

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-398

可視近赤外放射計用CCDイメージセンサの
評価試験

桜井善雄・木村武雄
興石肇・倉益凌一

1979年11月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

可視近赤外放射計用CCDイメージセンサの 評価試験*

桜井 善雄** 木村 武雄**
奥石 肇*** 倉益 凌一****

Study on the CCD Image Sensors for the Visible and Near-Infrared Radiometer

By

Yoshio SAKURAI, Takeo KIMURA,
Hajime KOSHIISHI and Ryouichi KURAMASU

ABSTRACT

This report describes the test procedures of 1728 and 2048 element charge coupled linear imaging devices and the test results obtained in characterizing their devices. This type of device has been intended for use of optical sensors in the visible and near-infrared multispectral electronic self-scanning radiometer mounted on the first Japanese earth observation satellite, MOS-1. For the purpose of obtaining the technical data in the development of the radiometer, the linearity, sensitivity, uniformity, element profiles and spectral responses of the devices were measured and useful results were obtained.

1. まえがき

我国の地球観測衛星シリーズの一つである海洋観測衛星 (MOS: Marine Observation Satellite, 1号は昭和59年度打上予定) には国産の可視近赤外放射計 (以下放射計と略す) が搭載される予定である¹⁾。この放射計は機能的には LANDSAT の 1, 2号で使用されている MSS (Multispectral Scanner) とほぼ同じようなものと考えられるが, その走査方法に大きな違いがある。MSS は機械的走査 (鏡の振動) を行うのに対して, 放射計は電子的走査を行う。この電子的走査は CCD リニ-

ア・イメージセンサ (以下 CCD と略す) により行われる予定である。しかしながら CCD は元来ファクシミリ用センサを主目的として作られたものであり, これを放射計のセンサとして改良開発して行くためには, 事前にその技術的問題点を十分把握しておく必要がある。本試験の目的は放射計のセンサとして重要な特性である CCD の直線性, 分光感度特性, 分光位置感度特性, 画素間の不均一性について試験を行うとともに, この様な評価試験方法を確立することである。ここで試験した CCD は 1728 画素および 2048 画素の 2 種類のものであるが, 両者の試験結果を比較検討することにより有用な結果を得たので報告する。なおこの試験は宇宙開発事業団との共同研究「可視近赤外放射計の試験評価法の研究」の中で行われたものである。

* 昭和54年9月21日 受付

** 計測部

*** 計算センター

**** 宇宙開発事業団

2. CCD の性能試験²⁾

2.1 CCDの概要

MOS-1号搭載用放射計のセンサ(光電変換素子)としては2048画素のCCD(Charge Coupled Devices)が考えられている。このCCDはシリコン基板上に2048個の独立した画素(絵素),すなわち光電変換用のフォトエレメント(photoelement)が図2.1に示すようにアレイ状に並べられており,個々の画素の電気出力信号(以下出力信号と略す)は,シフトレジスタによって時系列信号として取り出せるようになっている。現在国産されているCCDで画素数の最も多いものが2048であり,外国のものも市販されているものでは同様であって,画素のピッチは13~15 μm のことが多い。

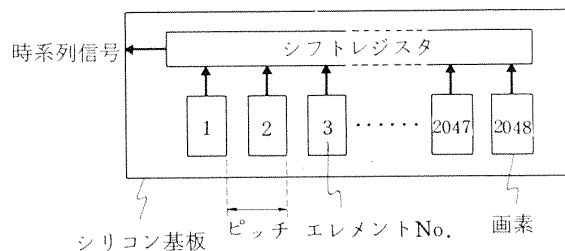


図 2.1 CCDの概要図

ここで試験した CCD は日本製のもの 4 個と外国製のもの 1 個の計 5 個であり,その概要を表 2.1 に示す。写真 2.1 はこの CCD で上が外国製,下が日本製である。これらの CCD はすべて実際の使用に近いと思われる 300 KHz のクロック周波数で作動させ,試験した。なお



写真 2.1 試験した CCD

以降の取り扱いを容易にするために各 CCD には表 2.1 のようなアレイ No. を付け、また画素には図 2.1 に示すようにエレメント No. を付けた。

表 2.1 CCD の仕様概要等

	日 本 製	外 国 製
画 素 数	2048	1728
画 素 の 大 き さ	9 μm \times 14 μm	8 μm \times 17 μm
チャンネル ストッパーの幅	5 μm	5 μm
画素配列ピッチ	14 μm	13 μm
受 光 部	MOS 容量	MOS 容量
電 極	ポリシリコン	ポリシリコン
シフトレジスタ	4 相駆動	2 相駆動
出 力 回 路	内 蔵	内 蔵
試 験 し た 数	4 個	1 個
ア レ イ No.	1 ~ 4	5

2.2 CCD の性能試験方法

CCD の性能試験は 20 ~ 25°C において

- (1) 直線性
- (2) 分光感度特性
- (3) 分光位置感度特性
- (4) 画素間の不均一性

の各試験を行った。以下これらの試験方法について述べる。

2.2.1 直線性の試験方法

放射計においては光の濃淡を、例えば 64 段階 (6 bits) ぐらいに分割する (すなわち出力信号の階調を 64 にする) 必要がある。したがって放射計のセンサとして、CCD は各画素に入射する光エネルギーとそれに対応する出力信号とが正比例することが望ましい。この関係を調べるためには総合測定精度としておよそ $\pm 0.3\%$ 以上が必要であり、このためには特に正確に減光 (または増光) することが必要となる。ここでは「被照面 (CCD の受光面) の放射照度が、そこから点光源までの距離の 2 乗に反比例する」性質を利用して行った。なぜならば距離は比較的容易かつ正確に測定できるので、この性質を利用すれば減光も比較的正確に行えるからである。なお CCD の感度は波長に依存するが直線性は波長に依存しないと考えられるので、ここでは光源に 100 W のハロゲンランプを用いた。

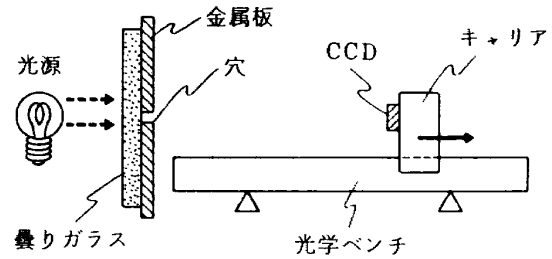


図 2.2 直線性の試験方法

図 2.2 は直線性の試験方法 (測定方法) の概要であって、金属板の穴 (直径 4 mm) から放射した一定の強さの光が CCD を照射する。CCD を光学ベンチ (2 m 長) 上で、光源から遠ざかる方向に動かすことにより減光する。金属板の穴に接する曇りガラス (ディフューザ) の表面からは穴を通して散乱光が放射されるので、ここではこれを点光源と見なすことにする。減光をできるだけ正確に行うために光学ベンチ上の CCD と点光源との距離を 400 mm 以上として測定を行った。減光の距離による誤差は距離が最も短い所、すなわち 400 mm の所で最大になると考えられる。ここで距離の測定誤差を $\pm 0.3\text{ mm}$ と考えると、放射照度の測距による誤差は

$$\frac{\pm 0.3 \times 2}{400} \times 100 = \pm 0.15 (\%)$$

となる。点光源は完全な点ではないが、その直径 4 mm が距離 400 mm に比べて十分小さいので、これによる誤差は無視できる。光源の変動による誤差は直流安定化電源を使用することにより、およそ $\pm 0.05\%$ 以下と考えられる。したがって総合測定精度としてはおよそ $\pm 0.2\%$ 程度と思われる。

2.2.2 分光感度特性の試験方法

ここでは主として相対分光感度特性を求めた。この試験方法の概要は図 2.3 の通りである。すなわち分光器入力光源を一定にして分光器出力側の一定の場所に基準センサを置き、その出力 $V_r(\lambda)$ を波長 λ を変えて測定する。次に光源はそのままにして基準センサの受光面の位置に CCD の受光面がくるように CCD を置き換え、その出力信号 $V_c(\lambda)$ を $V_r(\lambda)$ と同様に測定する。基準センサの相対分光感度を $S_r(\lambda)$ とし、CCD の相対分光感

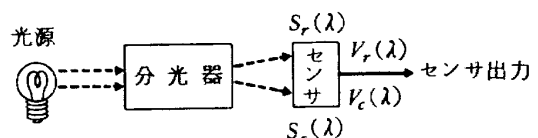


図 2.3 分光感度特性の試験方法

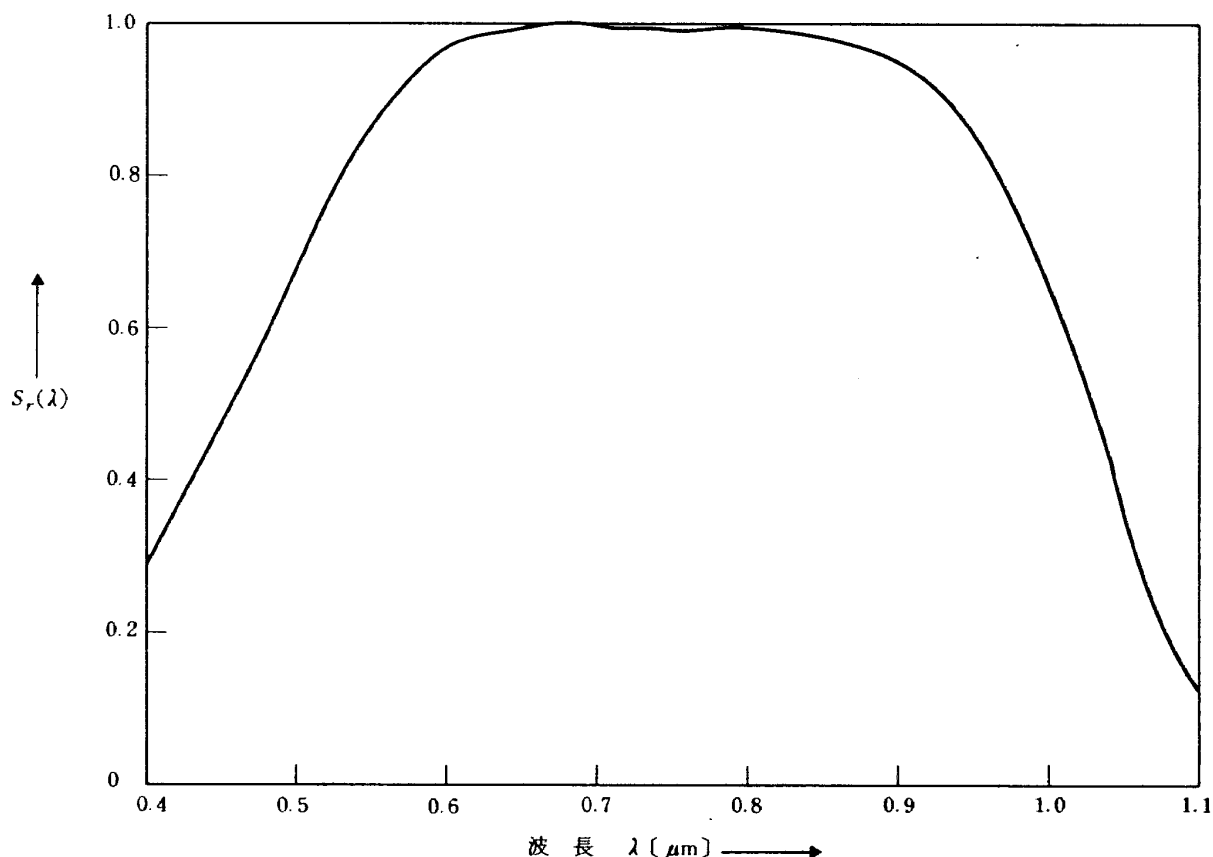


図 2.4 基準センサの相対分光感度特性

度を $S_c(\lambda)$ とすれば

$$S_c(\lambda) = K \frac{V_c(\lambda)}{V_r(\lambda)} S_r(\lambda) \quad (2.1)$$

となって CCD の相対分光感度特性を求めることができる。ここに K は $S_c(\lambda)$ を規格化するための定数である。また基準センサは 1 cm^2 の円形受光面を持つシリコンフォトダイオードである。

この試験方法における $S_c(\lambda)$ の精度はほとんど $S_r(\lambda)$ の精度で定まると考えてよい。なぜならば $V_c(\lambda)$, $V_r(\lambda)$ はそれぞれデジタル電圧計により計測できるので、 $\pm 0.3\%$ 程度の誤差範囲で測定することは比較的容易であるが、 $S_r(\lambda)$ を精度よく実測することはその試験設備等のことを考えてもむずかしいからである。ここでは $S_r(\lambda)$ の測定を日本写真機光学機器検査協会に依頼し、その測定結果を用いた。但し測定装置の関係で測定波長範囲は $400 \sim 800 \text{ nm}$ である。これ以上の波長に対してはやむを得ずカタログ値を用いた。したがって $S_r(\lambda)$ の精度はその最大値に対し λ が $400 \sim 800 \text{ nm}$ では $\pm 2 \sim 4\%$ 以内と考えられるが、それ以上になるとだんだん悪くなり、 $800 \sim 900 \text{ nm}$ でおよそ $\pm 4 \sim 8\%$ 、 $900 \sim 1000 \text{ nm}$ でおよそ $\pm 8 \sim 16\%$ 程度と思われる。なお $S_r(\lambda)$ を図 2.4 に示す。

本試験においては CCD の分光感度特性の概要をつかむのが主目的であるので、この測定精度で十分であるが、実際に搭載する CCD の分光感度特性を測る段階では $\pm 1 \sim 2\%$ の精度が必要と思われる。

2.2.3 分光位置感度特性の試験方法

ここで述べる分光位置感度特性とは、ある特定の画素の一部またはその画素の周辺に一定強度の分光スポット（ここでは直径が約 $1.5 \mu\text{m}$ のスポットを使用）を当てたときに、その画素の出力信号が位置によってどのように変化するかを表わしたものである。図 2.5 に分光位置感度特性の試験方法の概要を示す。ここにおいて分光器

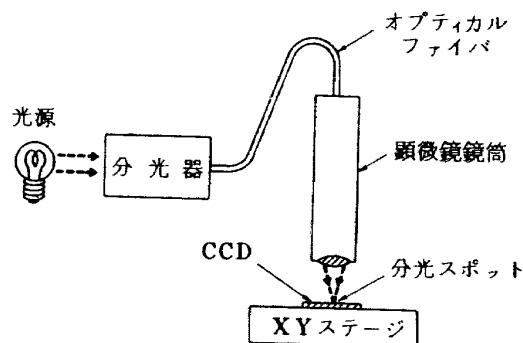


図 2.5 分光位置感度特性の試験方法

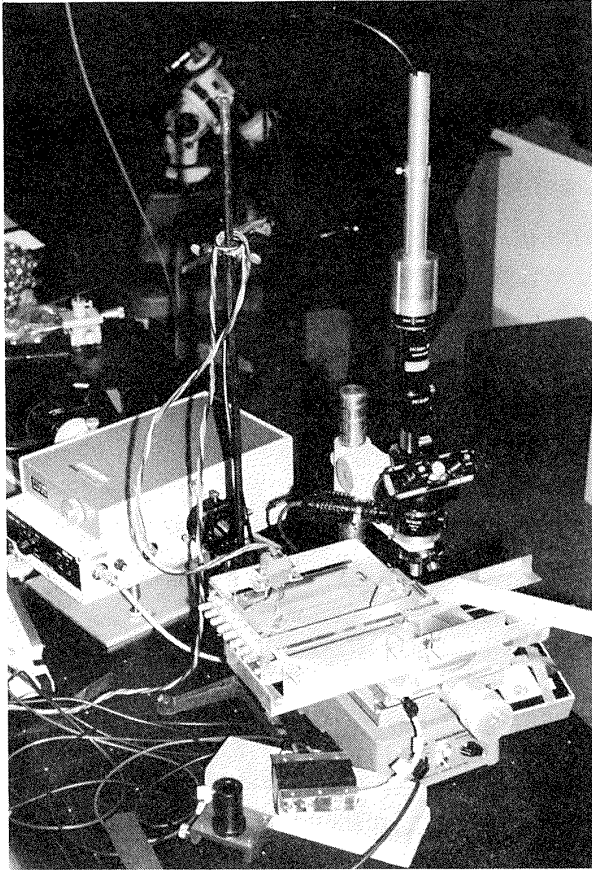


写真 2.2 試験装置

出力はオプティカルファイバを通して顕微鏡鏡筒に導かれ、鏡筒により集光されて CCD の受光面上にスポット状に結像し、また XY ステージを動かすことによってスポットを CCD の受光面上の任意の位置に当てられるようになっている。写真 2.2 は図 2.5 の試験装置であり、中央が顕微鏡でその対物レンズの下に小さく見えるのが CCD (アレイ No.5) であり、その左側が CCD の駆動回路と増幅器、その下側が XY ステージ、左中央の箱状のものが分光器、その裏側が光源である。

放射計では LANDSAT の MSS と同じようなバンド幅を持つ観測バンドが使用されると思われるので、本性能試験においては各バンドのほぼ中央の波長と思われる 550, 650, 750, 900 nm の 4 種類の波長をパラメータとして選んだ。上記波長におけるスポットの直径は 550, 650 nm において約 $1.5 \mu\text{m}$ である。750, 900 nm においては目で直接確認できないが、後述の付図 3.47~3.54 のデータから判断して、スポットの径は同様であったと思われる。

なおこの試験の主目的は画素の光電感度が場所および波長によってどのように変化するか、その概要をつかむことにある。したがって画素のピッチが $13\sim 14 \mu\text{m}$ であ

ることを考えると、分光スポットの直径は $1.5 \mu\text{m}$ 程度あれば十分であり、また適当でもある。なぜならばスポットをあまり小さくし過ぎると位置精度は上がるが、光量が減って CCD の出力信号レベルが低下し、 S/N が悪くなって出力信号の測定精度が低下するからである。

2.2.4 画素間の不均一性の試験方法

画素間の不均一性 (感度むら) の試験には図 2.5 の分光位置感度特性の試験方法と同じ方法を用いた。ただしスポットの直径は $56 \mu\text{m}$ とし、測定しようとする画素にはたえず様な強さのスポットが当たるように XY ステージを動かして試験した。なお不均一性の試験を全画素にわたって行うことは測定時間の関係上困難であるので、測定画素は CCD の両端の 50 画素と中央部の 50 画素に限定した。

本試験の主目的は画素間の不均一性の概要をつかむことであり、したがって測定精度も $\pm 1\%$ 程度あれば十分である。しかしながら CCD を放射計のセンサとして使用するときには不均一性による影響を後にデータ処理により補正してやる必要があり、そのためには各画素の感度をおよそ $\pm 0.3\%$ 以上の精度で前もって測っておく必要がある。ここで用いた試験方法はこの条件を十分満足する方法でもある。

2.3 CCD の性能試験結果

2.3.1 直線性の試験結果

CCD の各画素に入射する光エネルギーは、クロック周波数が一定であるために、各画素の放射照度に比例するので、ここでは光エネルギーの代わりに放射照度を用いる。

CCD の各画素の放射照度 (ここでは相対値) とそれに対応する各出力信号 (ここでは CCD の飽和出力信号を 1 とする) との関係の試験結果を付図 1.1 ~ 1.3 に示す。付図 1.1 はアレイ No.1 ~ 3 の CCD のそれぞれほぼ中央部の画素を測定した結果であり、付図 1.2, 1.3 はアレイ No.4, 5 の CCD のそれぞれ中央付近と両端付近の画素を測定した結果である。これらのグラフにおいて測定点上に引かれた直線は、直線性の良い範囲内のデータを使って最小 2 乗法により求めた基準直線である。アレイ No.1 ~ 4 の CCD はいずれも放射照度を増して行くと、ある点から緩やかに出力信号が飽和するが、アレイ No.5 は急激に飽和する特長がある。

放射計においては 2.2.1 で述べたように光の濃淡を例えば 64 段階ぐらいに分割する必要がある。したがって基準直線から測定データがどのくらい、ずれているかは興味あることである。図 2.6 に示すように測定値から得られた曲線の値 (点線) の基準直線からのずれを dV とし、

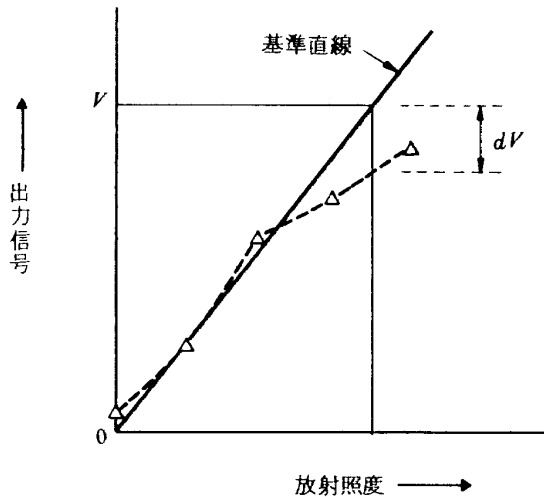


図 2.6 測定値の基準直線からのずれ

そのときの基準直線の値を V としたときに $dV/V=0.02$ となる V を V_f とし、 V_f をここでは出力信号のフルスケールと仮定した。なぜならば $dV/V=0.02$ となる V_f は測定結果からも求めやすく、かつ実際上のフルスケールも V_f に比較的近い値になると考えたからである。

$$D = \frac{\text{測定値} - \text{基準直線}}{V_f} \times 100 (\%) \quad (2.2)$$

の値を付図 1.4 ~ 1.12 に示す。横軸において△印は×印の 0 ~ 0.1 の間を細かく測定したものであり、同様に□印は△印の 0 ~ 0.01 の間を更に細かく測定したものである。 D を直線性とするならば、試験結果より直線性は良い CCD で土約 0.3 % 以内、悪い CCD で土約 1 % 以内に入っている。しかしながら同じアレイ内であっても画素の場所によって直線性にバラツキが見られるので、より正確に直線性を調べようとするならば、測定画素数をもっと増やす必要がある。

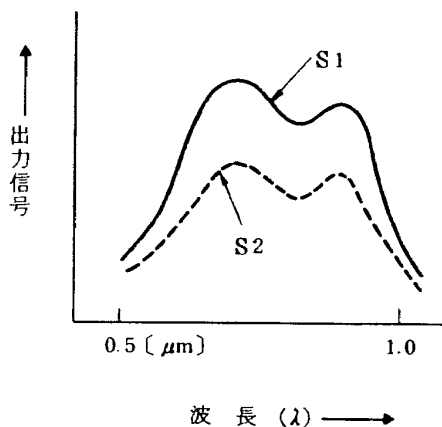
2.3.2 分光感度特性の試験結果

相対分光感度特性の試験結果を付図 2.1 ~ 2.20 に示す。付図 2.1 ~ 2.15 はアレイ No.1 ~ 5 における CCD の両端に近い部分の画素およびほぼ中央部の画素に対し、隣接する画素同士の分光感度特性がどうなっているかを調べたものである。その結果、隣接する画素同士の分光感度特性は、ほとんど同じであることがわかる。付図 2.16 ~ 2.20 は同じアレイ内において、両端に近い部分の画素とほぼ中央部の画素との分光感度特性がどうなっているかを調べたものである。その結果、各特性の間には相当の違いがあることがわかる。これらの中ではアレイ No.5 の CCD の特性が比較的良好である。以上付図 2.1 ~ 2.20 からの結果から考えて、画素間の分光感度特性の相違は画素間の距離が大きくなるにしたがって徐々に大きくなって行くものと思われる。

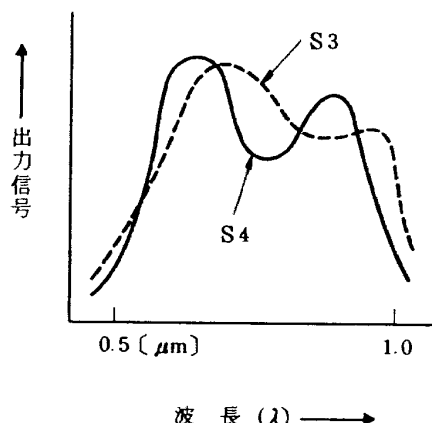
付図 2.21 ~ 2.23 は CCD の受光面に $0.39 (\mu\text{J}/\text{cm}^2)$ の光エネルギーを与えたときに、各波長に対して出力信号が 2.3.1 で述べた出力信号のフルスケール V_f の何割ぐらい現われるかを示したものである。したがって縦軸は出力信号を V_f で規格化したものである。付図 2.21 はアレイ No.1 ~ 3 のほぼ中央部の画素の分光感度特性であり、付図 2.22, 2.23 はそれぞれアレイ No.4, 5 の両端に近い部分の画素と、ほぼ中央部の画素との分光感度特性である。

以下分光感度特性の画素間のバラツキについて考察する。図 2.7 は同一アレイ内の任意の 2 点における画素の各分光感度特性である。画素間の分光感度特性のバラツキには図 2.7 (a) に示すような性質のものと、(b) に示すような性質のものとがあると考えられる。図 2.7 (a) においては、 S_1 と S_2 の分光感度特性をそれぞれ $f(\lambda)$, $g(\lambda)$ とし、また C を定数としたときに

$$f(\lambda) = C g(\lambda) \quad (2.3)$$



(a) 相似性の場合



(b) 非相似性の場合

図 2.7 2つの画素の分光感度特性の相違

となるものである。このようなS1とS2の分光感度特性は互に相似性があるということにする。そうすると図2.7(b)のS3とS4の分光感度特性は互に非相似性であると言える。

放射計用のセンサとしては各画素間の分光感度特性が相似性を持つことが望ましく、かつできるだけ各画素間の出力レベルも同じであること、すなわち(2.3)式の $C=1$ であることが望ましい。特に C が1に近いときには後のデータ処理が簡単になるという利点が出てくる。しかしその反面センサの製造が難しくなってくる。

各画素間の分光感度特性が相似性でない場合、すなわち図2.7(b)のような場合には、その特性の差が大きければ大きいほど、放射計用のセンサとしては致命的になってくる。なぜならば、放射計に入射した地球表面からの反射光はセンサの受光面上に結像されるわけであるが、各画素に当たる光のスペクトル分布は一般に未知であるために、各画素間の特性の差による影響を後でデータ処理により補正することが非常に困難になるためである。

このような観点から付図2.22、2.23の試験結果を見ると、これらの分光感度特性には相当のバラツキがあり、今後の改善が望まれる。

2.3.3 分光位置感度特性の試験結果

ここで述べる分光位置感度特性とは、正確には相対分光位置感度特性であって、出力信号の最大値を1としたものである。

分光位置感度特性の試験結果を付図3.1～3.54に示す。ここにおいて被測定画素の座標は図2.8のようにとった。

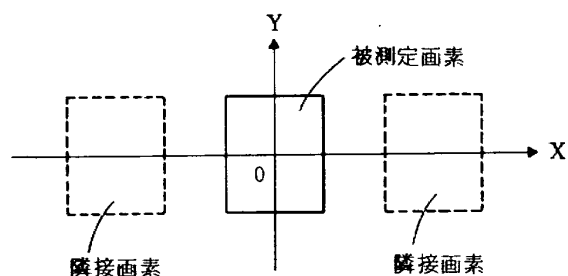


図 2.8 被測定画素の座標

付図3.1～3.54の中のSWEEP AXISにおいて $X=0$ とは同付図の横軸が図2.8のY軸であることを示し、 $Y=0$ とは同様に同付図の横軸が図2.8のX軸であることを示す。

付図3.1～3.4においてはCCD（アレイNo.1～2）のほぼ中央部の画素の、波長をパラメータにした分光位置感度特性を示す。付図3.5～3.22はCCD（アレイNo.3～5）の両端に近い部分の画素とほぼ中央部の画素と

の、波長をパラメータにした分光位置感度特性を示す。付図3.1～3.22から次のようなことが言える。

- (イ) Y軸方向の分光位置感度特性は波長に関係なくシャープな立ち上がり特性を持つ。これは画素の外側がA/Dで被われているので、そこにスポットが当たっても出力信号は現われず、当然のことである。
- (ロ) X軸方向の分光位置感度特性はアレイNo.1～4に対しては波長が長くなるにしたがって相当劣化してくる。すなわち測定している画素以外の部分に光が当たっても測定している画素に出力信号が現われるということである。これは放射計のセンサとして使用した場合に分解能の劣化を招き、具合の悪いことである。この点に関し、アレイNo.5は非常に良好な特性を持っていることがわかる。

付図3.23～3.30はCCD（アレイNo.2）の中央部分の隣接した画素同士の分光位置感度特性がどうなっているかを調べたもので、これらの特性は互に良く似ていることがわかる。

付図3.31～3.54はアレイNo.3～5のCCDにおいて、同じアレイ内の両端付近の画素とほぼ中央部の画素とで分光位置感度特性がどの程度変わるかを調べたものである。X軸上の分光位置感度特性について言えば、かなり特性の合っているものもあり、また相当特性の異なっているものもある。ただアレイNo.5のCCDは波長にかかわらず非常によく特性がそろっていると言える。

2.3.4 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4.1～4.21に示す。ここで縦軸は各波長における測定画素中の出力信号の最大値を1としている。アレイNo.1～4のCCDは表2.1に示すように画素数が2048の仕様になっているが、実際には2050まであるので2050まで試験した。アレイNo.4、5のCCDについては白色光の場合についても試験した。

これらの試験結果において、CCDの両端においては一般に感度むらが大きくなっている。また隣接する画素間の感度差が大きくなることは一般的に少なく、画素間の距離が大きくなるにしたがってそれらの感度差は徐々に大きくなって行く傾向にある。

3. ま と め

CCDを放射計のセンサに使用するという観点に立ち、常温におけるCCDの主要性能と思われるものを試験した。その結果次のようなことがわかった。

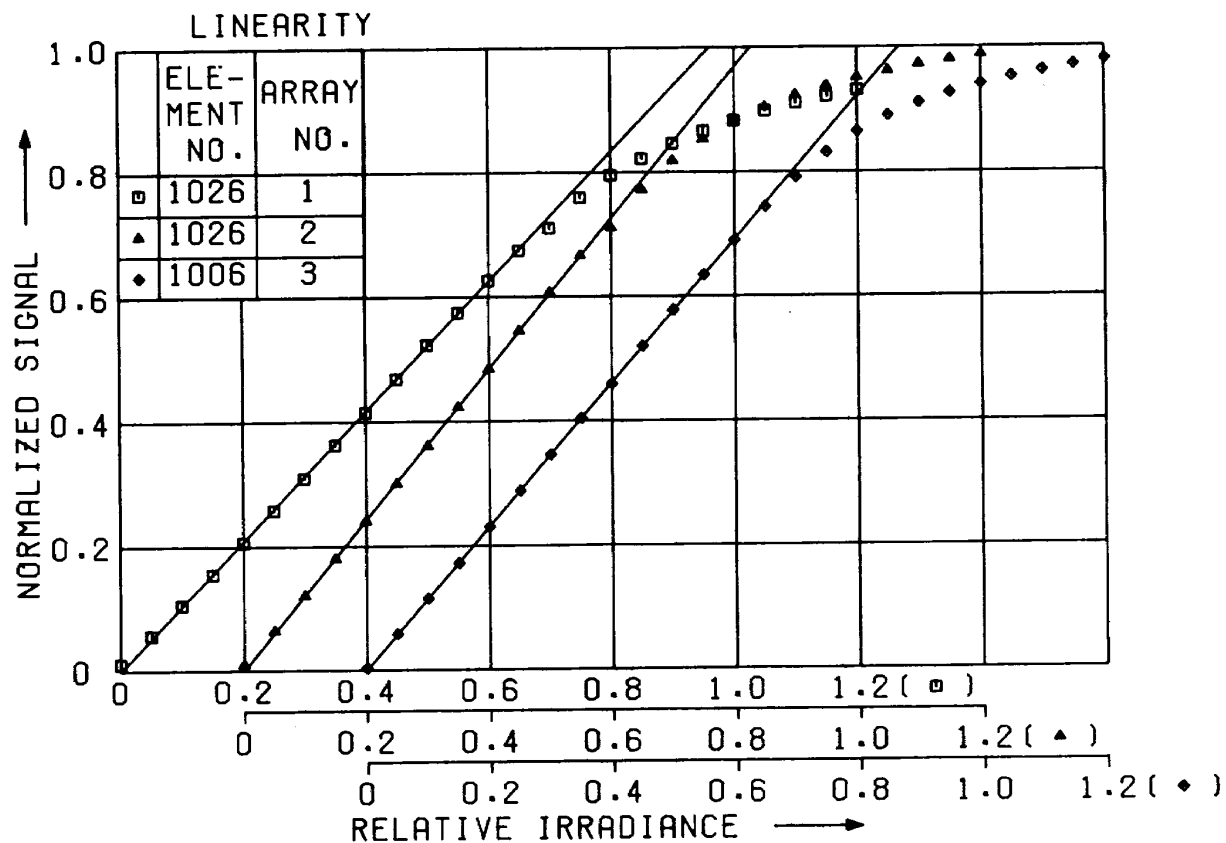
- (1) 直線性の試験結果から考えて、CCDを選別して使えば64階調（6 bits）程度の画像は得られそうである。

- (2) 分光感度特性の試験結果から考えて、画素間が相当離れた場合には、それらの特性間の非相似性のバラツキが相当ある。この点に関し、バラツキが付図 2.20 程度内におさまるような CCD の改良が望まれる。また国産の CCD では特に 500 ~ 600 nm の波長域における感度の向上も望まれる。
- (3) 分光位置感度特性の試験結果から考えて、ここで扱った国産の CCD は波長が 750 nm 以上になると分光位置感度特性が急に悪くなる。これは放射計の分解能の低下を招き、具合が悪い。この点、外国産の CCD は画素数が多少すくないとは言え、非常に優れており、国産の CCD もこの点まだ改良する必要があると思われる。
- (4) 画素間の不均一性の試験結果から考えて、画素間の感度むらは画素間の距離があまり離れていないときには比較的良好であるが、距離が離れてくると相当感度差が出てくる。画素間の感度むらに起因する誤差は後で補正が可能であるが、感度むらが大きいと S/N が低下して放射計の画質を低下させる。したがって感度むらがおよそ ±10% 以内に入るような CCD の改良が望まれる。

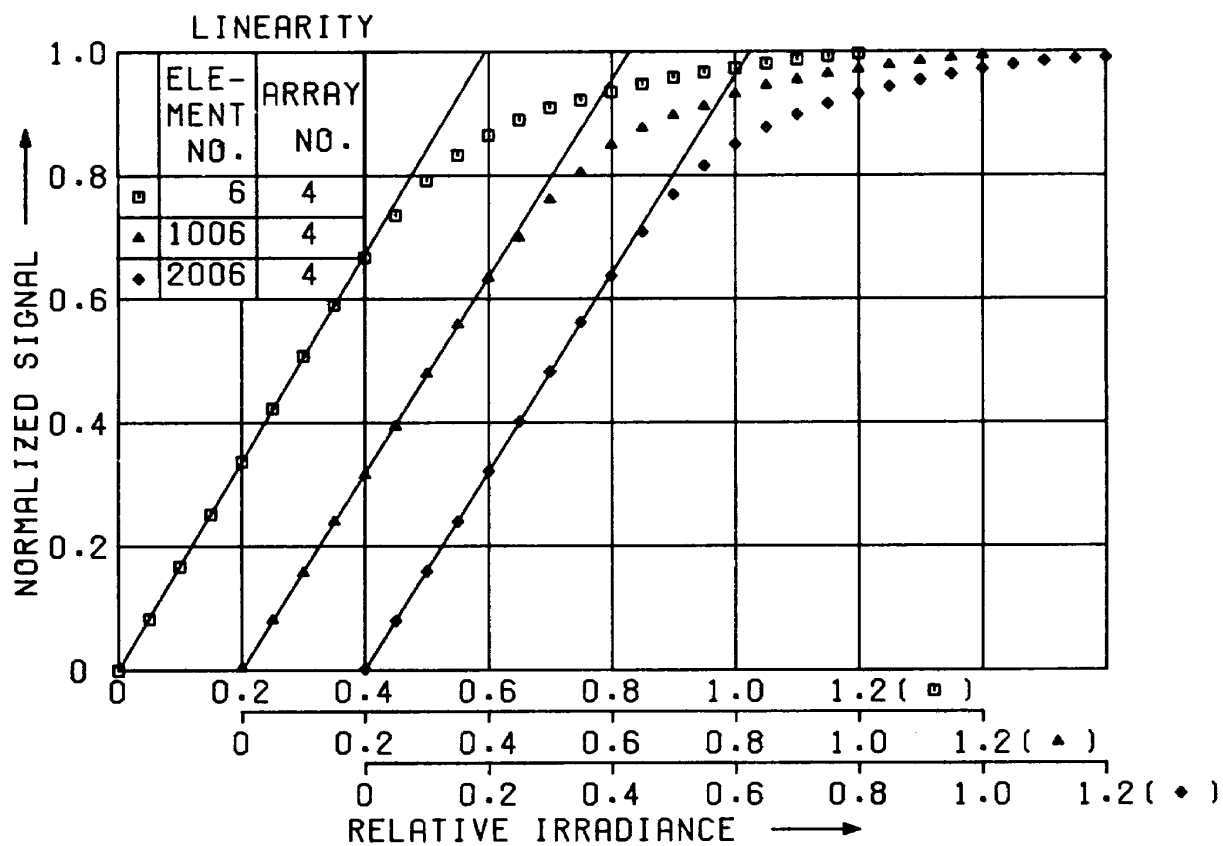
以上、放射計用として考えた CCD の性能試験結果には、まだ不十分な点が多々あるが、この点に関しては以降の課題としたい。なお本試験研究の促進にいろいろと御尽力下された 幸尾治朗 計測部長、田畑浄治 宇宙開発事業団 衛星設計第 1 グループ総括開発部員、および関係者各位に深く感謝する次第である。

参 考 文 献

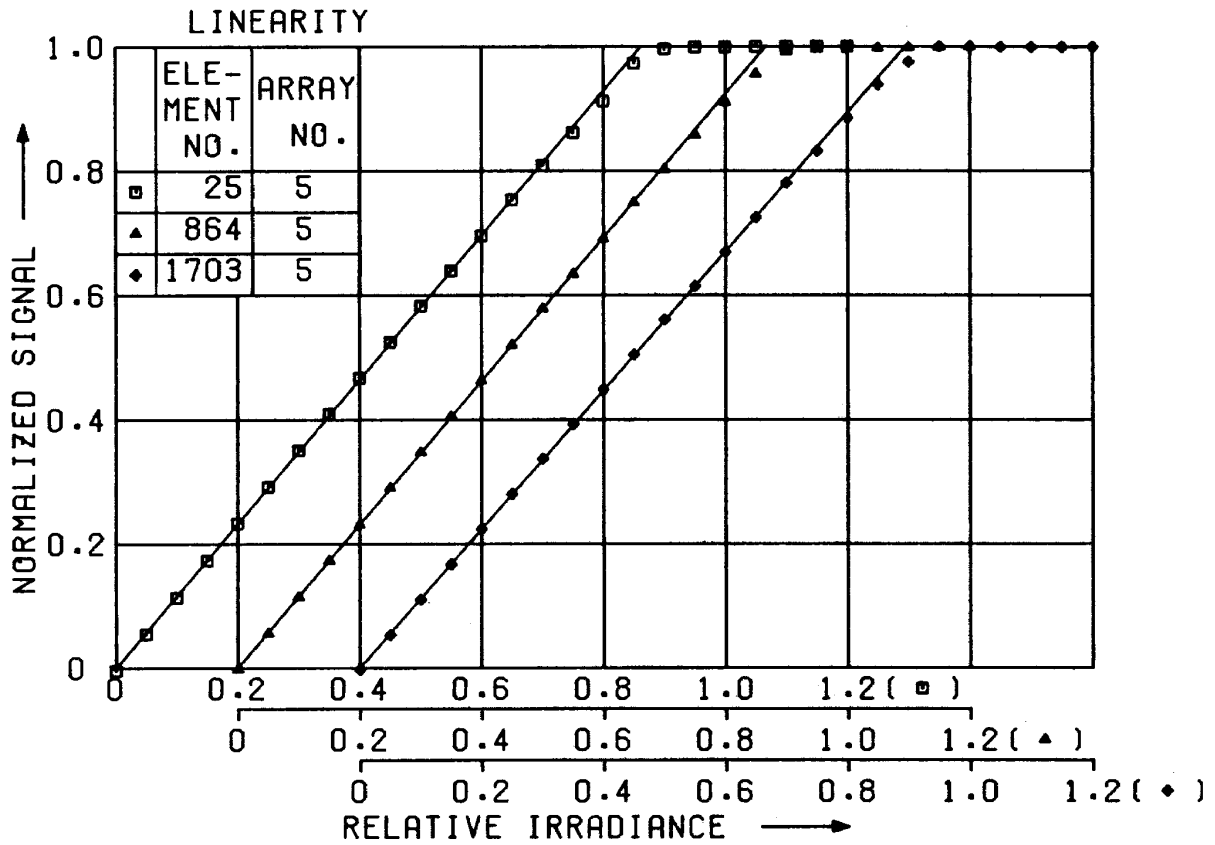
- 1) 宇宙開発の推進について、科学技術庁研究調整局、昭和53年9月
- 2) NASA-CR-132833; Solid State High Resolution Multi-Spectral Imager CCD Test Phase, 1973.



