

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-438

可視近赤外放射計用イメージセンサの評価試験

桜井善雄・木村武雄・奥石肇

1981年6月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

可視近赤外放射計用イメージセンサの評価試験*

桜井善雄** 木村武雄** 奥石 肇***

1. まえがき¹⁾

我国の地球観測衛星1号機は昭和59年度に海洋観測衛星(MOS-1)として打ち上げられる予定であり、その後地球資源衛星(ERS-1)も昭和61年度頃打ち上げを目標に開発研究が進められている。MOS-1には国産初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。LANDSAT に搭載されているMSS(Multispectral Scanner)は機械的走査(鏡の振動)を行うが、これに対してこの放射計は電子的走査を行うところに大きな特色がある。

この電子的走査は CCD リニア・イメージセンサ(以下 CCD センサと略す)により行われる予定であるが、これは一般的に CCD センサに限定する必要はなく、これに類するリニアアレイのイメージセンサ(以下センサと略す)であれば何でもよい。時代の要請から考えて放射計の高性能化の要求はますます強くなると思われるが、これを実現するための技術資料を得るために、ここではセンサの最も代表的なものであるホットダイオードアレイセンサ(以下 PDA センサと略す)と CCD センサ(いずれのセンサも 2048 画素)の 2 種類のセンサを選び常温において評価試験を行うと共に、以前に試験したセンサの試験結果とも合わせ比較検討を加えた。

ここで試験したセンサの特性は、(1)直線性、(2)分光感度特性、(3)分光感度分布特性、(4)画素間の不均一性である。その結果有用な結果を得たので報告する。なおこの試験の内の CCD センサに関する試験は昭和54年度の宇宙開発事業団との共同研究「放射

計の試験法・評価法の研究」として行われたものである。

2. センサの概要

ここで取り扱うセンサは元来ファクシミリ用を主目的として作られたものであり、画素数の多いものでは 1024, 1728, 2048 画素の 3 種類のものが主として市販されている。これらを放射計用のセンサとして考えた場合には、放射計の分解能をできるだけ上げたいという要求から画素数は多いものほど望ましく、したがって 2048 画素のセンサに最も興味がある。センサの種類(タイプ)は市販されているものでは大別して 2 種類あり、その 1 つがホットダイオードアレイであり他の 1 つが CCD である。ここでは 1 ~ 2 年前より発売され始めた外国製の比較的新しい 2 種類のセンサを取り上げ評価試験を行った。表 2.1 はここで試験したセンサの仕様概要等であり、写真 2.1 はその概観で上側が PDA センサ、下側が CCD センサである。なお表 2.1 のアレイ No.(array No.)

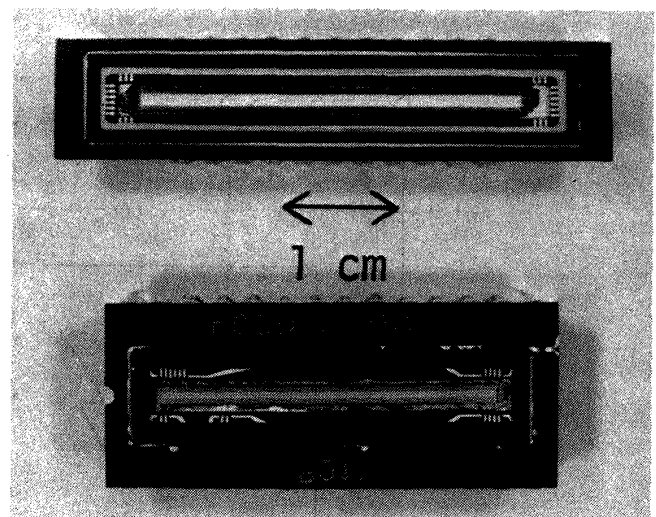


写真 2.1 センサの概観

* 昭和56年5月28日 受付

** 計測部

*** 計算センター

表 2.1 センサの仕様概要等

センサの種類	ホットダイオードアレイ	CCD
会社名	Reticon	Fairchild
型名	RL 2048 H	CCD 143 DC
画素数	2048	2048
画素の大きさ	7 μm \times 16 μm	8 μm \times 13 μm
チャンネルストッパーの幅	8 μm	5 μm
画素配列ピッチ	15 μm	13 μm
受光部	ホットダイオード	MOS容量
最大サンプリング周波数	3 MHz	20 MHz
試験した数	1 個	1 個
アレイ No.	7	8

とは被験センサを区別するために便宜上付けた番号である。

2.1 PDA センサ

ここで試験した PDA センサ (RL 2048 H) は 2048 個の独立した画素 (photoelement), すなわち光電変換用のホットダイオードが 1 つのシリコンチップ上に 15 μm 間隔で直線状に並べられたものであって, 各ホットダイオードからの信号は同上のシリコンチップ上に作られた電界効果トランジスタ (MOSFET) のスイッチング作用により逐次時系列信号として取り出せるようになっている。

このセンサの原理的な等価回路図を図 2.1 に示す。

ここにおいて $D_1 \sim D_{2048}$ はホットダイオードであり, $C_1 \sim C_{2048}$ はそれぞれ $D_1 \sim D_{2048}$ に対応するホットダイオードの内部容量であり, $T_1 \sim T_{2048}$ はそれぞれ $D_1 \sim D_{2048}$ に対応するホットダイオードを on-off するための MOSFET であり, $S_1 \sim S_{2048}$ はそれぞれ $T_1 \sim T_{2048}$ に対応する MOSFET をコントロール (on-off) するためのスイッチでこれらの各スイッチは実際にはいくつかの MOSFET の組み合わせ回路で構成されているものであり, R は抵抗, E は電池である。

図 2.1 の動作原理を説明すると, まず S_1 が on になったとすると T_1 は on になり, C_1 は E によってほ

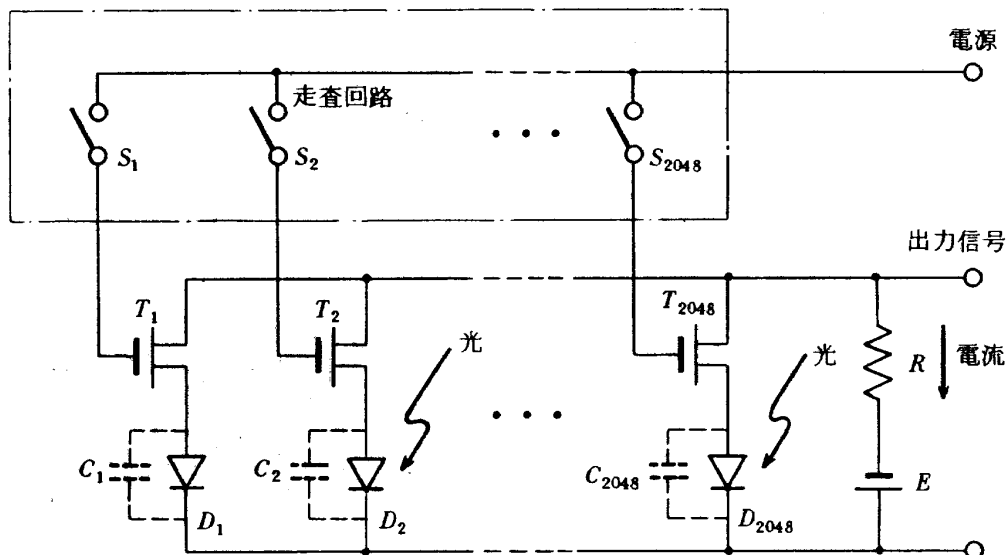


図 2.1 PDA センサの等価回路

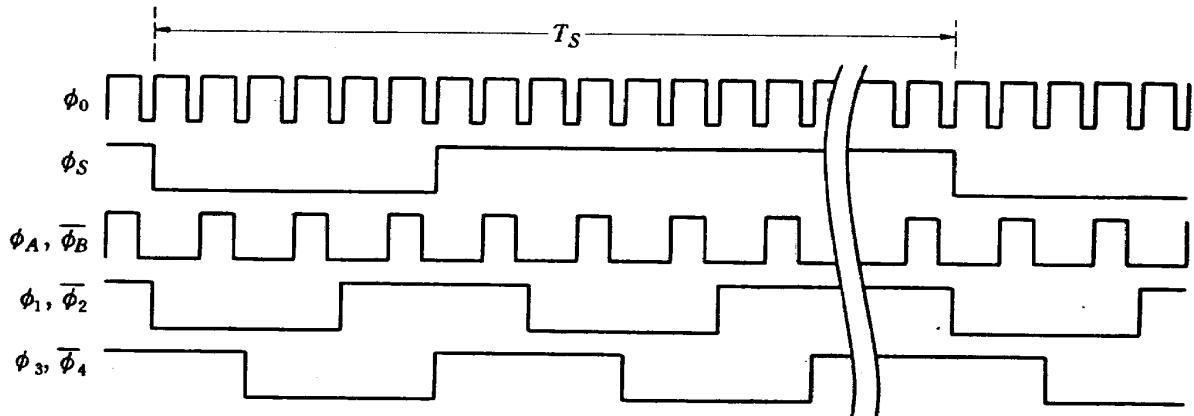


図 2.2 PDA センサのクロックパルス

とんど瞬時的に R を通して充電される。充電が終わると S_1 は off になり、したがって T_1 も off になる。次に同様な on-off を S_2, \dots, S_{2048} と逐次行って C_2, \dots, C_{2048} を充電して行く。

今 D_1 にある一定波長の光が当たっていると仮定すると D_1 の内部には光の強さに比例した電子とホールが発生し、これが C_1 に既に充電されている電荷を中和するように作用する。(光の強さ) \times (光の当たっている時間) は D_1 の内部に発生する電子の数(又はホールの数)に比例し、この数は C_1 に充電されている電荷の内の減少した電荷(中和された電荷)に比例する。 D_1 が充電されてから後、再び D_1 が充電される時には C_1 の減少した電荷を補充するための電流が R にパルス状に流れ、これが(光の強さ) \times (光の当たっている時間) に比例することになる。

上述の現象は $D_2 \sim D_{2048}$ にも同様に言えるので、 $S_1 \sim S_{2048}$ が逐次 on-off のスイッチング動作を一定の周期で繰り返して行くと、各ホトダイオードに当たった光の強さに比例する信号(電圧信号)がその都度 R の両端に現れる。

実際の回路においてはホトダイオードに光が当たらなくても内部で熱によりわずかの電子とホールが絶えず発生しているので、コンデンサに充電された電荷はこれによって徐々に放電(減少)し、ホトダイオードがスイッチングされて再充電されるときには R に充電電流(暗電流)が流れることになる。

このセンサを駆動するためには +5V の直流電源とマスタークロックパルス ϕ_0 を除くスタートパルス ϕ_S と 6 種類のクロックパルス $\phi_A, \phi_B, \phi_1, \phi_2, \phi_3,$

ϕ_4 が必要である。なお ϕ_A と ϕ_B, ϕ_1 と ϕ_2, ϕ_3 と ϕ_4 はそれぞれ互に逆相の関係にある。これらの関係を図 2.2 に示す。

これらのパルスで ϕ_0 と ϕ_S 以外のクロックパルスは図 2.1 で考えるならば $S_1 \sim S_{2048}$ のスイッチを逐次 on \rightarrow off するために使われるものであり、 ϕ_S は S_{2048} の on \rightarrow off 動作が終わって S_1 の on \rightarrow off 動作が新たに開始する間に走査の区切の情報を与えるためのパルス(フレーム信号)であって、 ϕ_S の周期 T_S が PDA センサの走査周期となる。また図 2.2 において ϕ_0 は低レベル(Lレベル)がおおよそ 0V、高レベル(Hレベル)がおおよそ +5V のいわゆる TTL レベルのパルスであるが、その他のパルスはすべて Lレベルがおおよそ -7V、Hレベルがおおよそ +5V のパルスである。なお ϕ_0 は他のパルスを作るための基準となるパルスであり、この繰り返し周波数はサンプリング周波数(1画素分の出力信号を送り出すのに要する時間の逆数)と同じである。

2.2 CCD センサ

ここで試験した CCD センサ (CCD143 DC) は 2048 個の独立した光電変換用の画素が 1 つのシリコンチップ上に $13 \mu\text{m}$ 間隔で直線状に並べられたものであって、各画素からの信号(電荷)は CCD (Charge Coupled Device) で構成されたアナログシフトレジスタにいったん蓄えられ、その後クロックによってアナログシフトレジスタから逐次時系列信号として取り出せるようになっている。この様子を示す模式図を図 2.3 に示す。

CCD センサの動作原理を説明するために、ある 1 つの画素近傍の断面略図を図 2.4 に示す。ここに

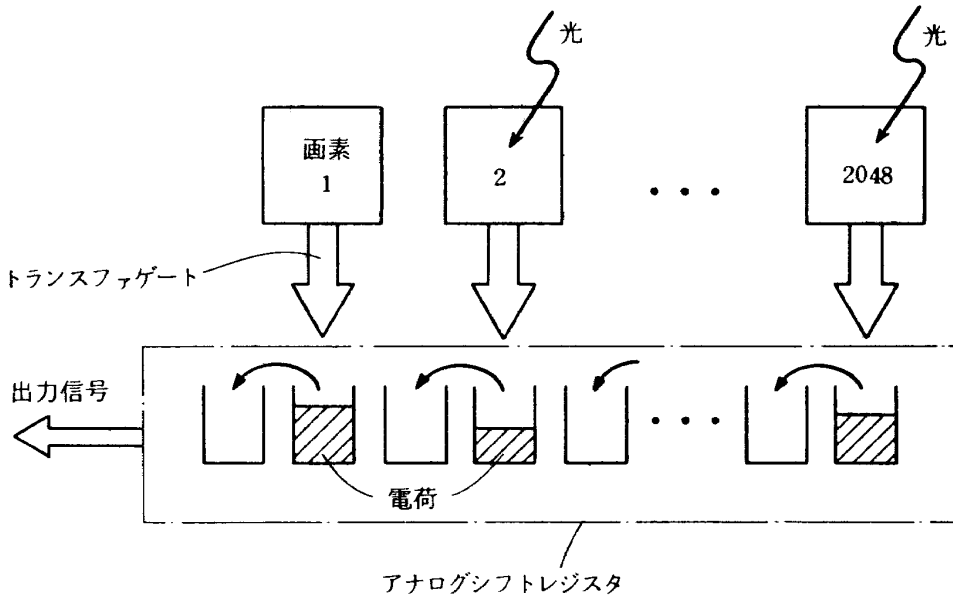


図 2.3 CCD センサの模式図

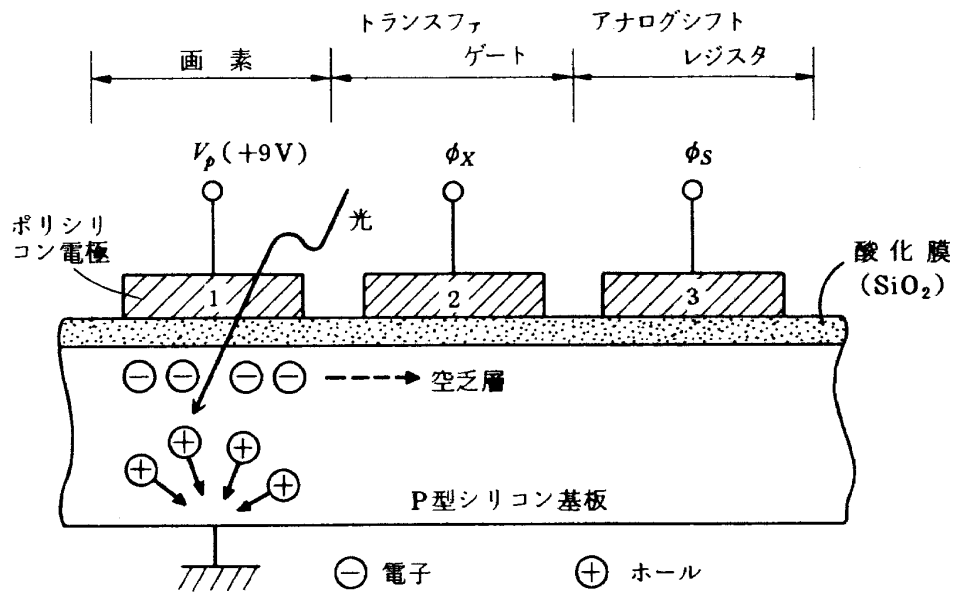


図 2.4 CCD の動作原理

において光は上側の方向からのみ入射するものとし、またホットゲート電圧 V_p が加えられているポリシリコン電極 1 以外の上側部分にはここでは図示していないが絶縁物を介してアルミニウム等で覆われ、しゃ光されているものとする。ポリシリコン電極 1 および SiO_2 の酸化膜（絶縁物）は十分薄く作られているので光は透過して P 型シリコン基板内部に入射し、光の強さに比例した数の電子とホールを発生させる。

今トランスファクロック ϕ_x およびシフトレジスタクロック ϕ_s が L レベル (0V) であると仮定すると光により発生したホールはアースに流れ込み、電子

はバイアス (+9V) されたポリシリコン電極 1 の下の P 型シリコン基板内の表面近くに誘導された空乏層と言われる一種のコンデンサに蓄えられる。 ϕ_x が L レベルから H レベル (+11.5V) に変化するとポリシリコン電極 1 の下の空乏層に蓄えられた電荷 (電子) はポテンシャルの高いポリシリコン電極 2 の下の空乏層に移動し、次に ϕ_s を H レベル (+11.5V) にし、 ϕ_x を除々に L レベルにしたとすると、ポリシリコン電極 2 の下の空乏層の電荷はポリシリコン電極 3 の下の空乏層に移動する。このようにして光によって発生した電荷は画素からトランスファゲ

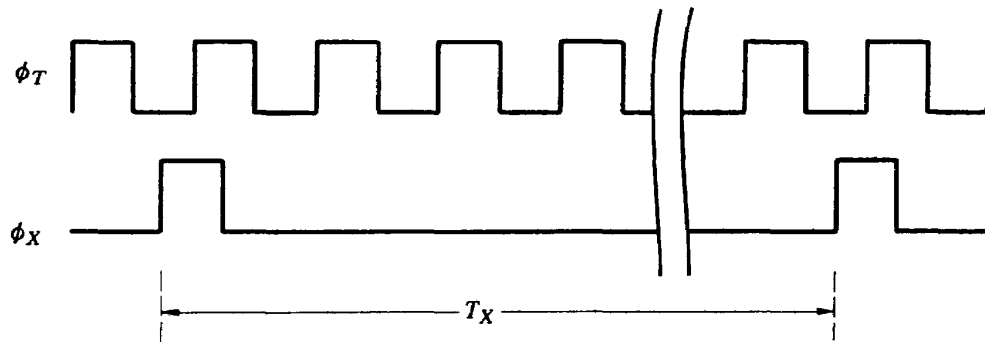


図 2.5 CCD センサのクロックパルス

ートを経てアナログシフトレジスタまで運ばれる。

図 2.3 のアナログシフトレジスタの動作原理も図 2.4 に述べたことと同様の原理であって空乏層に蓄えられた電荷を隣の空乏層に次々と転送して行き、逐次電荷を信号として取り出す。光の強さに比例したこれらの電荷は電圧に変換され、更に増幅されてから CCD センサの出力信号として取り出されるようになっている。

このセンサを駆動するためには +14V の直流電源と 3 種類のバイアス電圧 (+6.2, +9, +10.5V) および図 2.5 に示すようなクロックパルスが必要である。このセンサは以前に試験した CCD センサ (CCD121H) の改良型であって、クロックドライバ回路が内蔵されているためにユーザーが用意するクロックパルスは 2 種類だけで済み使いやすい。なお ϕ_X は光电変換されて画素に蓄積された電荷をアナログシフトレジスタに移すために使用されるクロックパルスであり、 ϕ_T はアナログシフトレジスタに移された電荷を逐次隣のレジスタに転送して時系列信号を得るために使われるクロックパルスであって、 ϕ_X および ϕ_T は共に L レベルが約 0V, H レベルが約 11.5V である。 ϕ_X の周期 T_X は CCD センサの走査周期であり、 ϕ_T の繰り返し周波数はサンプリング周波数の $1/2$ である。なおこのセンサにはサンプルホールド回路が内蔵されているので、これを用いて出力信号をサンプルホールドすることも容易にできる。

3. センサの性能試験方法

3.1 センサの性能試験用電子回路

センサの諸特性を測定するためにはセンサを作動

させる必要がある、このためにはセンサ駆動用クロックパルスを発生するためのセンサ駆動回路が必要である。またセンサから得られる時系列信号の中から計測したい画素からの信号分のみを取り出すための計測用電子回路も必要である。

本試験に用いたこれらのための計測システムのブロック図を図 3.1 に示す。この中でセンサが異なるとセンサ駆動回路もそれに応じて異なってくるが、その他の部分はほとんど変更なく共通して使用できる部分である。

図 3.1 の出力信号選択回路は主として図 3.2 に示すような構成で成り立っている。ここでマスタークロックパルスは PDA センサに関しては図 2.2 の ϕ_0 と同じであり、CCD センサに関しては図 2.5 の ϕ_T に同期した ϕ_T の 2 倍の繰り返し周波数を持つクロックパルスと同じであって、いずれもサンプリング周波数と同じである。また同期信号は PDA センサに関しては図 2.2 の ϕ_S と同じであり、CCD センサに関しては図 2.5 の ϕ_X と同じである。カウンタ 1 および 2 には同期信号が入る度ごとにそれぞれプリセットスイッチ 1 および 2 においてセットされている数の内容がそれぞれリセットされ、その後リセットされた各カウンタ内の数はマスタークロックパルスが入る度ごとに 1 つずつ引算されて行き、カウンタの中が 0 になるとただちにこの情報がそれに対応するパルス発生回路に伝わり、適当なパルス幅のパルスが発生される。パルス発生回路 1 および 2 において発生したパルスはそれぞれサンプルホールド回路のコントロール信号およびオシロスコープの同期信号として使われる。

例えばプリセットスイッチ 1 および 2 をそれぞれ

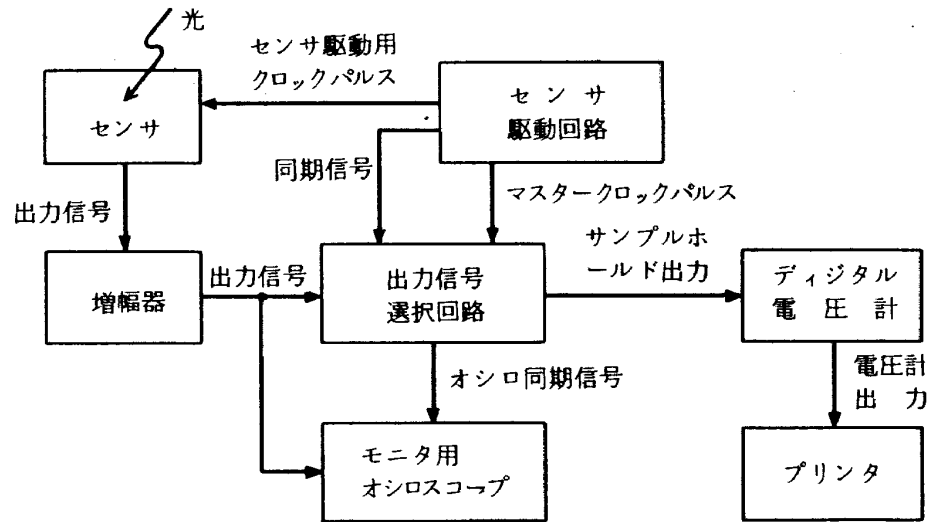


図 3.1 計測システムの構成

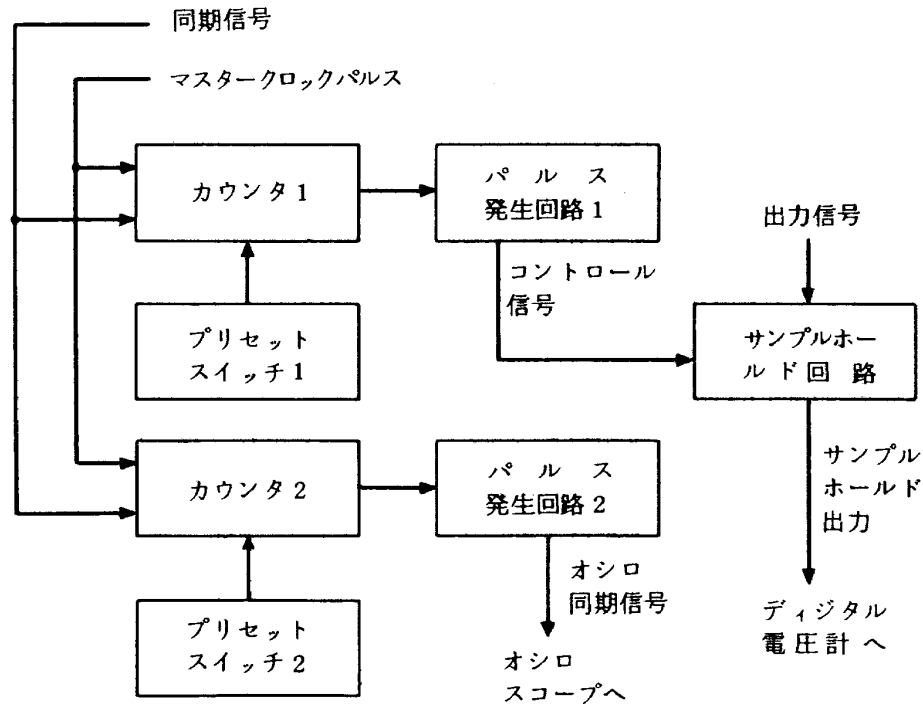


図 3.2 出力信号選択回路の構成

1005 および 1000 にセットしたとすると同期信号から数えて1005番目のマスタークロックパルスに対応する出力信号のみがサンプルホールドされてデジタル電圧計により測定され、またオシロスコープの出力波形は一番左側が同期信号から数えて1000番目のマスタークロックパルスに対応する出力信号となる。したがってオシロスコープの左から6番目の出力信号がデジタル電圧計で測定している出力信号となる。

このようにしてプリセットスイッチ1によってセ

ンサの任意の画素番号 (Photoelement No.) からの信号を選択し、これを測定すると共に、また結果をプリンタによって記録することもできる。また実際の計測に際してはセンサからの出力信号で計測したい画素近傍の出力信号のみを時間軸に対して拡大しモニタしたいことがしばしばあるが、このような場合にはプリセットスイッチ2を適当に選ぶことによりこれを容易に行うことができる。

3.2 分光微小点光源装置

センサの光電変換に関する諸特性を測定するため

には計測しようとしている画素の全面にあるいは画素の一部分にできるだけ様なしかも明るい単色光（または単色光に近い光）を当てる必要が生じる。この目的のために試作したのが以下に述べる分光微小点光源装置である。

従来顕微鏡を用いた分光微小点光源装置としては図3.3に示すようなものが使用されていた。²⁾ここで光源アダプタの代わりに点線で示すカメラボディを取り付けると顕微鏡写真を撮る構成となる。もしもカメラのフィルム面上に適当な大きさの円形の面光源を置いたとすると、この光は逆顕微鏡としてその倍率に応じて縮小され、被験センサ上にスポットを結像する。光源アダプタは分光された微小面光源を作るためのもので、白色光をフィルタによって分光し、ディフューザで明るさのむらをできるだけ無くし、しゃ光板に開けられた微小穴を通してできるだけ様な明るさの微小面光源を得ている。

一方センサの分光感度分布特性を測定するためには直径が1.5～2.0 μm程度の明るいスポットが必要となるが、これに対して従来の方法では次のよう

な欠点があった。

- (1) スポットの直径を1.5～2.0 μm程度にするとセンサに必要とする十分な光量が得にくい。
- (2) スポットの径が連続的に調節しにくい。
- (3) 波長が連続的に変えにくい。
- (4) 光源を強くすると光源アダプタの重量が増し、顕微鏡の上に乗せることが不適當になる。

筆者らは光源アダプタの代わりに図3.4に示すようなファイバアダプタを用いて上述の欠点を次のように大幅に改善した。

スポットの明るさを増すために集光レンズを用いて入射光量の増加を図ると共に光ファイバを用いることによって白色光源を顕微鏡の上部から切り離し、分光器を用いて任意の波長の光が容易に選択できるようにすると共に合わせてファイバ射光面を上下に適当に動かし任意の位置で固定できるようにしてスポットの径が連続的に調節できるようにした。

次に直径1.5 μmのスポットを作るための設計例を示す。顕微鏡から顕微鏡写真アダプタまでの光学系の倍率を300倍、集光レンズの焦点距離 $f=15.6$ mm、ファイバ射光面（円形）の直径=2 mmとす

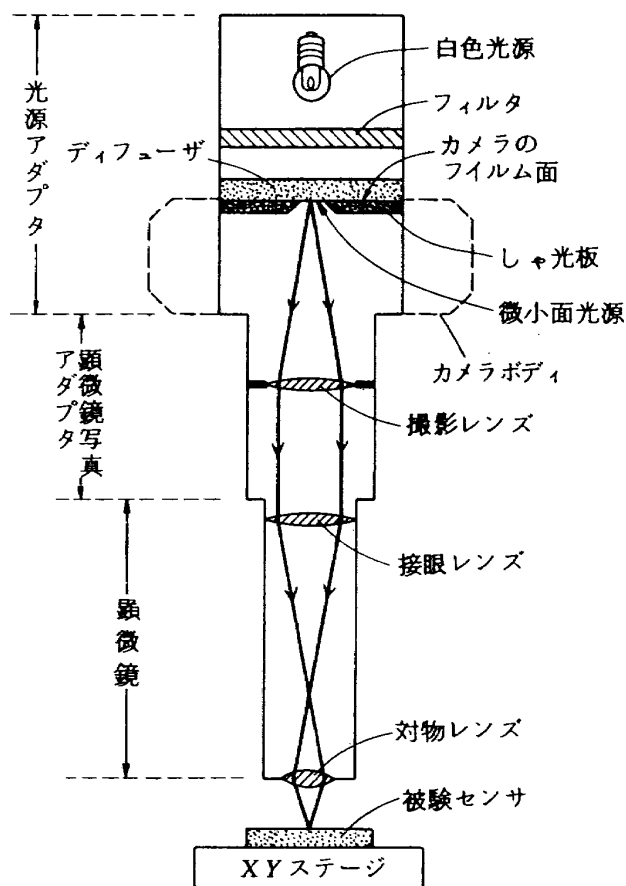


図3.3 従来の分光微小点光源装置

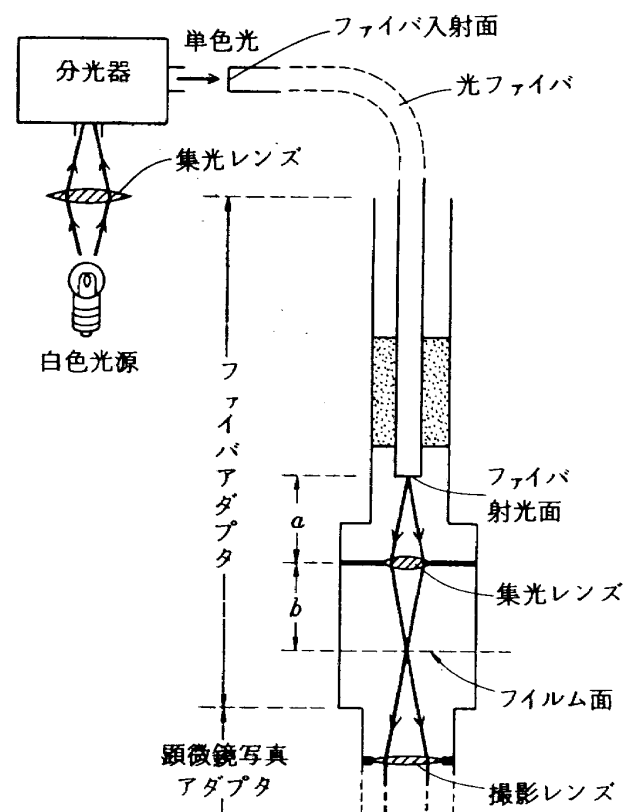


図3.4 試作した分光微小点光源装置

ると

$$\begin{cases} \frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \\ 1.5 \times 10^{-3} \times 300 \times \frac{a}{b} = 2 \end{cases}$$

の関係から $a \doteq 84.9$ (mm), $b \doteq 19.1$ (mm) となり, ファイバアダプタ製作上作りやすい妥当な値となる。ここに a はファイバ射光面から集光レンズまでの距離, b は集光レンズより結像面 (図 3.3 のカメラのフィルム面に対応する面) までの距離である。

3.3 センサ諸特性の試験方法

センサ諸特性の試験方法については当研究所資料 (TM-398) で既に述べているのでここではその概要を述べ, まだ述べていない部分のみを詳細に述べる。なおセンサの試験はサンプリング周波数を 300 KHz にして行ったが, PDA センサの分光感度分布特性の試験だけは光量不足のため 100 KHz に下げて行った。

3.3.1 直線性の試験方法

白色光の点光源 (直径 4 mm) を用い, 「被照面 (センサの受光面) 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」性質を利用してセ

ンサを光学ベンチ上で動かし, 点光源とセンサとの距離を変えて放射照度を変え, 直線性 (センサの入射光量と出力信号との関係) の試験を行った。

3.3.2 分光感度特性の試験方法

分光器入力光源 (白色光源) を一定にして分光器出力側の適当な場所に, 基準センサの受光面 (1 cm² の円形) に様な光が当たるよう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被験センサの受光面を置き換え, 被験画素の出力信号 $V_c(\lambda)$ を $V_r(\lambda)$ と同様に測定する。基準センサの分光感度特性は既知であるからこれに $V_c(\lambda)/V_r(\lambda)$ を乗ずれば被験画素の分光感度特性が求まる。

PDA センサの被験画素として中央の画素 (画素 No.1025) を選び受光面の直前に 25 mm 幅のスリットをスリットの中央が被験画素のほぼ中央になるように置いてセンサ受光面の両端部分を除くほぼ全面に光が当たるようにして相対分光感度特性を求めた結果, 図 3.5 の SLIT 25 (mm) (右側の一番上) のグラフに示すような結果を得た。PDA センサはシリコンを用いたセンサ故に 1000~1100 nm (1~1.1 μ m) 付近の波長領域で大きな感度を持つことは物

