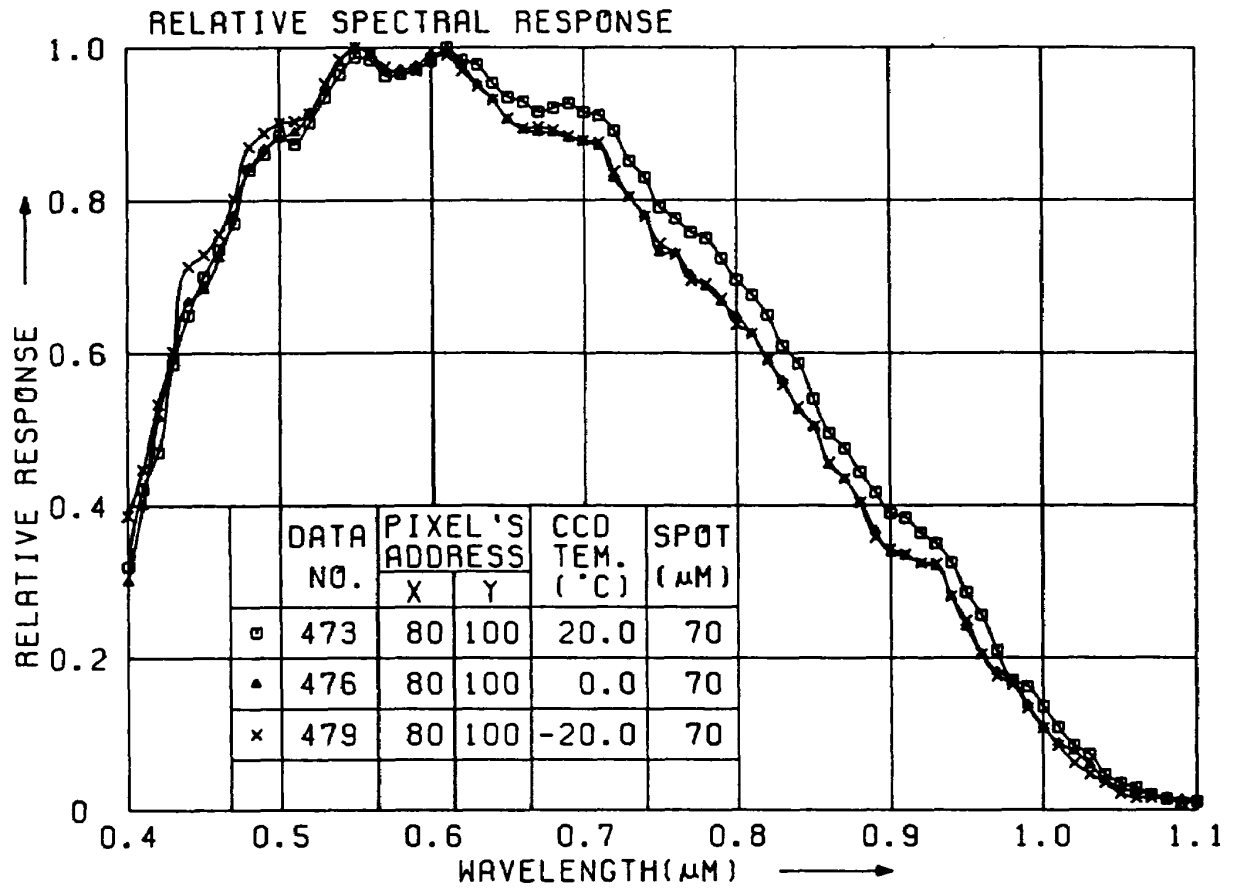
付図 2.2 相对分光感度特性



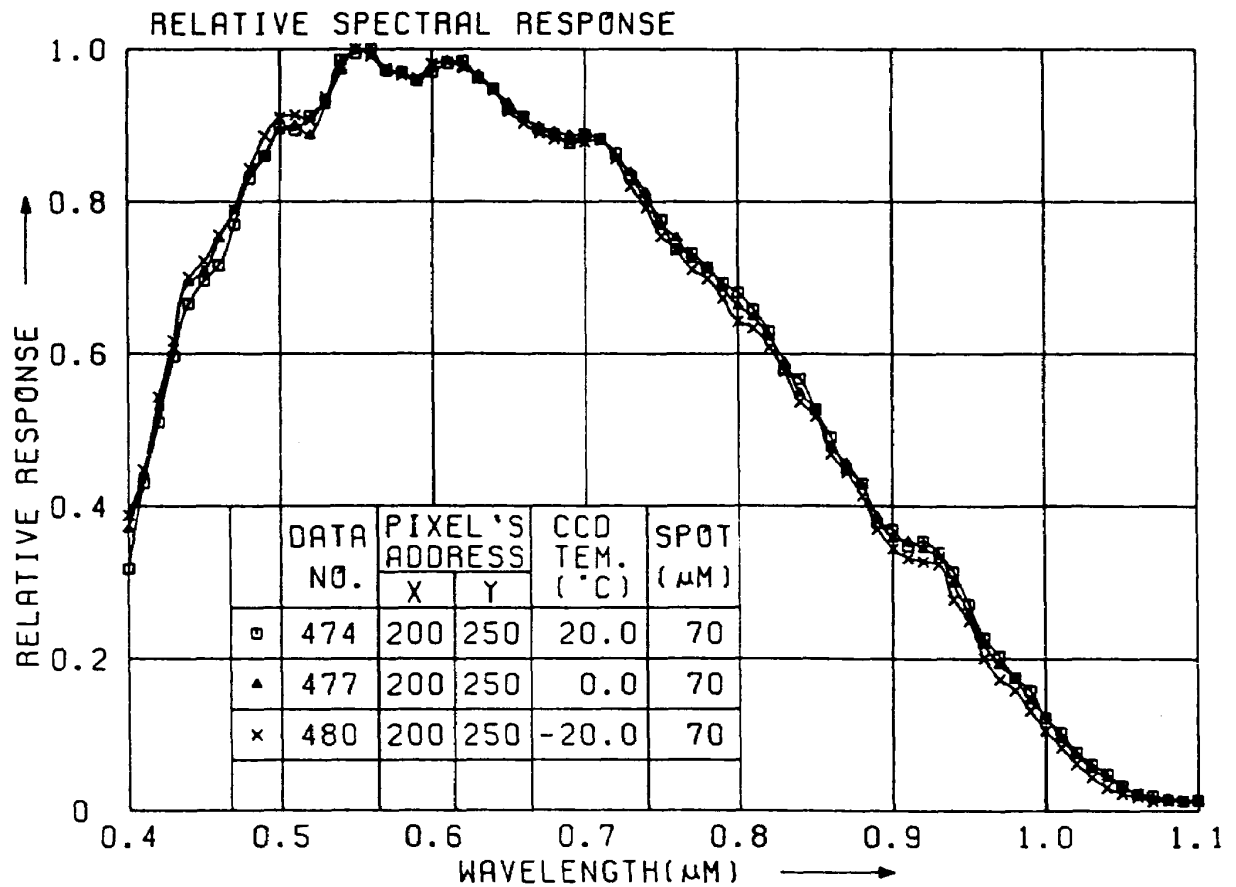
付図 2.3 相対分光感度特性



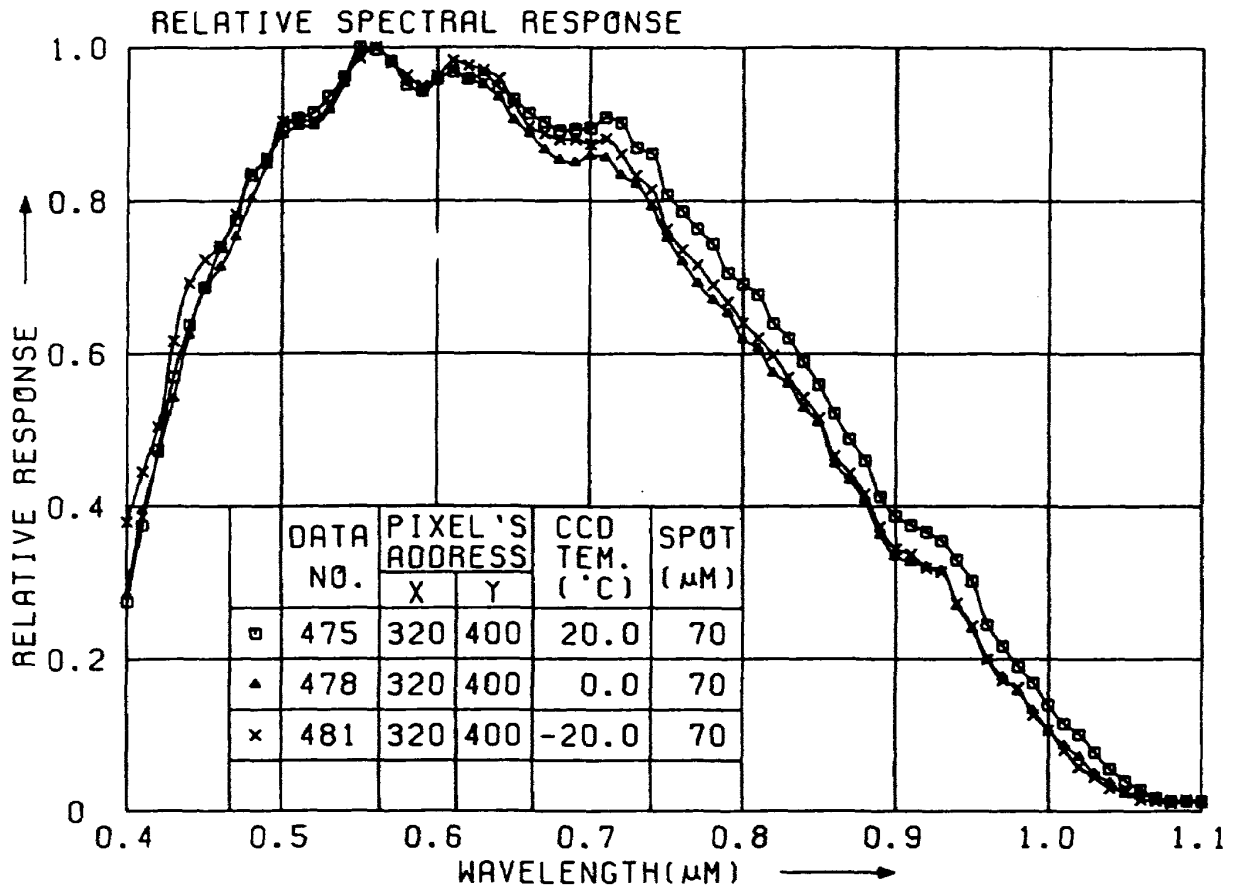
付図 2.4 相対分光感度特性



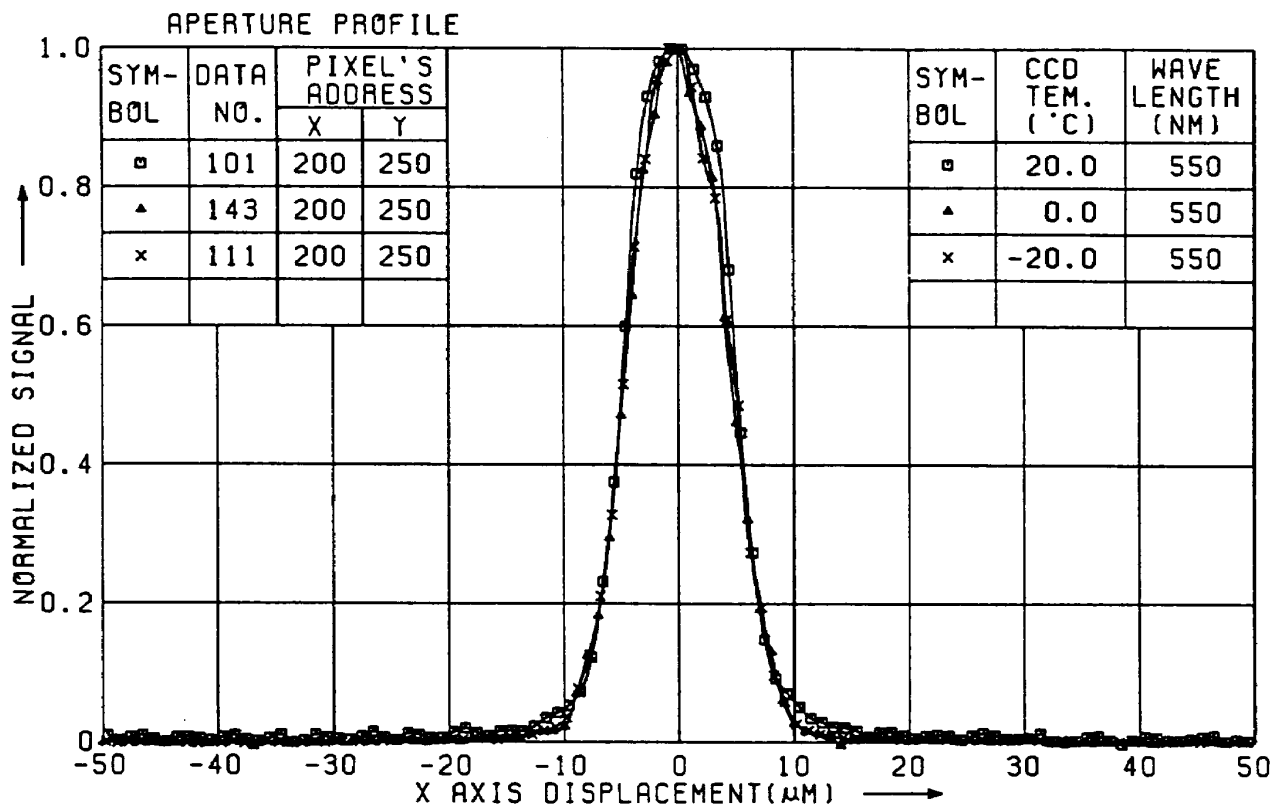
付図 2.5 相对分光感度特性



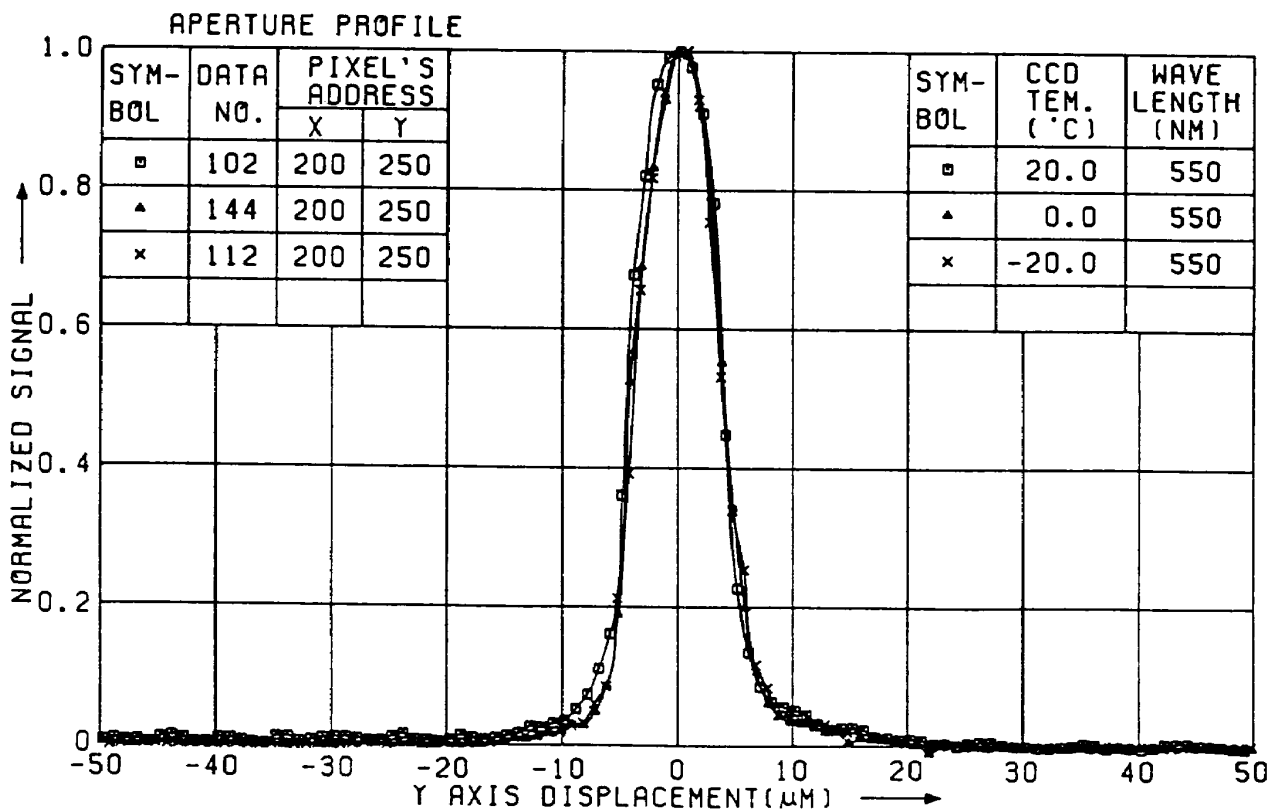
付図 2.6 相对分光感度特性



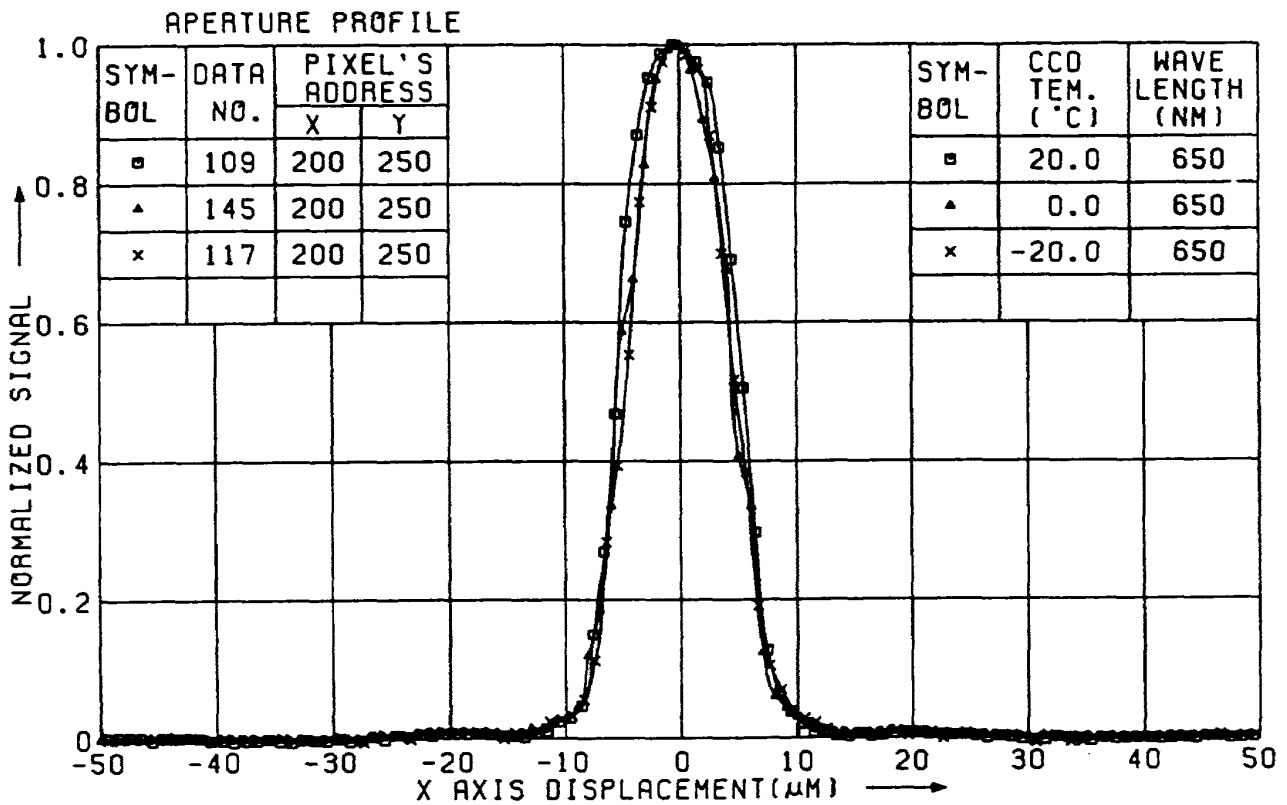
付図 2.7 相対分光感度特性