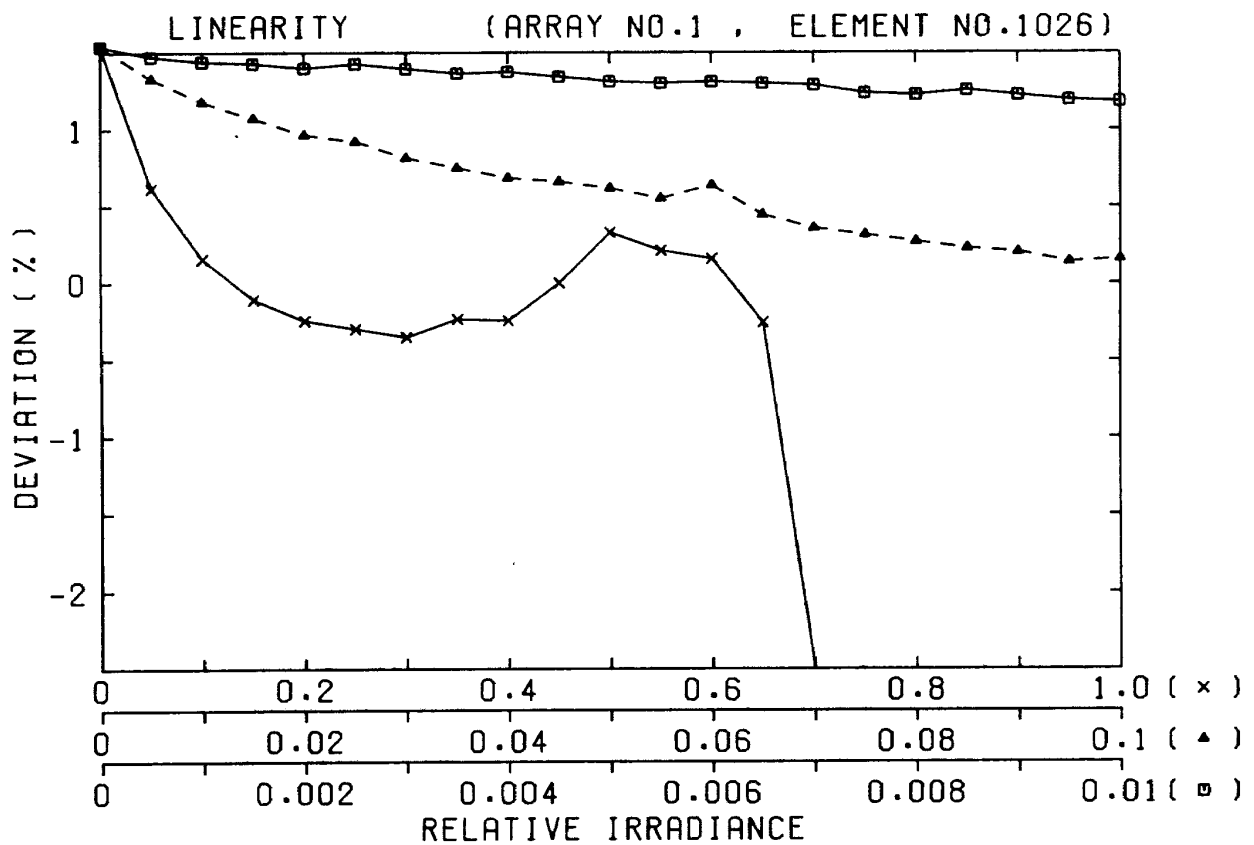
付図 1.1



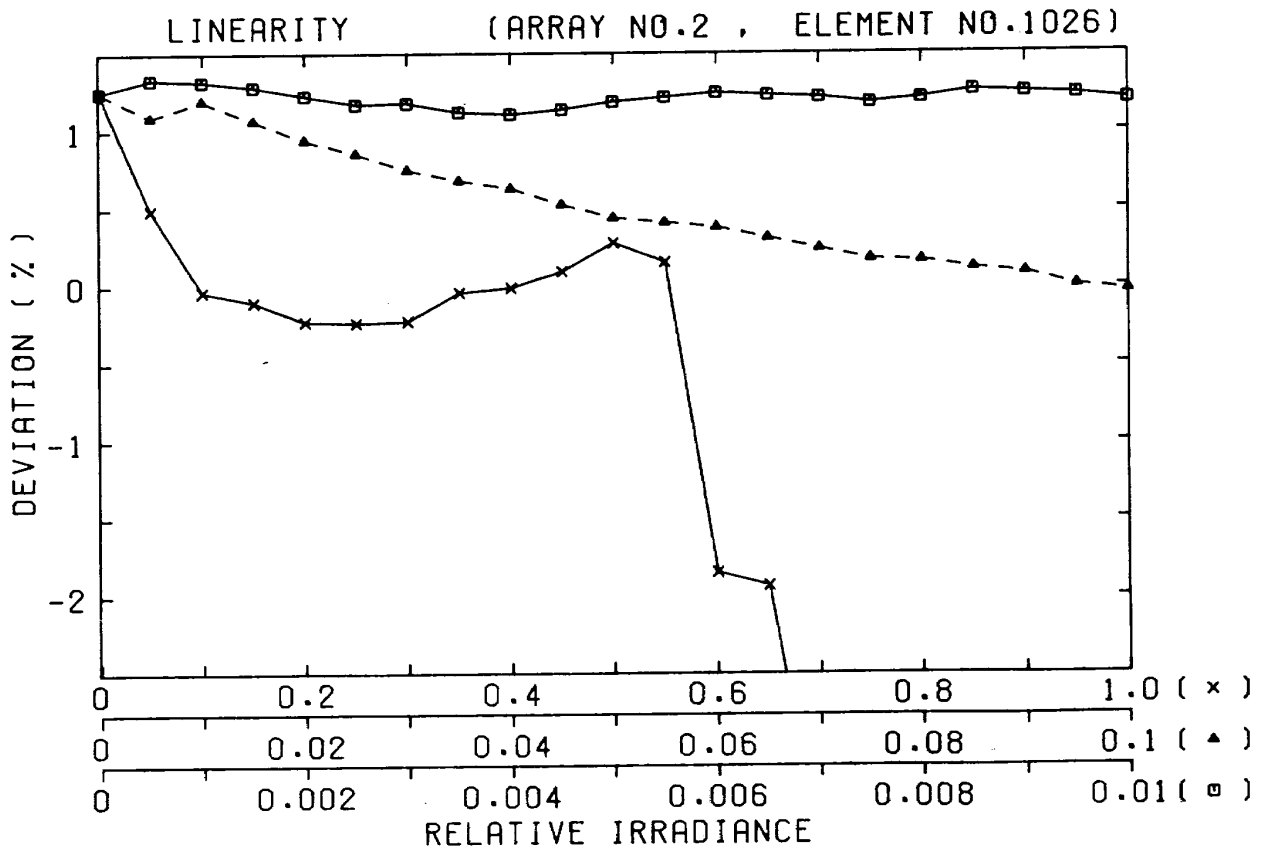
付図 1.2



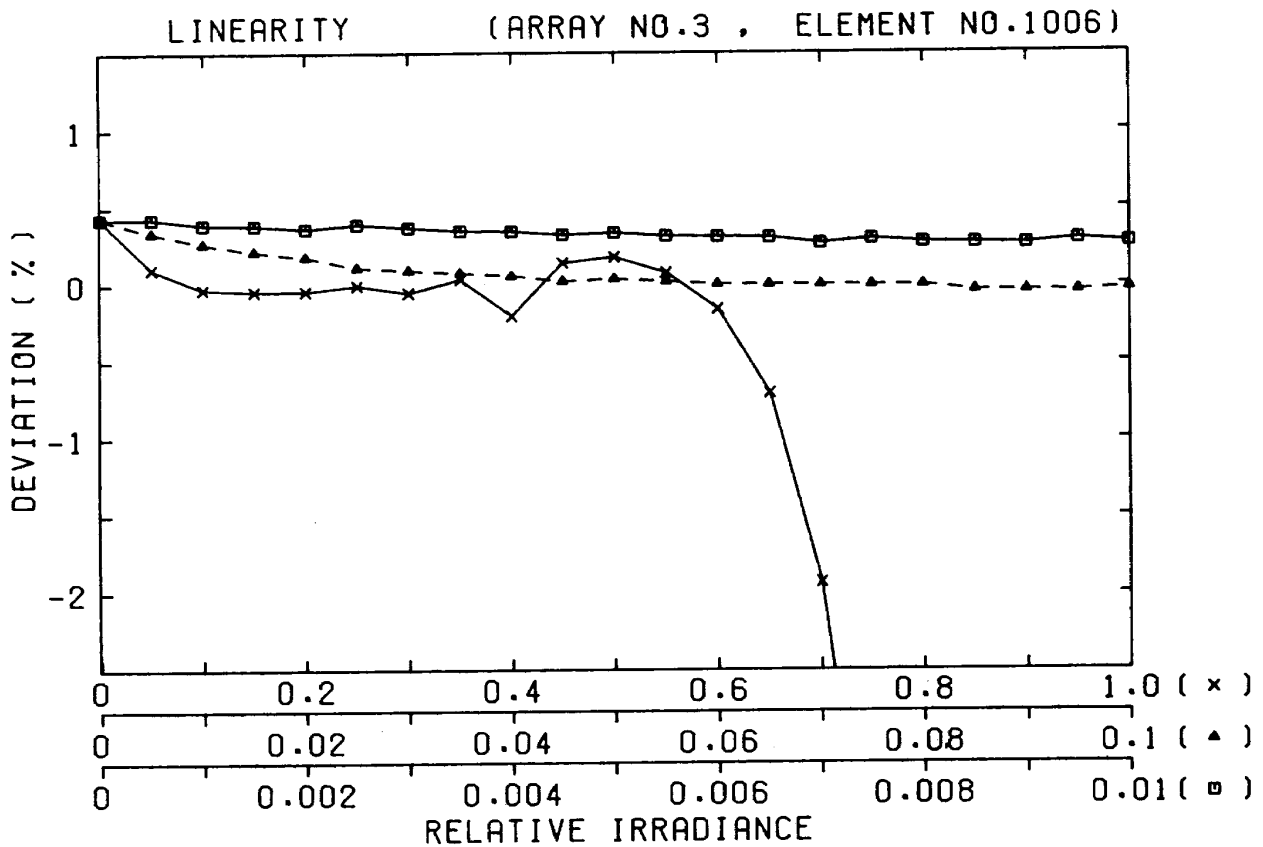
付図 1.3



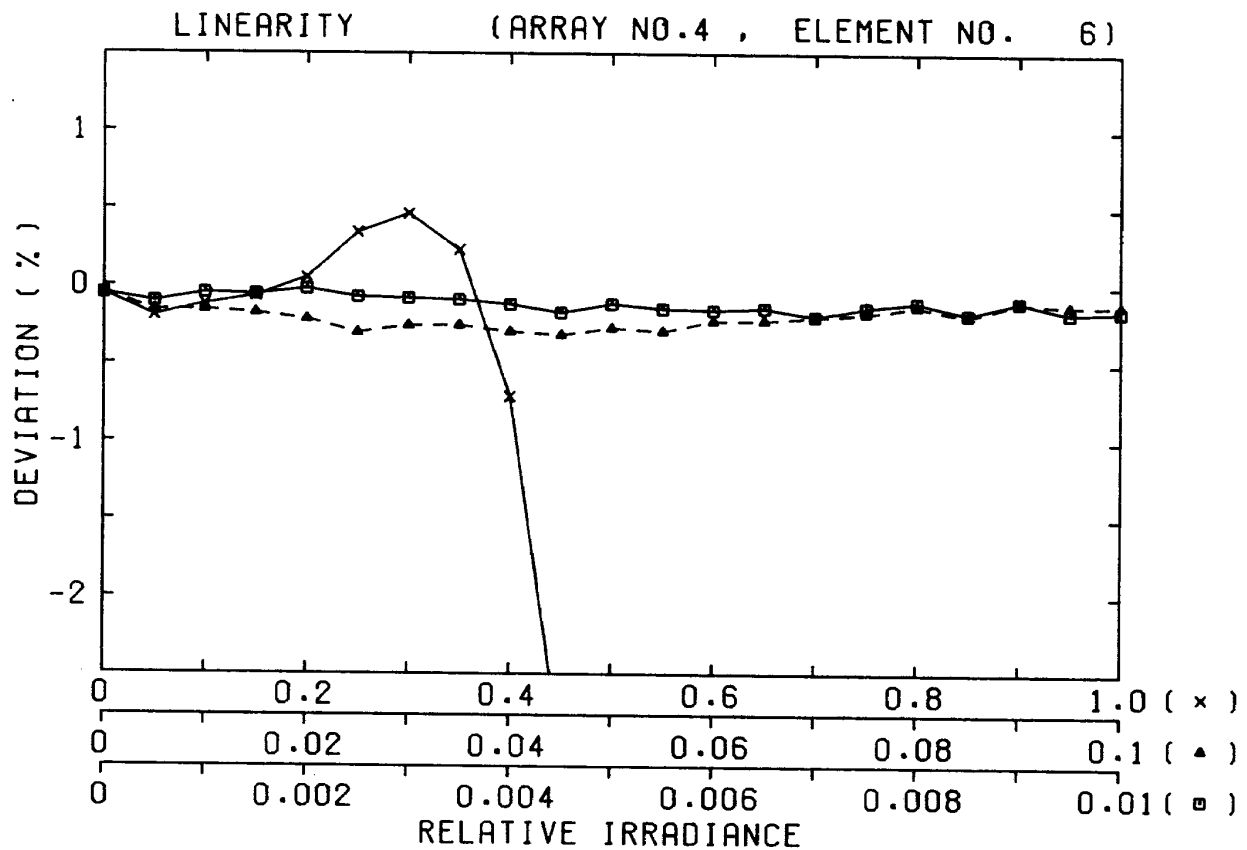
付図 1.4



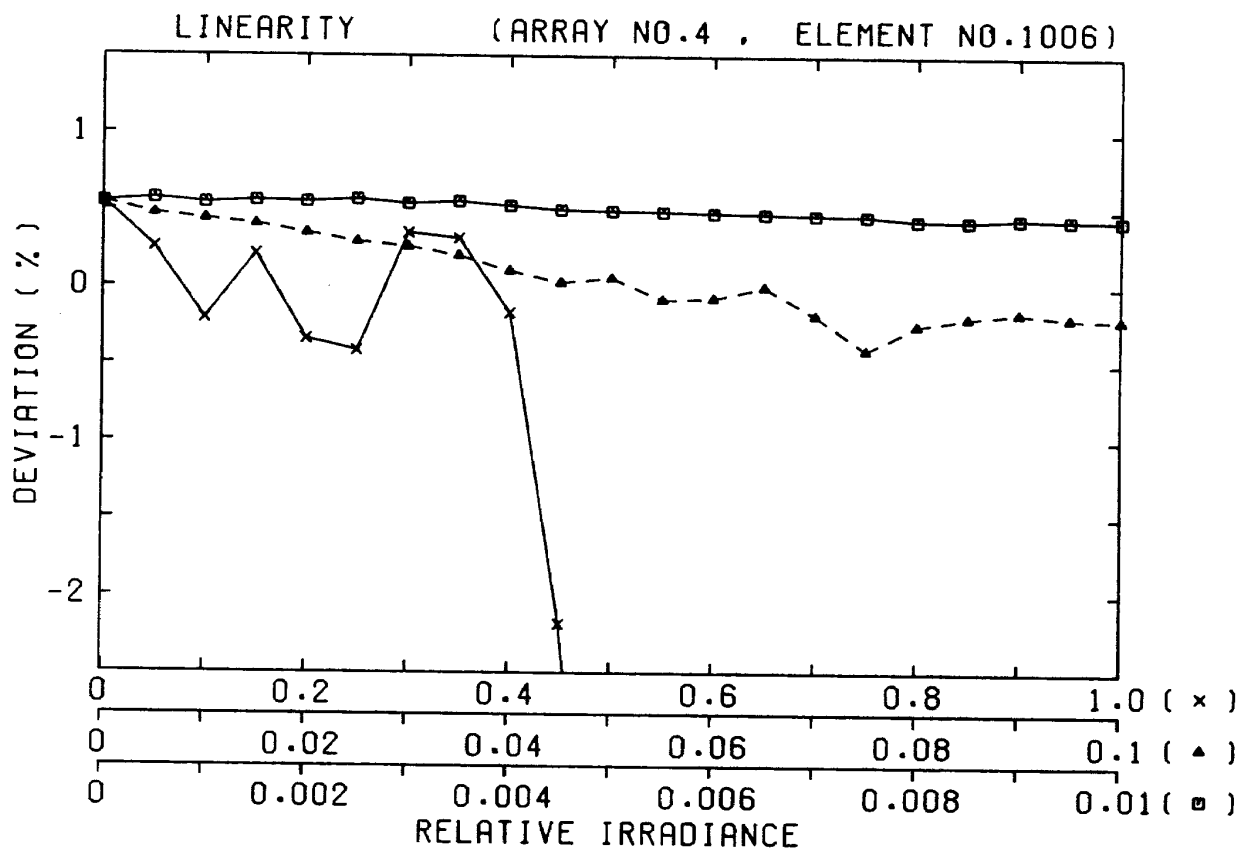
付図 1.5



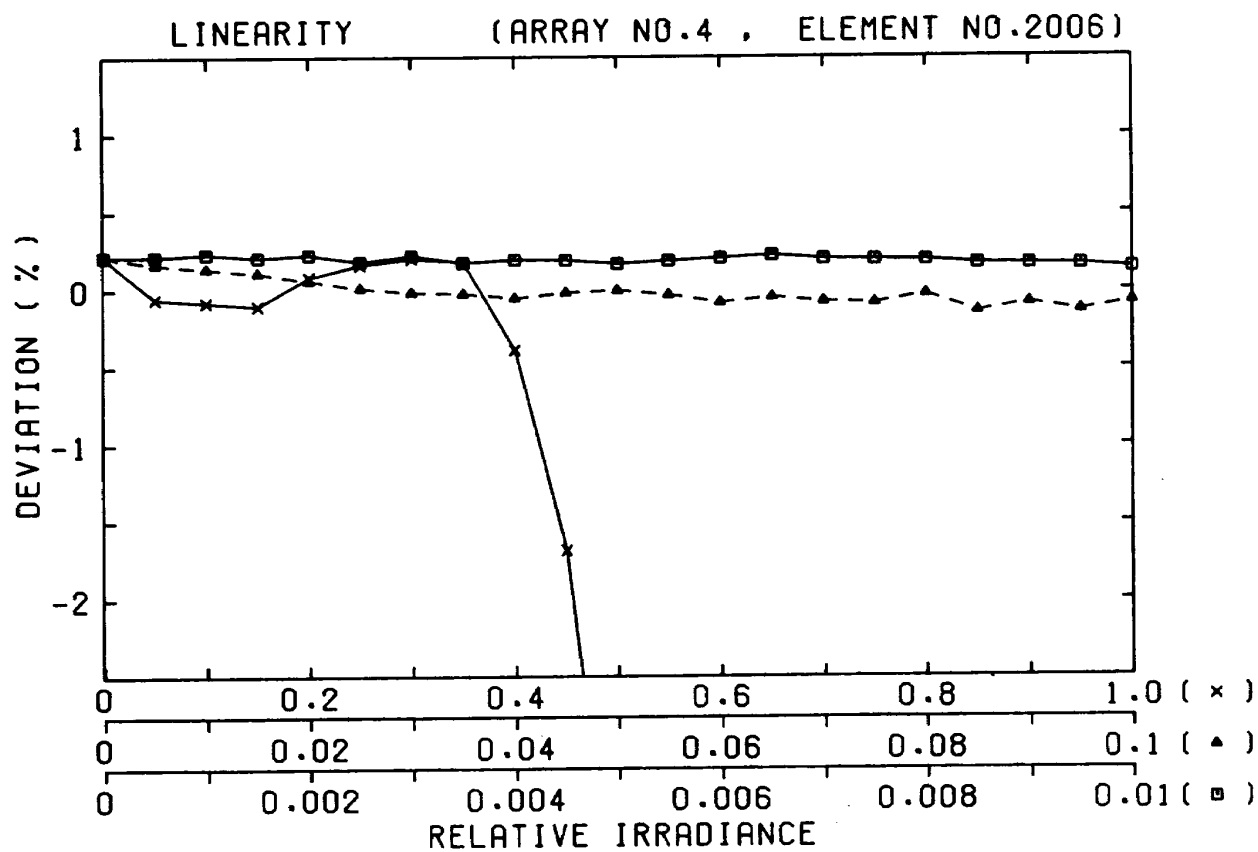
付図 1.6



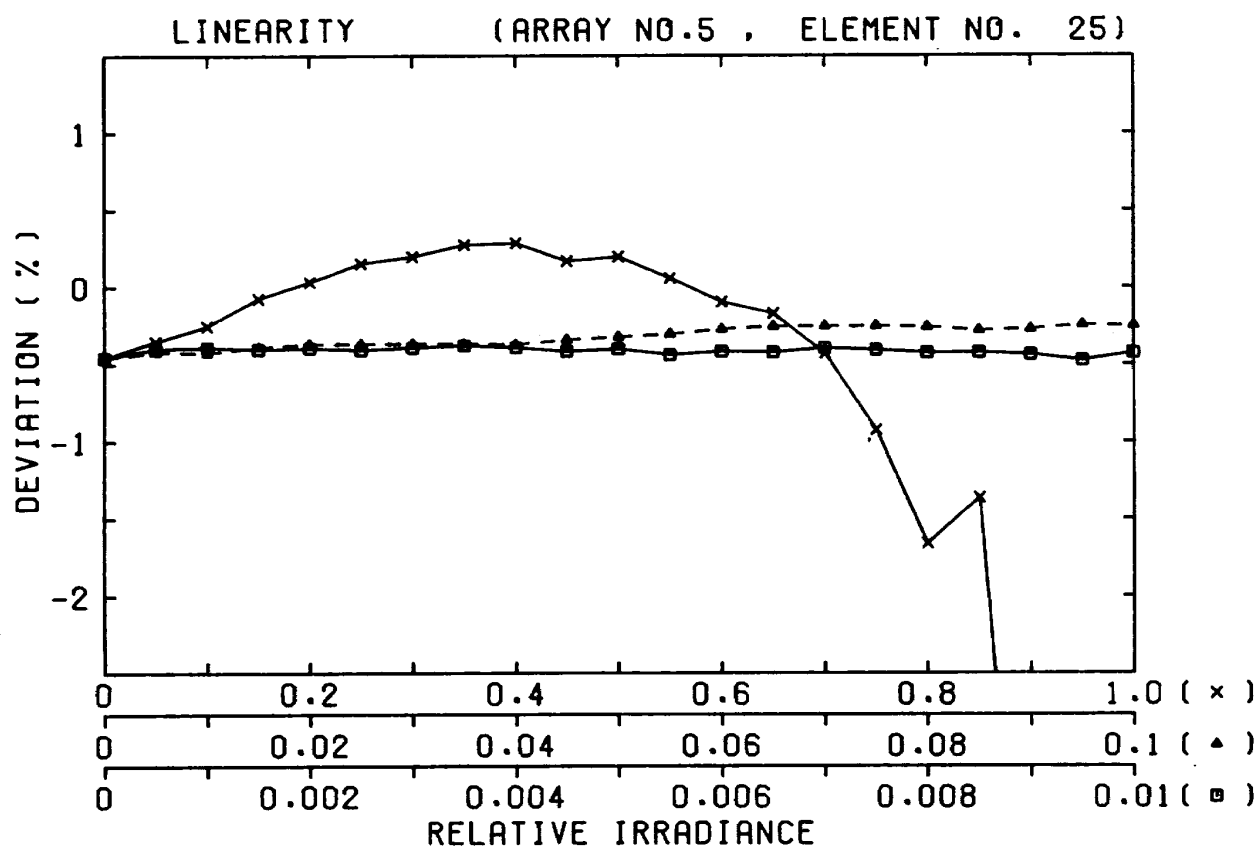
付図 1.7



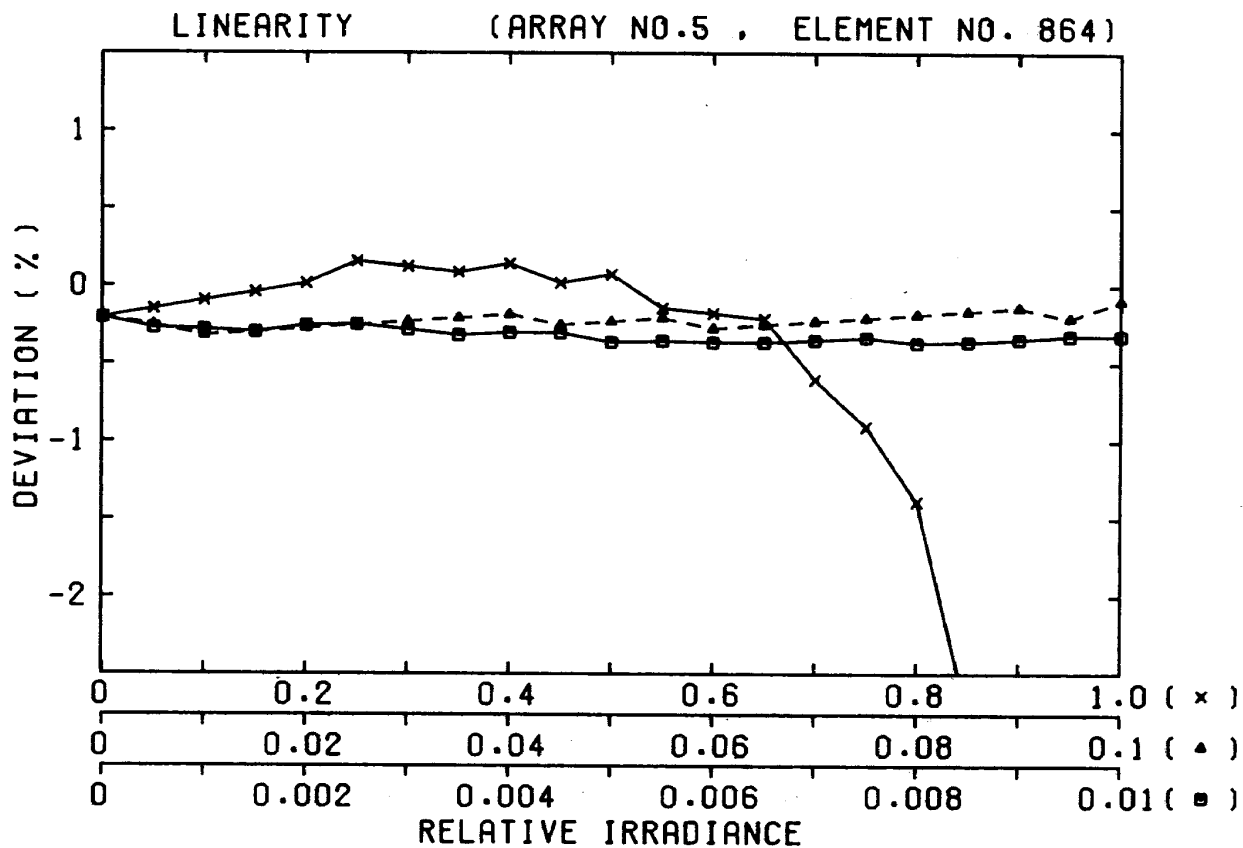
付図 1.8



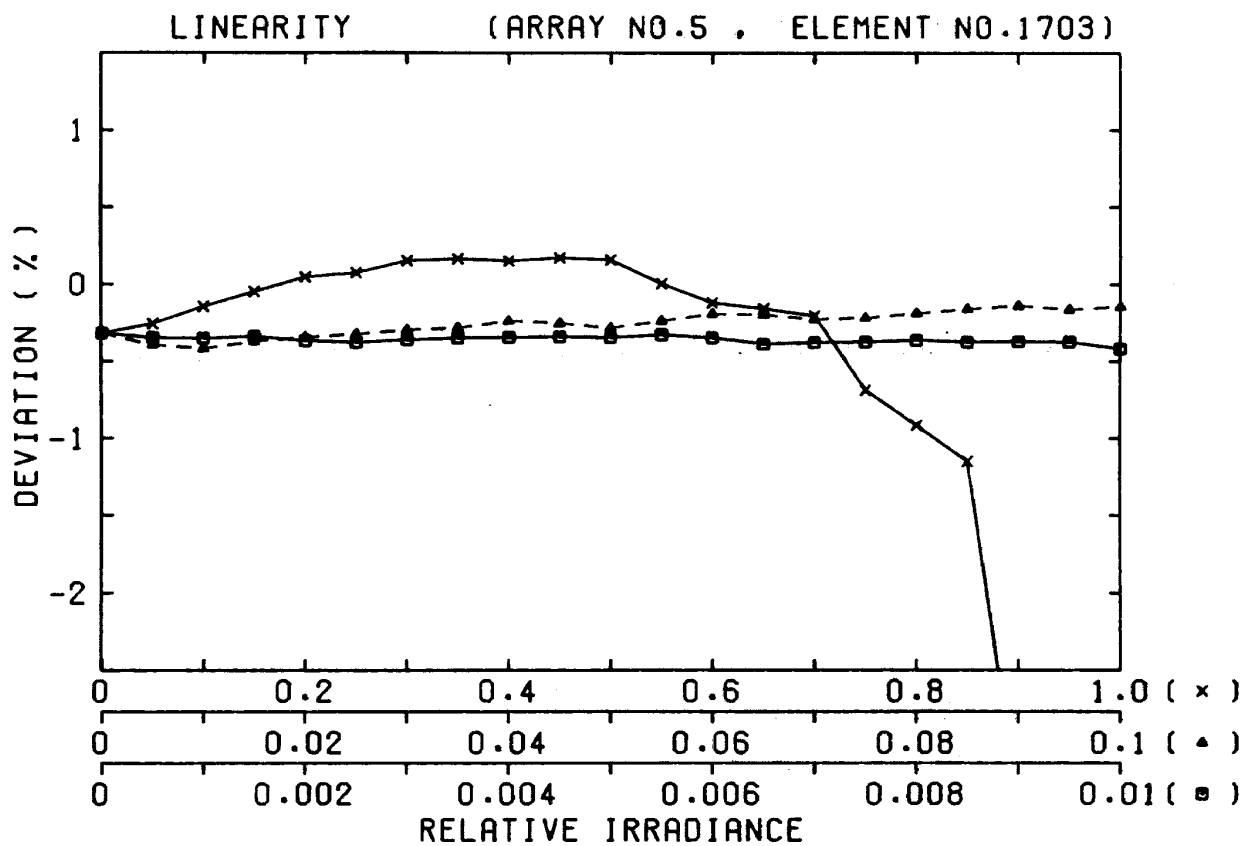
付図 1.9



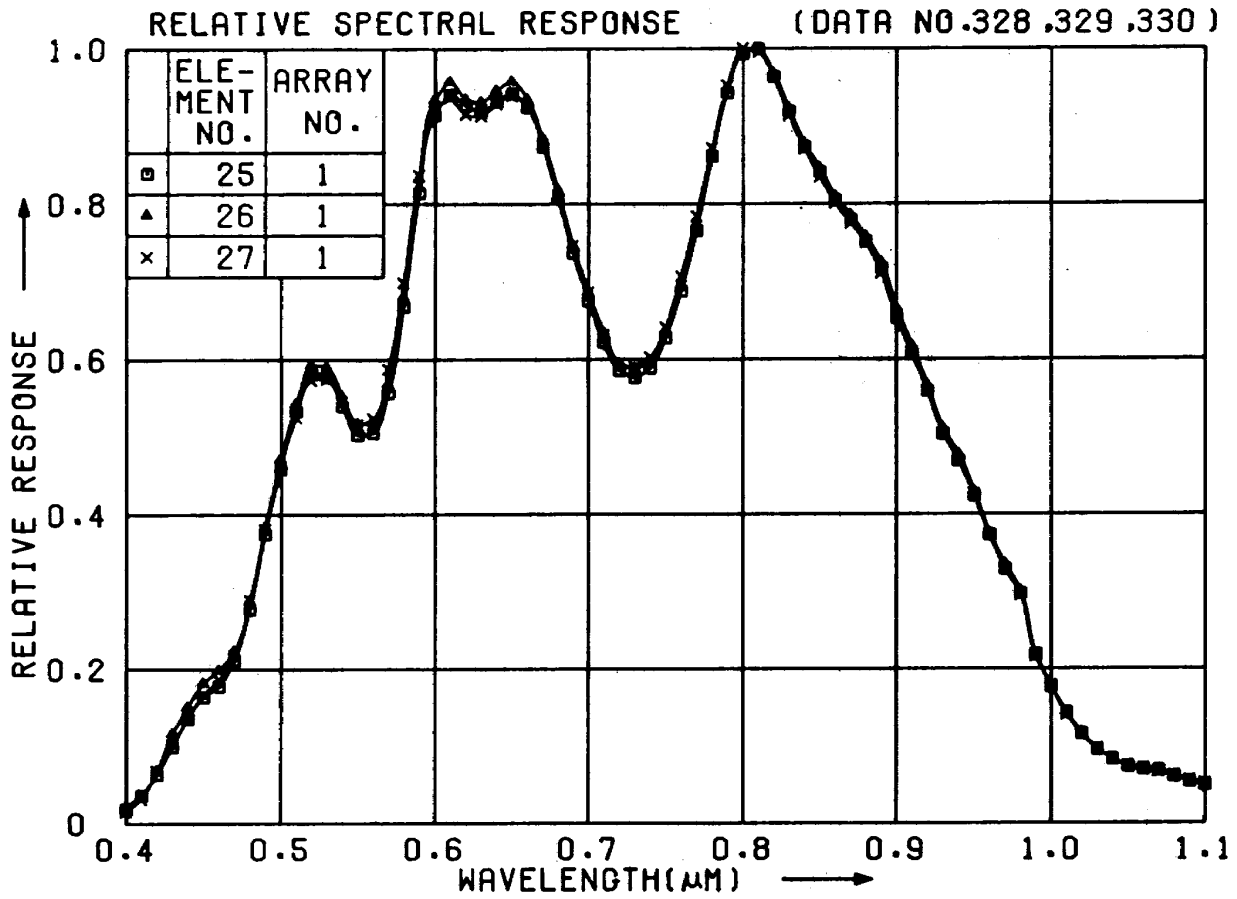
付図 1.10



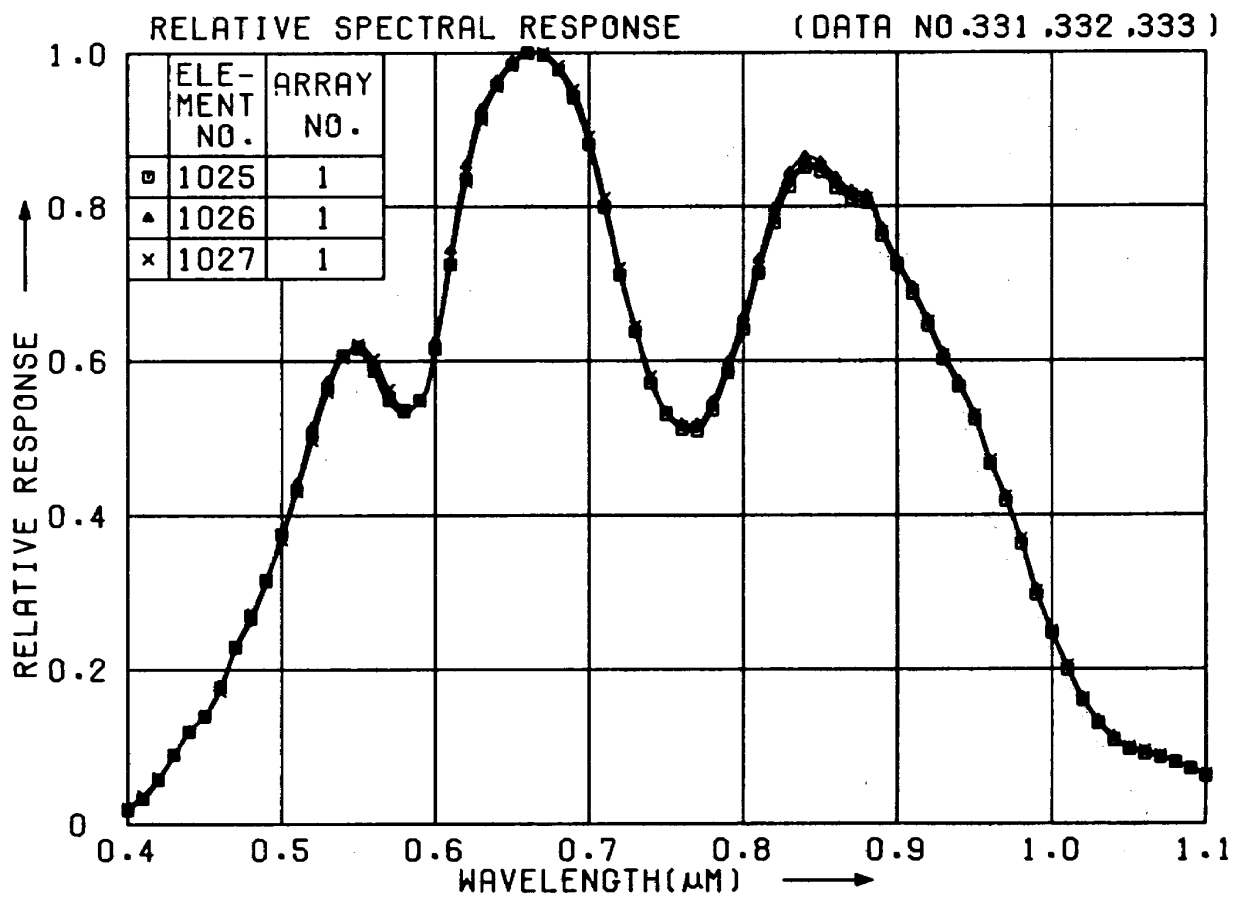
付図 1.11



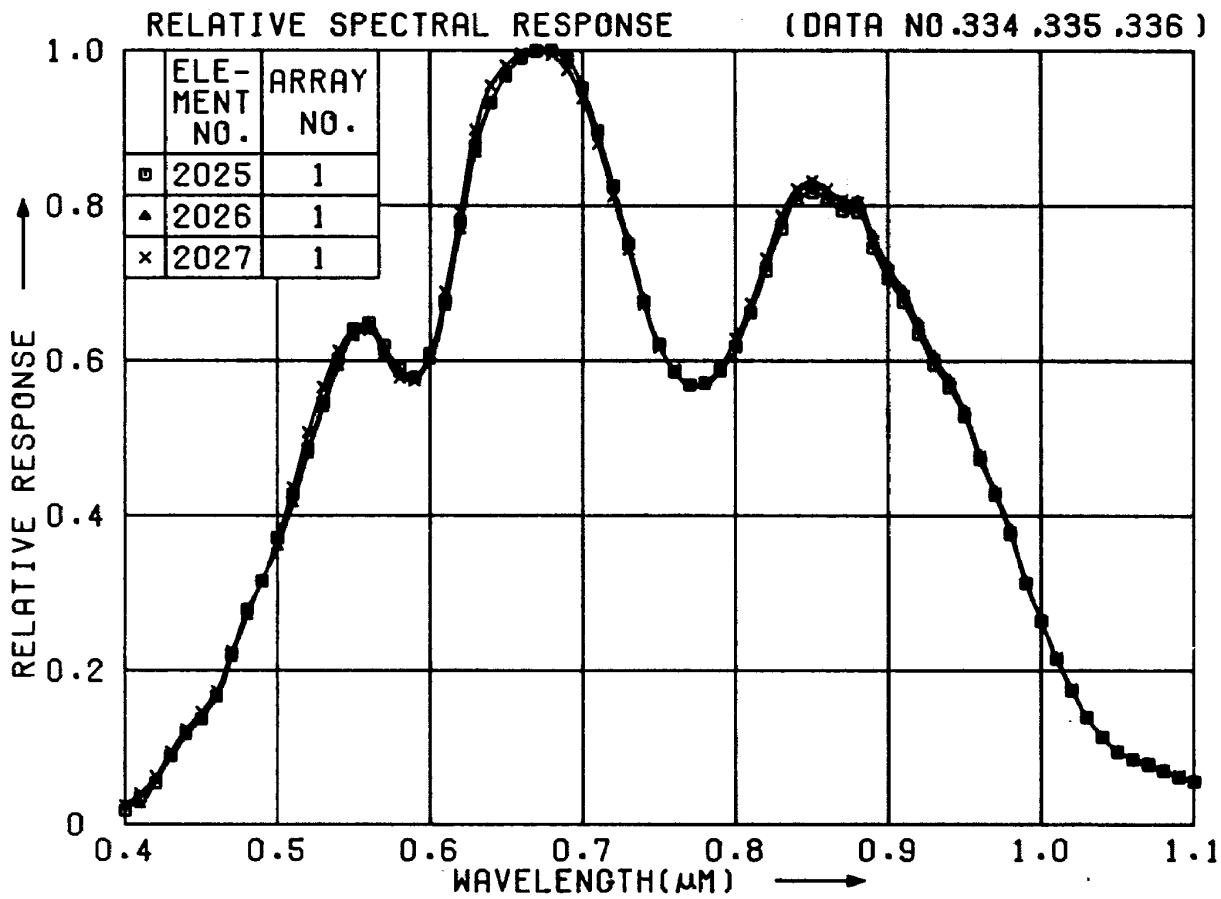
付図 1.12



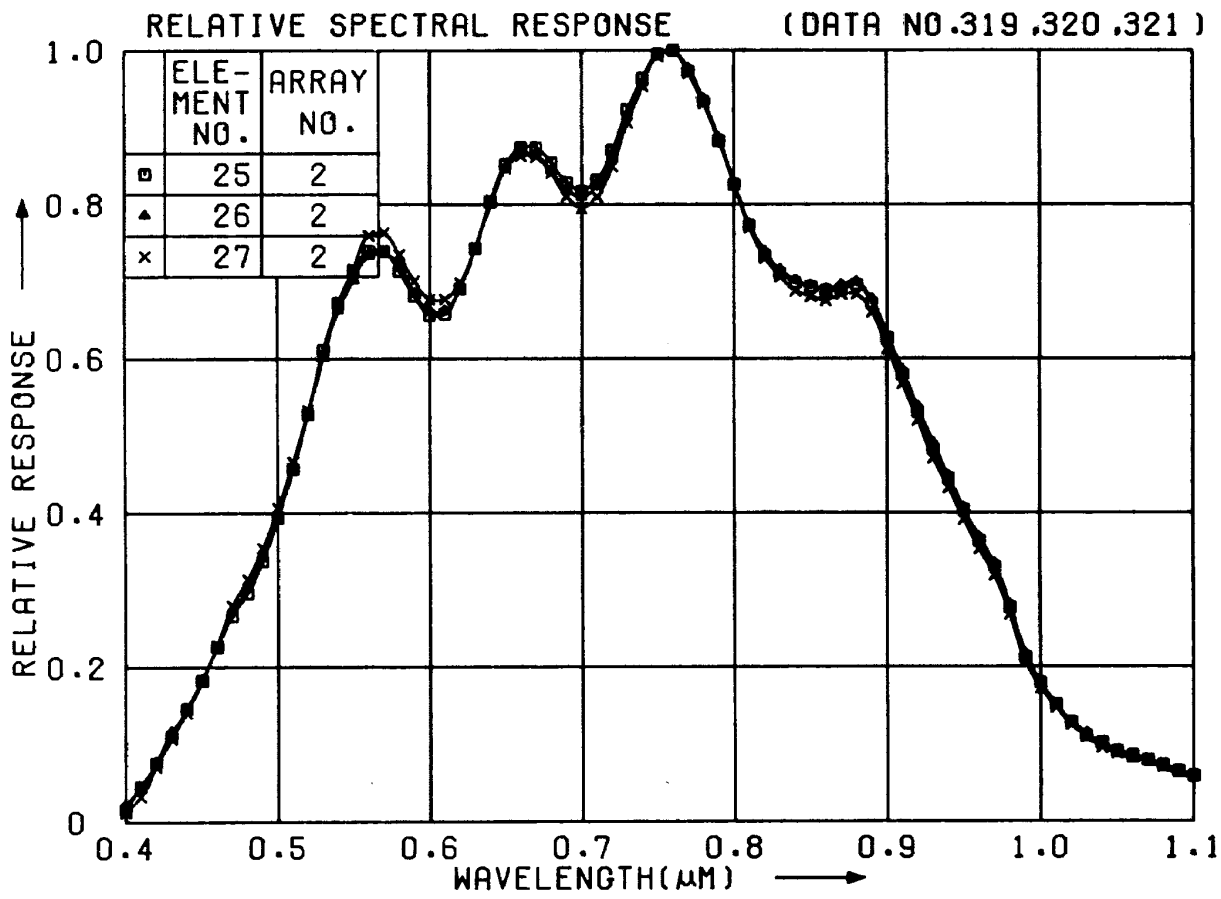
付図 2.1



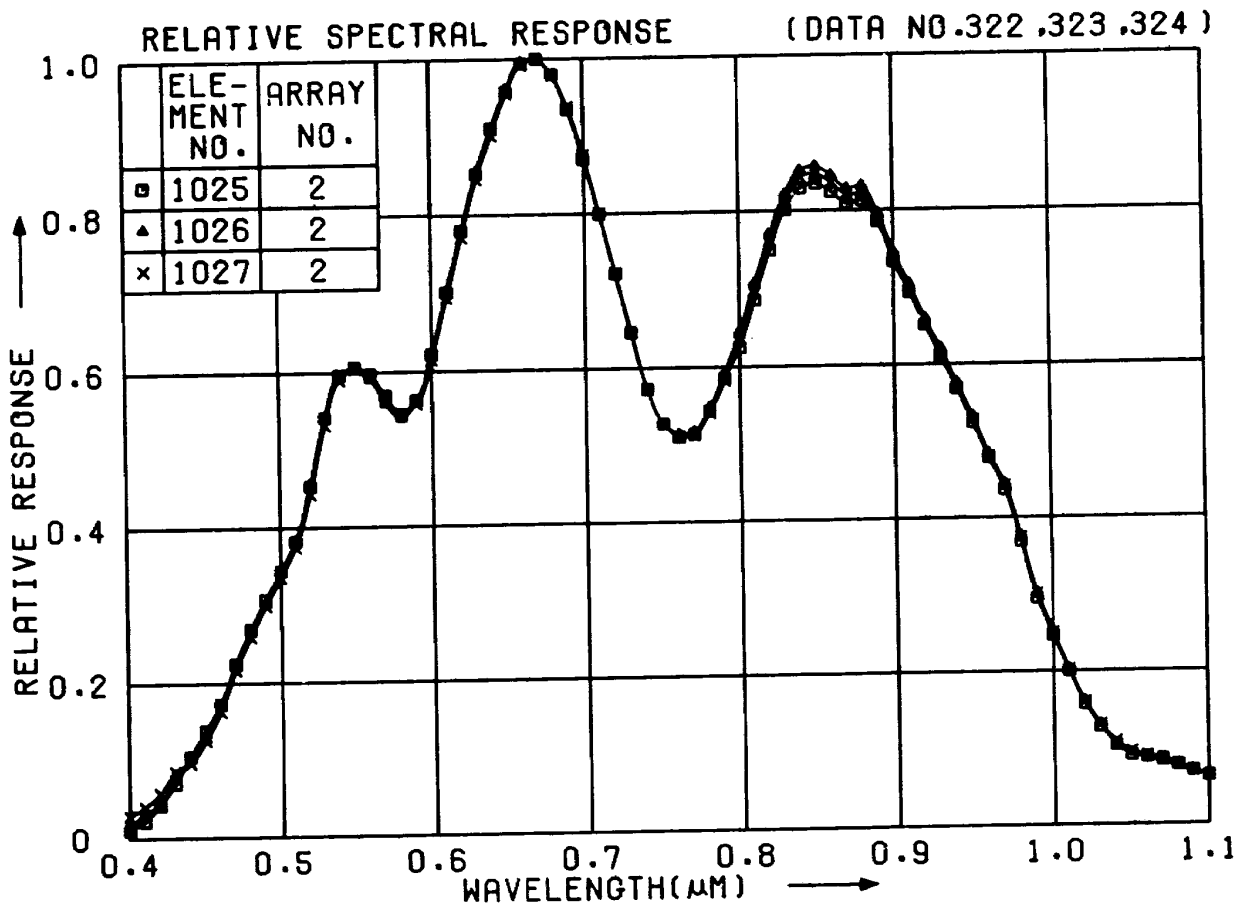
付図 2.2



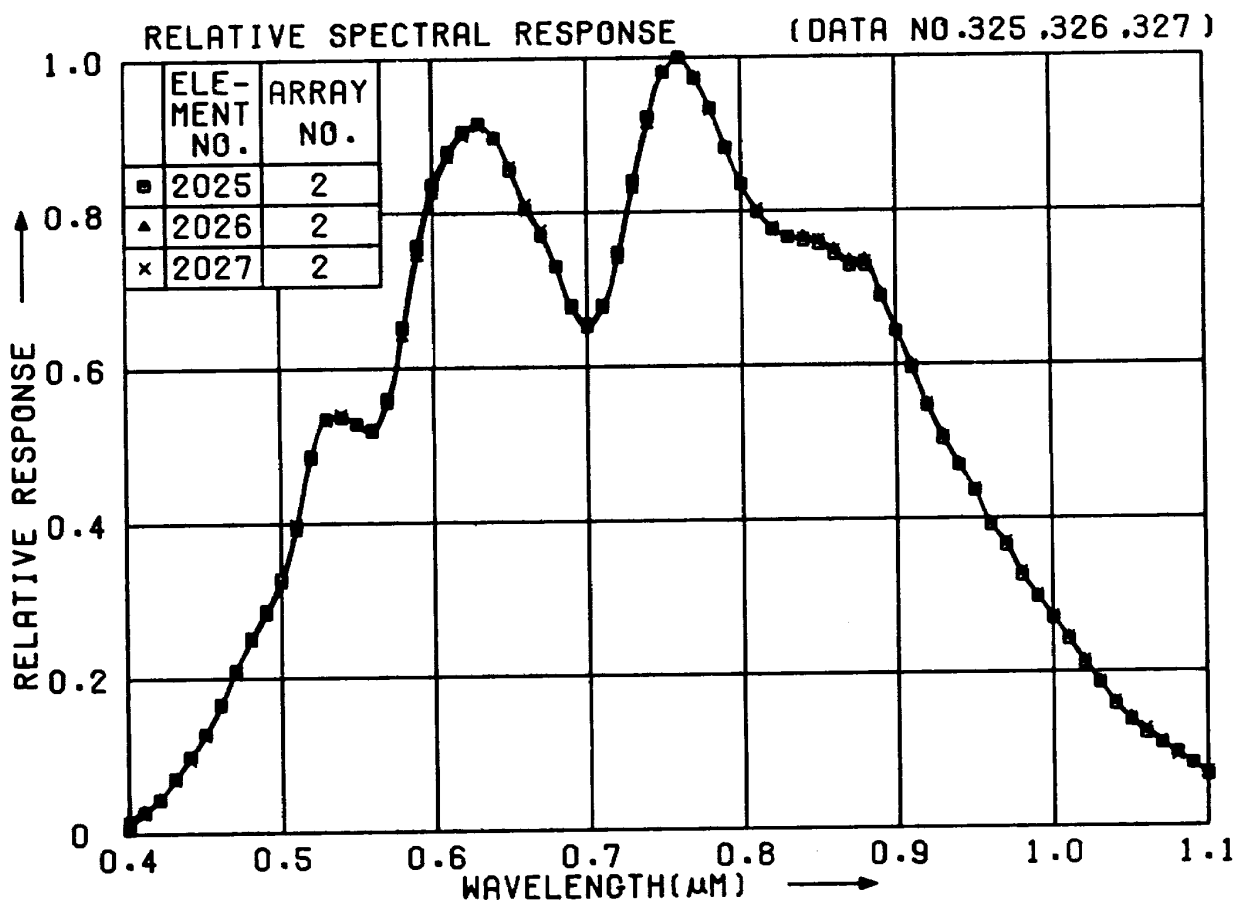
付図 2.3



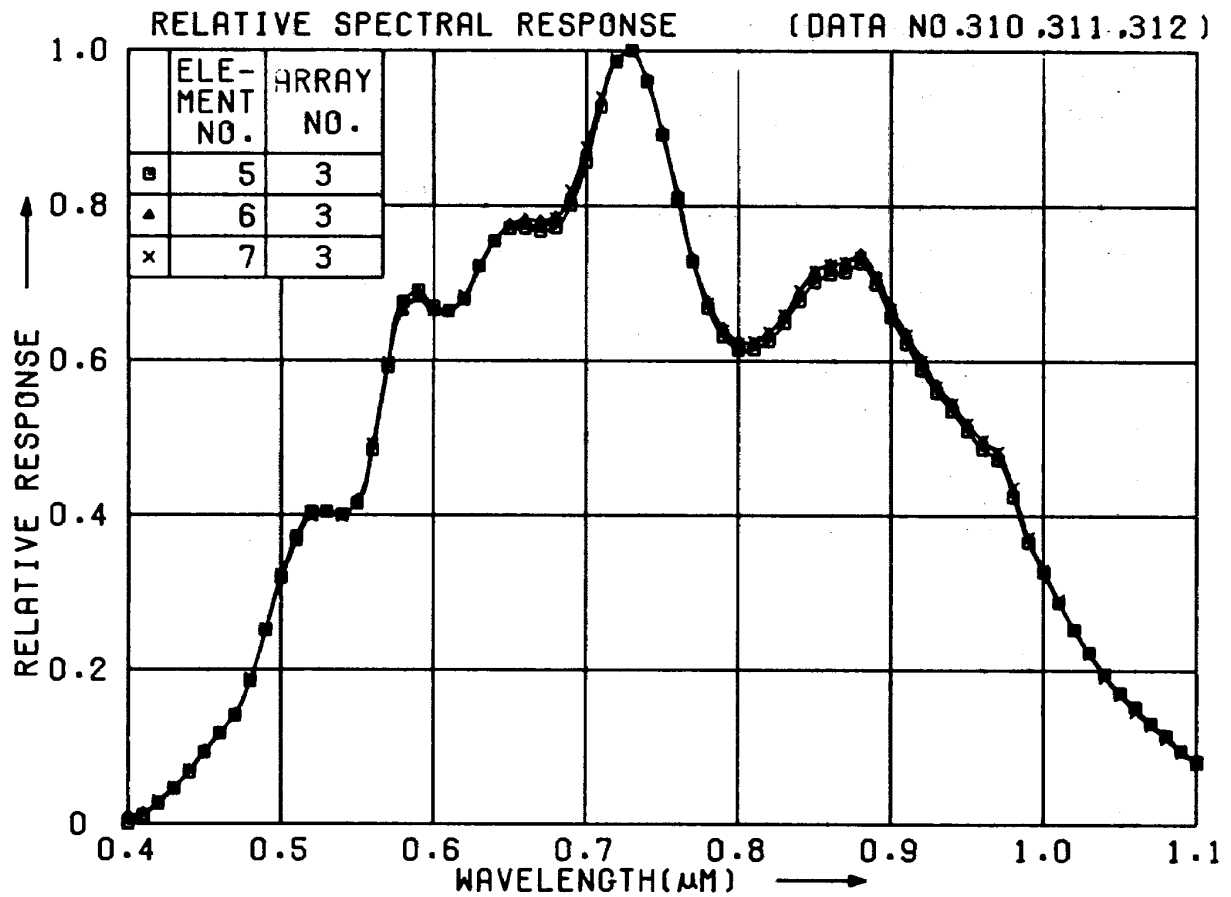
付図 2.4