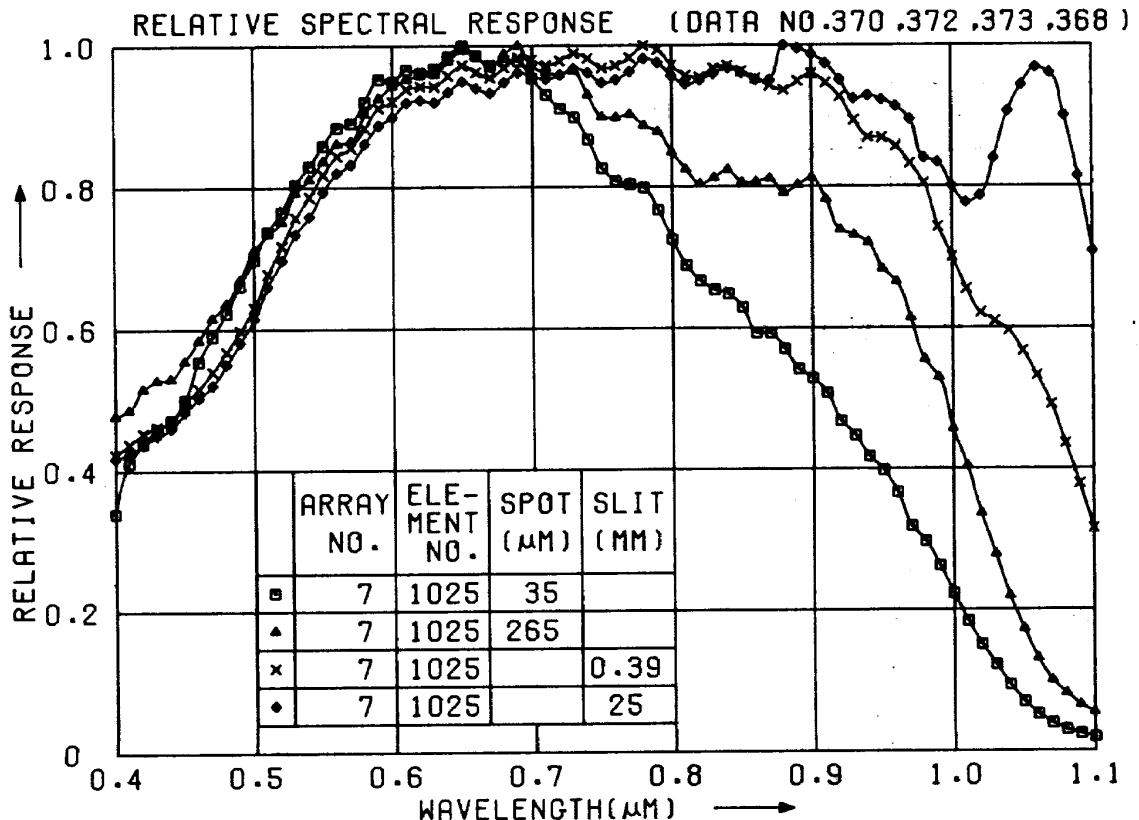


図 3.5 照射光の形状が相対分光感度特性に及ぼす影響

理的に考えにくい。そこでスリット幅だけを0.39 mmに変更し、被験画素付近以外の光を遮断して前と同様に相対分光感度特性を求めた結果、図3.5のSLIT 0.39 [mm]のグラフに示すような結果を得た。これらの結果から考えると、1000~1100 nm付近の波長領域でこのセンサは被験画素以外の所に当たる光の影響を相当受けていることが予想される。そこでこのセンサの被験画素の分光感度特性をできるだけ正確に求めようとするならば、できるだけ被験画素だけに光を当てる必要がある。スリットでこれを行おうとしてもセンサ表面(画素を保護するために画素の上に覆せられた保護ガラスの表面)から被験画素の表面迄はおよそ1.5 mmの光路長があるために、スリット幅をあまり狭くする(例えば0.3 mm以下にする)と回折の影響がだんだんと強く現れるようになり、スリットがある場合と無い場合とで被験画素に当たる放射照度が異なり具合が悪い。

そこでこの影響を避けるために顕微鏡でスポットを作り、これを被験画素に当てて分光感度特性を求めることとした。しかしながら顕微鏡で作られたスポットの放射照度はスポットが小さすぎて基準センサで直接実測することがむずかしい。そこでスポッ

トの放射照度を求めようとする間接的に求めることになるが、ここでは簡単のためにスポットの相対的な放射照度を求めた。このためには図3.4に示すように光ファイバと顕微鏡関係のレンズ系との透過率が必要となる。これらの各透過率を乗じたものを T とし、ファイバ入射面の面積 A_1 における放射照度を E_1 、スポットの面積 A_2 における放射照度を E_2 とすると

$$E_2 \propto \frac{TE_1 A_1}{A^2} \quad (3.1)$$

となる。スポットの直径を $35 \mu\text{m}$ にした場合の T を正規化した結果を図3.6に示す。

PDAセンサにおいてスポットの直径を $35 \mu\text{m}$ および $265 \mu\text{m}$ にしたときの相対分光感度特性の一例をスリットの場合と同様に図3.5に示す。これらのグラフから700 nm以下の波長においてはスリットの場合とスポットの場合とがほとんど一致し、700 nm以上になると徐々にそれらの差が大きくなっていることがわかる。このような現象は光電変換された後に起こると思えないので、主として保護ガラスによって生じていると推定される。

スポットの直径が $35 \mu\text{m}$ の相対分光感度特性は以

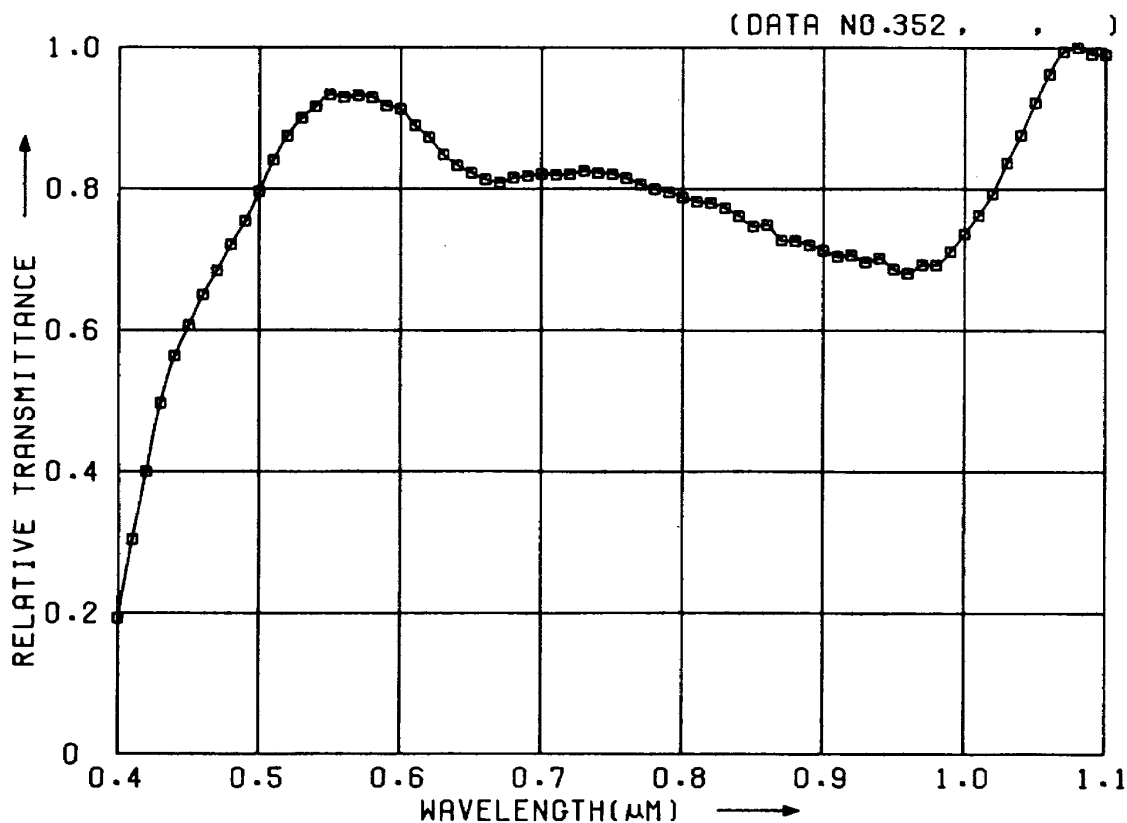


図3.6 光ファイバを含む光学系の相対透過率の一例

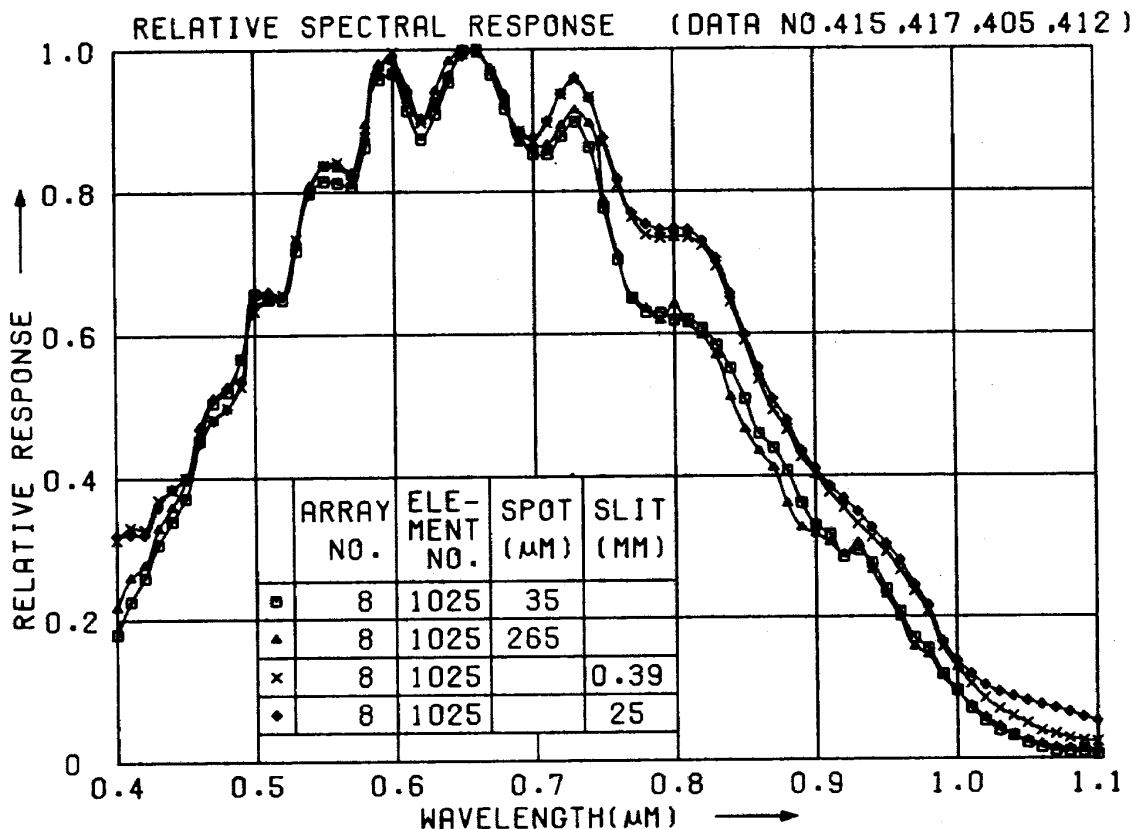


図 3.7 照射光の形状が相対分光感度特性に及ぼす影響

前に測定した CCD センサの特性等から比較して見ても妥当であると思われるので、PDA センサの相対分光感度特性の測定には $35\ \mu\text{m}$ のスポットを用いた。

CCD センサについて図 3.5 と同様の測定を行った結果を図 3.7 に示す。この結果からスリット幅 $0.39\ \text{mm}$ の場合と $25\ \text{mm}$ の場合とは、ほとんど特性が一致していることがわかる。またスポット直径 $35\ \mu\text{m}$ の場合と $265\ \mu\text{m}$ の場合とでも、ほとんど特性が一致していることがわかる。このことから考えて CCD センサの場合には保護ガラスの分光感度特性に及ぼす影響はほとんどないと考えられる。スポットの場合には 4 組のレンズの各透過率の測定結果と光ファイバの透過率の測定結果とから (3.1) 式の T を求め間接的にスポットの相対的な放射照度を求めているために、相対分光感度特性の誤差はスリットの場合よりも多くなると考えられる。したがって CCD センサの場合にはスリットを用いた方が相対分光感度特性の誤差は少ないと考えられる。そこで CCD センサの場合には $0.39\ \text{mm}$ 幅のスリットを用いて試験を行った。

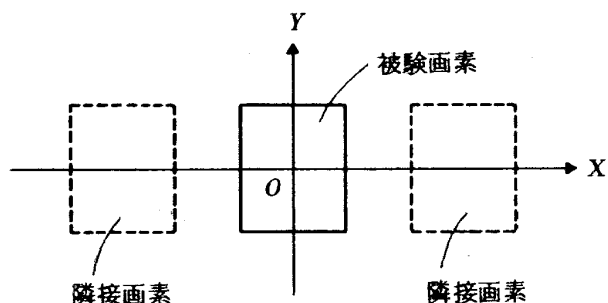


図 3.8 被験画素の座標

3.3.3 分光感度分布特性の試験方法

波長のパラメータとして $550, 650, 750, 900\ \text{nm}$ を選び、被験画素の座標を図 3.8 のように選んだときに直径が約 $1.5 \sim 2.0\ \mu\text{m}$ の分光スポットを X 軸上または Y 軸上に当てて走査し、そのときの被験画素の出力信号を測定して分光感度分布特性 (分光位置感度特性) を求めた。

3.3.4 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) の試験は 3.3.3 で述べた分光感度分布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絶えず一様な明るさのスポット

が当たるようにXY ステージを動かして試験した。ここで試験した2つのセンサは共に奇数の画素番号から取り出される出力信号と偶数の画素番号から取り出される出力信号とがセンサの別々の端子(ピン)から取り出されるようになっている。そこでセンサ全体の感度むらの概要を調べるときにはサンプリング画素の間隔を偶数とせず奇数(11)とした。

4. センサの性能試験結果

4.1 直線性の試験結果

各センサの中央付近の画素と両端付近の画素との代表的な9画素に関する直線性の試験結果を付図1.1~1.6に示す。なお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。またグラフの縦軸の1は画素の飽和レベルであり、横軸の相対的な放射照度は画素に入射する光エネルギーに比例する量である。

付図1.1~1.6の各基準直線からの計測点のずれを%で表したものが付図1.7~1.24である。これらの結果からPDAセンサの直線性はおよそ±0.4%以内に入っており、比較的良好であることがわかる。これに対してCCDセンサの直線性は±0.9%程度と前者に比べても、また以前に測定したCCD121Hの±0.4%に比べてもあまり良くない。

CCDセンサの画素番号がおよそ1900以上の画素は4.4で後述するように(付図4.12参照)感度むらが大きく、若干欠陥を持っているように思われる。付図1.22~1.24の画素の直線性が±1.1~1.3%と他の場所の画素の直線性に比べて悪いのも、これが主な原因と思われる。

4.2 分光感度特性の試験結果

各センサの代表的な部分の画素の相対分光感度特性の試験結果を付図2.1~2.10に示す。以前に試験したセンサの結果では相対分光感度特性のパラツキは隣接する画素間ではほとんど無く、画素間が大きく離れた場合のみ大きく現れていた。これに対して今回試験した両センサは共に画素間が大きく離れた場合でも相対分光感度特性のパラツキが非常に少なく、放射計用センサの特性として非常に好ましい特性を持っていることがわかる。

CCDセンサの画素No.1925付近の特性に関しては付図2.8および2.10からもわかるように他の部分の画素の特性と、特に900nm前後の波長領域において若干ずれているが、これは4.1で述べたように画素の欠陥によるものと思われる。

付図2.11~2.13は代表的な画素の分光感度特性を示す。ここで縦軸の1は4.1で述べた基準直線から-2%にずれたセンサの出力信号レベルで、飽和レベルに非常に近いレベルである。付図2.11および2.12はそれぞれのセンサに3.1および0.31($\mu\text{J}/\text{cm}^2$)のエネルギーが当たったときの代表的な画素出力レベルを示す。これらの結果からPDAセンサの感度はCCDセンサの感度に比べて非常に悪い(約1/10)ことがわかる。付図2.13はCCDセンサと以前に試験したセンサ(CCD121H, array No.5)との感度の比較をしたものである。この結果今回試験したCCDセンサは全体的に感度が上がっており、特に青色付近(400~500nm)の感度の向上が著しいことがわかる。

4.3 分光感度分布特性の試験結果

出力信号の最大値で正規化した相対分光感度分布特性の試験結果を付図3.1~3.52に示す。

付図3.1~3.10はPDAセンサの中央付近および両端付近の画素について波長をパラメータとして示したものである。Y軸上の特性は波長にほとんど依存せず非常に良好な特性を持っていることがわかる。しかしながらX軸上の特性は波長に大きく依存し、特に900nmでは分光感度分布が大きく拡がり、センサの分解能を低下させる原因となることがわかる。

付図3.11~3.20は上述のことをCCDセンサについて試験した結果である。Y軸上の特性はPDAセンサの場合と同様に波長にほとんど依存せず非常に良好な特性を持っていることがわかる。X軸上の特性についても波長による依存性は比較的少なく良好な特性を持っていることがわかる。しかしながら以前に試験したCCDセンサ(CCD121H)に比べると若干悪い。付図3.20においては900nmの波長において分光感度分布の拡がりがある他の画素に比べて若干大きいのが、これは4.1で述べたように画素の欠陥によるものと思われる。

付図3.21~3.36はPDAセンサにおいて波長を固

定し、画素の場所をパラメータとして特性を示したものである。付図 3. 21~3. 28 は中央付近の 3 個の隣接する画素について示したものであり、付図 3. 29~3. 36 はセンサの中央および両端付近の画素について示したものである。その結果いずれの場合においても波長が決まると、特性は画素の場所にほとんど関係無くほぼ同一であることがわかる。

付図 3. 37~3. 52 は上述の付図 3. 21~3. 36 と同様のことを CCD センサについて示したものである。これらの結果からも波長が決まると特性は画素の場所に関係無くほとんど同一であることがわかる。

なお CCD センサの X 軸上の特性において付図 3. 38, 3. 40, 3. 46, 3. 48 等に見られるように被験画素の中心 0 から X 軸上におよそ $-20 \sim -33 \mu\text{m}$ 離れた所にも被験画素は若干感度を持っているように見える。しかしながら、このことは物理的に考えても不自然であるので以下これについて考察する。

ここで試験した CCD センサは実際には集積度を上げる関係から図 4. 1 に示すように構成されている。すなわち奇数番目の画素からの各信号（電荷）は図 2. 5 に示す ϕ_x により走査周期ごとに全部同時にアナログシフトレジスタ A に転送され、その後時系列の出力信号 A として取り出されるようになっている。偶数番目の画素からの各信号も同様にして出力信号 A とは独立に、出力信号 B として取り出されるようになっている。

一方、例えば付図 3. 38 の画素 No. 1025 の特性で調べて見ると、CCD センサの画素配列ピッチは $13 \mu\text{m}$ であるから X 軸上の $-19.5 \sim -32.5 \mu\text{m}$ の位置が画

素 No. 1023 の置かれた位置に相当し、この位置にはほとんど一致して若干の信号が現れていることがわかる。X 軸上の $-20 \sim -33 \mu\text{m}$ 付近において実際に被験画素が感度を持っているならば、もっと被験画素に近い $-10 \sim -20 \mu\text{m}$ 付近においてはもっと大きな感度を持つのが普通である。またこの現象は接近した画素間では隣同士の特性格よりも奇数番目の画素同士あるいは偶数番目の画素同士の特性が良く一致していることが観測される。

上述のような種々の理由から考えて、X 軸上の $-20 \sim -30 \mu\text{m}$ 付近に現れる信号は実際に被験画素が感度を持つために現れた信号ではなく、シフトレジスタ内部における信号同士の干渉（一種の漏話現象）によるものと思われる。

4. 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. 12 に示す。付図 4. 1~4. 6 はセンサの両端付近の画素 50 と中央付近の画素 50 とを選び画素間の感度むらを波長をパラメータとして示したものである。これらの結果から接近している画素間の感度むらは比較的少なく、PDA センサに比べて CCD センサの方が感度むらが少ないことがわかる。

付図 4. 7~4. 12 はセンサ全体の感度むらの概要を調べるために画素を 11 個ごとにサンプリングした結果である。付図 4. 12 の結果から CCD センサの画素番号がおよそ 1900 以上では 750 nm および特に 900 nm の感度が急に変化している。これは付図 1. 22~1. 24 で直線性が他の場所の画素に比べて良くないこと、付図 2. 10 で画素 No. 1925 の特に 900 nm 付近の特性が

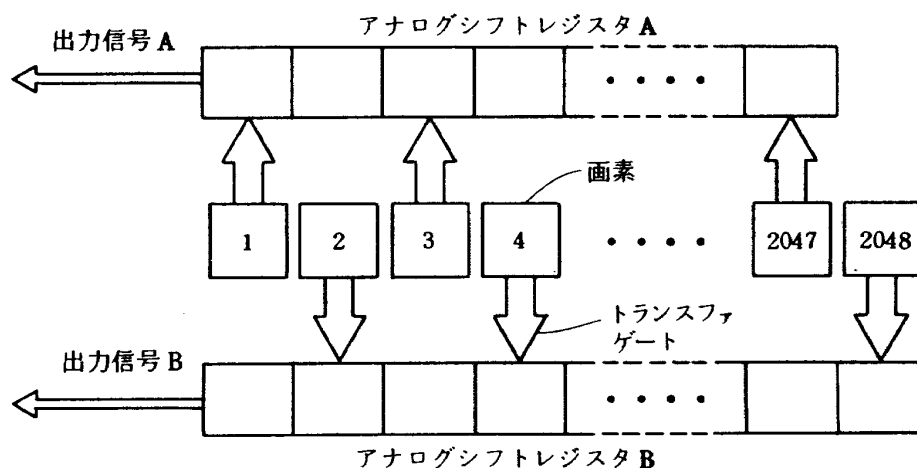


図 4. 1 CCD センサの構成

他のものに比べて若干ずれていること、付図3.52の900 nm の特性において画素No.1926の特性が他の画素の特性に比べて若干ずれていること等を考え合わせると、CCD センサの製造上のバラツキが主な原因ではないかと思われる。この部分を除けば PDA センサよりも CCD センサの方が感度むらがなく良好である。

5. ま と め

可視近赤外波長領域(400~1100 nm)に感度を持つ代表的な2種類のリニア・アレイセンサについて光電変換特性に関する諸特性を求め、かつ以前に試験したセンサの諸特性ともあわせて比較検討し評価した結果を表5.1に示す。

今回試験した CCD センサは直線性があまり良くない。しかしながら CCD センサは原理的には直線性の良いものであるので、この原因は CCD センサ内に組み込まれた増幅器やサンプルホールド回路等によるものと思われる。

分光感度特性においては、PDA センサは感度が非常に悪くまた近赤外の光(800~1100 nm)が被験画素からかなり離れた所に当たっても被験画素はその光の影響を強く受けるという大きな欠点がある。これに反して CCD センサは以前に試験した CCD

センサと比較しても最も感度が良く、特に可視近赤外放射計用センサとして重要な要素である①青色付近(400~500 nm)の感度が著しく改善されていること、②全体にわたって画素間の相対分光感度特性のバラツキが非常に少ないこと、の2点に関しては特に注目すべきことである。

分光感度分布特性においては、PDA センサは X 軸上の分光感度分布の拡がりが大きく、特に波長が近赤外に近付くにつれその拡がりは更に大きくなり具合が悪い。これに反して CCD センサは波長の依存性が少なく、また画素の場所によっても特性がほとんど同じで良好な特性を持っている。

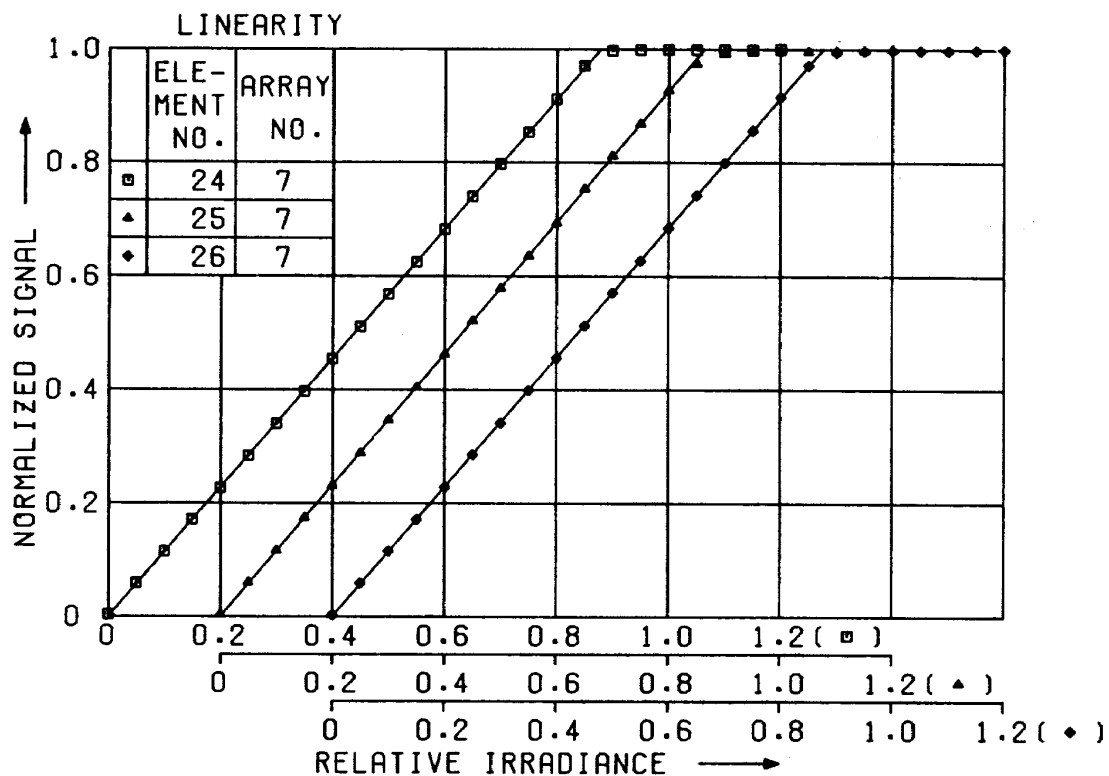
特性全体から考えて今回試験した CCD センサは可視近赤外放射計用センサとして考えた場合、非常に良い特性を具えていることがわかった。ただし一部では直線性が少し悪いとか多少の漏話があるとか、あるいはまた一部の画素間で多少感度むらが多いとかはあるが、これらの点については近い将来において改善されて行くものと思われる。

最後に本試験研究の促進にいろいろと御尽力下された 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、幸尾治朗 当研究所計測部長、および関係者各位に深く感謝する次第である。

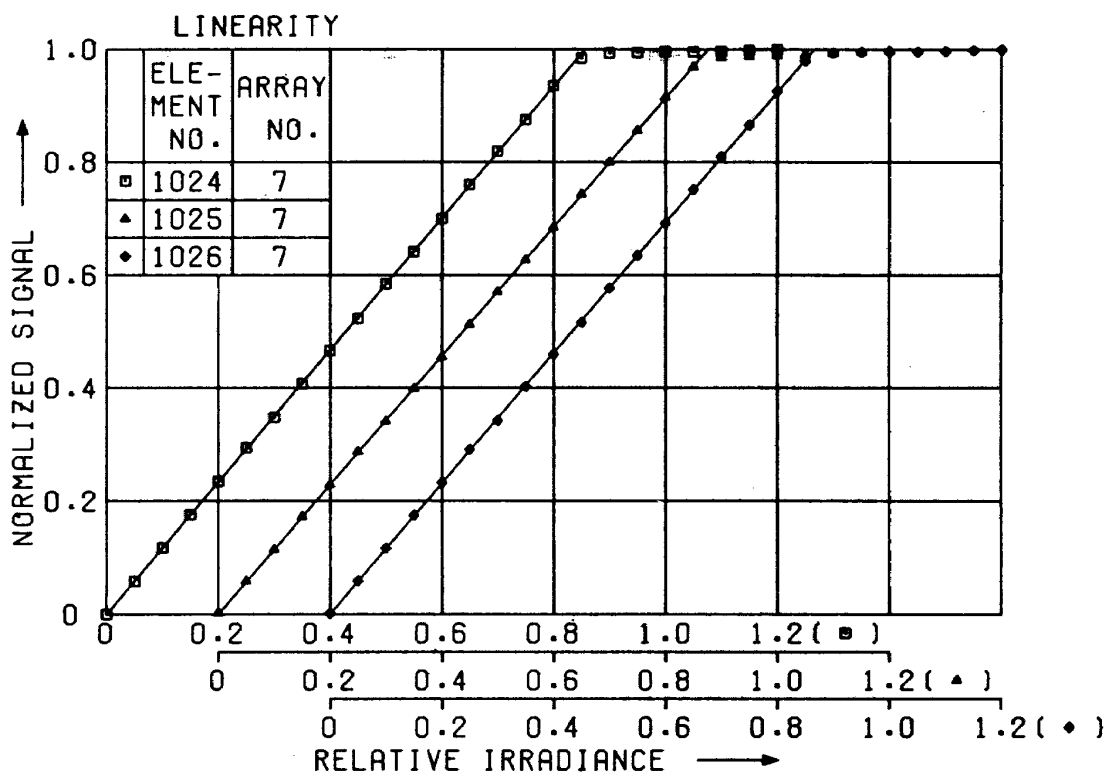
表 5.1 被験センサの試験結果比較一覧表

被験センサ	アレイ No.	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
			画素間の特性のバラツキ	感 度* [$\mu\text{J}/\text{cm}^2$]		
PDA センサ (RL2048H)	7	±0.4%	非常に少ない	3.2	あまり良くない。特に近赤外波長領域ではかなり悪い。	良 い
CCD センサ (CCD143DC)	8	±0.9%	非常に少ない	0.33	かなり良い。	かなり良い
CCD121 H	5	±0.4%	少ない	0.41	非常に良い。	かなり良い
その他の CCD センサ	1~4	良いセンサ：±0.3% 悪いセンサ：±1.0%	かなりある	0.67 ~ 1.2	あまり良くない。特に近赤外波長領域では悪い。	良 い

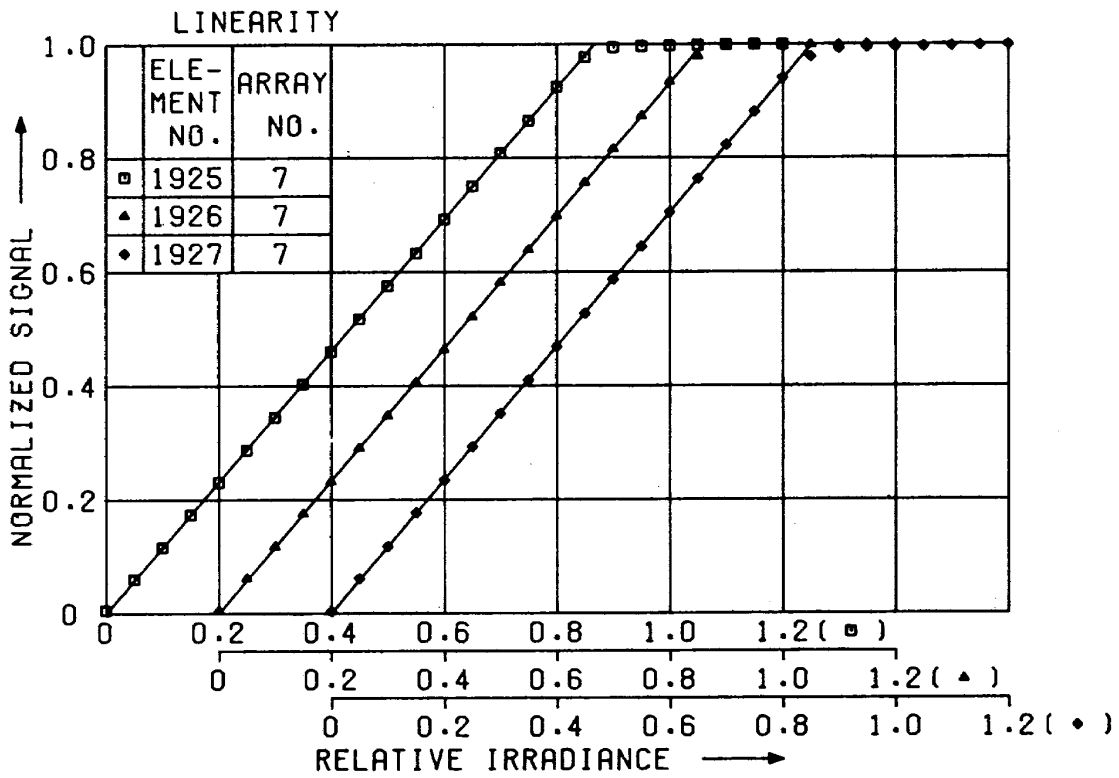
* 感度：被験センサの最大感度を持つ波長において、センサ出力が直線性の良い範囲(-2%)内で最大となるために必要な入射光の単位面積当たりのエネルギー(画素間には感度のバラツキがあるが、ここではその平均値)