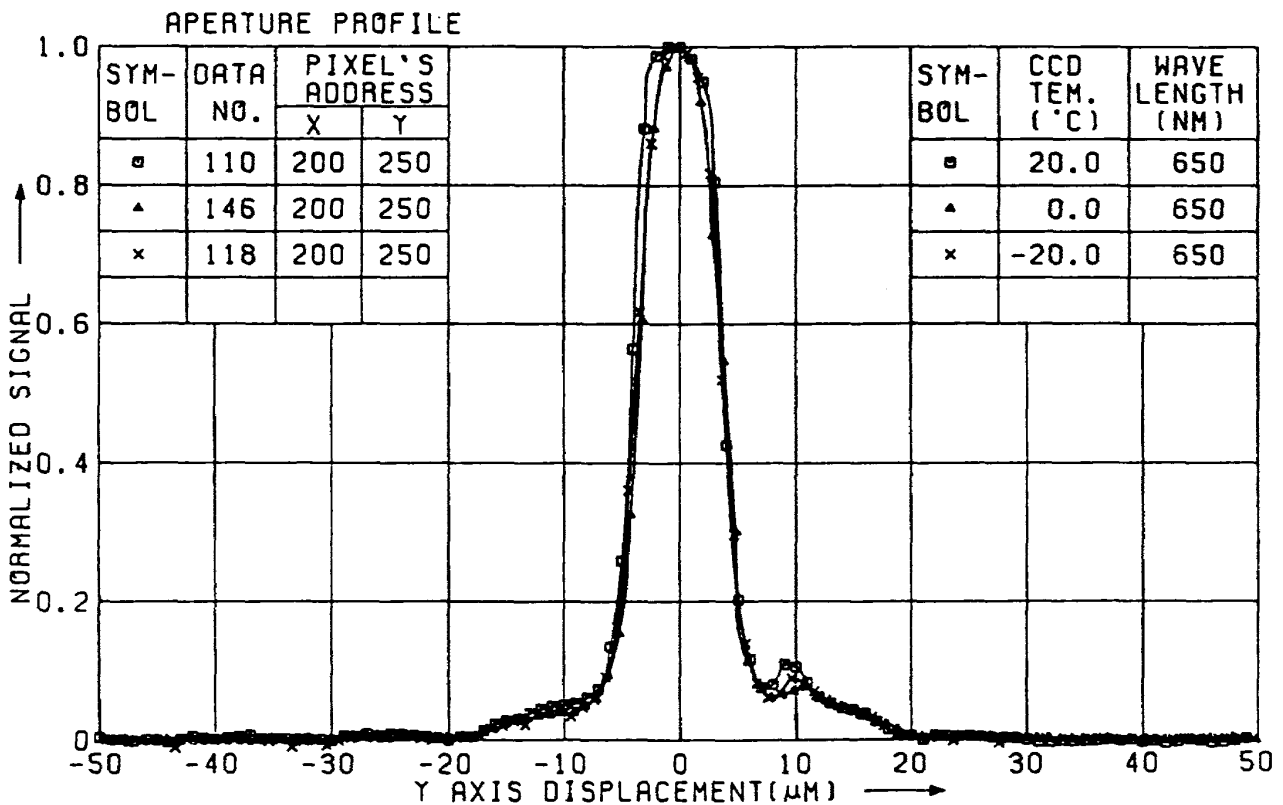
付図 3.1 相对分光感度分布特性



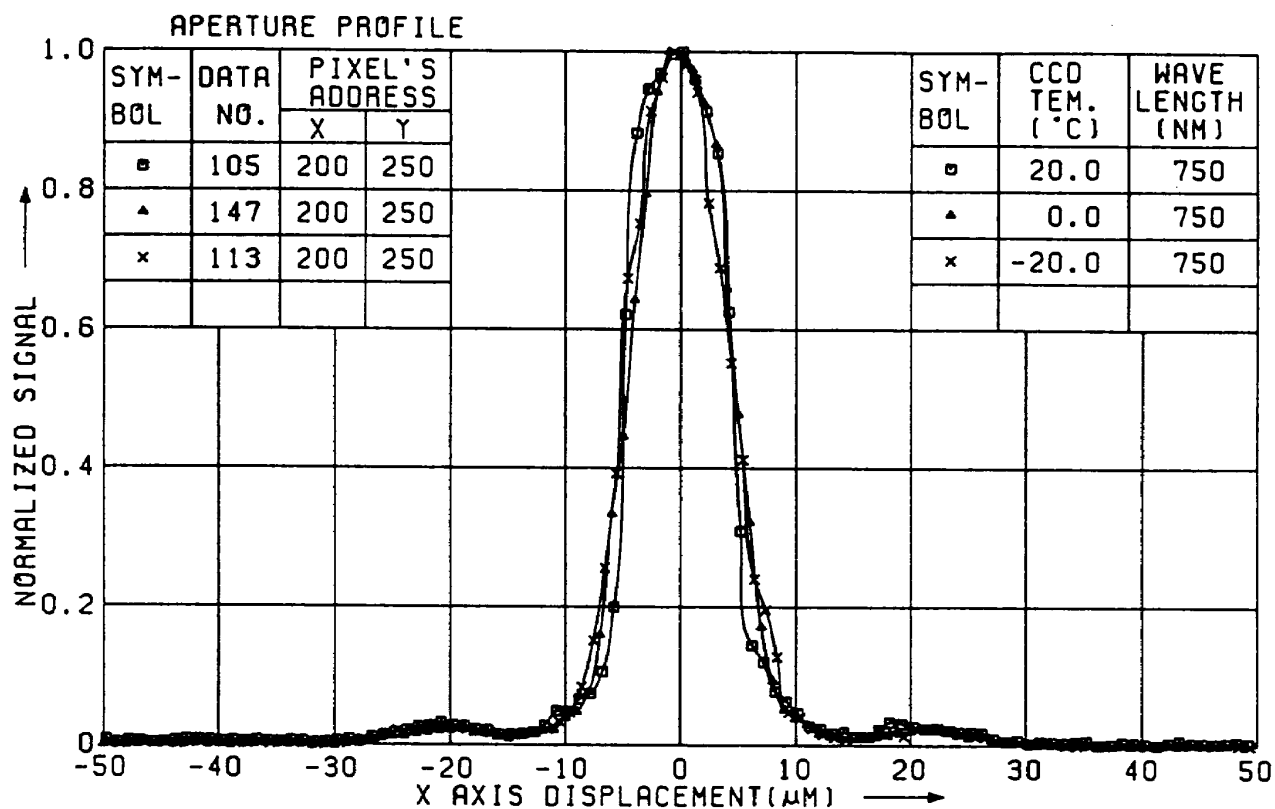
付図 3.2 相对分光感度分布特性



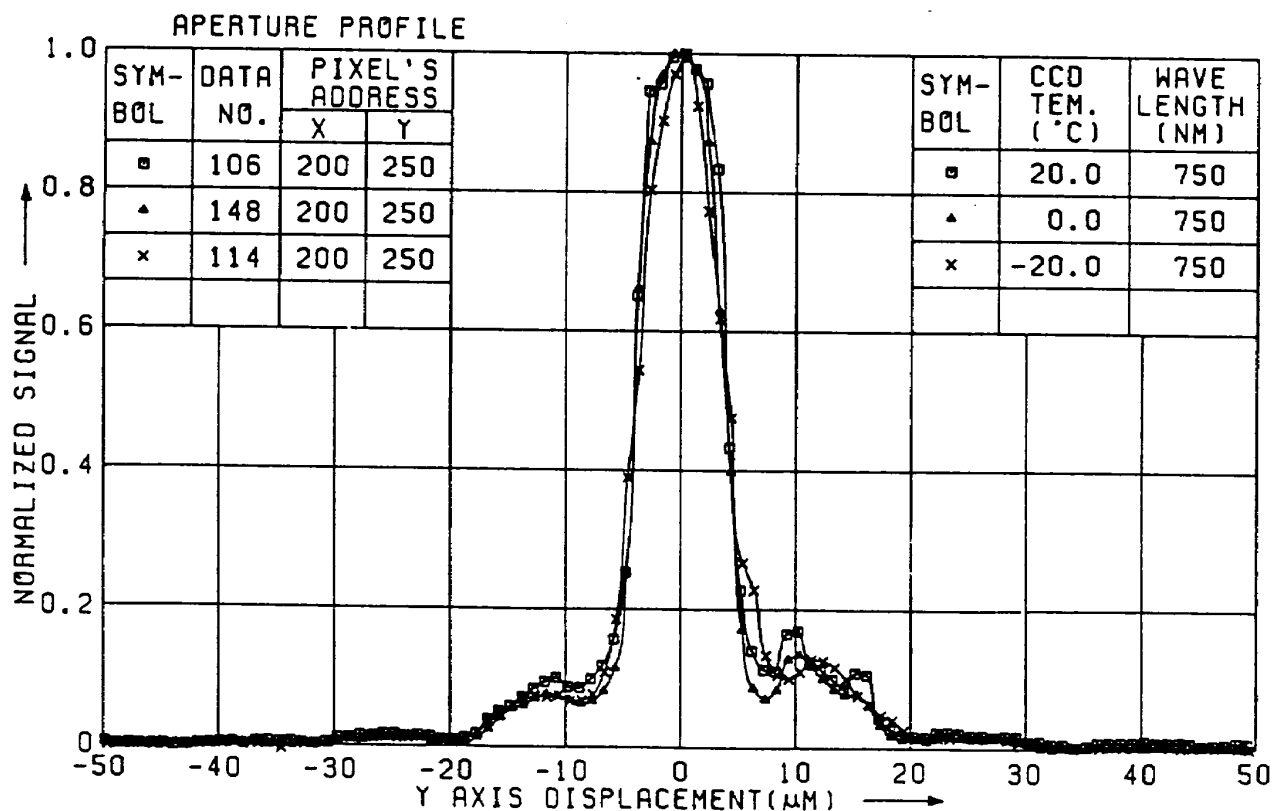
付図 3.3 相対分光感度分布特性



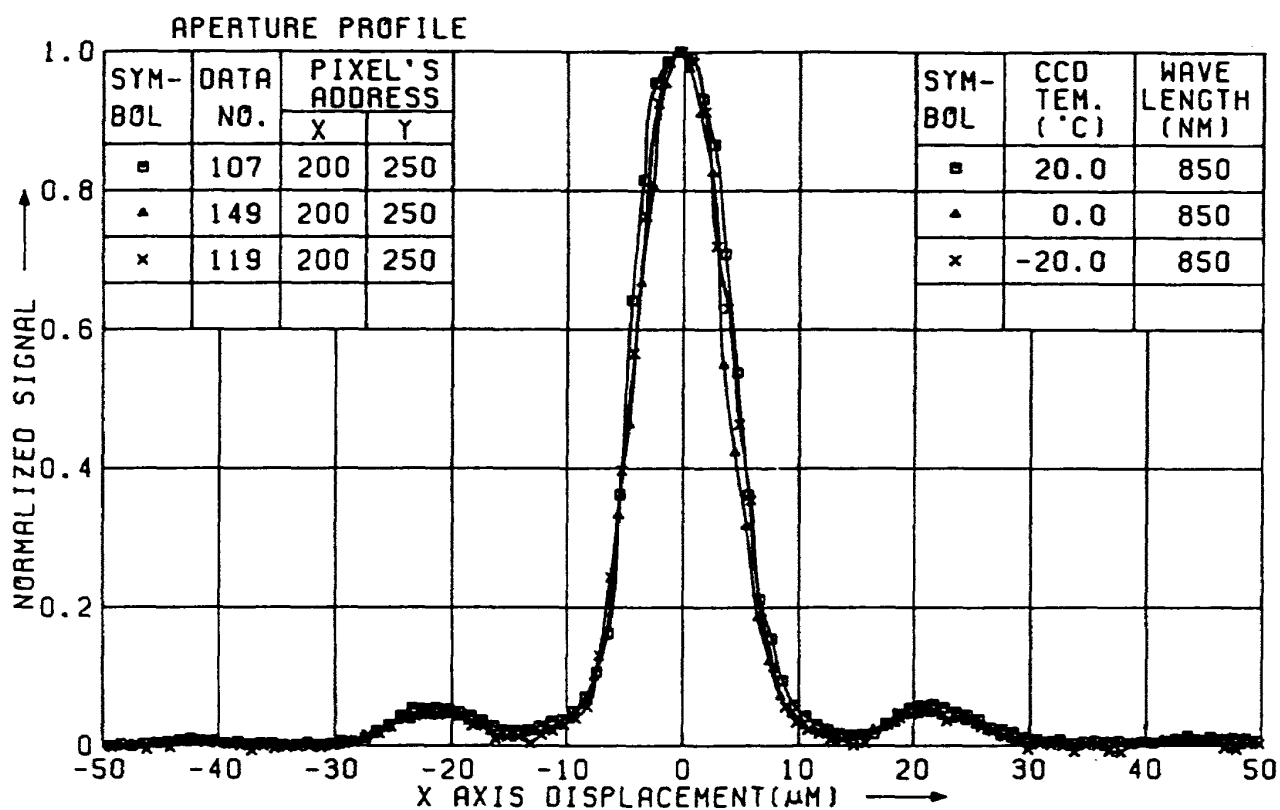
付図 3.4 相対分光感度分布特性



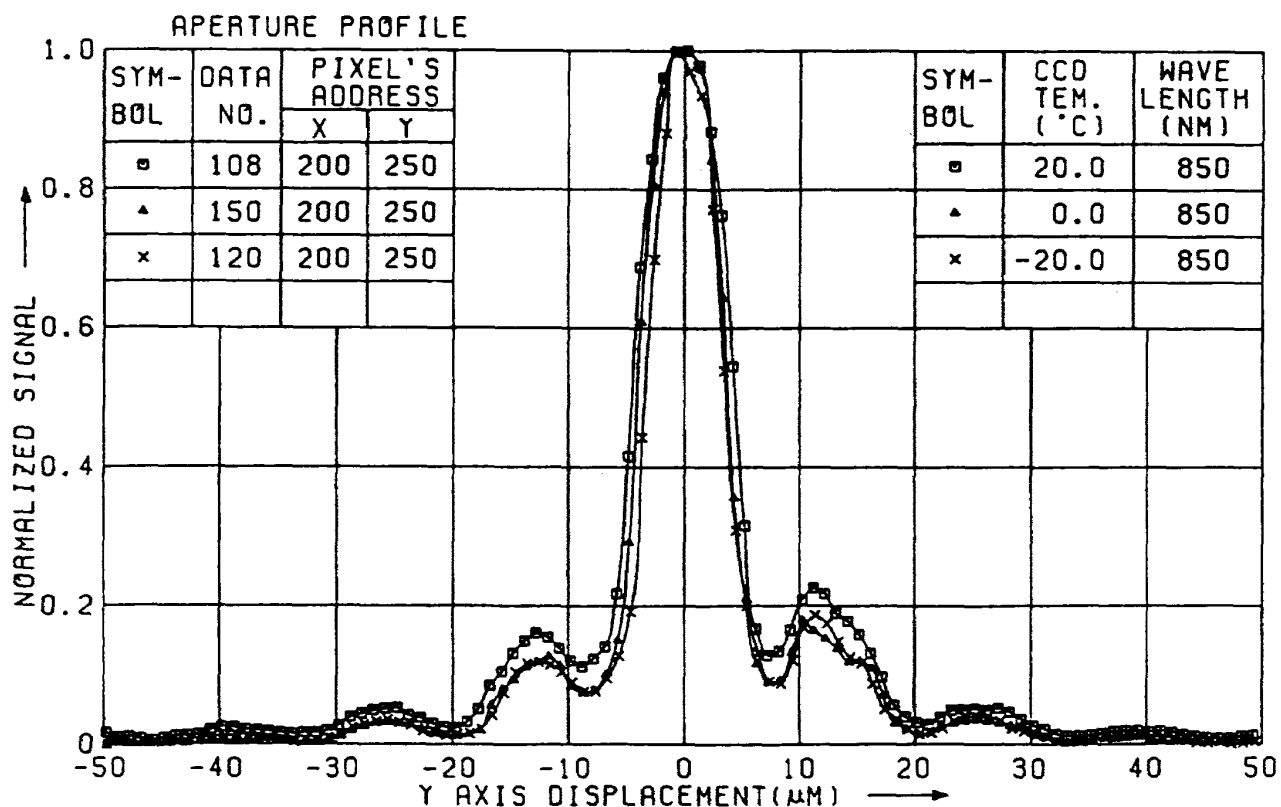
付図 3.5 相对分光感度分布特性



付図 3.6 相对分光感度分布特性

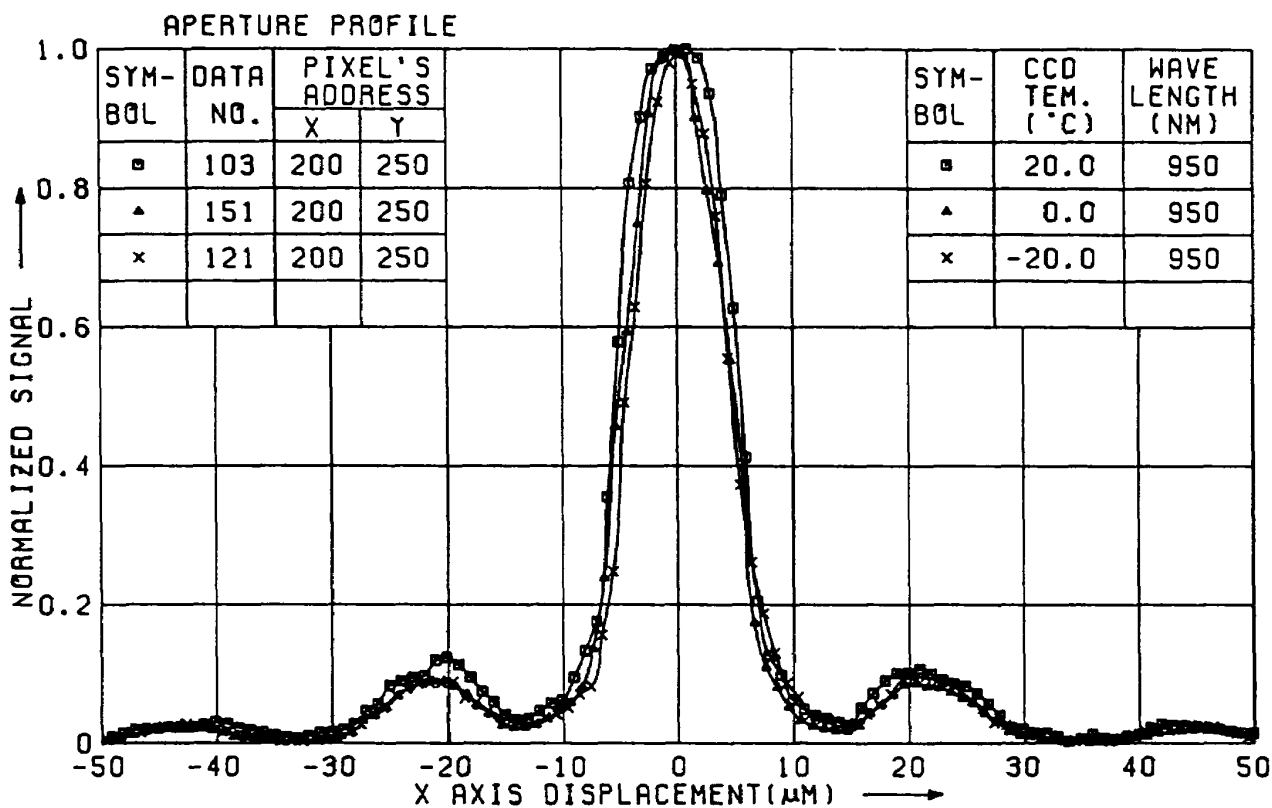


付図 3.7 相対分光感度分布特性