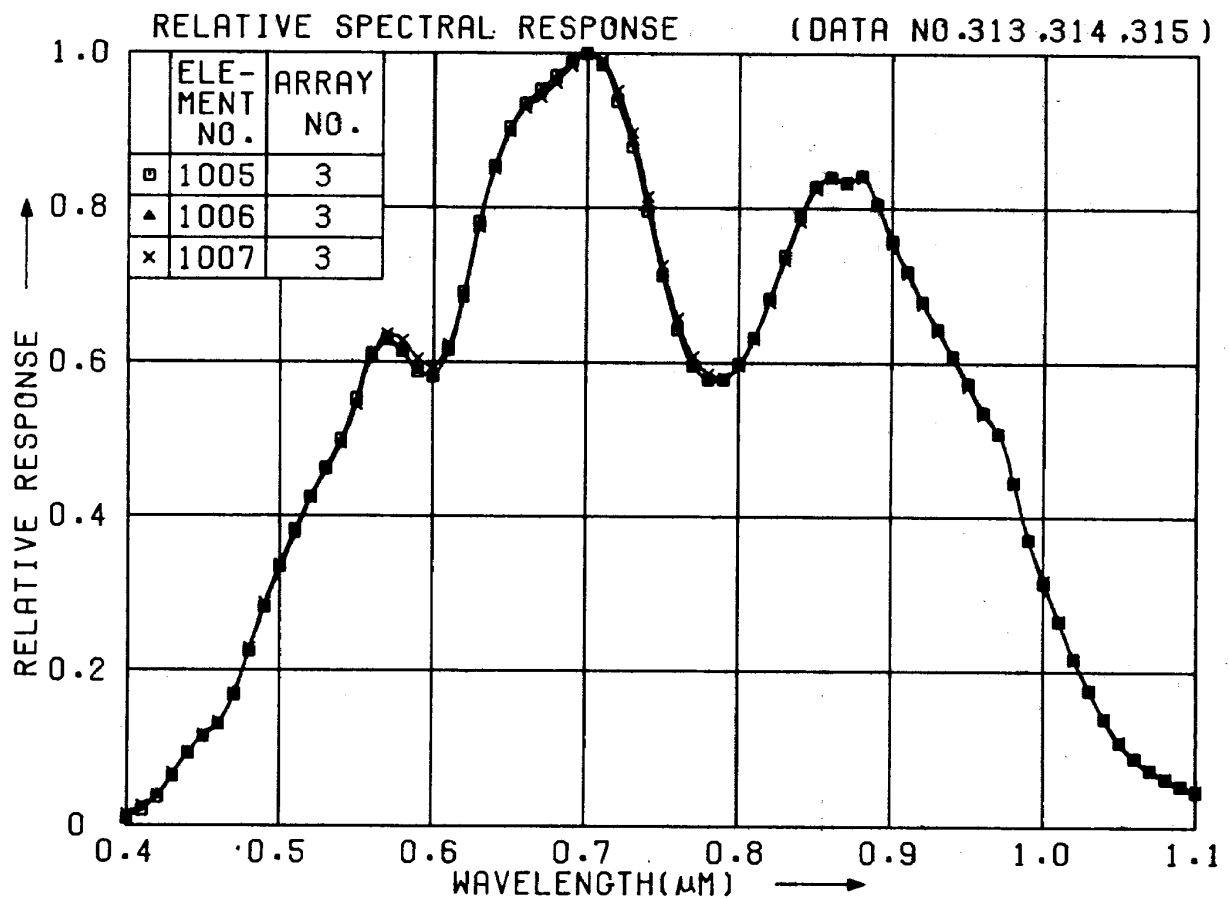
付図 2.5



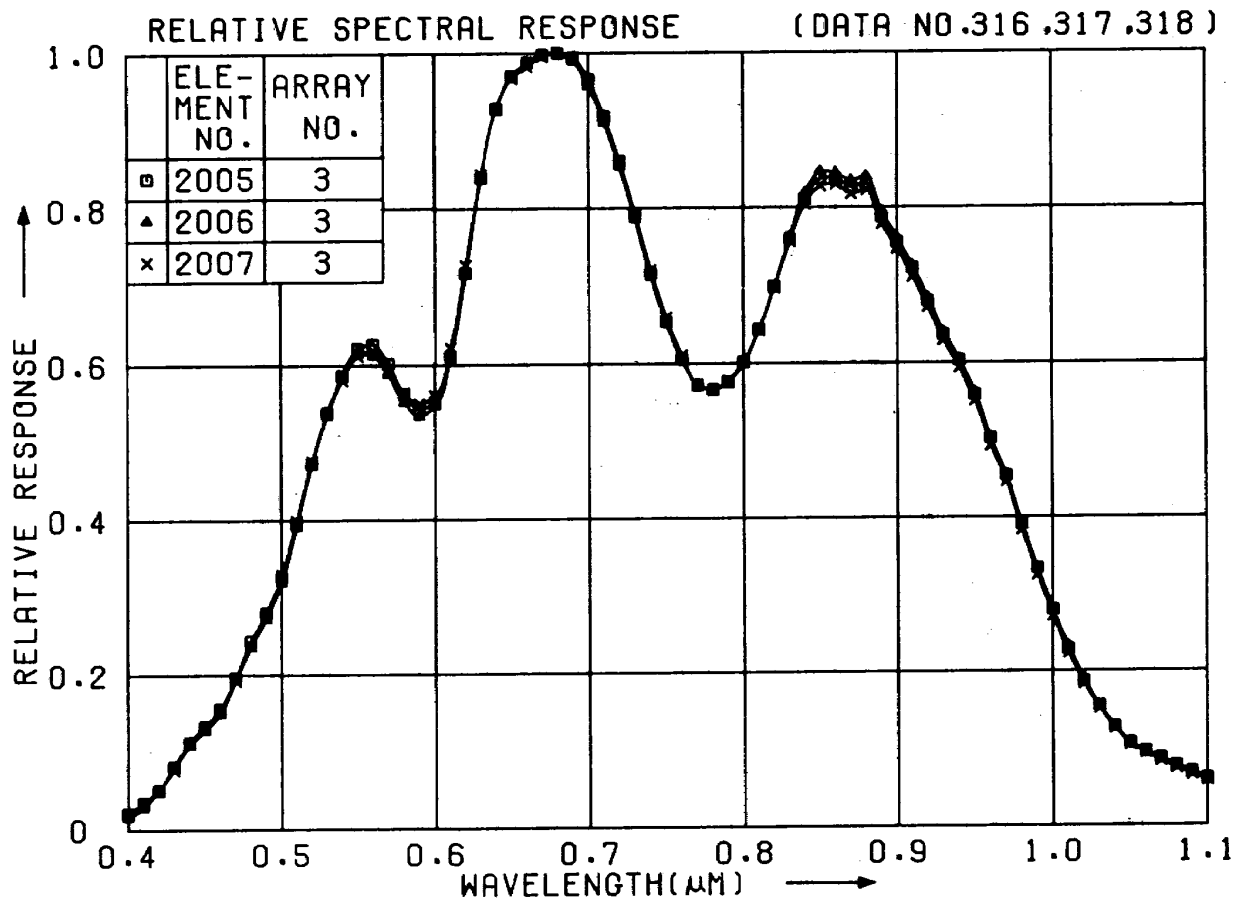
付図 2.6



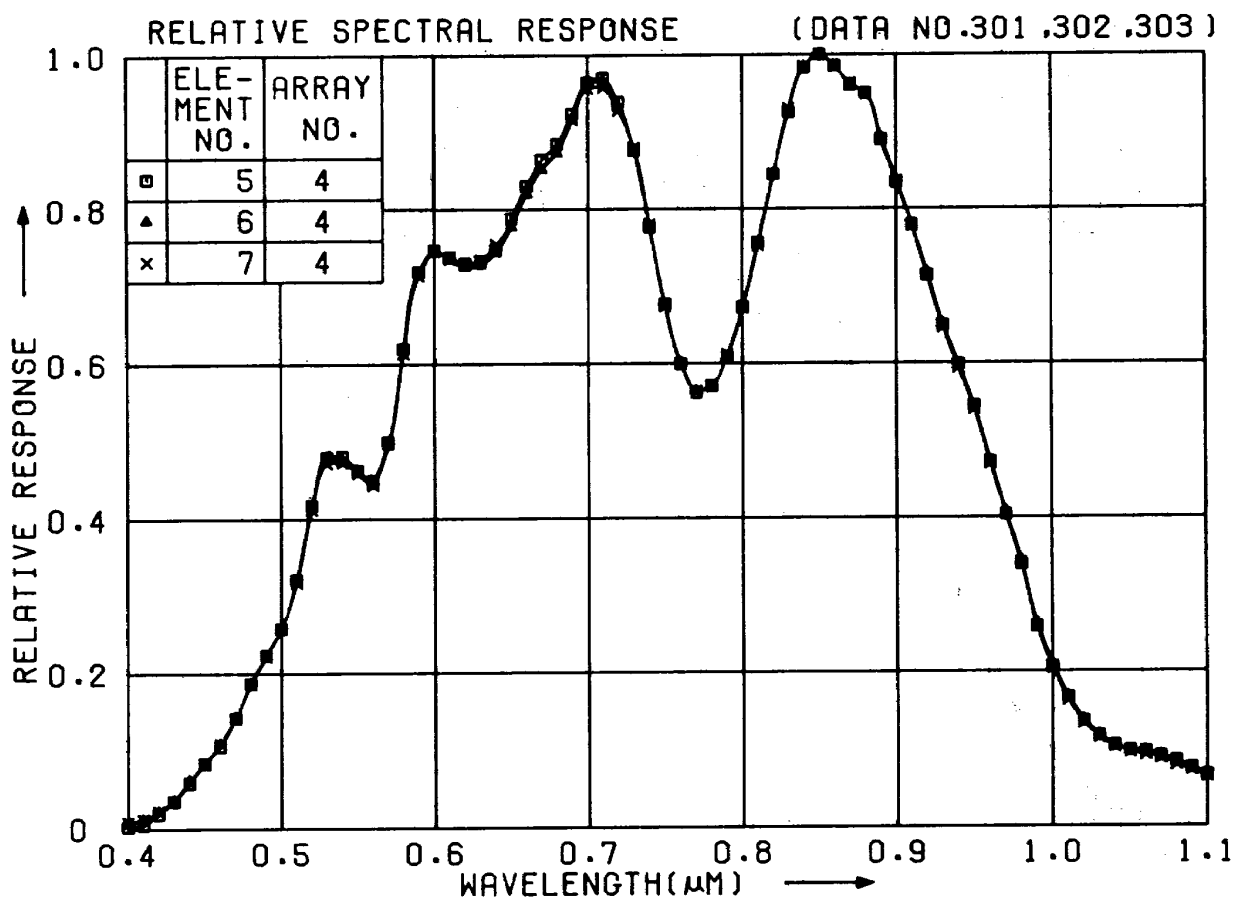
付図 2.7



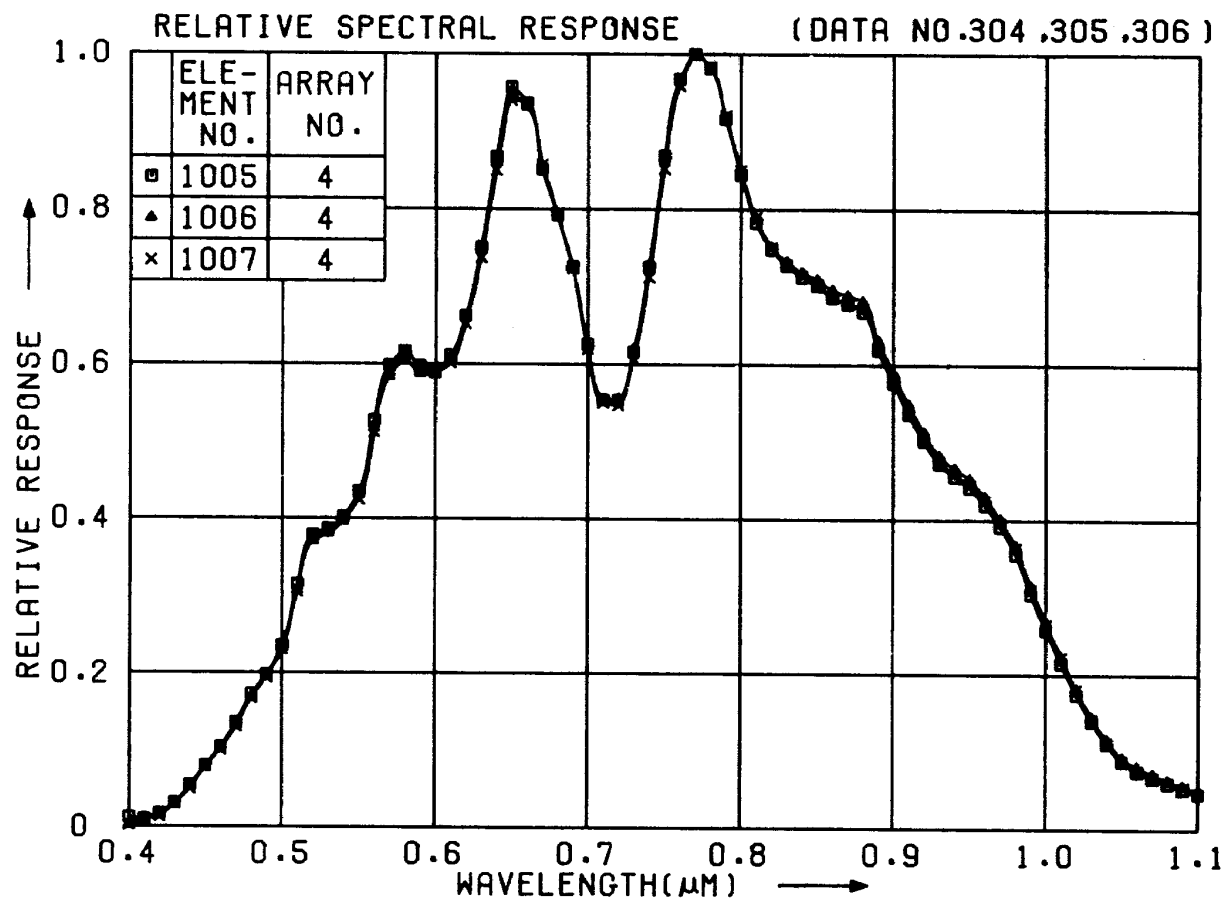
付図 2.8



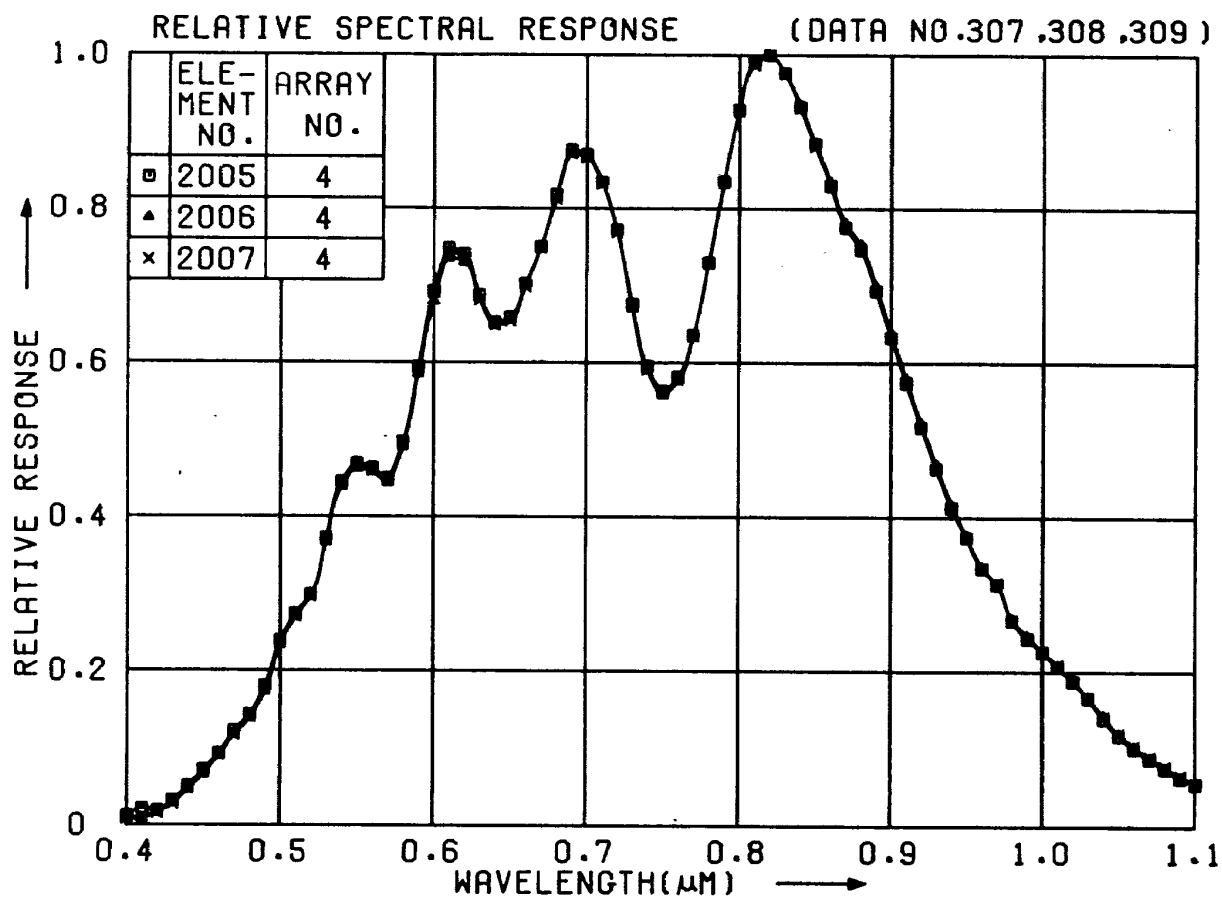
付図 2.9



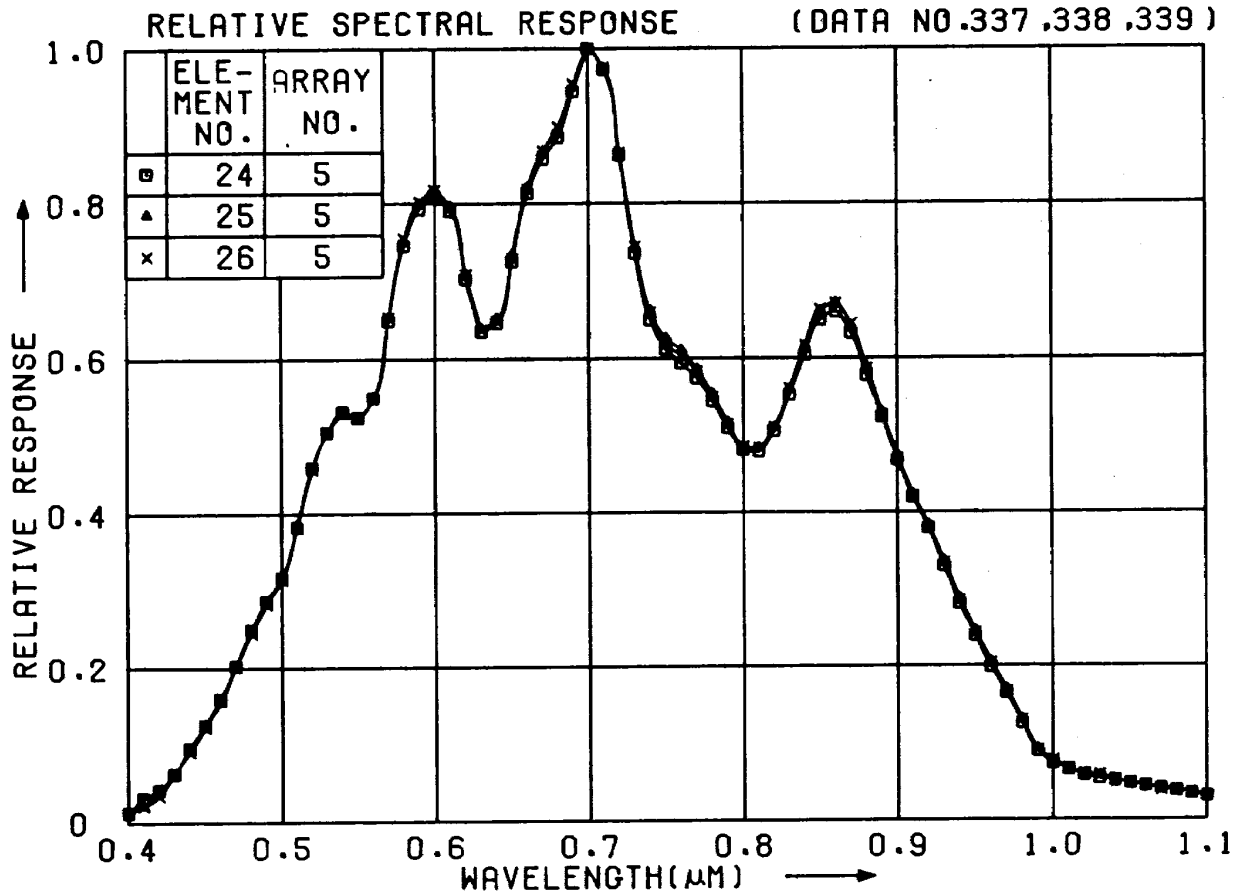
付図 2.10



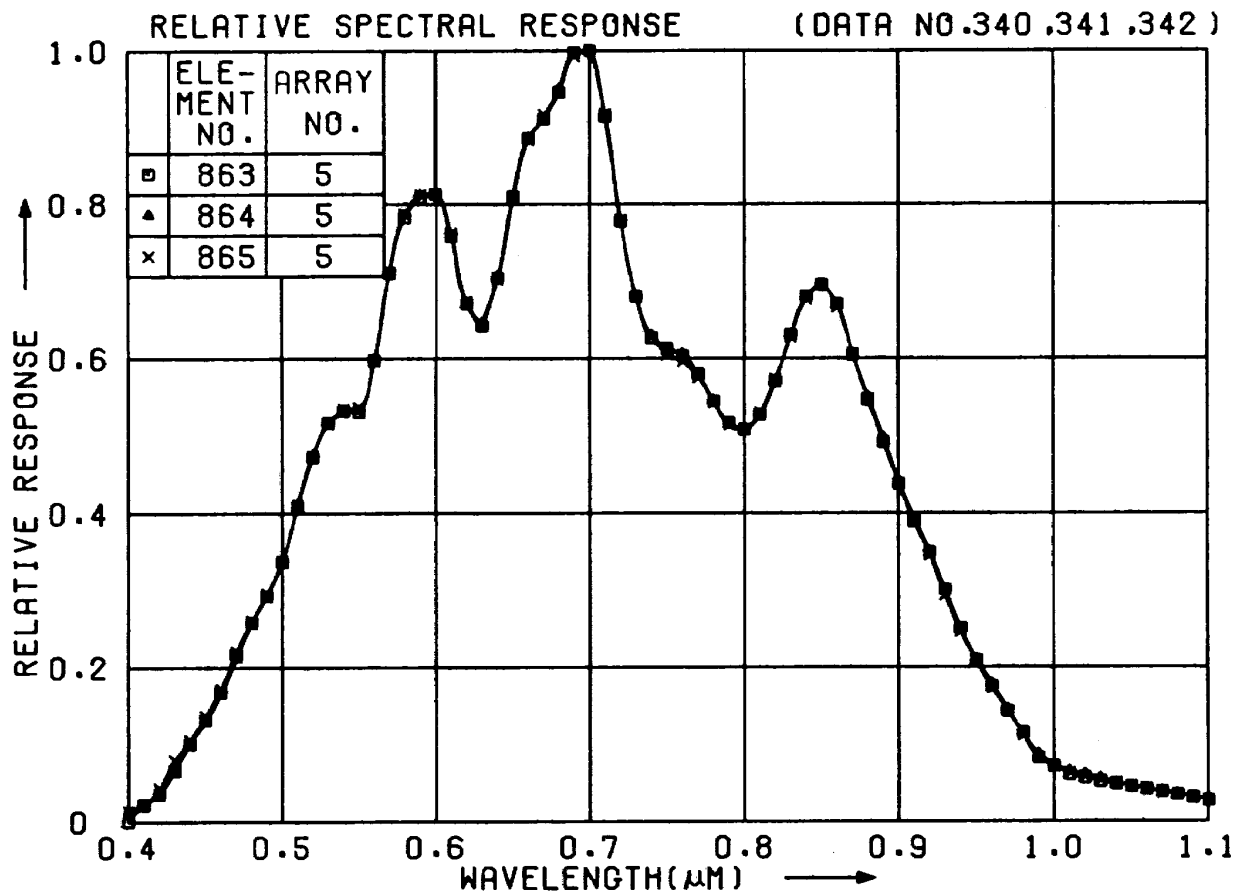
付図 2.11



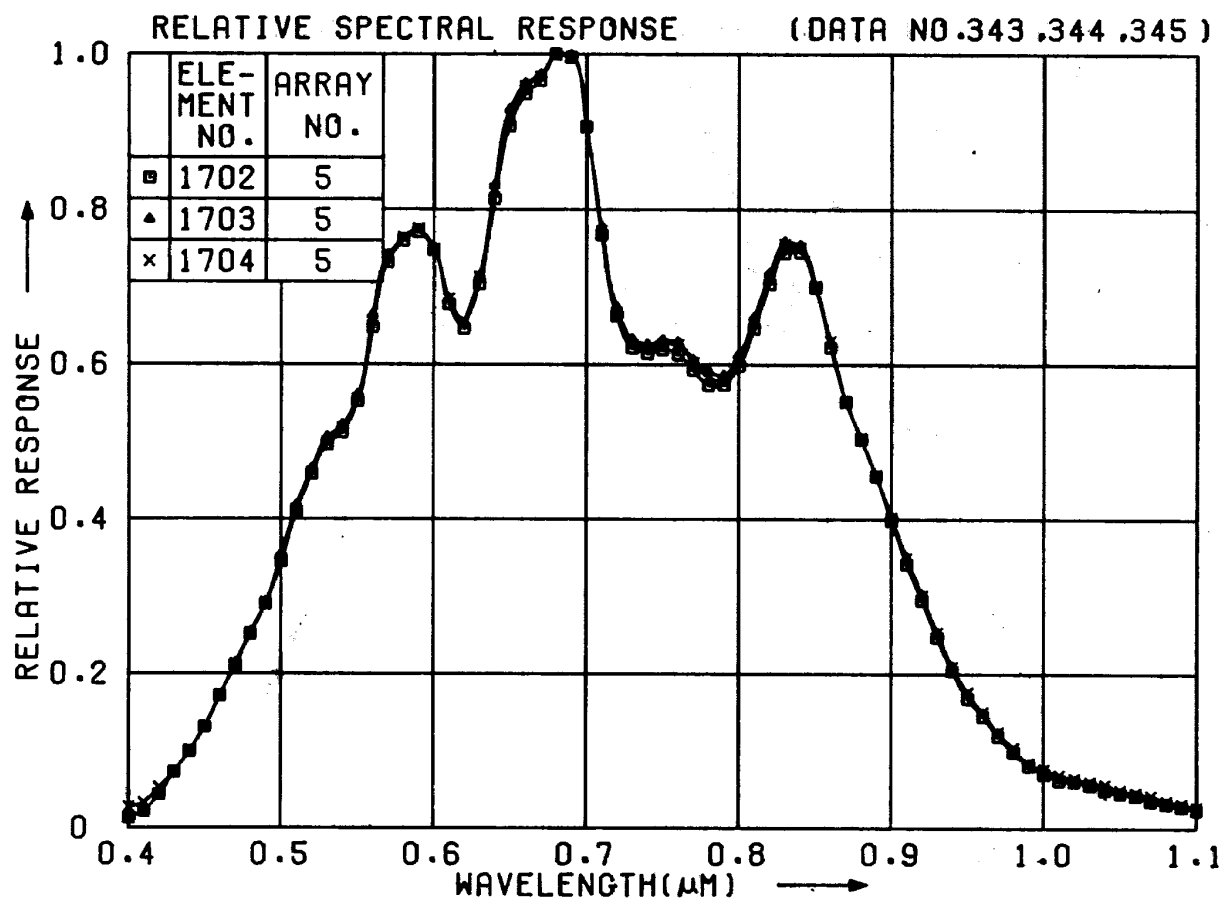
付図 2.12



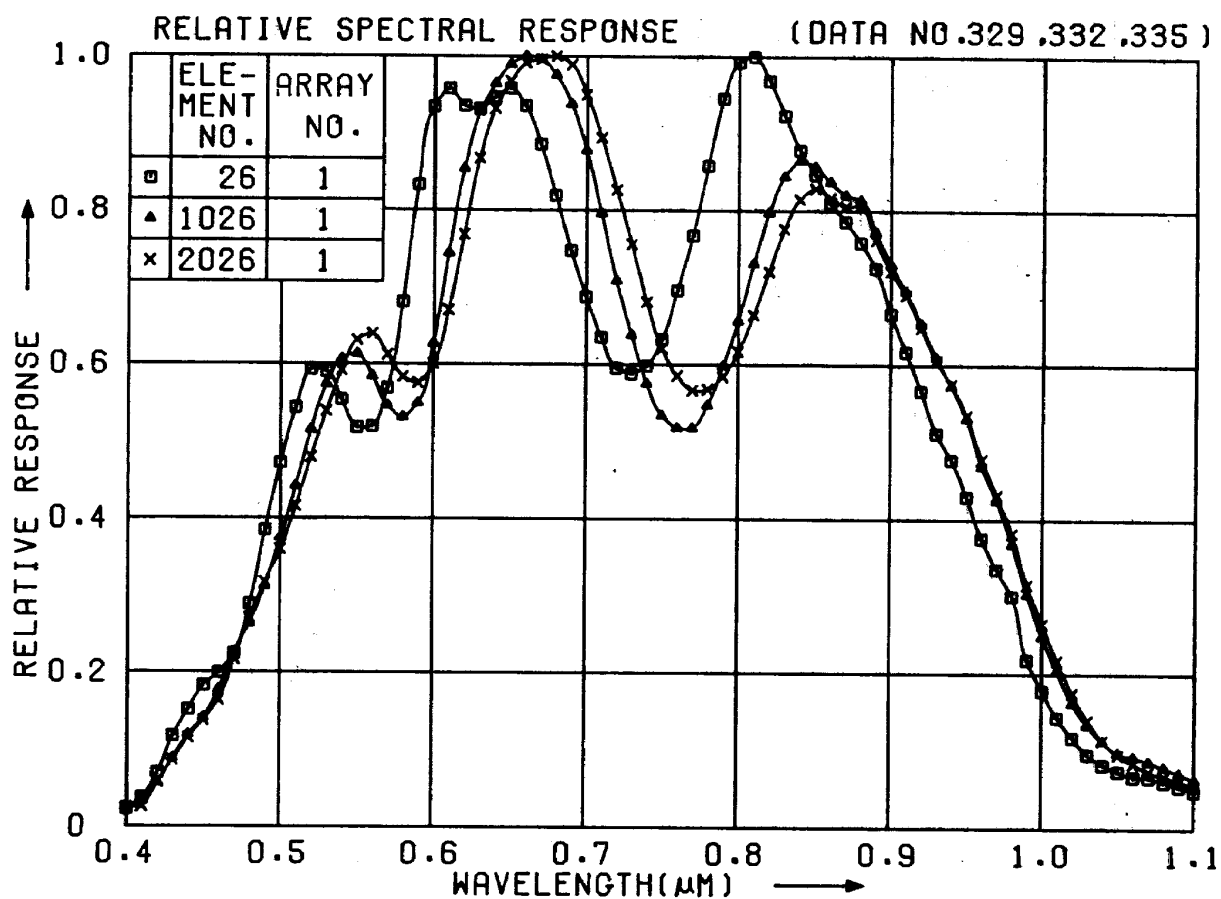
付図 2.13



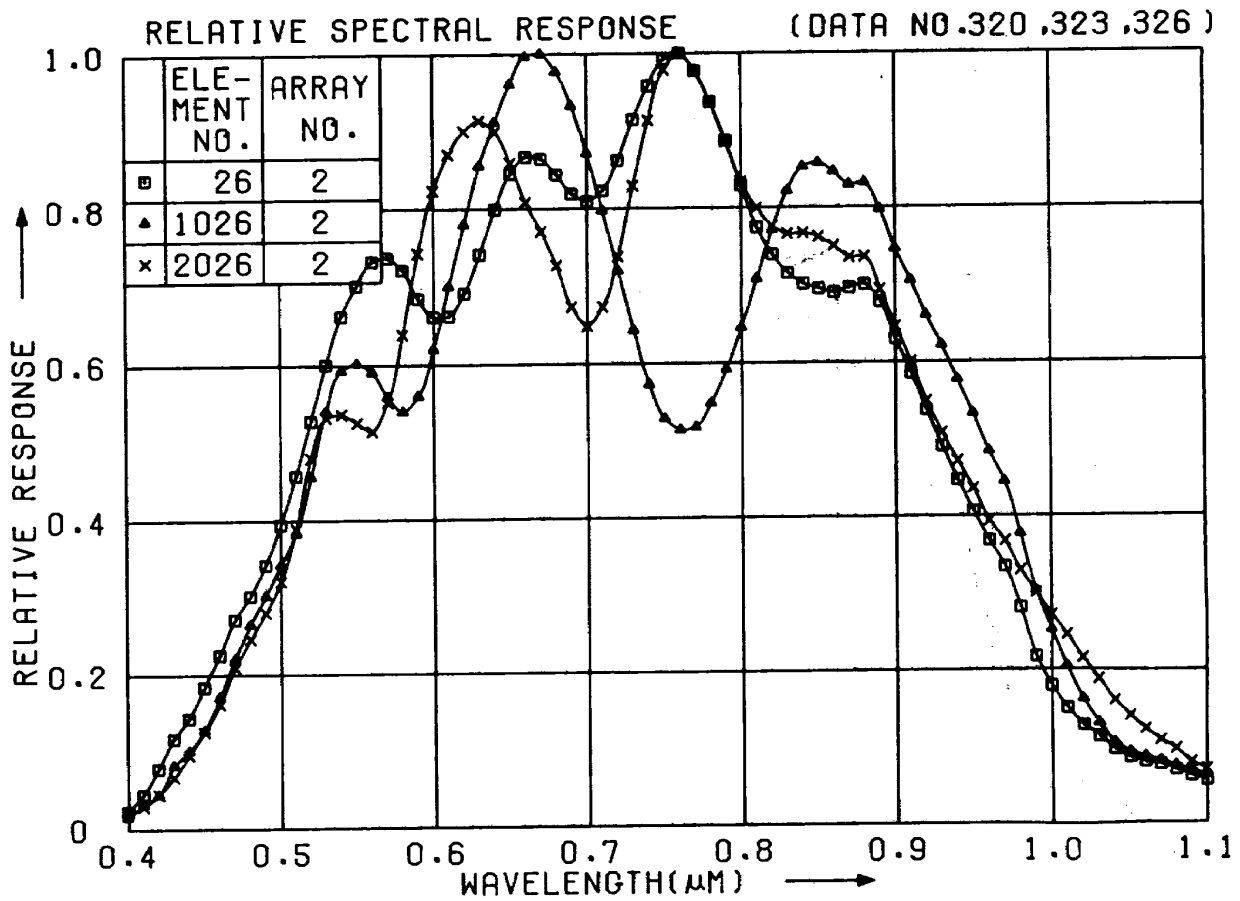
付図 2.14



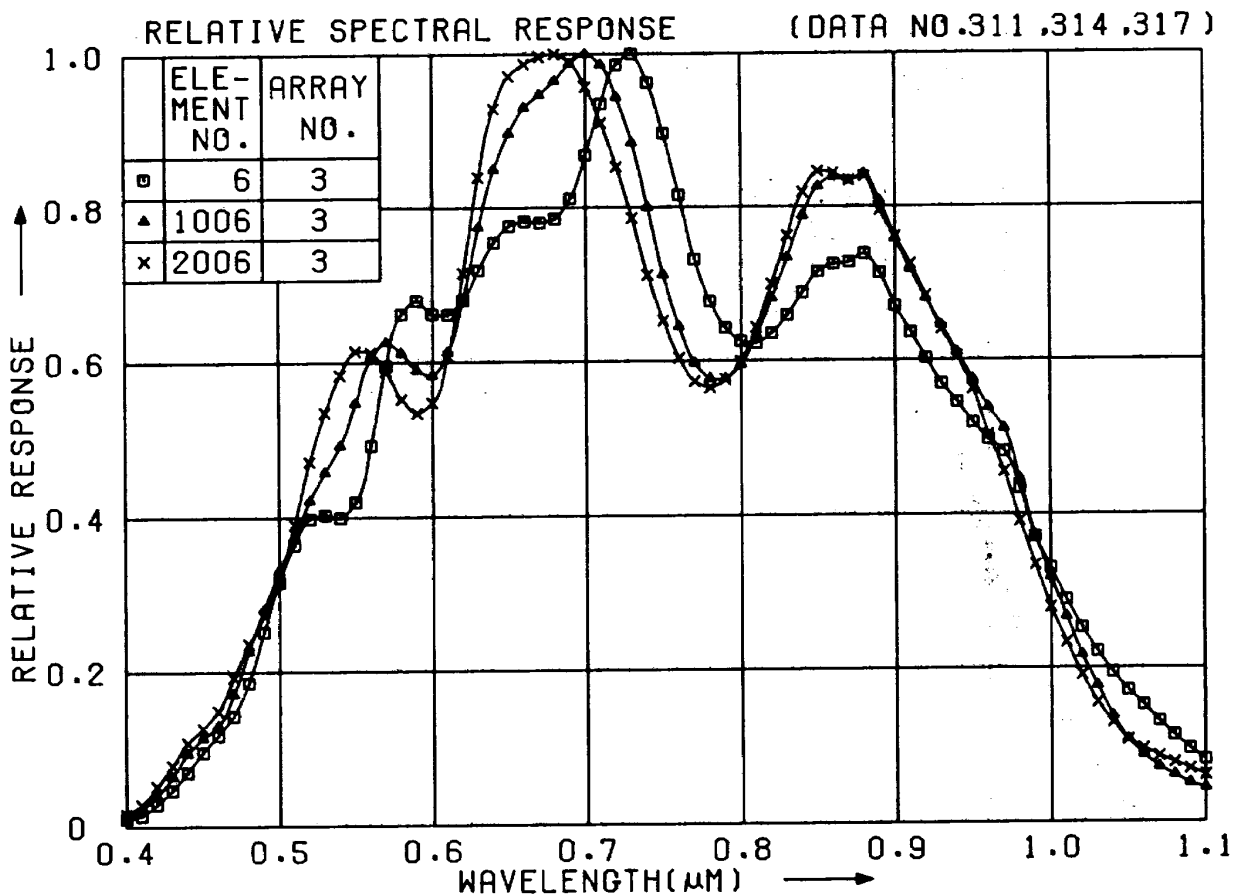
付図 2.15



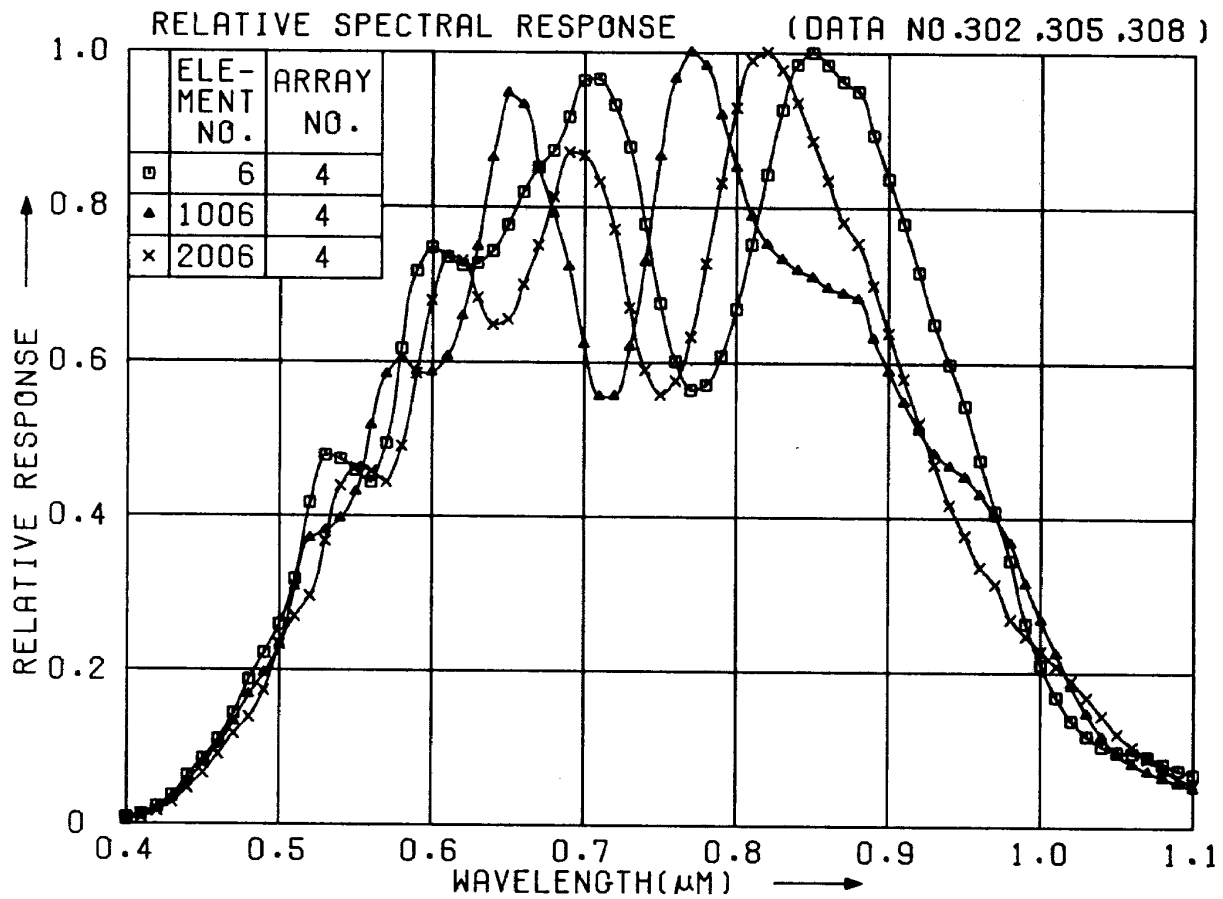
付図 2.16



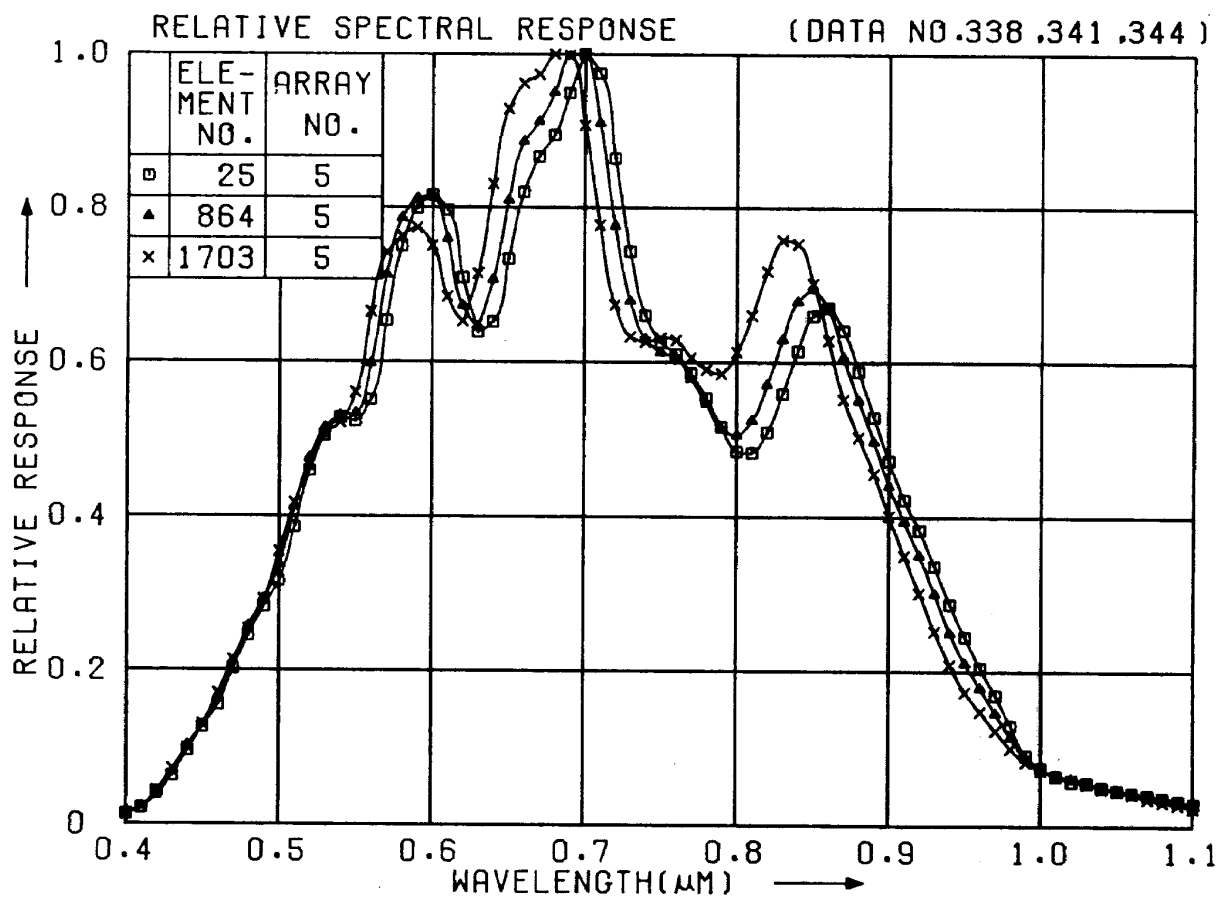
付図 2.17



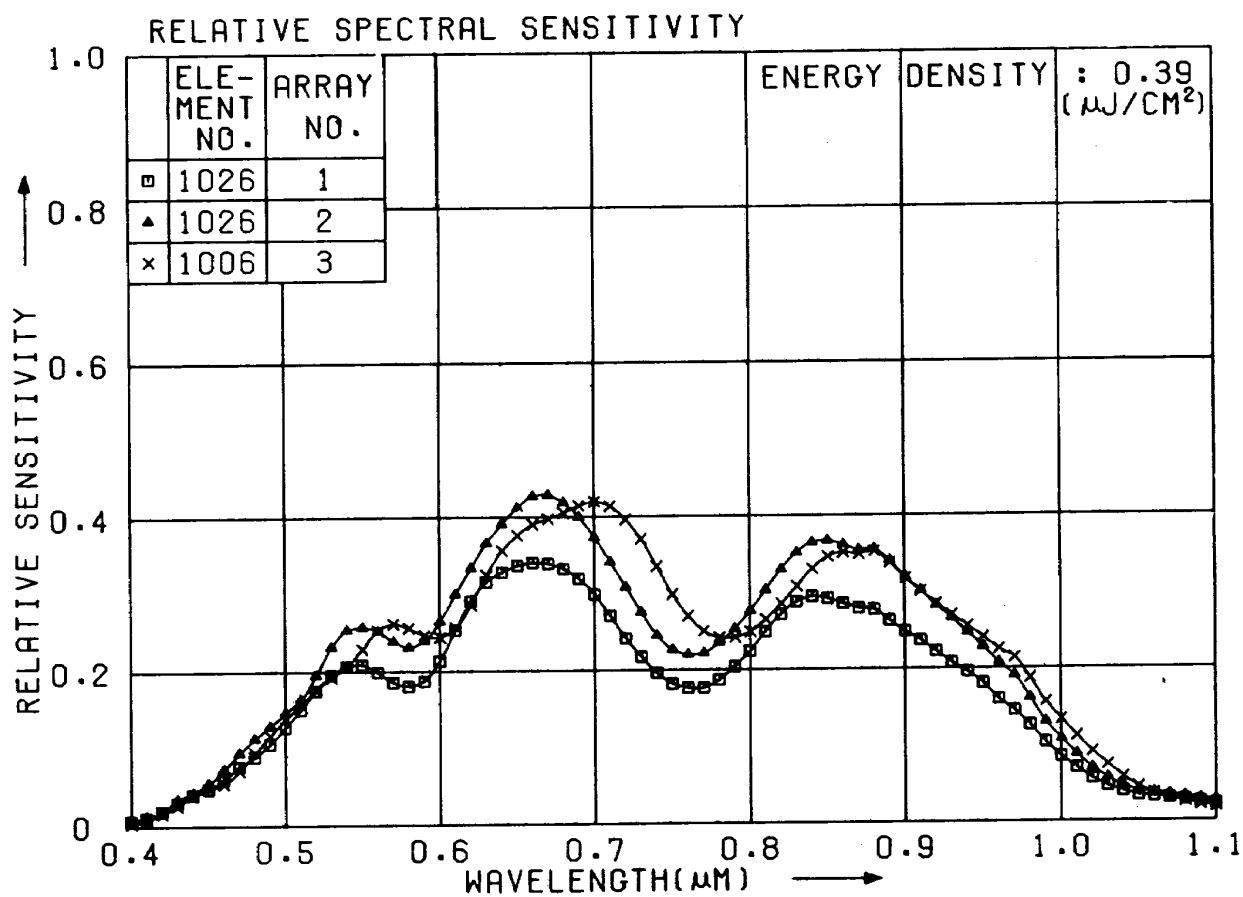
付図 2.18



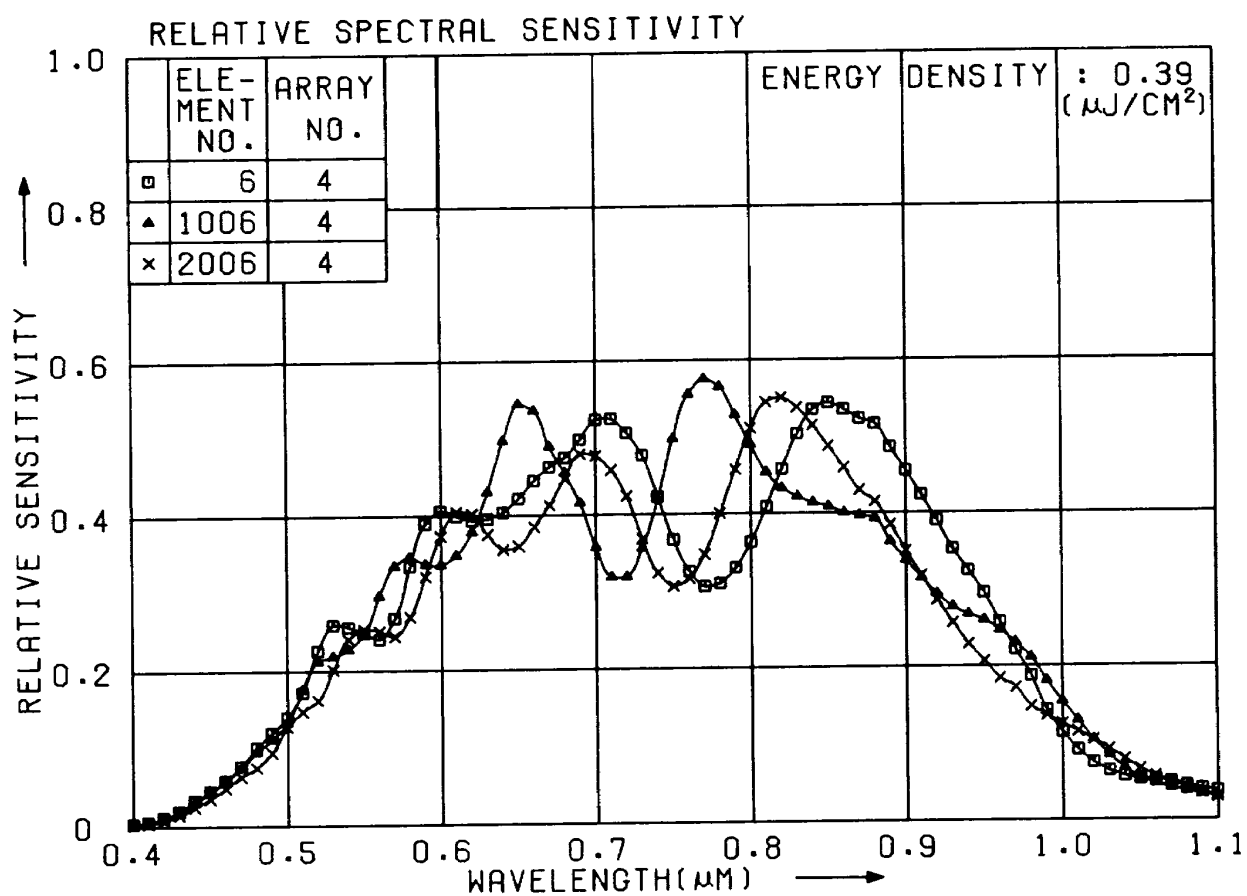
付図 2.19



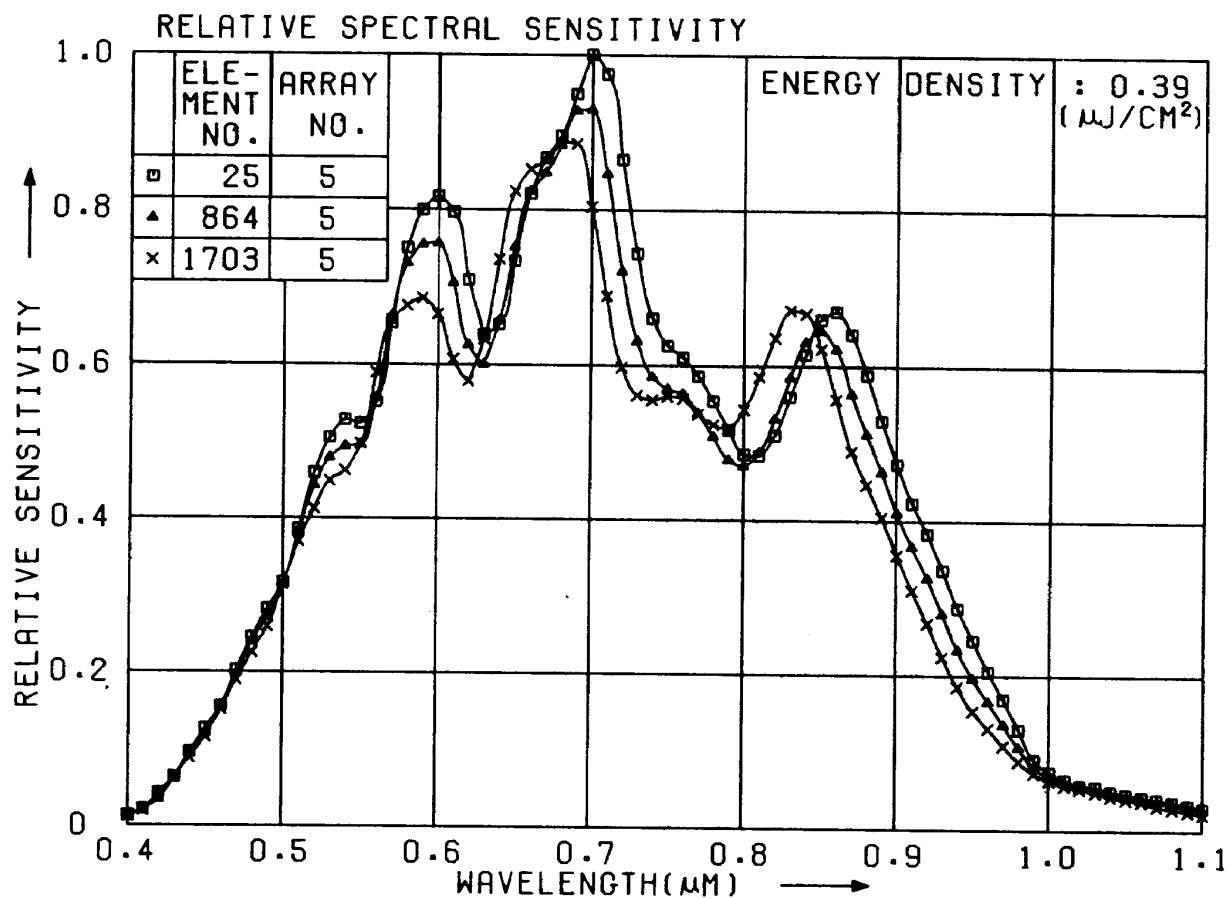