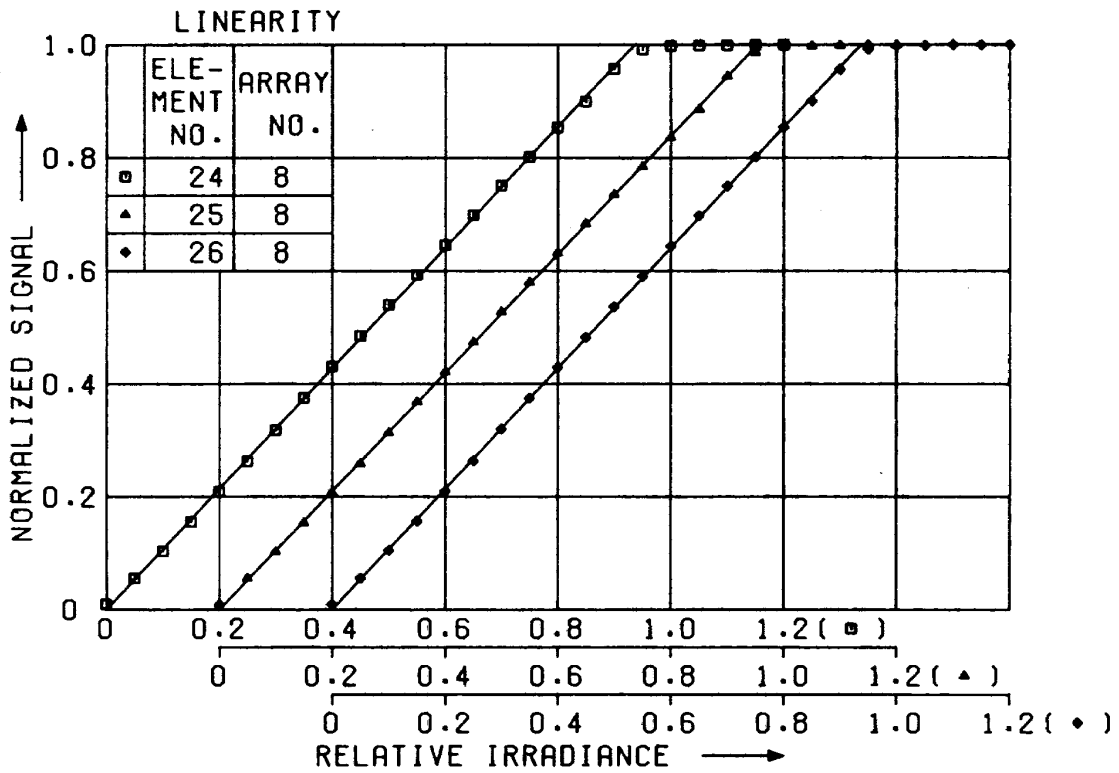
付図1.1



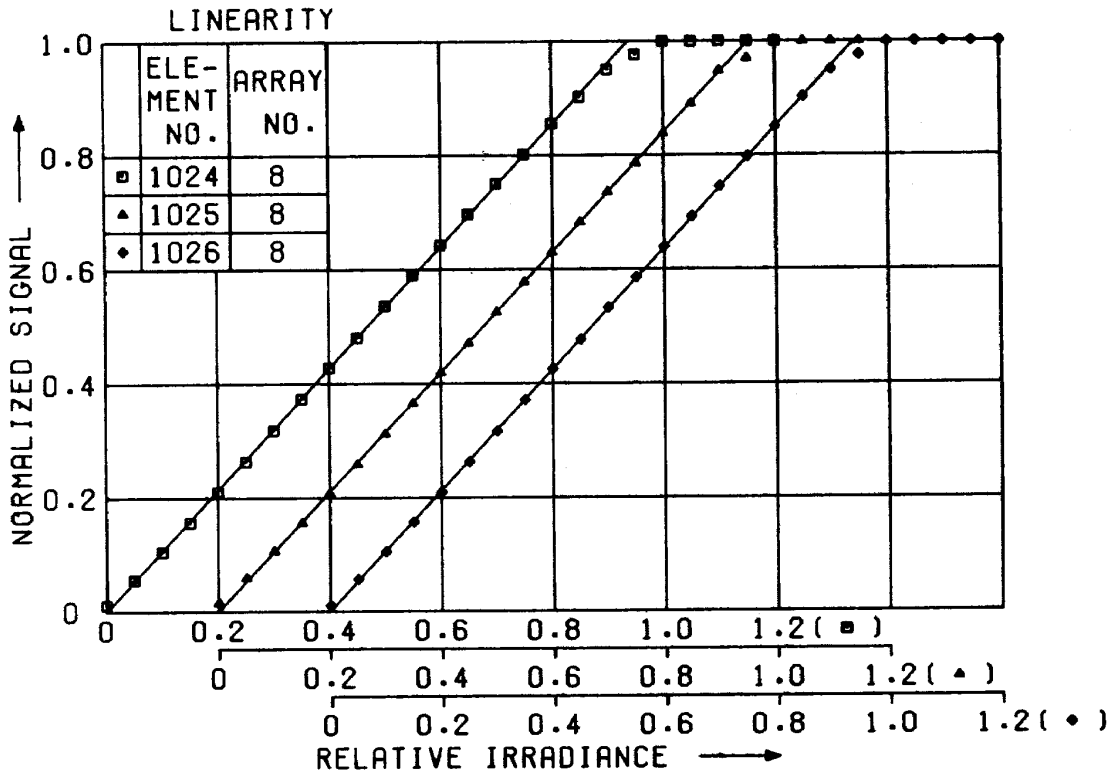
付図1.2



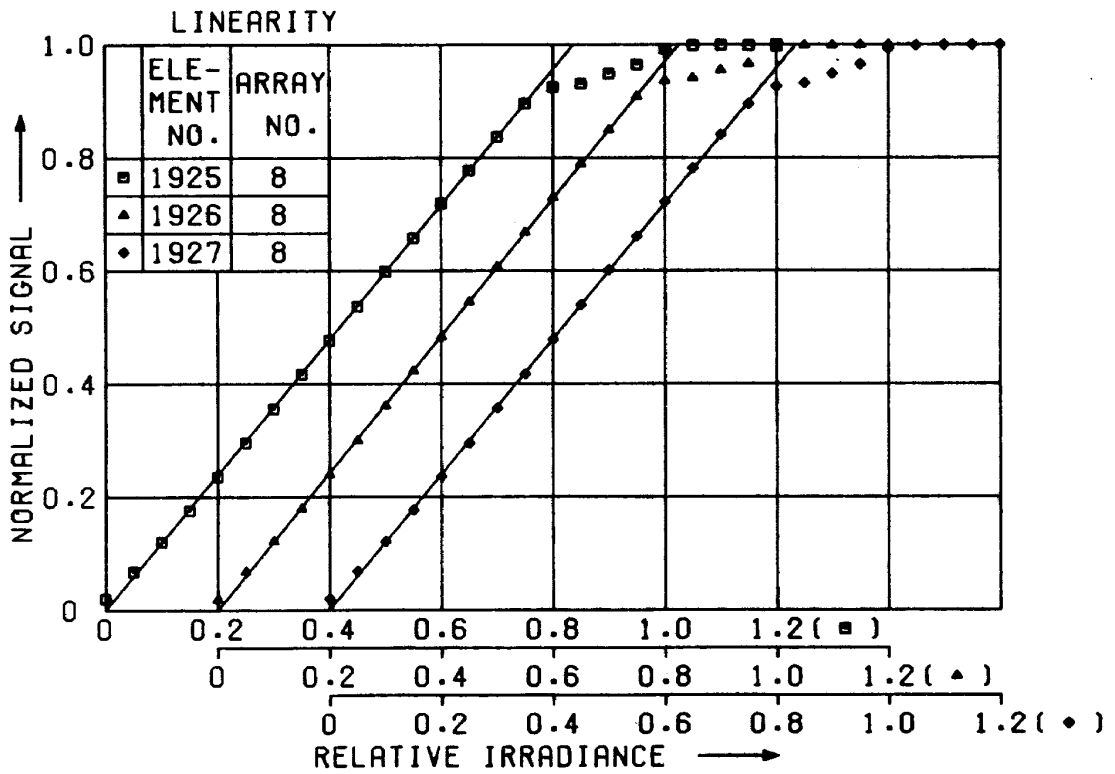
付図 1.3



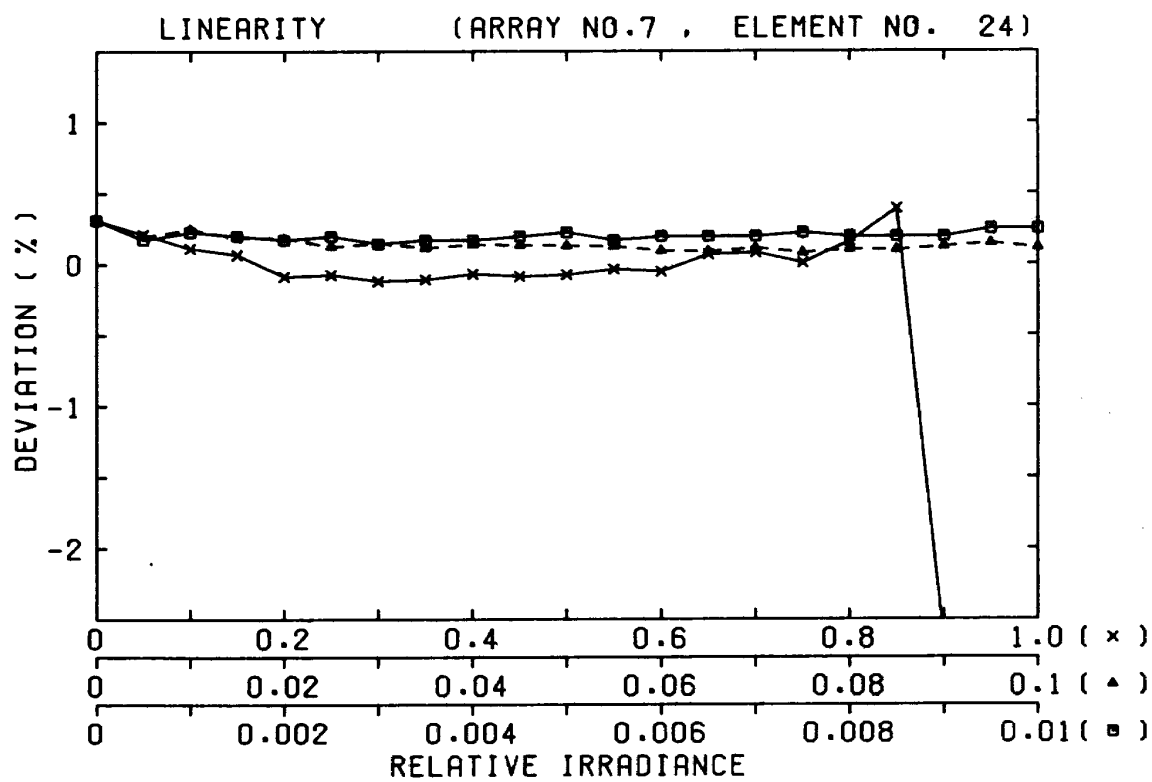
付図 1.4



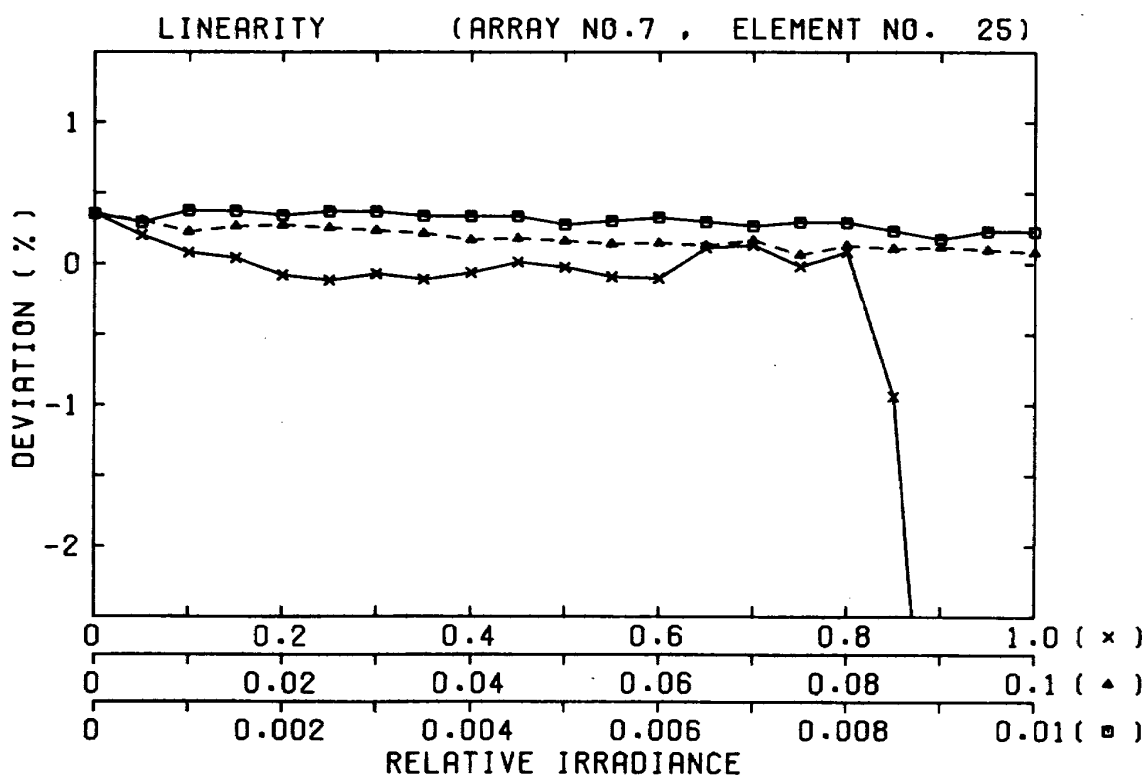
付図 1.5



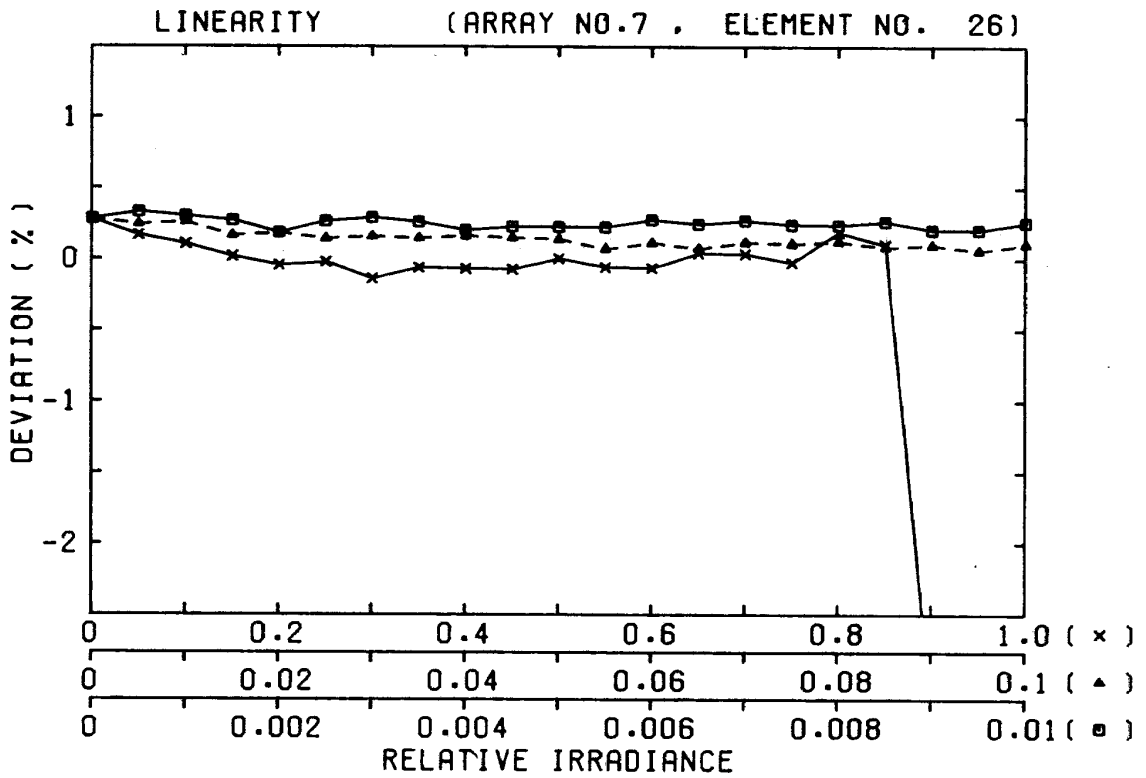
付図 1.6



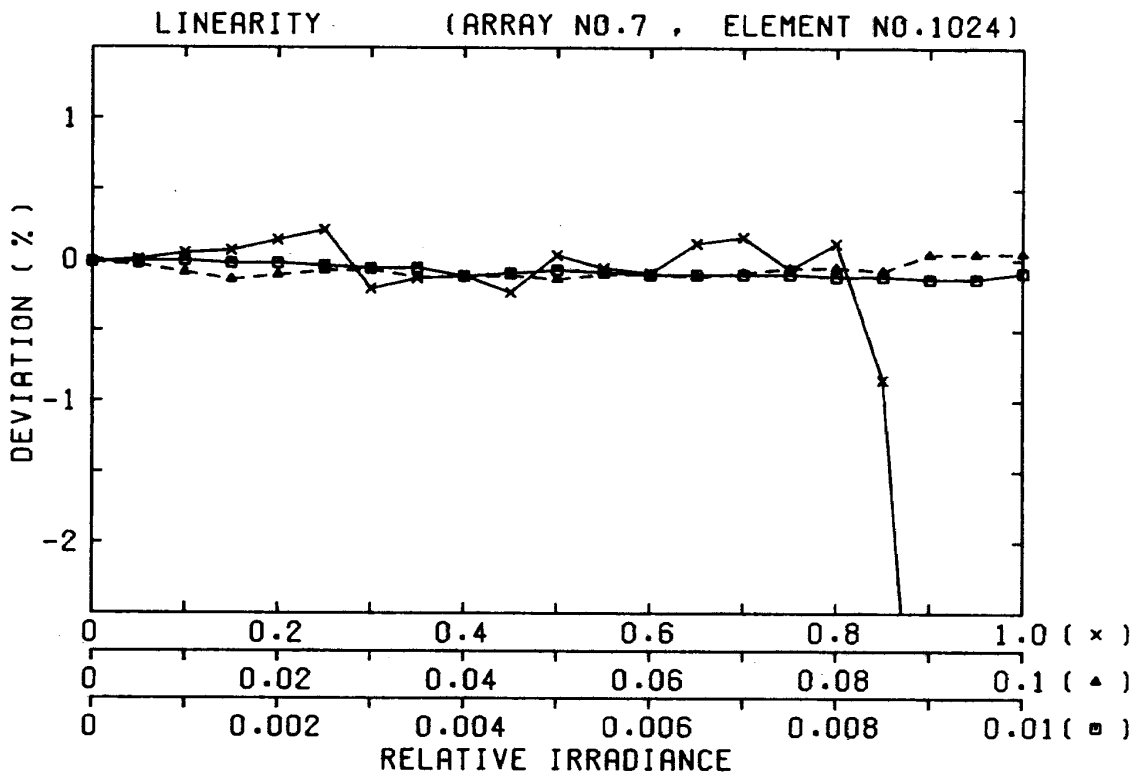
付図 1.7



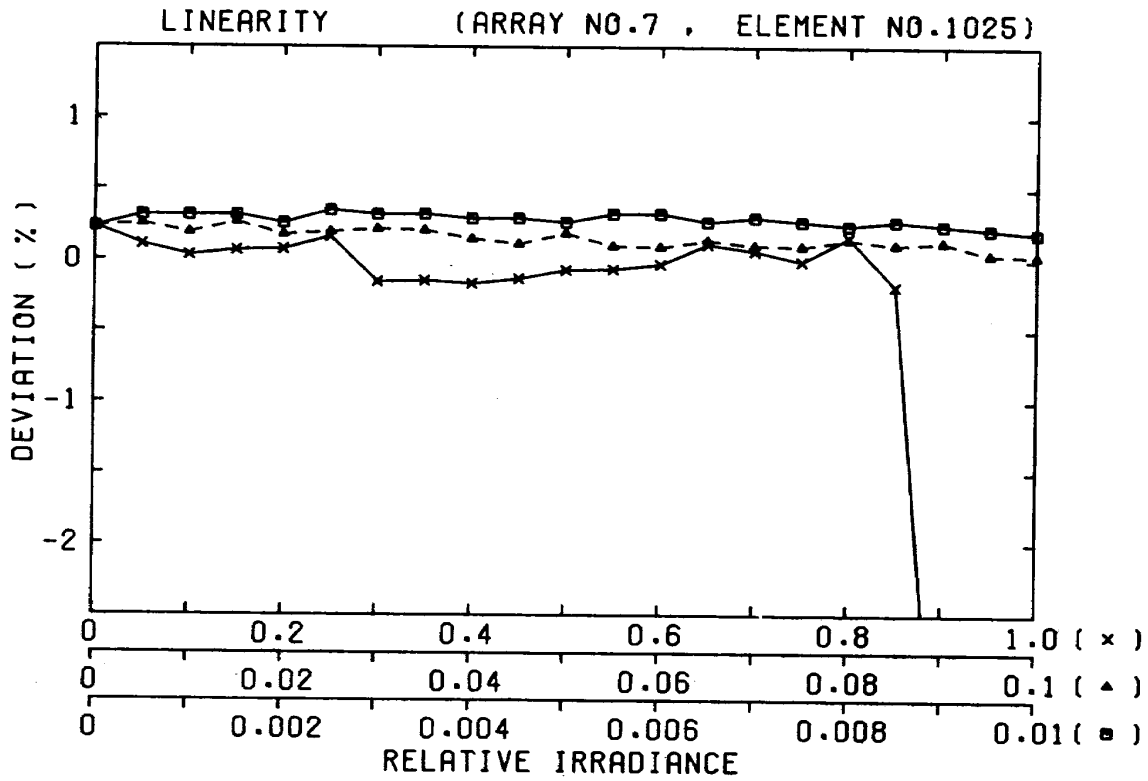
付図 1.8



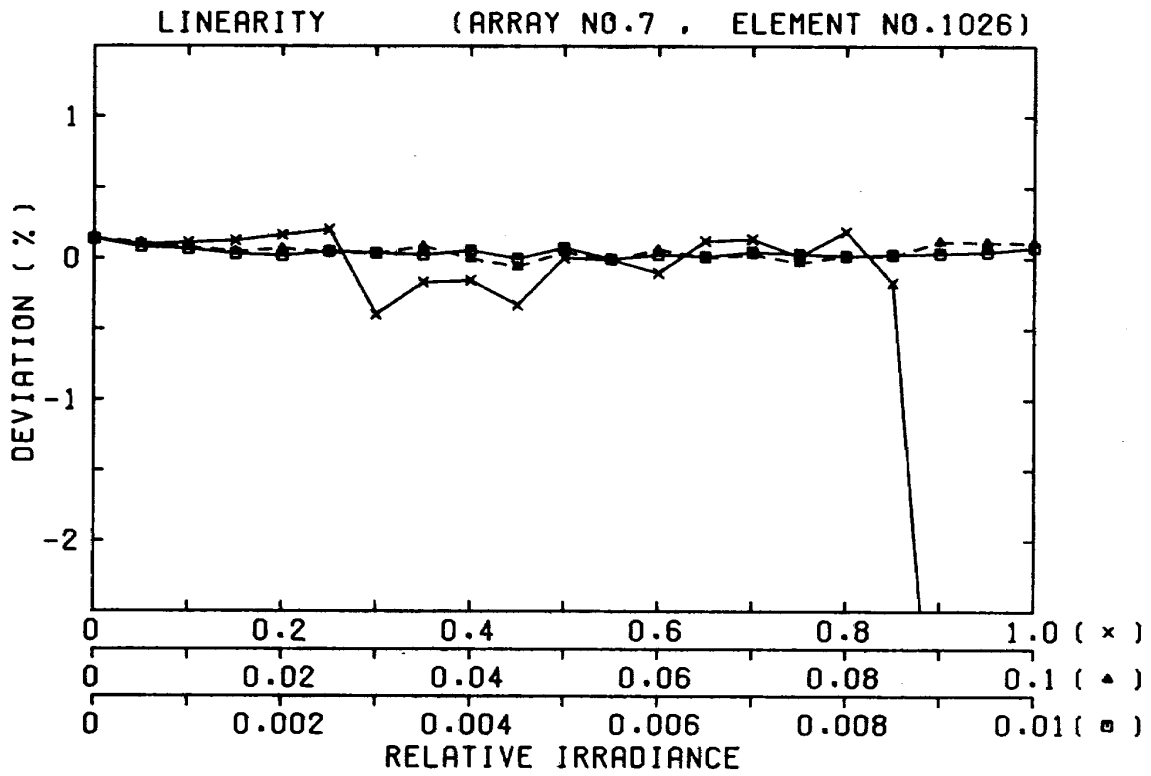
付図 1.9



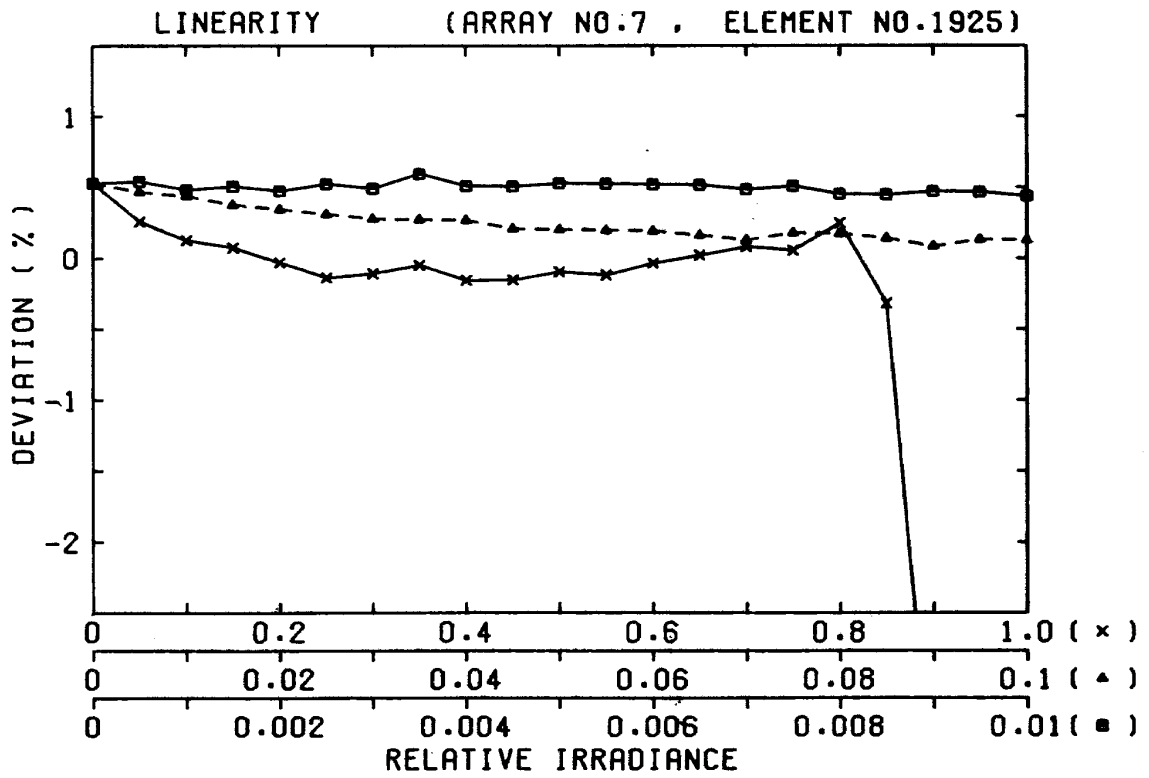
付図 1.10



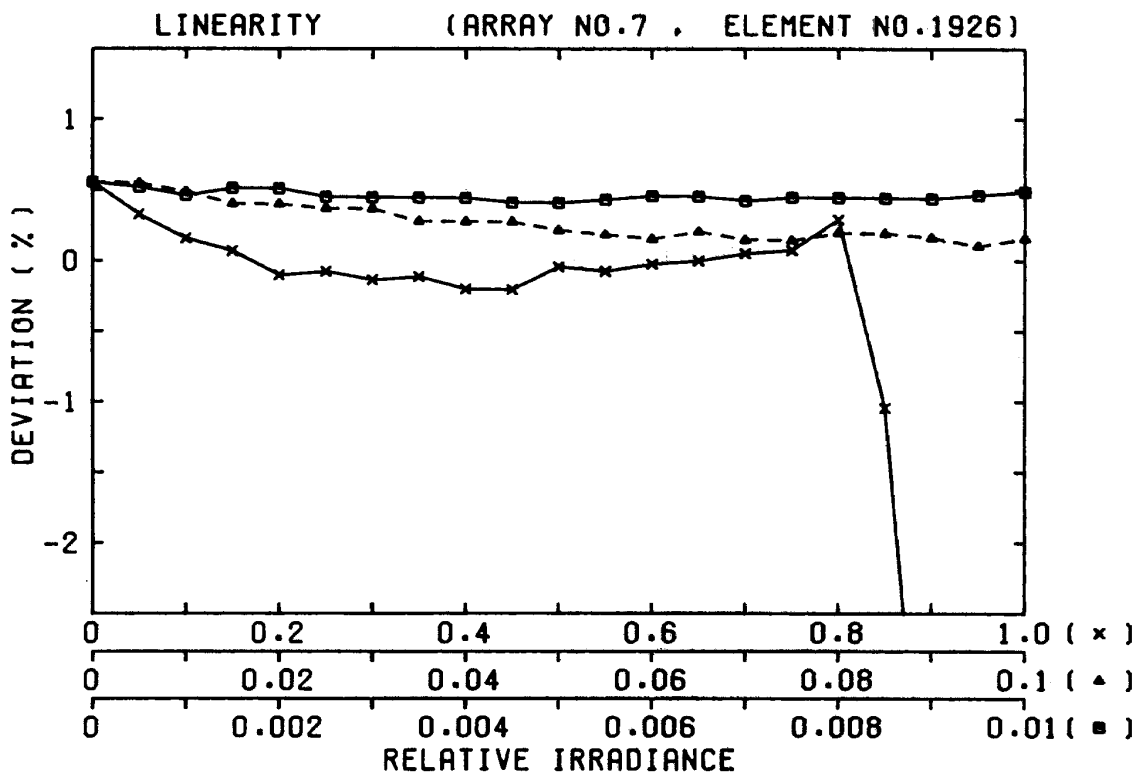
付図 1.11



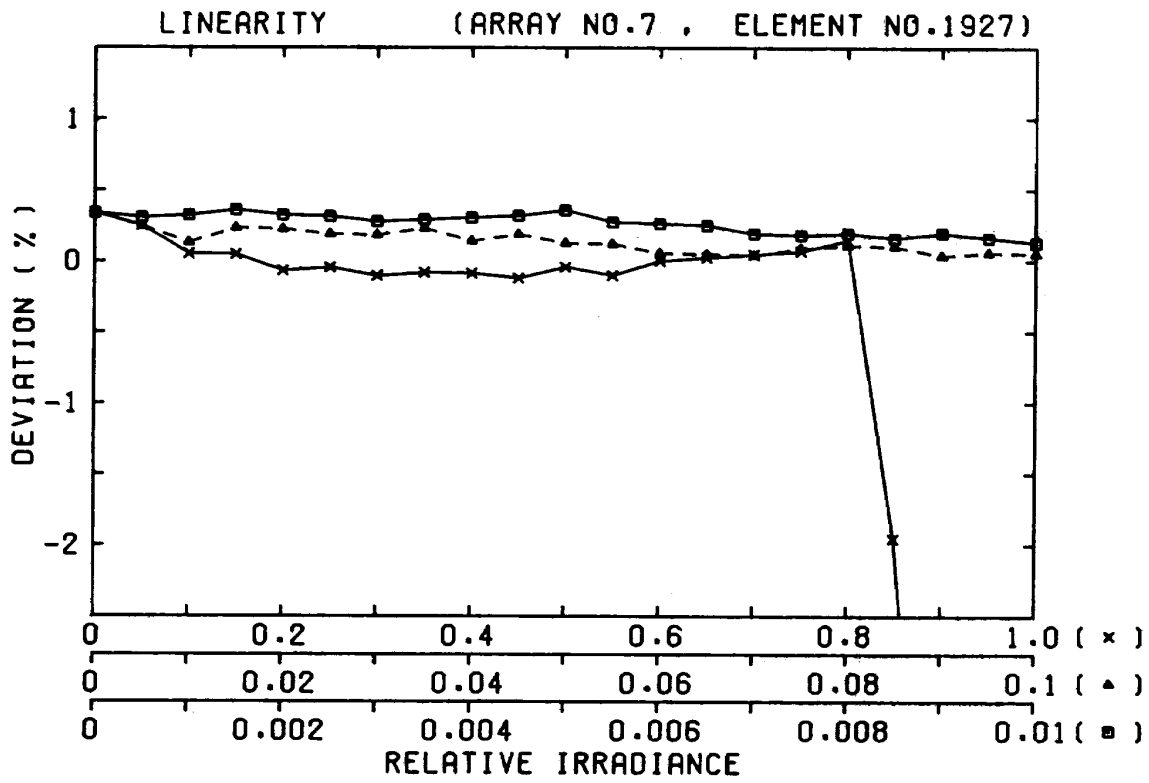