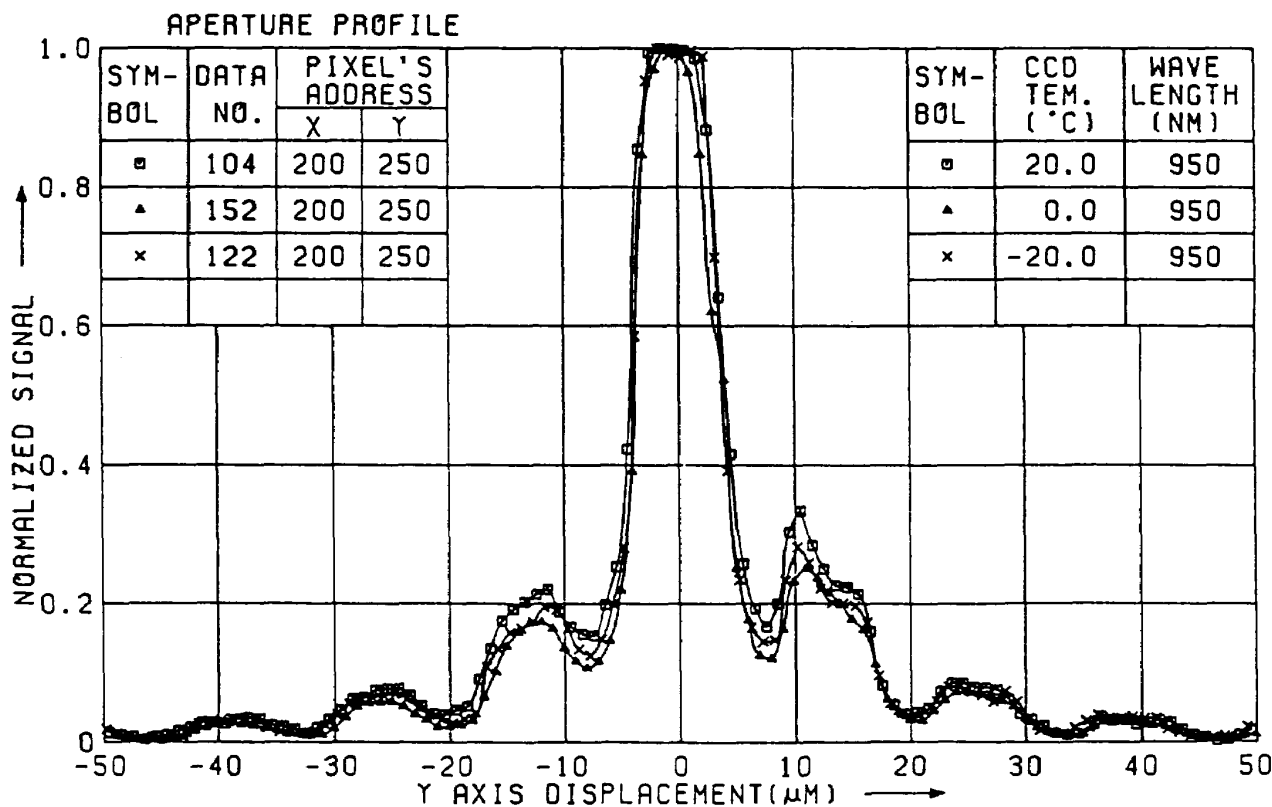


付図 3.8 相対分光感度分布特性

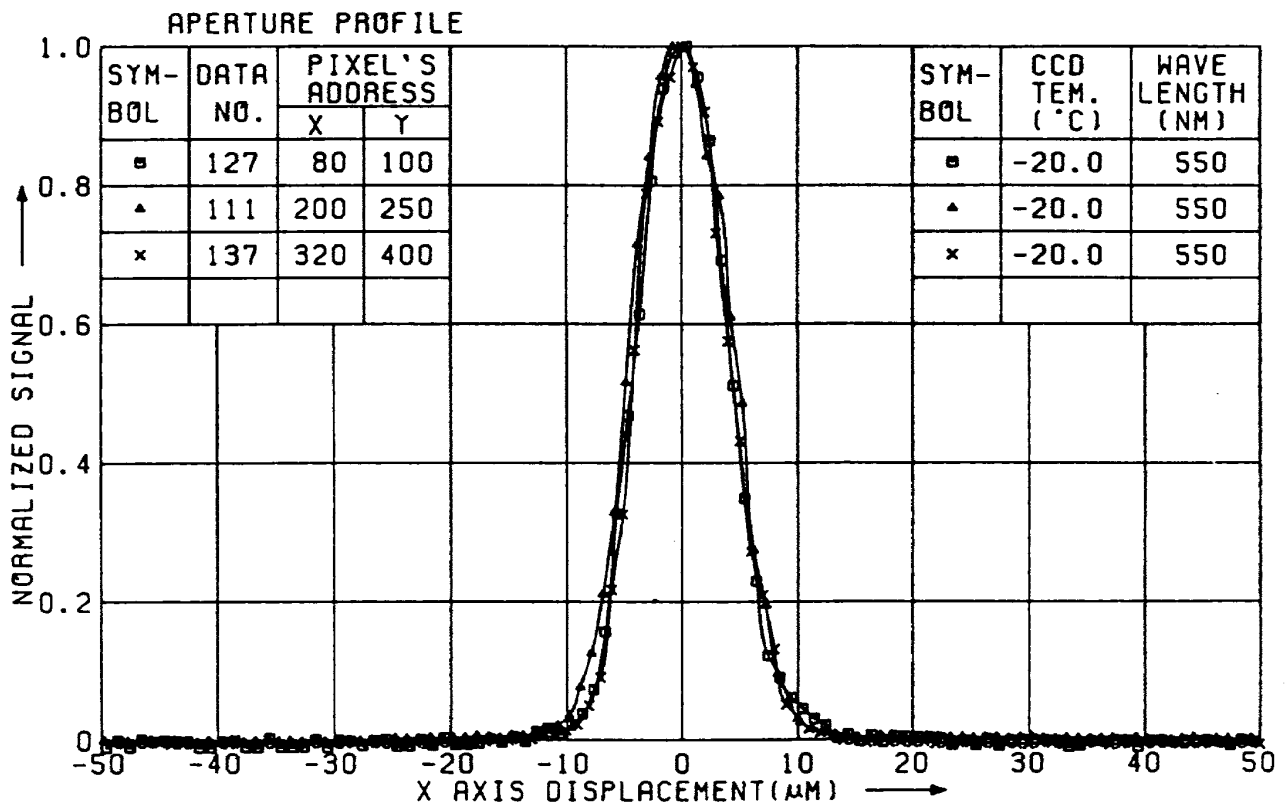




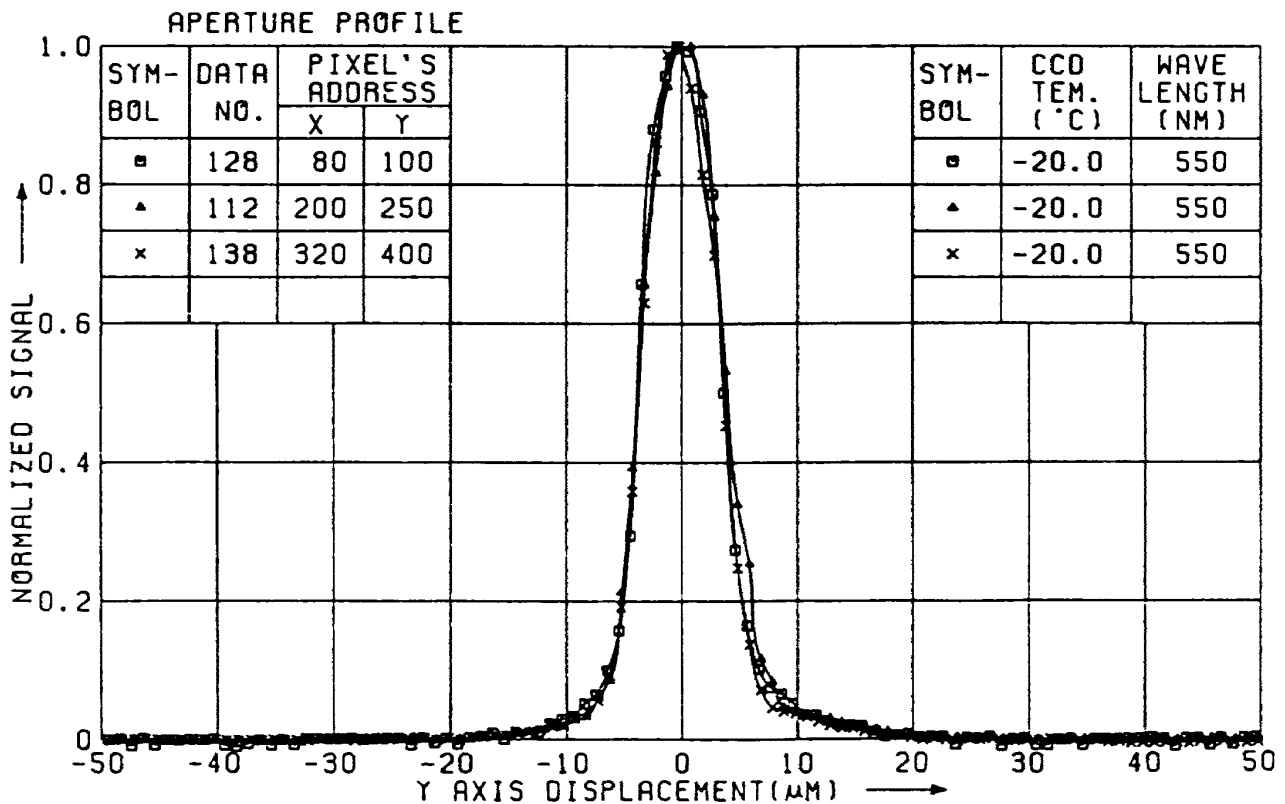
付図 3.9 相对分光感度分布特性



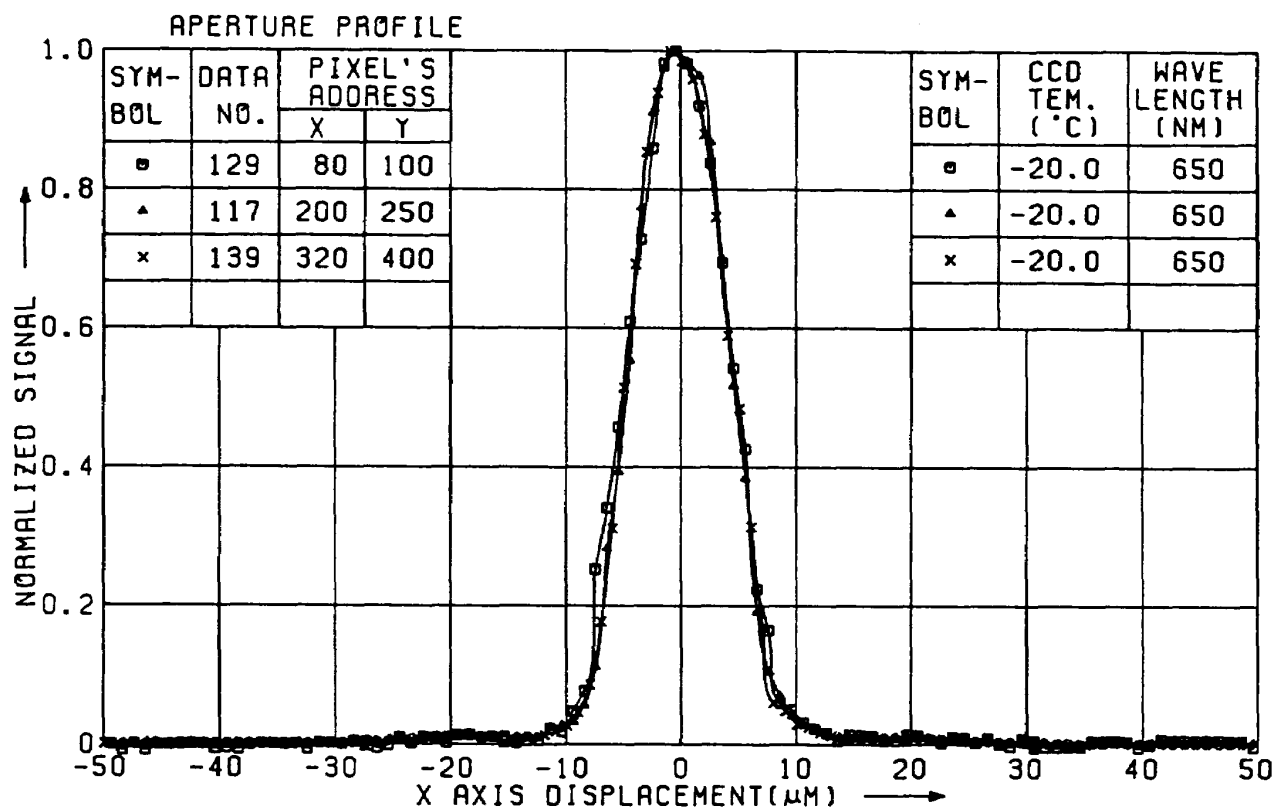
付図 3.10 相对分光感度分布特性



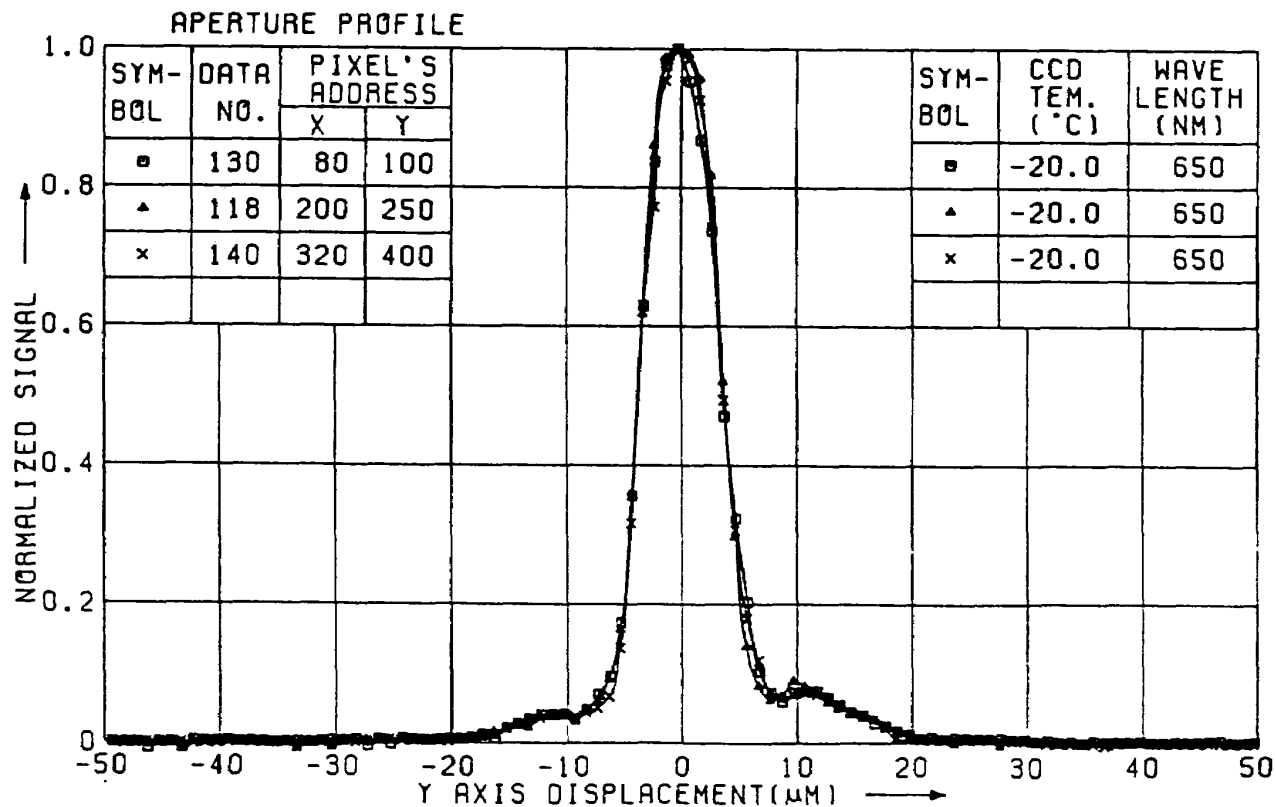
付図 3.11 相对分光感度分布特性



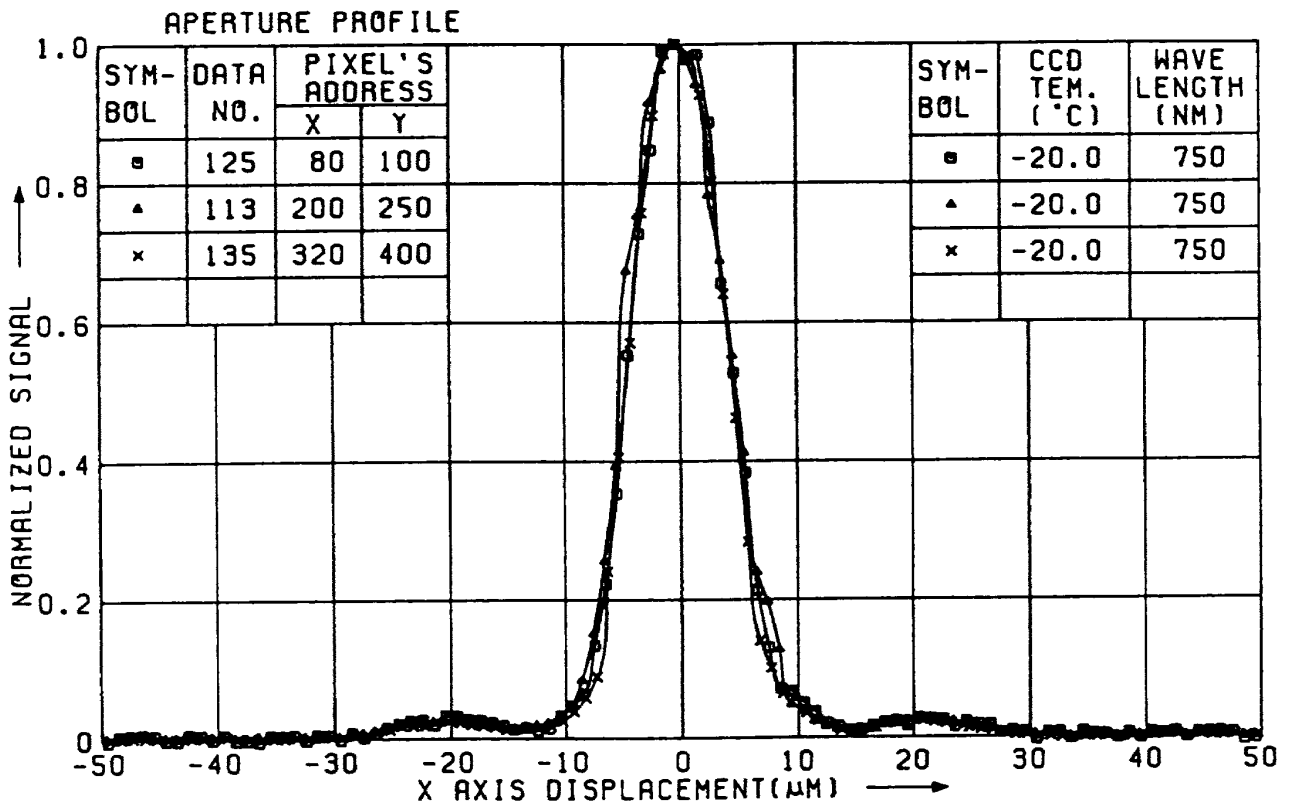
付図 3.12 相对分光感度分布特性



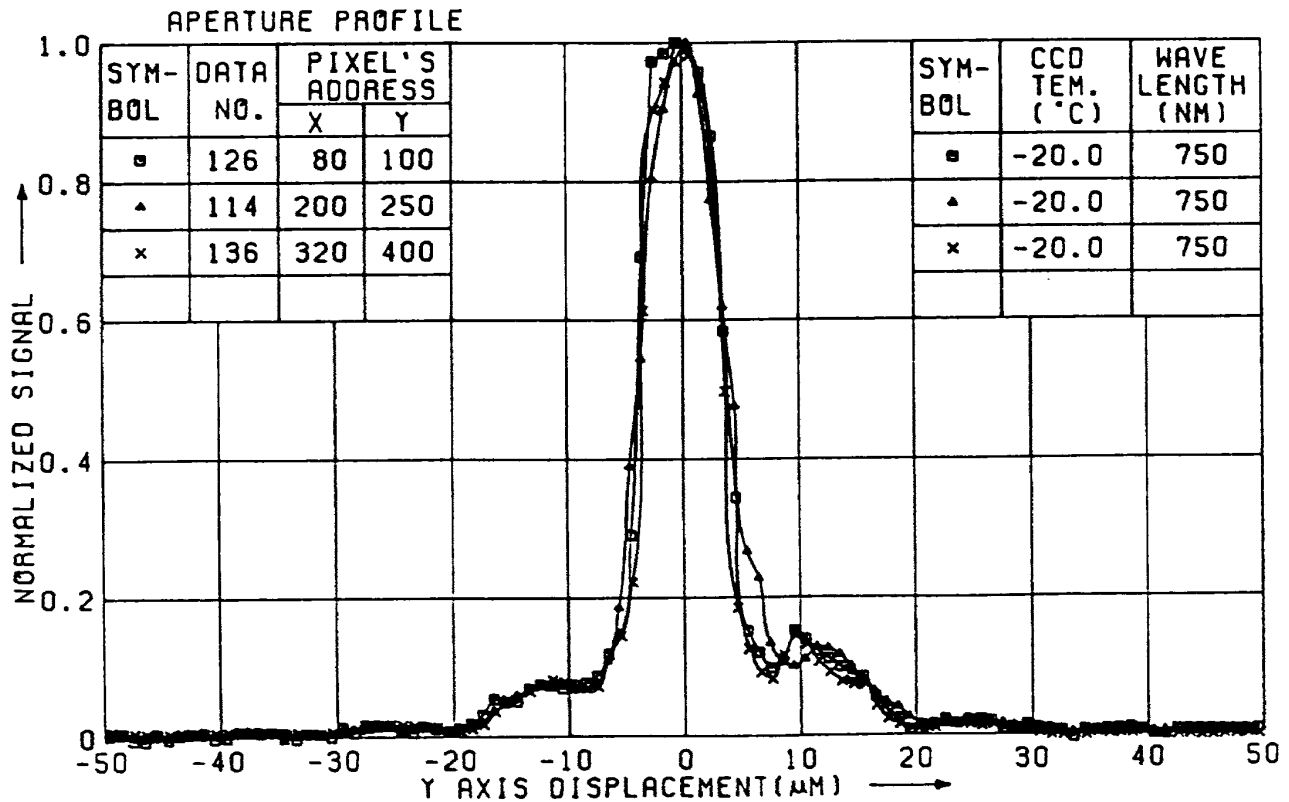