付図 2.20



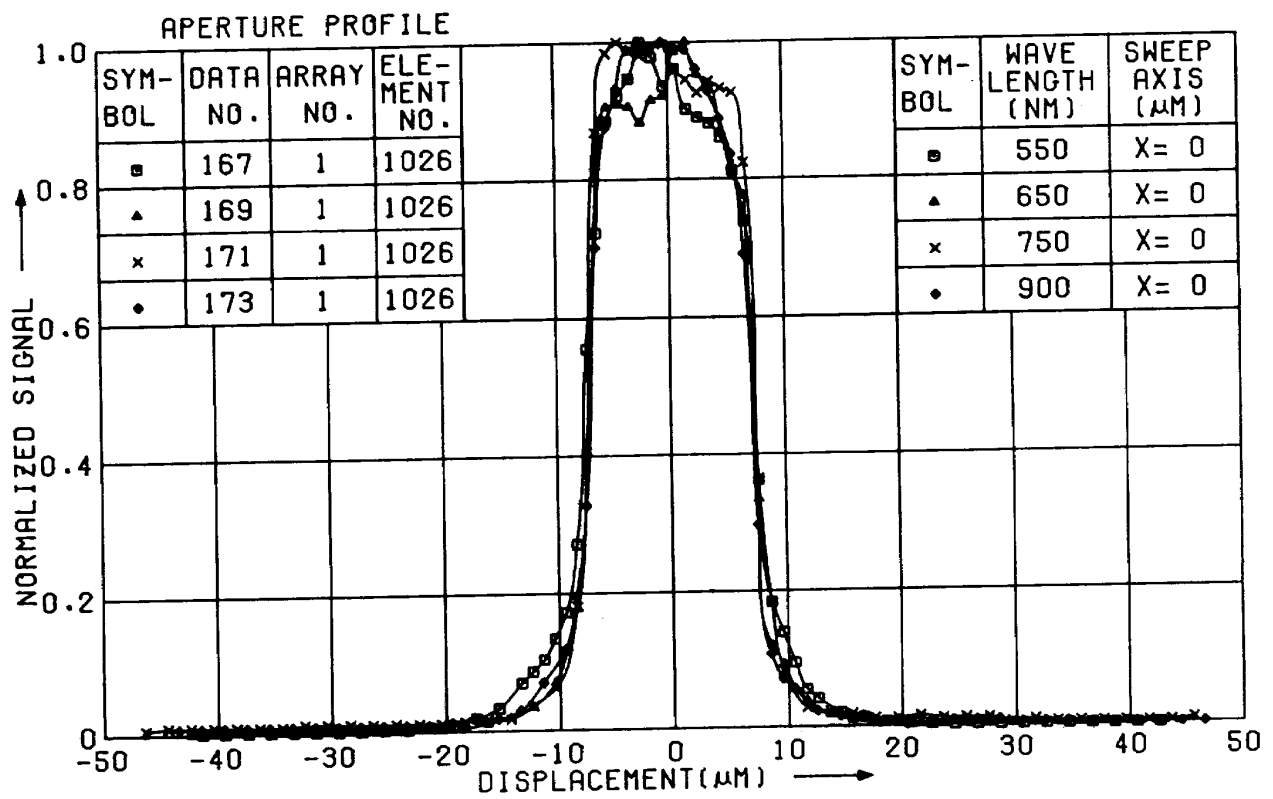
付図 2.21



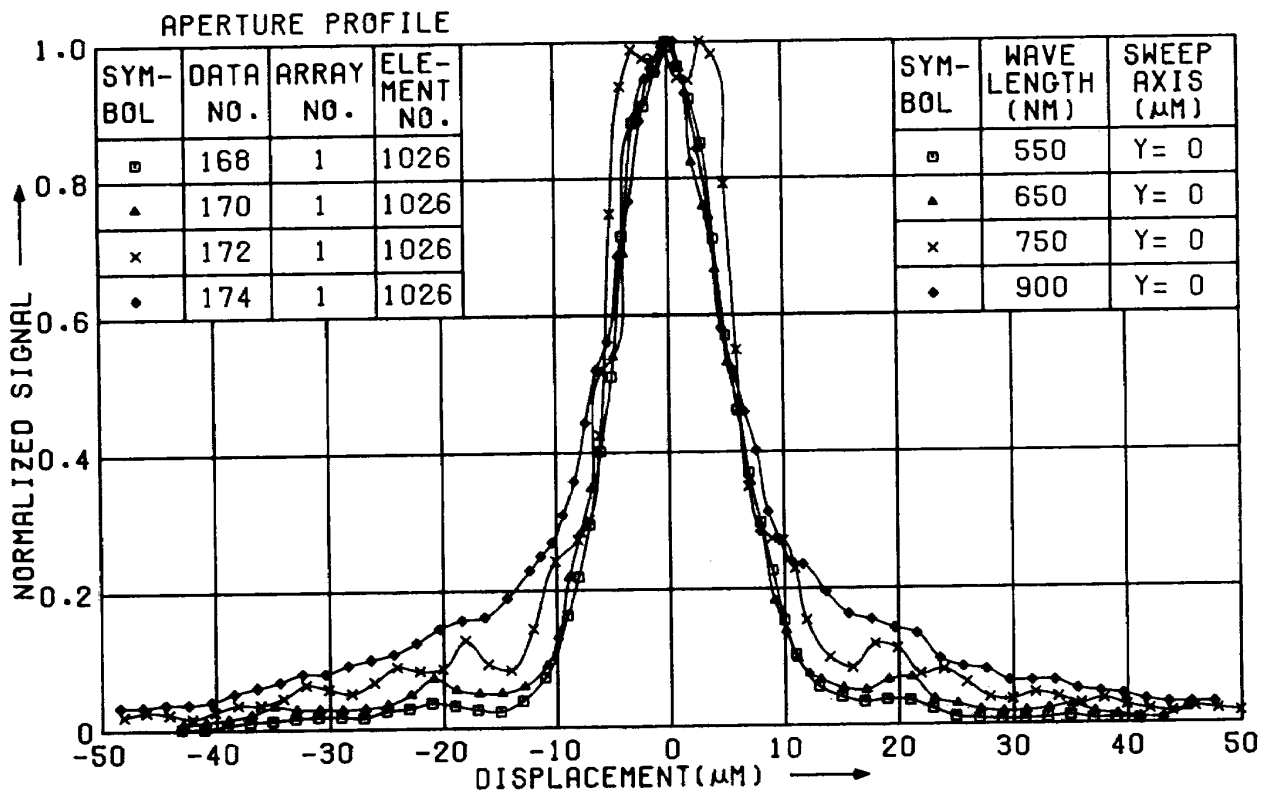
付図 2.22



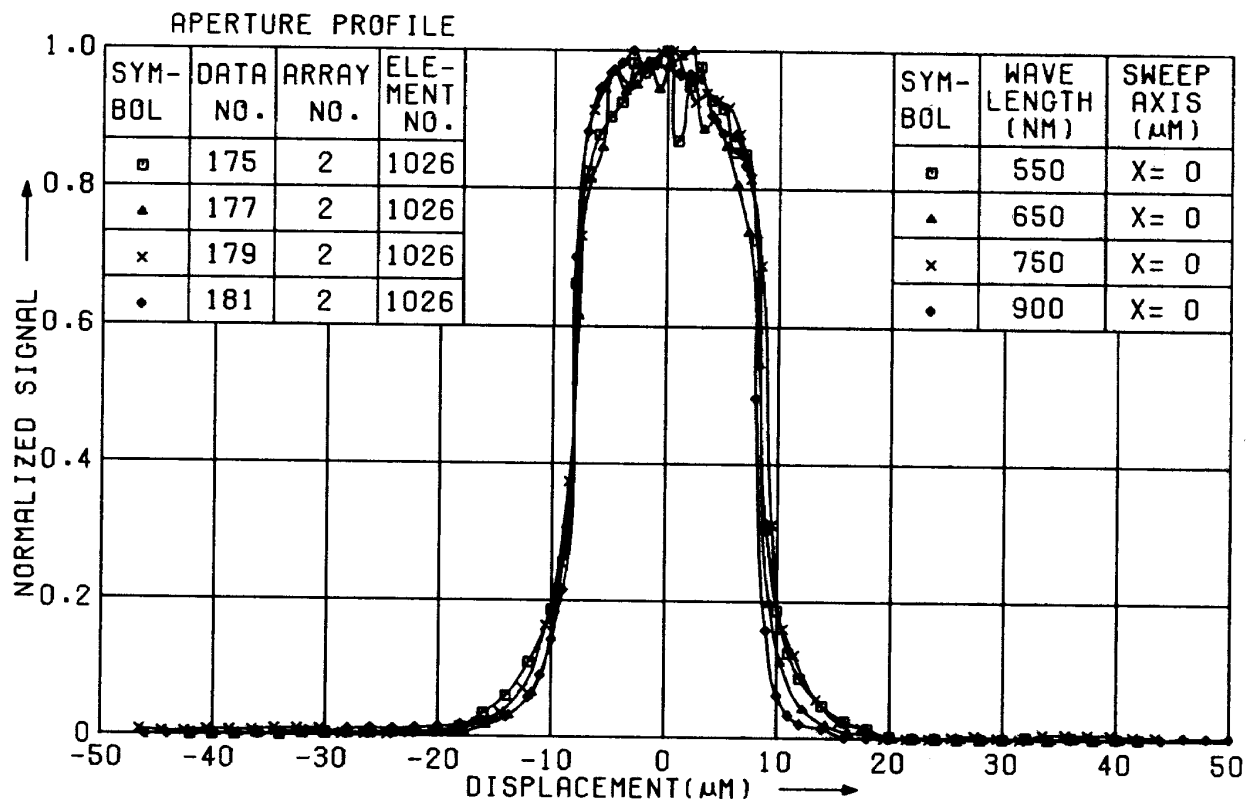
付図 2.23



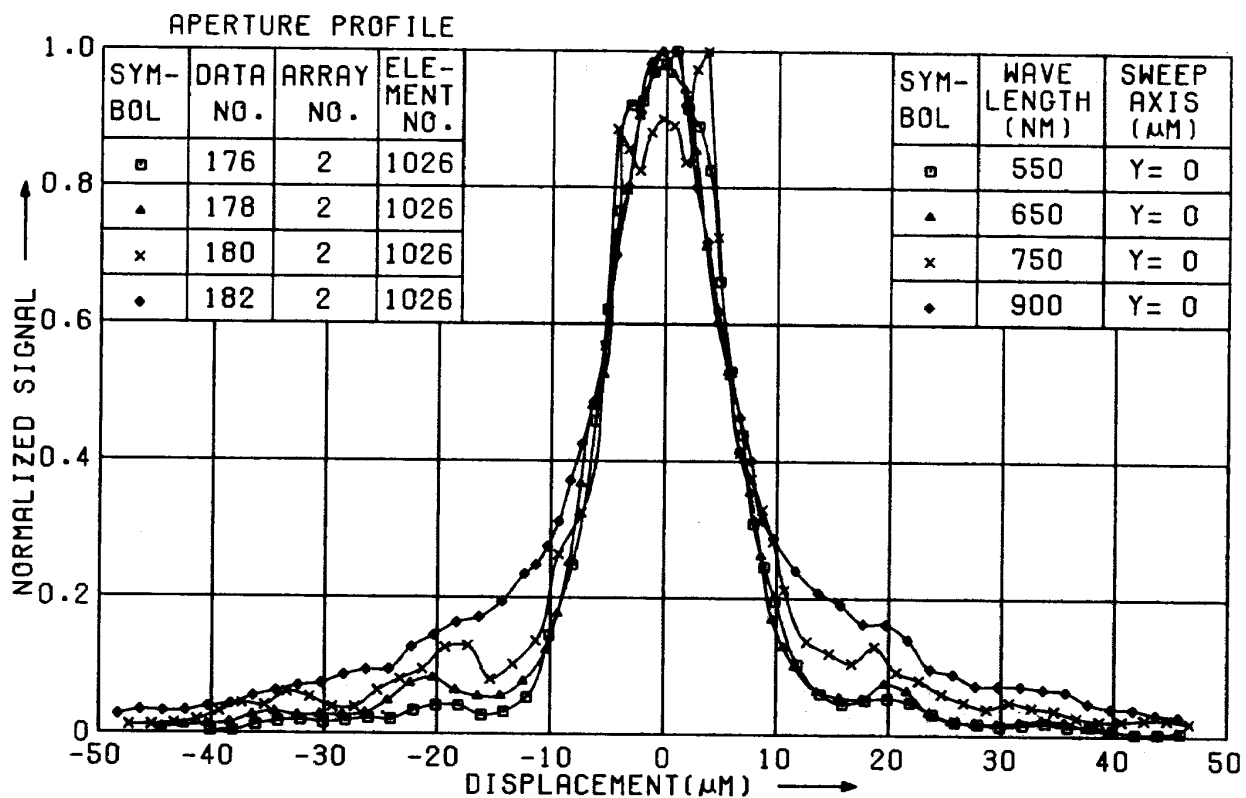
付図 3.1



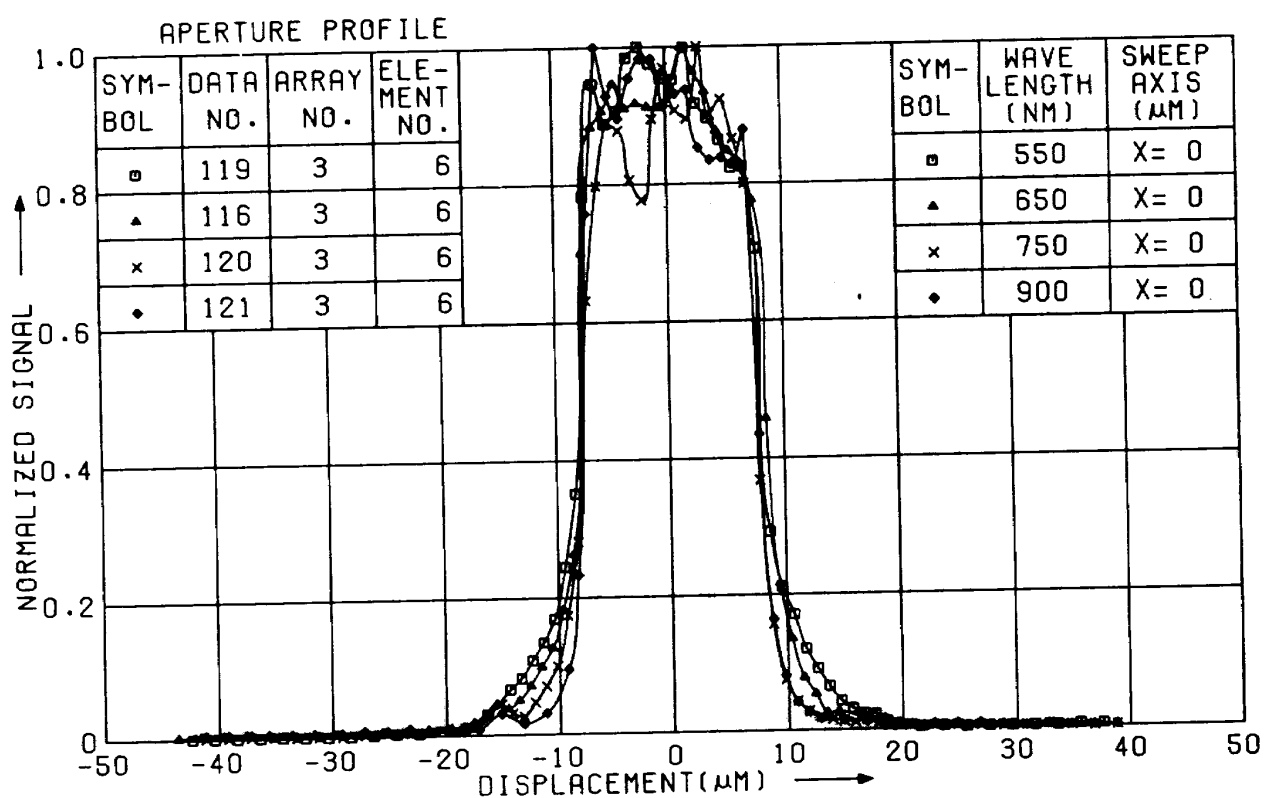
付図 3.2



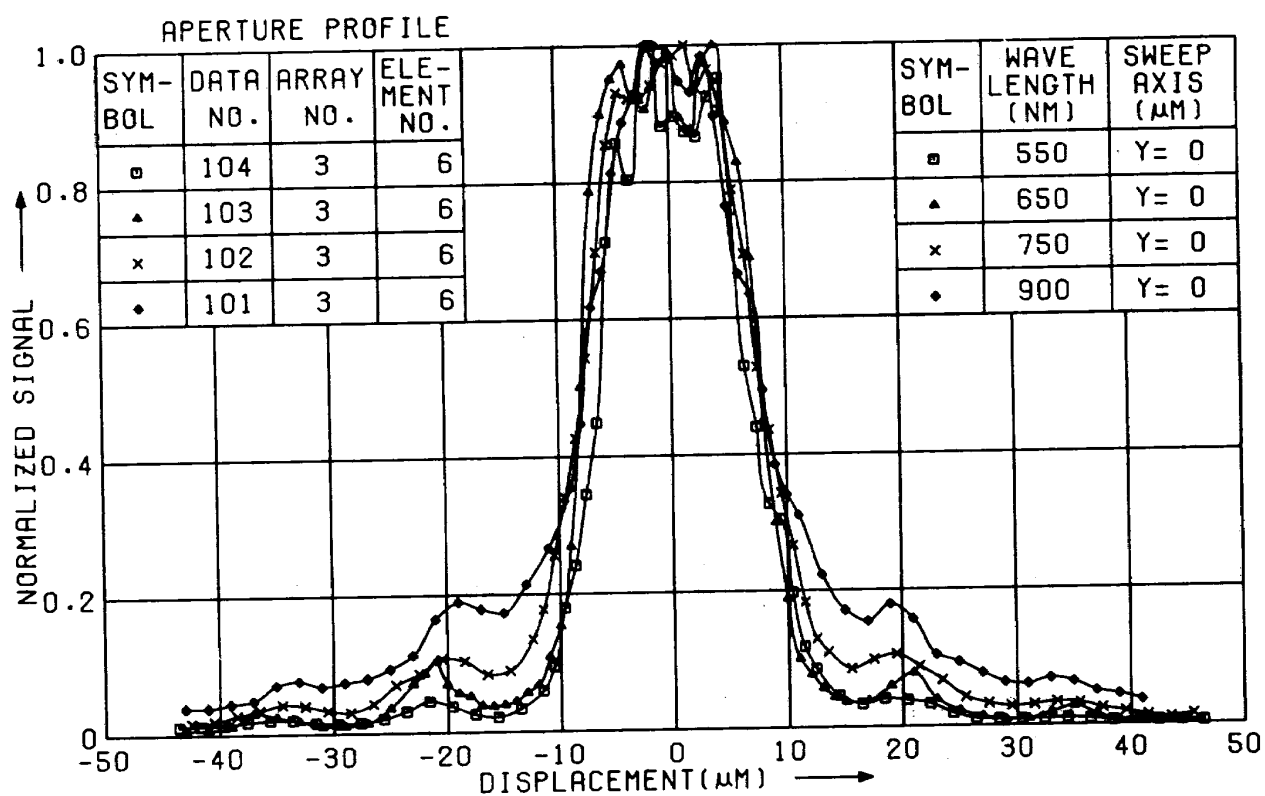
付図 3.3



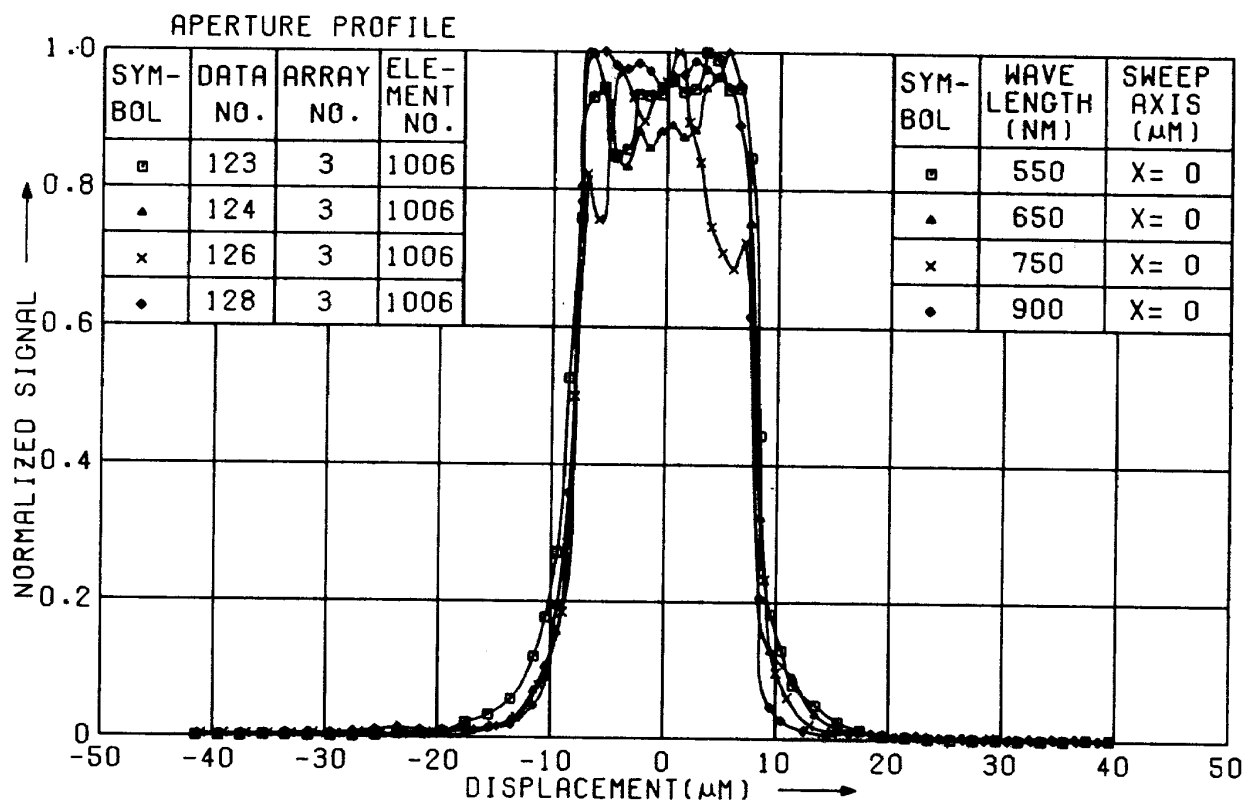
付図 3.4



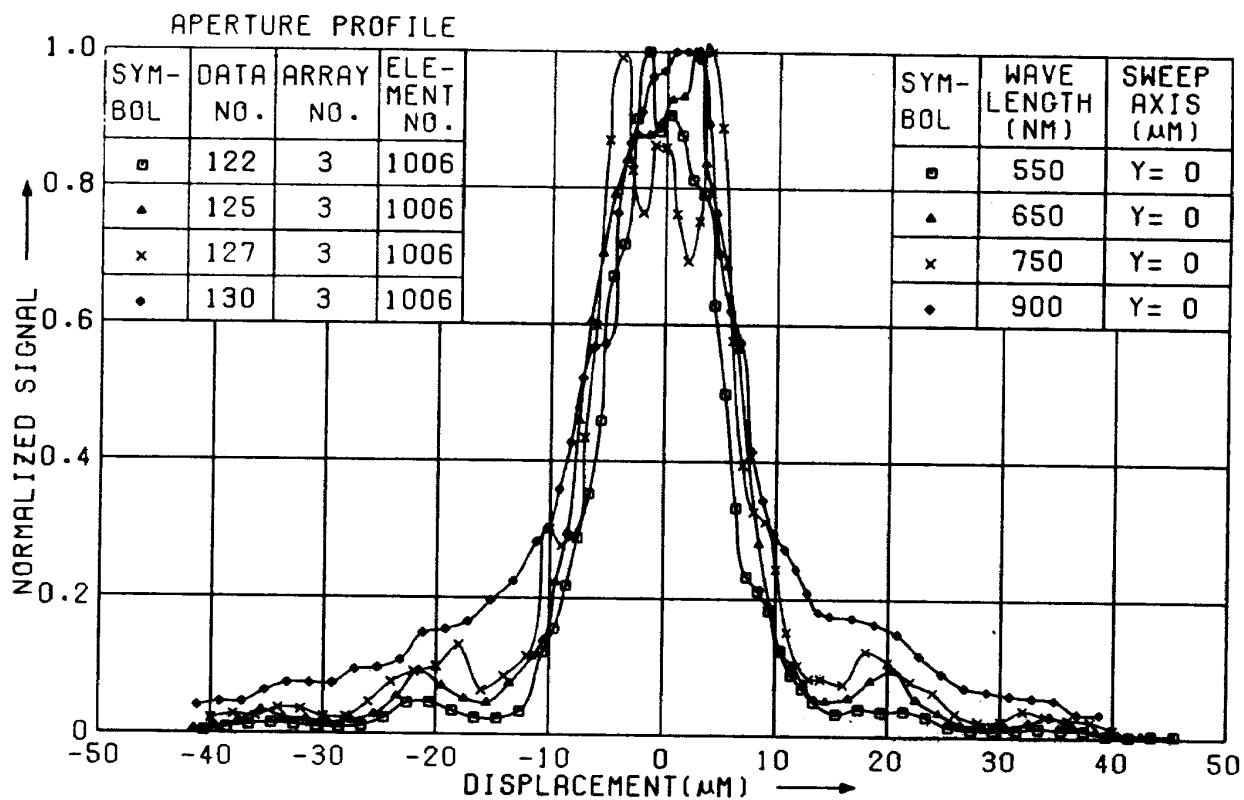
付図 3.5



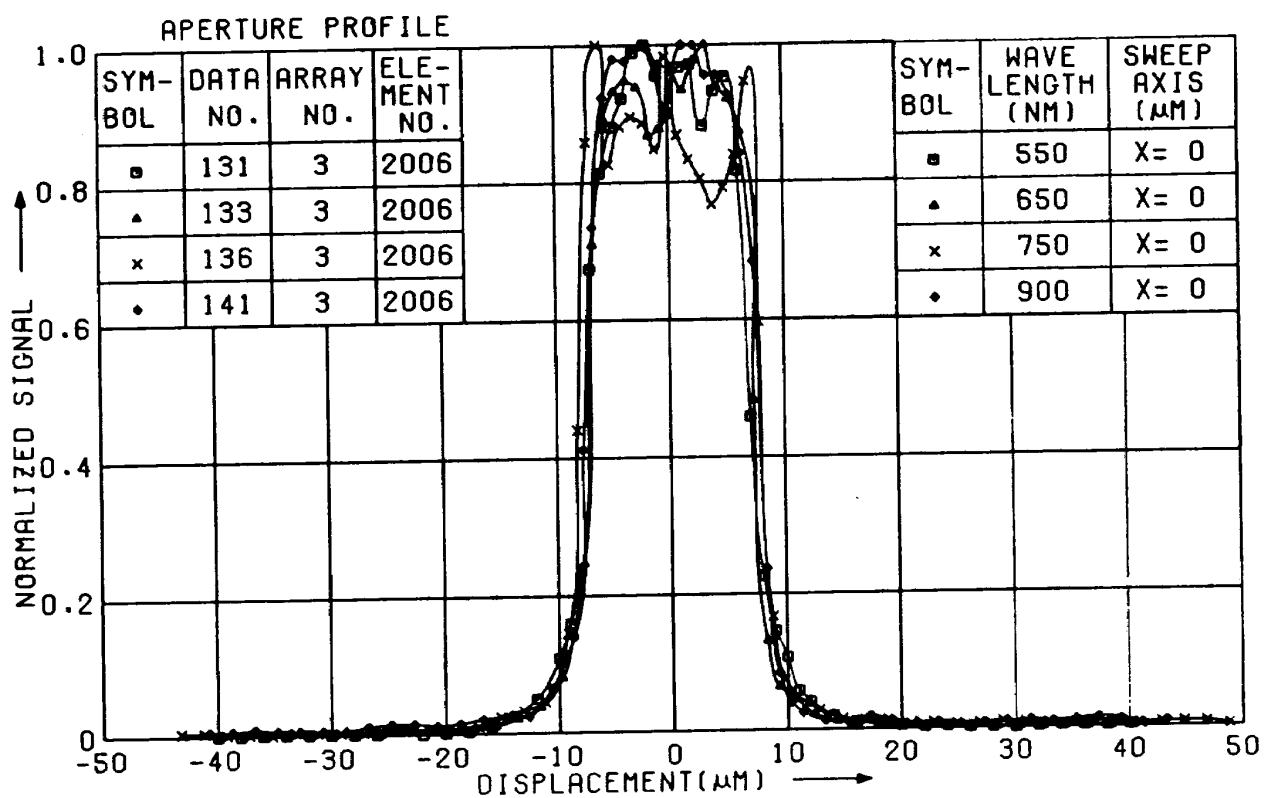
付図 3.6



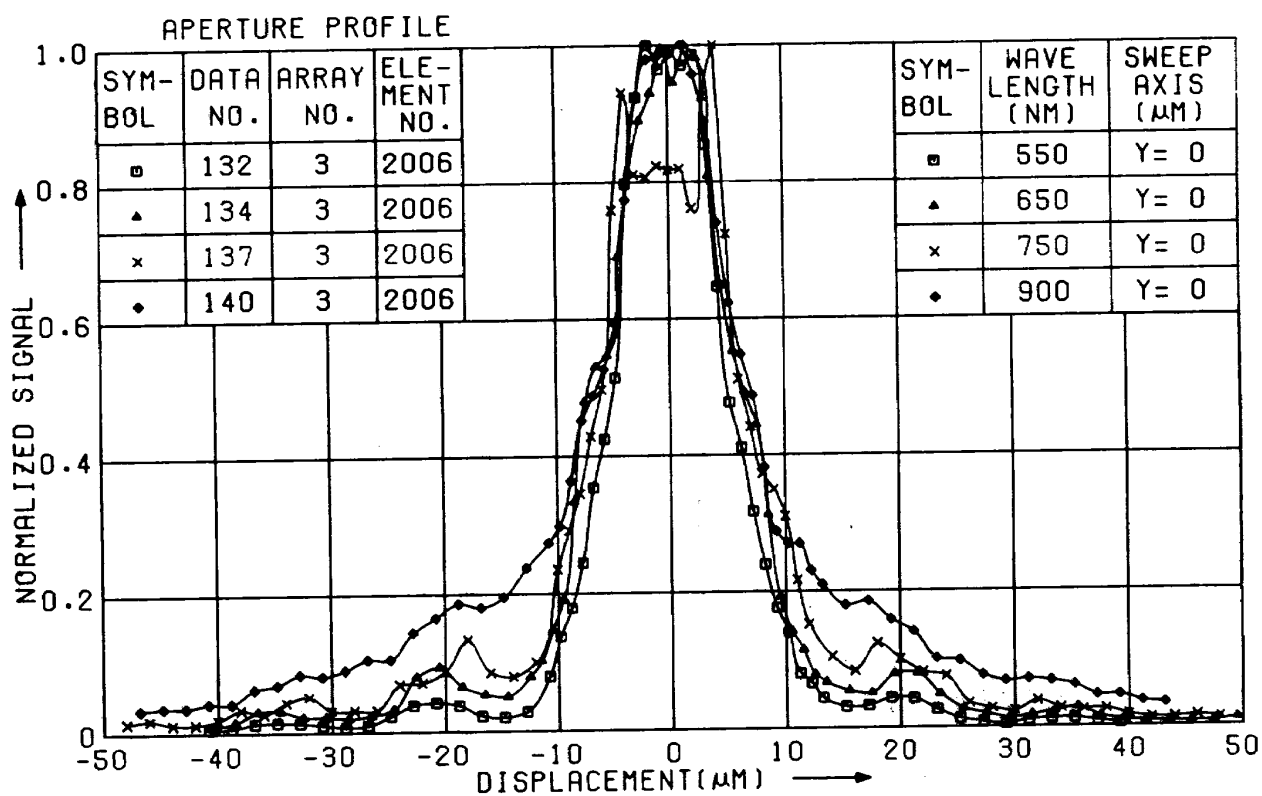
付図 3.7



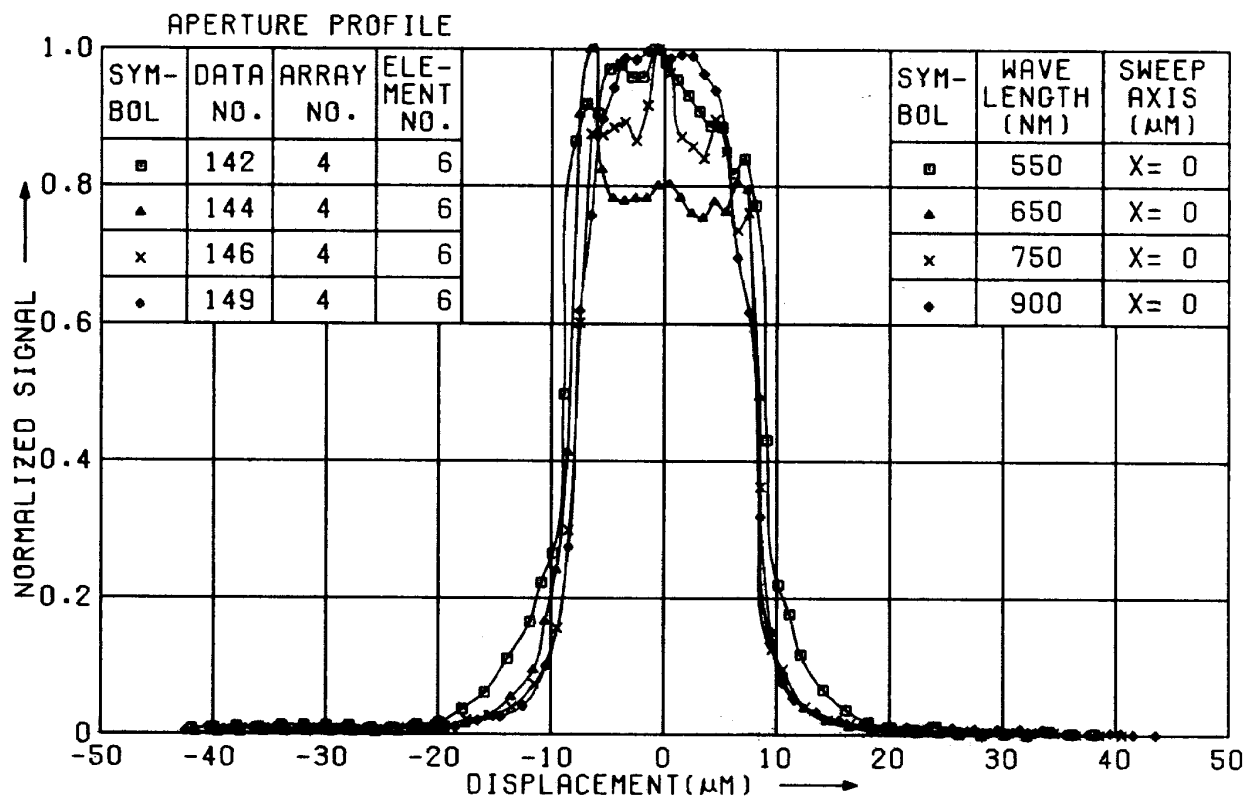
付図 3.8



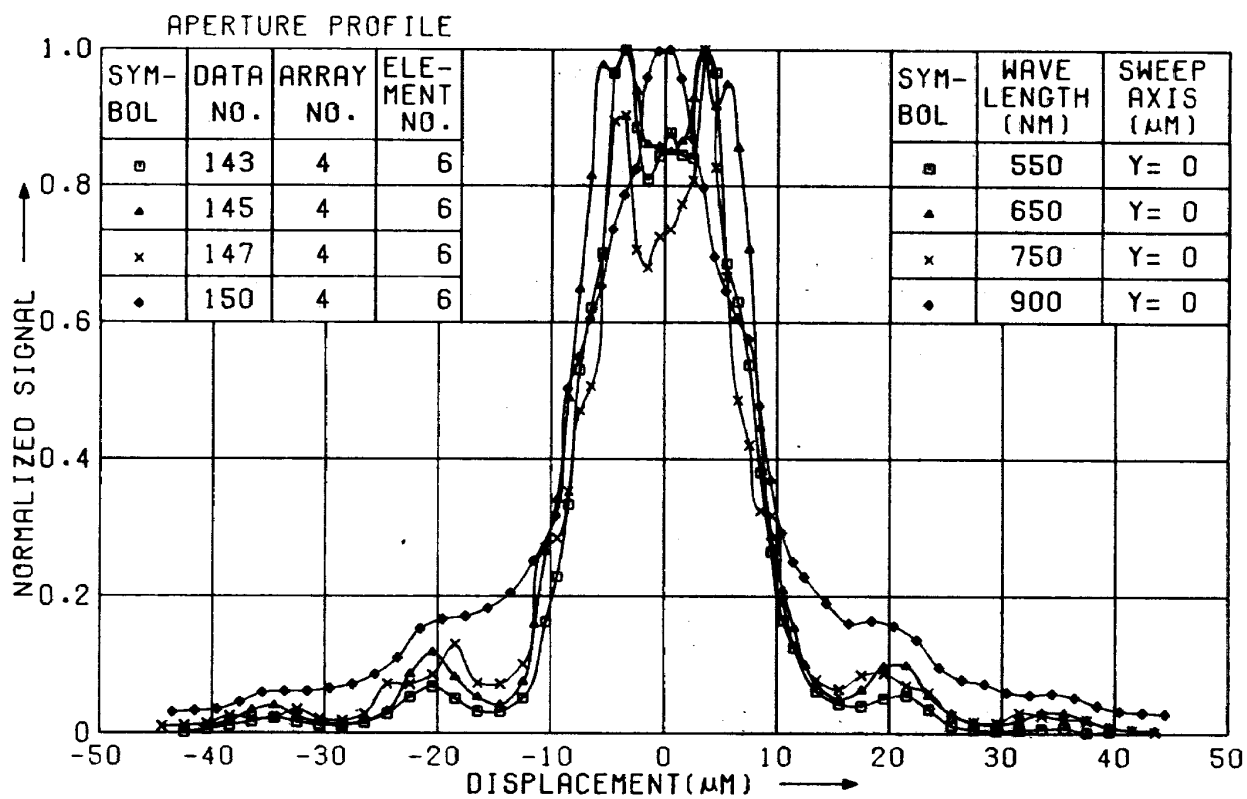
付図 3.9



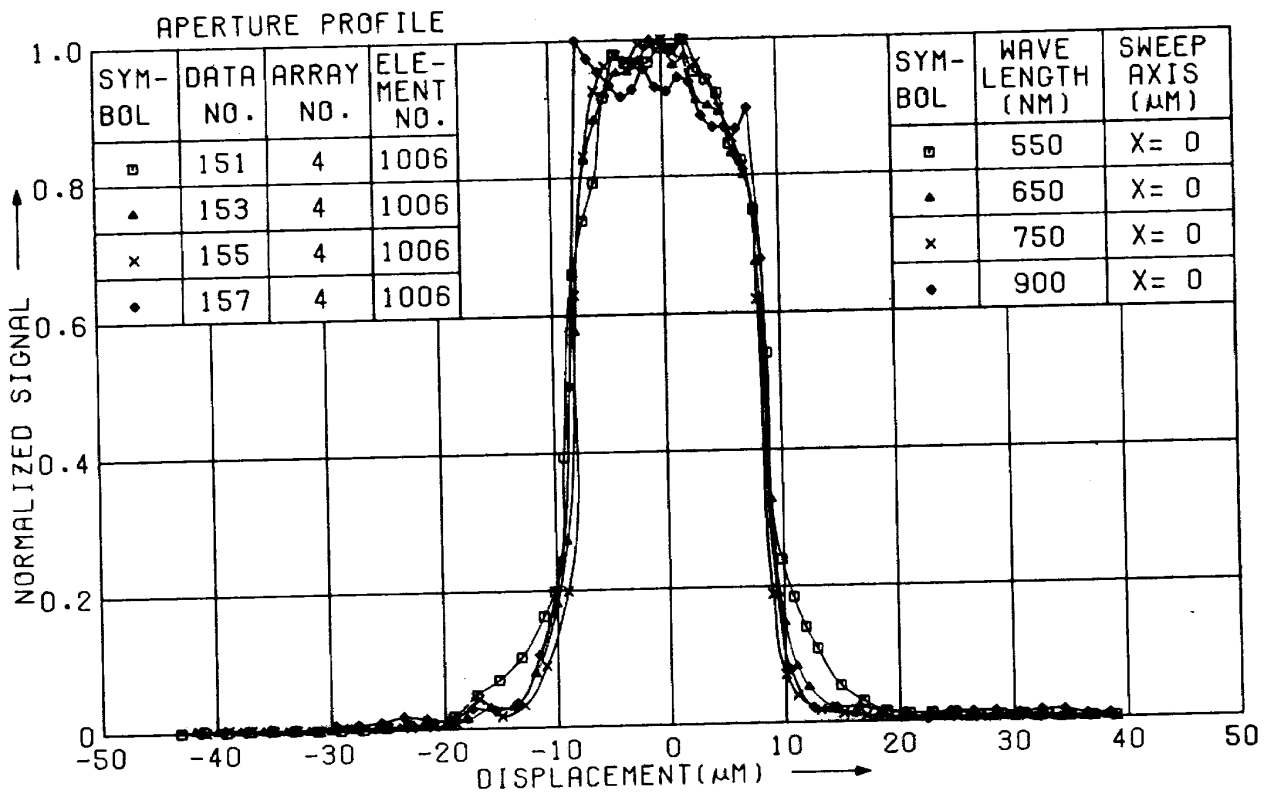
付図 3.10



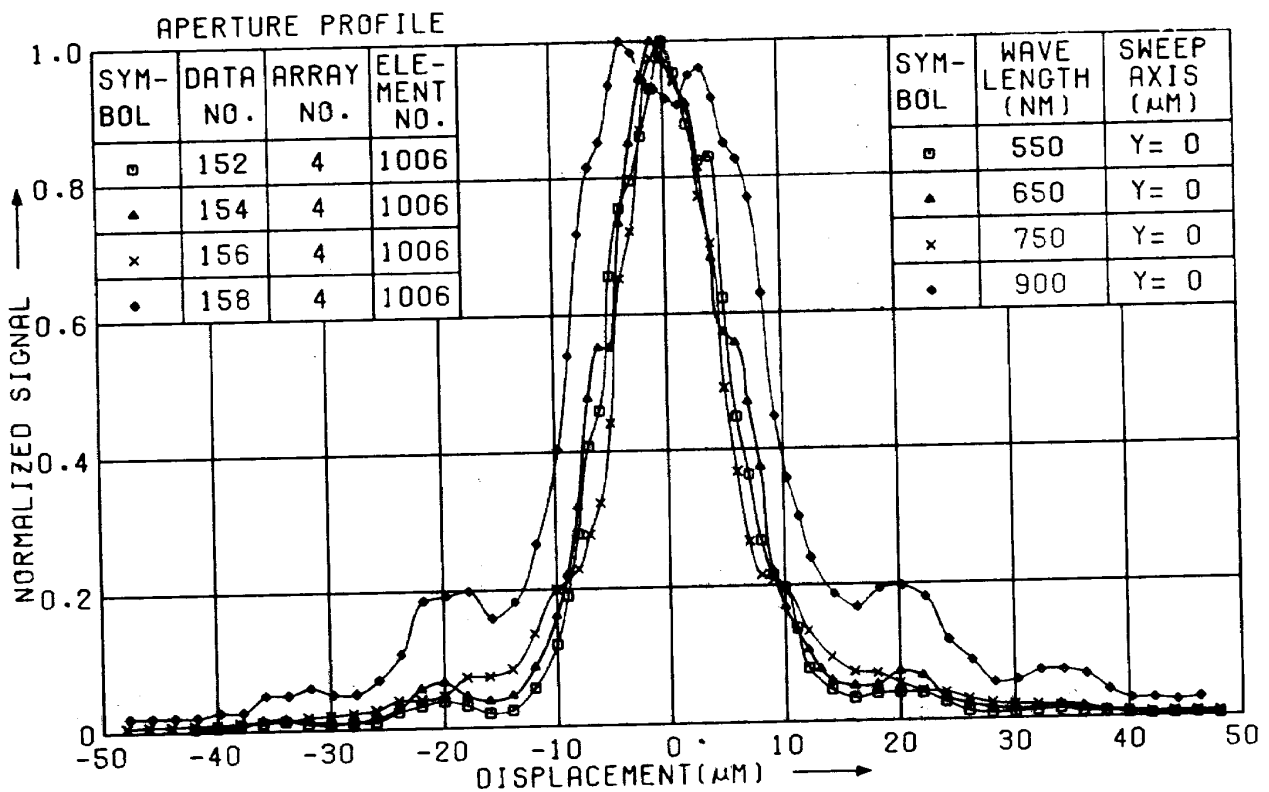
付図 3.11



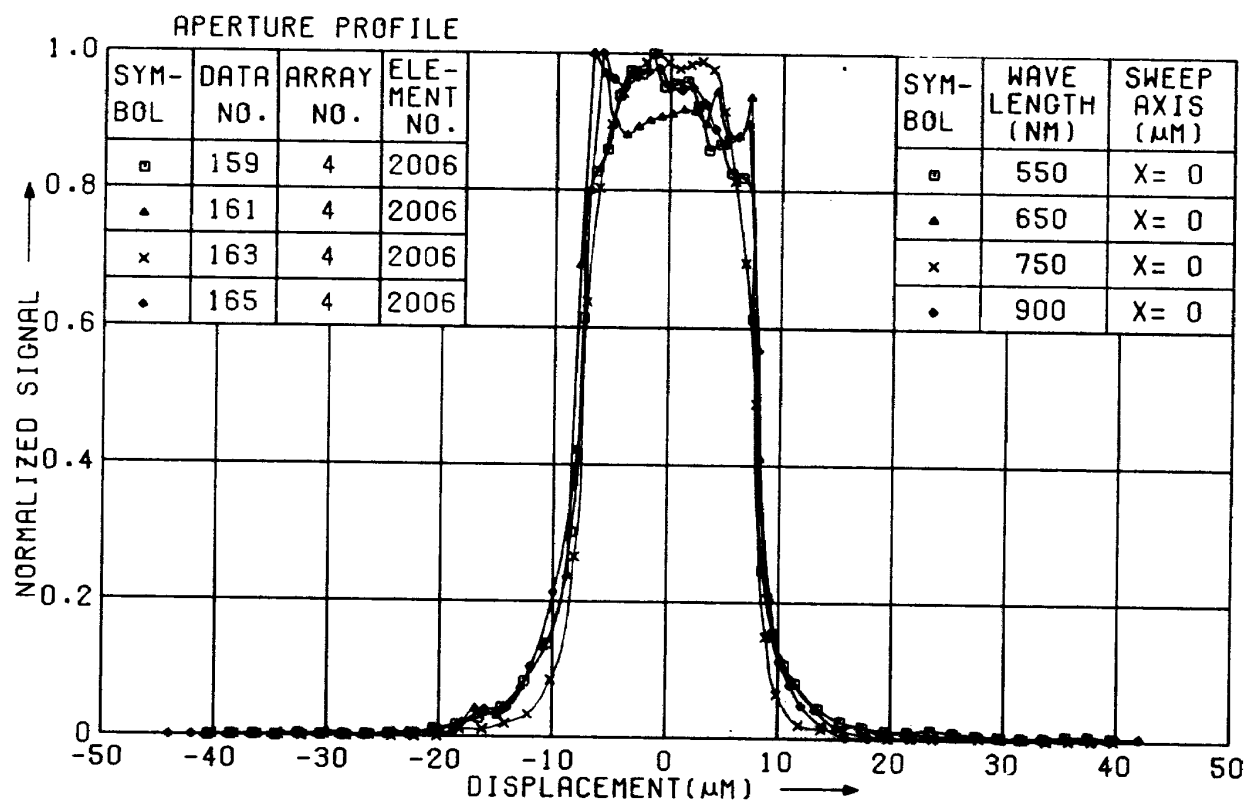
付図 3.12



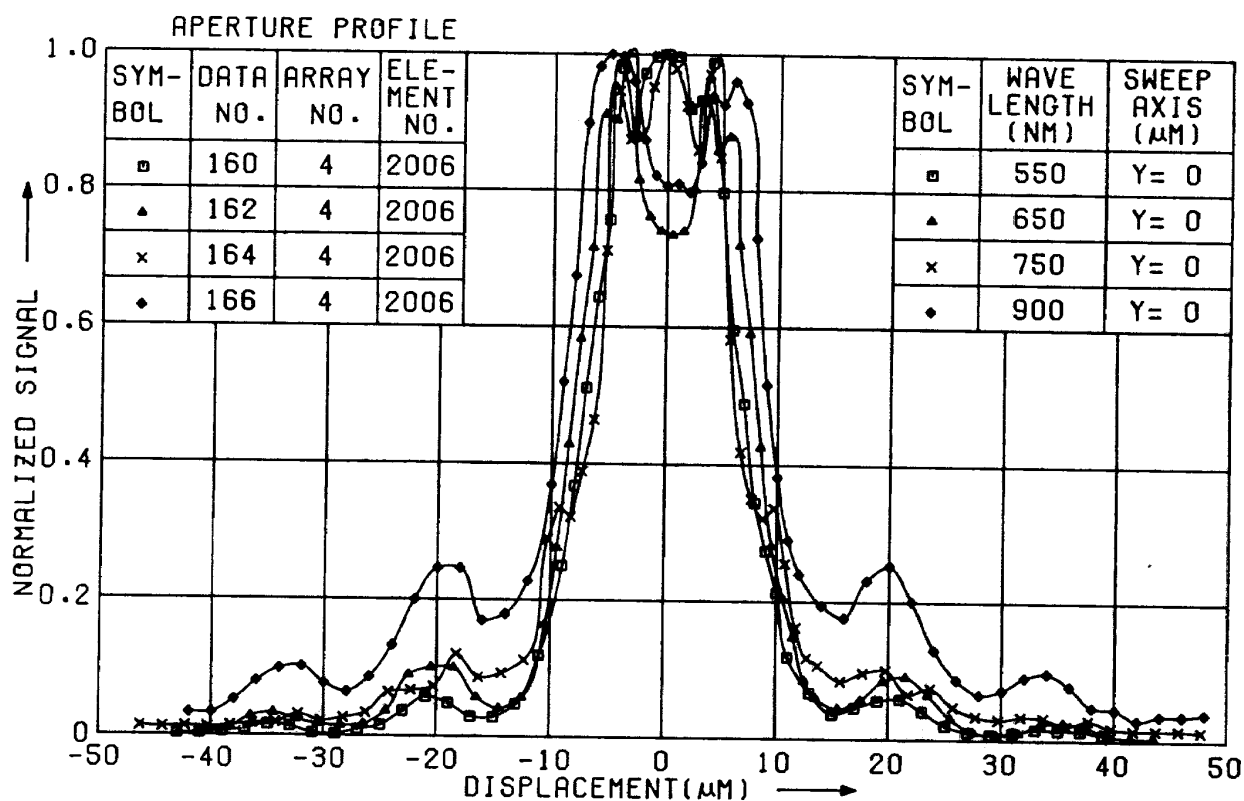