付図 1.12



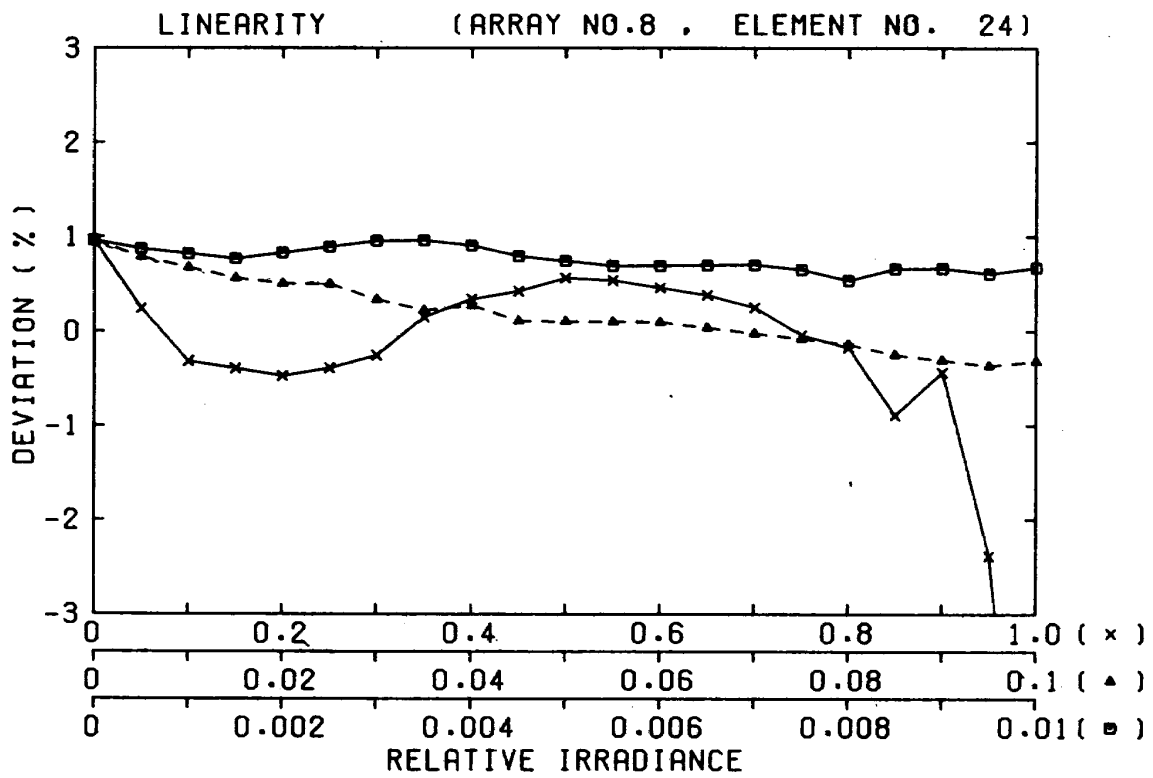
付図 1.13



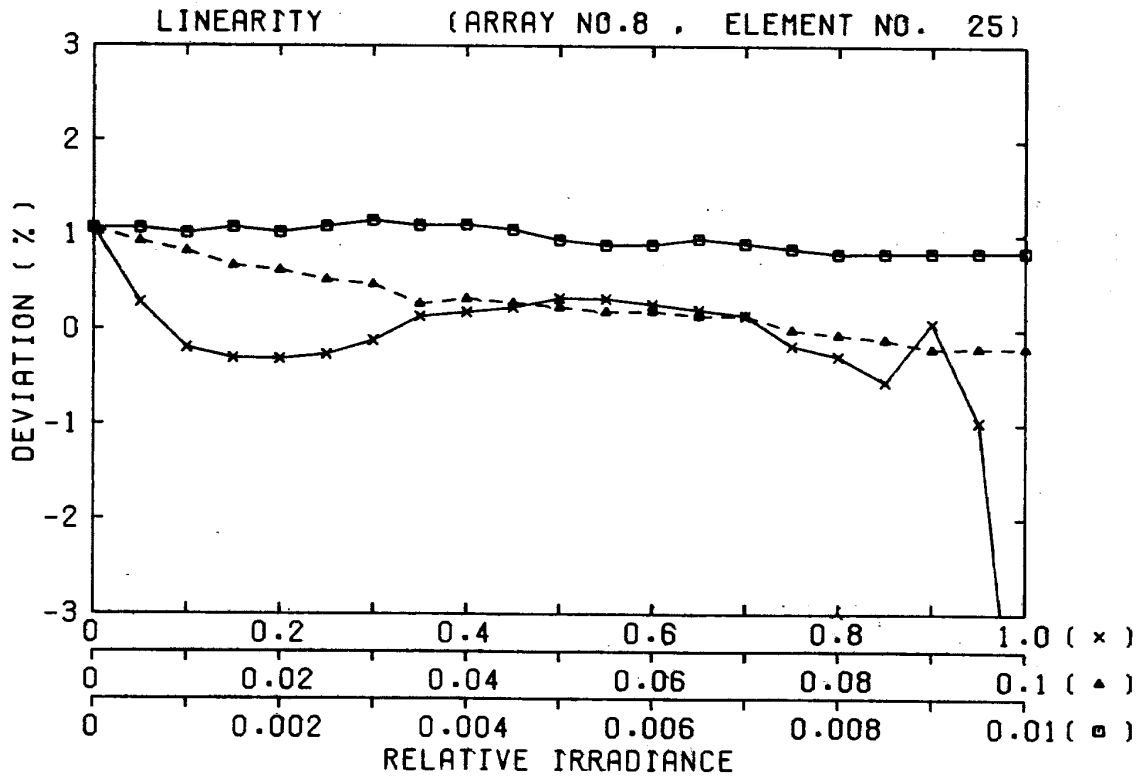
付図 1.14



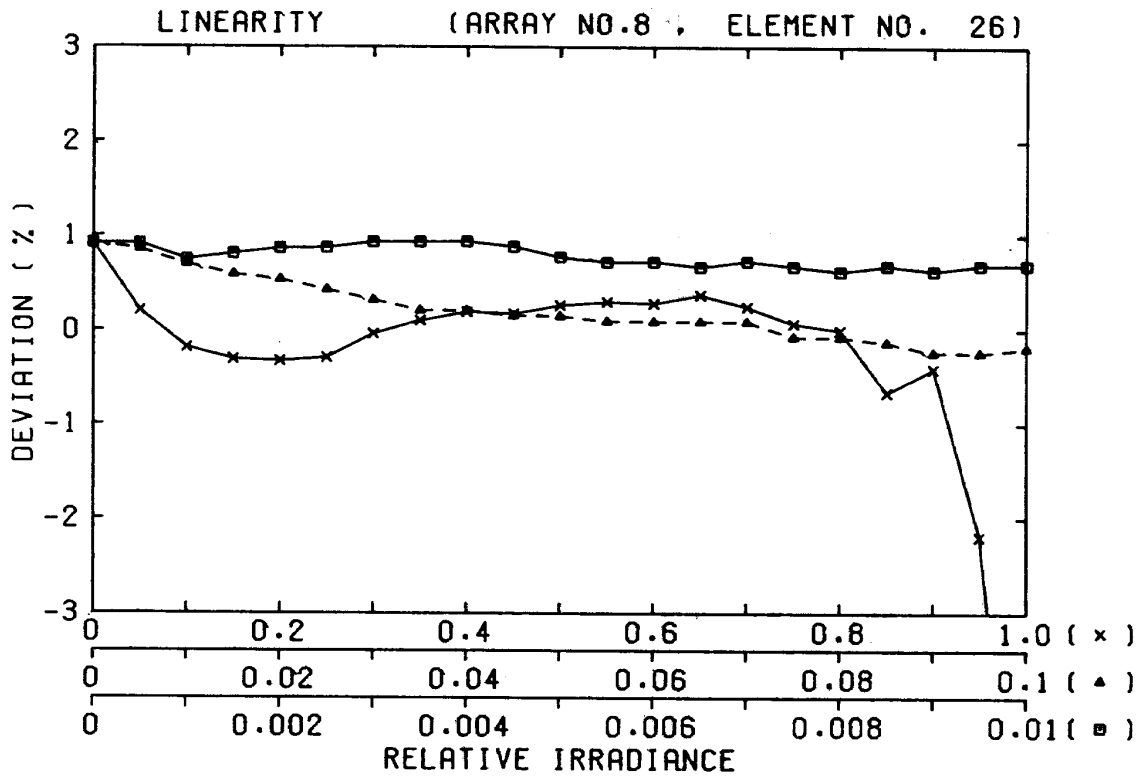
付図 1.15



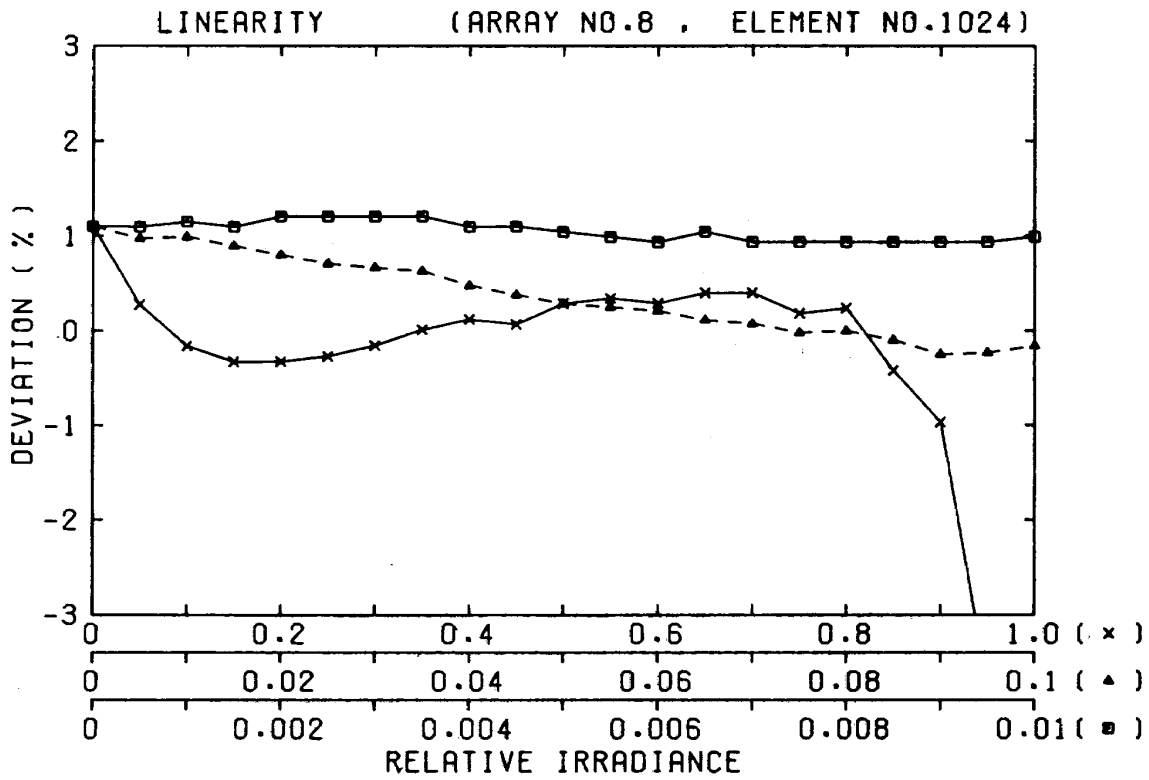
付図 1.16



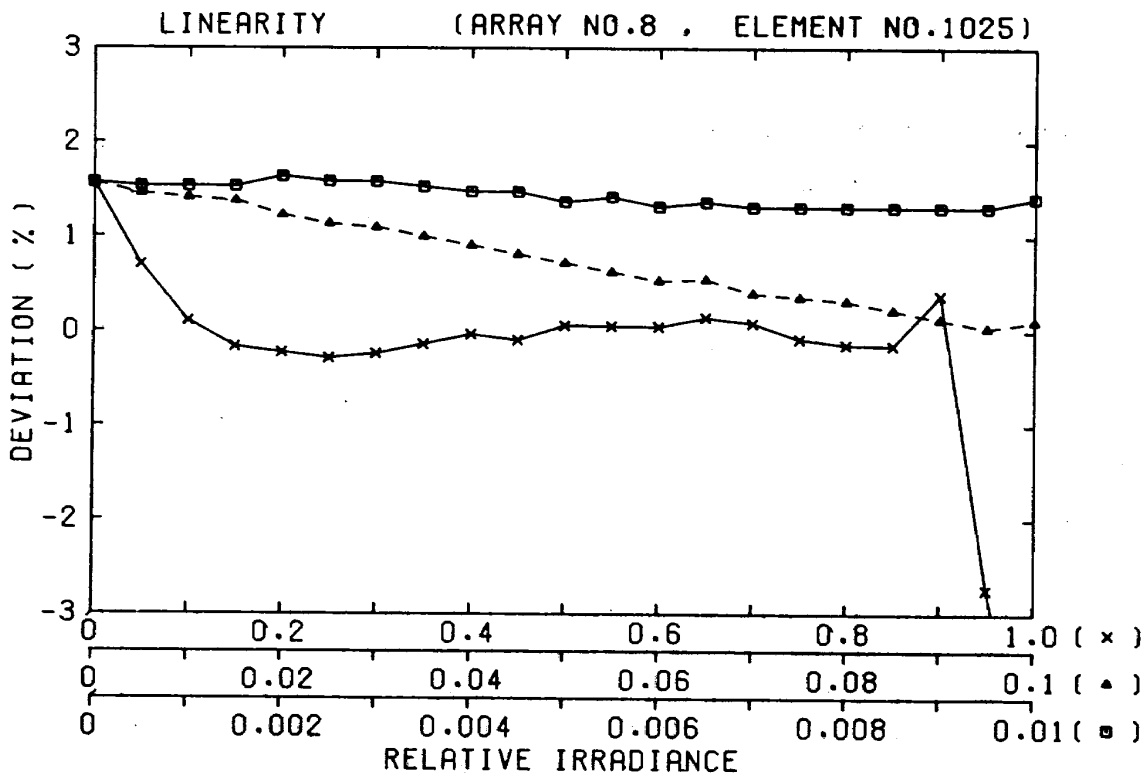
付図 1.17



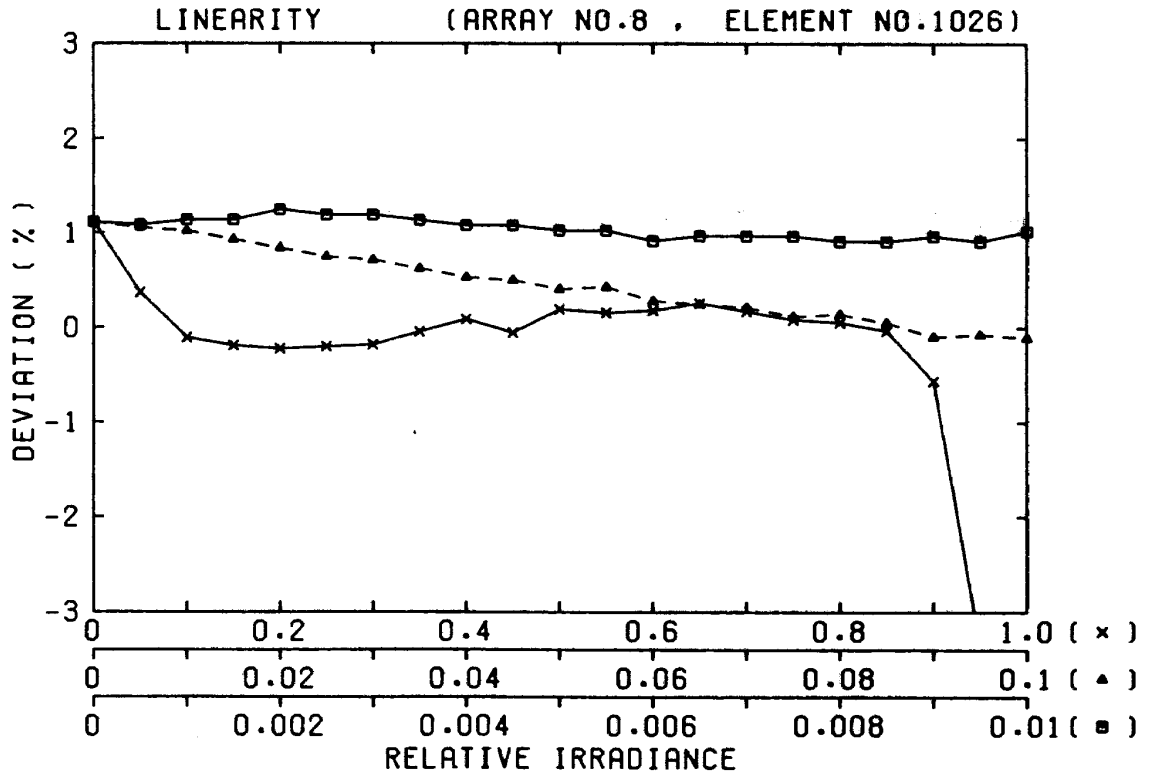
付図 1.18



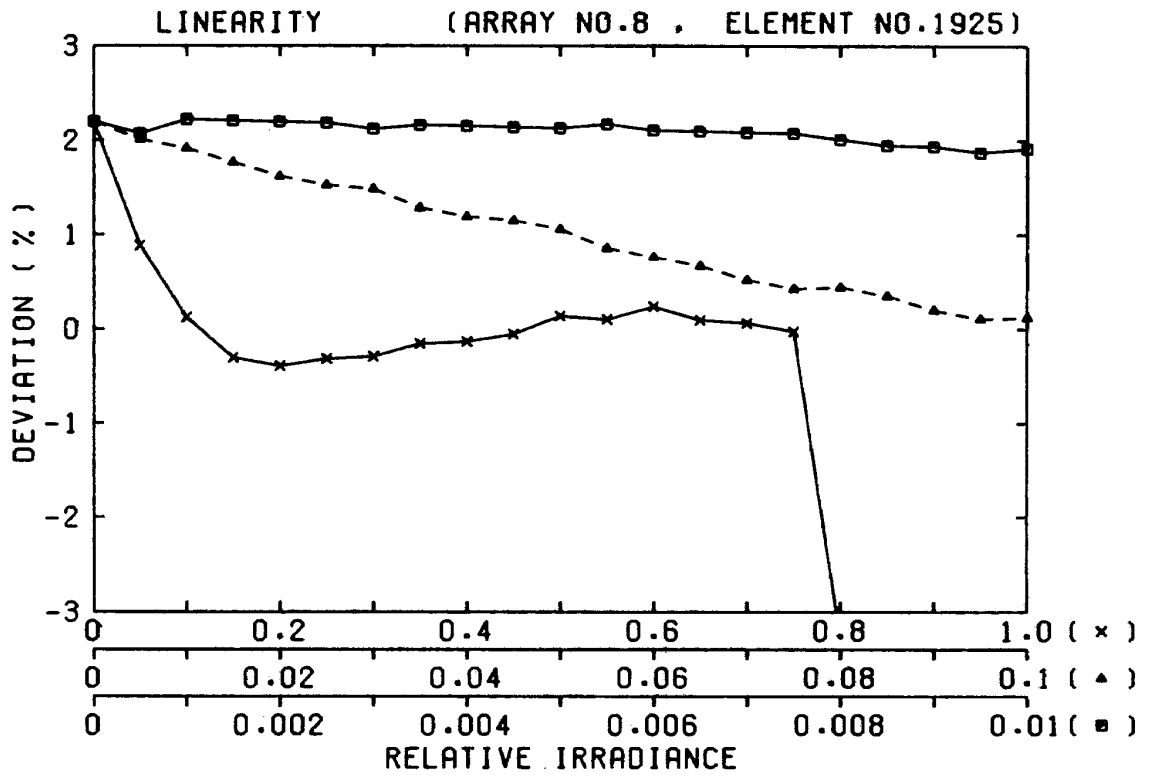
付図 1.19



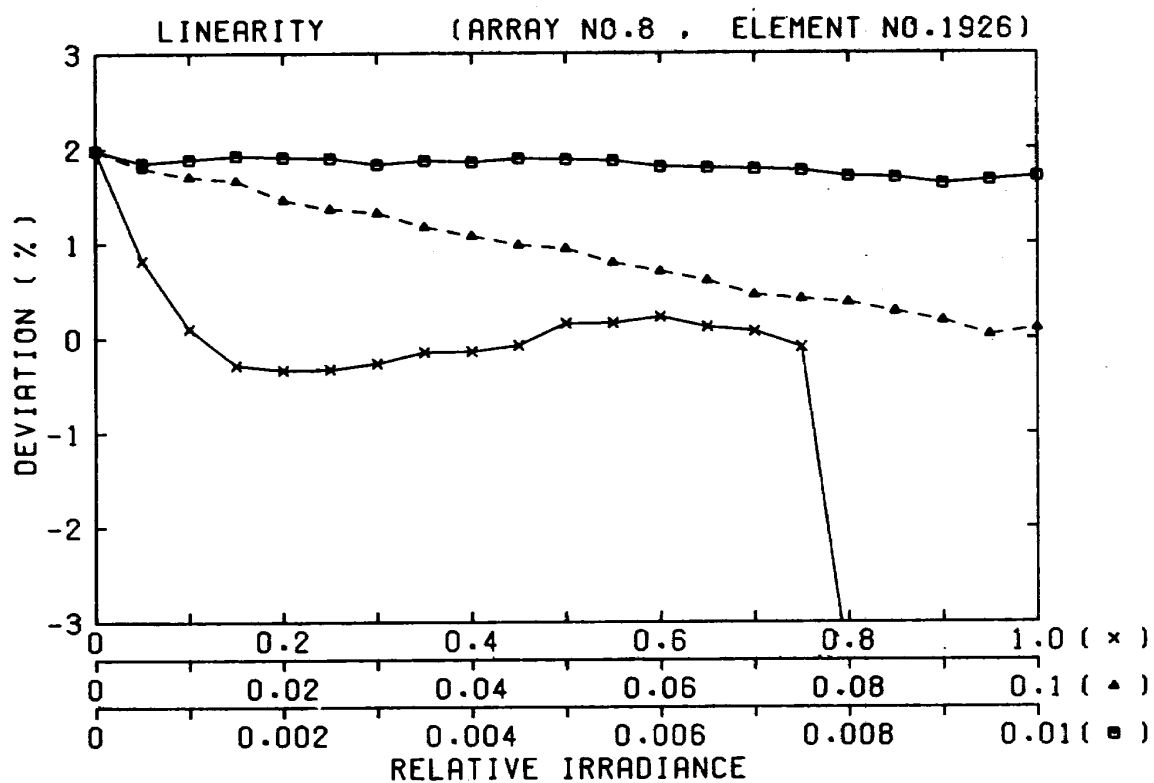
付図 1.20



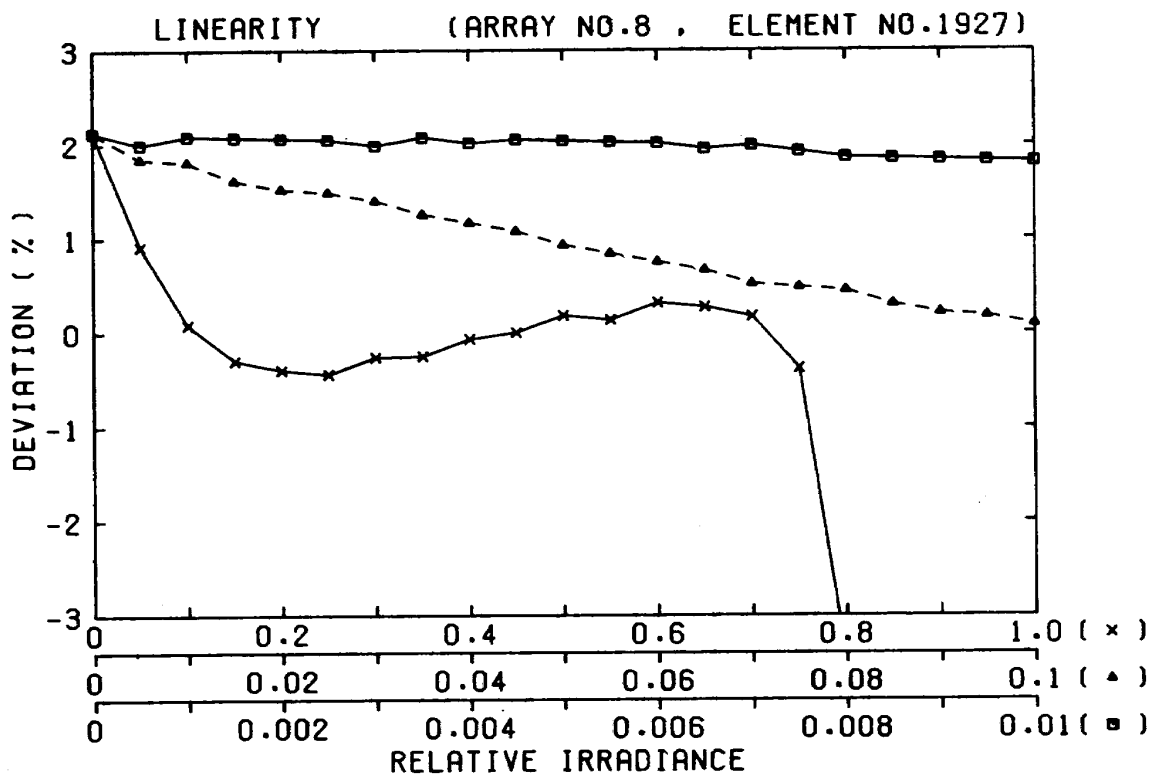
付図 1.21



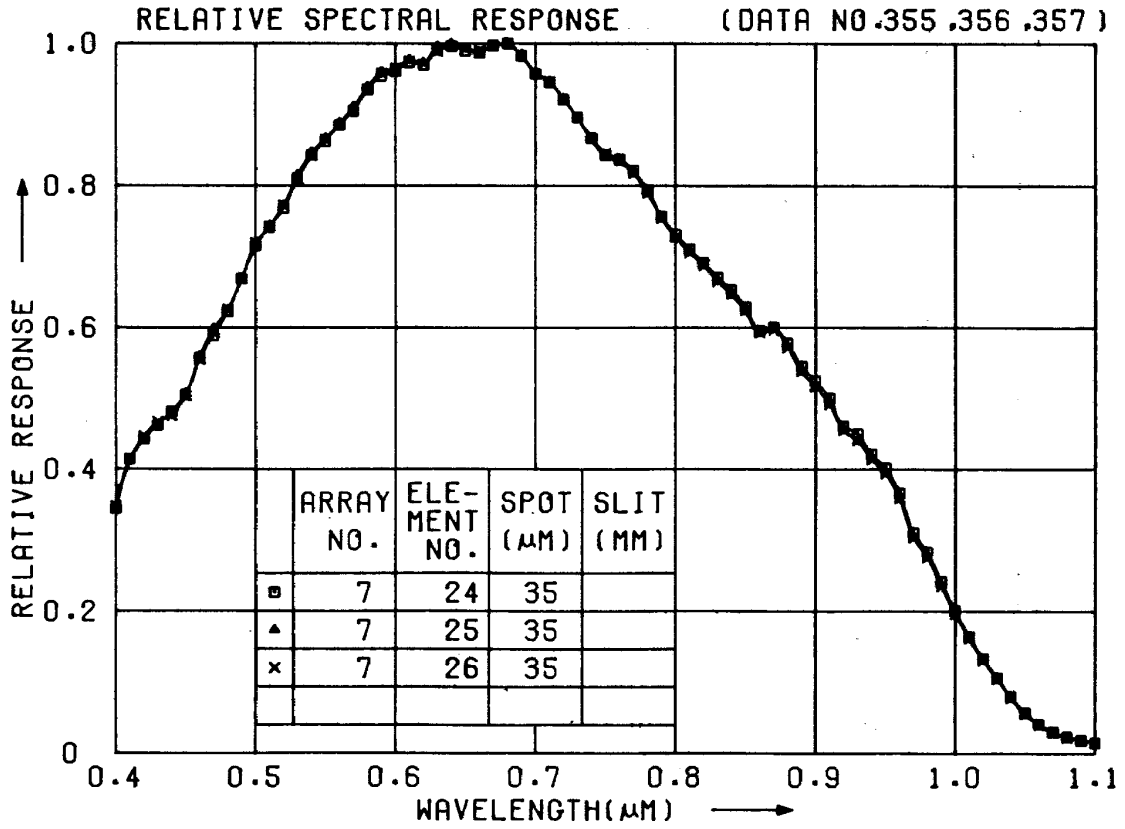
付図 1.22



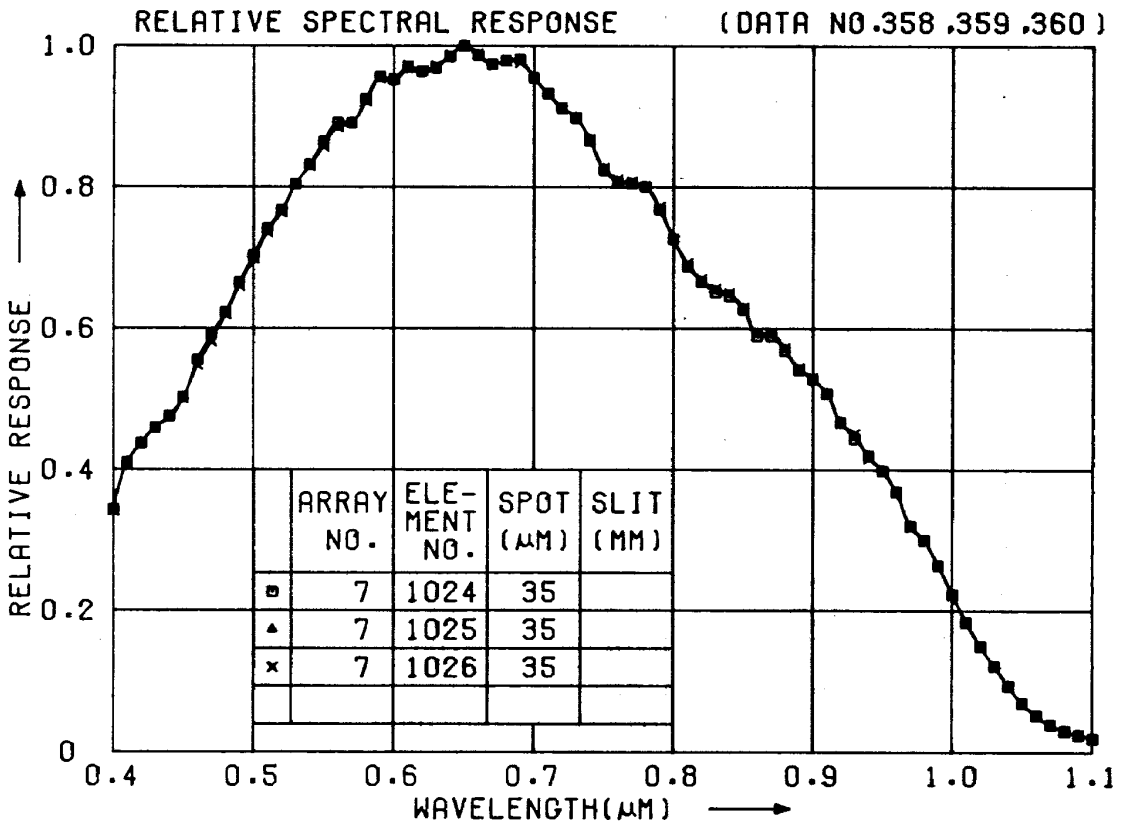
付図 1.23