付図 3.13 相对分光感度分布特性



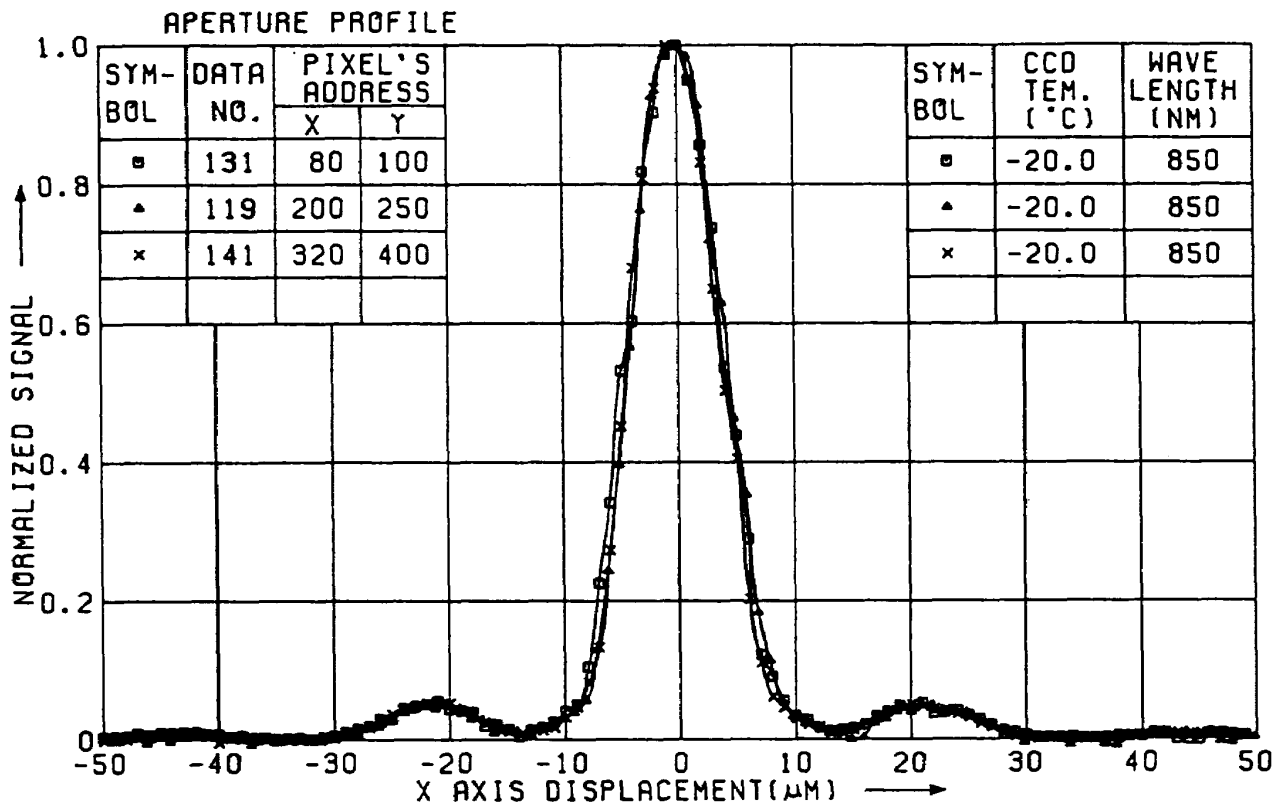
付図 3.14 相对分光感度分布特性



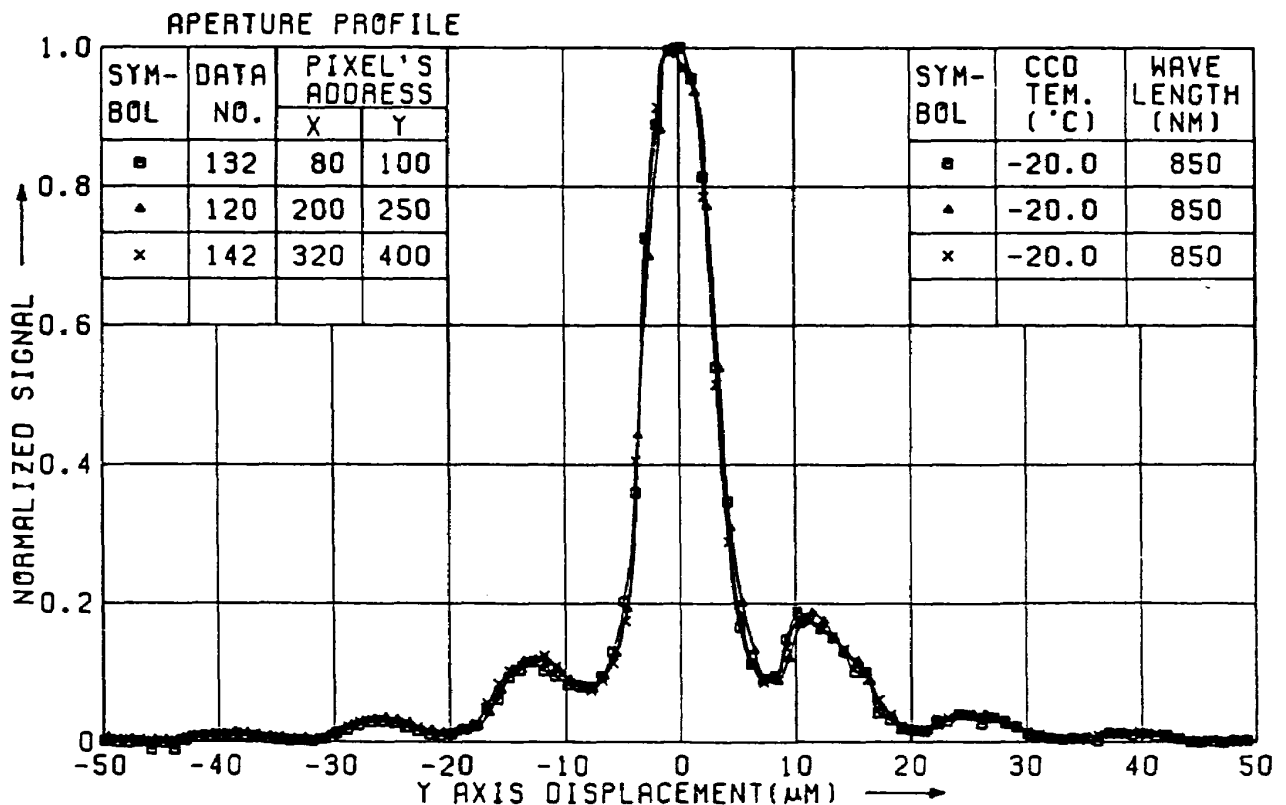
付図 3.15 相対分光感度分布特性



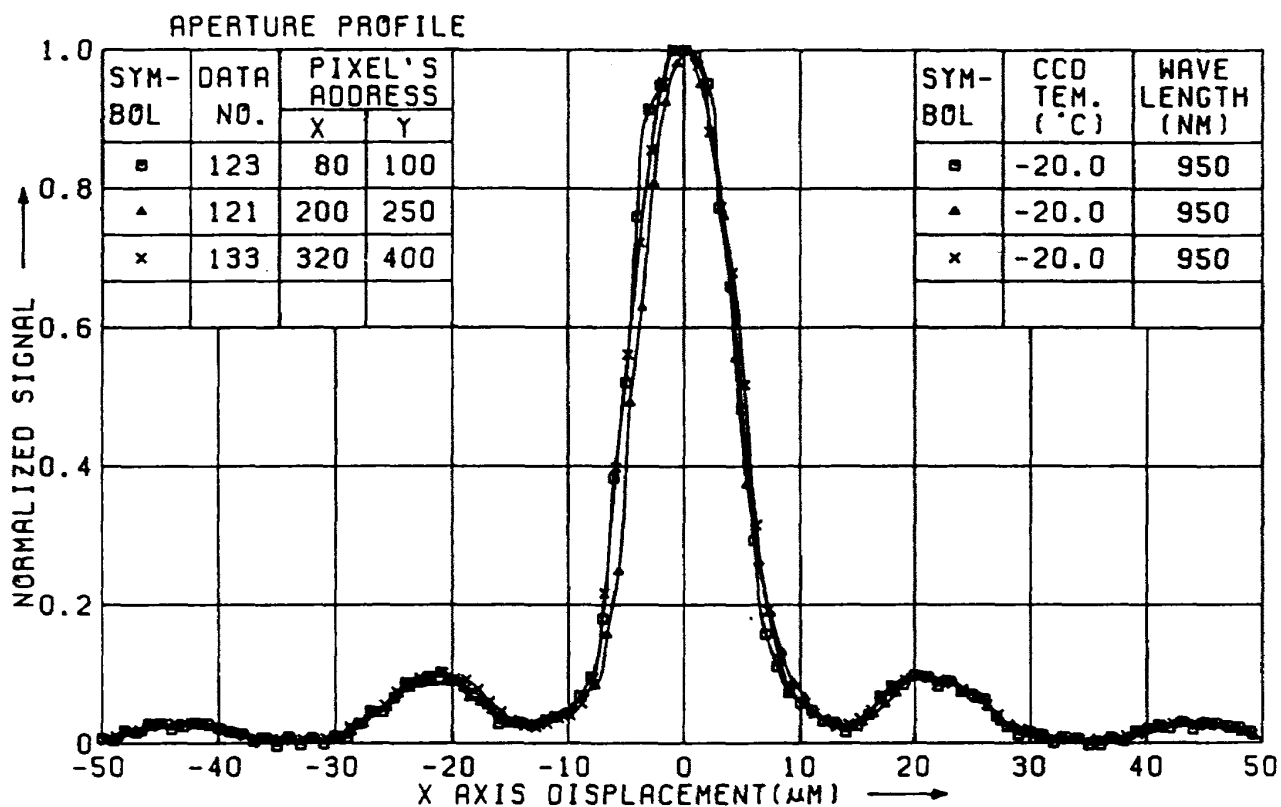
付図 3.16 相対分光感度分布特性



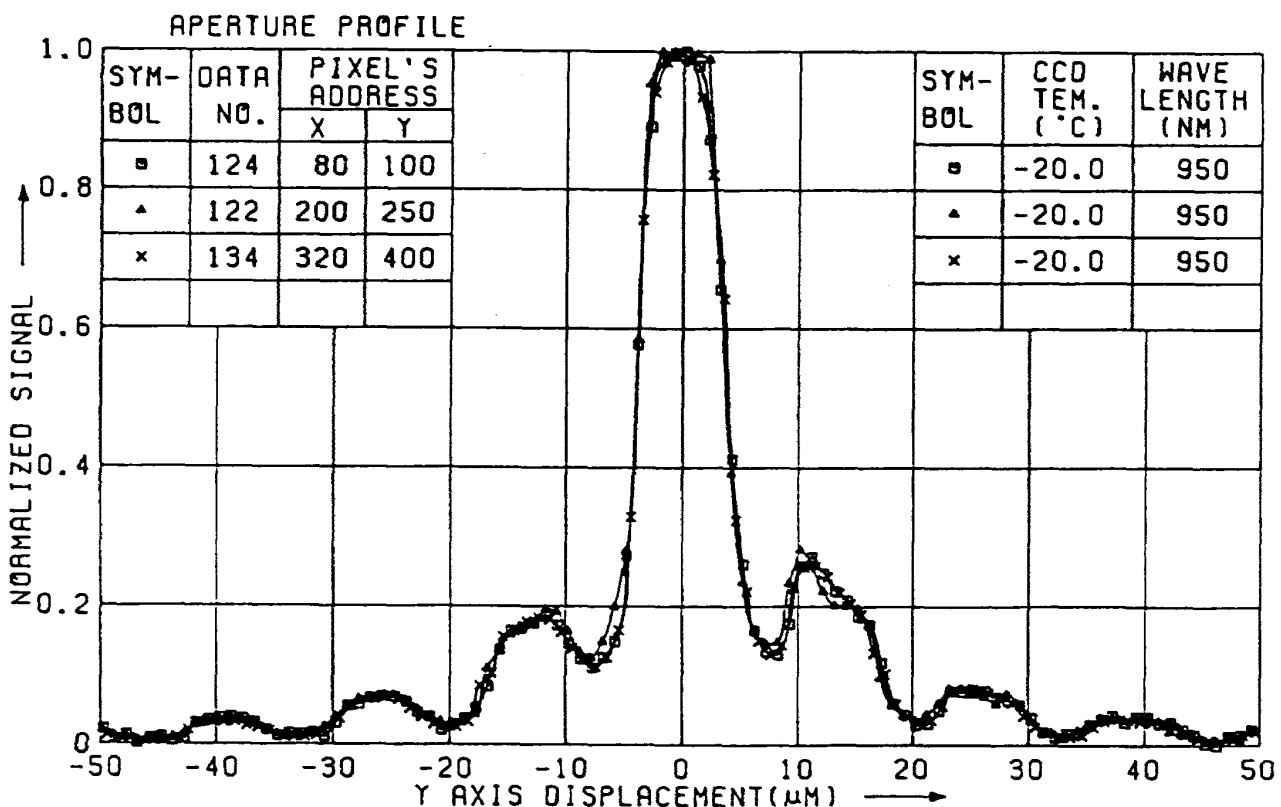
付図 3.17 相对分光感度分布特性



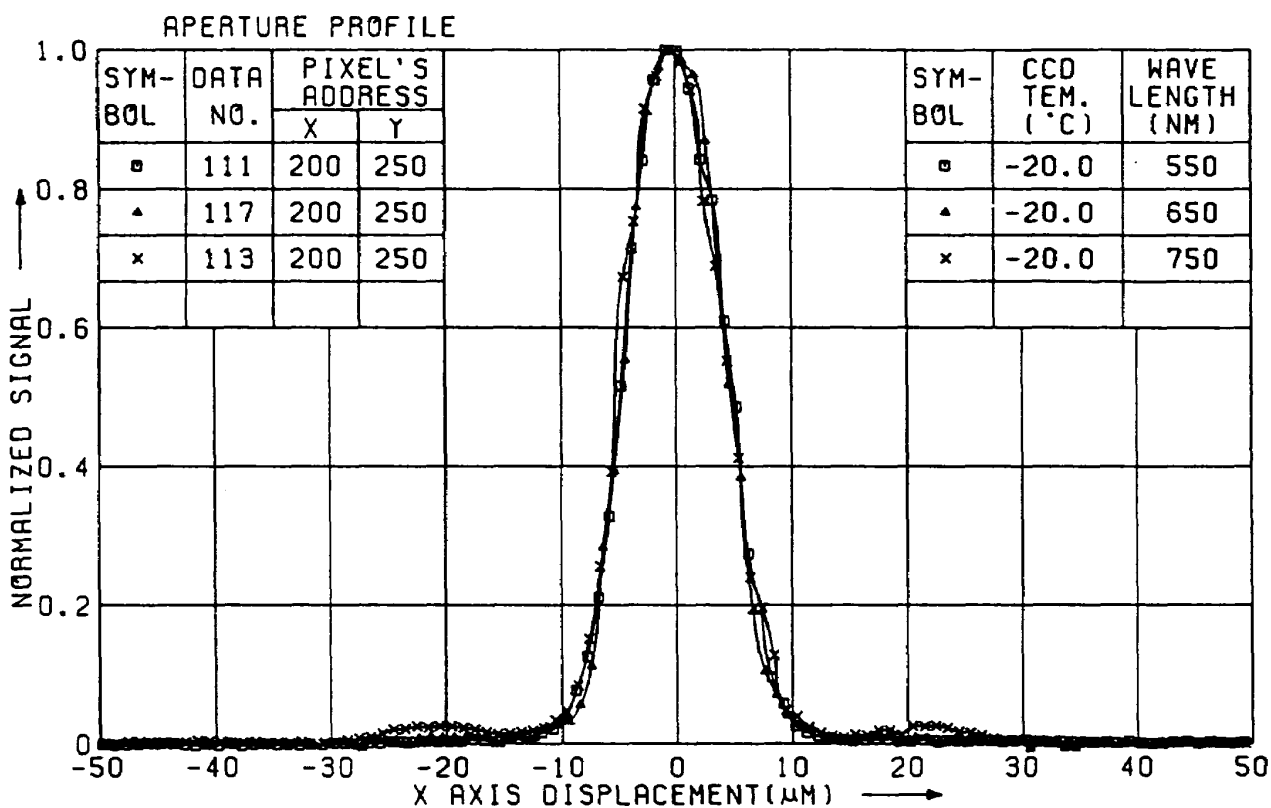
付図 3.18 相对分光感度分布特性