付図 3.13



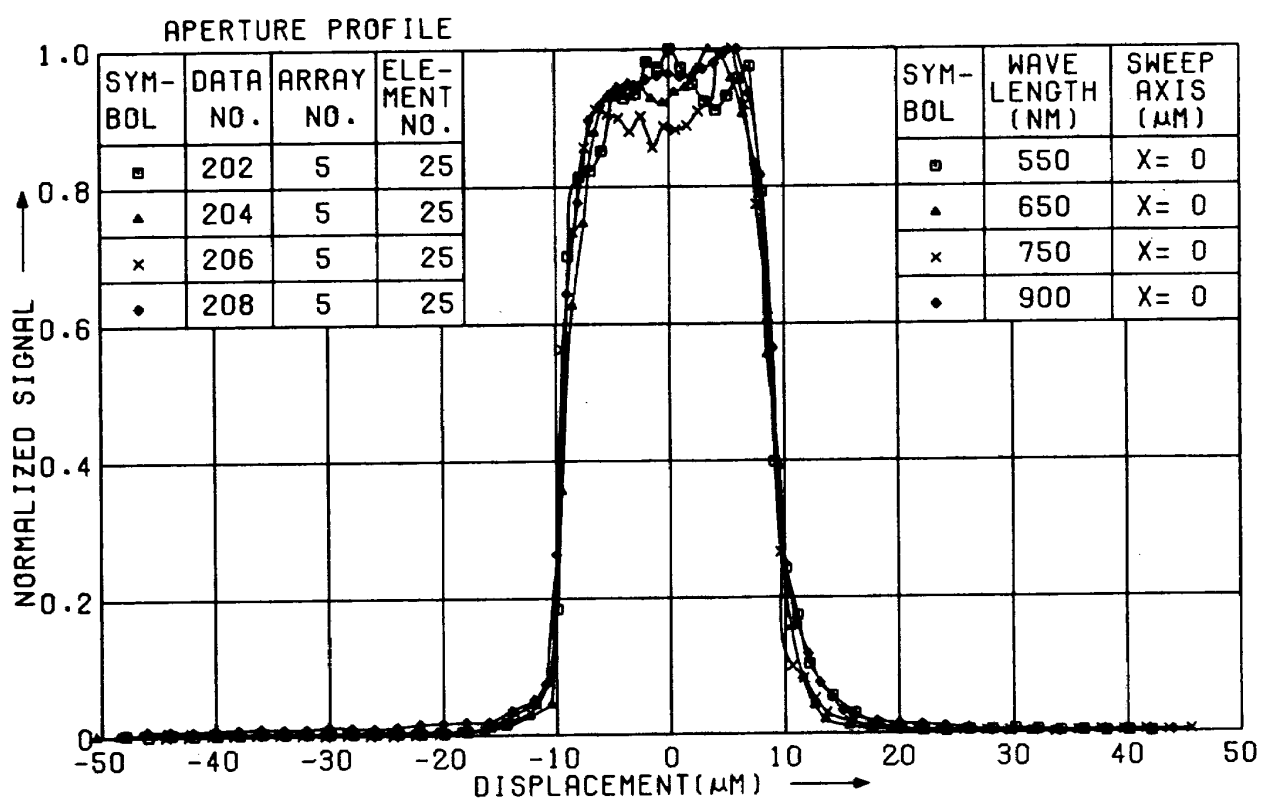
付図 3.14



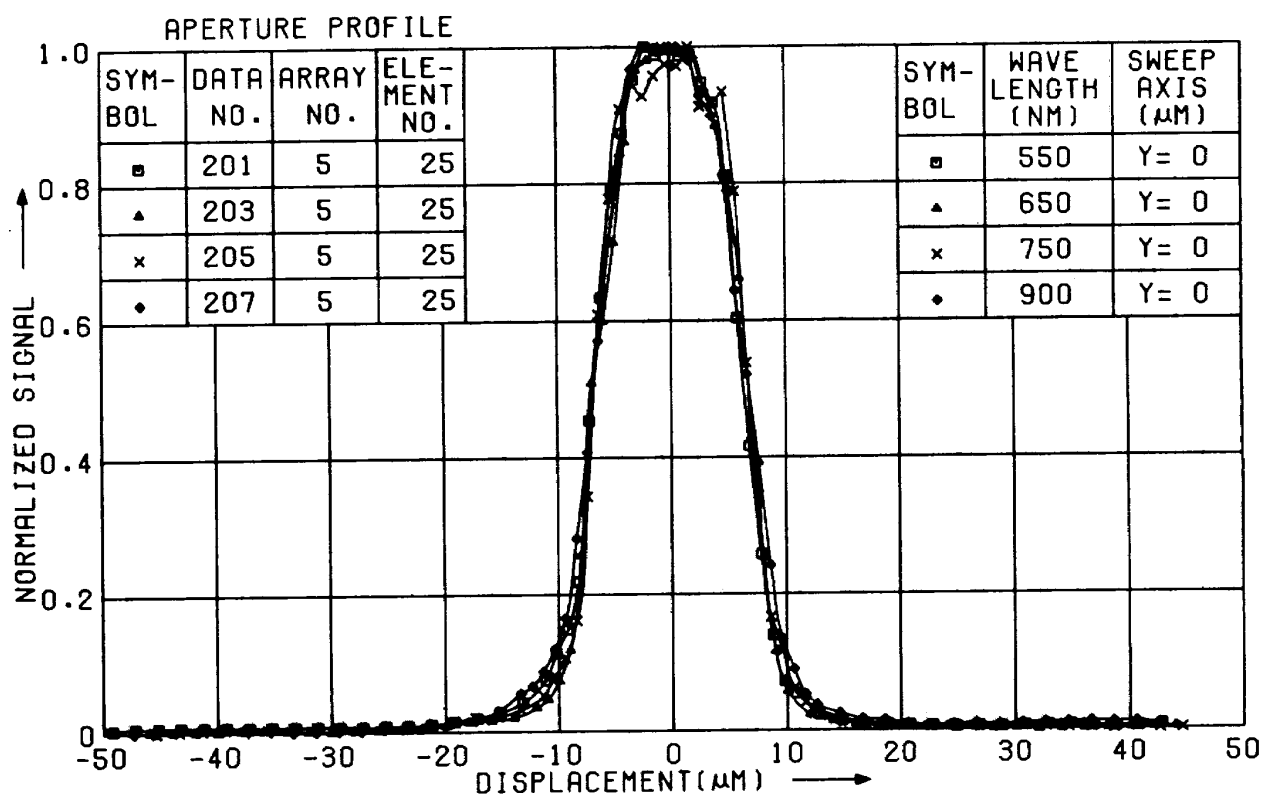
付図 3.15



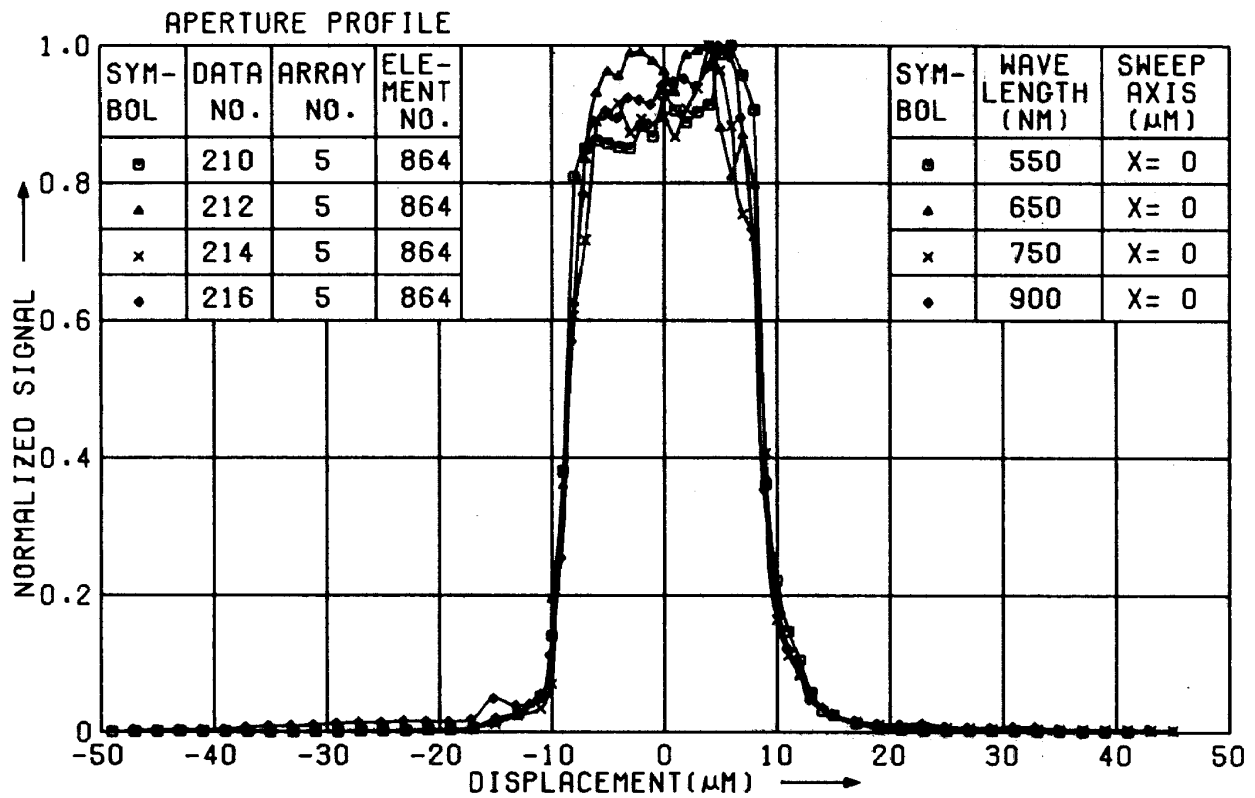
付図 3.16



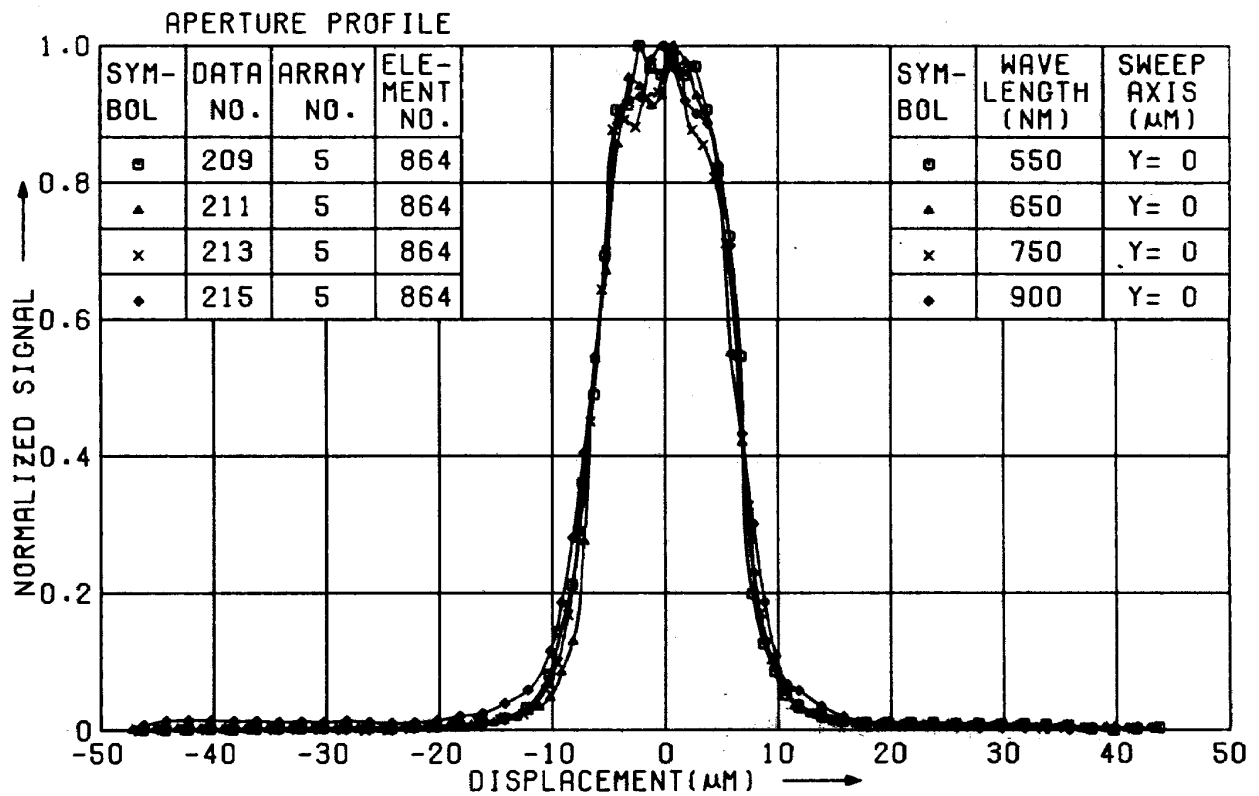
付図 3.17



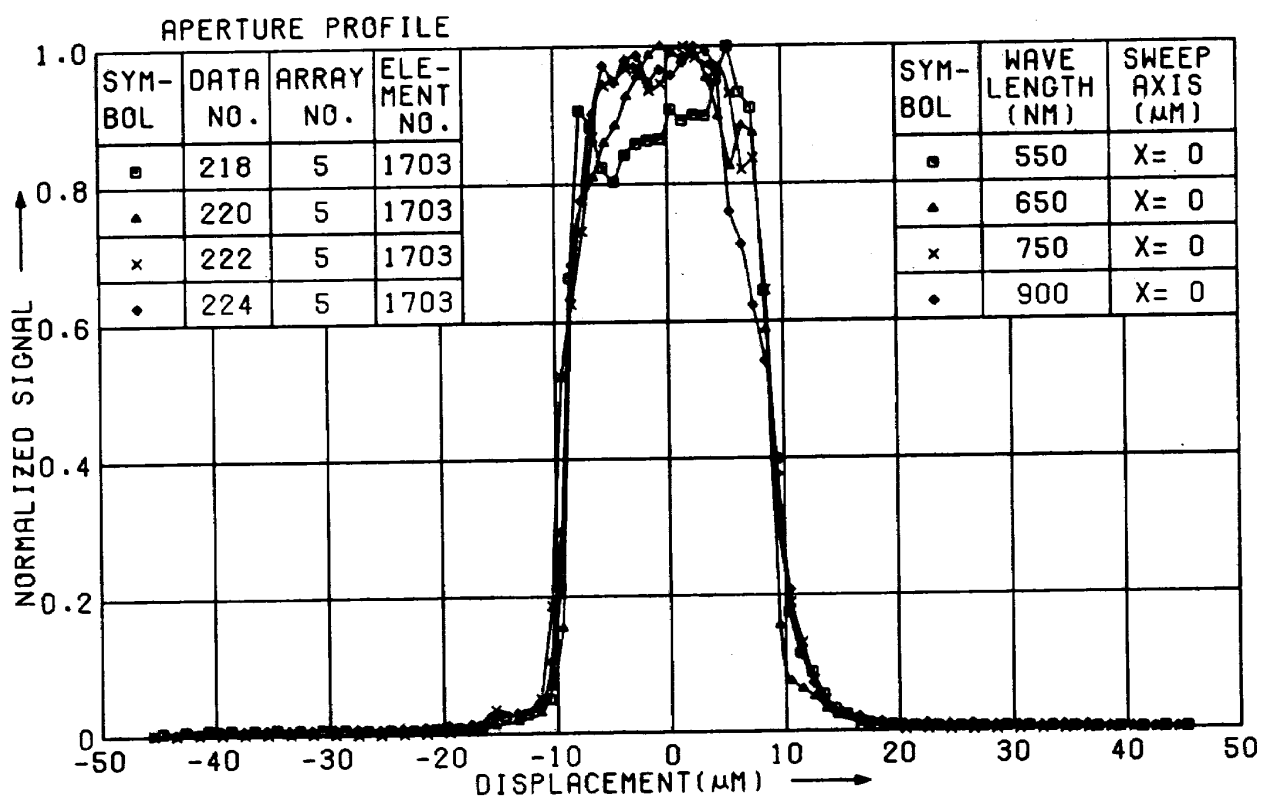
付図 3.18



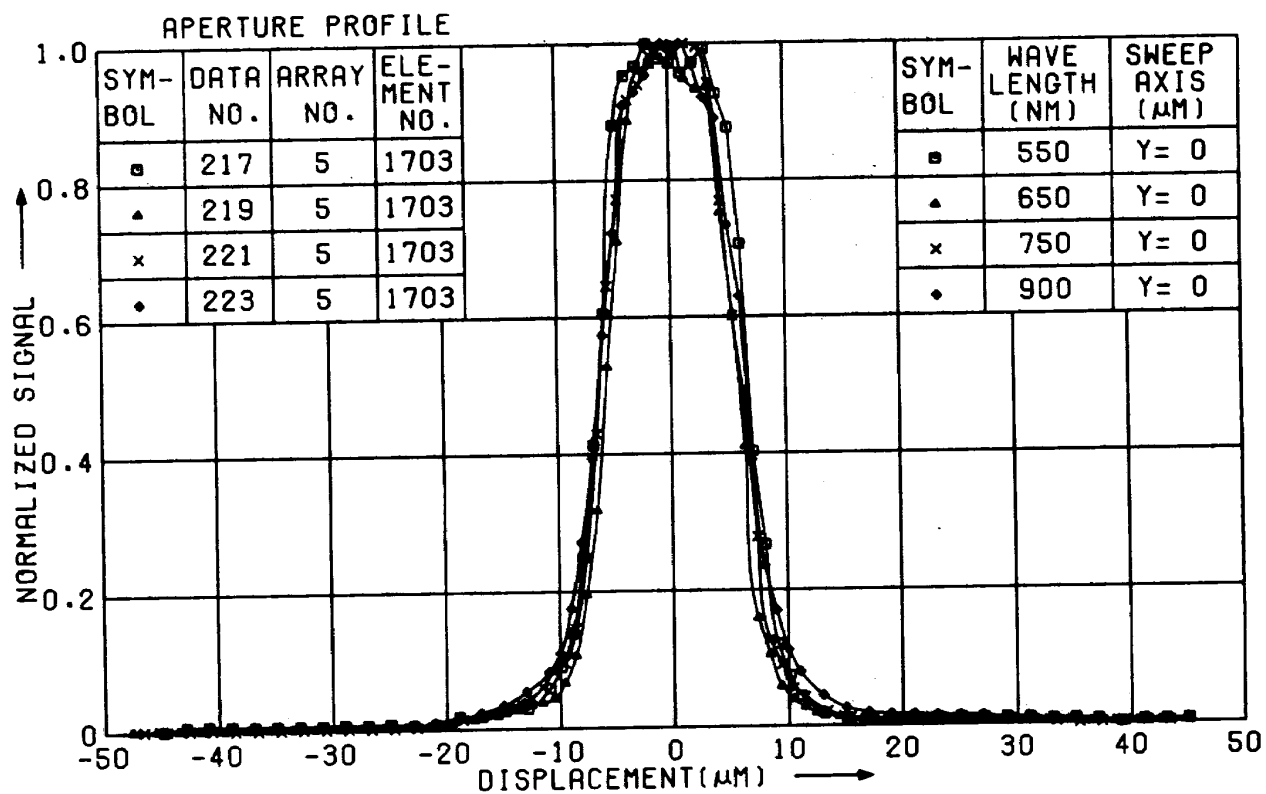
付図 3.19



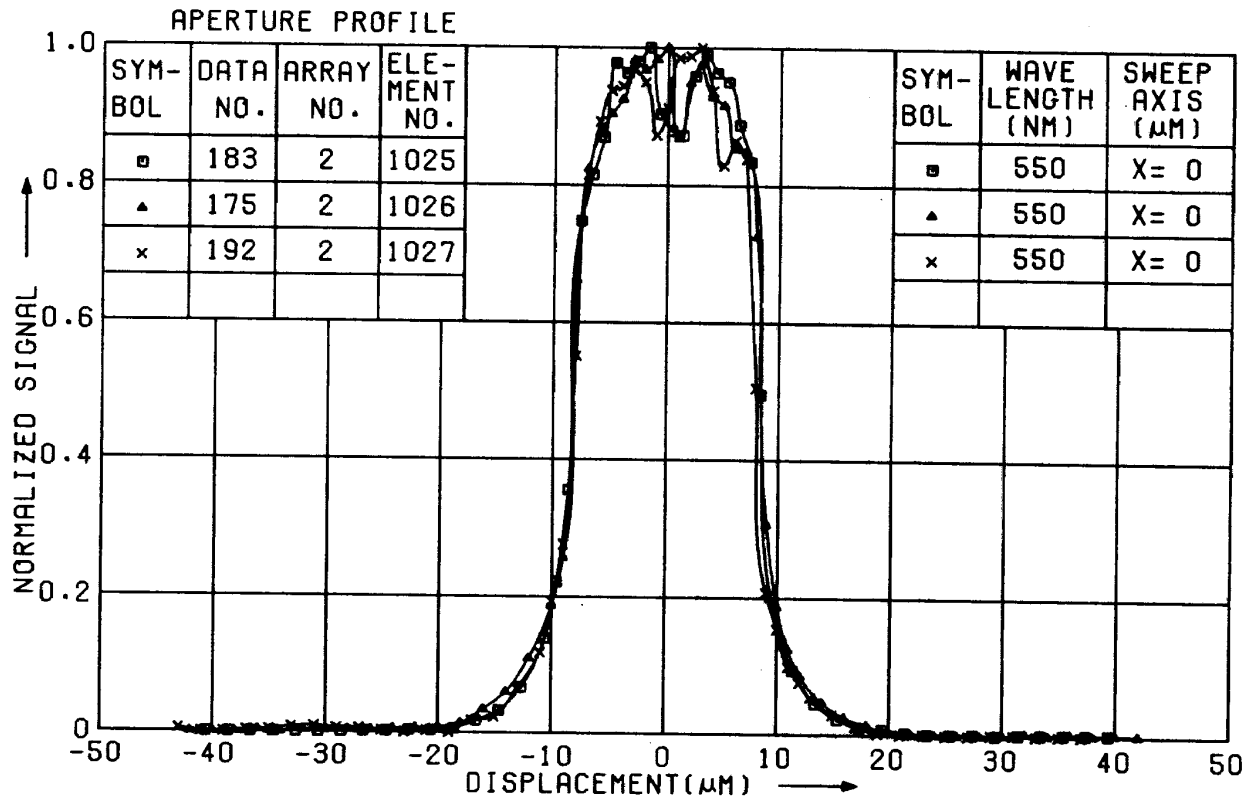
付図 3.20



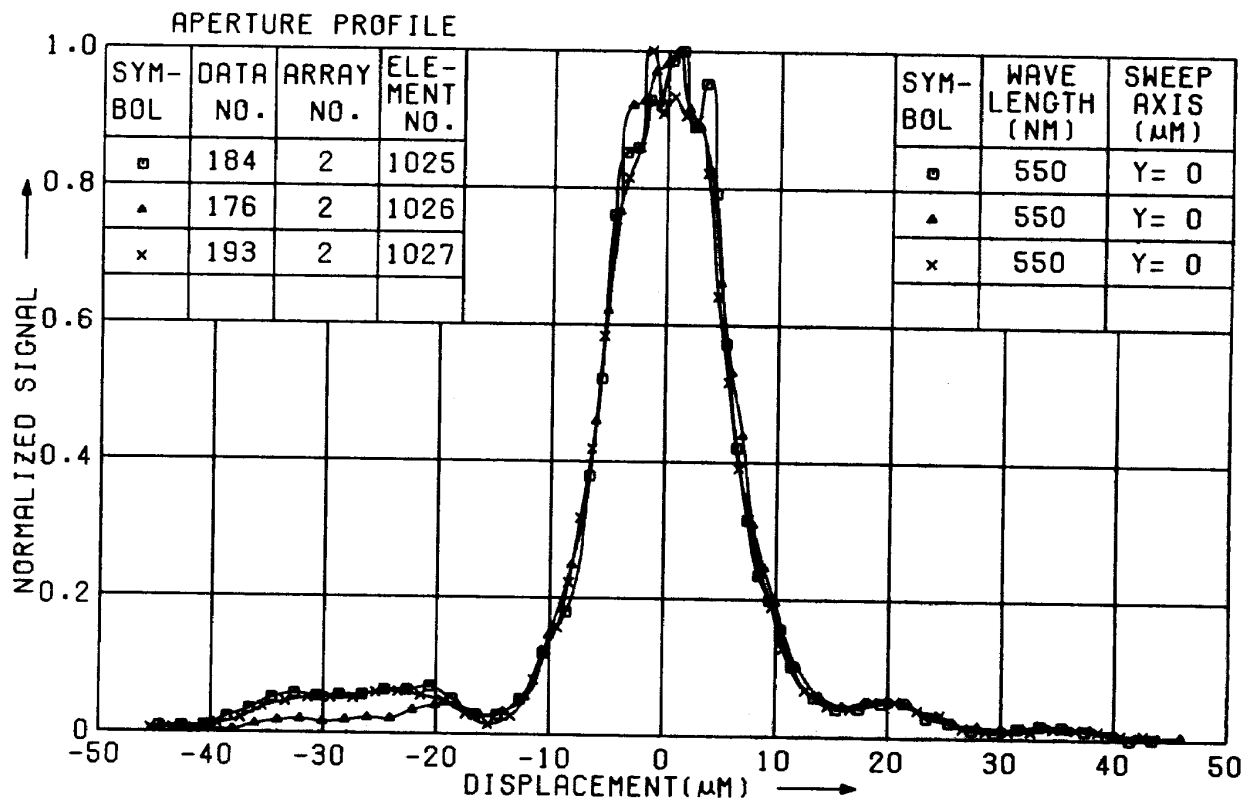
付図 3. 21



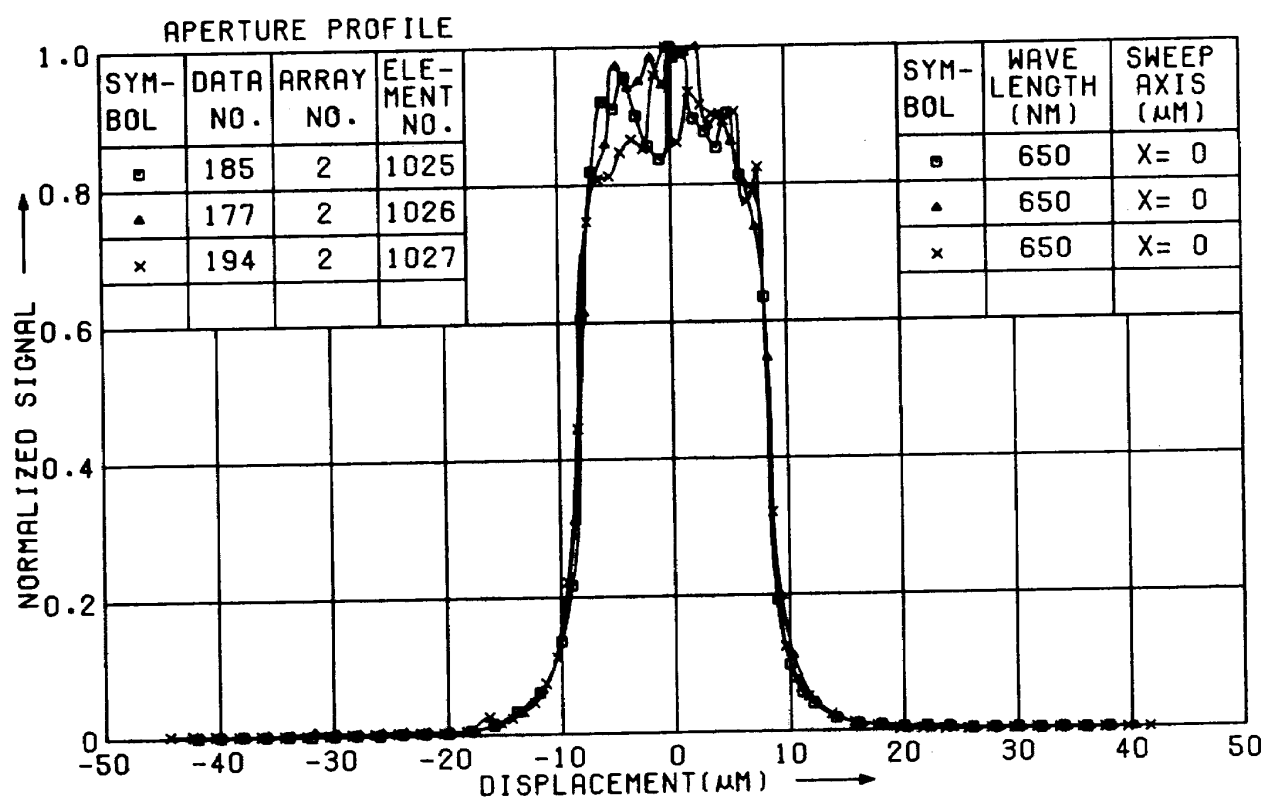
付図 3. 22



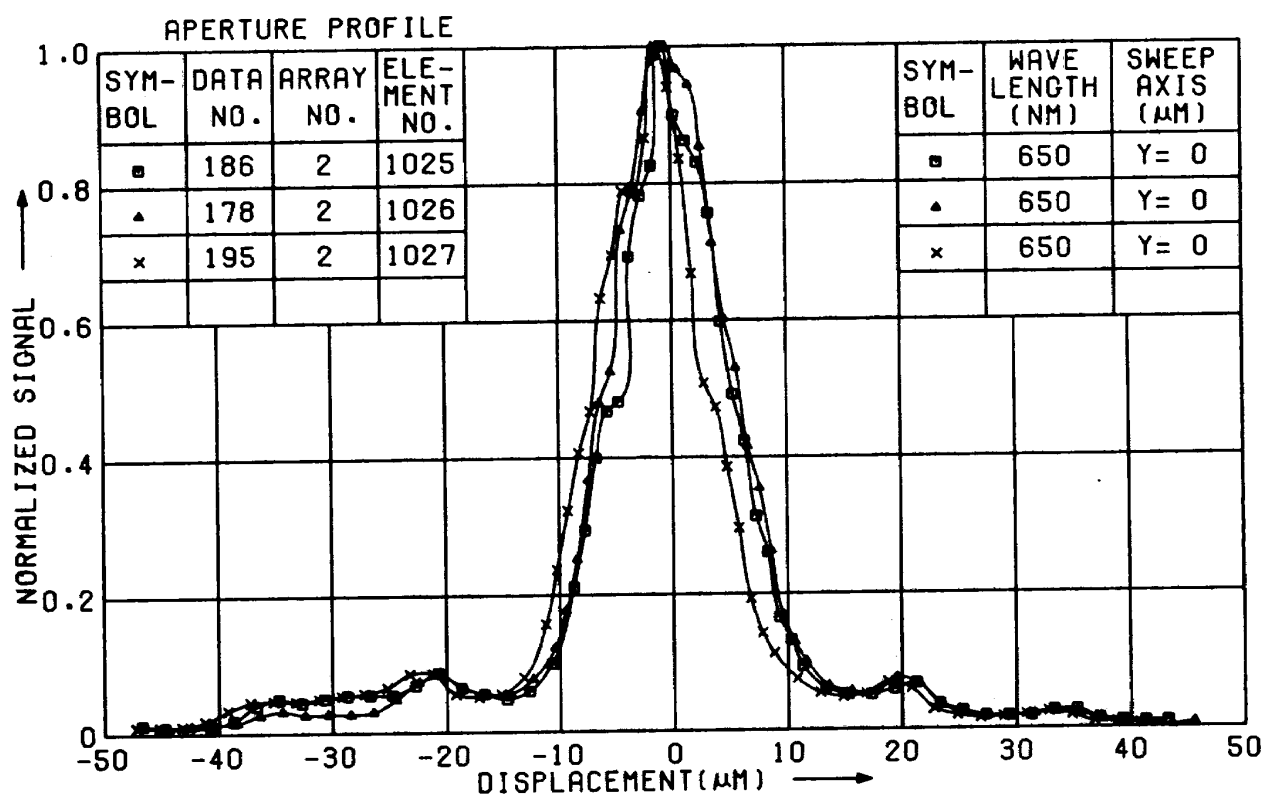
付図 3. 23



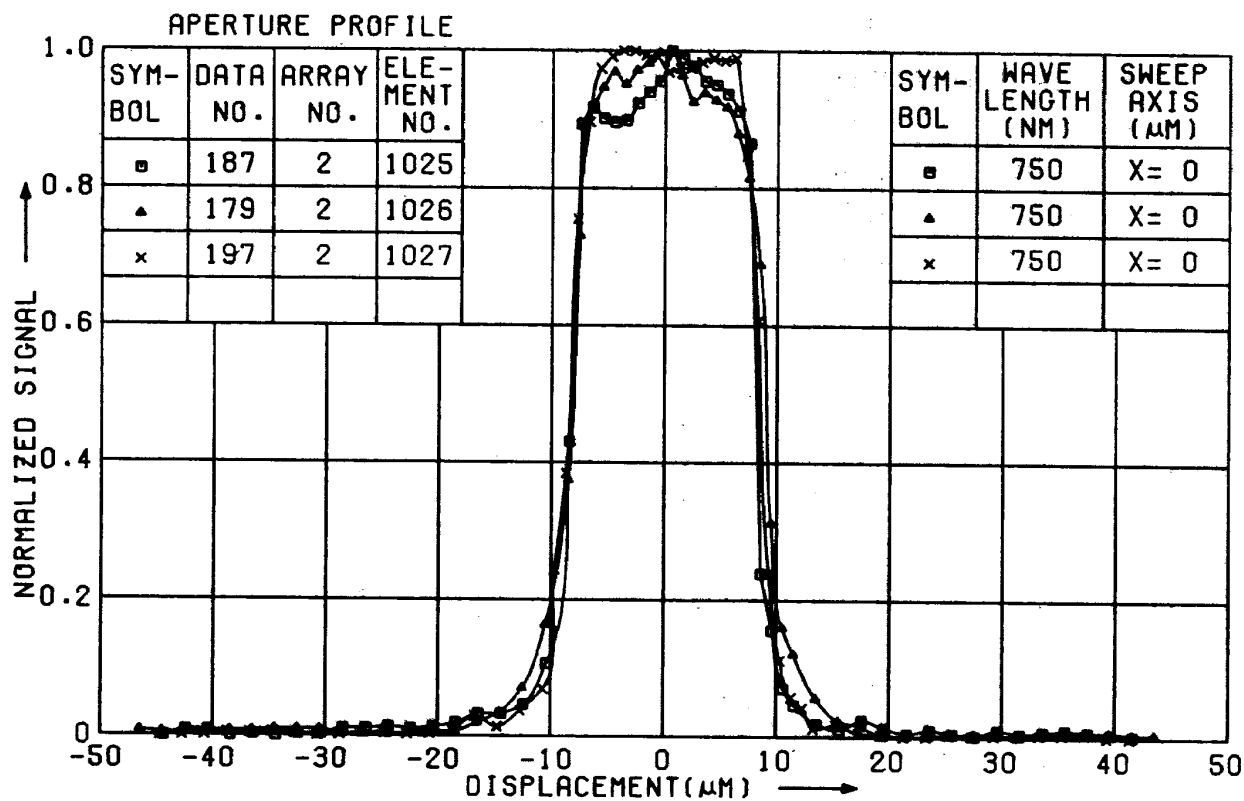
付図 3. 24



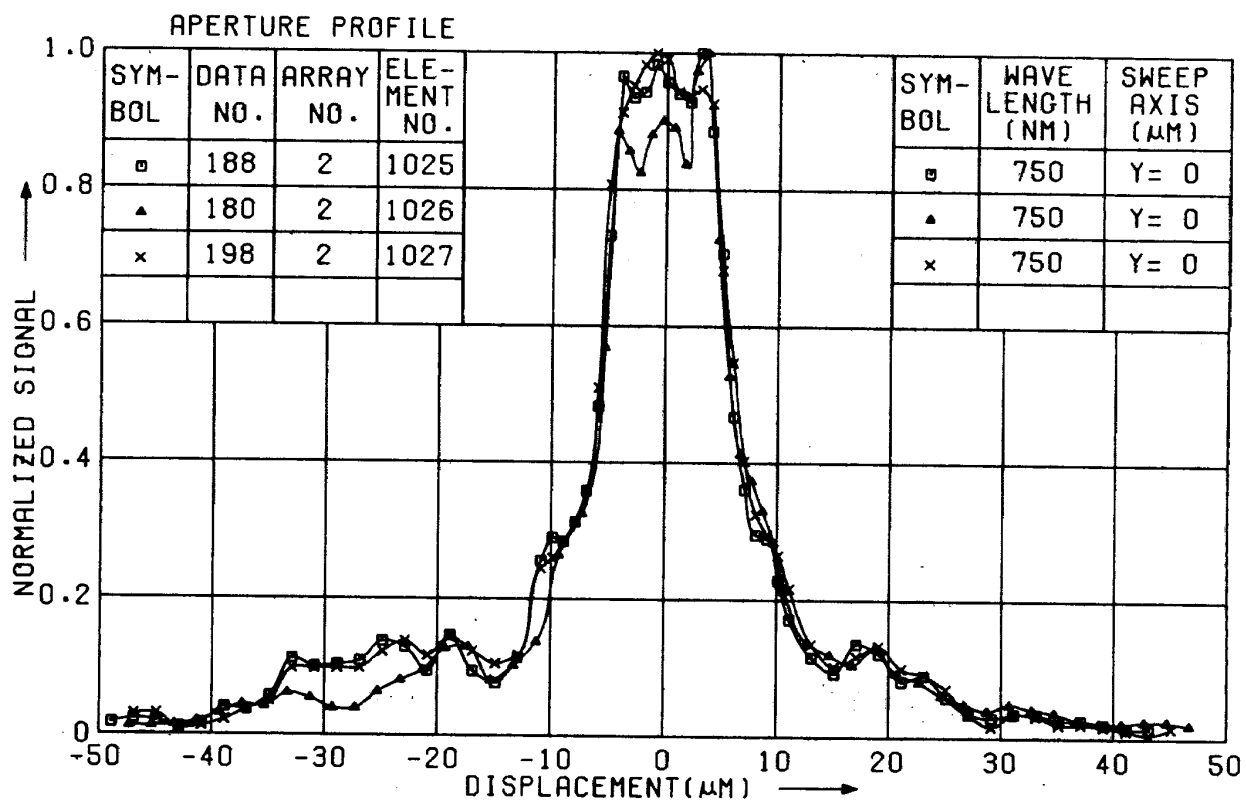
付図 3.25



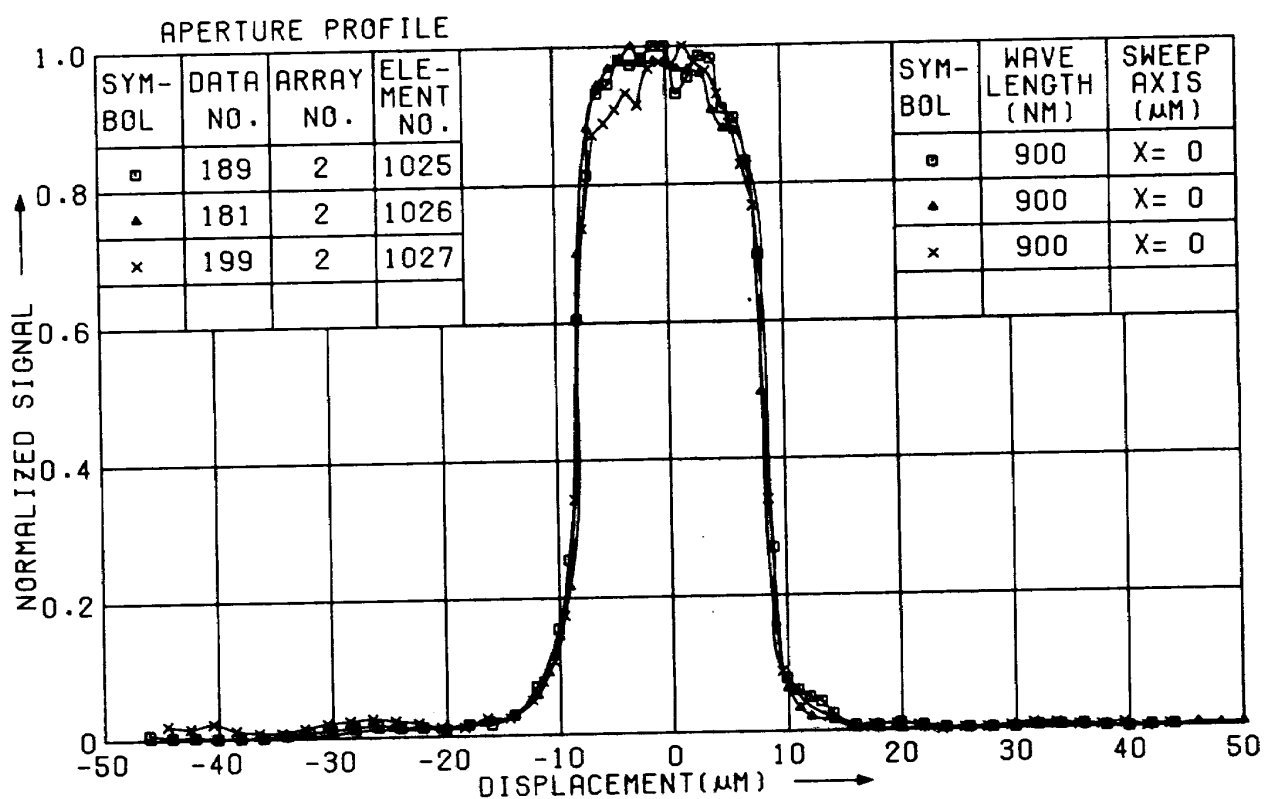
付図 3.26



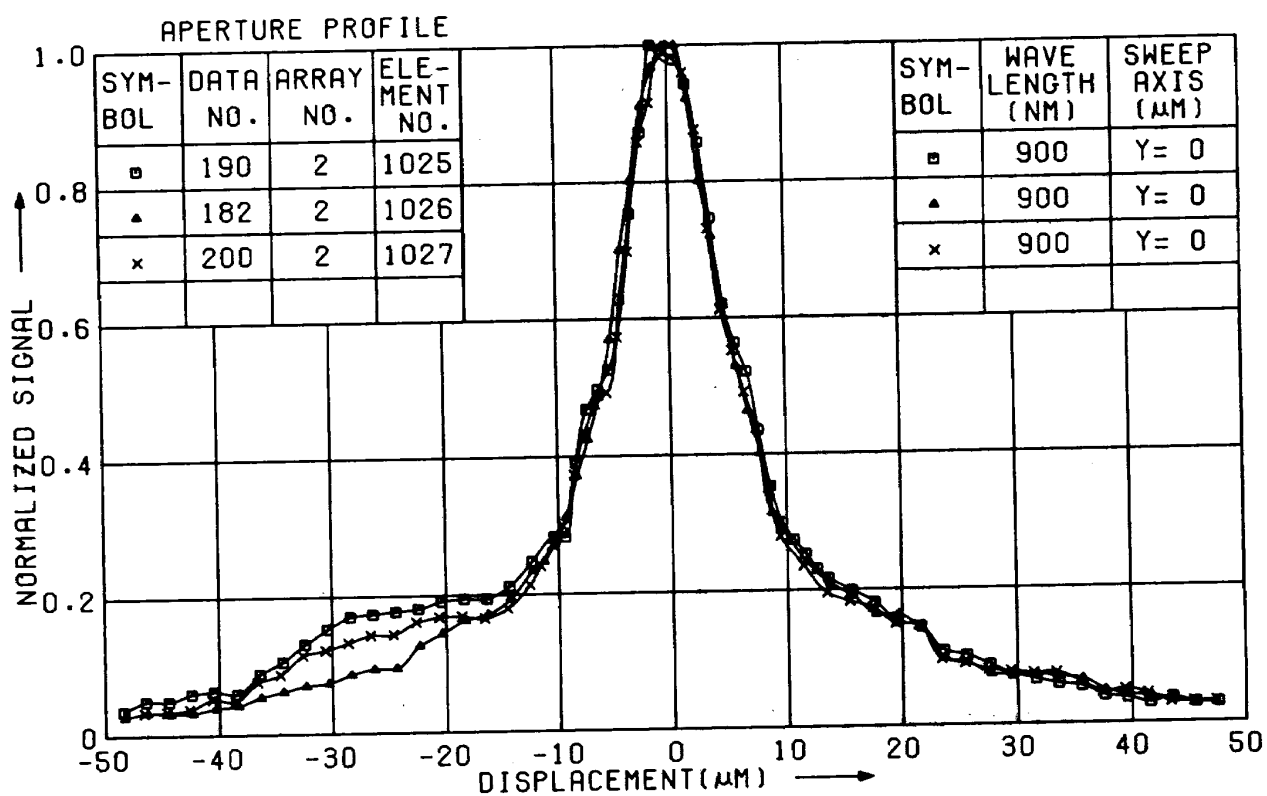
付図 3. 27



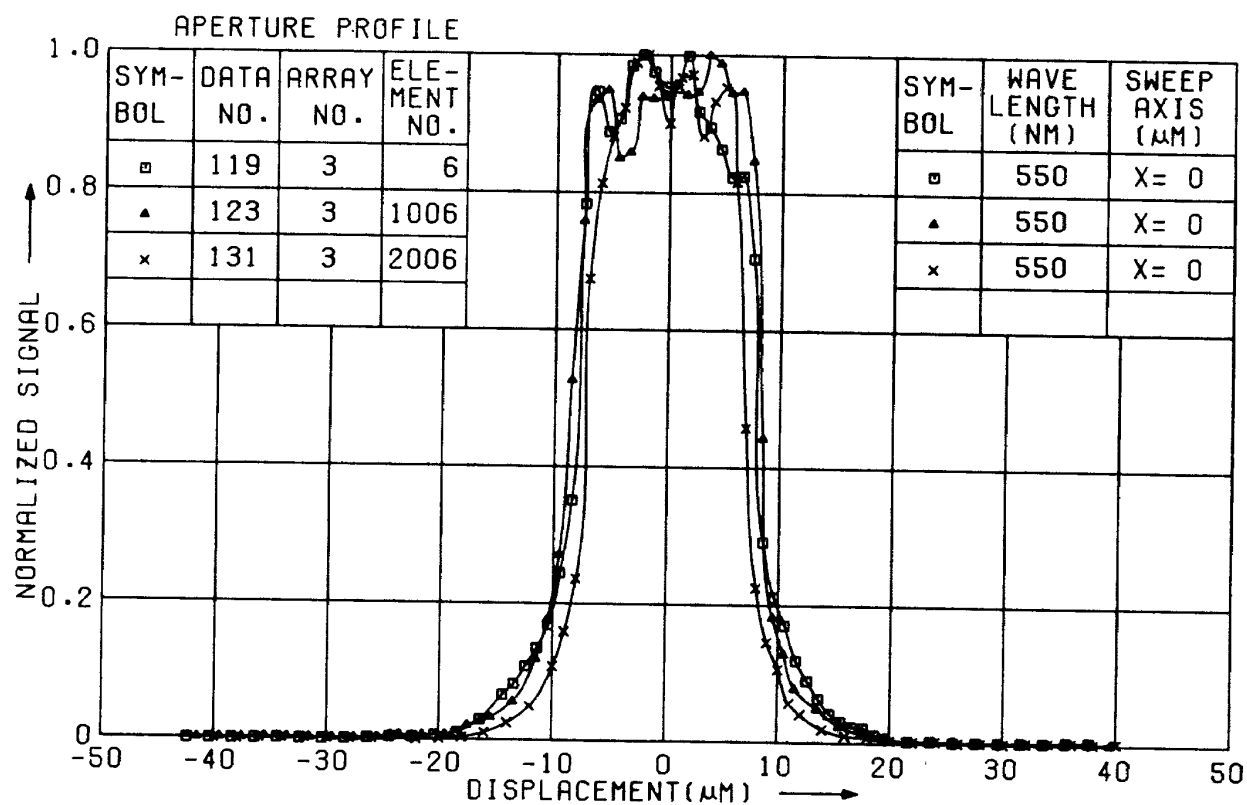
付図 3. 28