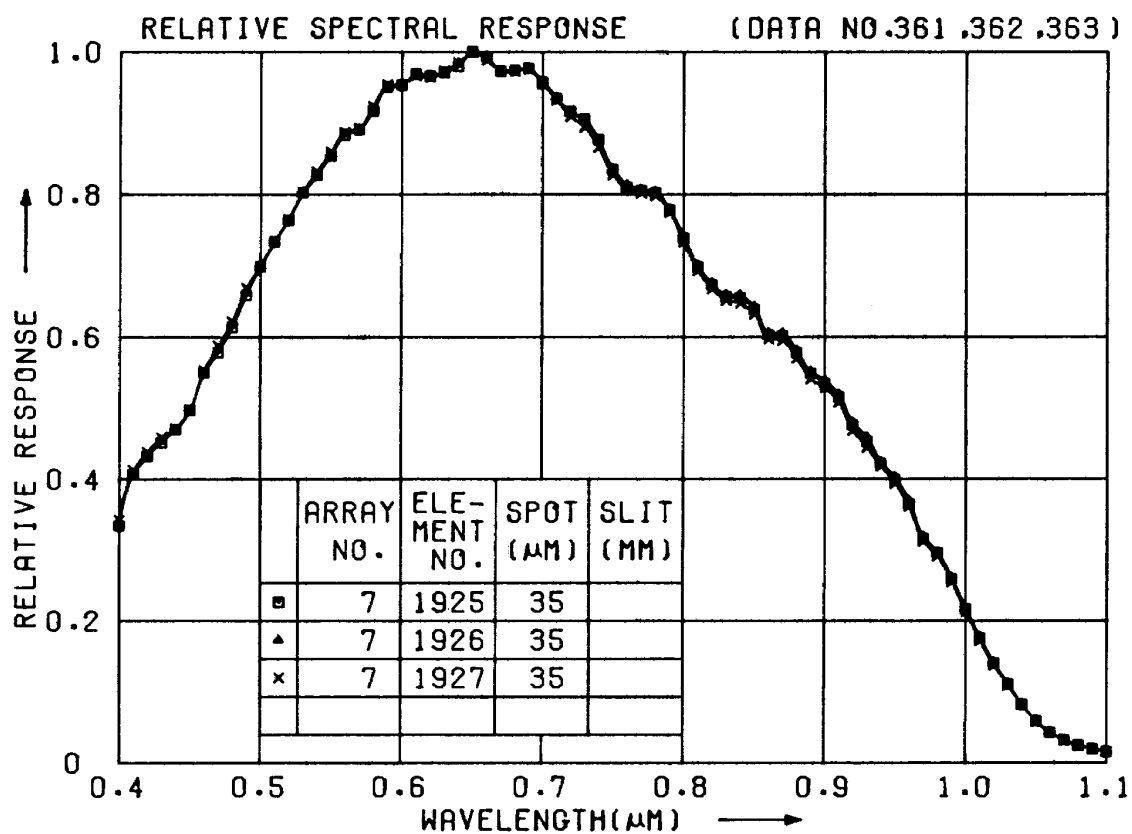
付図 1.24



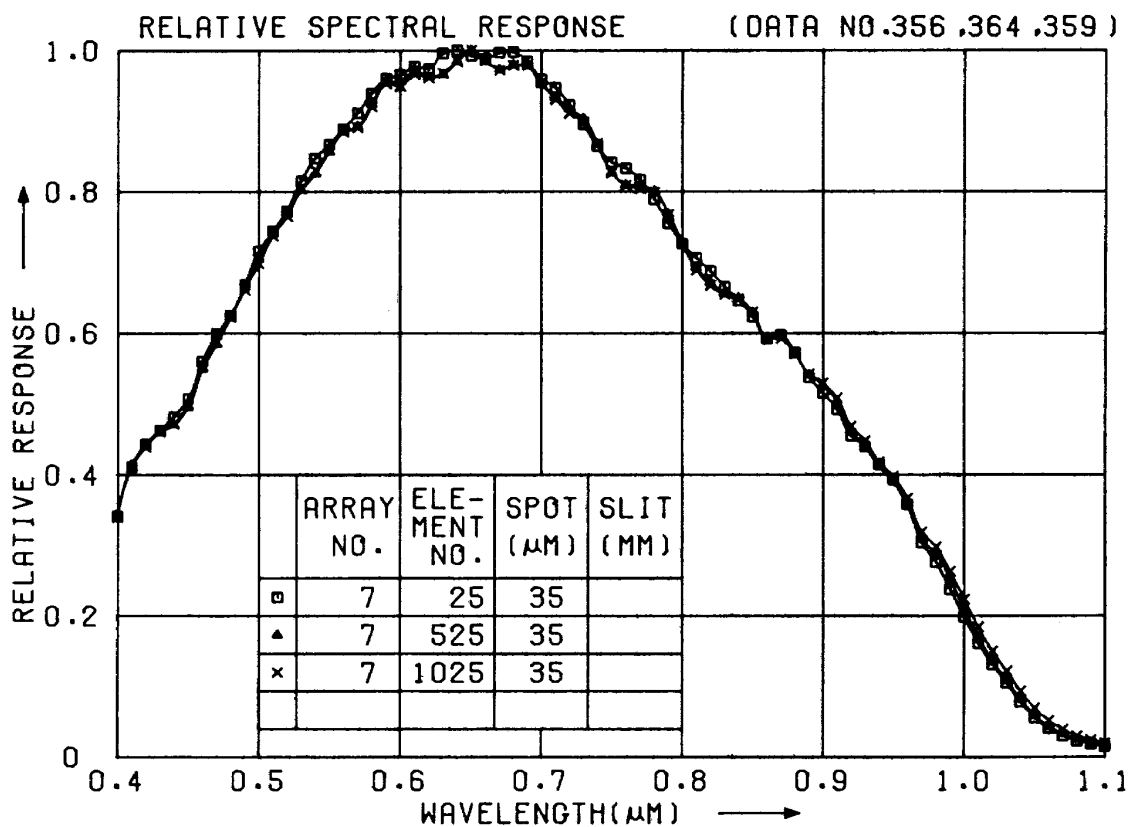
付図 2.1



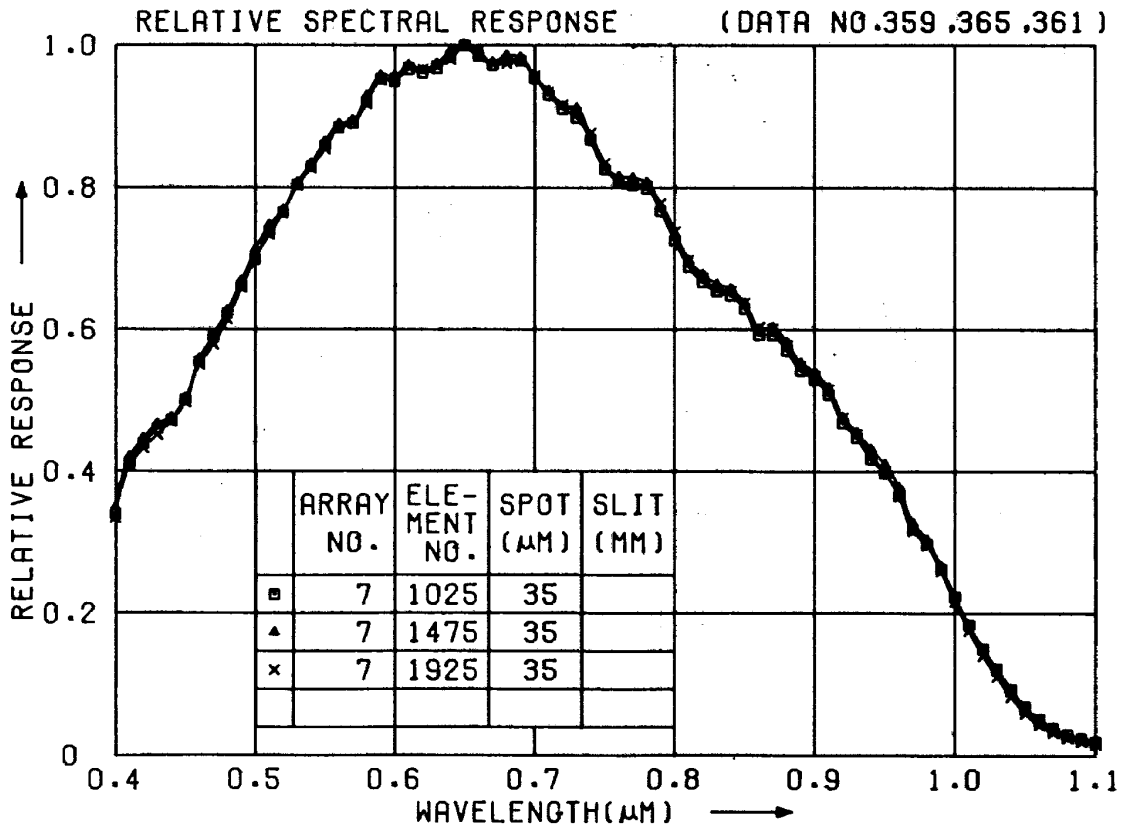
付図 2.2



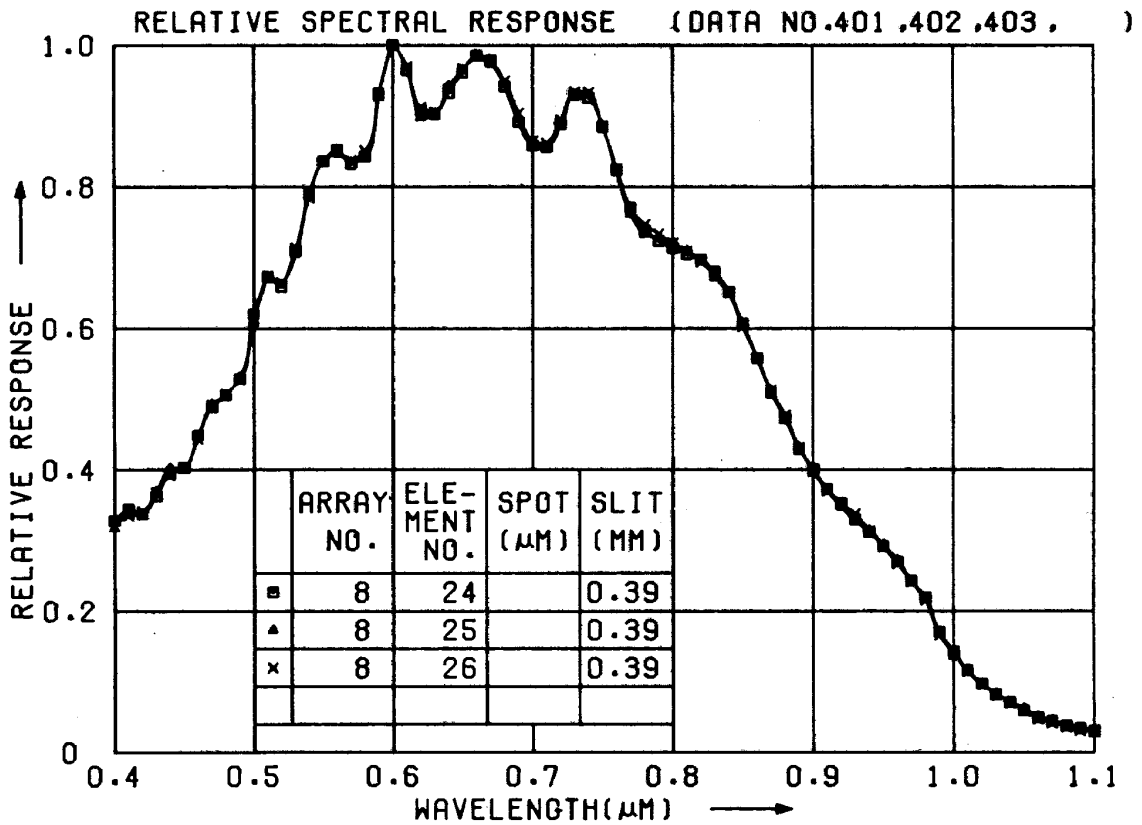
付図 2.3



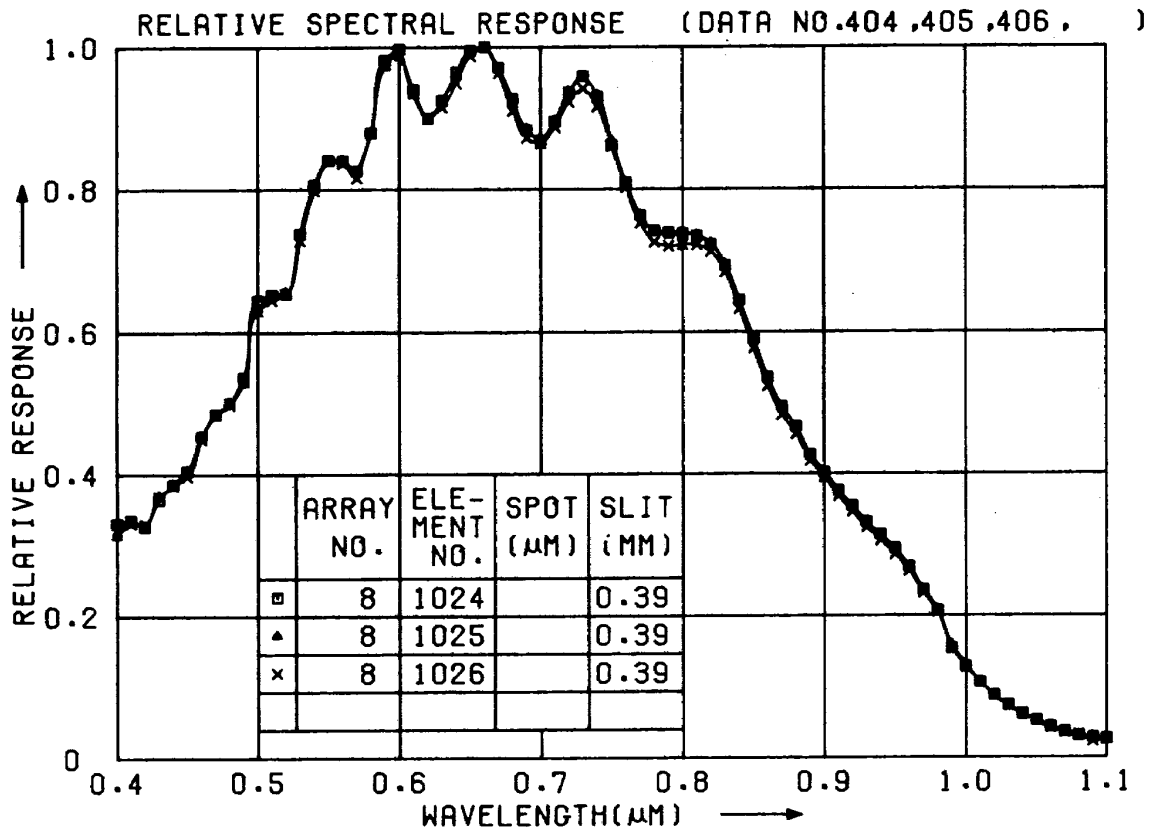
付図 2.4



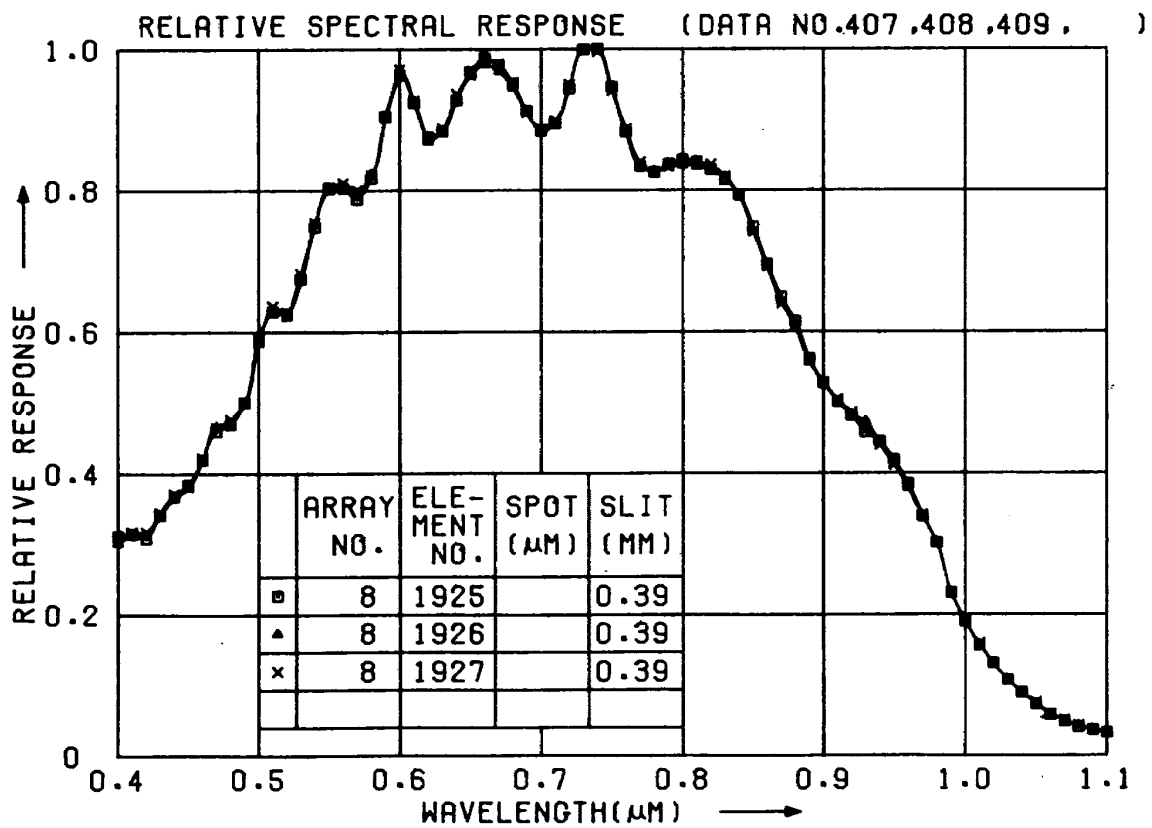
付図 2.5



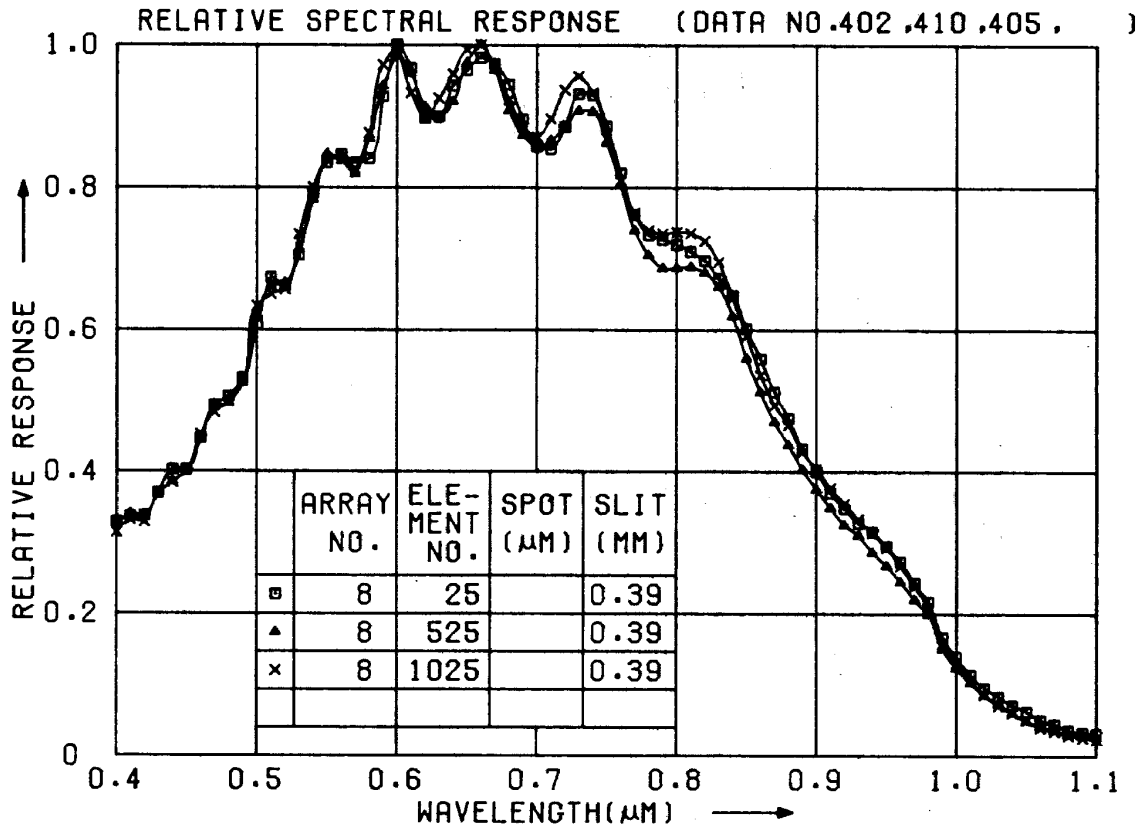
付図 2.6



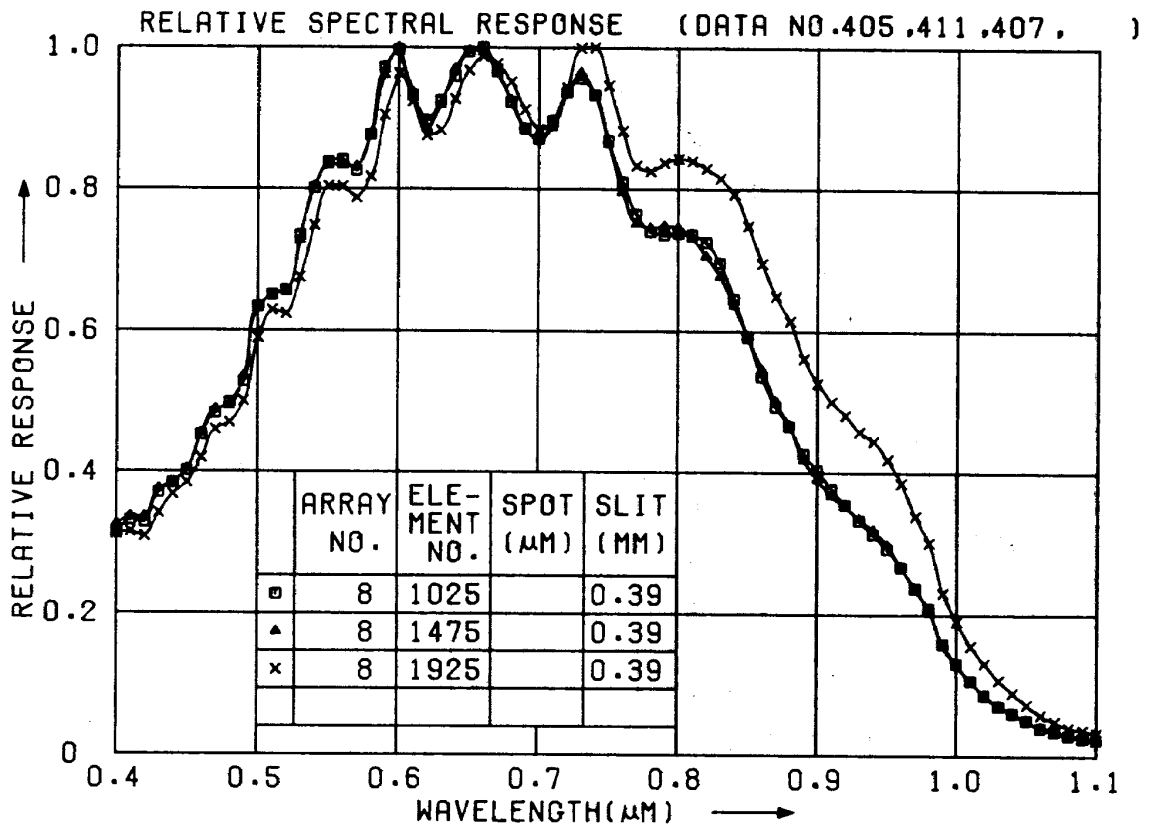
付図 2.7



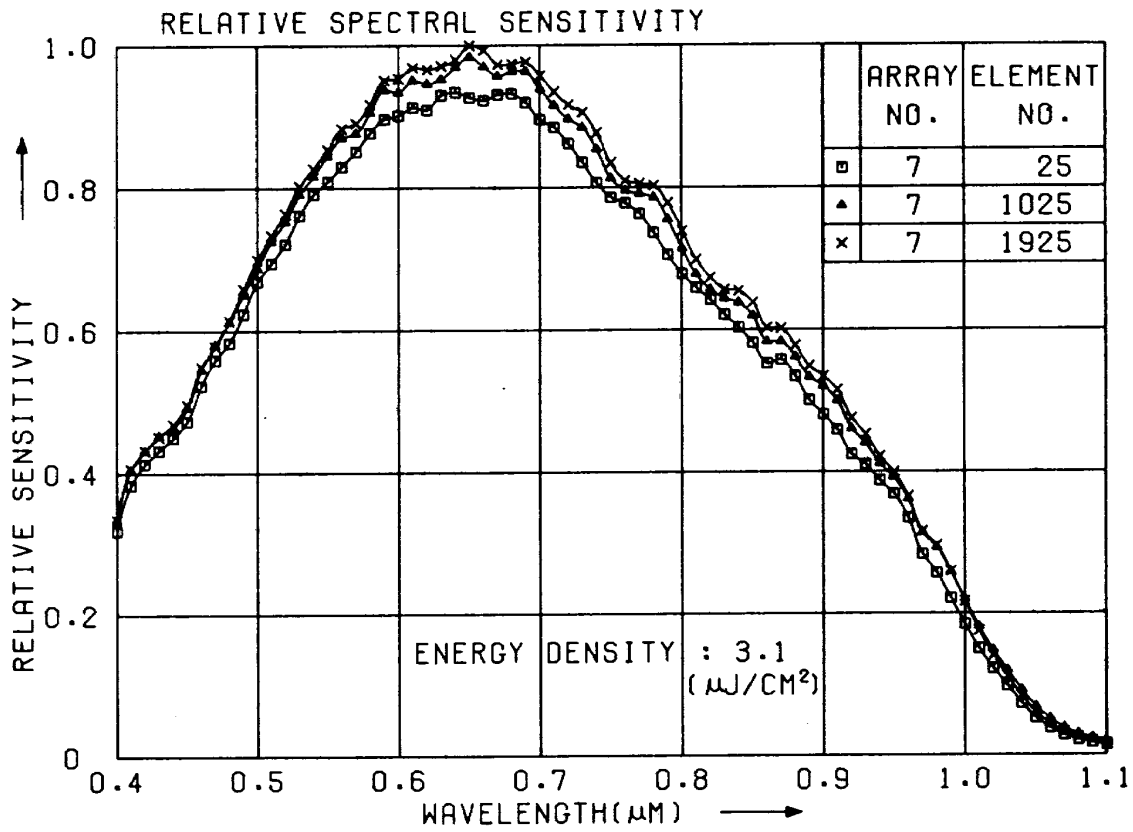
付図 2.8



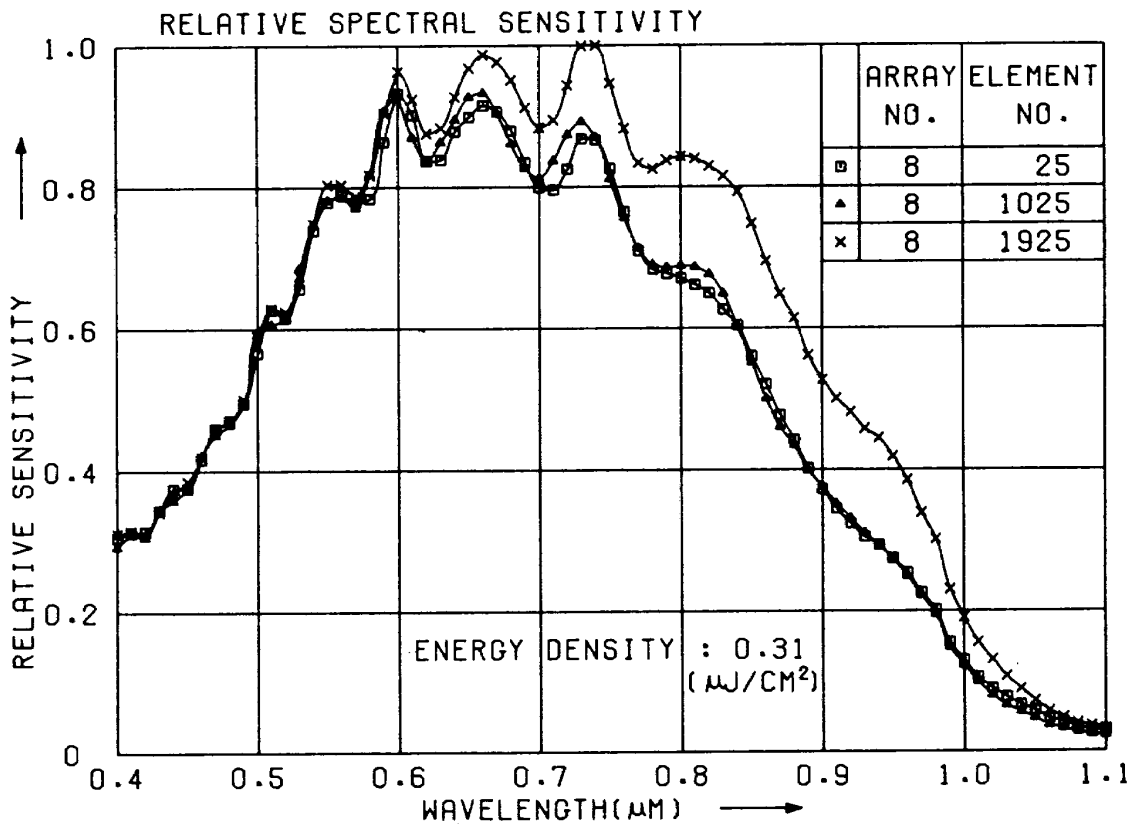
付図 2.9



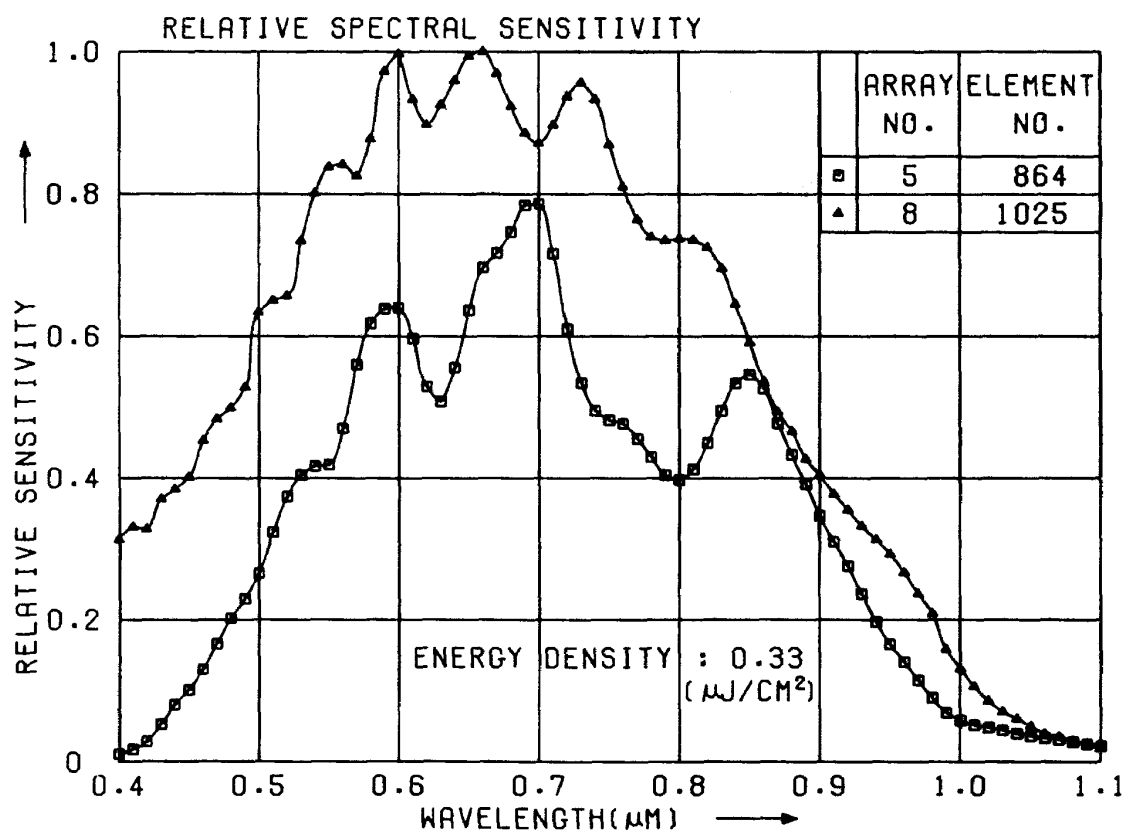
付図 2.10



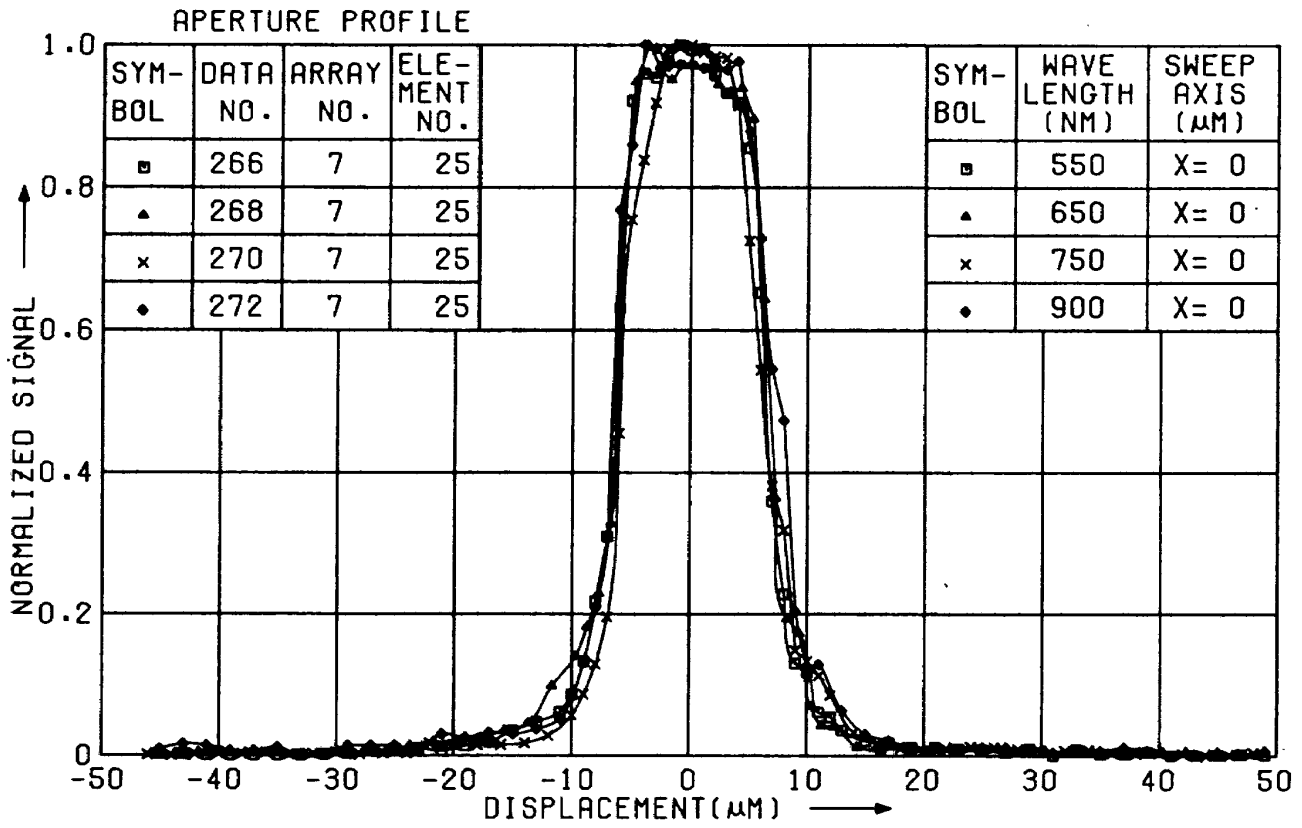