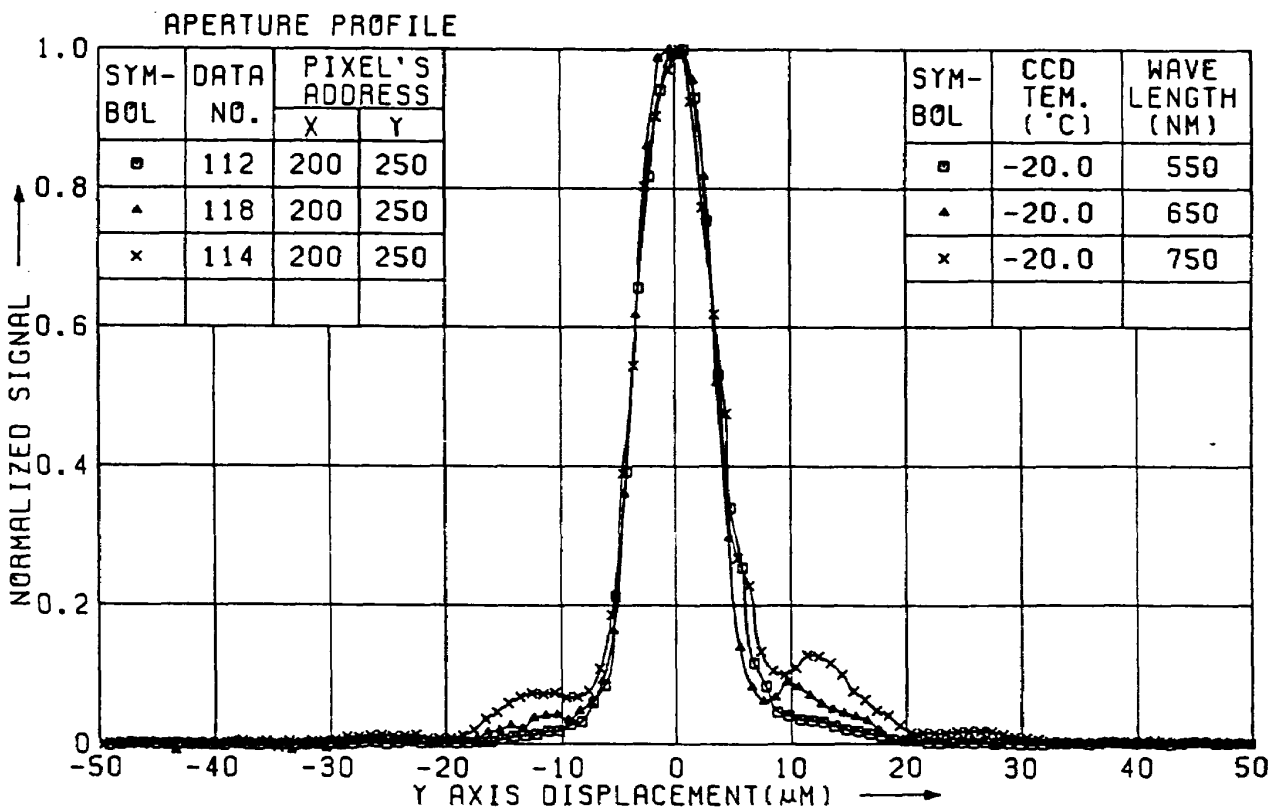
付図 3.19 相对分光感度分布特性



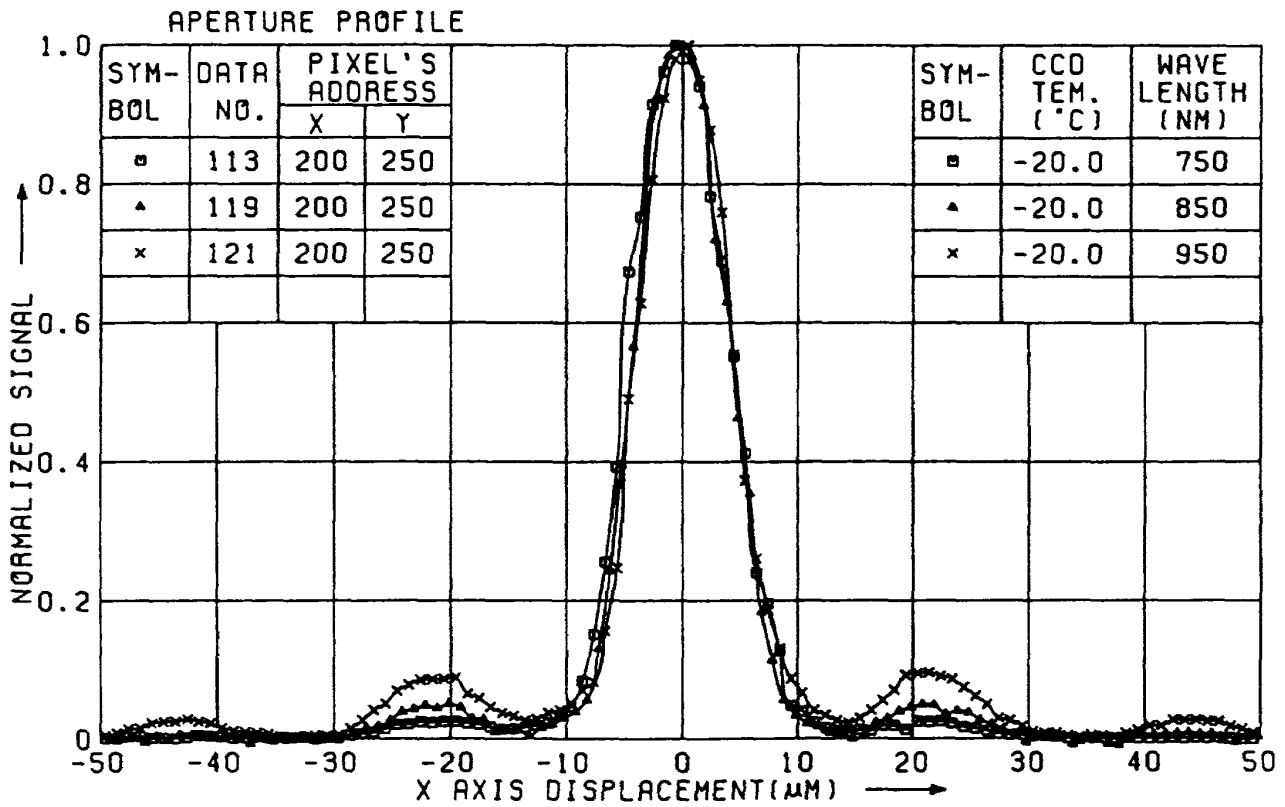
付図 3.20 相对分光感度分布特性



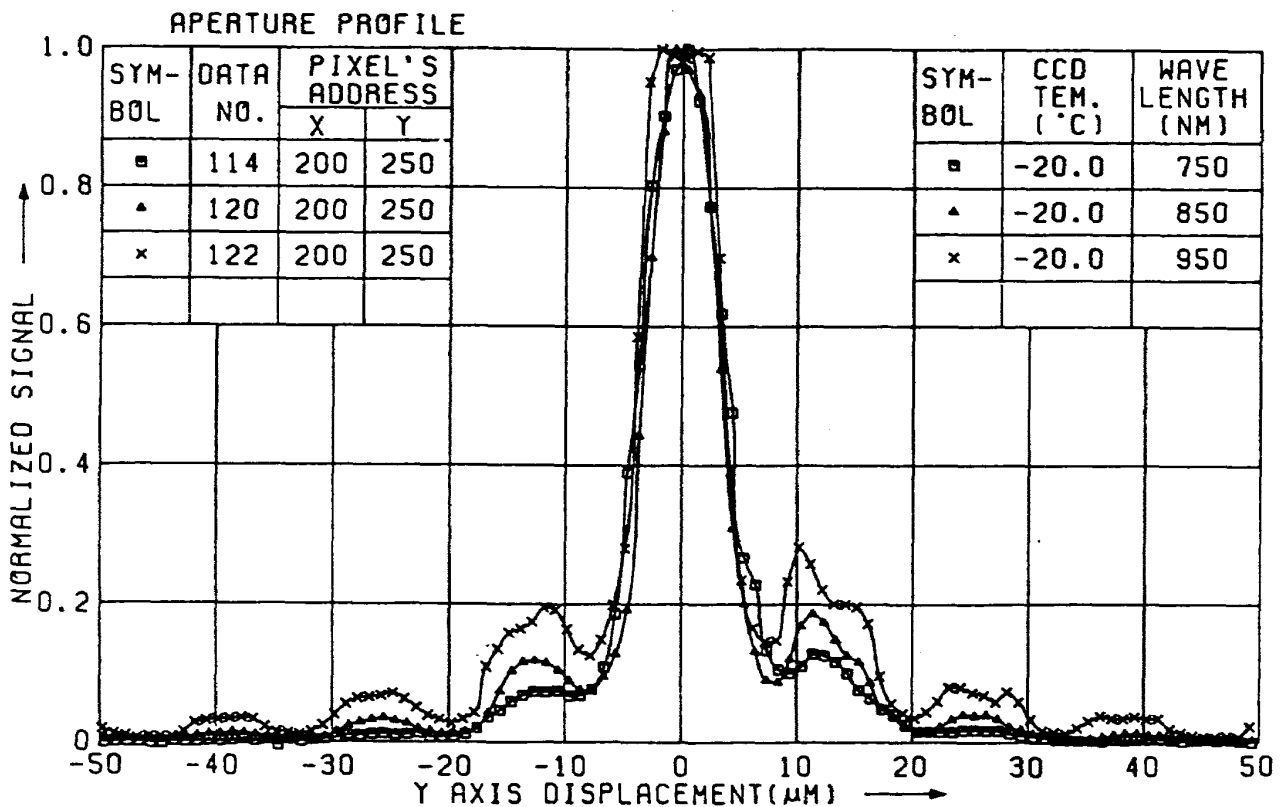
付図 3.21 相对分光感度分布特性



付図 3.22 相对分光感度分布特性

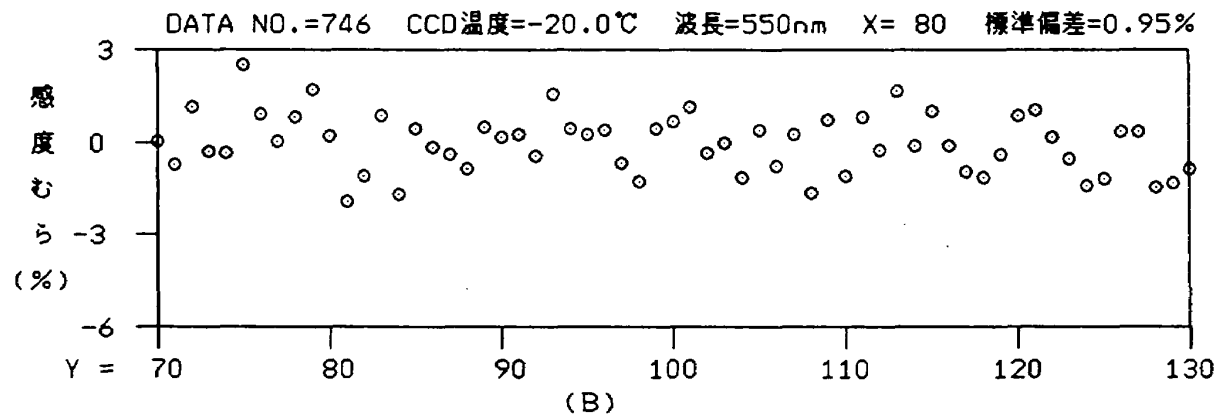
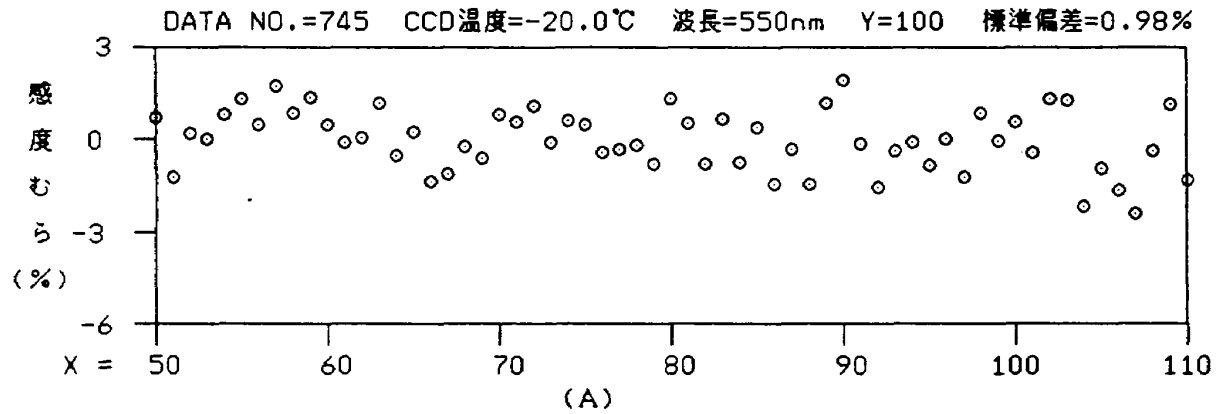


付図 3.23 相対分光感度分布特性

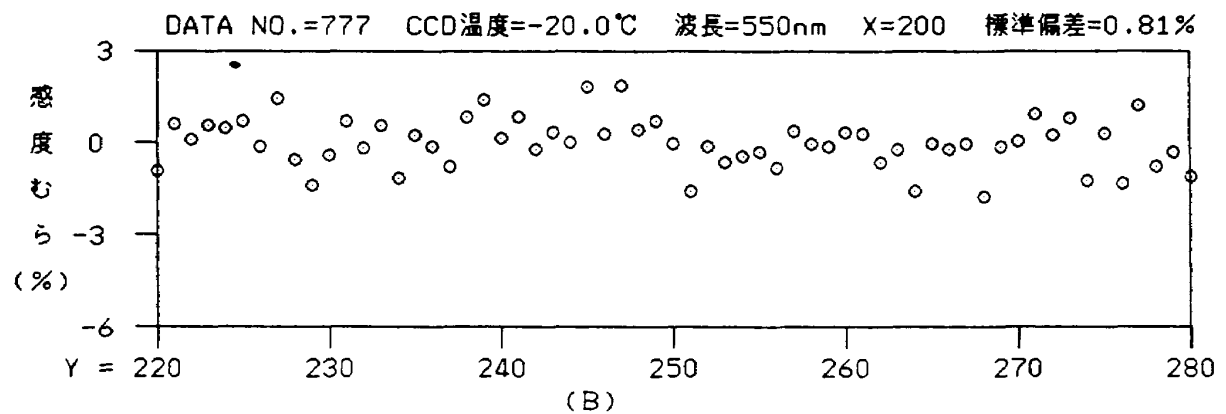
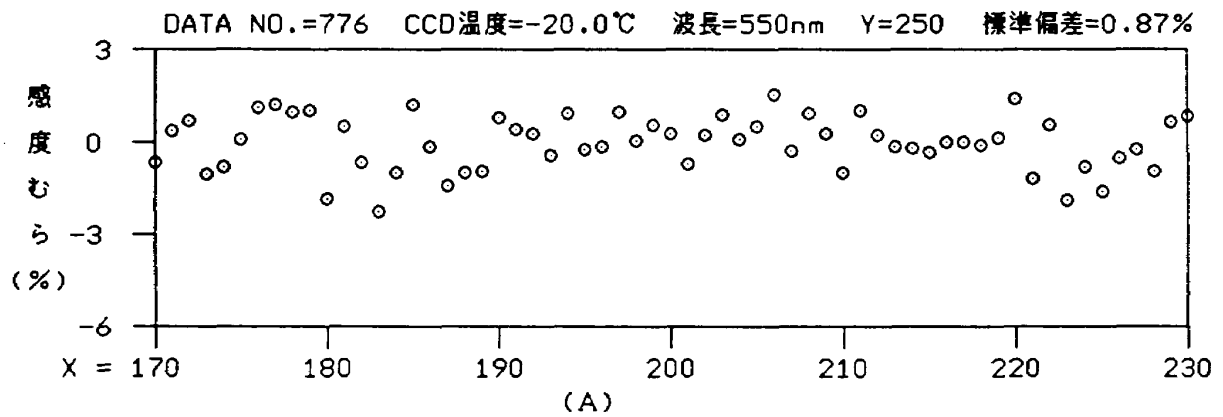