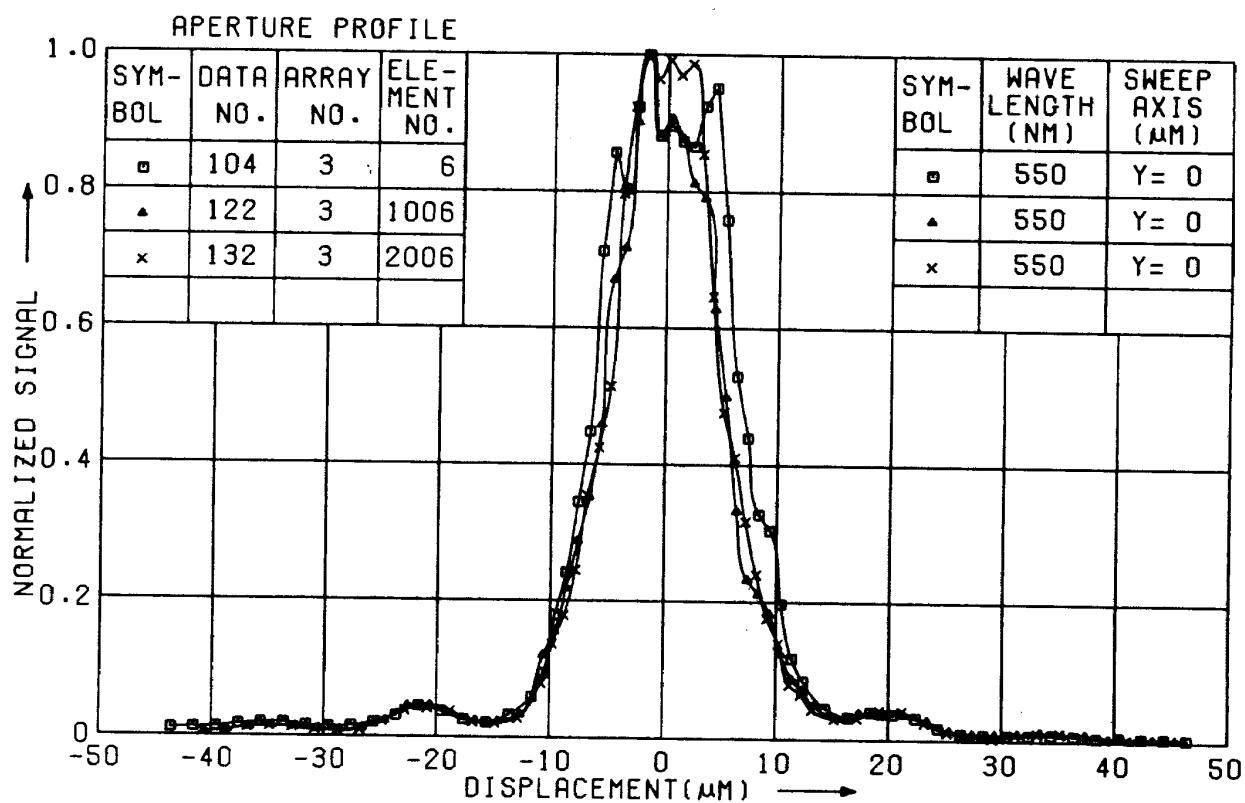
付図 3. 29



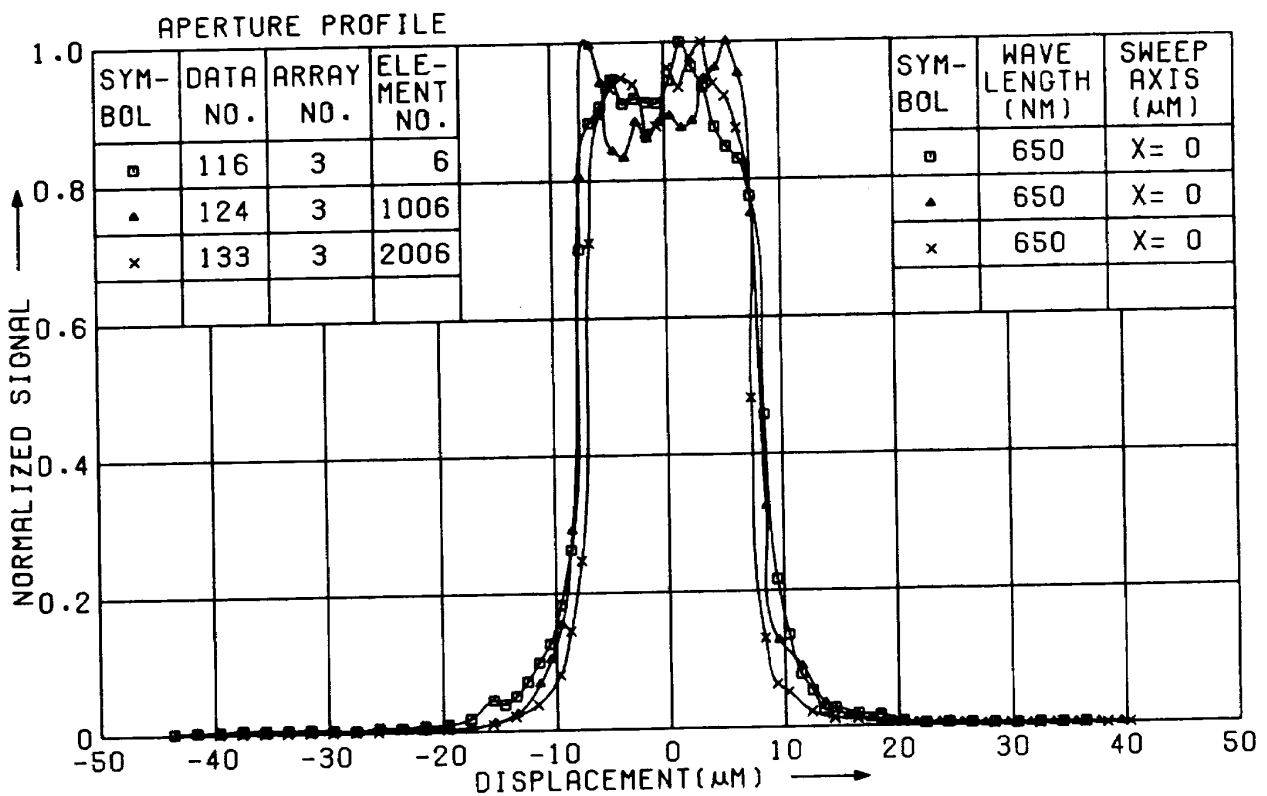
付図 3. 30



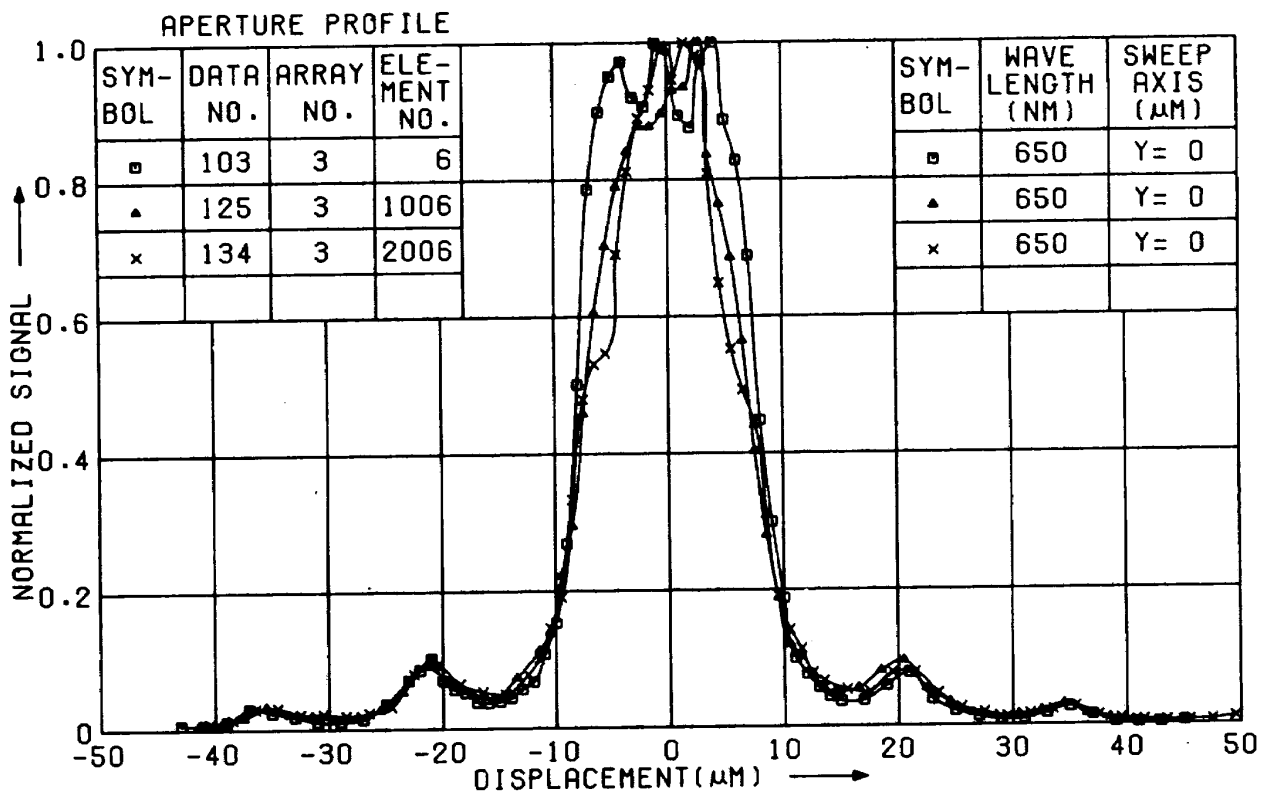
付図 3.31



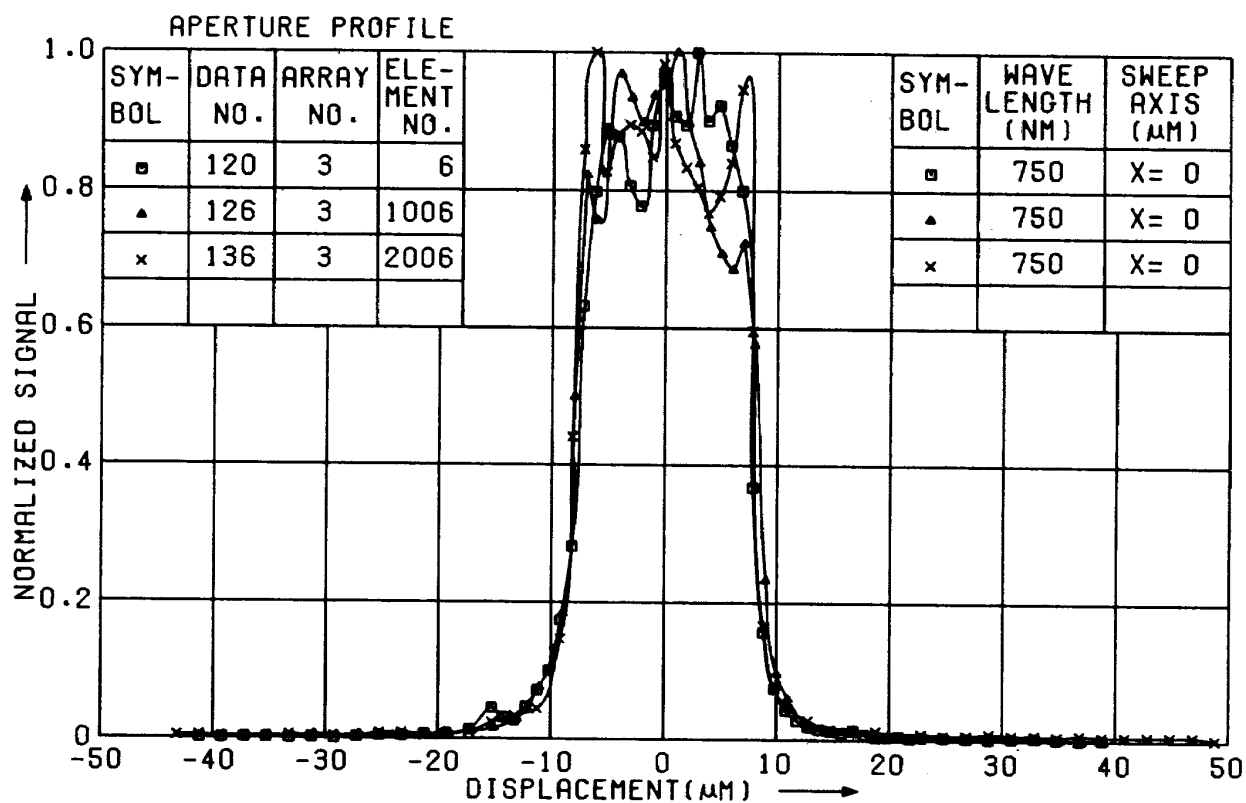
付図 3.32



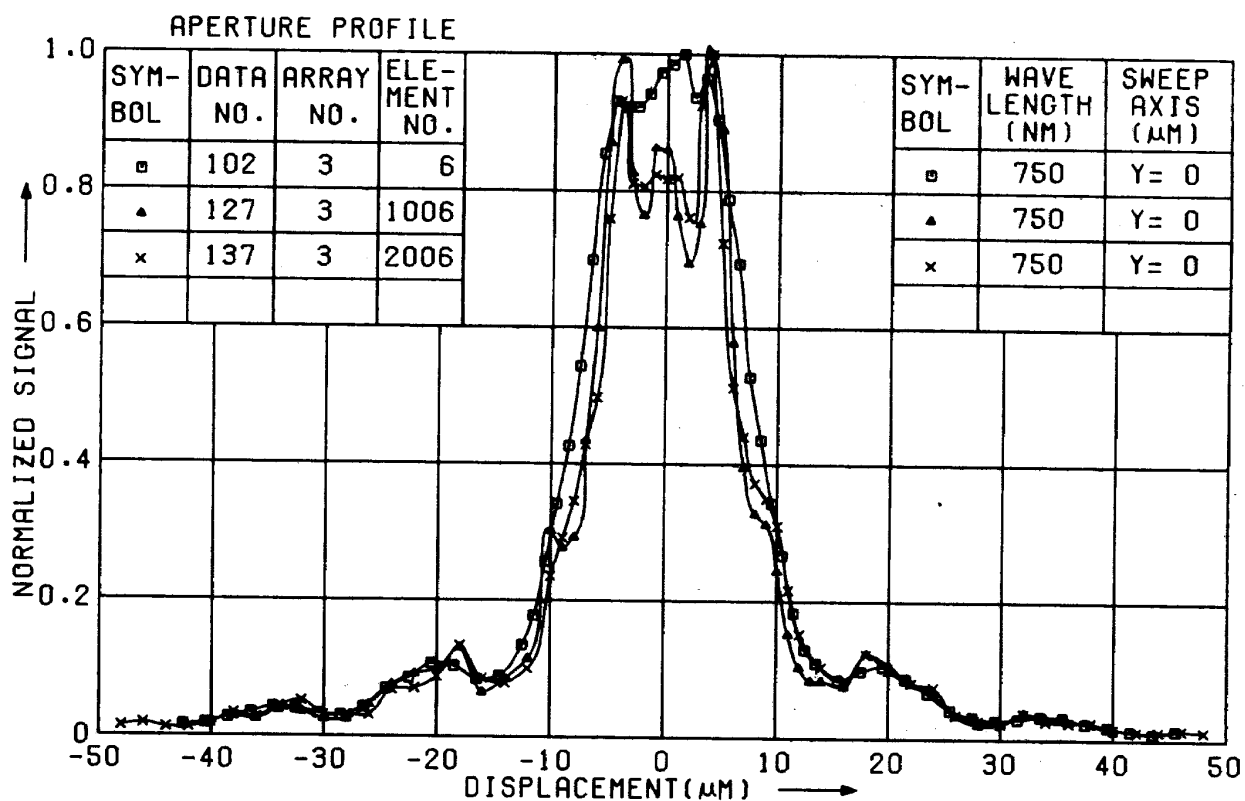
付図 3.33



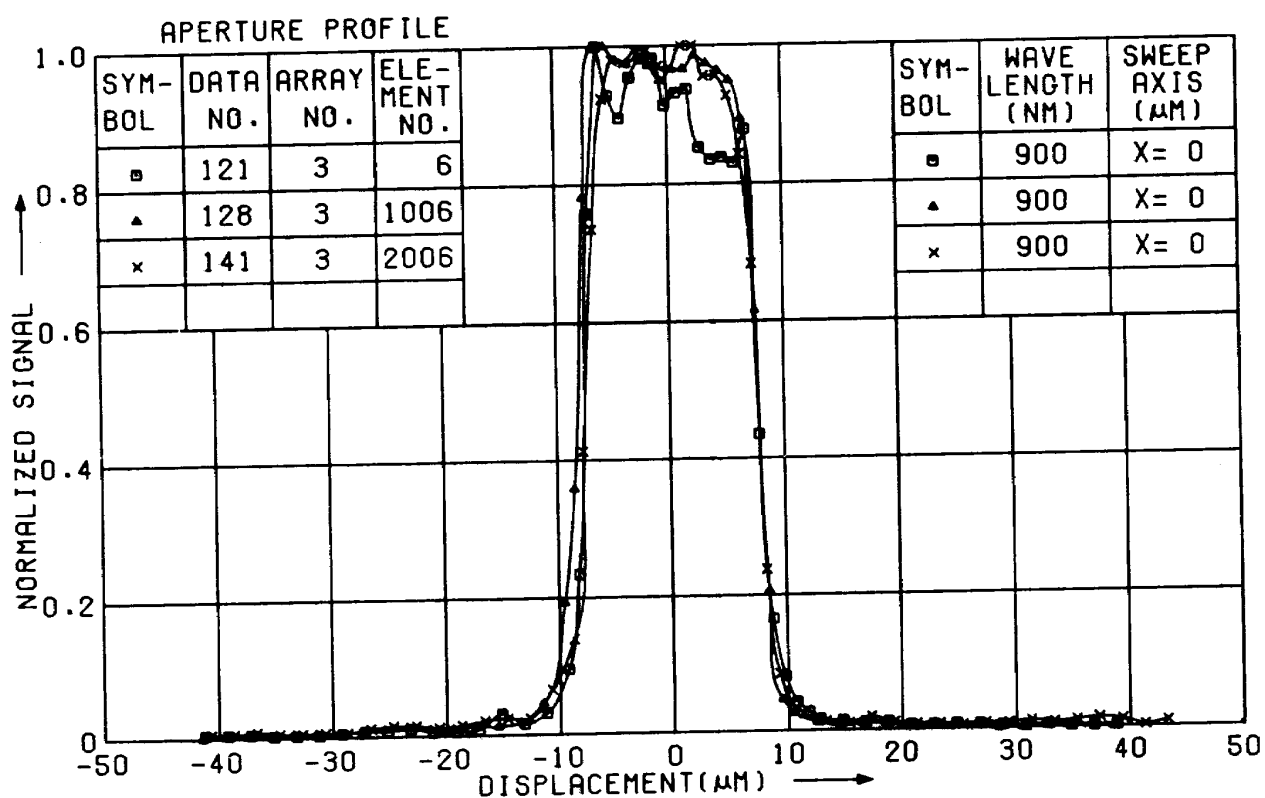
付図 3.34



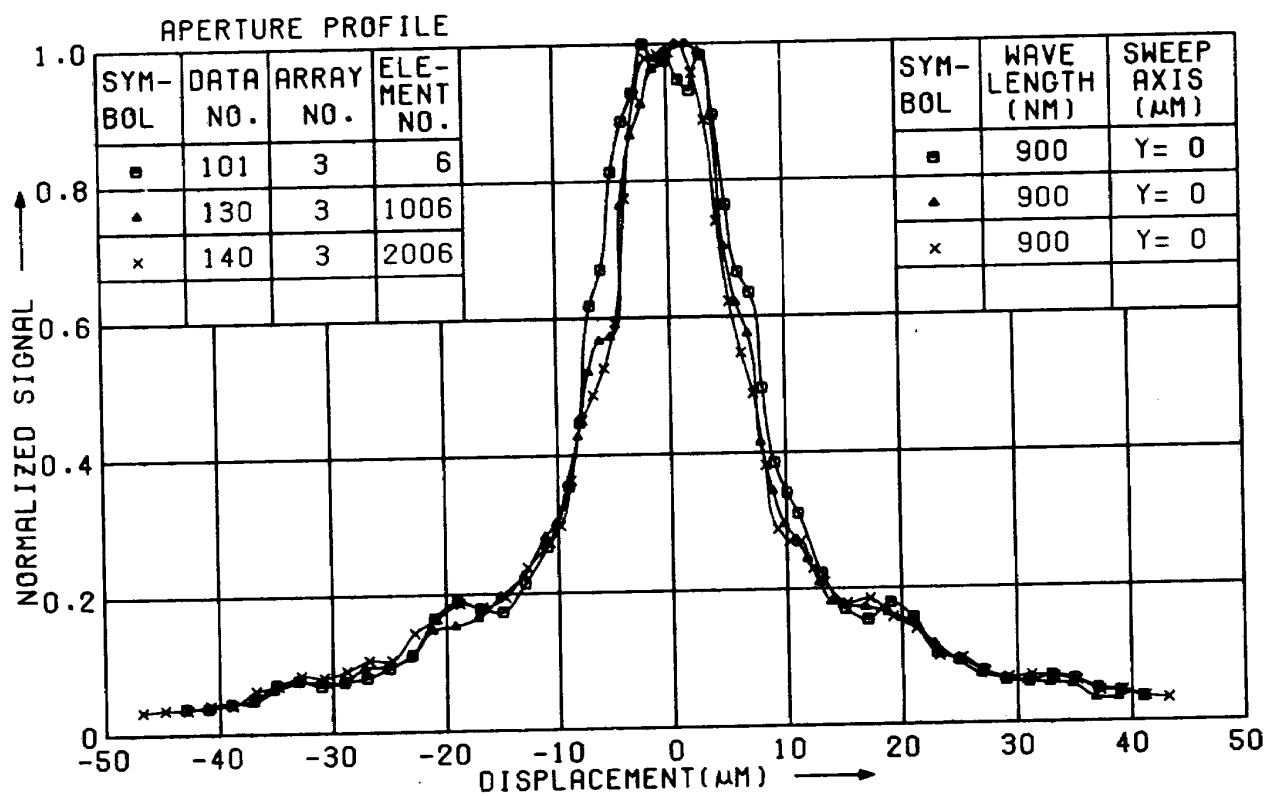
付図 3.35



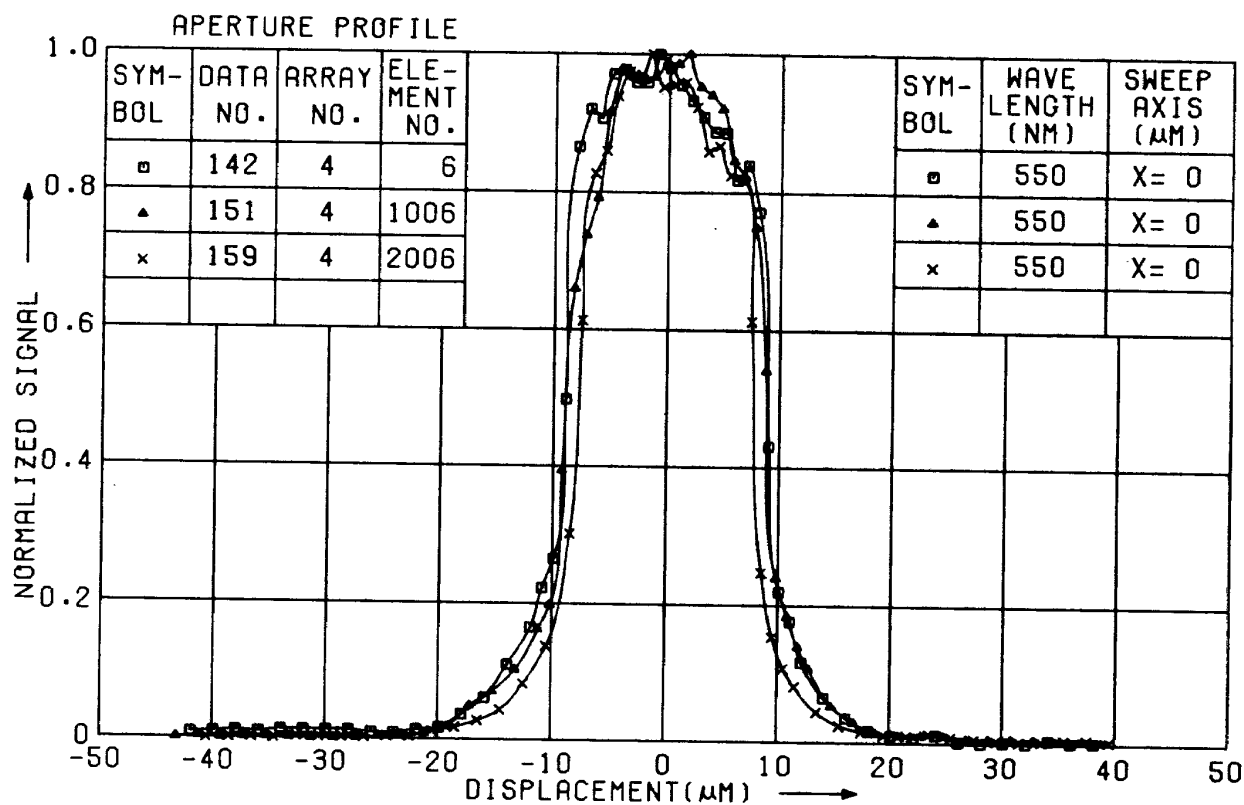
付図 3.36



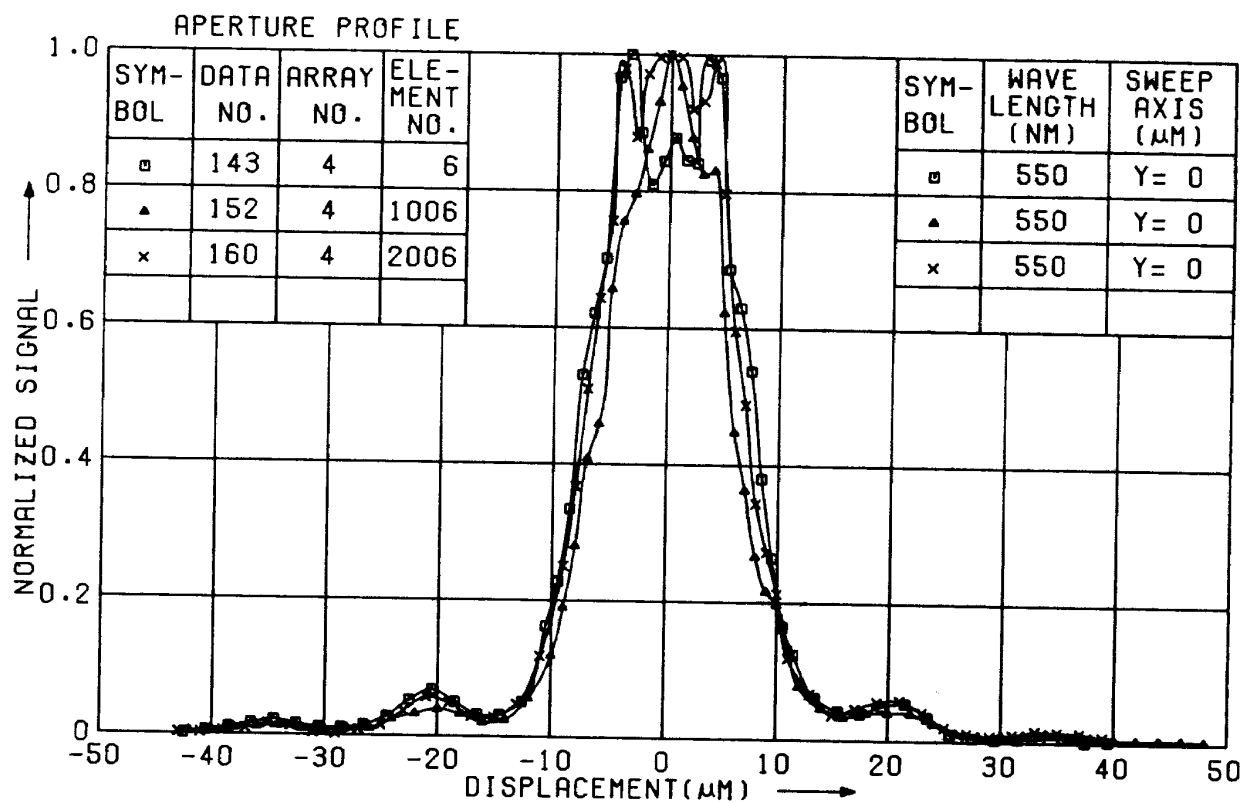
付図 3.37



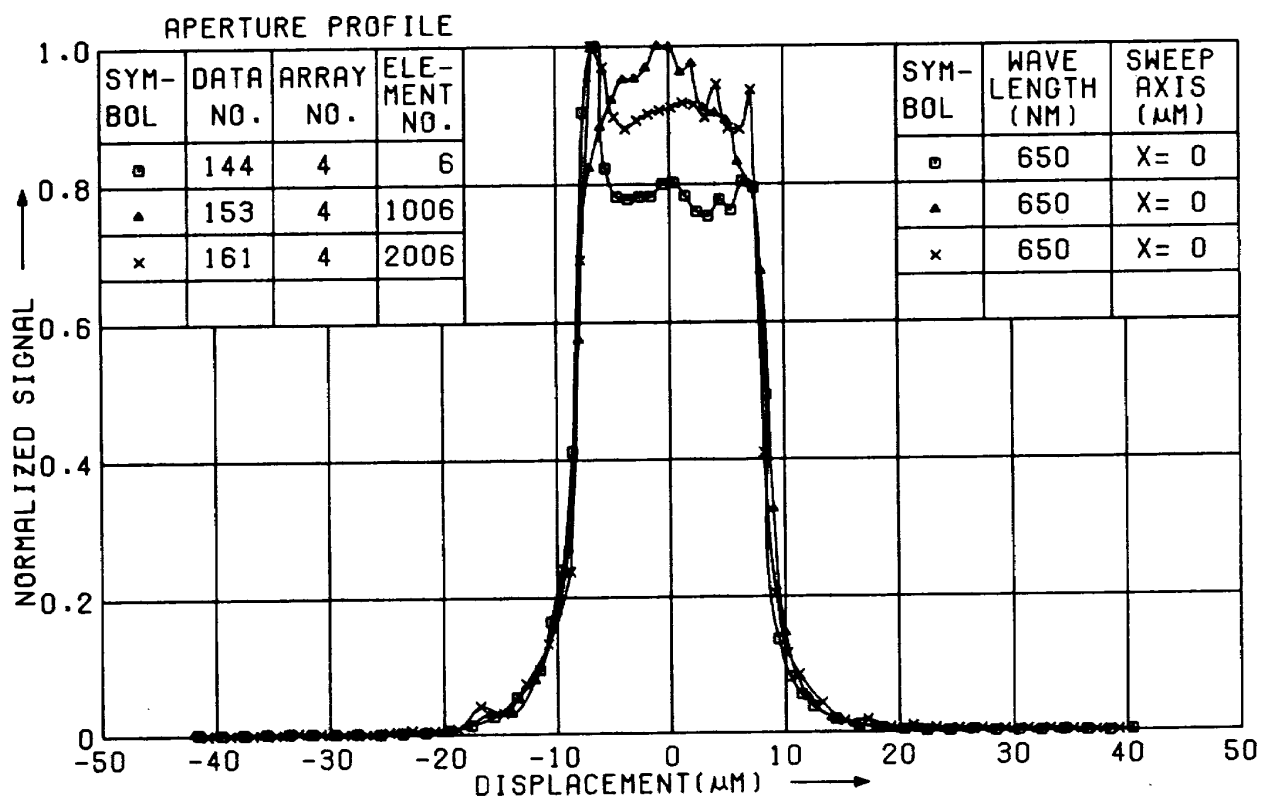
付図 3.38



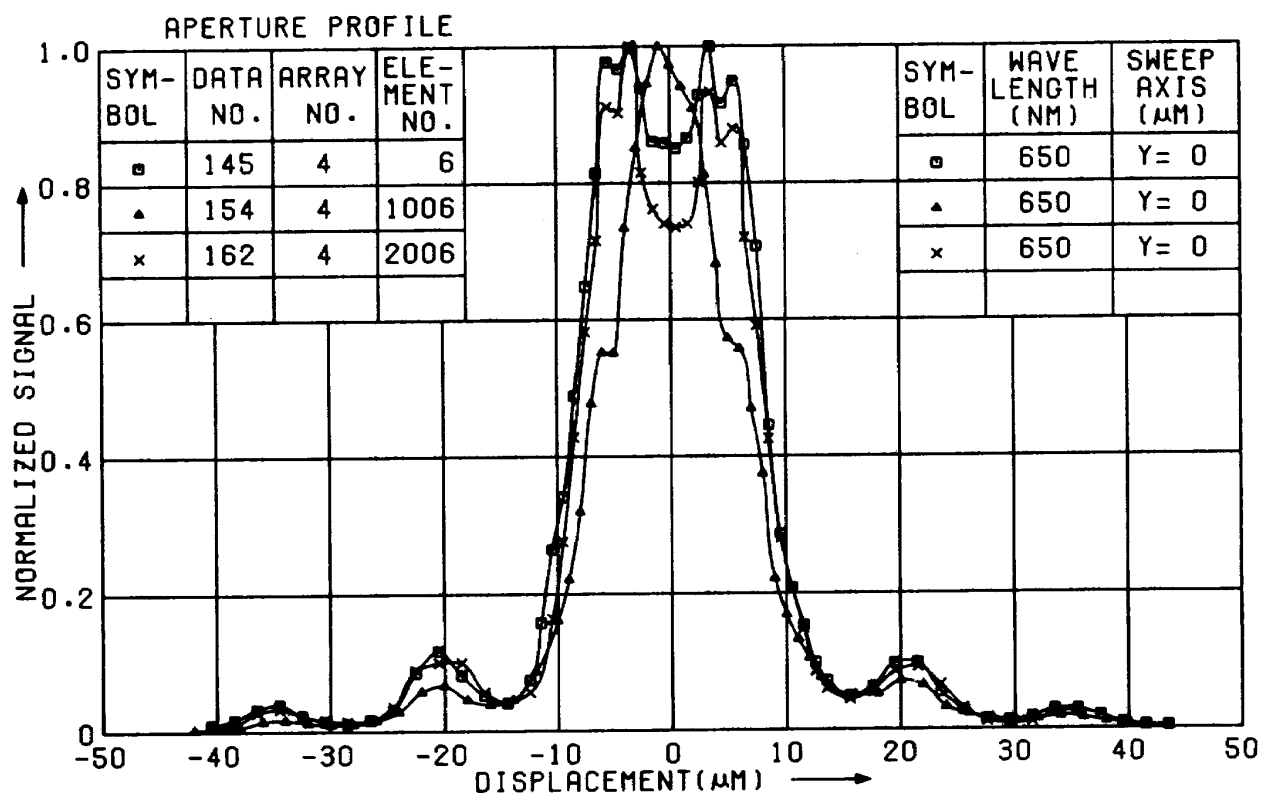
付図 3.39



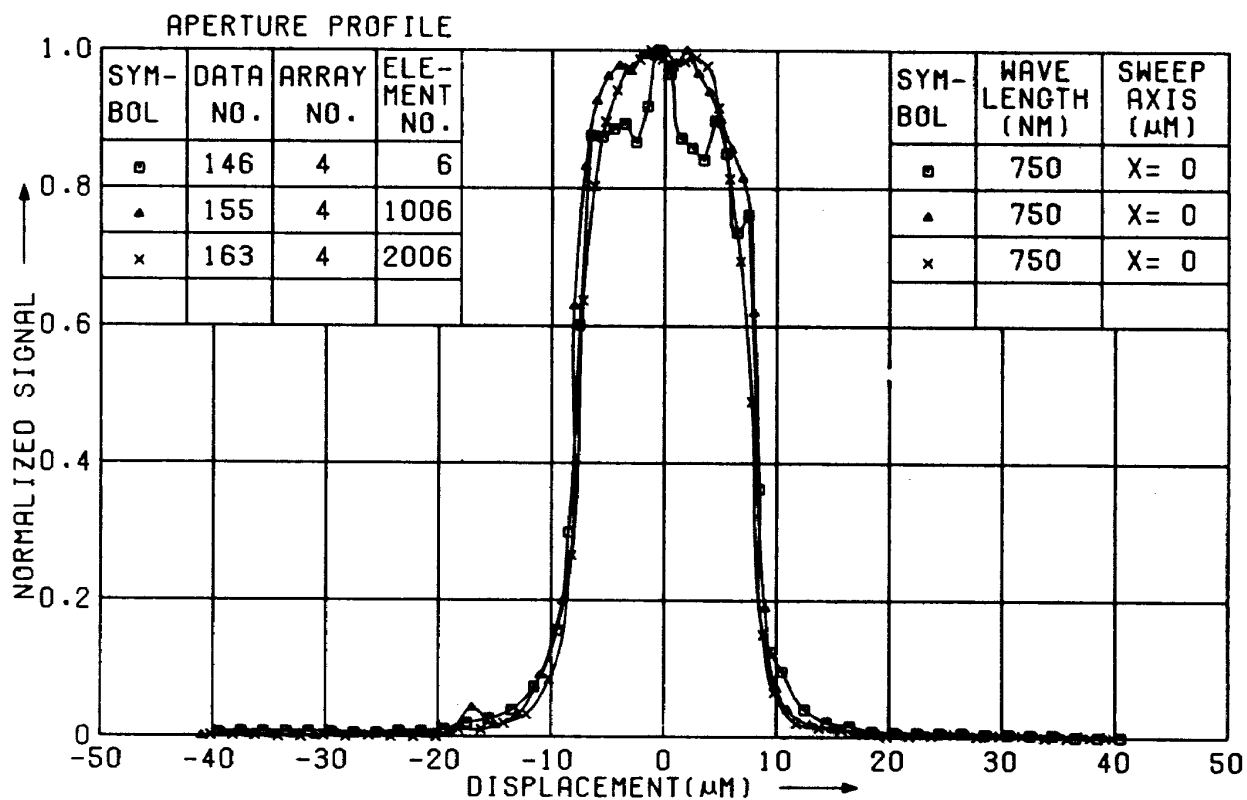
付図 3.40



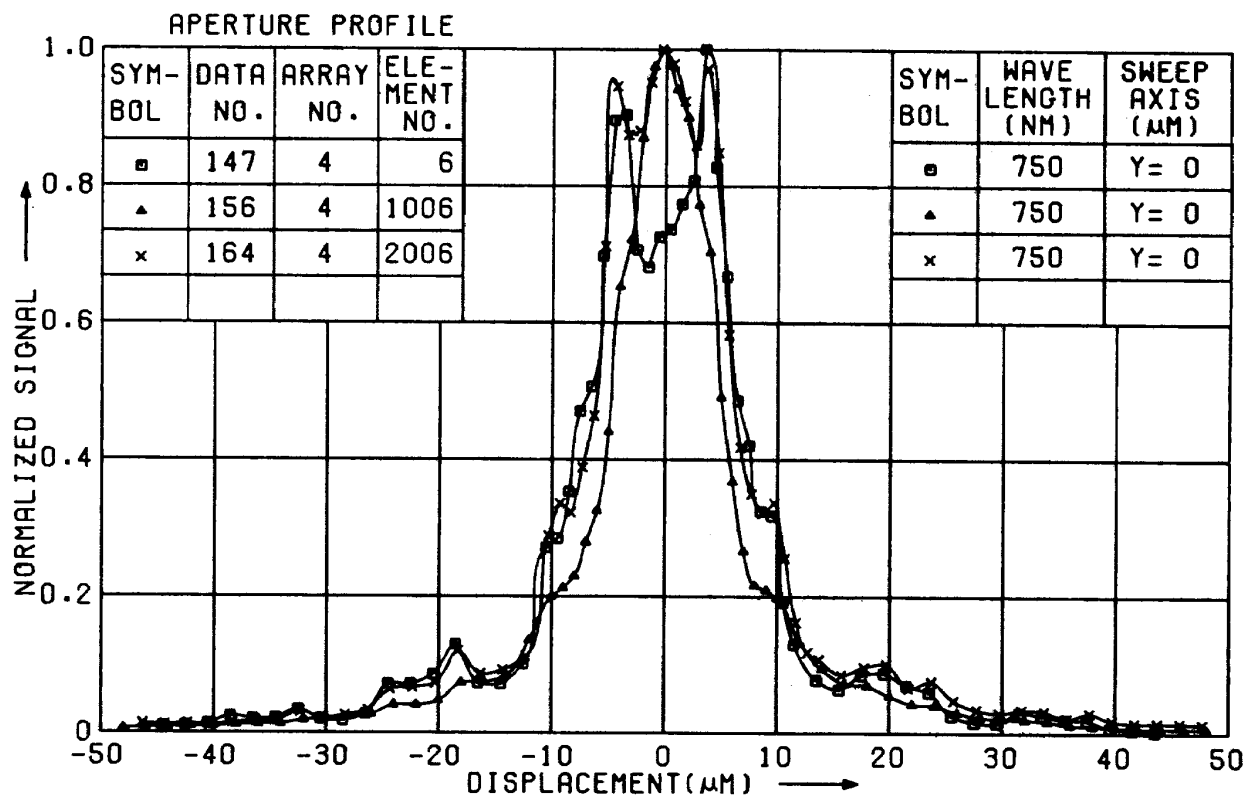
付図 3.41



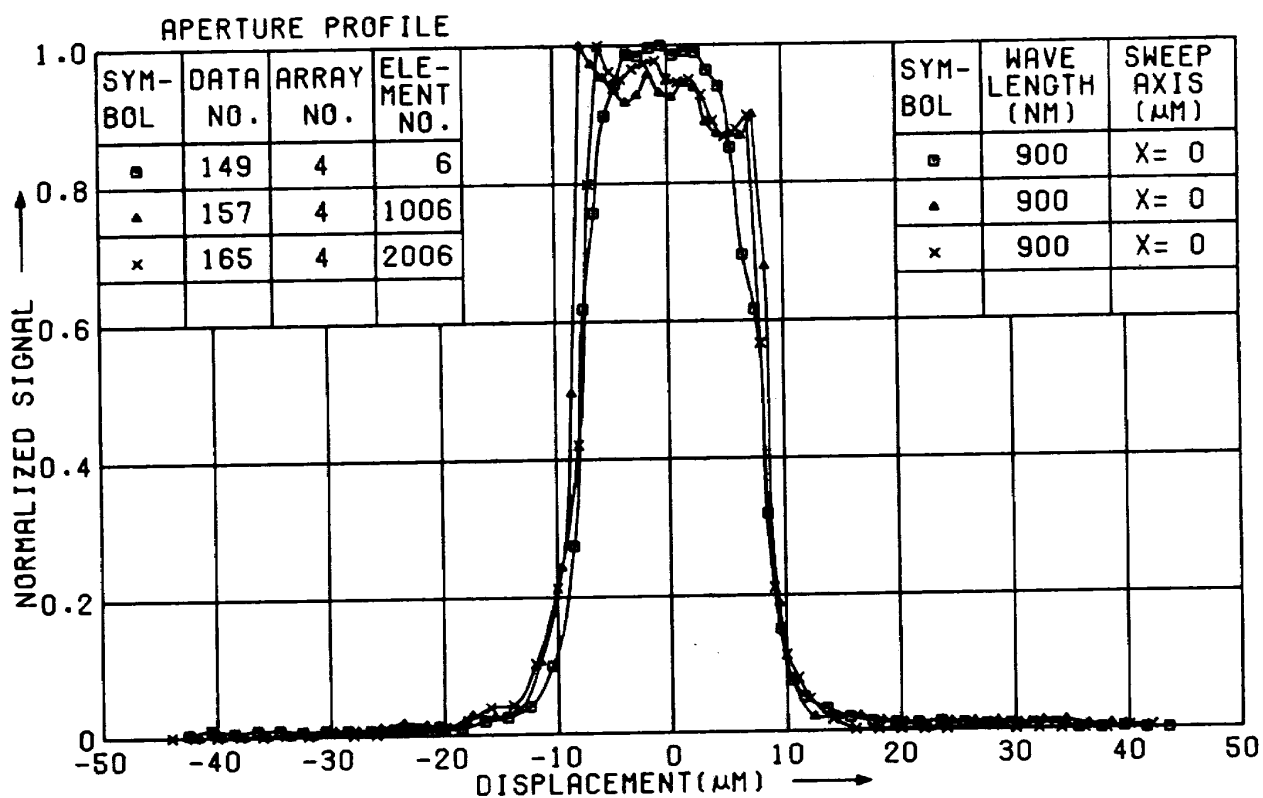
付図 3.42



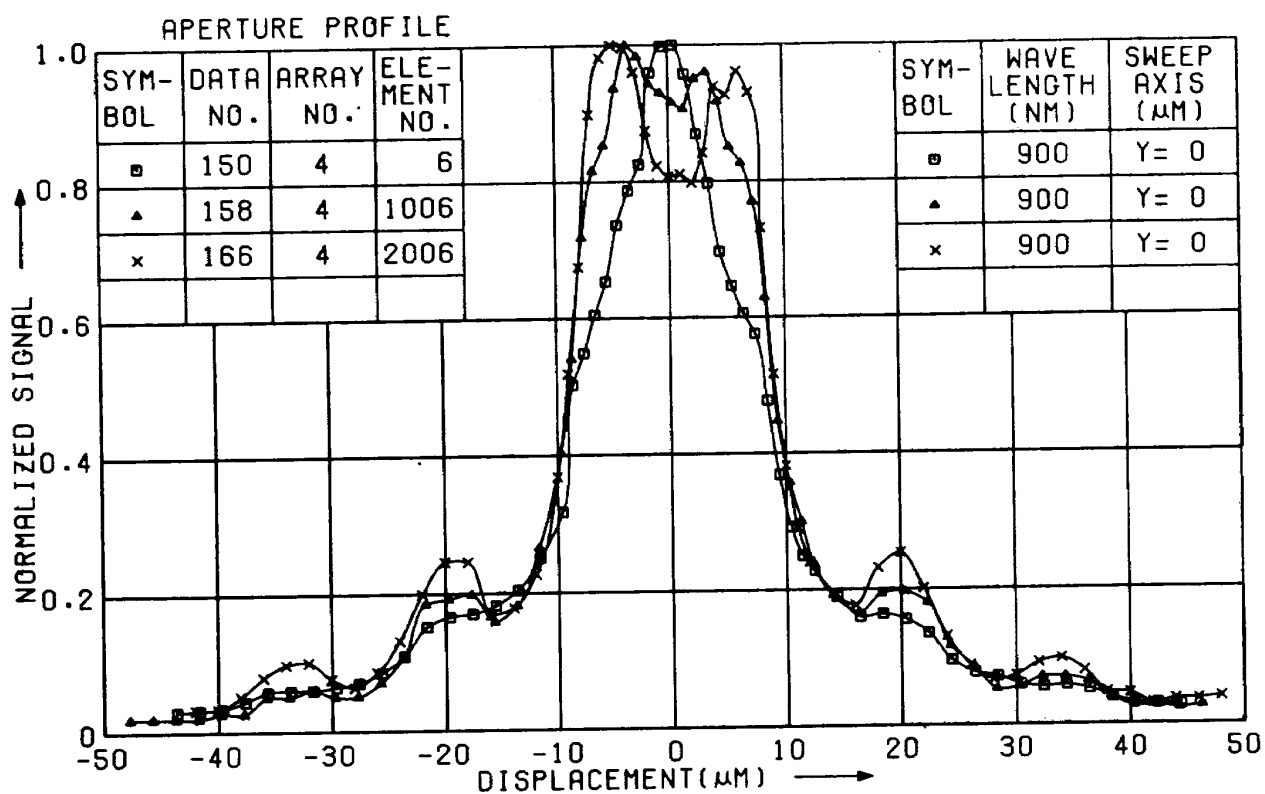
付図 3.43



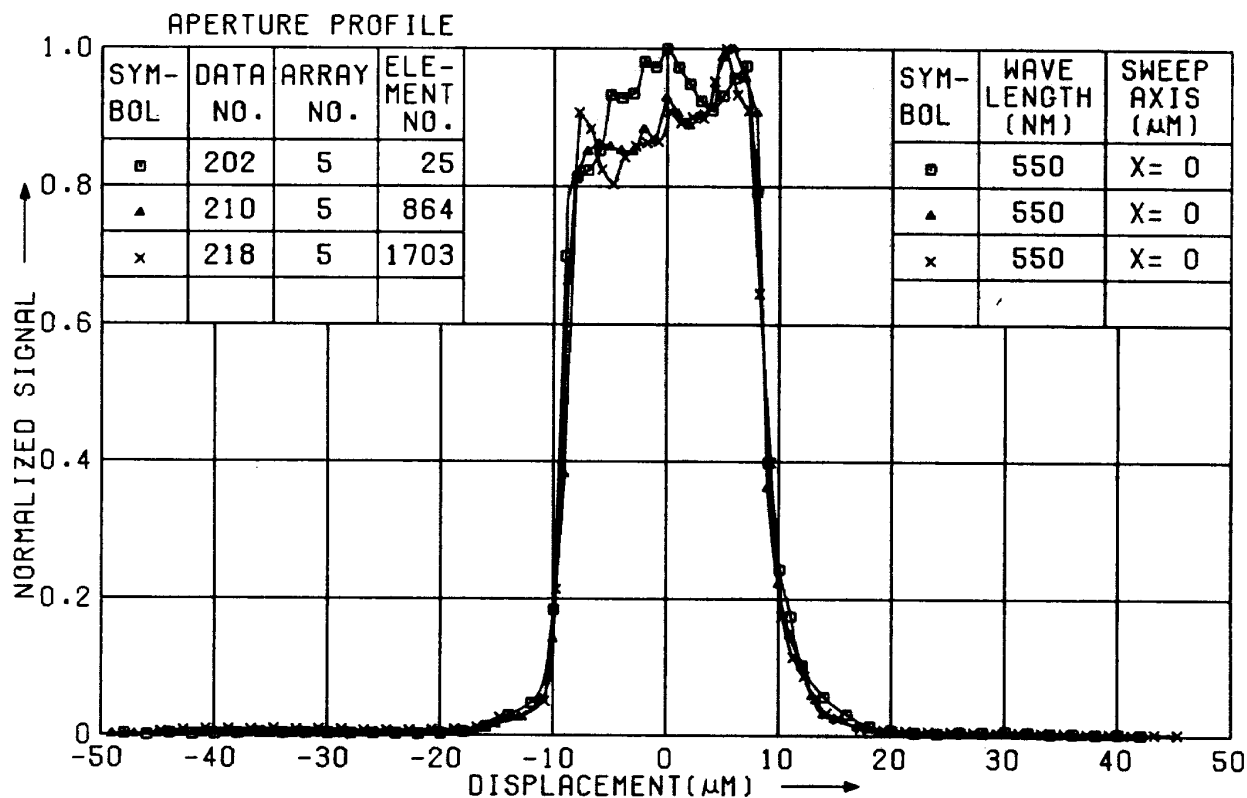
付図 3.44