付図 2.11



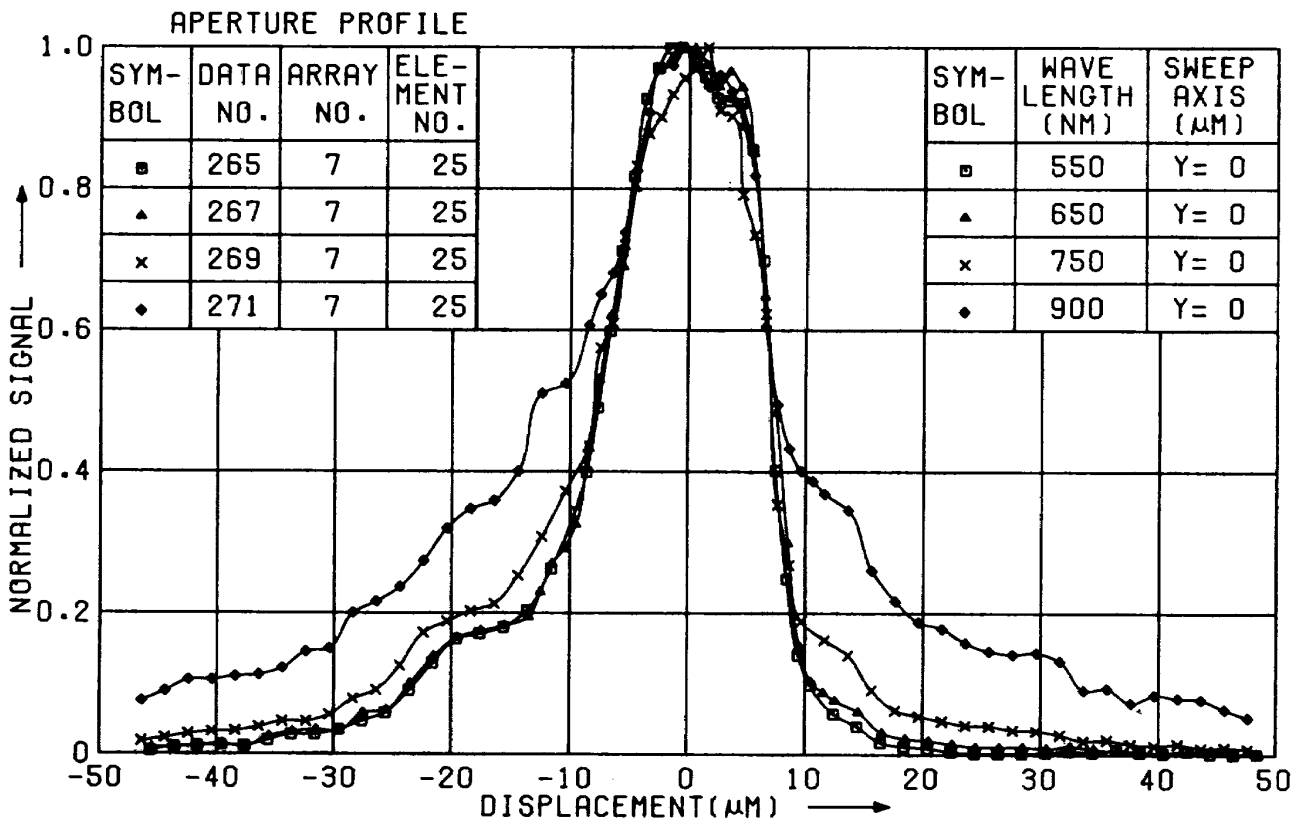
付図 2.12



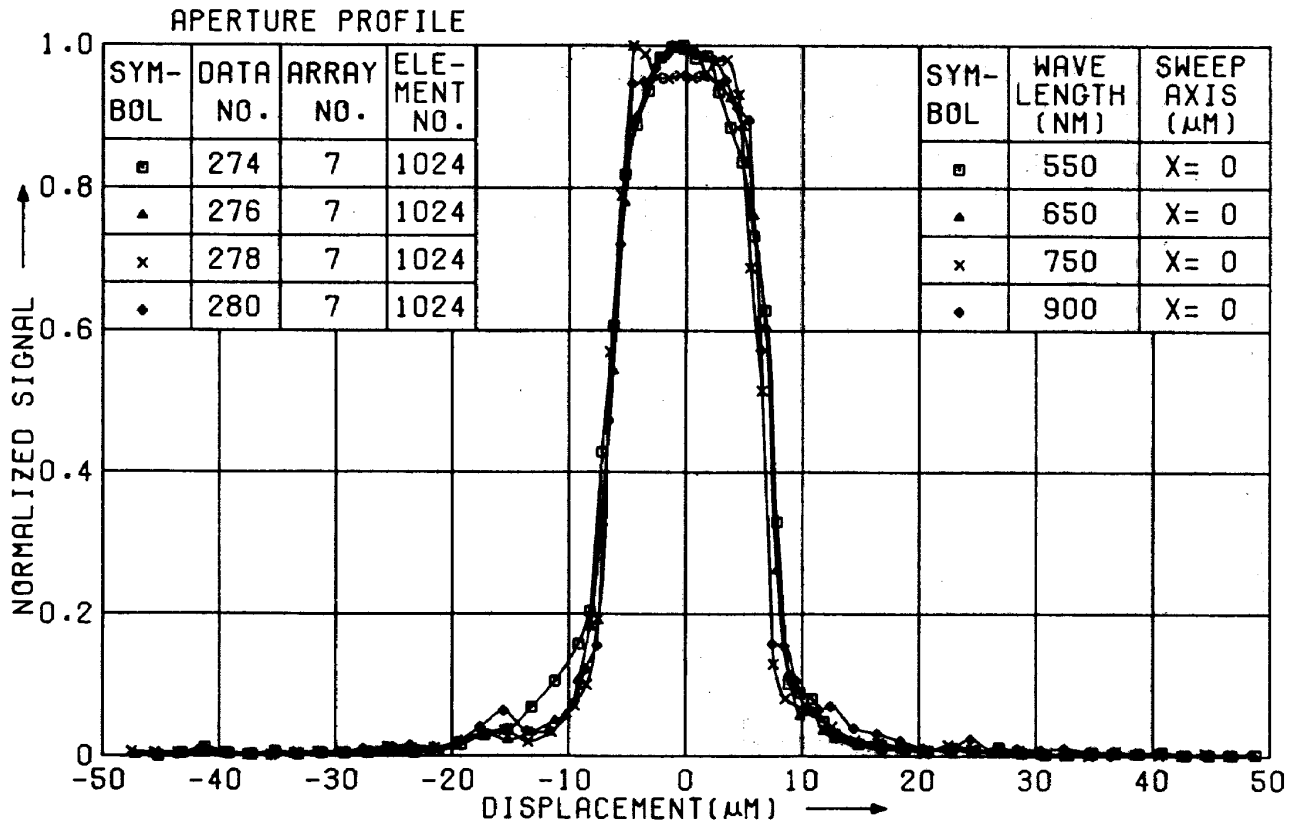
付図 2.13



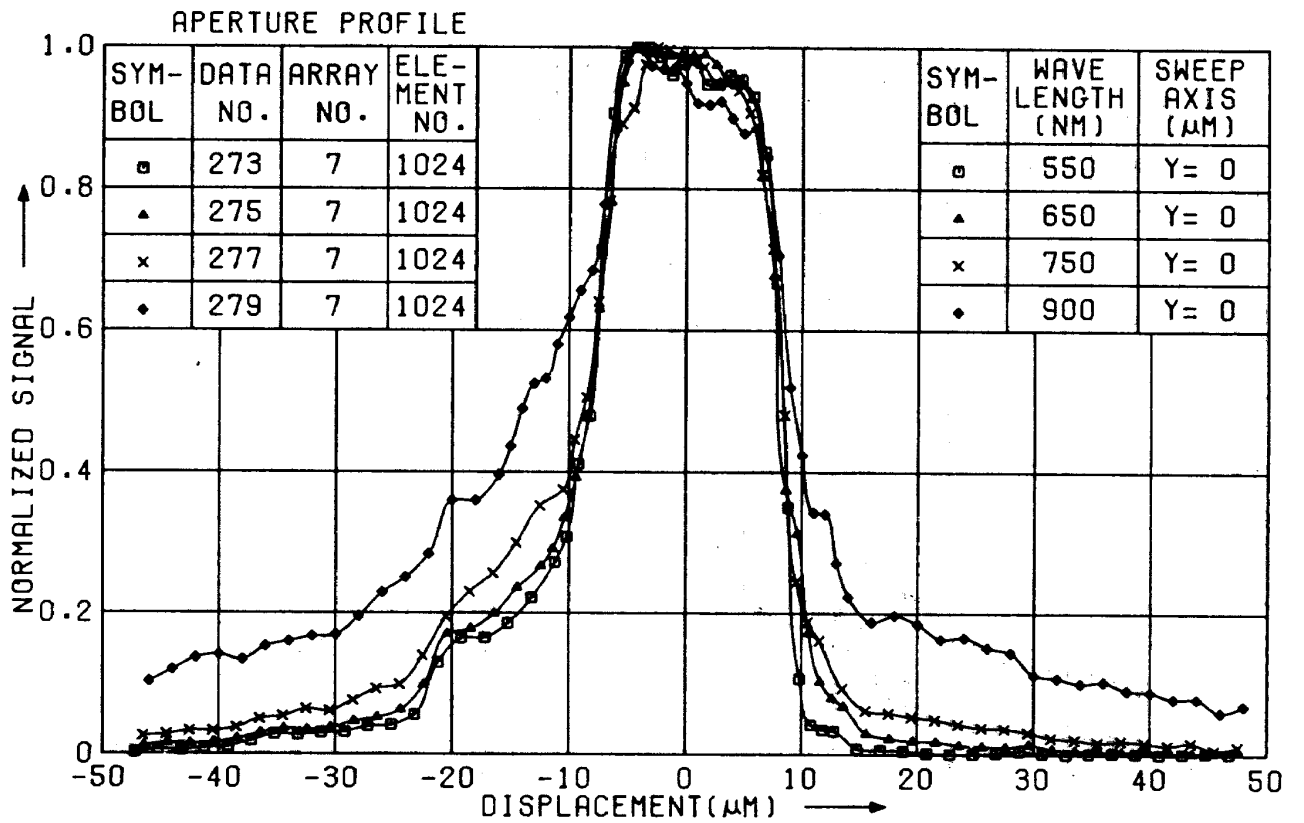
付図 3.1



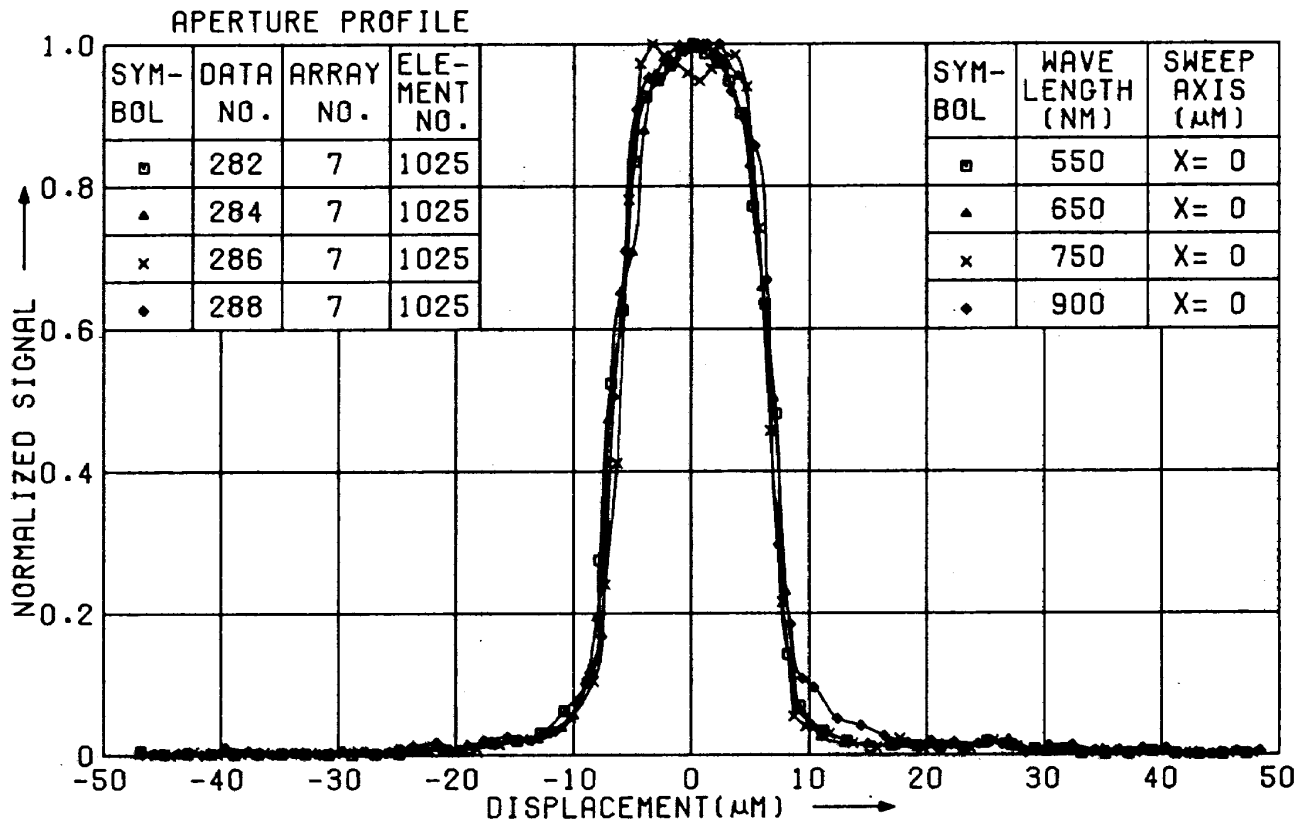
付図 3.2



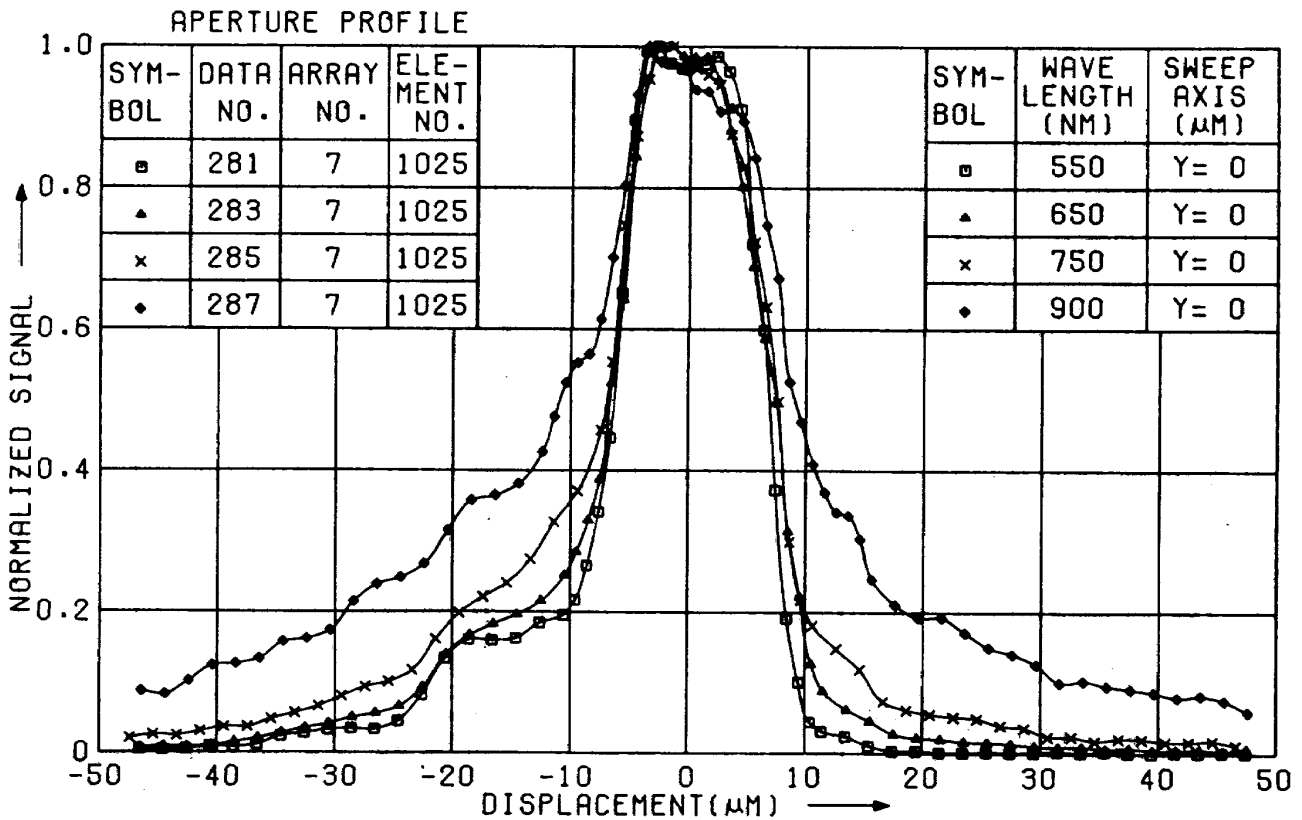
付図 3.3



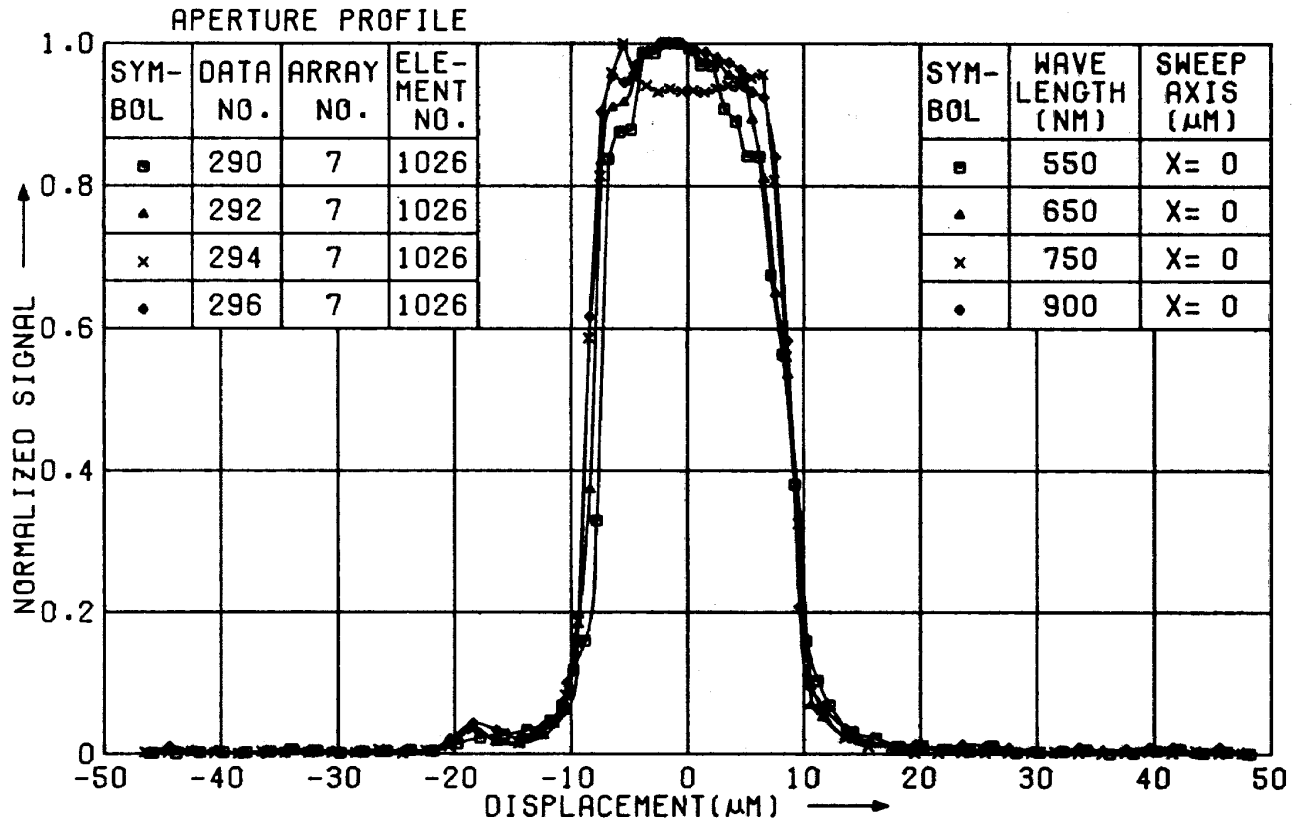
付図 3.4



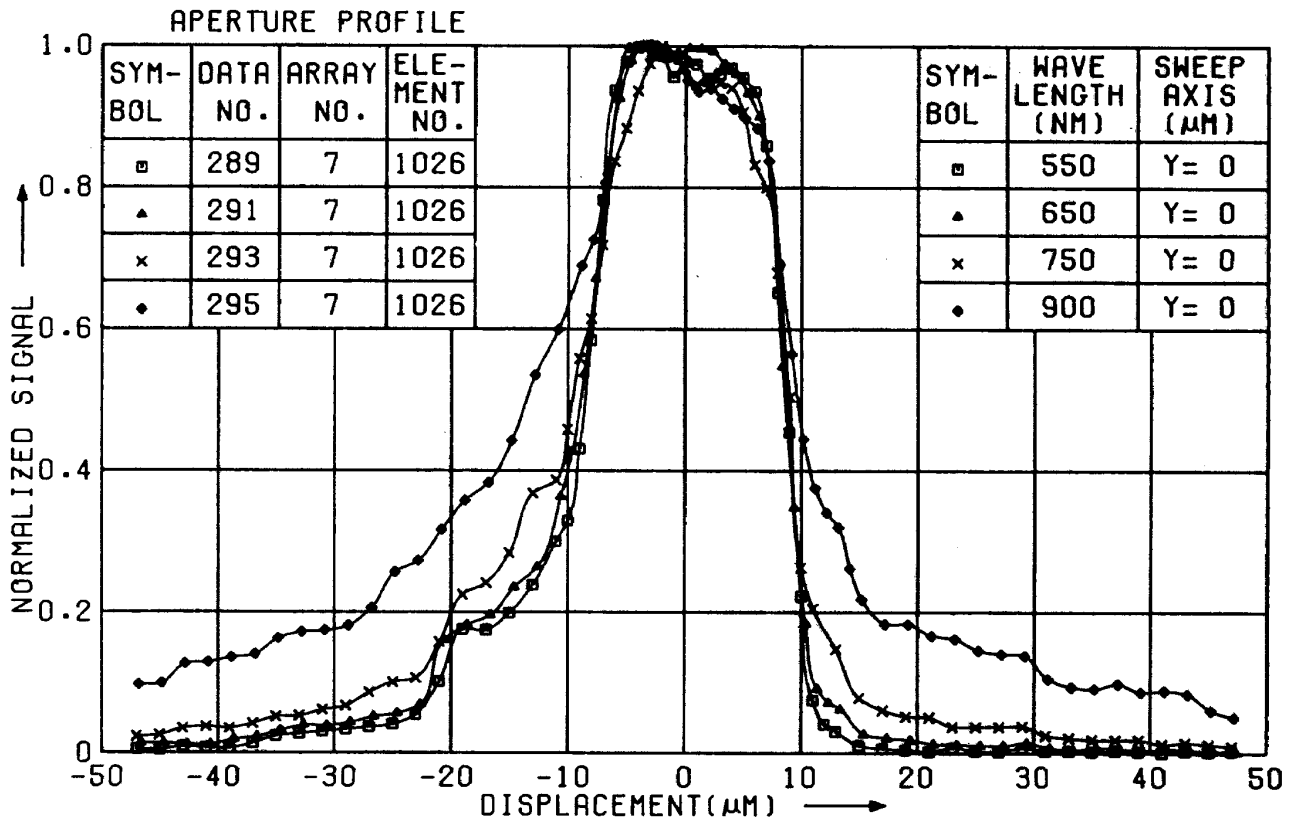
付図 3.5



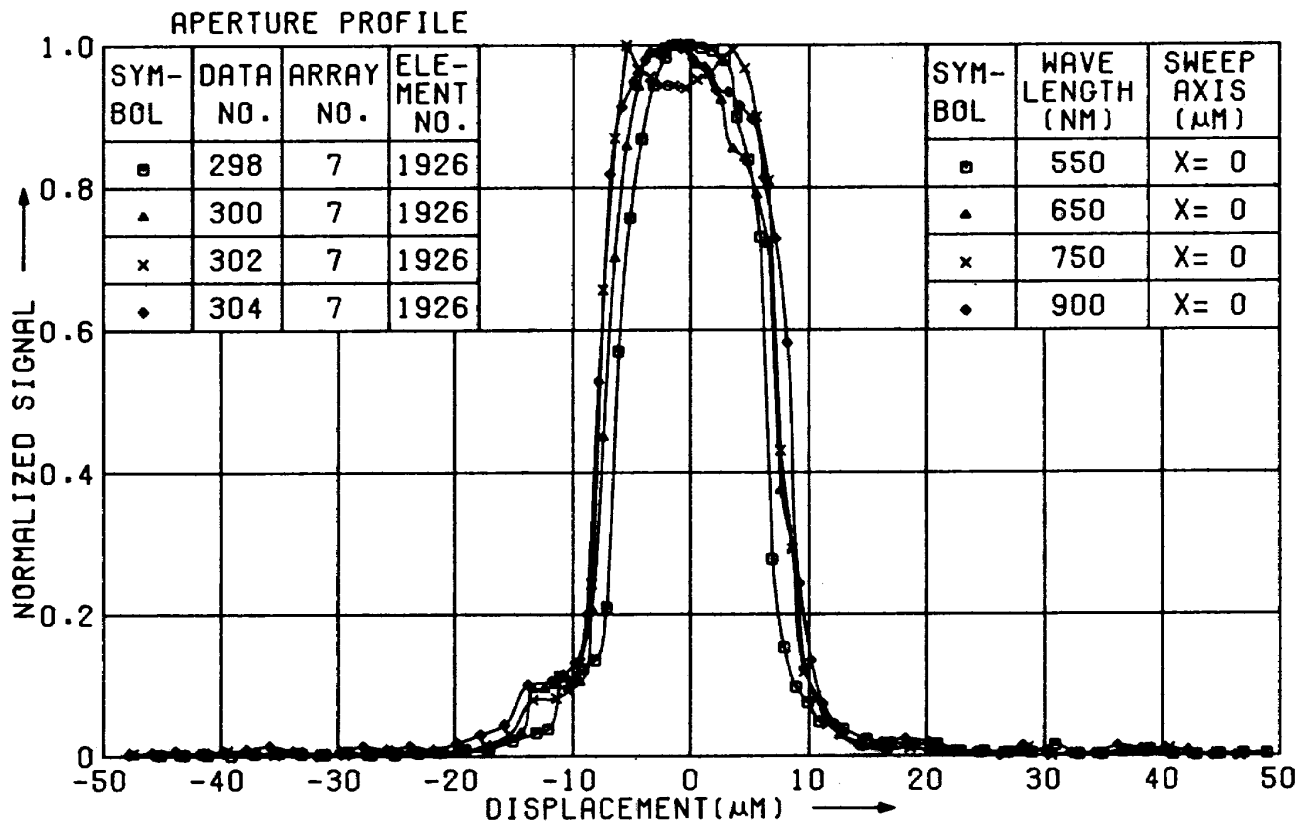
付図 3.6



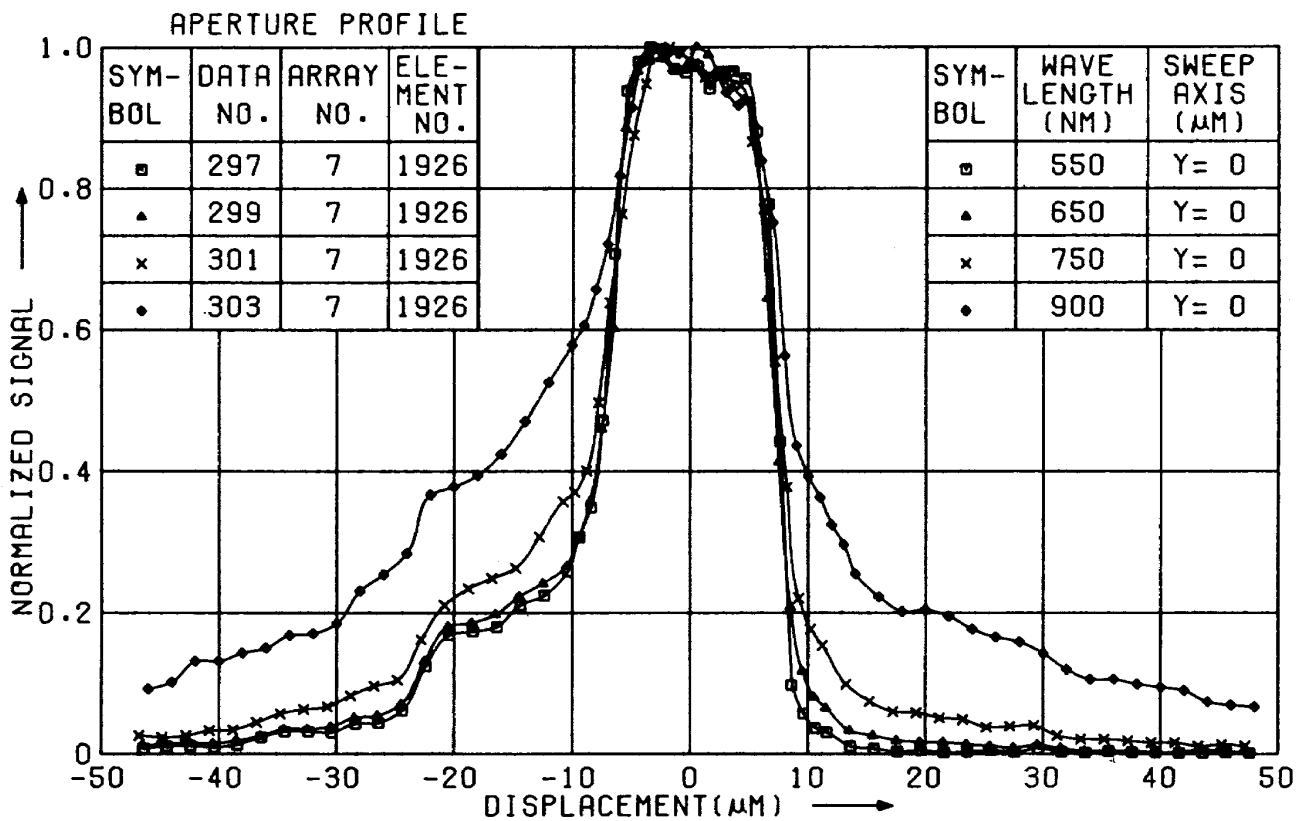
付図 3.7



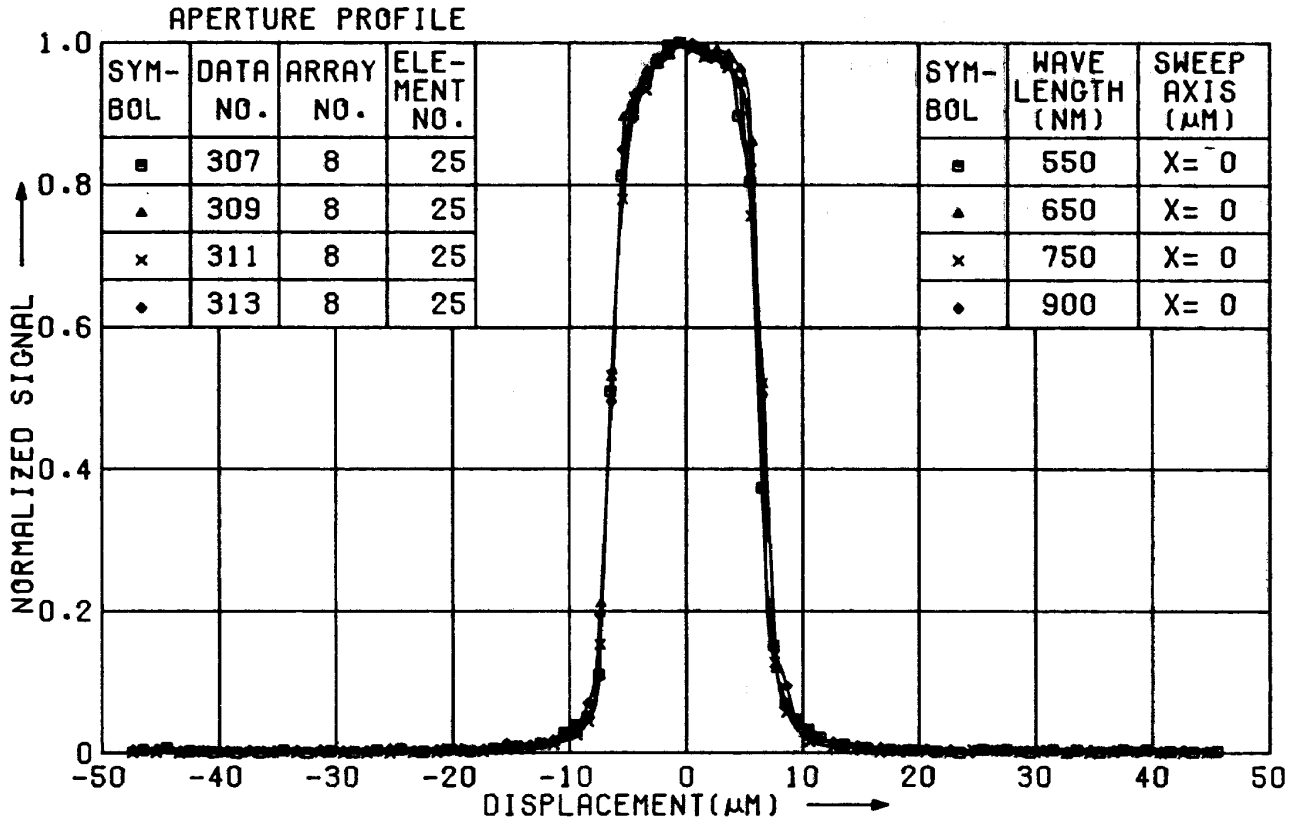
付図 3.8



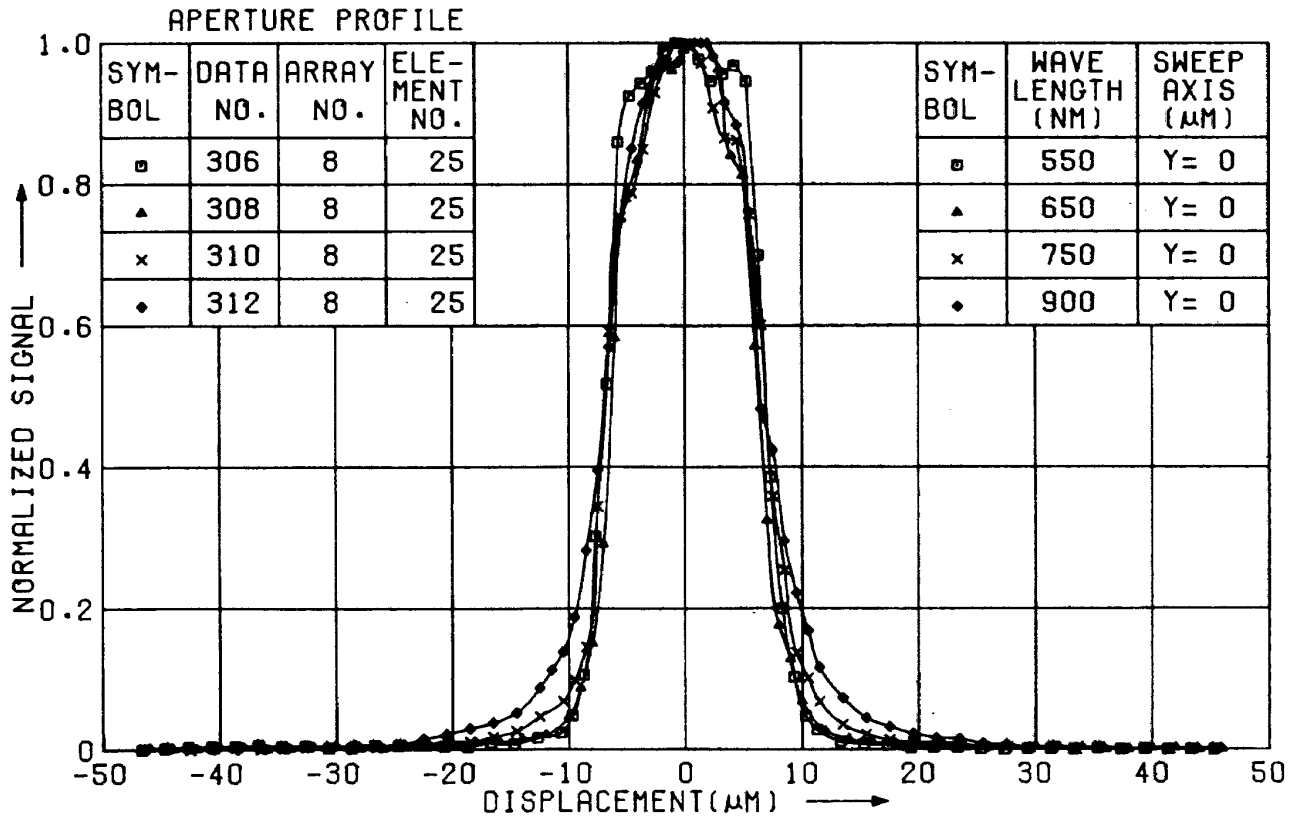
付図 3.9