付図 3.24 相対分光感度分布特性

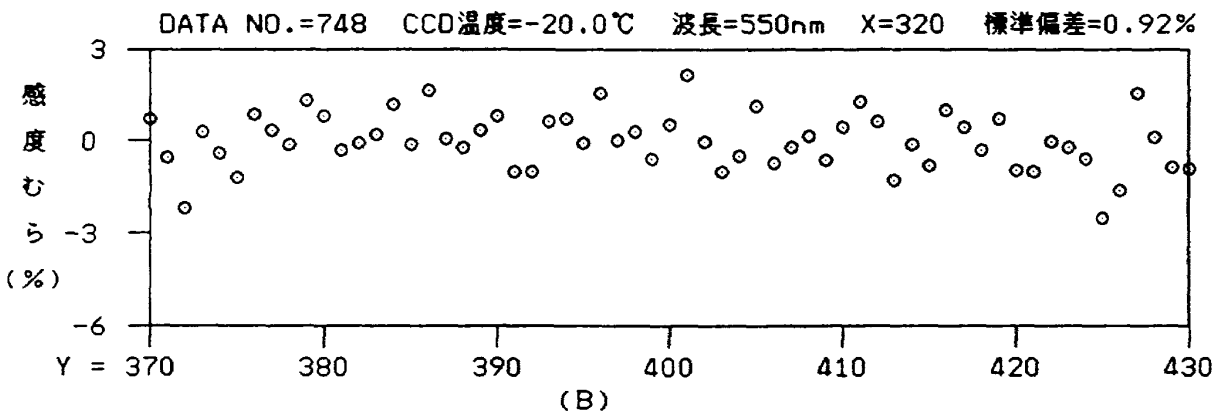
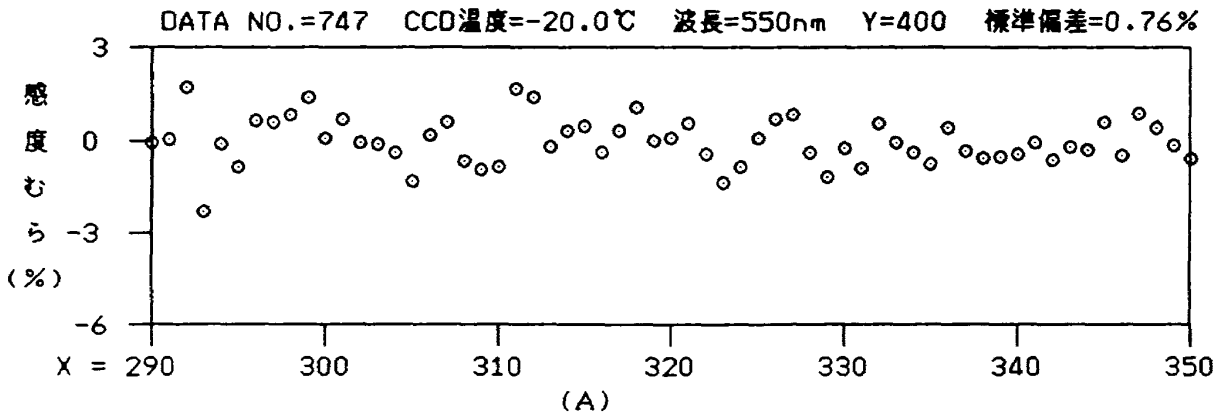




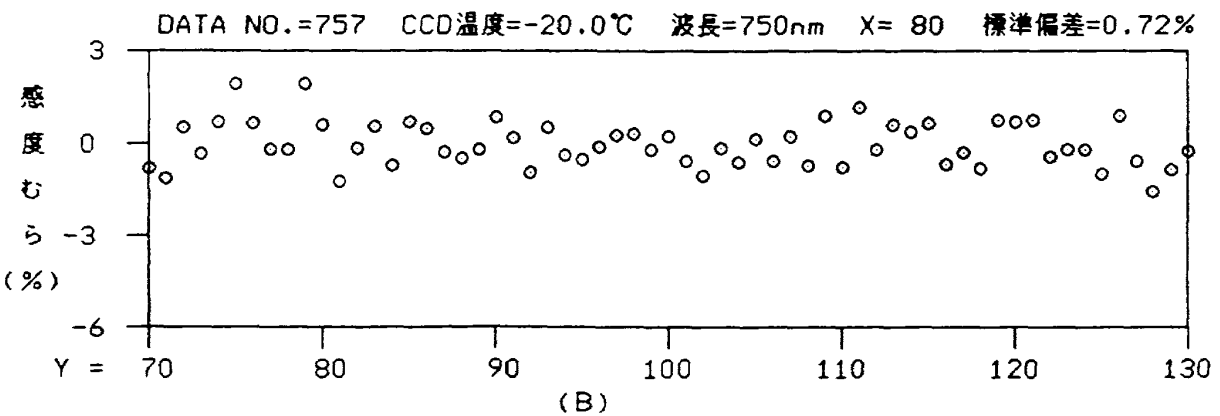
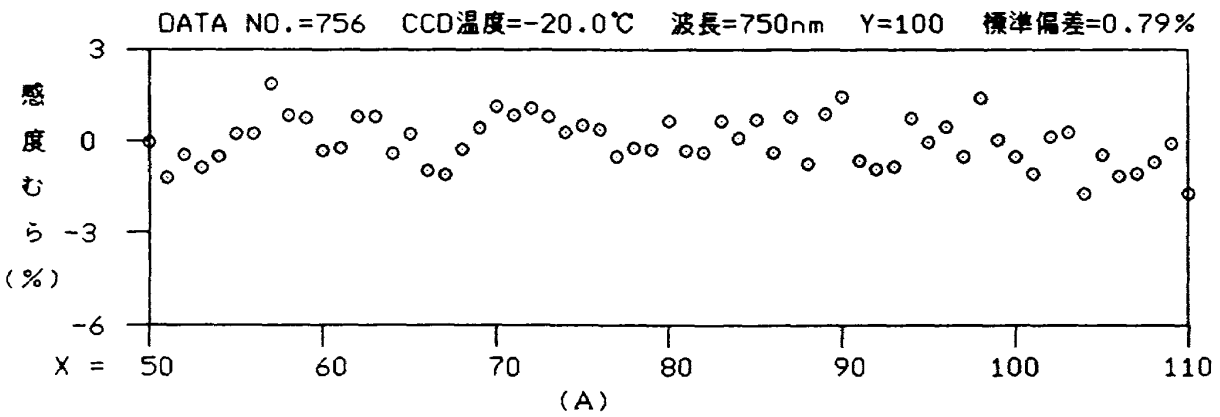
付図 4.1 画素間の不均一性



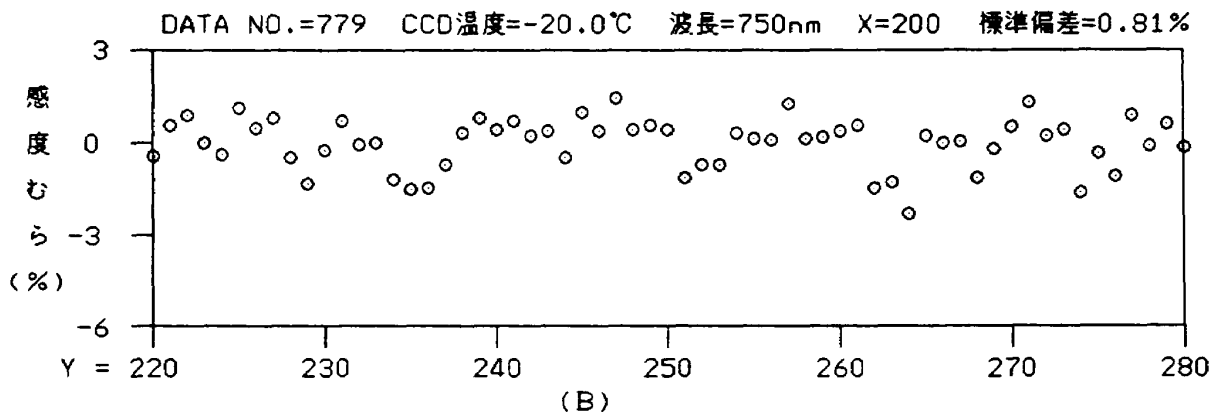
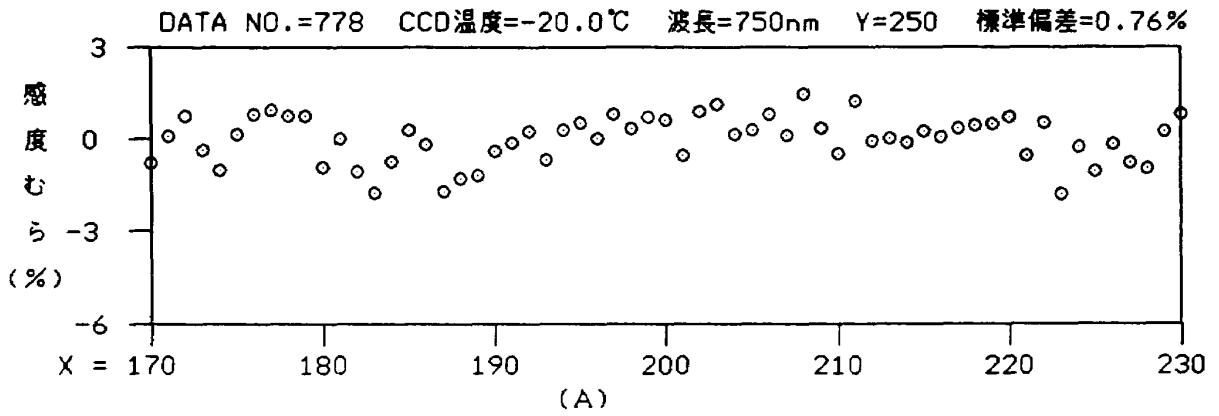
付図 4.2 画素間の不均一性



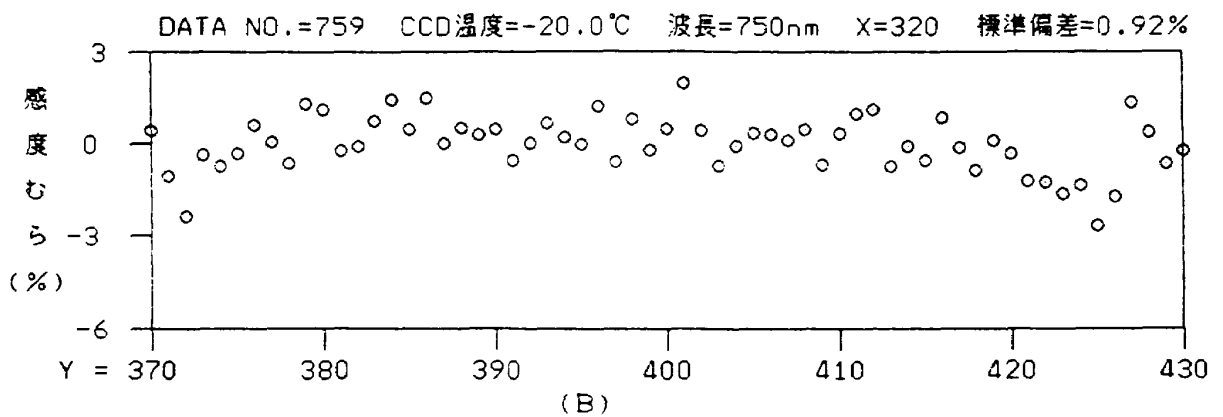
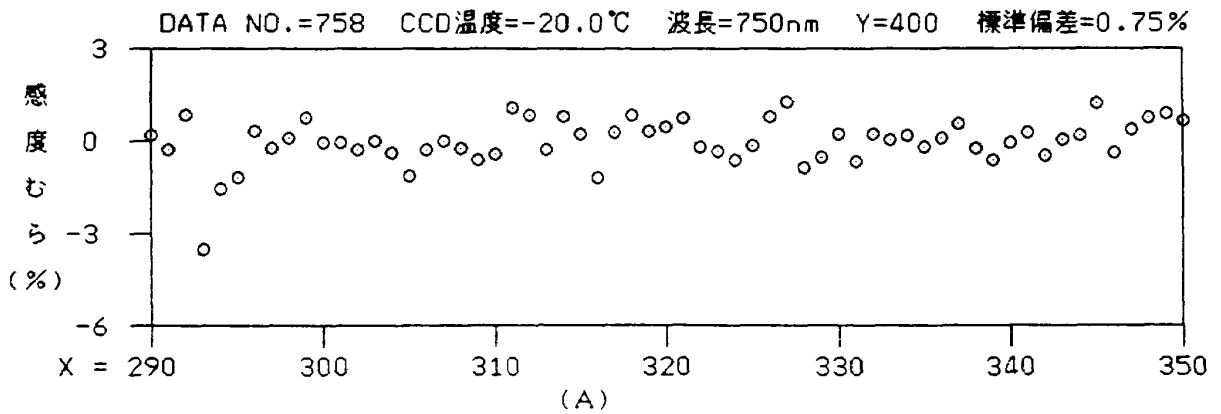
付図 4.3 画素間の不均一性



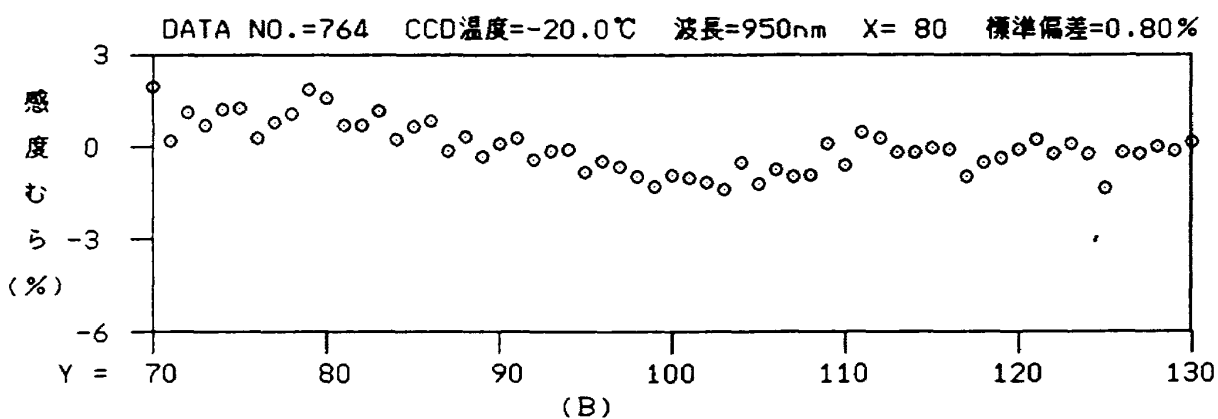
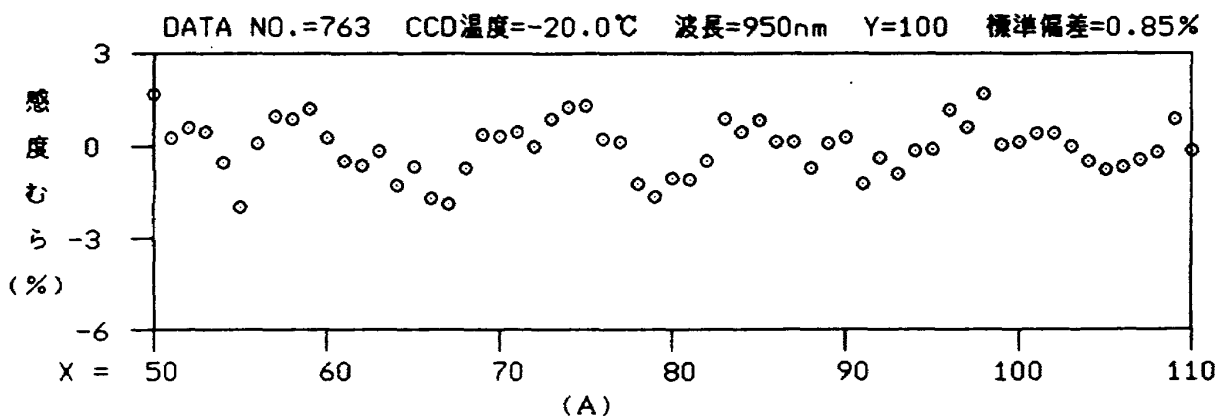
付図 4.4 画素間の不均一性



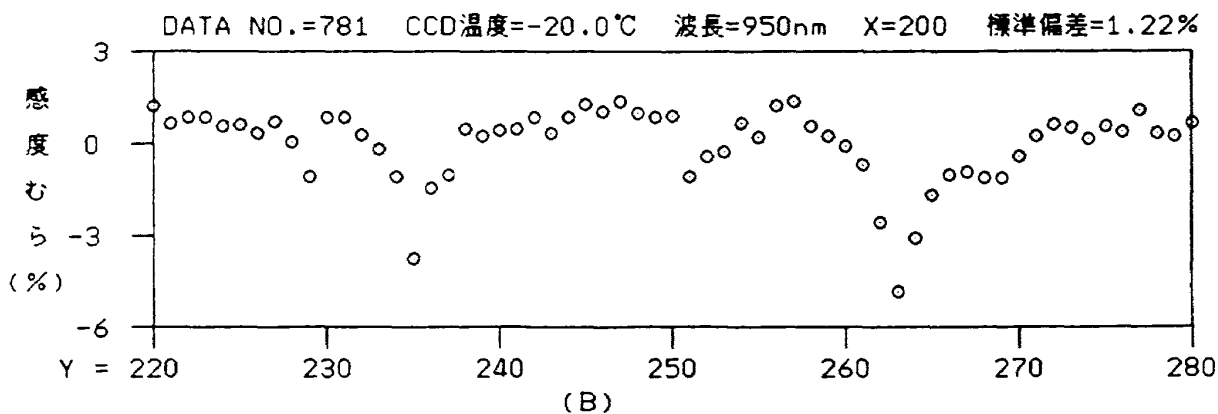
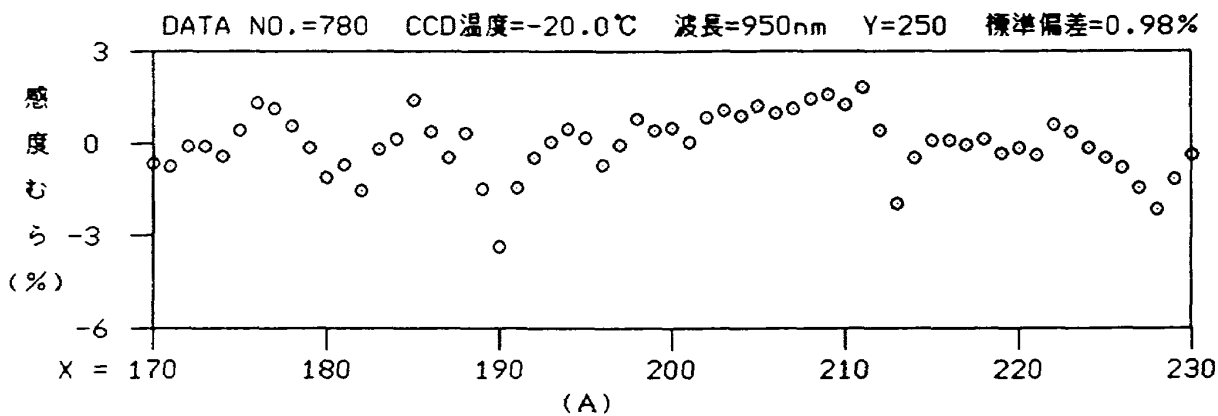
付図 4.5 画素間の不均一性