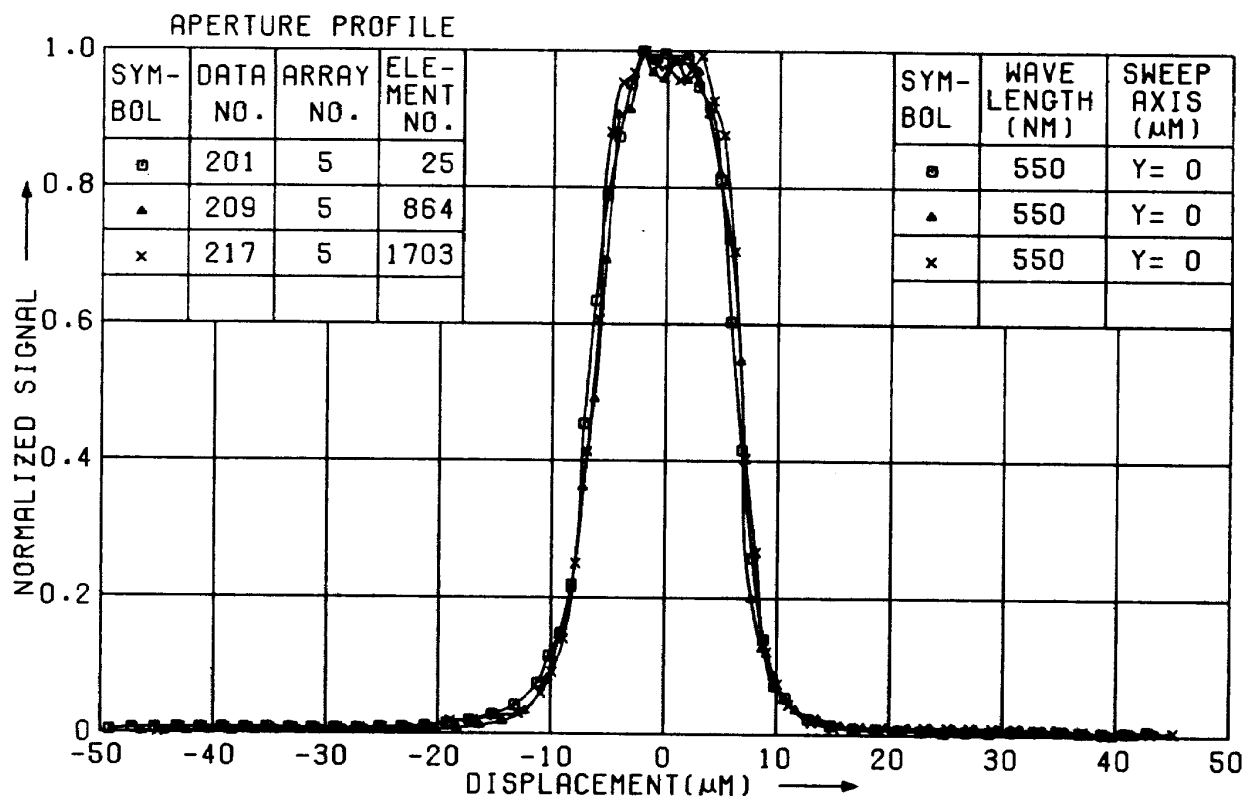
付図 3.45



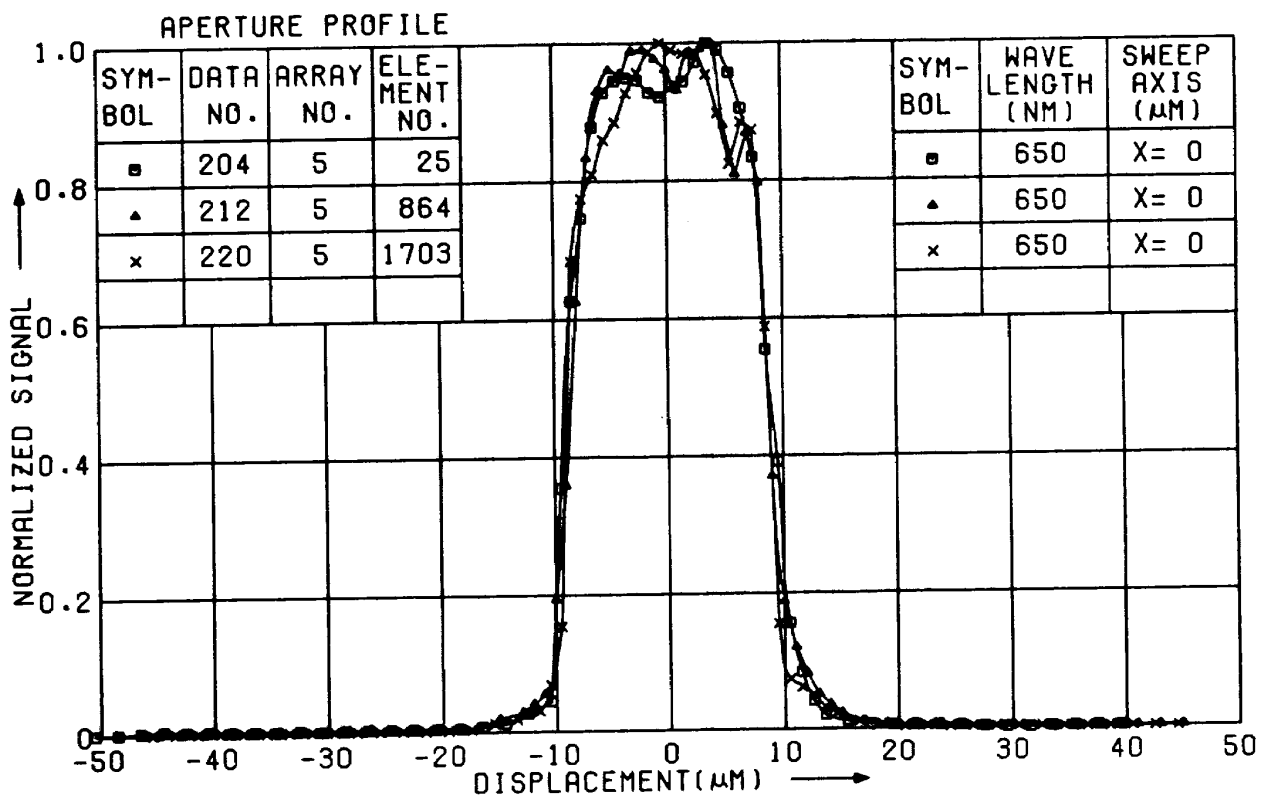
付図 3.46



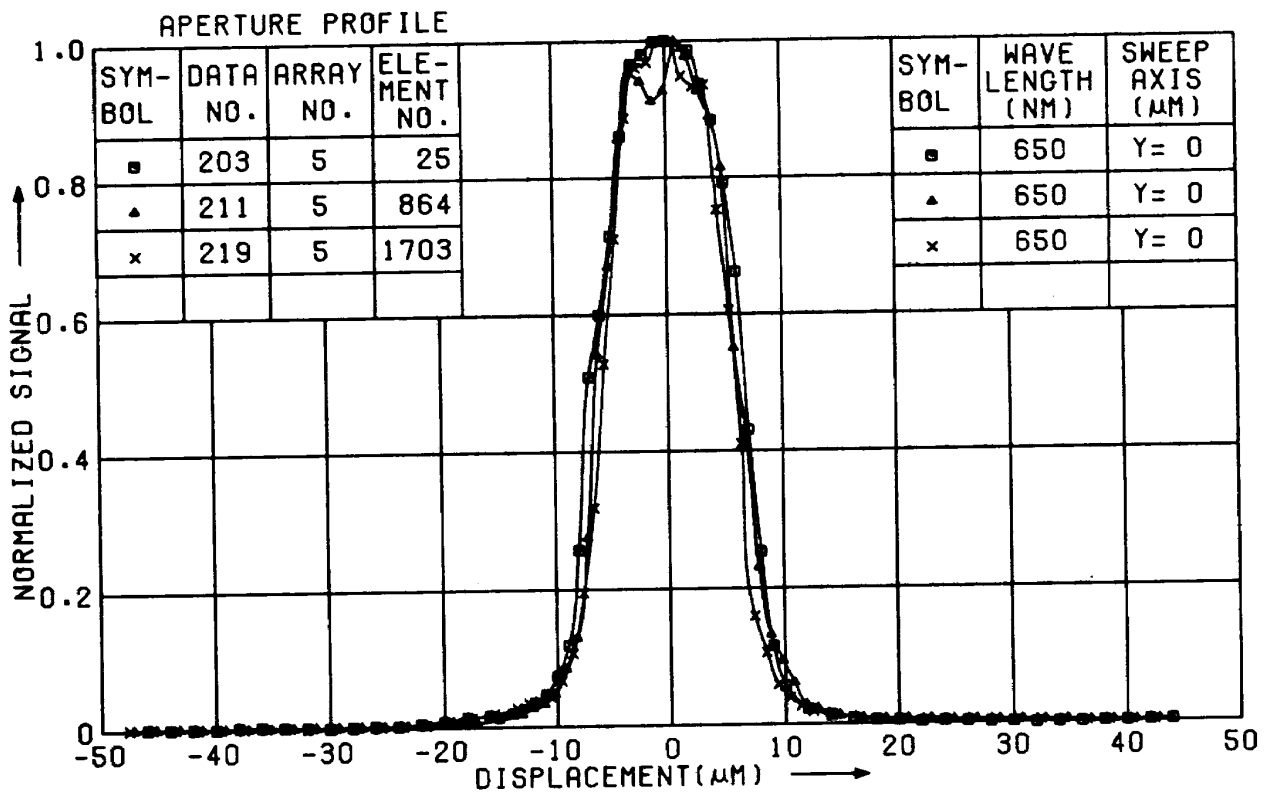
付図 3. 47



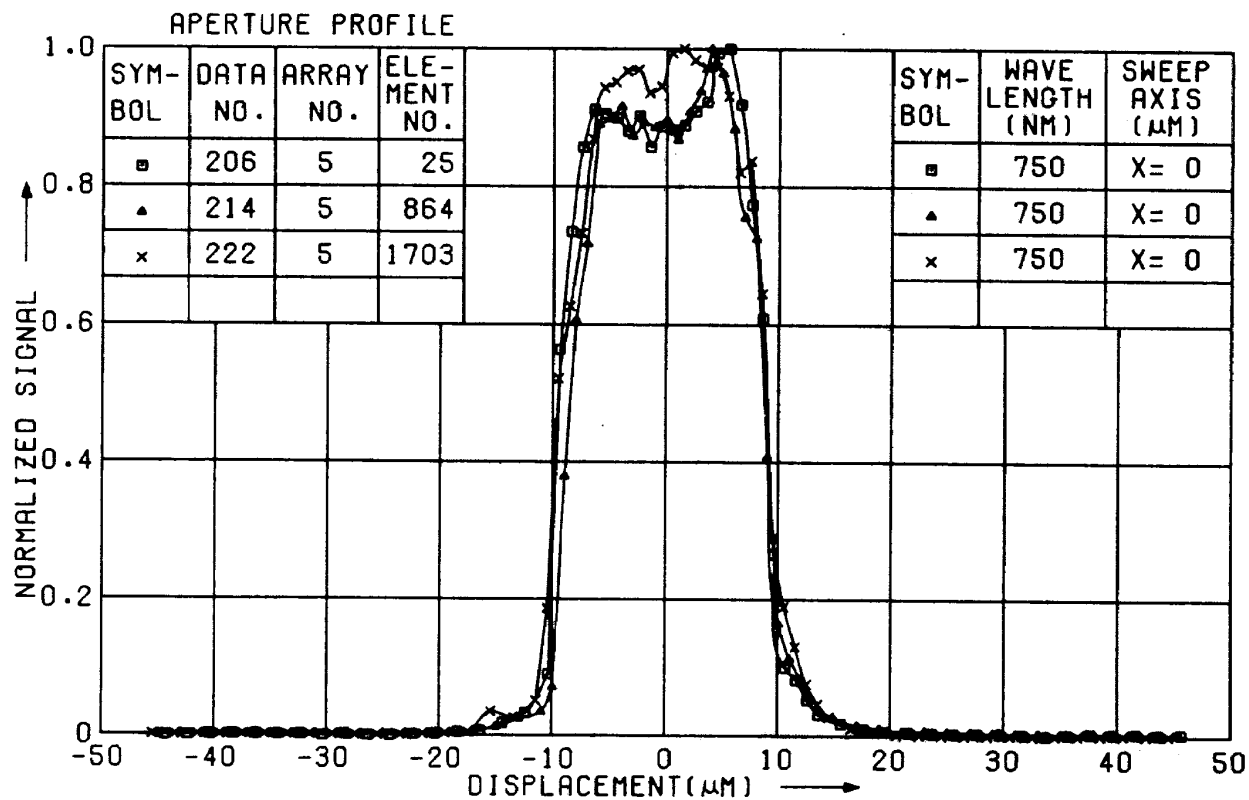
付図 3. 48



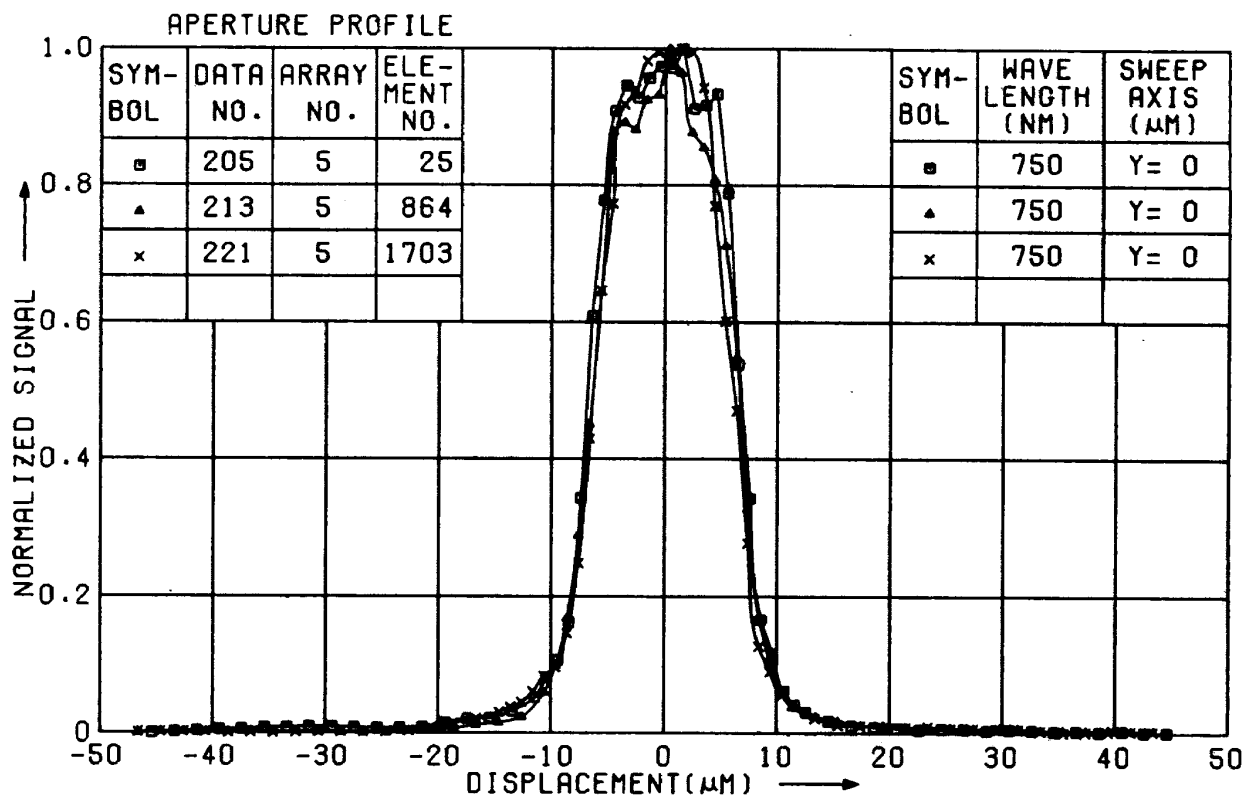
付図 3.49



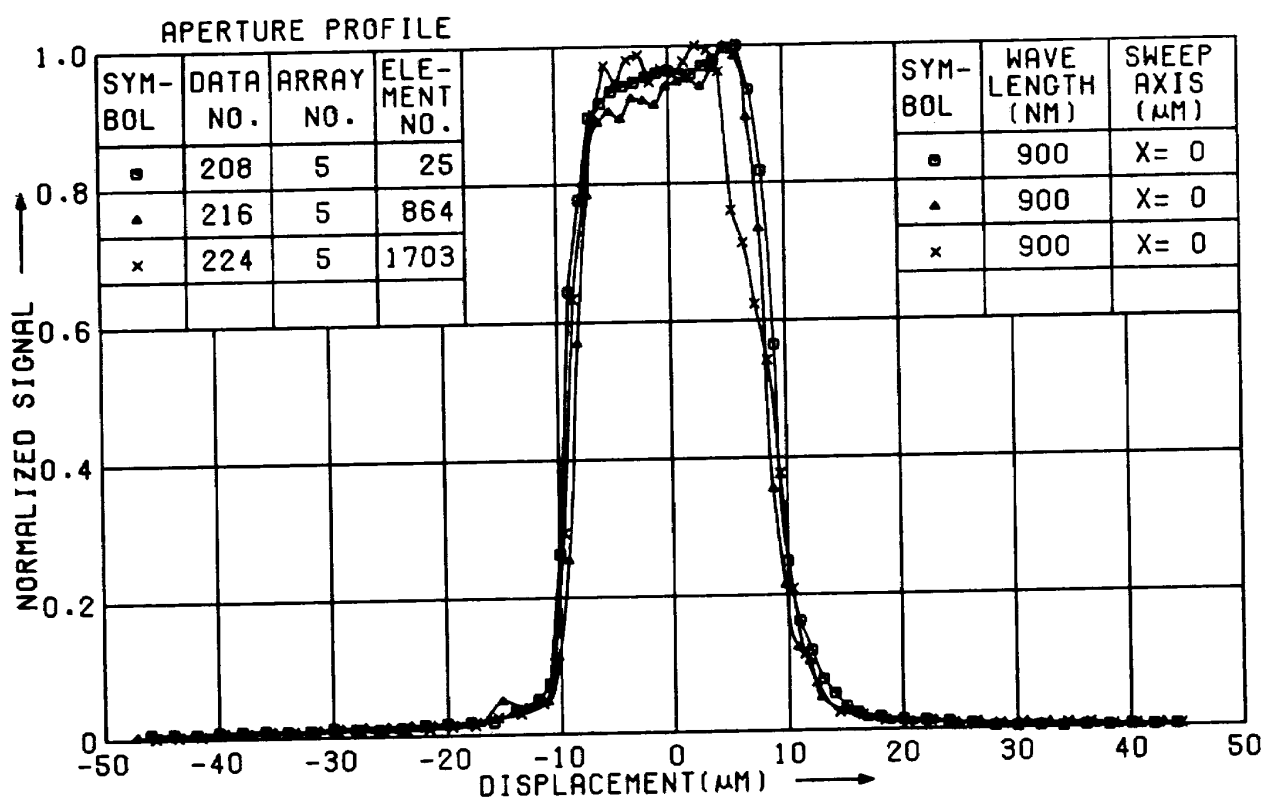
付図 3.50



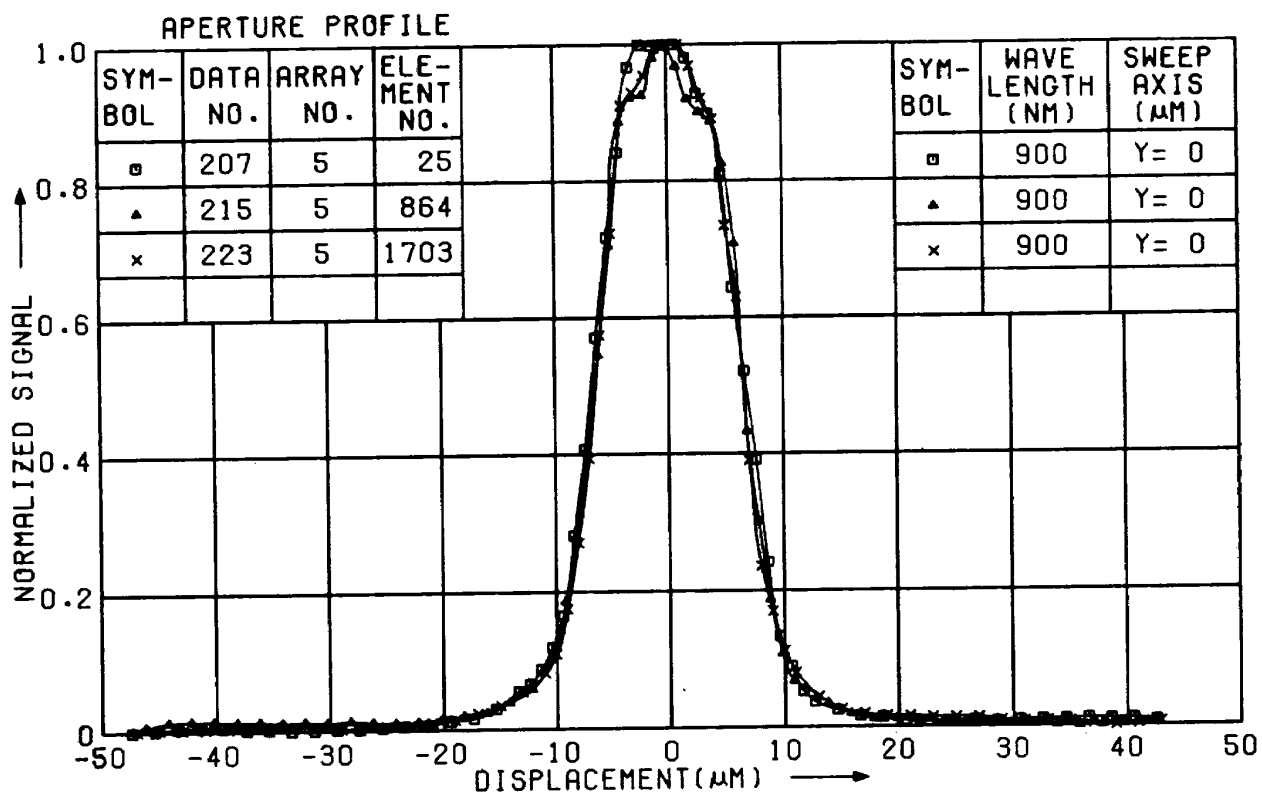
付図 3.51



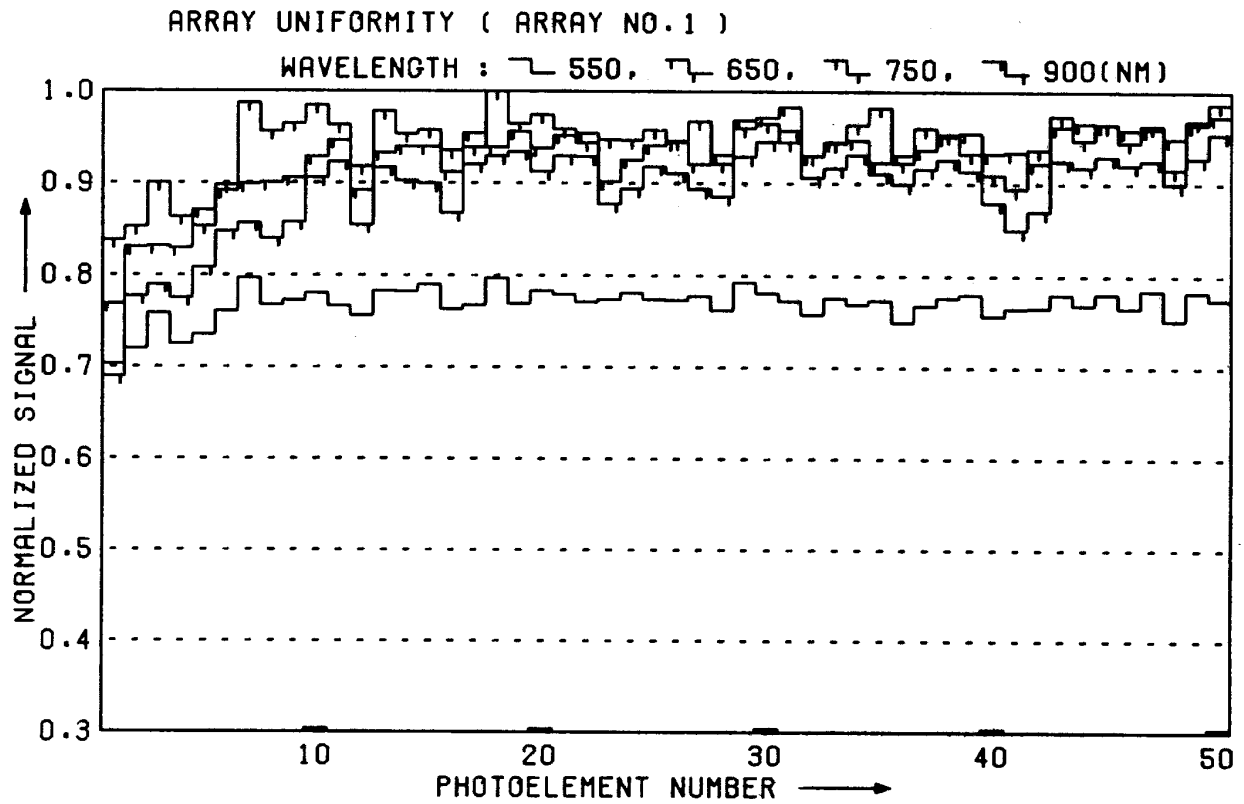
付図 3.52



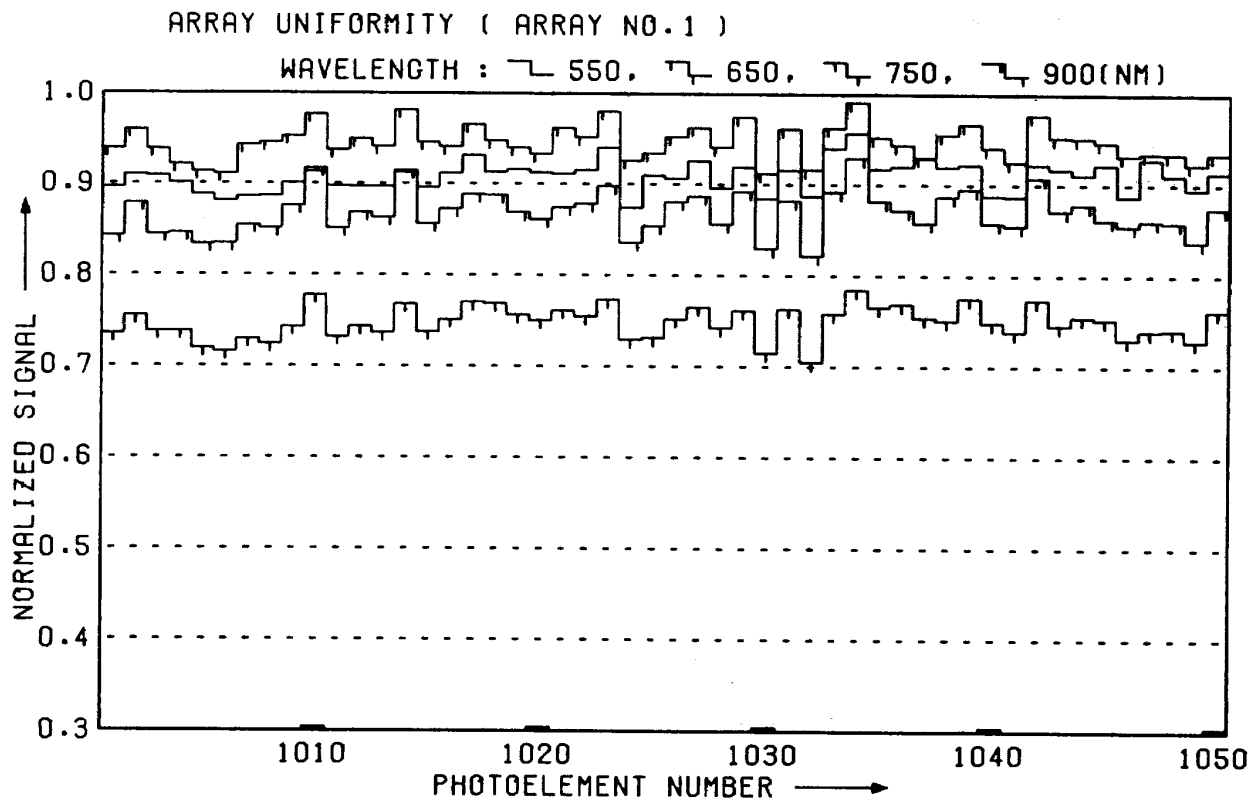
付図 3.53



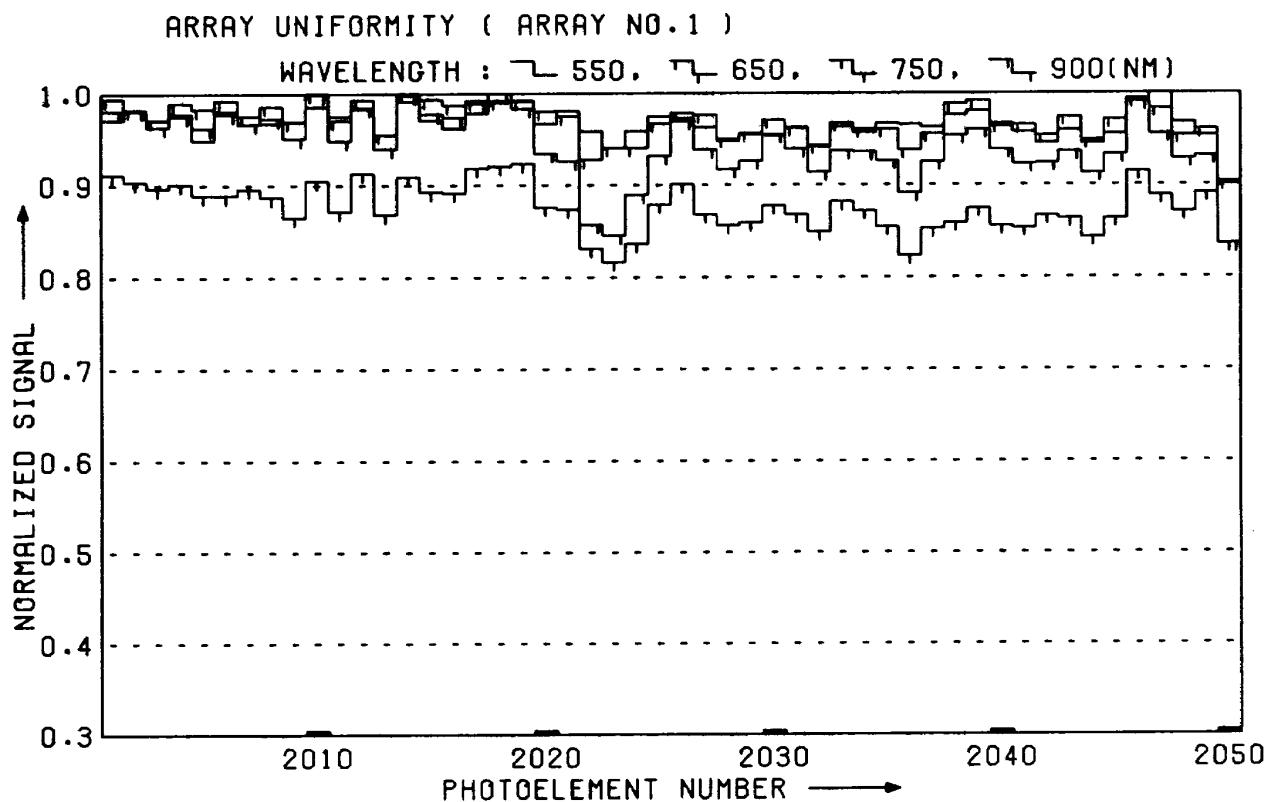
付図 3.54



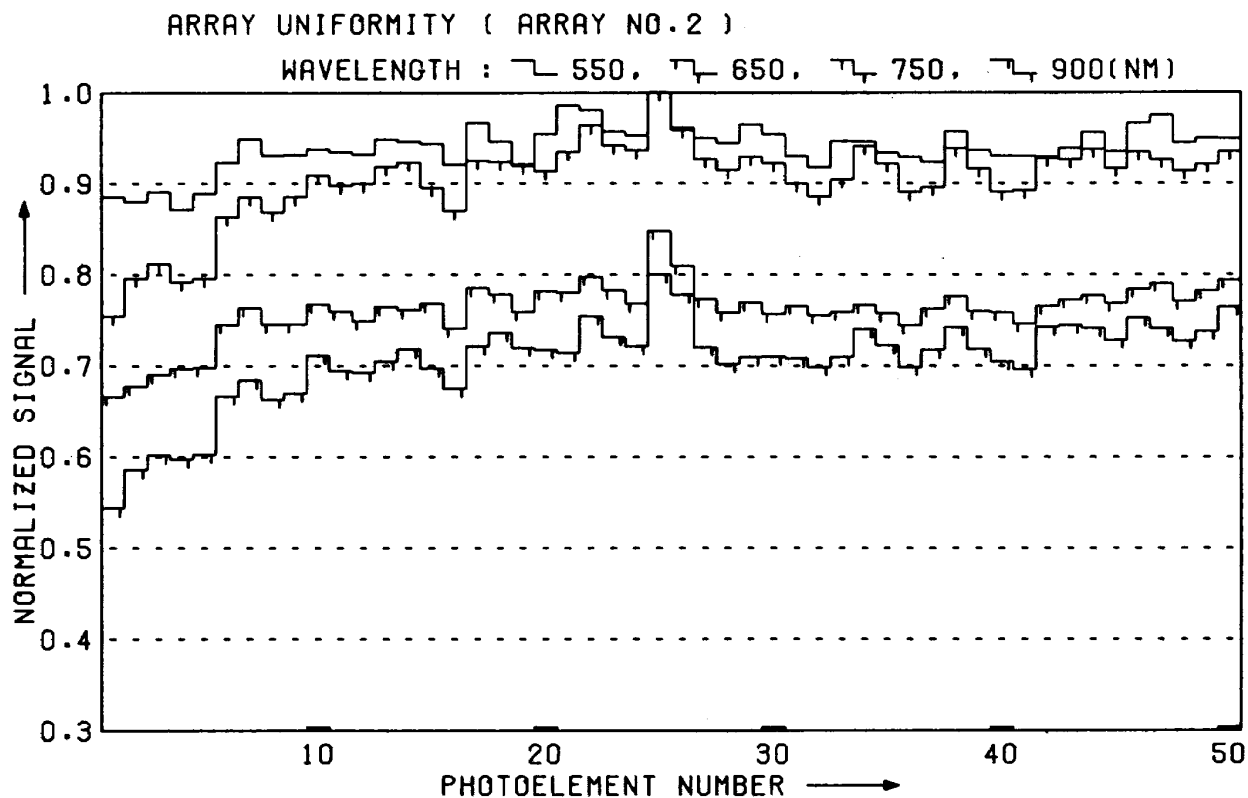
付図 4.1



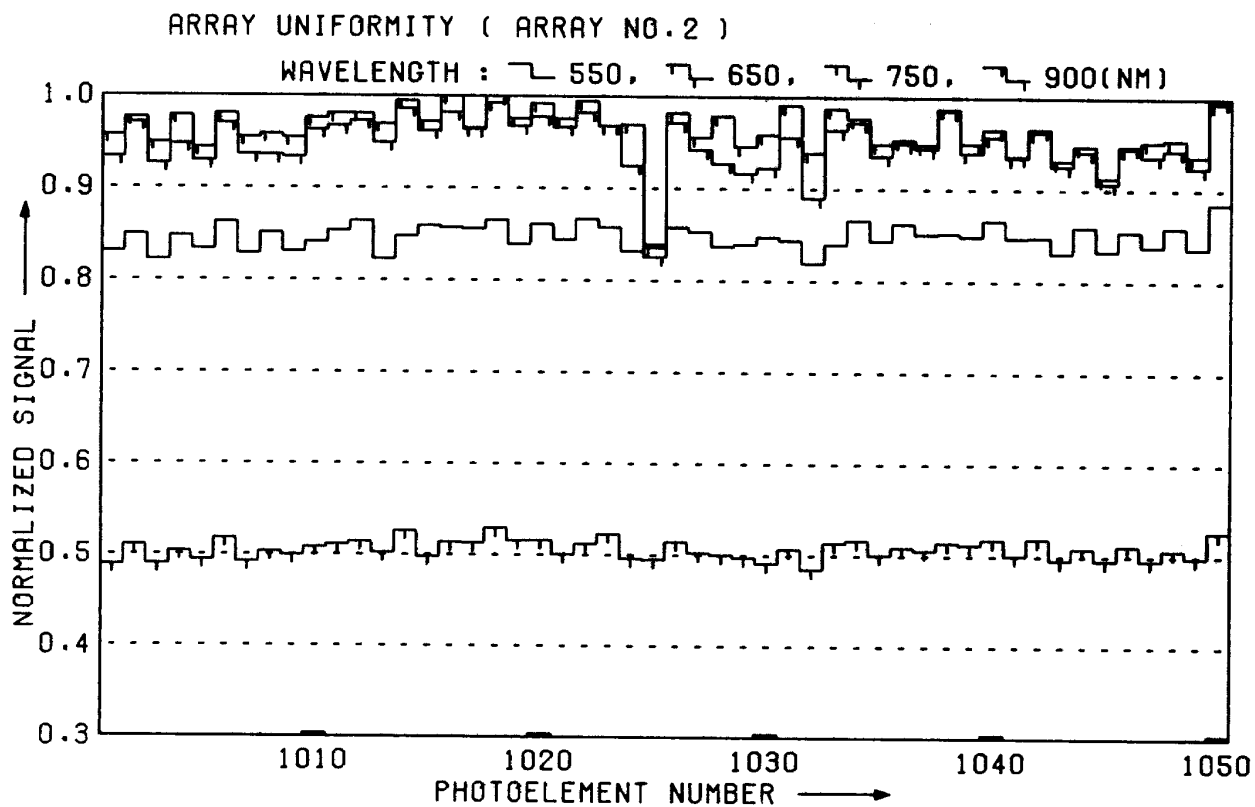
付図 4.2



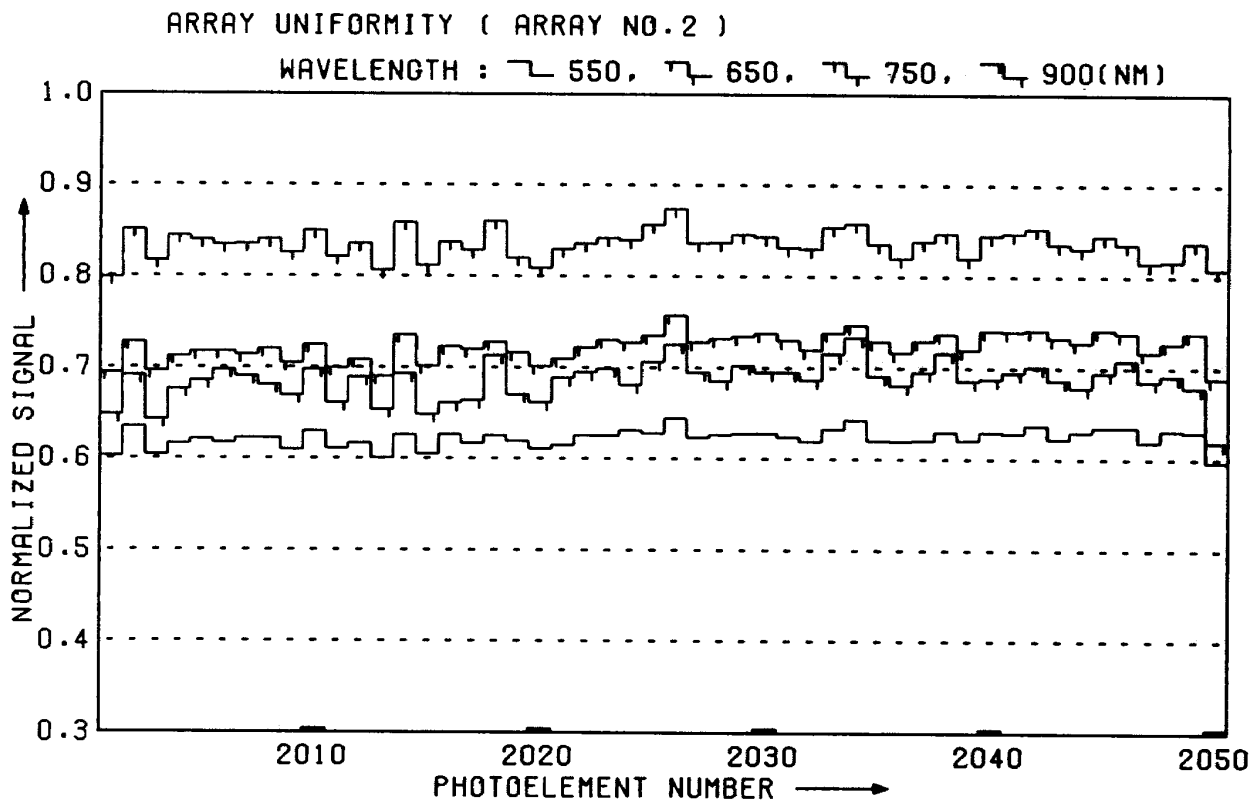
付図 4.3



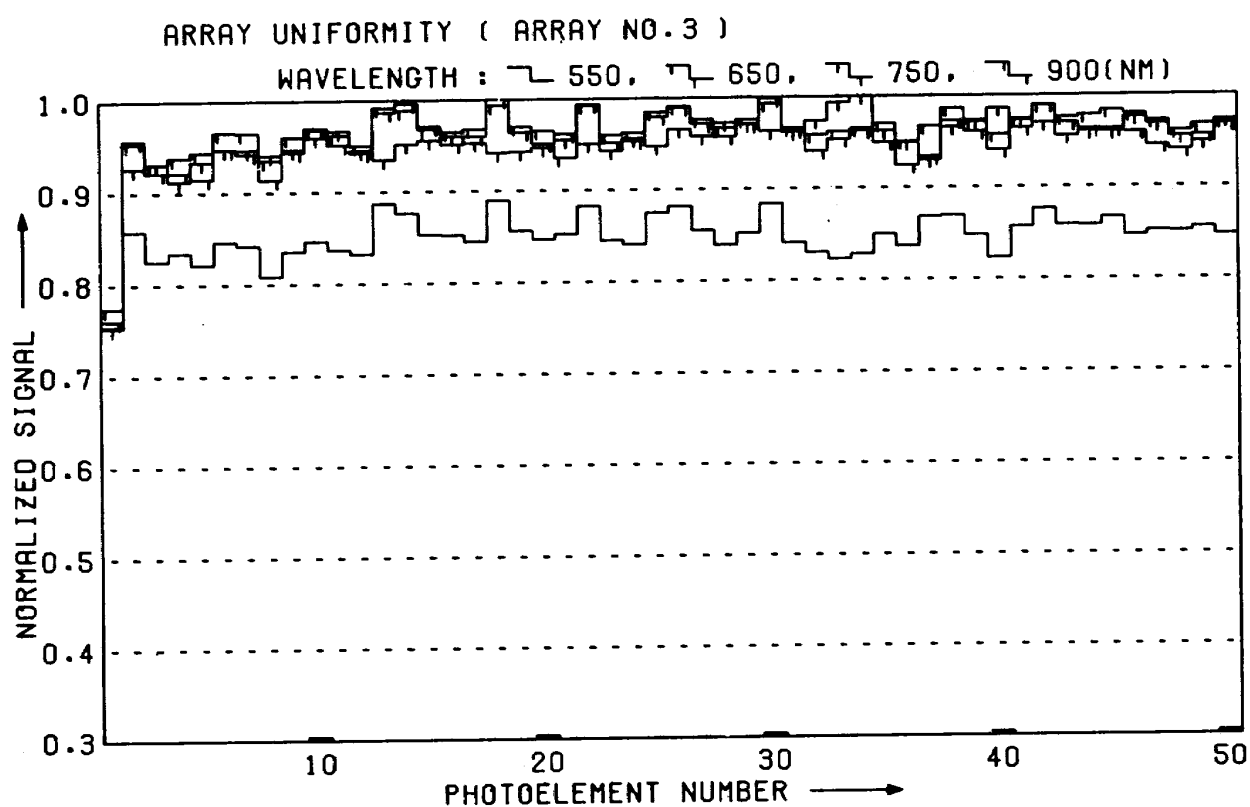
付図 4.4



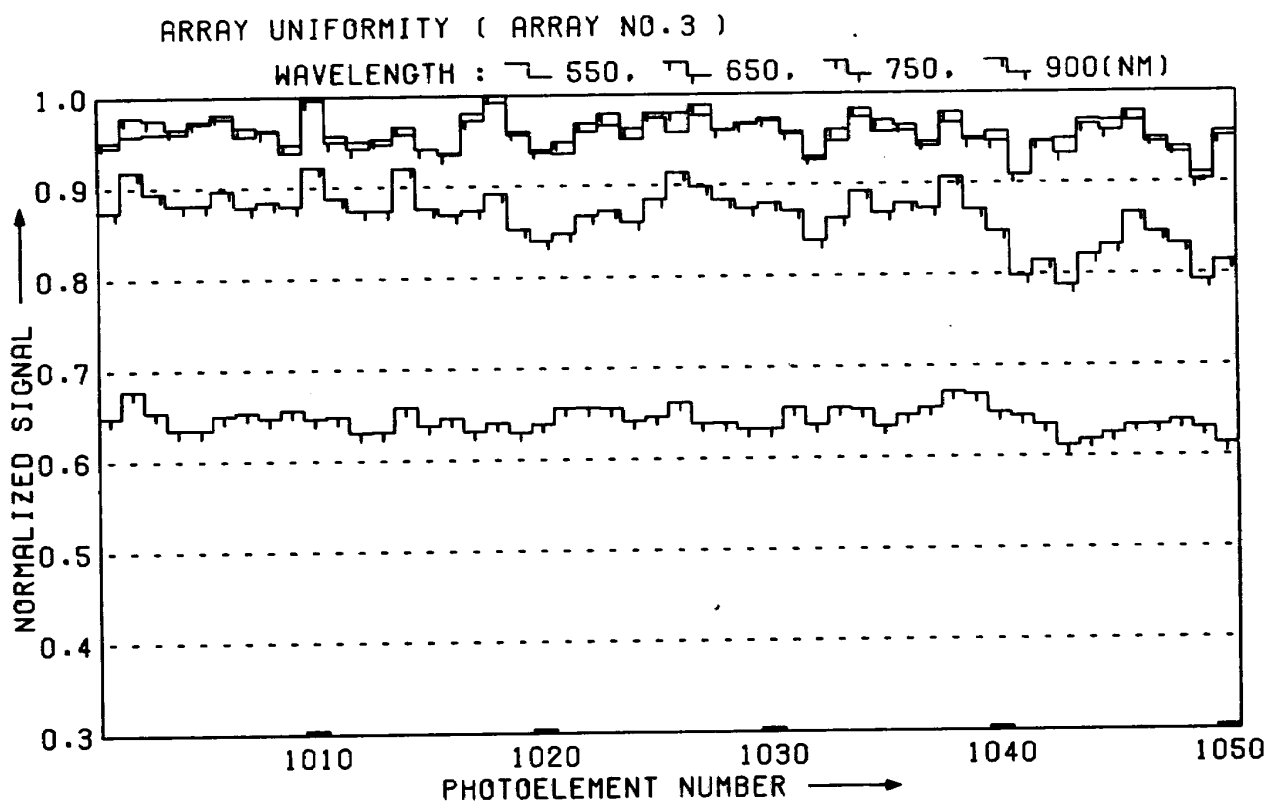
付図 4.5



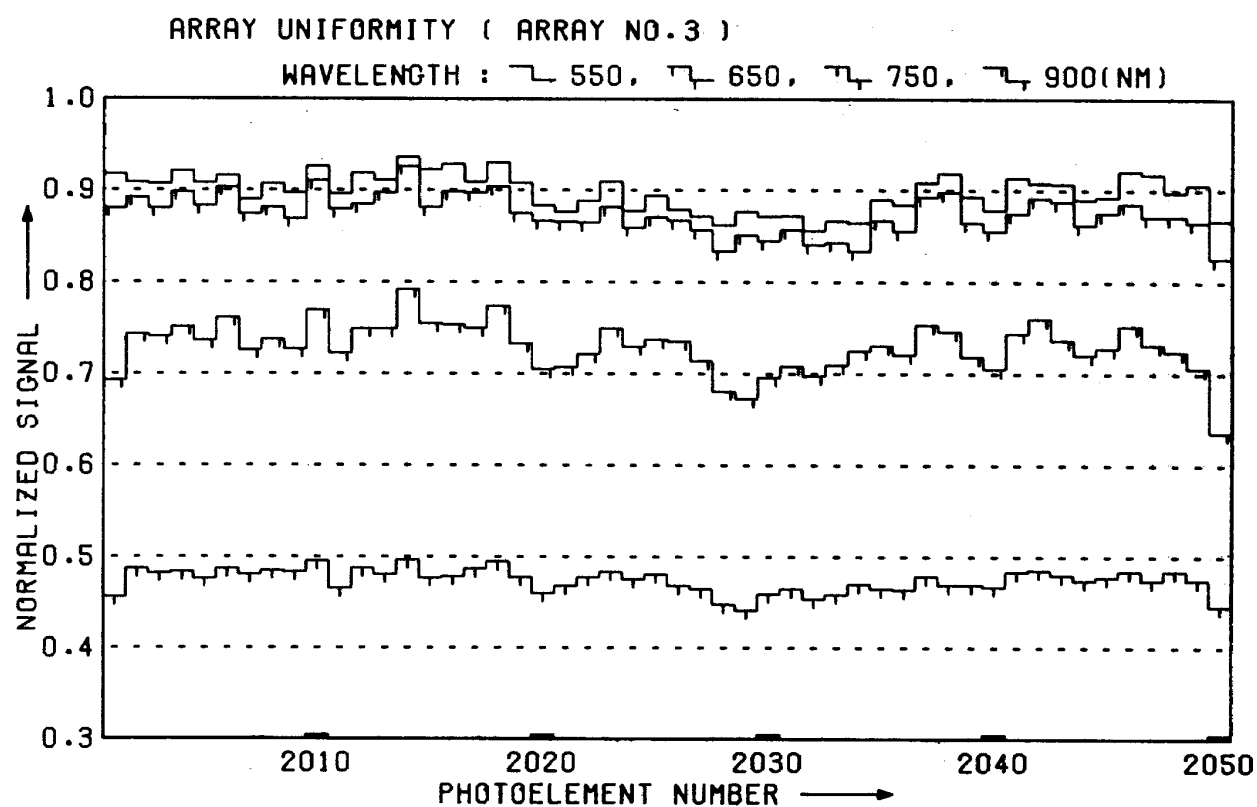