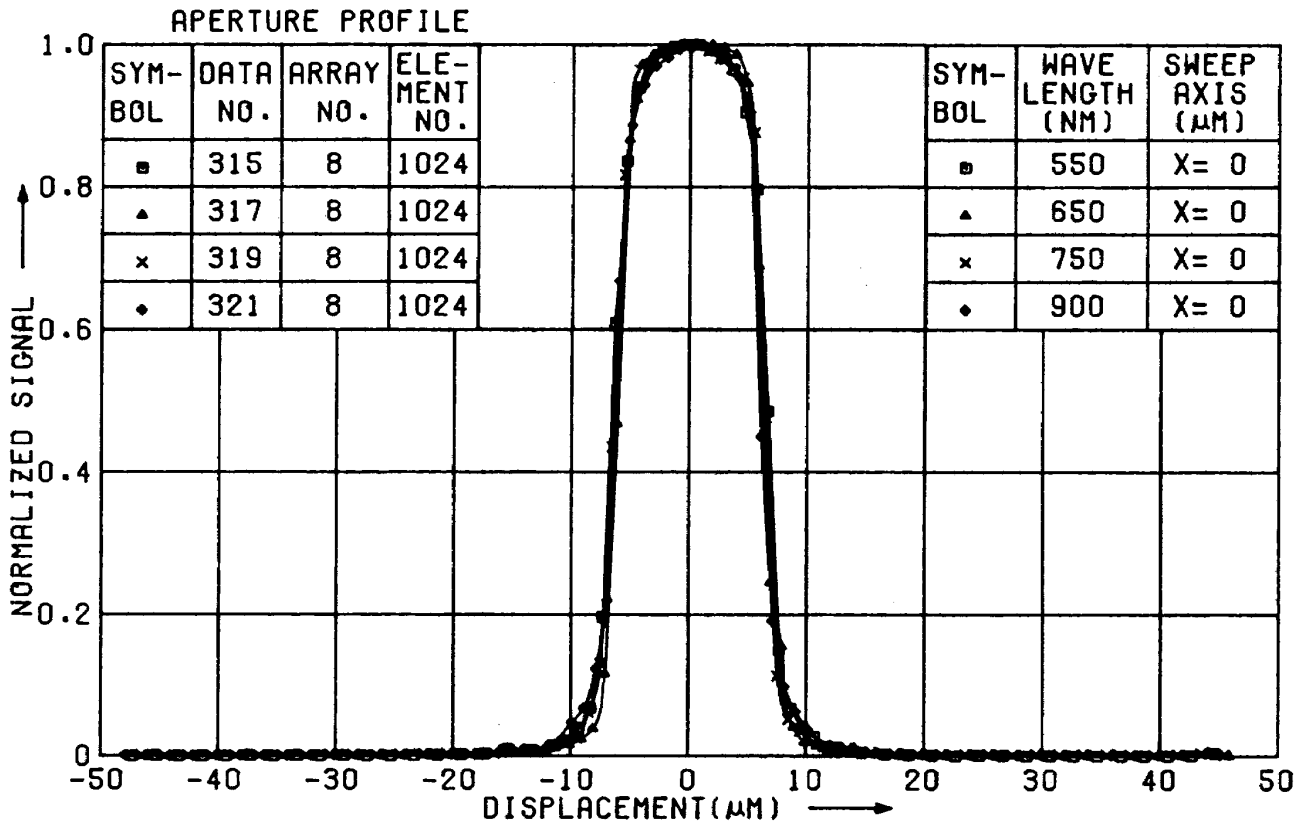
付図 3.10



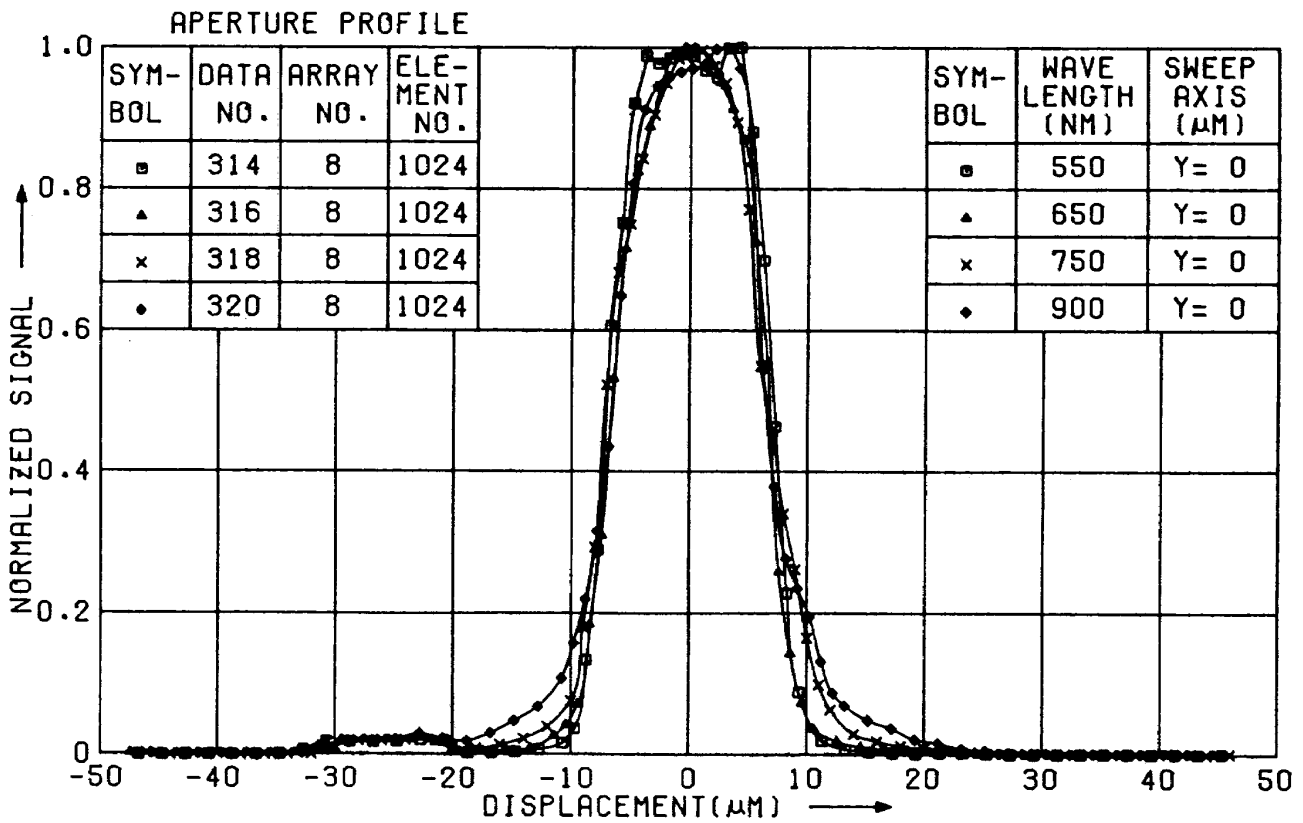
付図 3.11



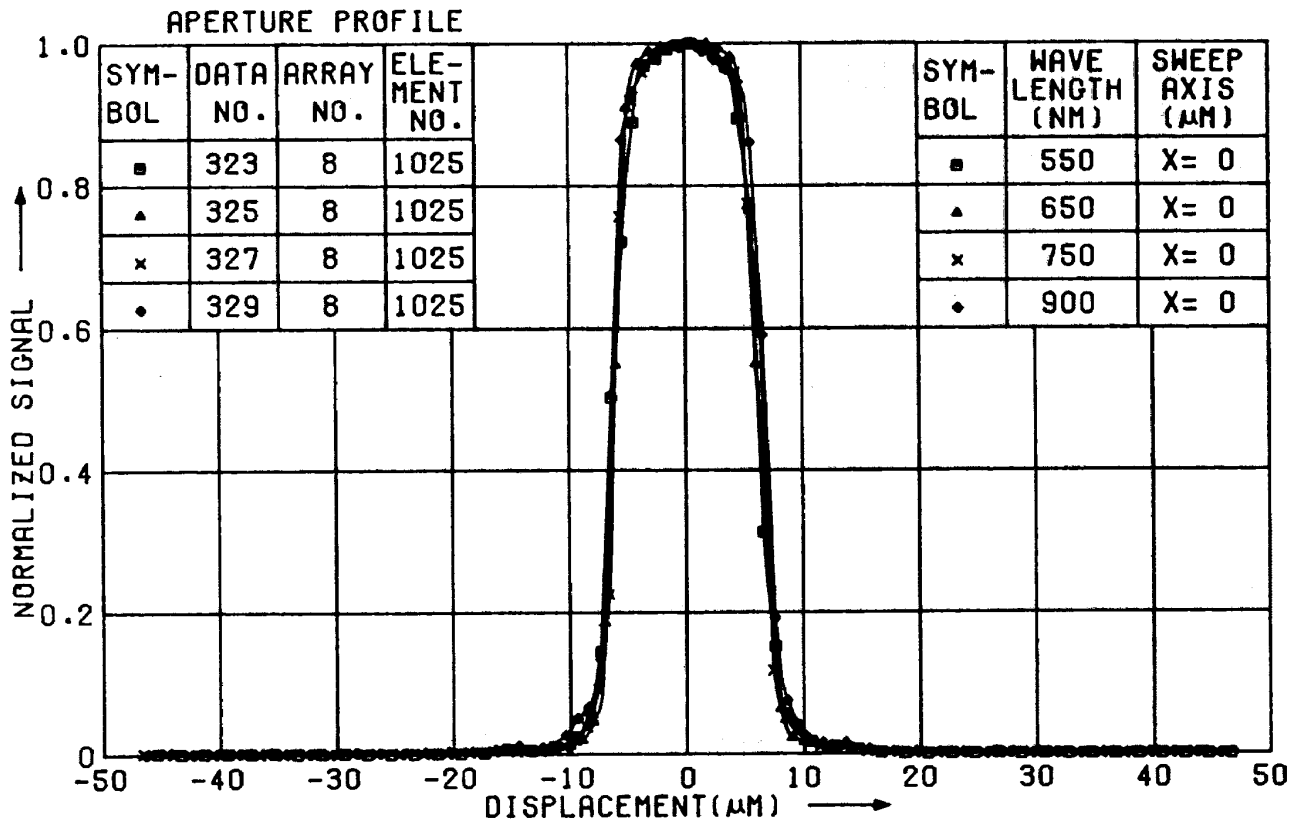
付図 3.12



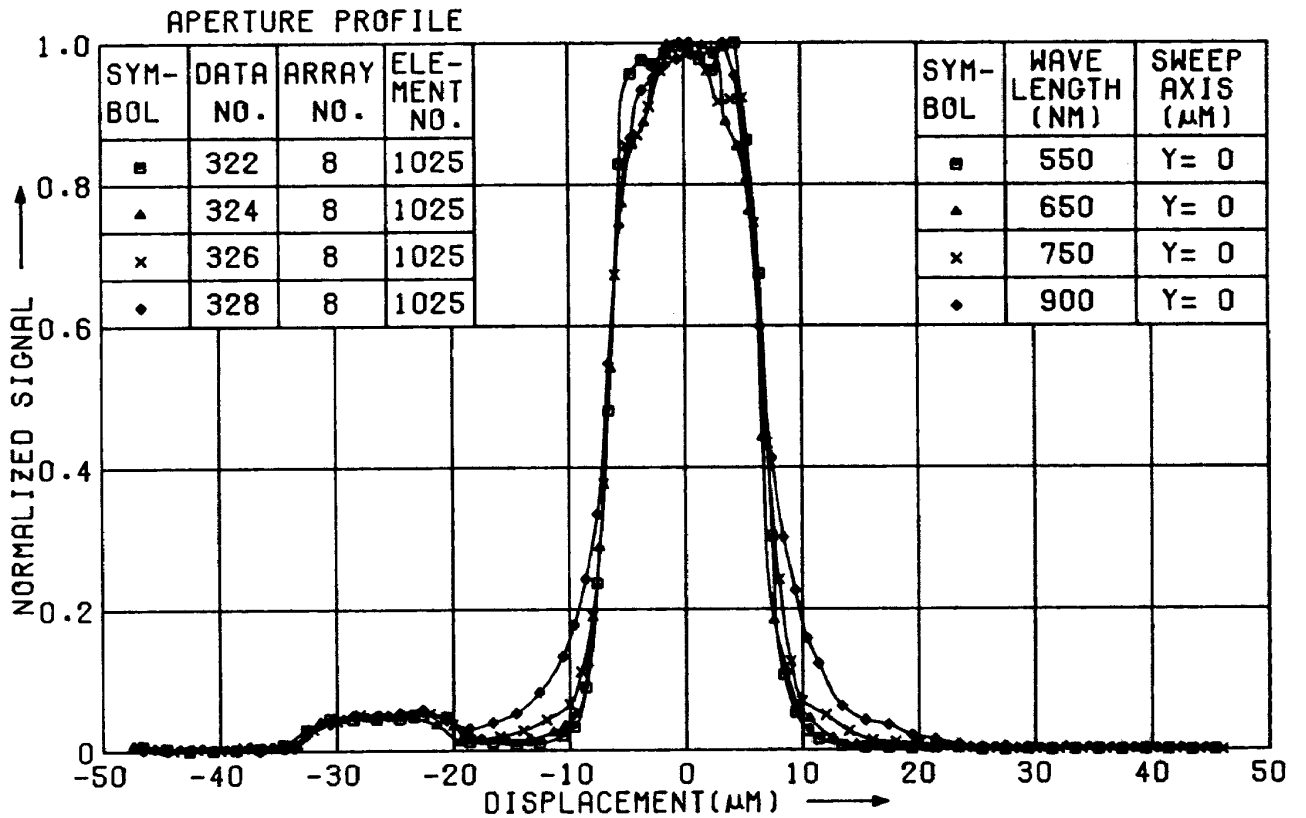
付図 3.13



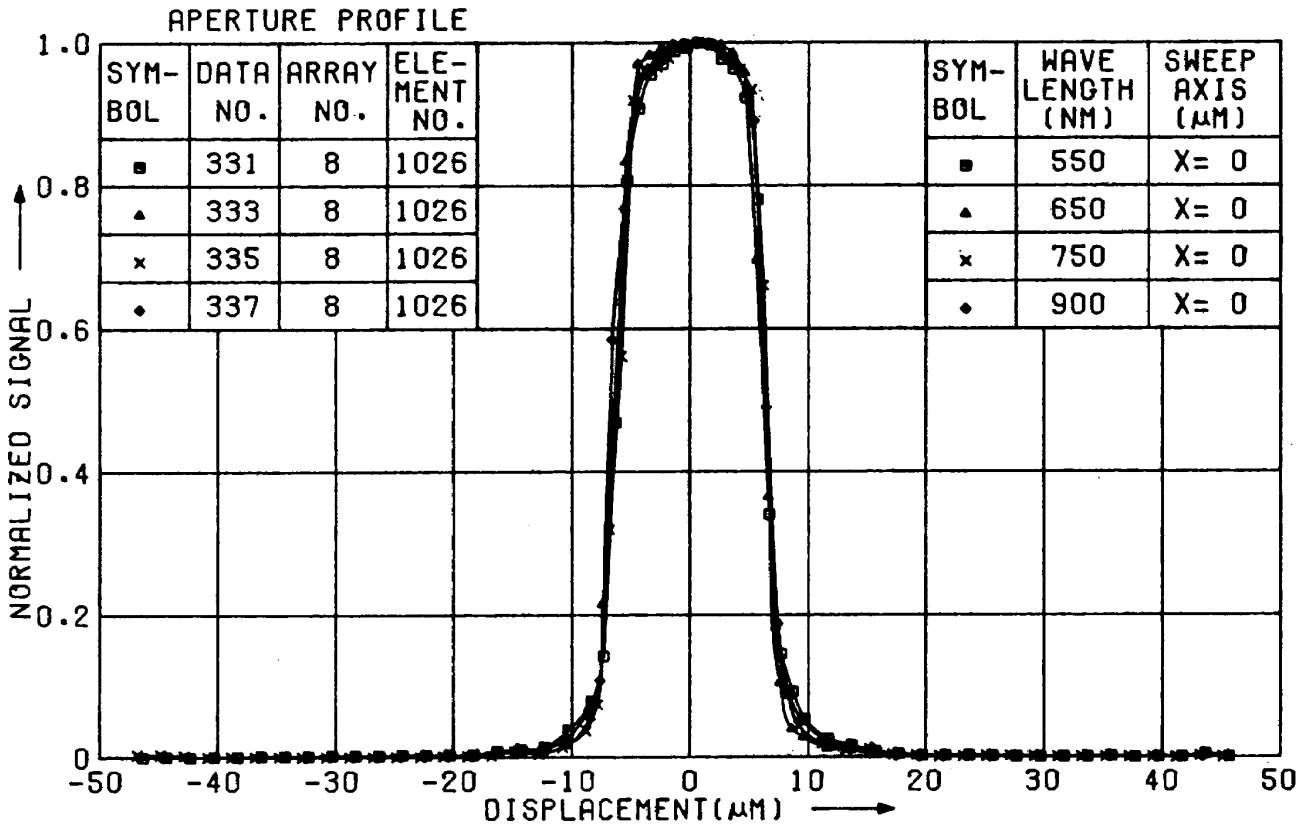
付図 3.14



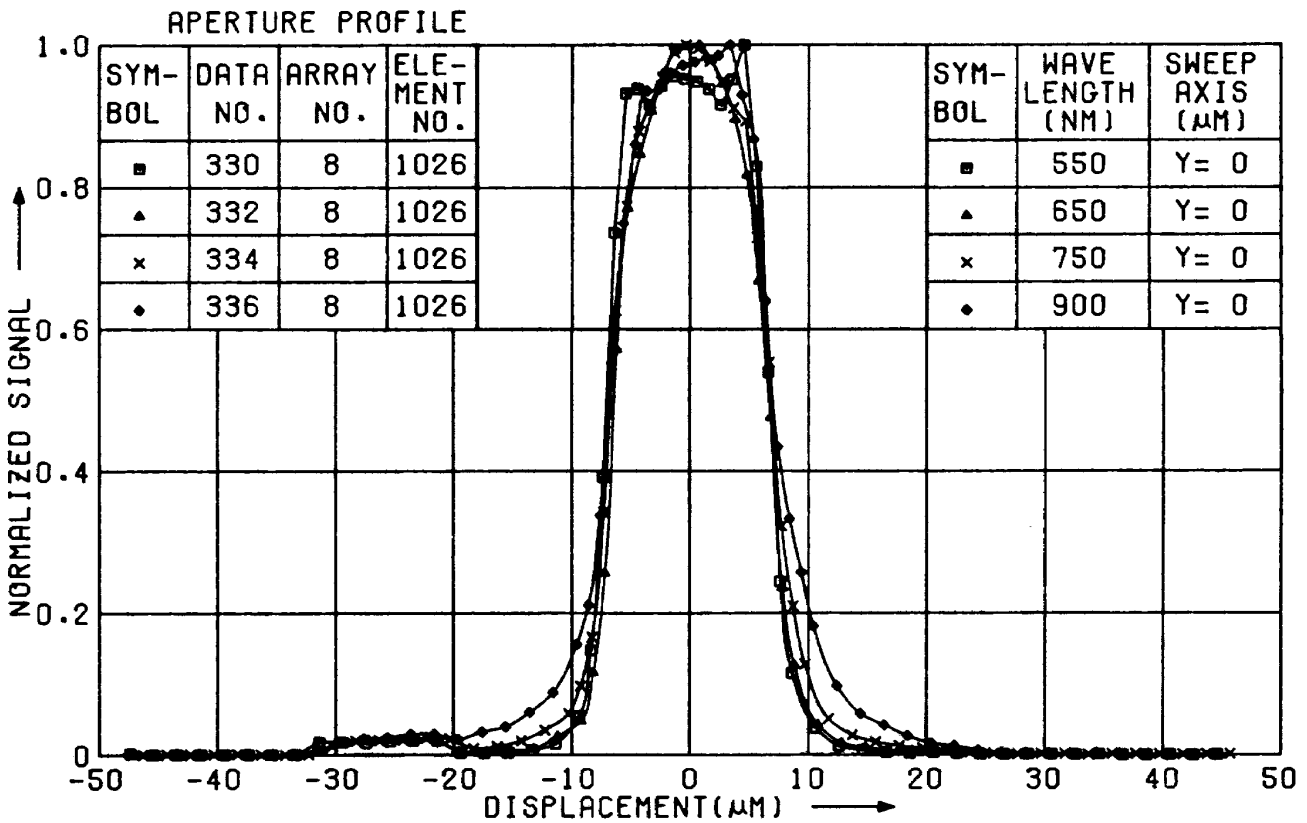
付図 3. 15



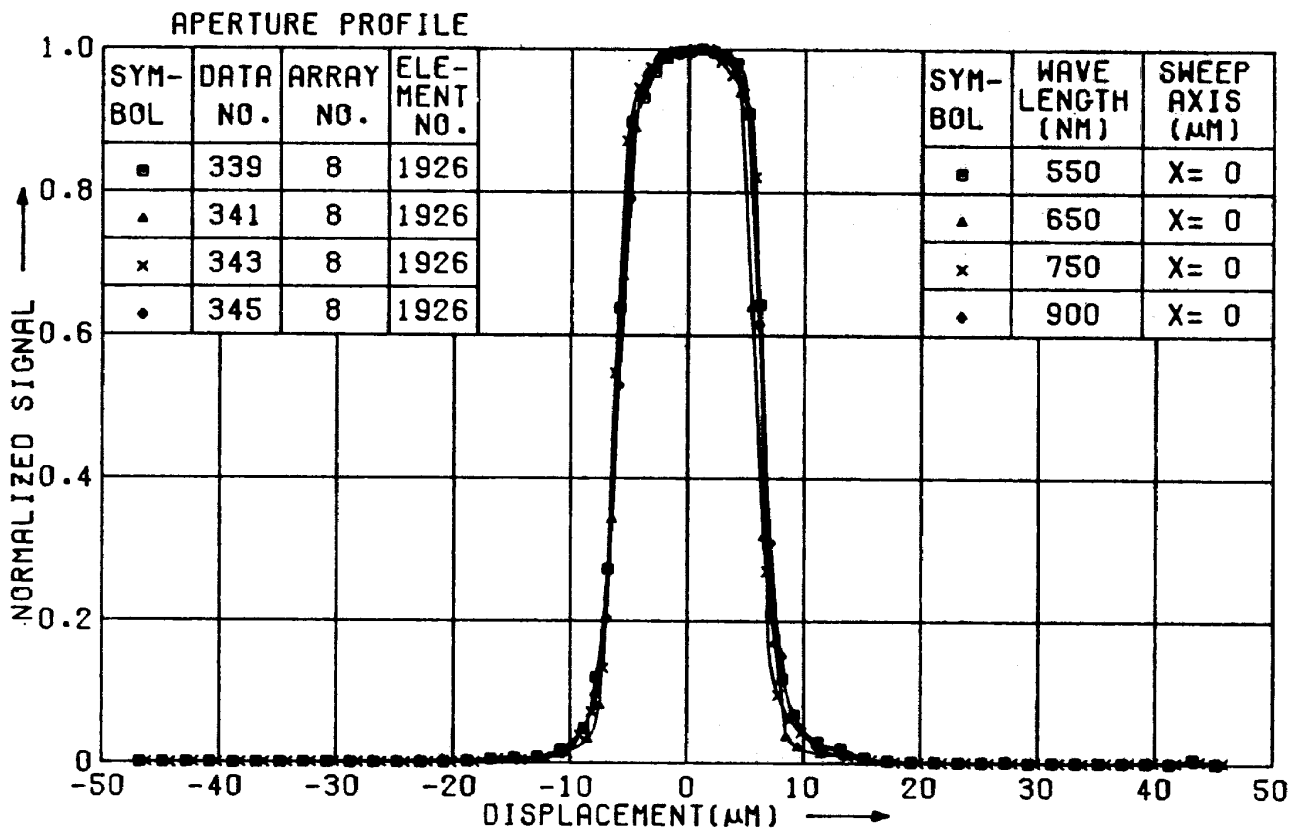
付図 3. 16



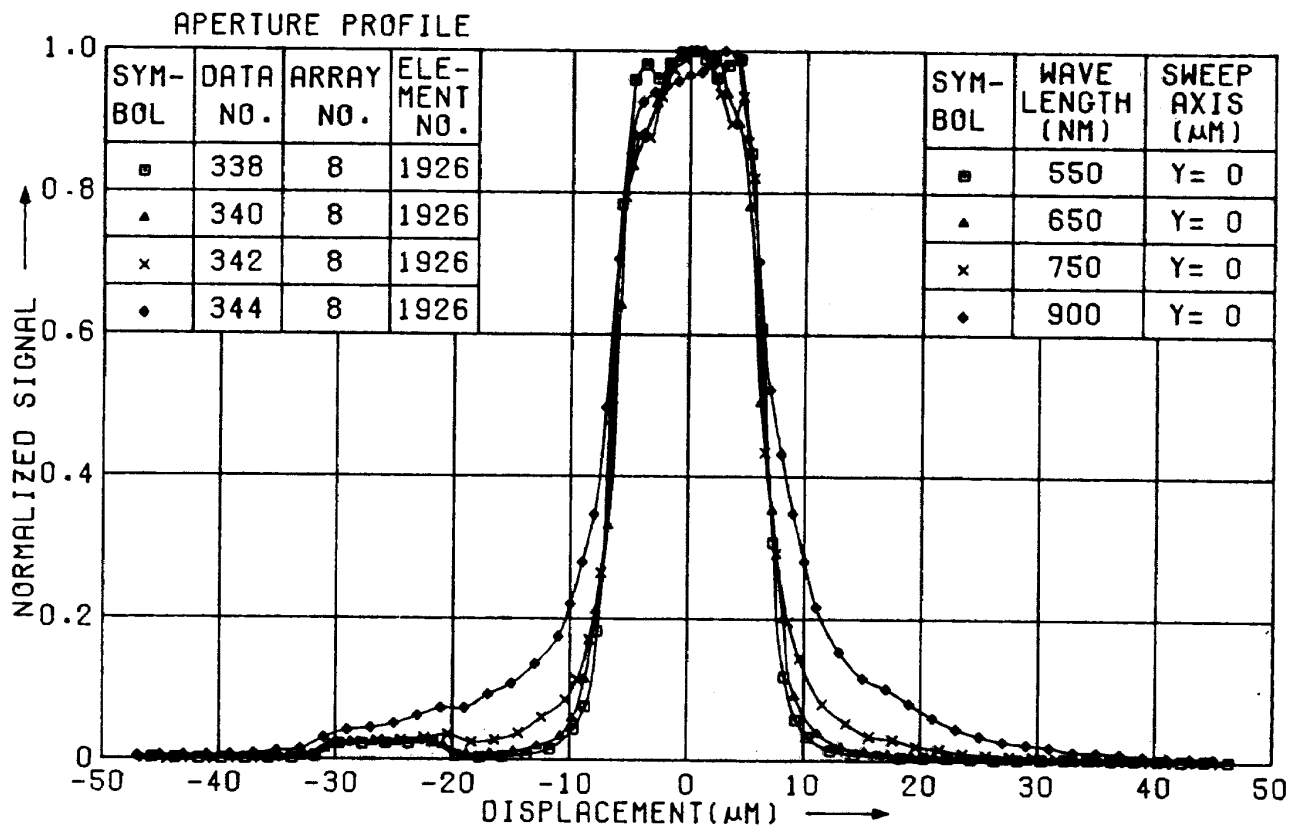
付図 3. 17



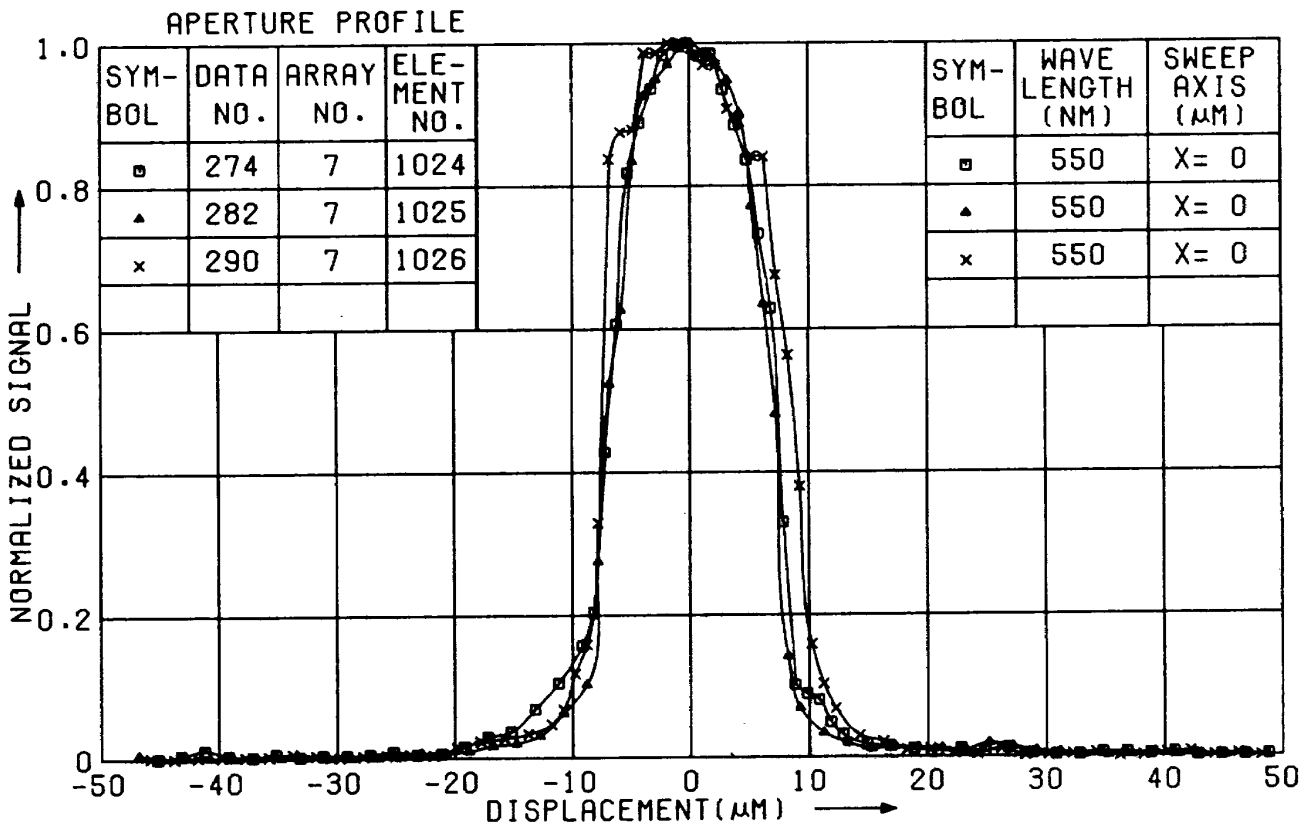
付図 3. 18



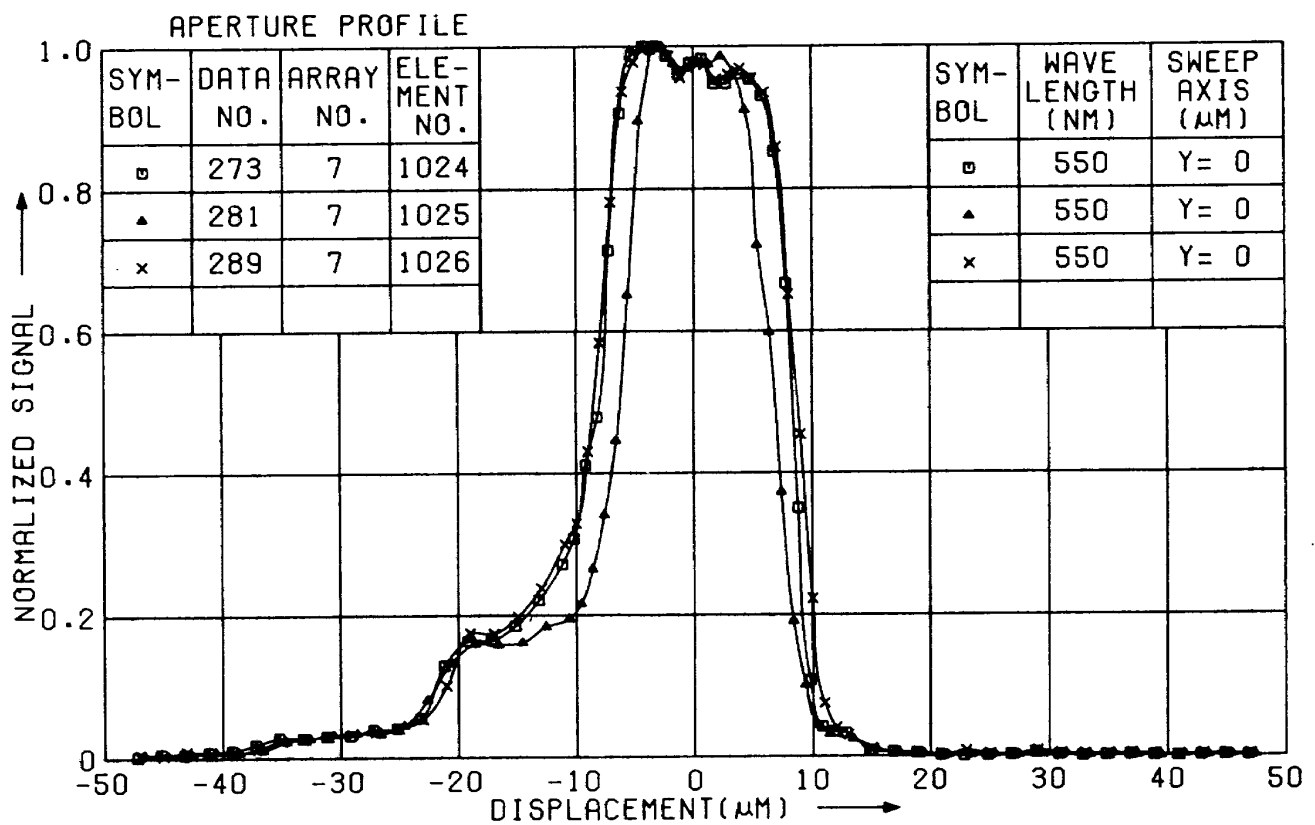
付図 3. 19



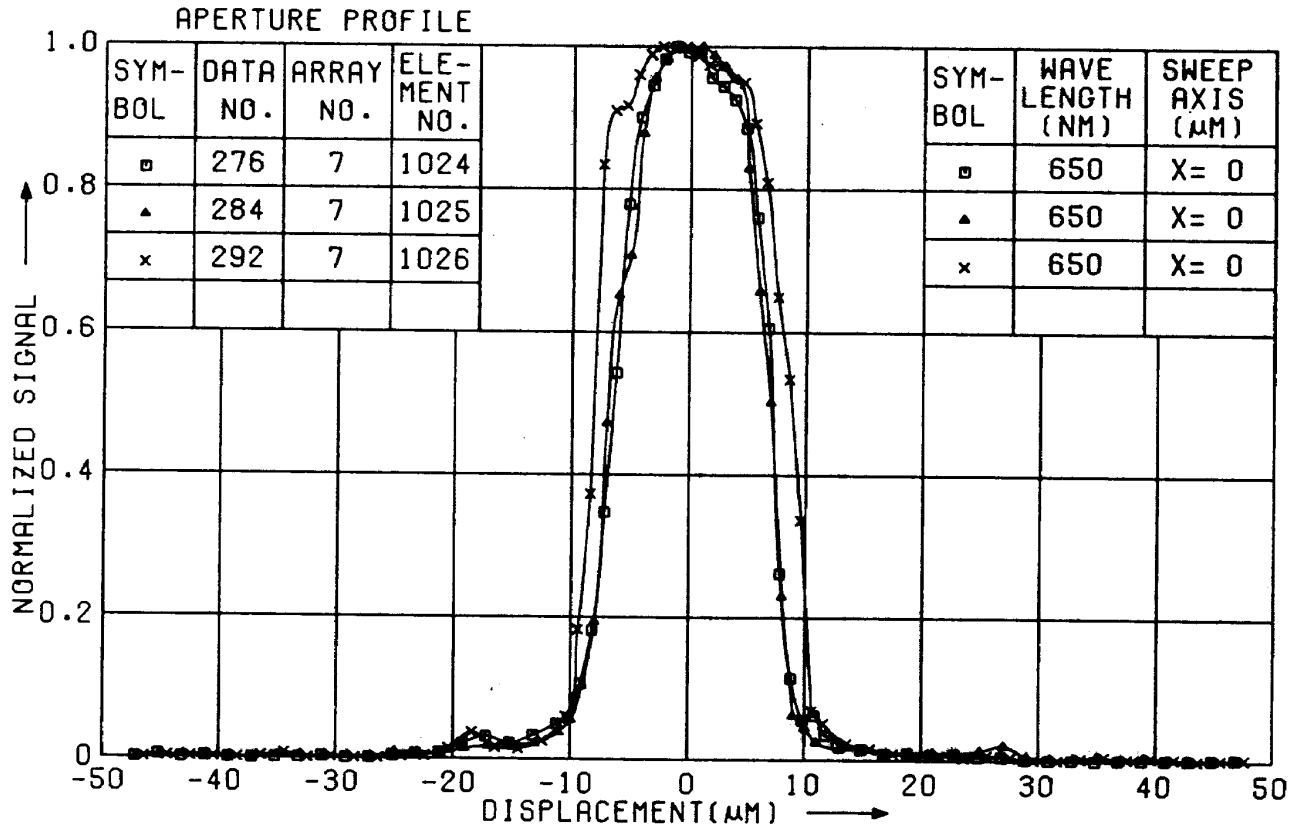
付図 3. 20



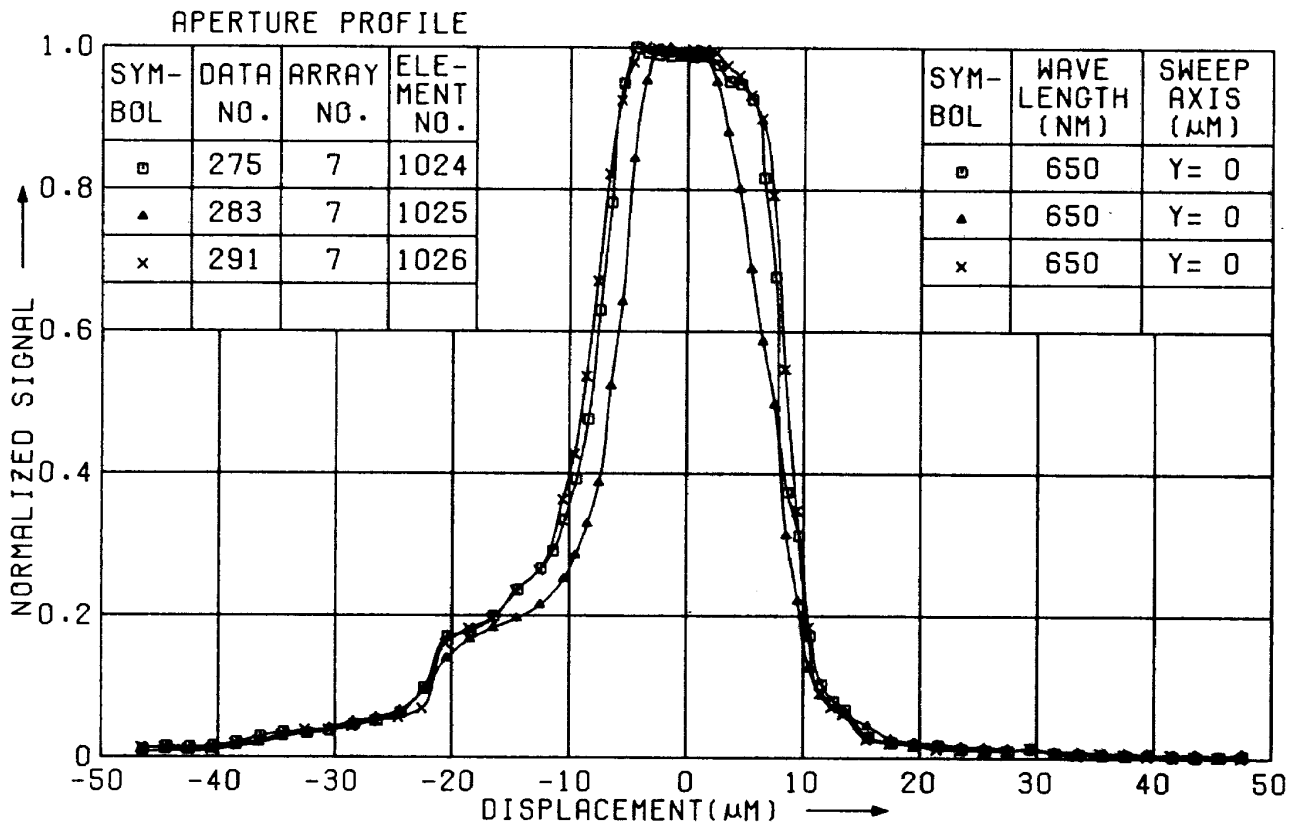