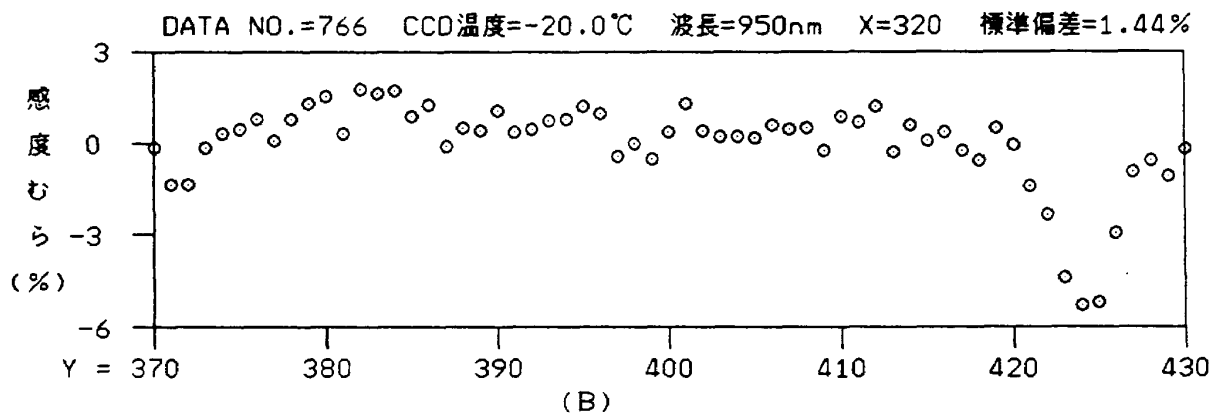
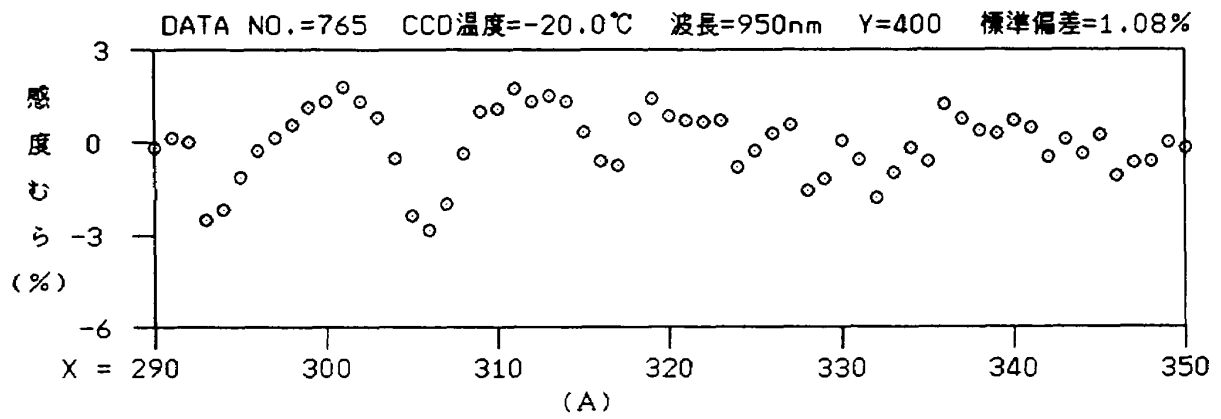
付図 4.6 画素間の不均一性



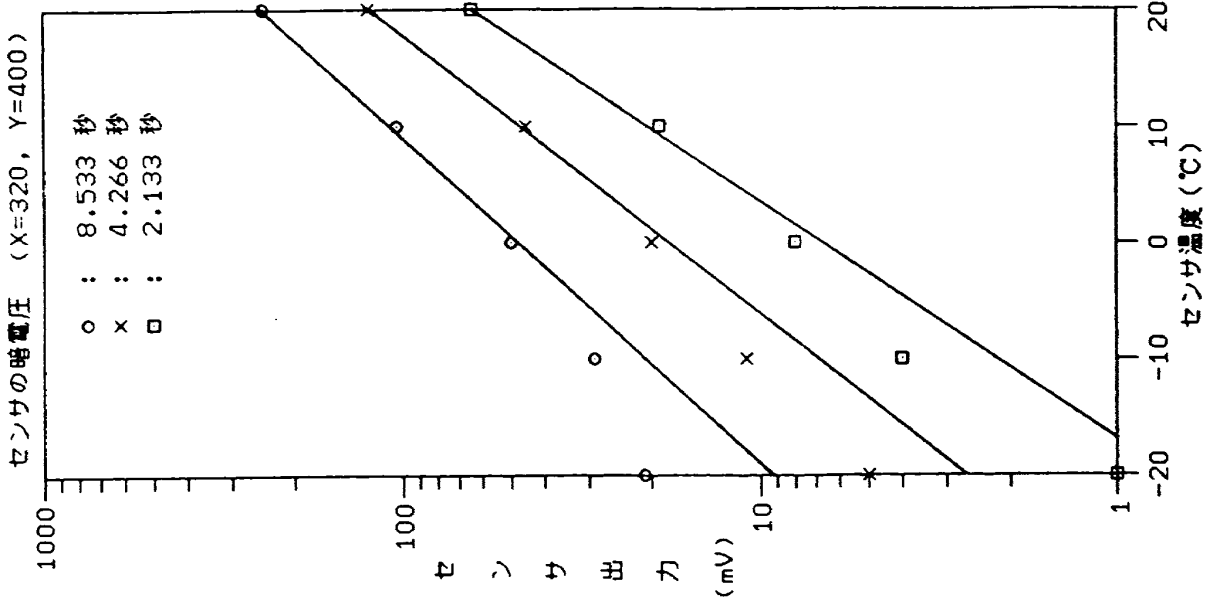
付図 4.7 画素間の不均一性



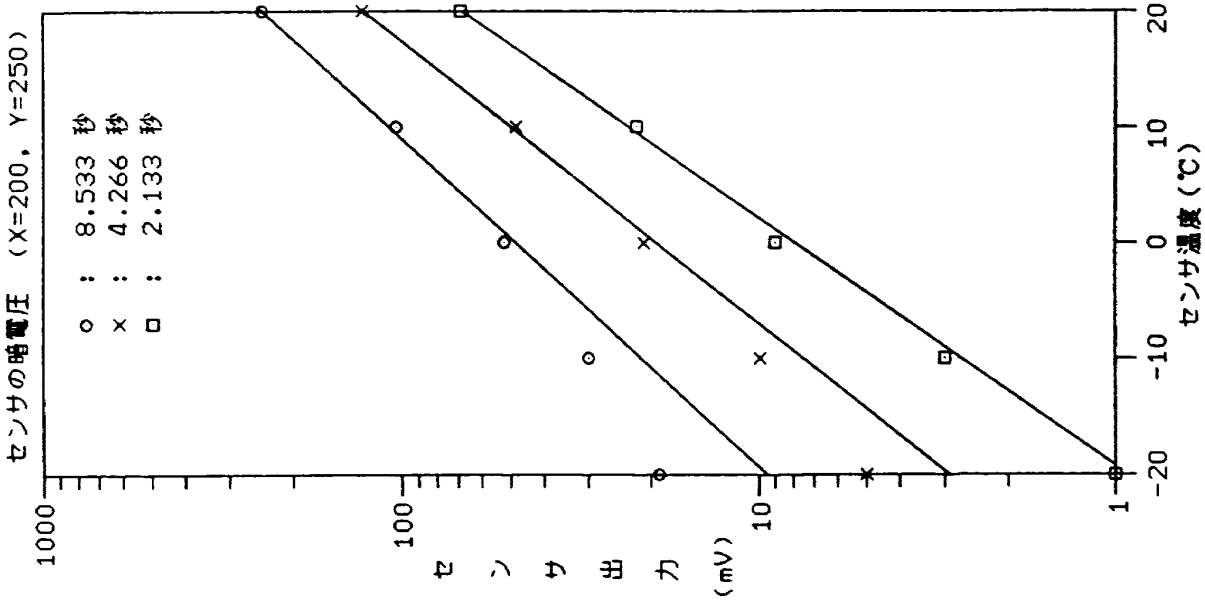
付図 4.8 画素間の不均一性



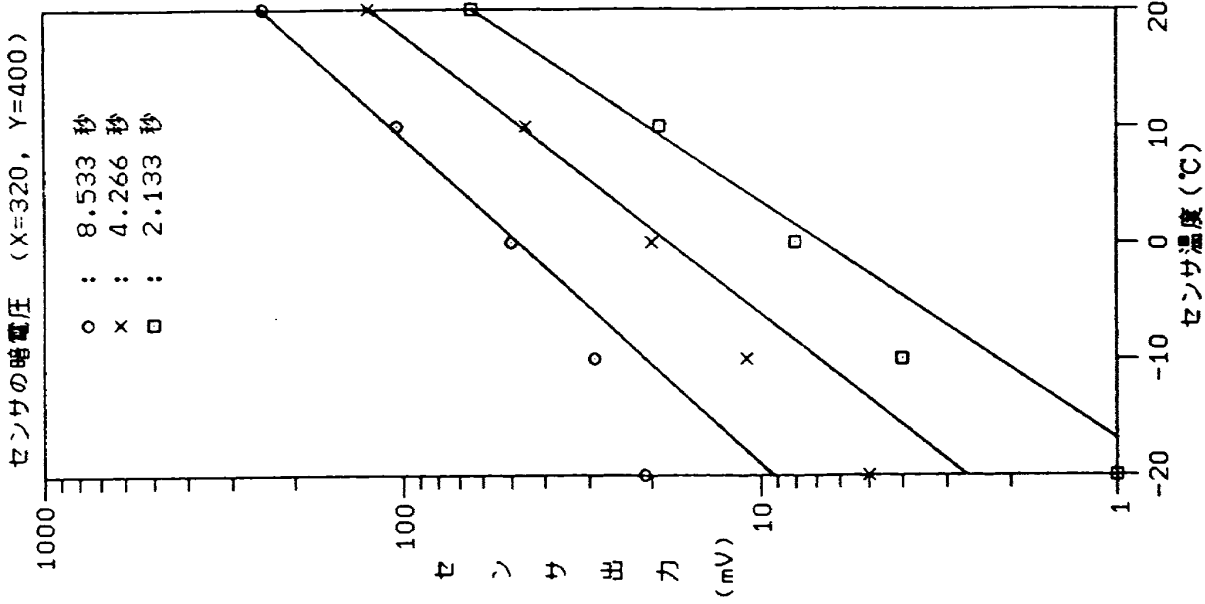
付図 4.9 画素間の不均一性



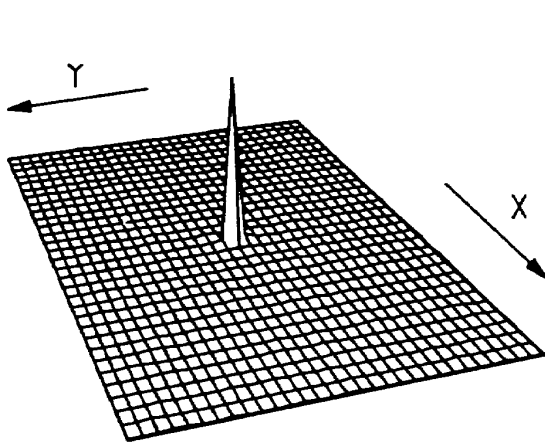
付図 5.1 暗電圧



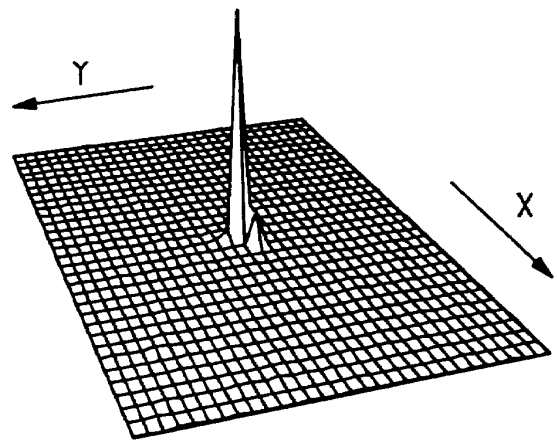
付図 5.2 暗電圧



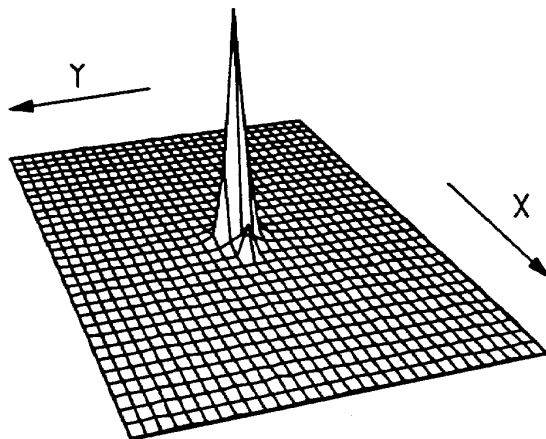
付図 5.3 暗電圧



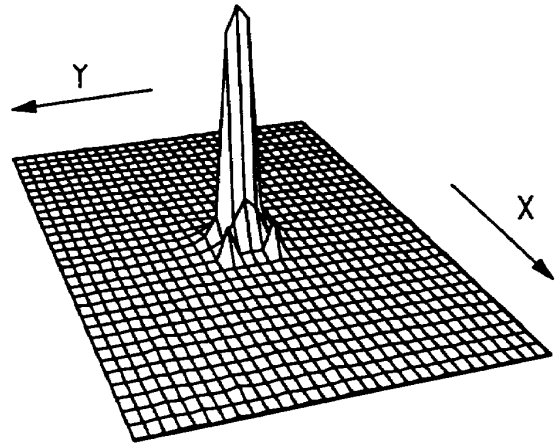
RELATIVE INTENSITY = 1  
( 1 )



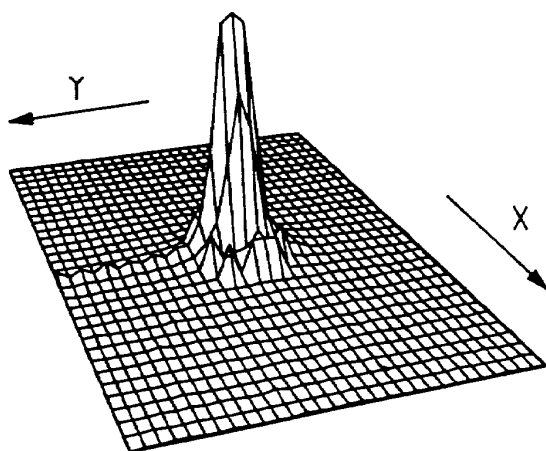
RELATIVE INTENSITY = 3  
( 2 )



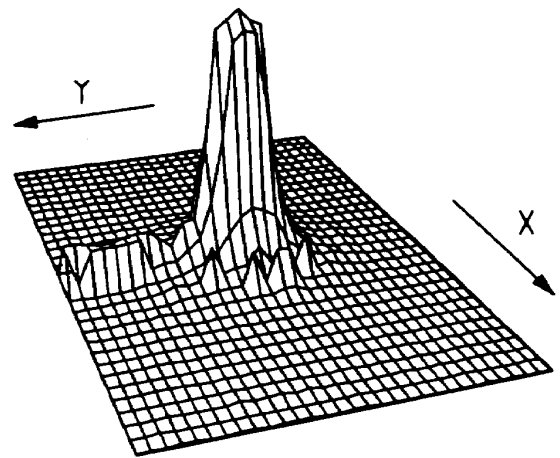
RELATIVE INTENSITY = 10  
( 3 )



RELATIVE INTENSITY = 30  
( 4 )



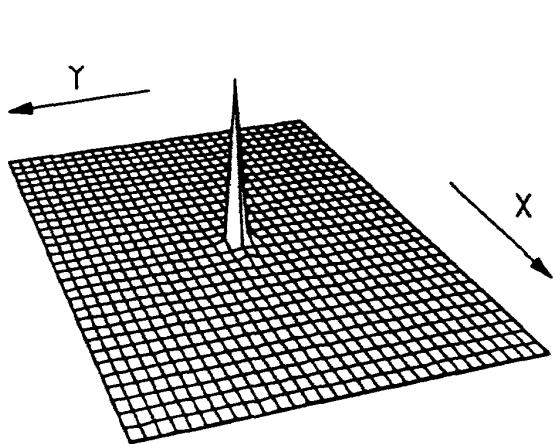
RELATIVE INTENSITY = 100  
( 5 )



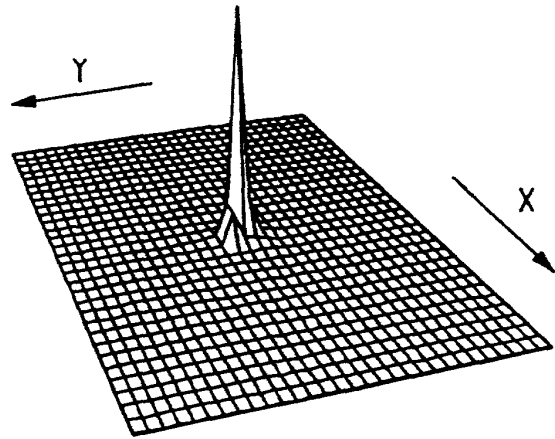
RELATIVE INTENSITY = 300  
( 6 )

( CCD TEMPERATURE(°C) = -20, WAVELENGTH(NM) = 550 )