付図 4.6



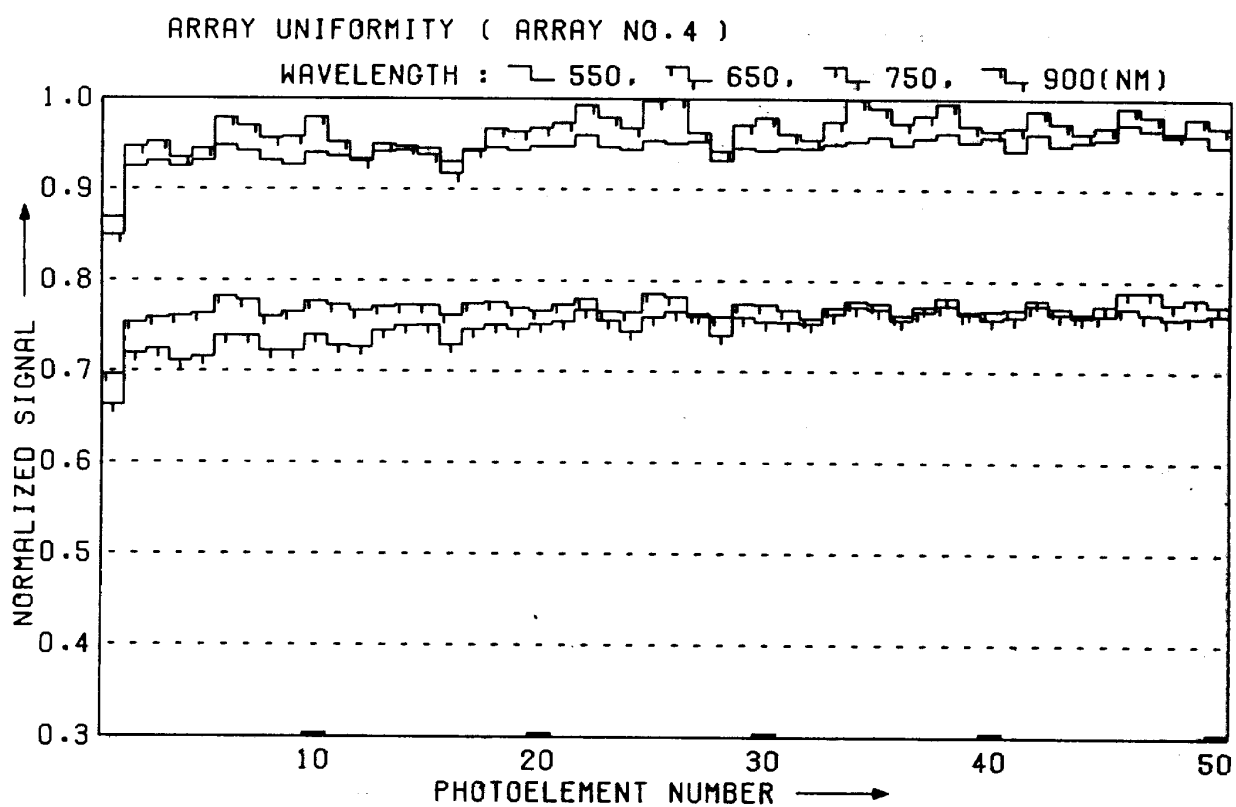
付図 4.7



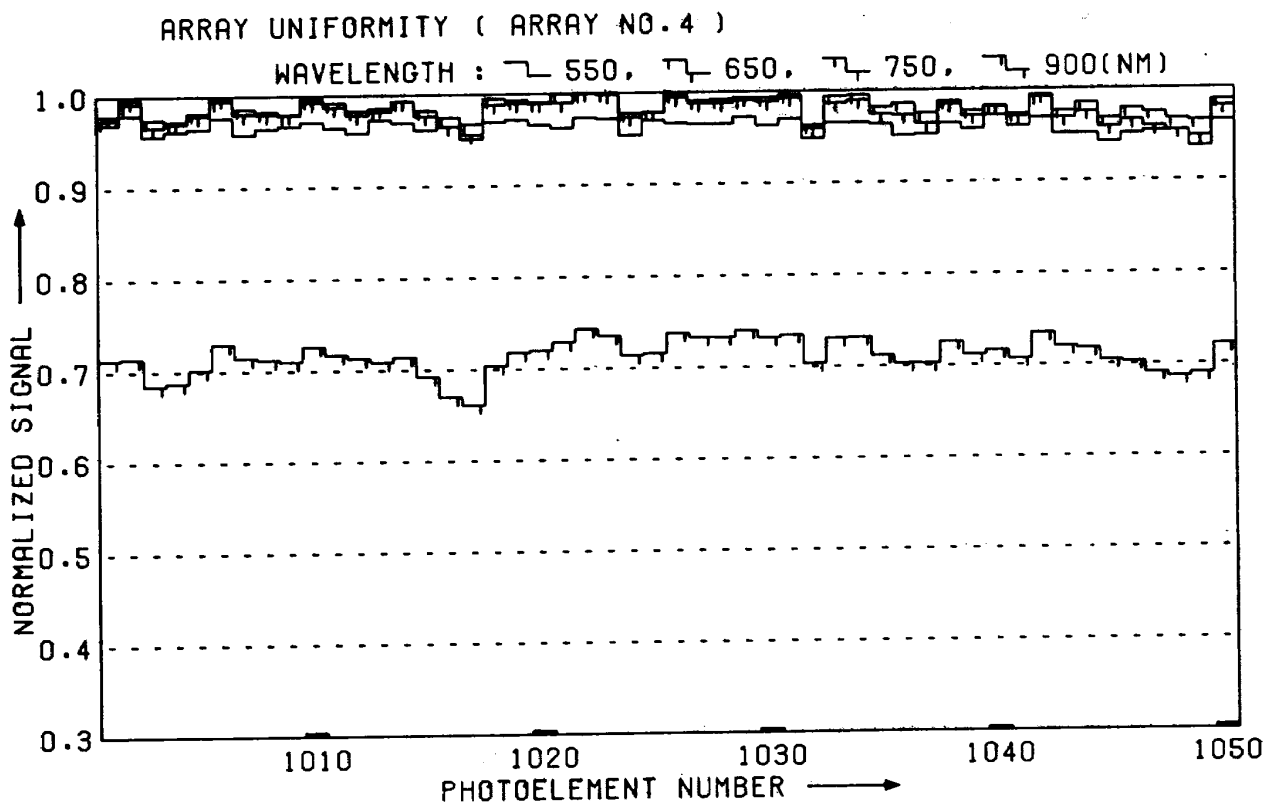
付図 4.8



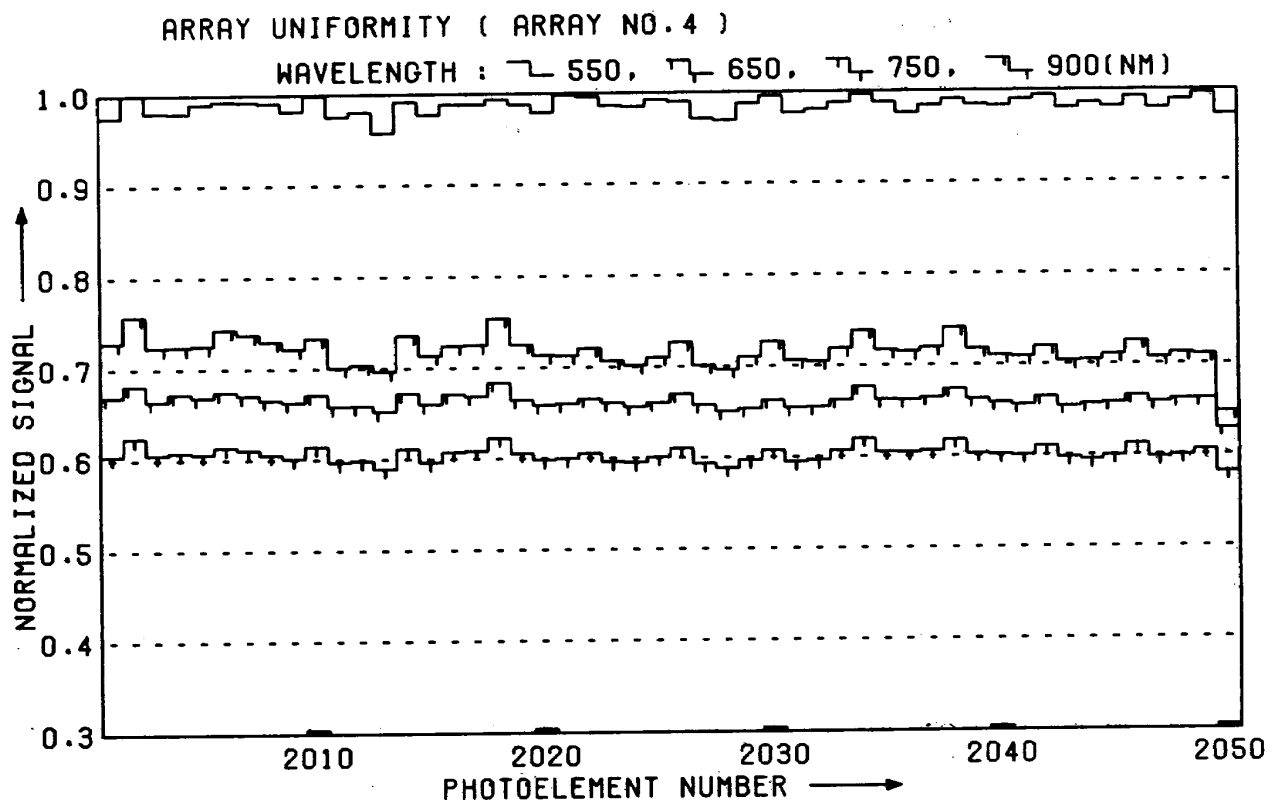
付図 4.9



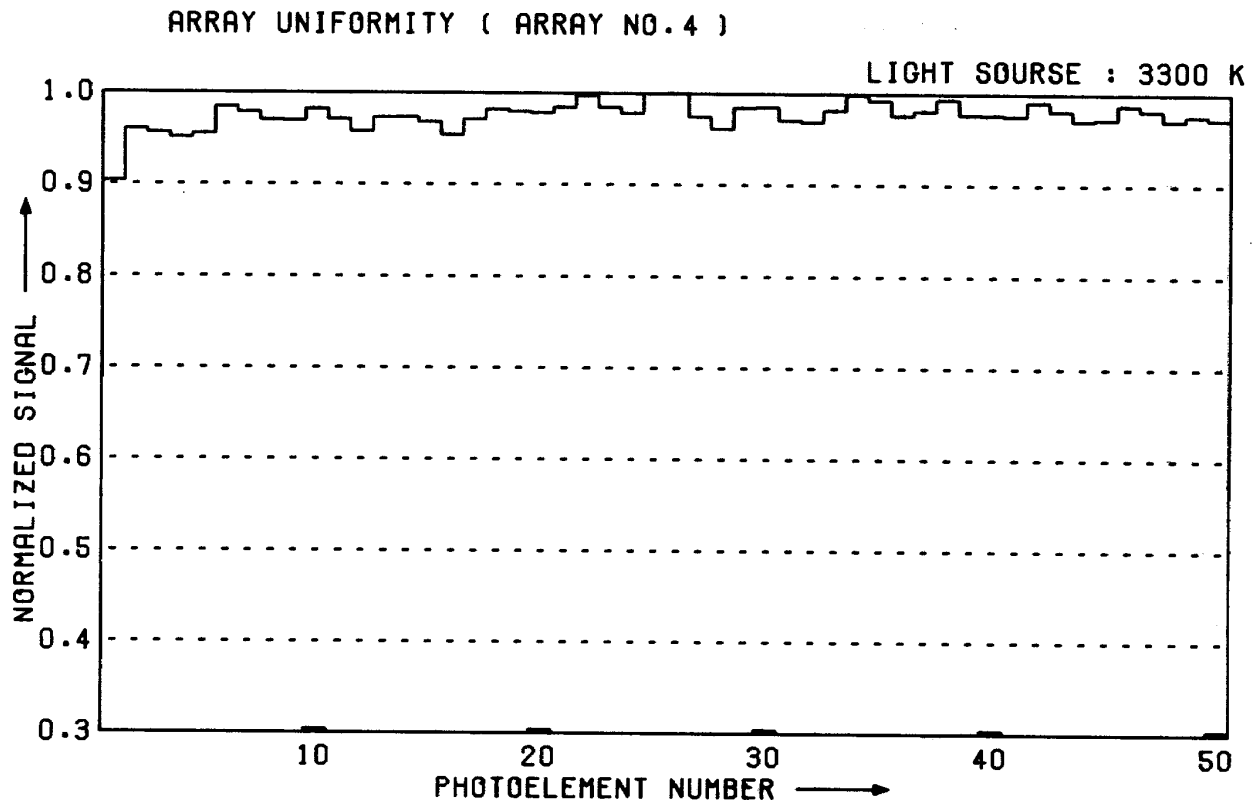
付図 4.10



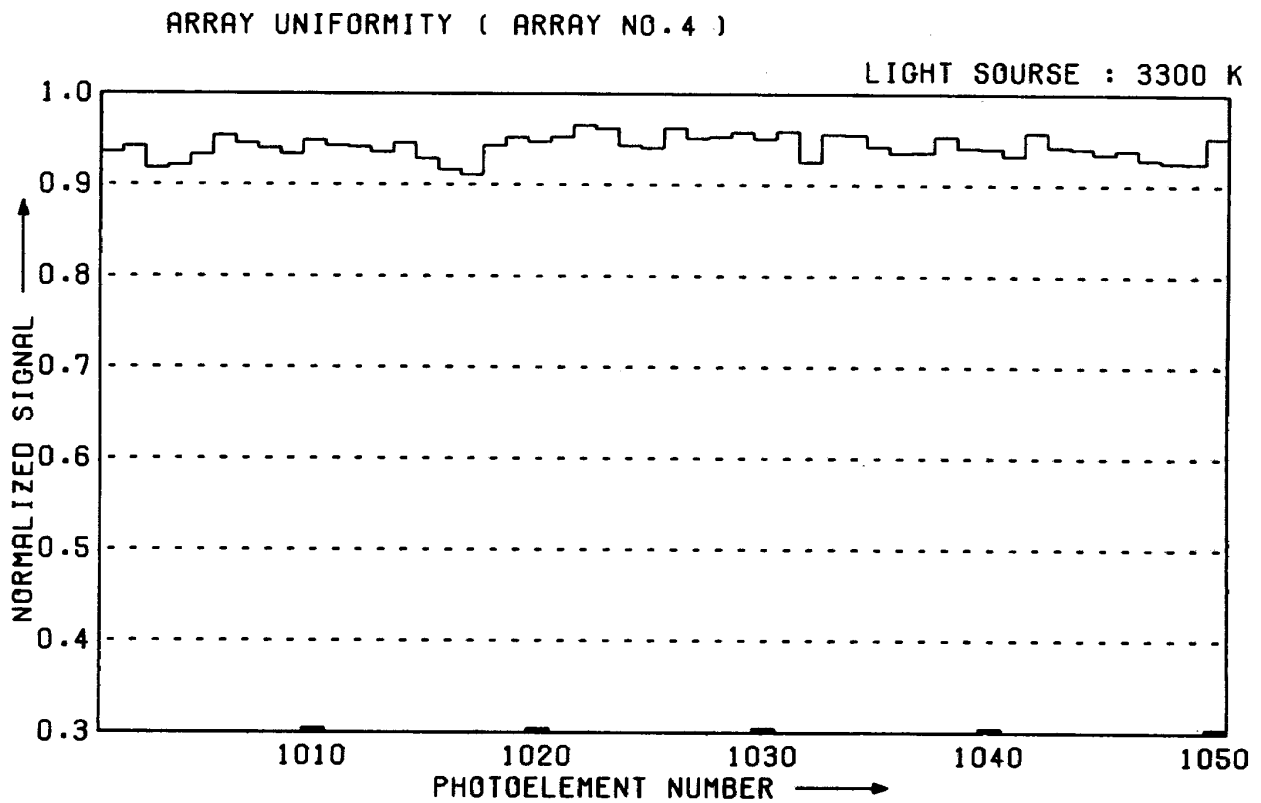
付図 4.11



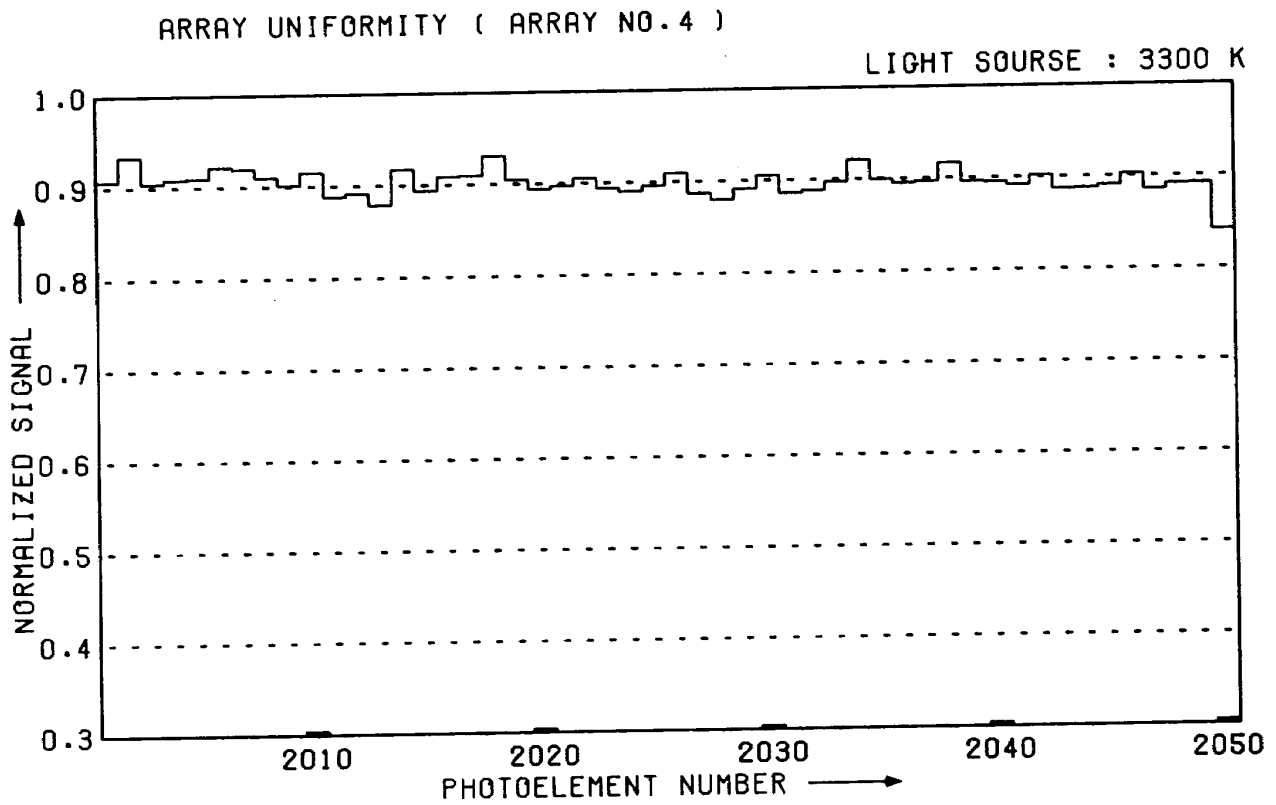
付図 4.12



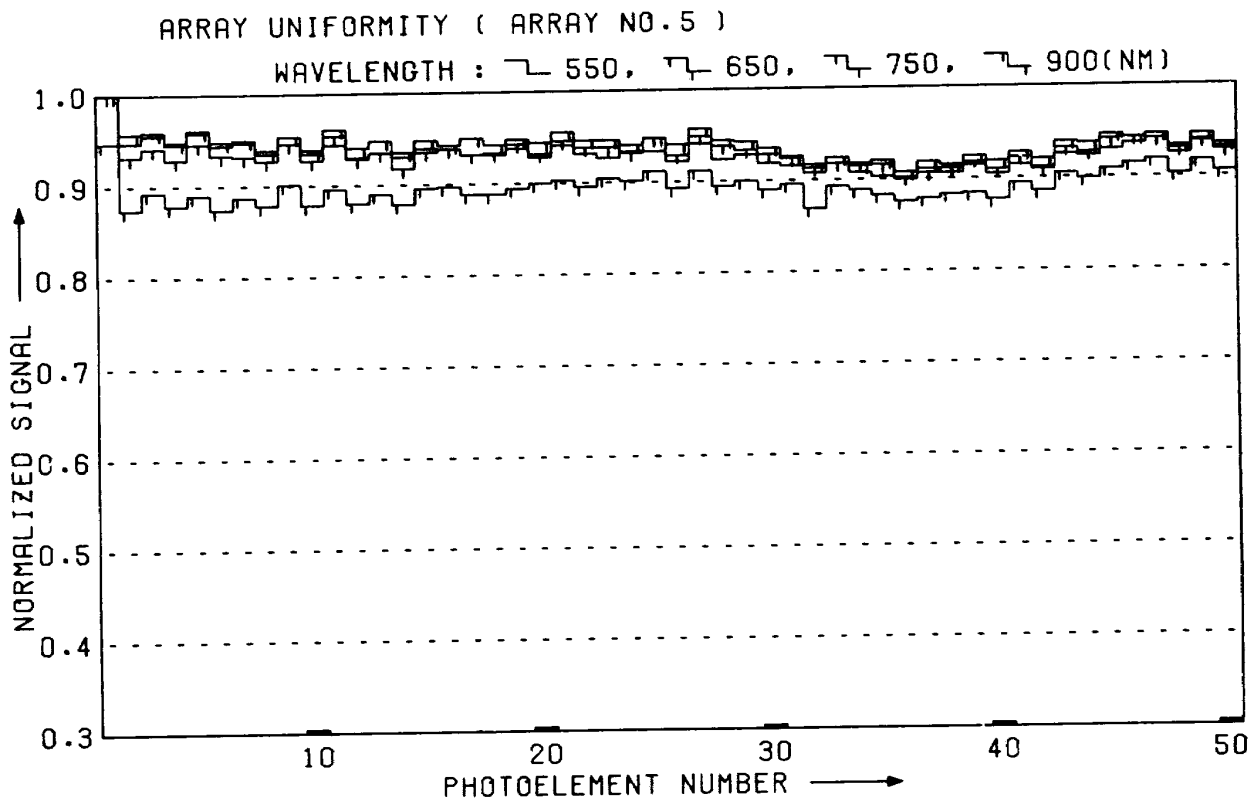
付図 4.13



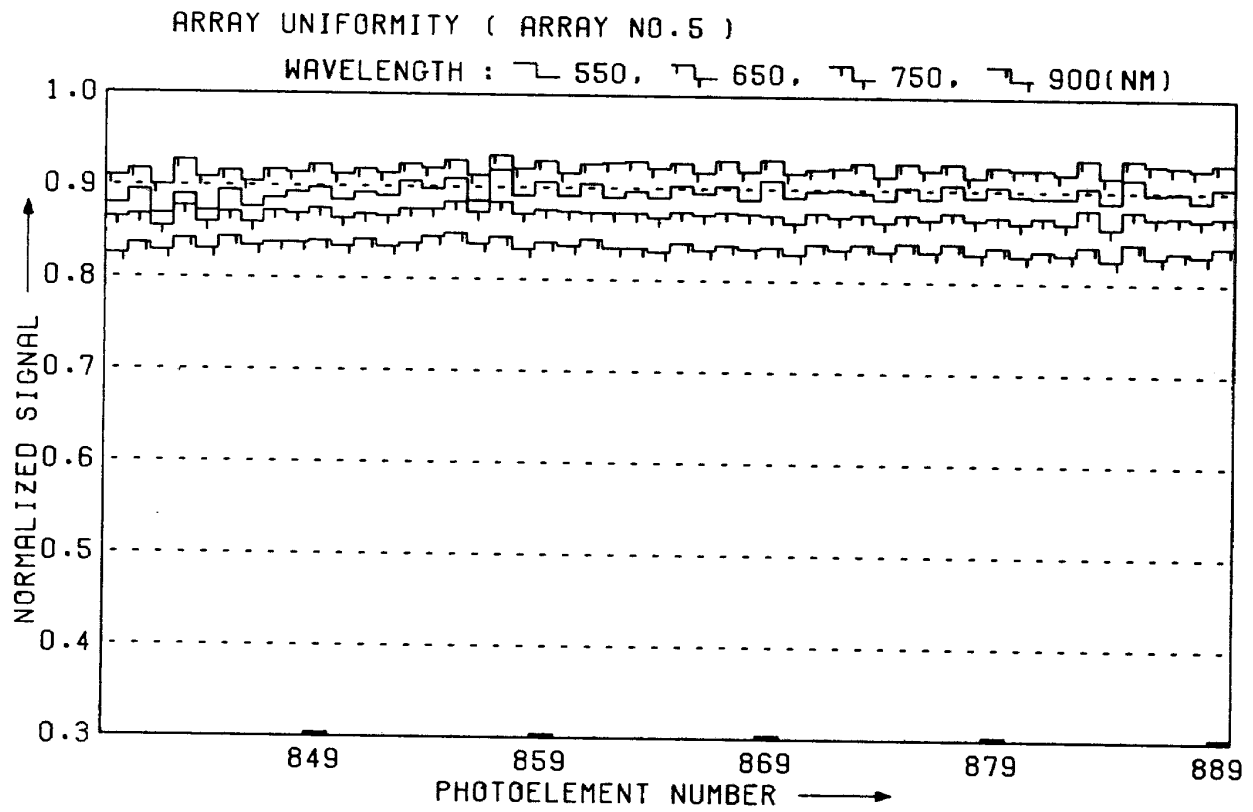
付図 4.14



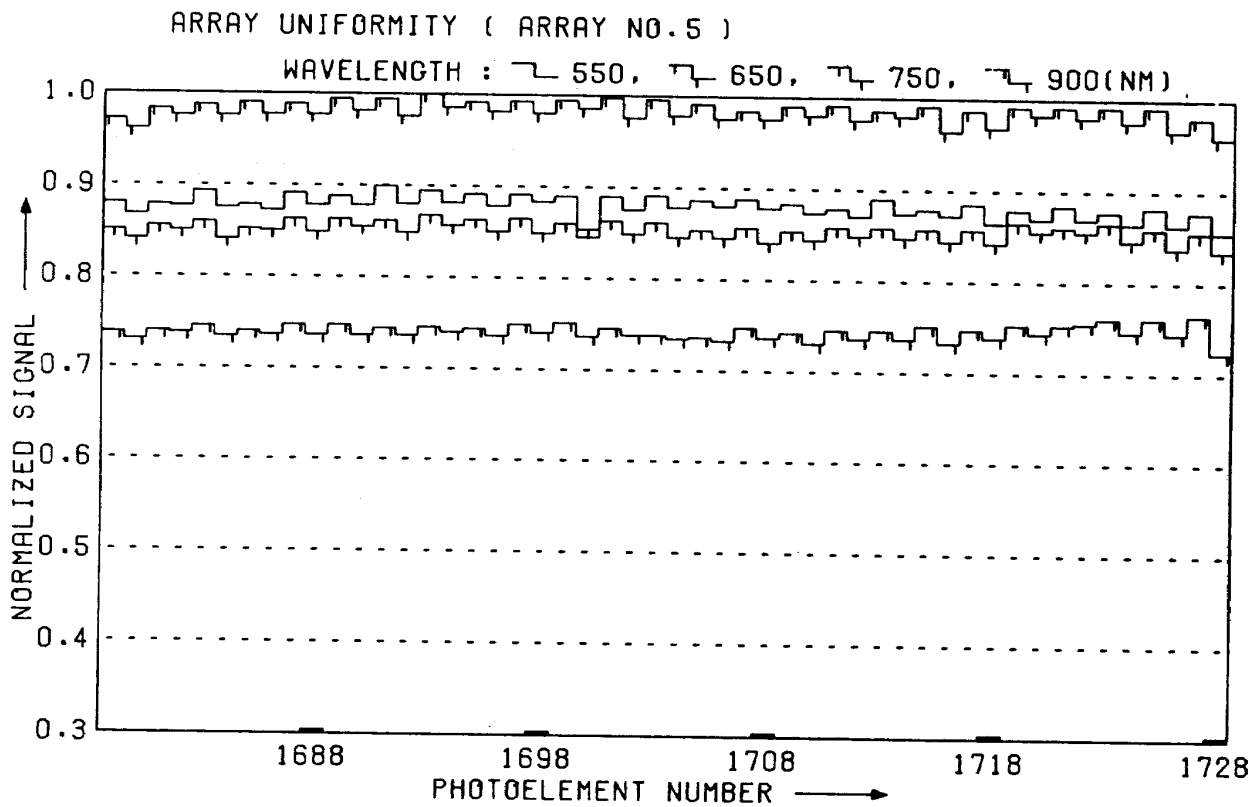
付図 4.15



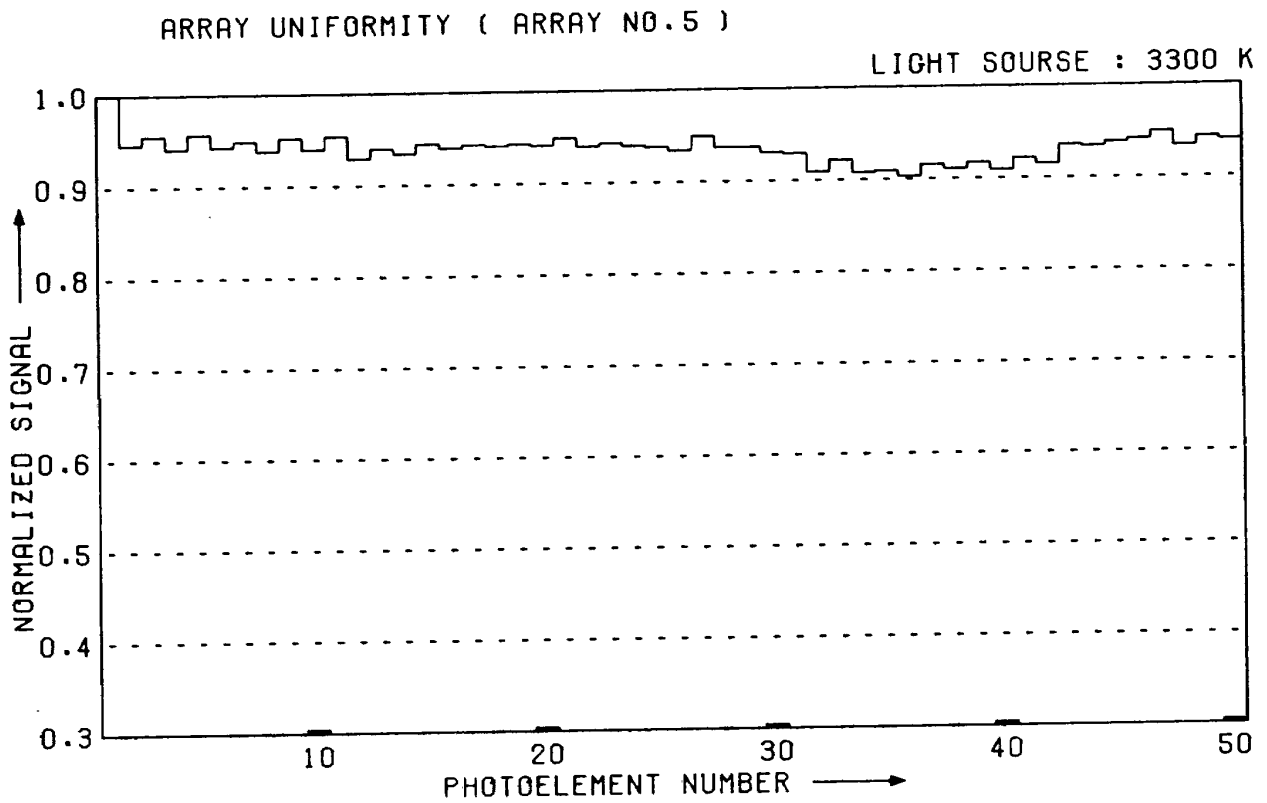
付図 4.16



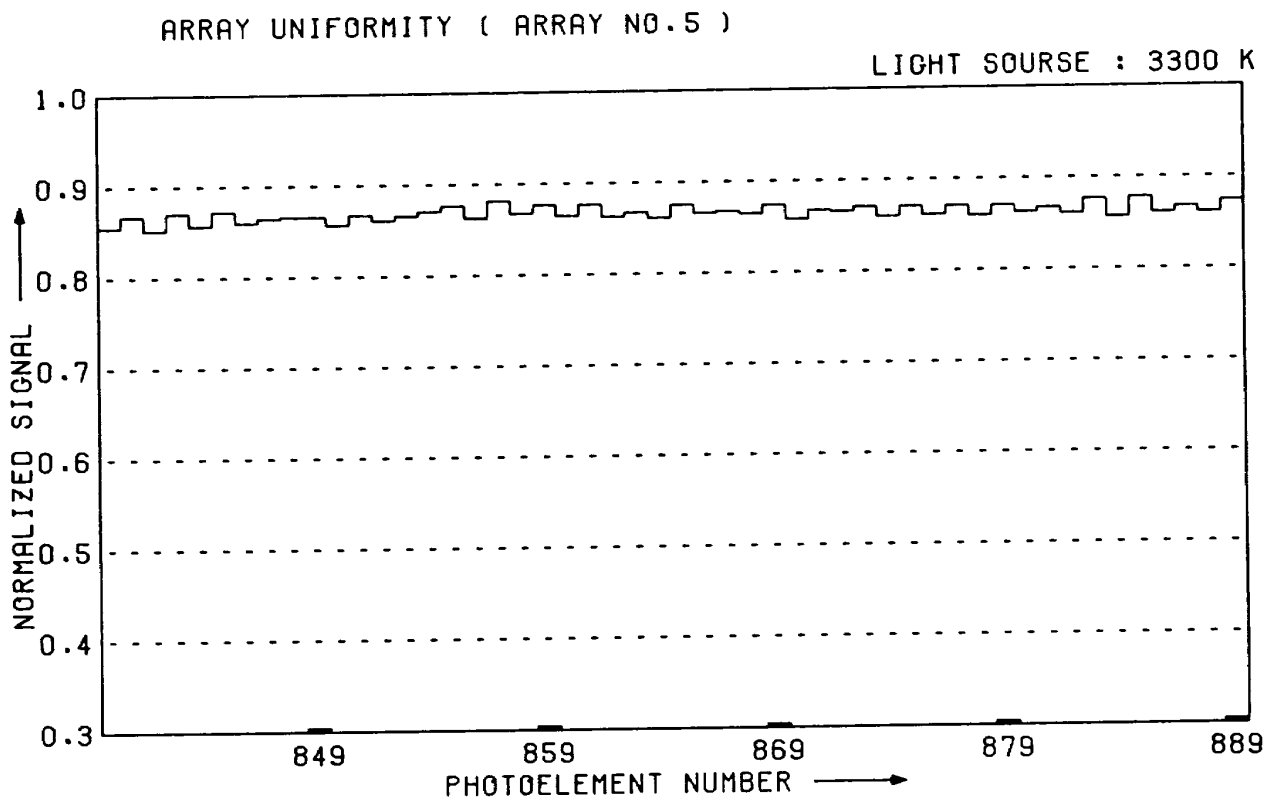
付図 4.17



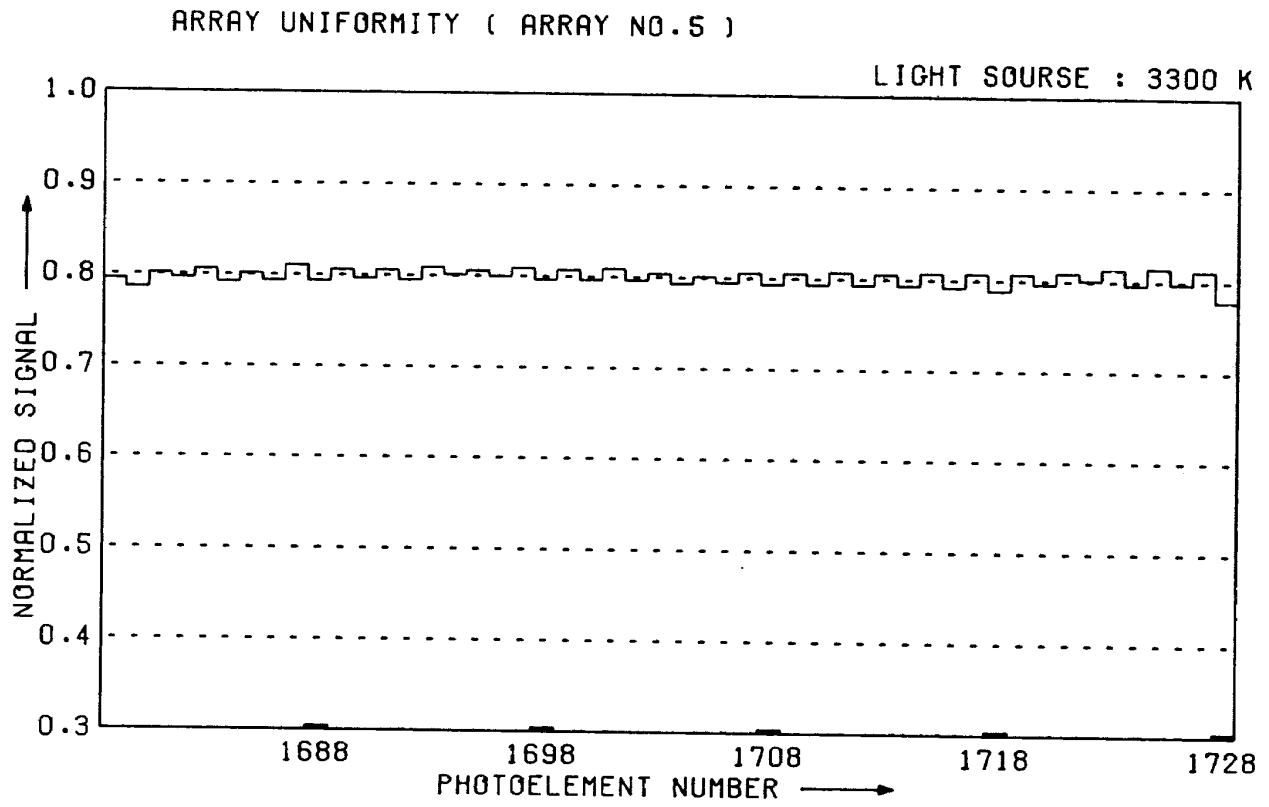
付図 4.18



付図 4.19



付図 4.20



付図 4.21

航空宇宙技術研究所資料 398号

昭和54年11月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺町1880
電話武蔵野三鷹(0422)47-5911(大代表)〒182
印刷所 株式会社 共 進
東京都杉並区久我山4-1-7(羽田ビル)