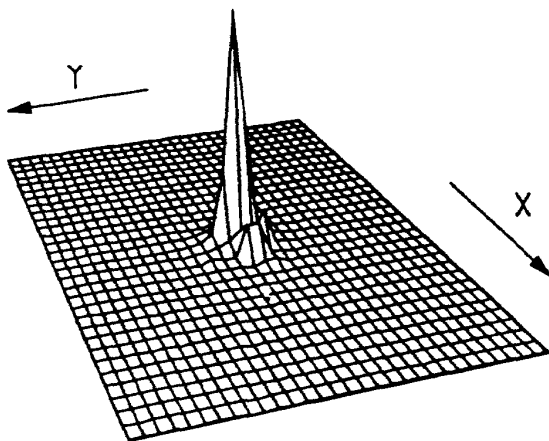
付図 6.1 ブルーミング



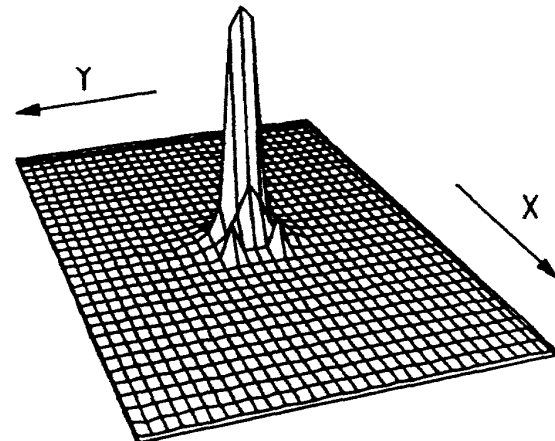
RELATIVE INTENSITY = 1  
( 1 )



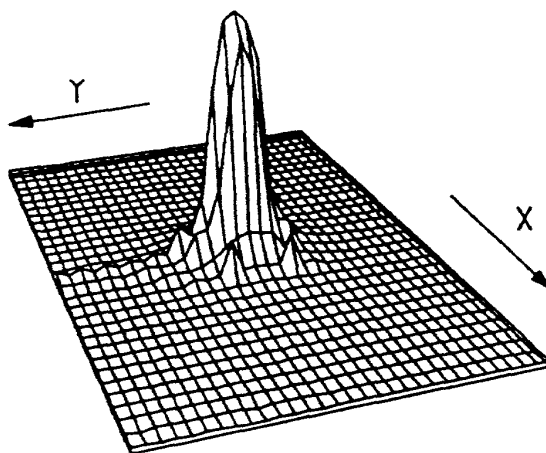
RELATIVE INTENSITY = 3  
( 2 )



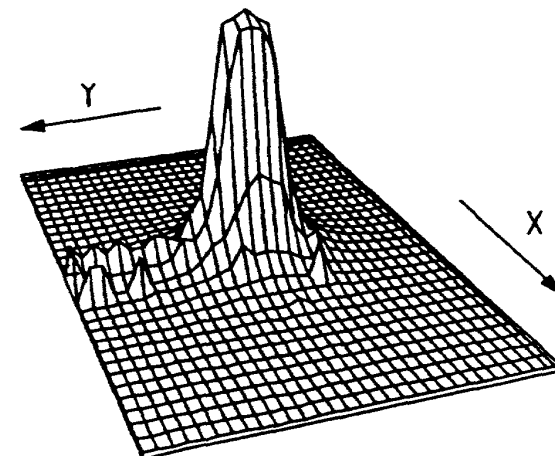
RELATIVE INTENSITY = 10  
( 3 )



RELATIVE INTENSITY = 30  
( 4 )



RELATIVE INTENSITY = 100  
( 5 )

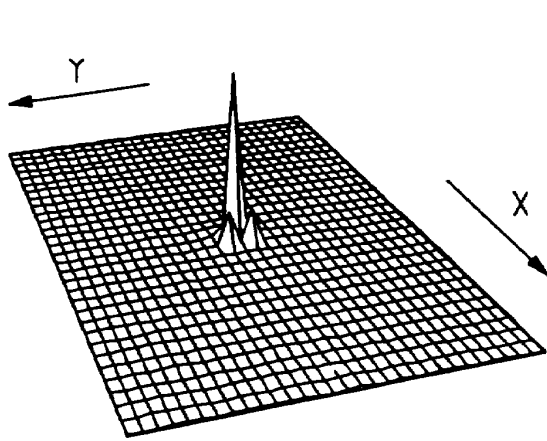


RELATIVE INTENSITY = 300  
( 6 )

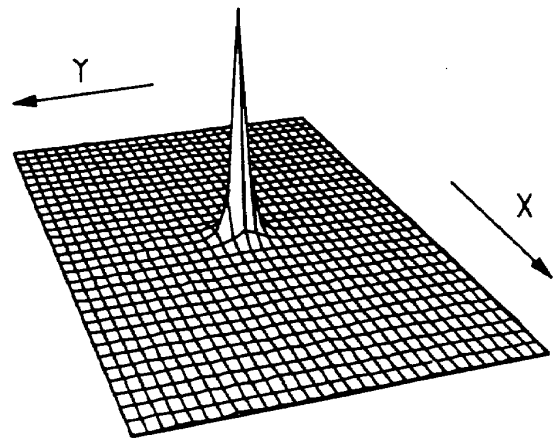
( CCD TEMPERATURE(°C) = -20, WAVELENGTH(NM) = 650 )

付図6.2 ブルーミング

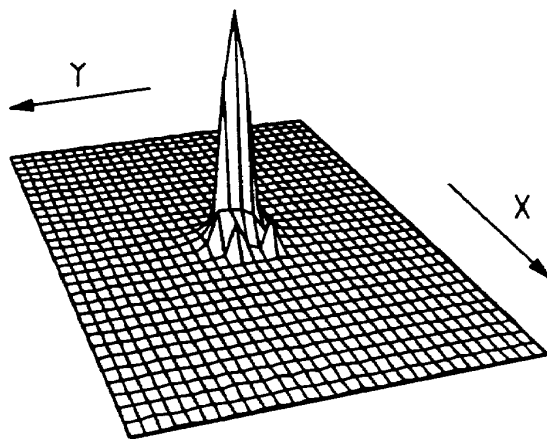




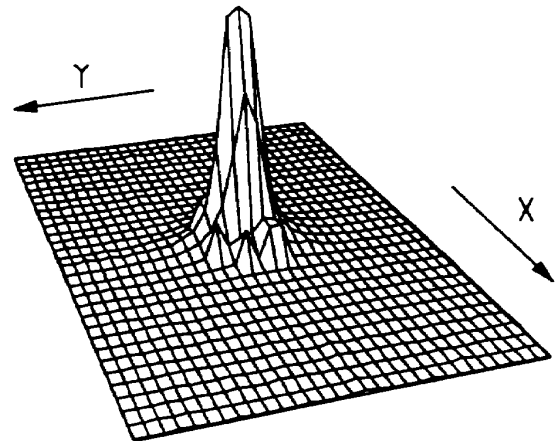
RELATIVE INTENSITY = 1  
( 1 )



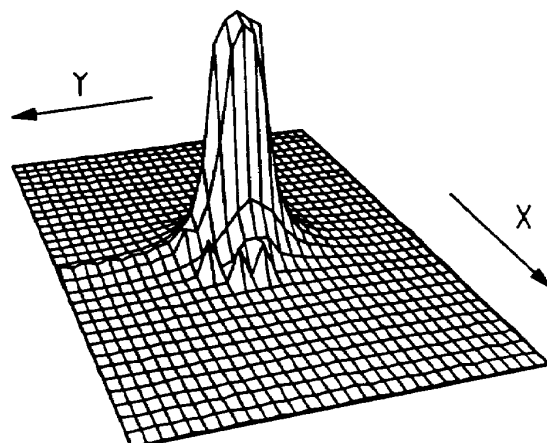
RELATIVE INTENSITY = 3  
( 2 )



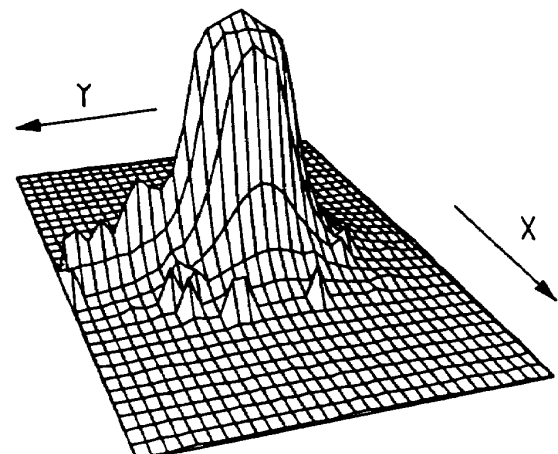
RELATIVE INTENSITY = 10  
( 3 )



RELATIVE INTENSITY = 30  
( 4 )



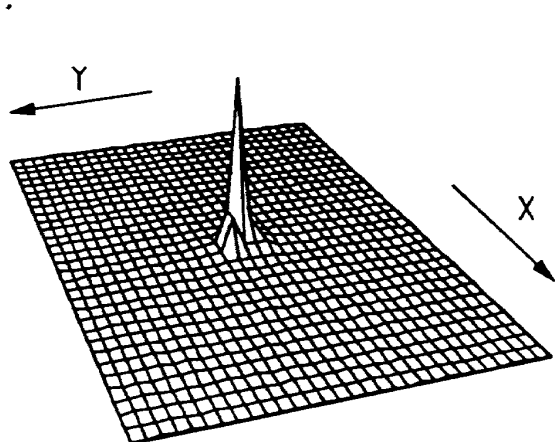
RELATIVE INTENSITY = 100  
( 5 )



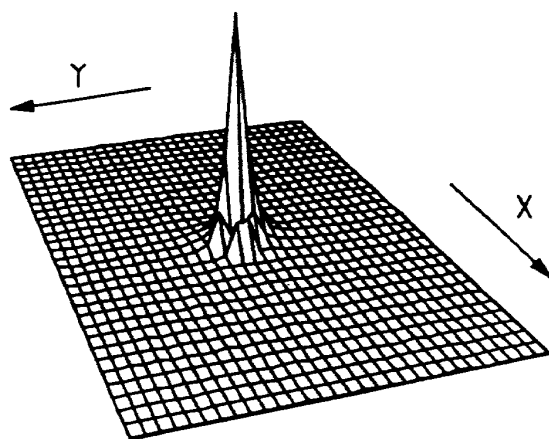
RELATIVE INTENSITY = 300  
( 6 )

( CCD TEMPERATURE(°C) = -20, WAVELENGTH(NM) = 750 )

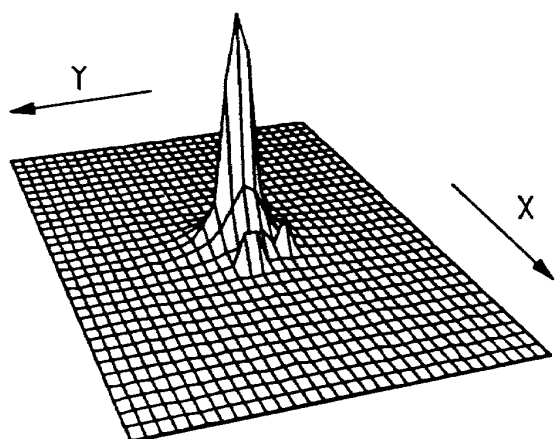
付図 6.3 ブルーミング



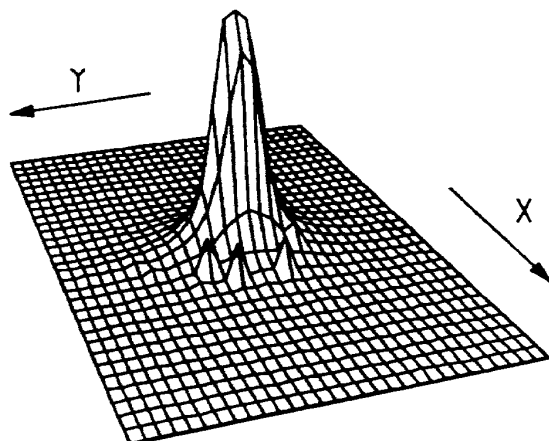
RELATIVE INTENSITY = 1  
( 1 )



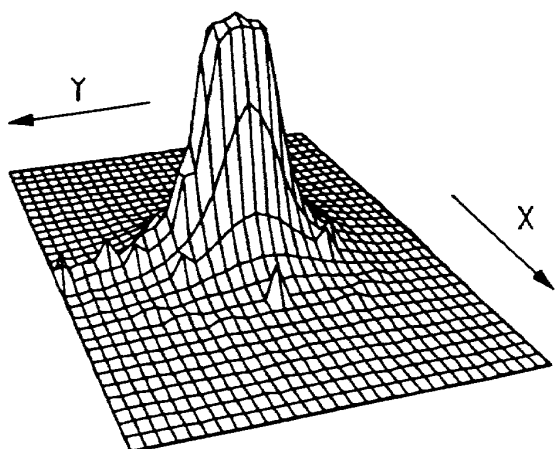
RELATIVE INTENSITY = 3  
( 2 )



RELATIVE INTENSITY = 10  
( 3 )



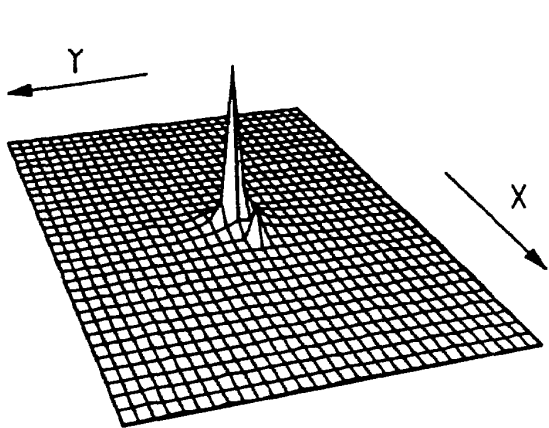
RELATIVE INTENSITY = 30  
( 4 )



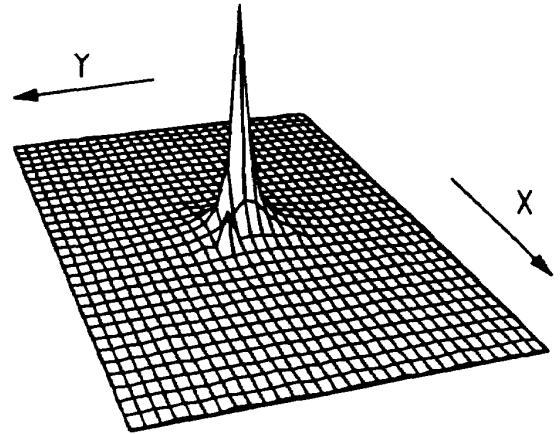
RELATIVE INTENSITY = 100  
( 5 )

( CCD TEMPERATURE(°C) = -20, WAVELENGTH(NM) = 850 )

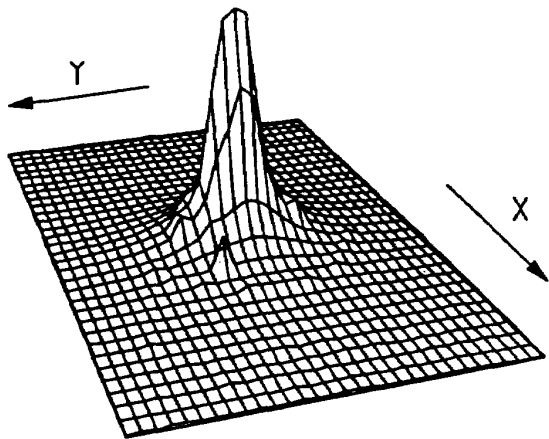
付図 6.4 ブルーミング



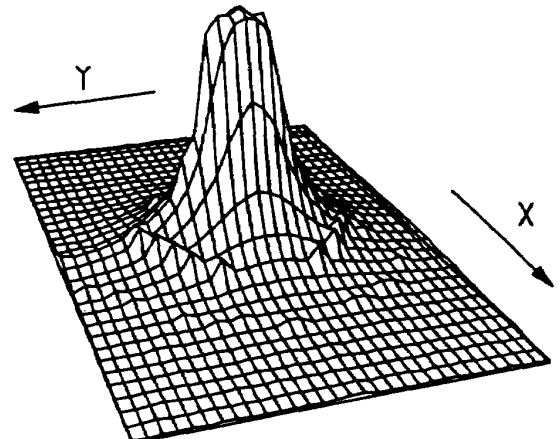
RELATIVE INTENSITY = 1  
( 1 )



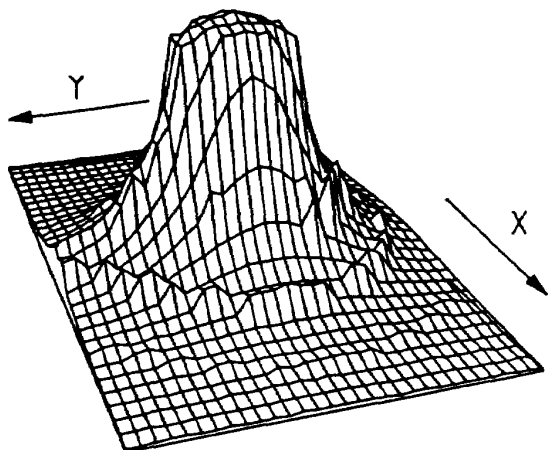
RELATIVE INTENSITY = 3  
( 2 )



RELATIVE INTENSITY = 10  
( 3 )



RELATIVE INTENSITY = 30  
( 4 )



RELATIVE INTENSITY = 100  
( 5 )

( CCD TEMPERATURE ( °C ) = -20, WAVELENGTH ( NM ) = 950 )

付図 6.5 ブルーミング

## 既 刊 資 料

TM-560	ラスタスキャン型ディスプレイのための基本プログラム	1986年12月	磯部俊夫, 末松俊二 小口慶子
TM-561	パーソナルコンピュータによる計測データ処理システム(スクラムジェット燃焼試験用)	1986年12月	工藤賢司, 小室智幸 村上淳郎
TM-562	材料強度に及ぼす熱サイクルの影響	1987年1月	池田為治
TM-563	H-II ロケット衛星フェアリング構造要素模型(アルミ面板/アルミハンカムサンドイッチ曲面板)の軸圧縮座屈試験	1987年1月	遠藤修司, 野口義男 大竹邦彦, 小野幸一 福島幸夫
TM-564	液酸/液水ロケットの推進剤および燃焼ガスの物性値高速計算用プログラム	1987年3月	若松義男, 菊の丈士 冠 昭夫
TM-565	航技研 2 m × 2 m 遷音速風洞用壁圧分布測定装置の開発	1987年3月	榊原盛三, 沢田秀夫 鈴木弘一, 中村正剛 細江信幸
TM-566	実用STOL機半截模型風洞試験(第1報)	1987年3月	奥山政広, 高橋 侖 藤枝郭俊, 藤田敏美 岩崎昭人
TM-567	USBフラップ構造の音響熱環境(第1報, 地上, 模擬, 試験結果)	1987年3月	佐野政明, 江川幸一 遠藤修司
TM-568	弾性支持2自由度シャイロの運動方程式に関する一考察	1987年4月	新宮博公
TM-569	最近のエアラインの燃油費に関する一考察	1987年4月	田辺義一

---

## 航空宇宙技術研究所資料 570 号

昭和62年4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7-44-1  
電話武蔵野三鷹(0422)47-5911(大代表)〒182

印刷所 株式会社実業公報社  
東京都千代田区九段南4-2-12

---