付図 3. 21



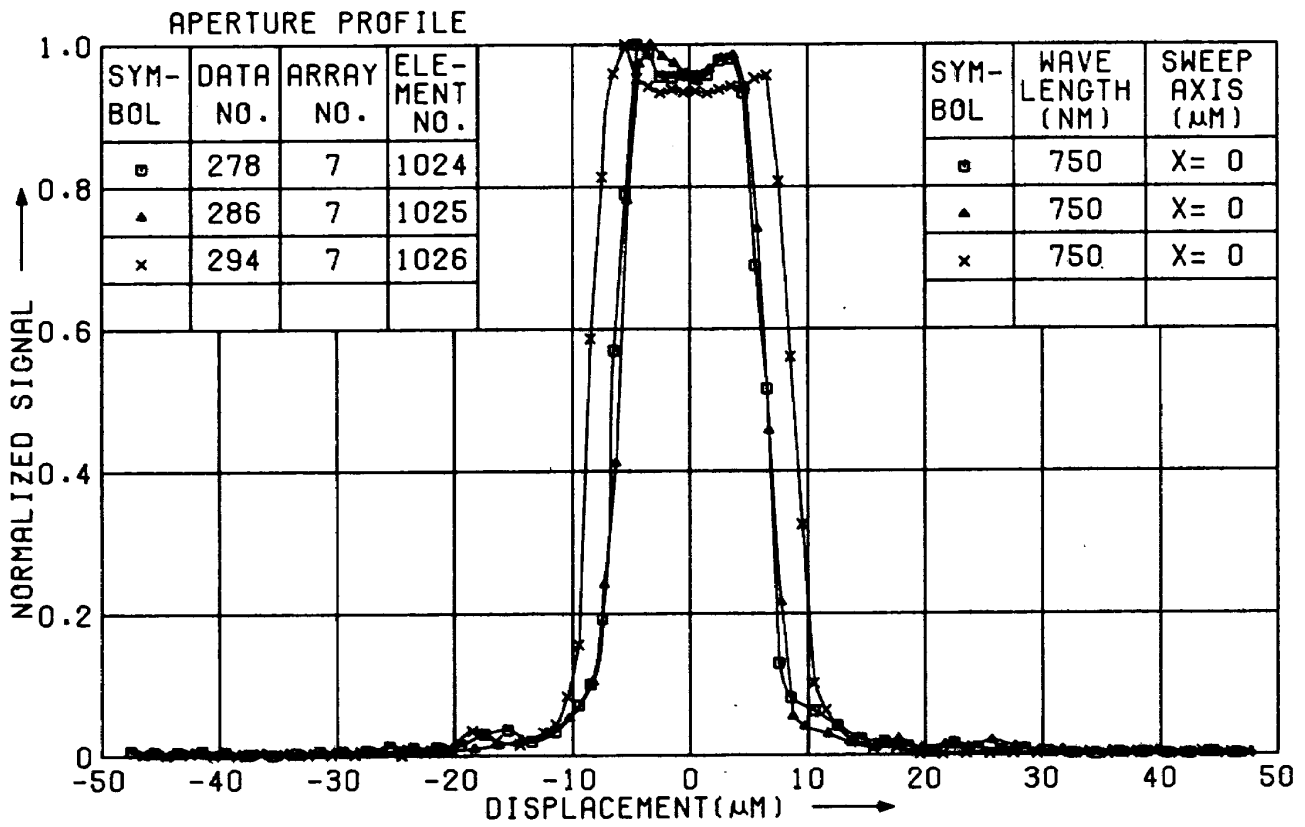
付図 3. 22



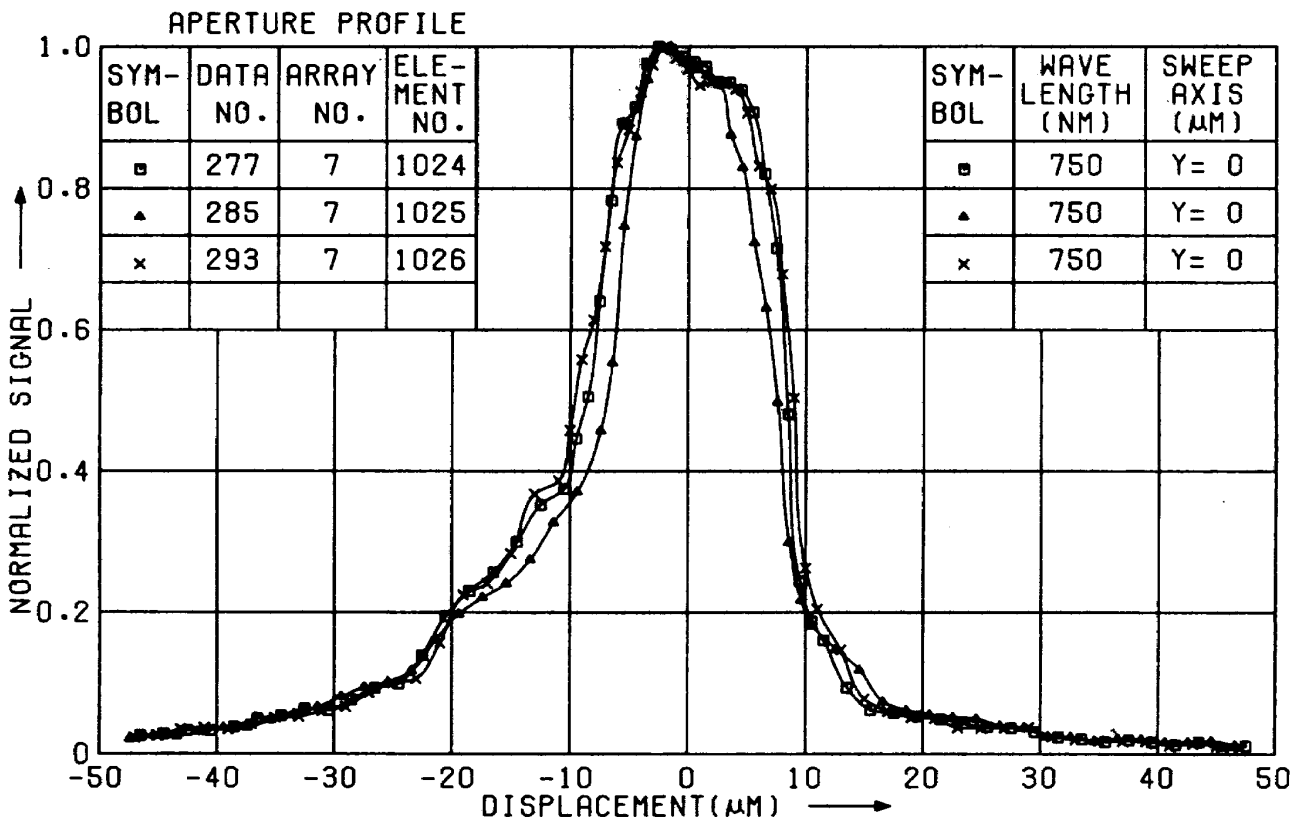
付図 3.23



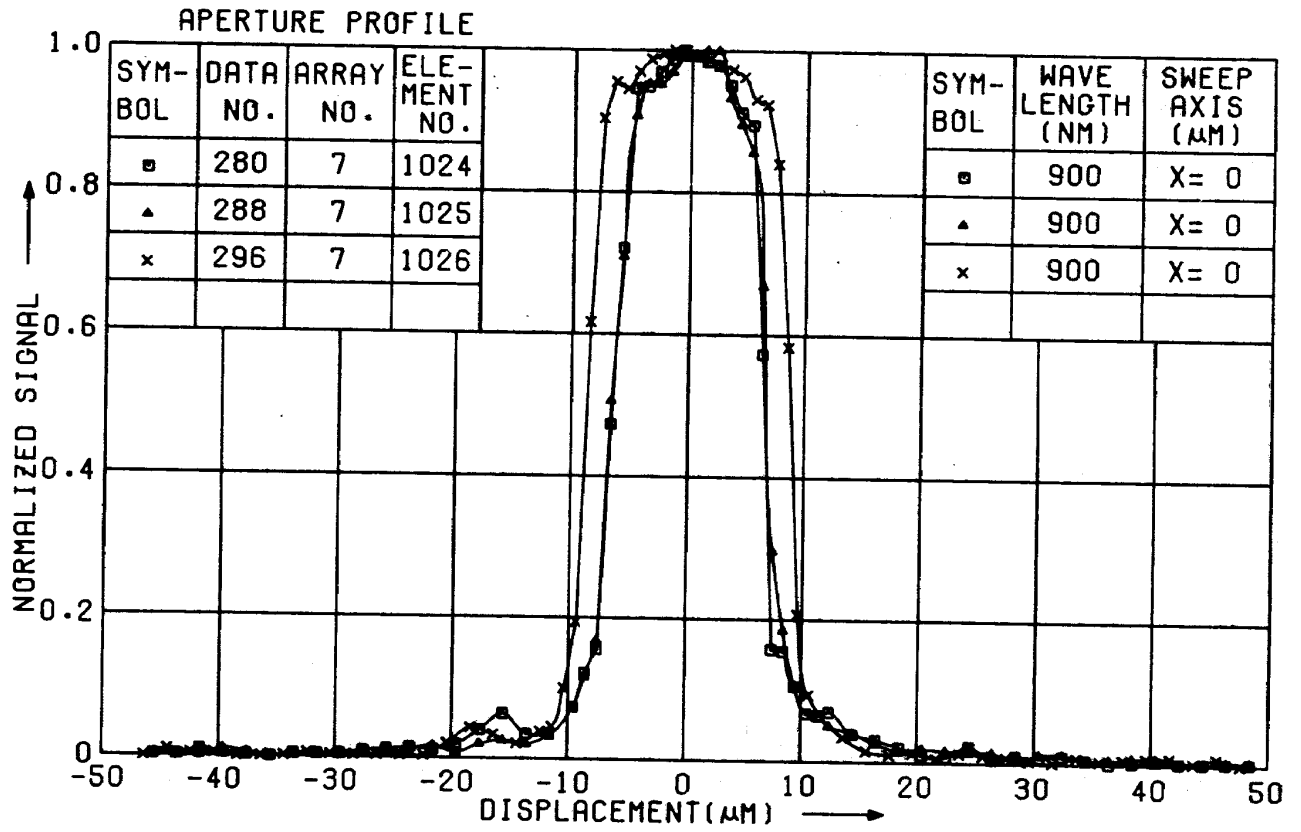
付図 3.24



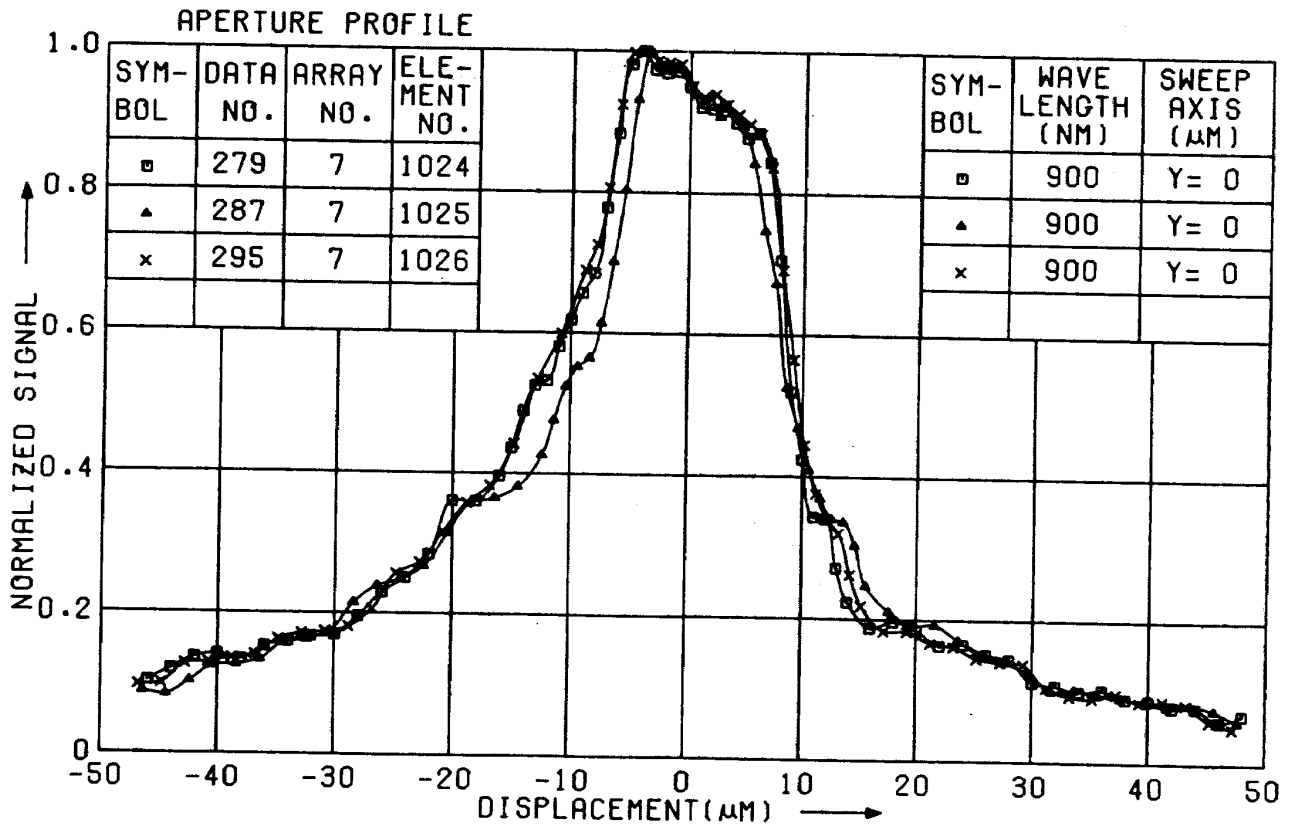
付図 3. 25



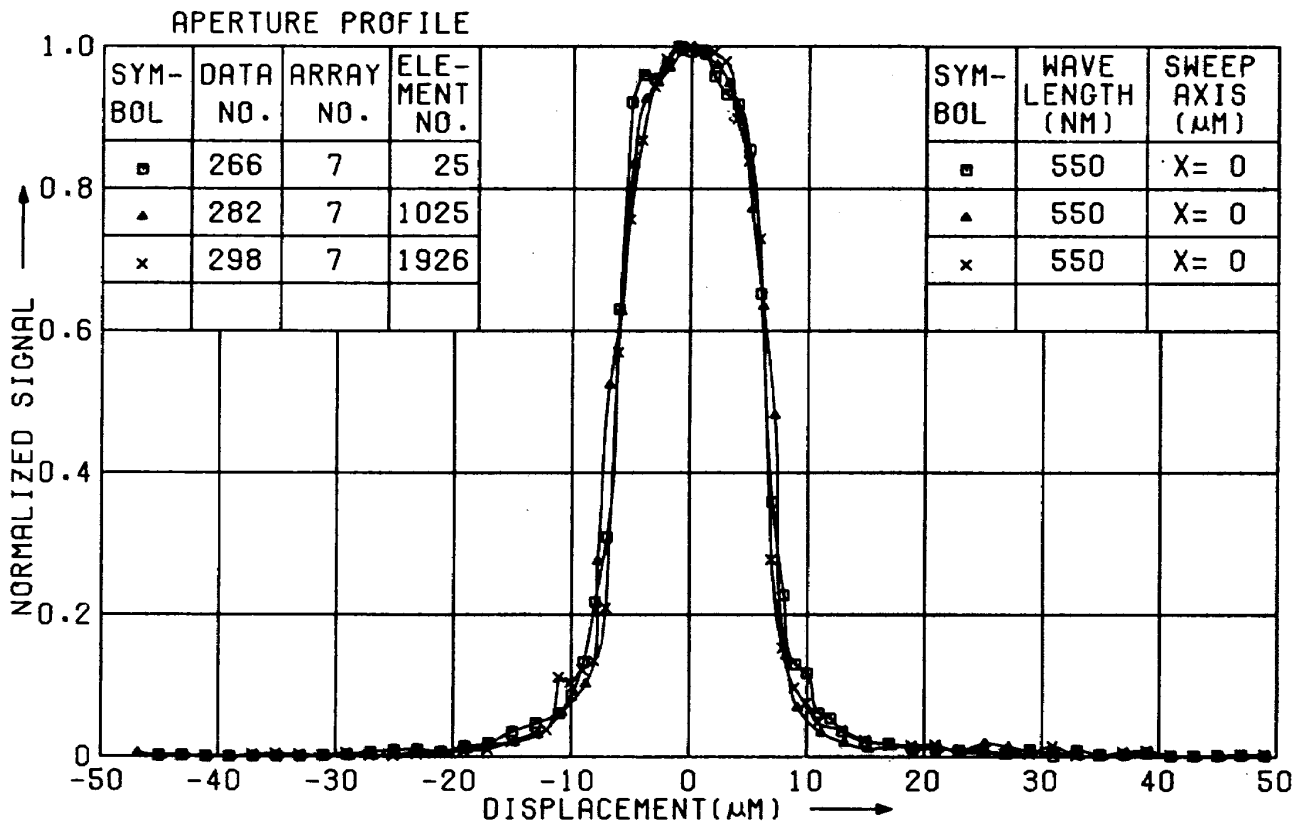
付図 3. 26



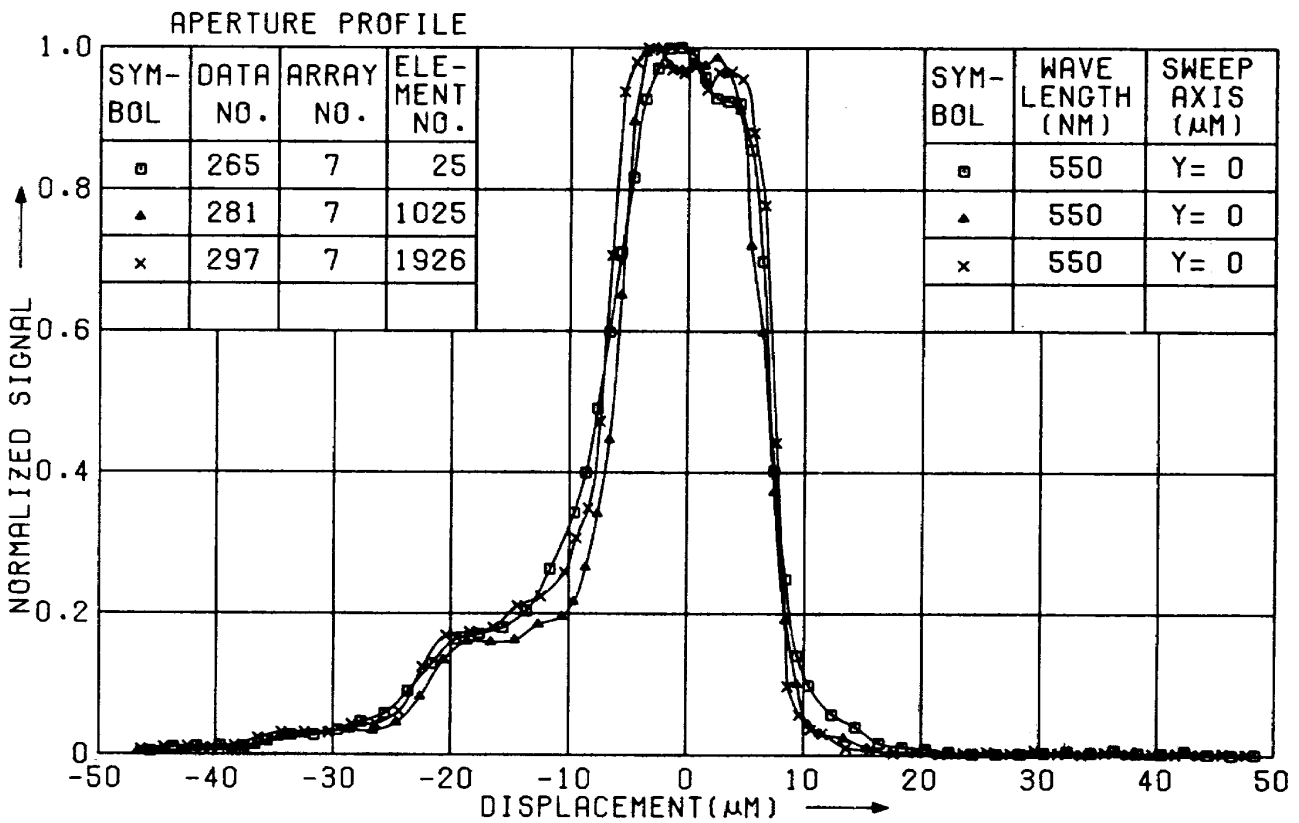
付図 3.27



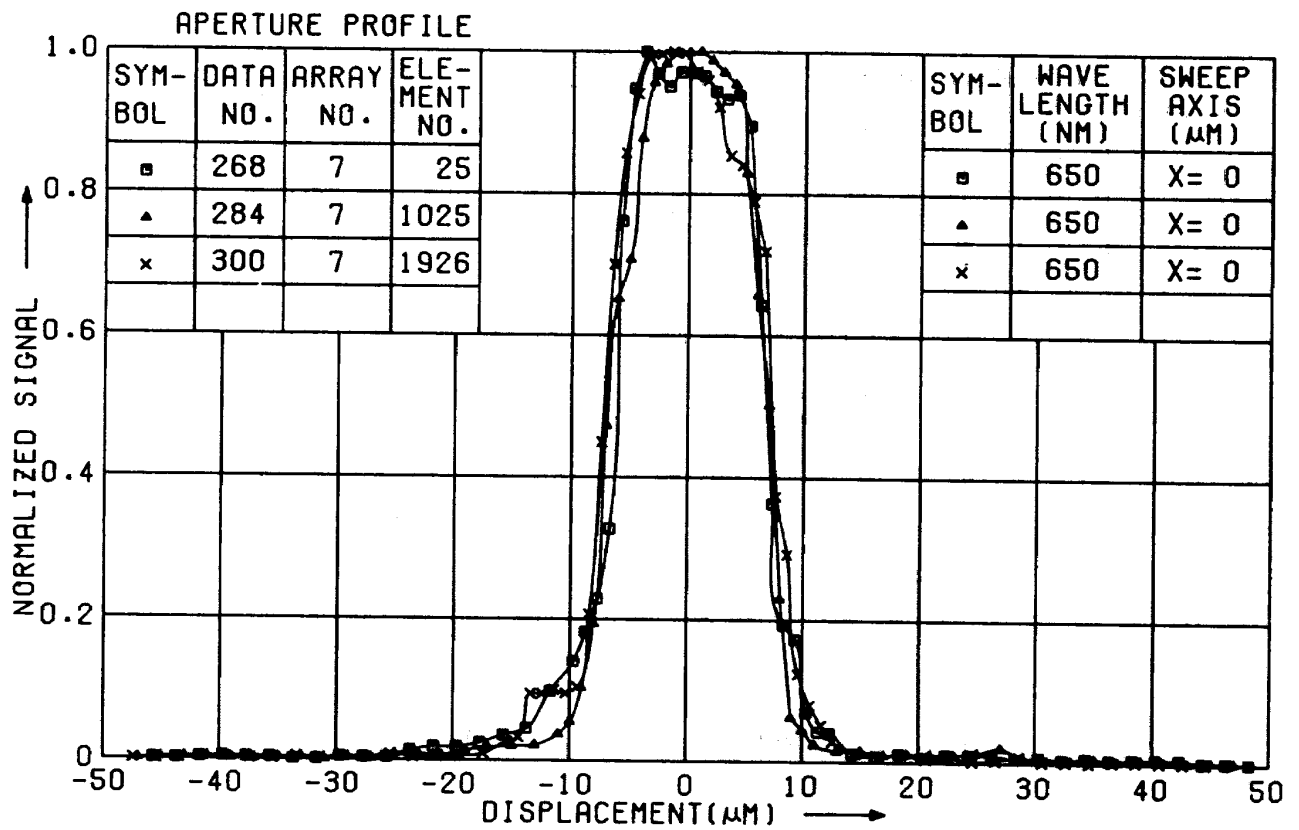
付図 3.28



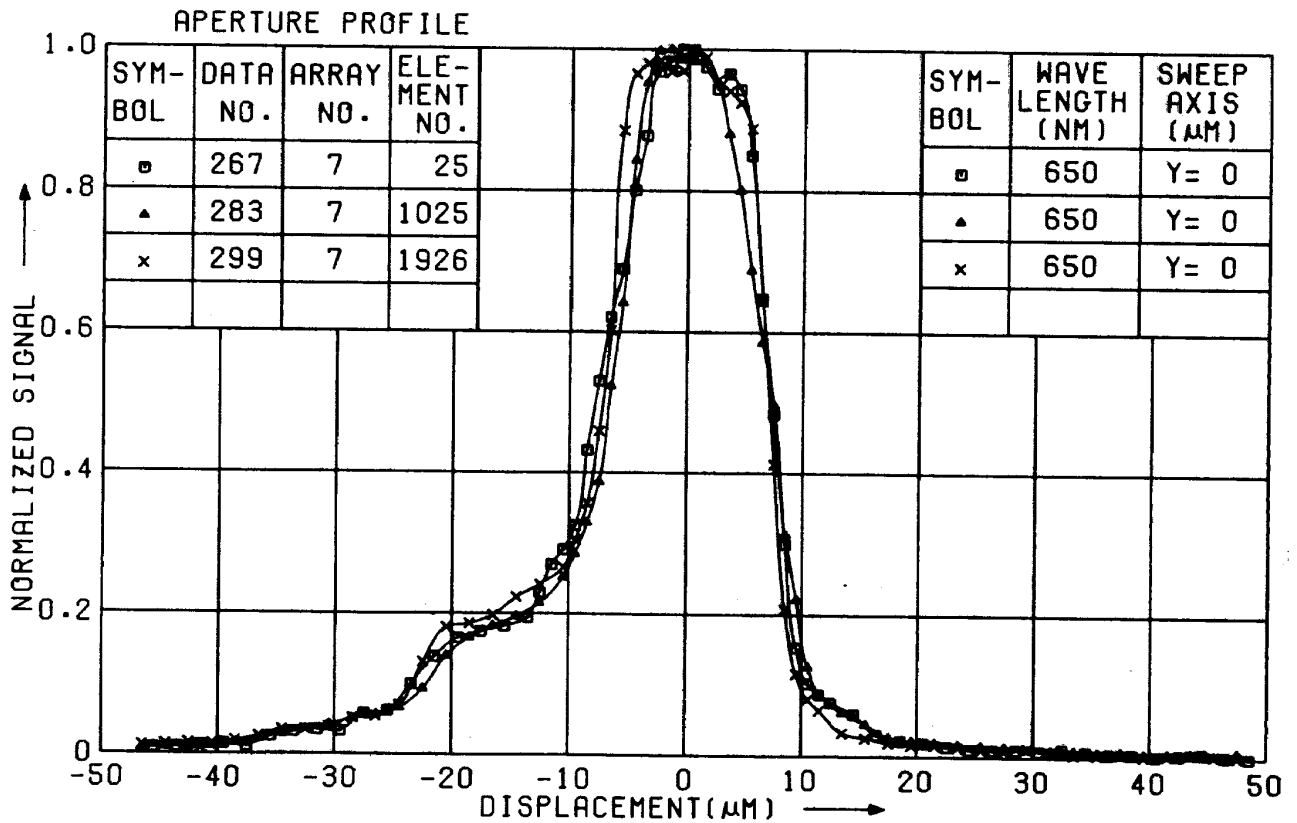
付図 3. 29



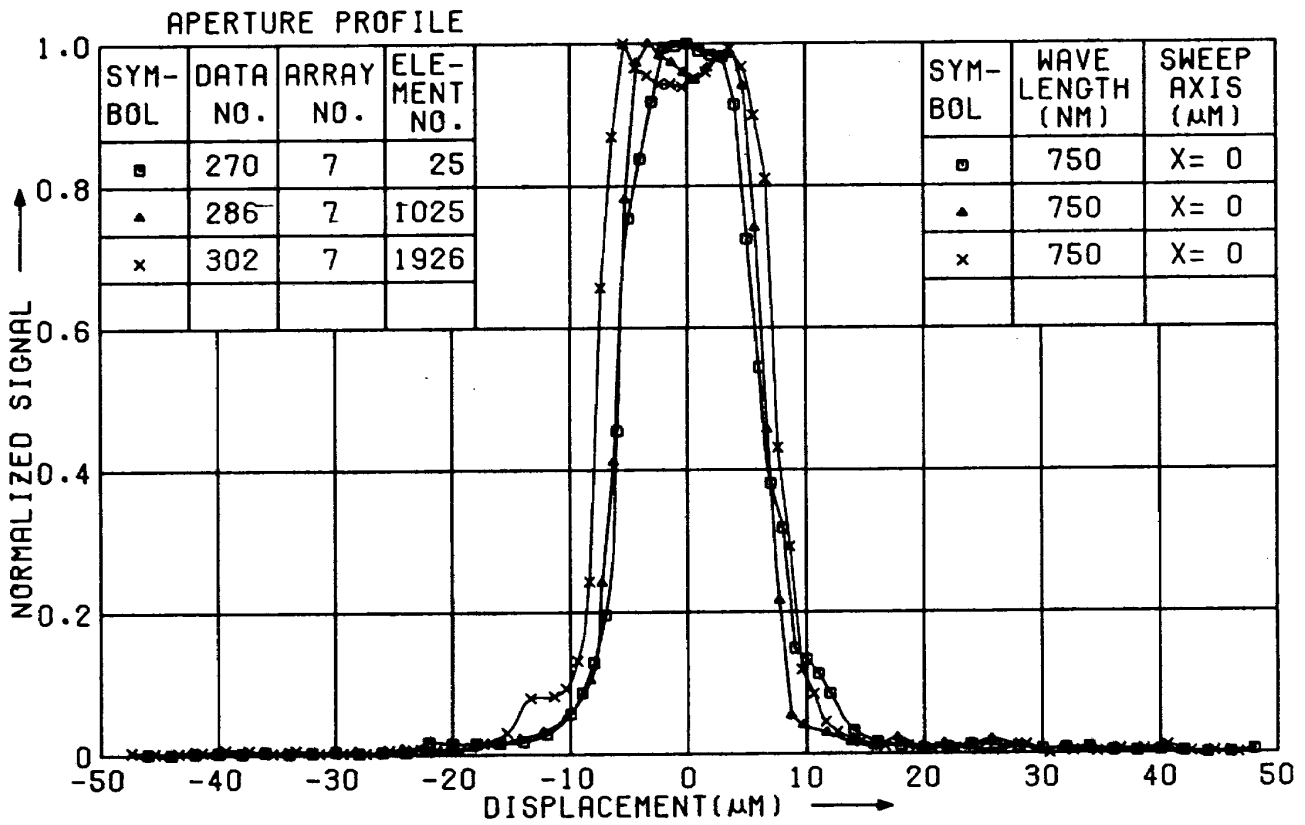
付図 3. 30



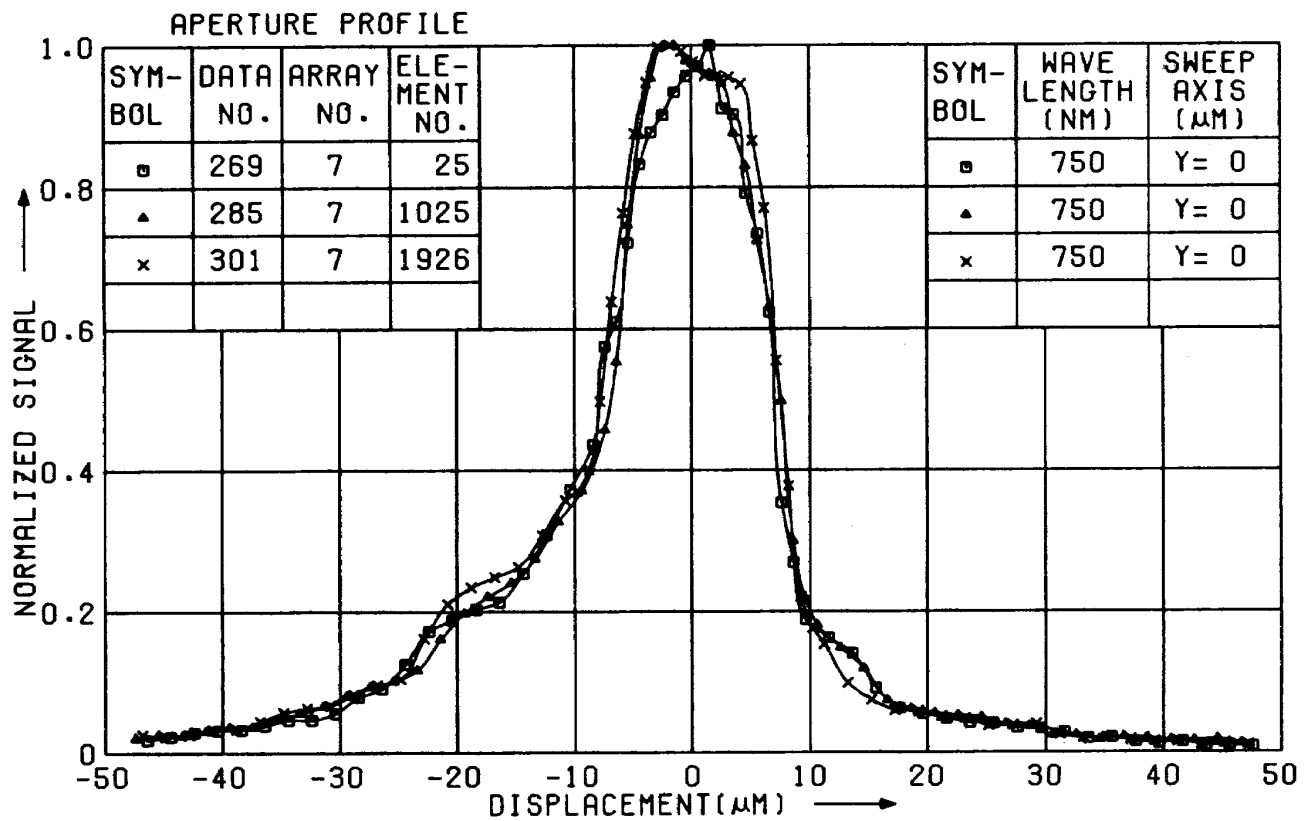
付図 3.31



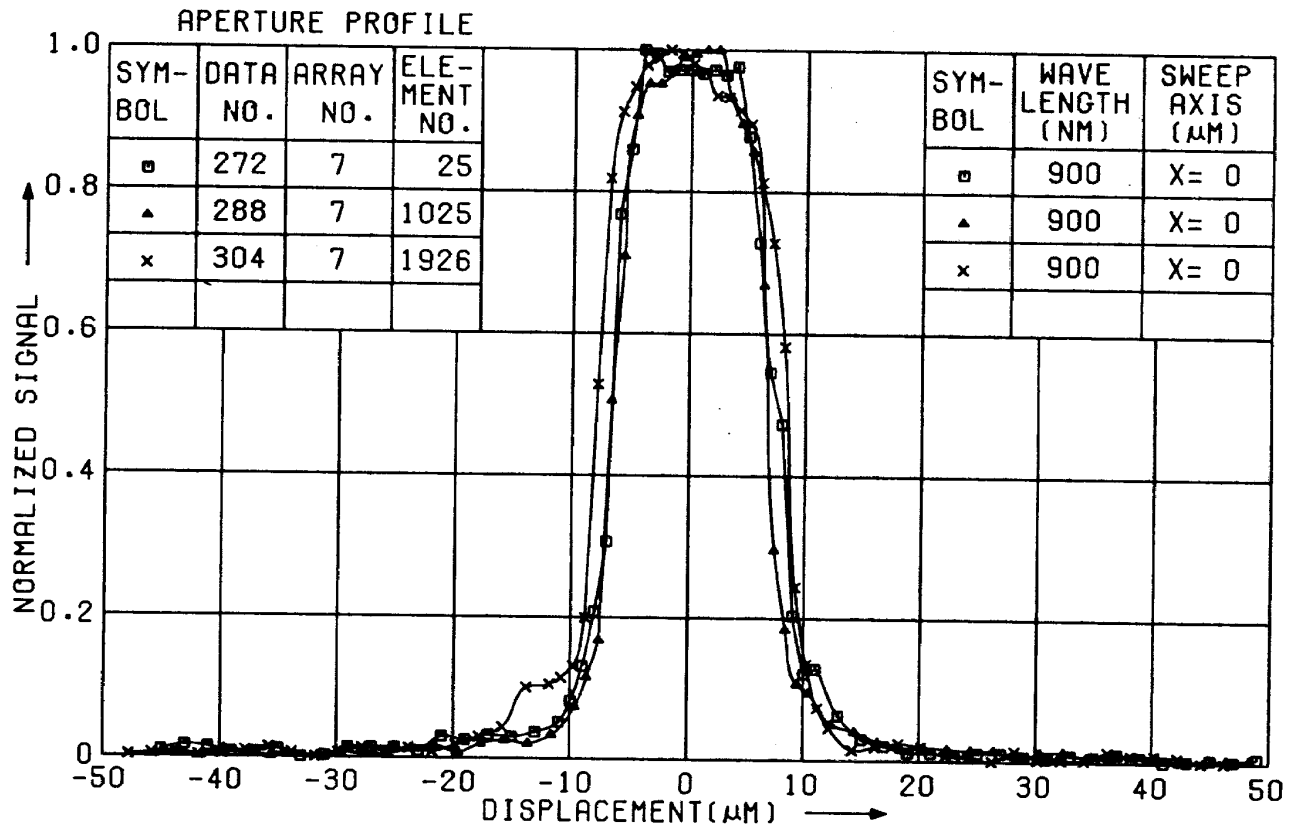
付図 3.32



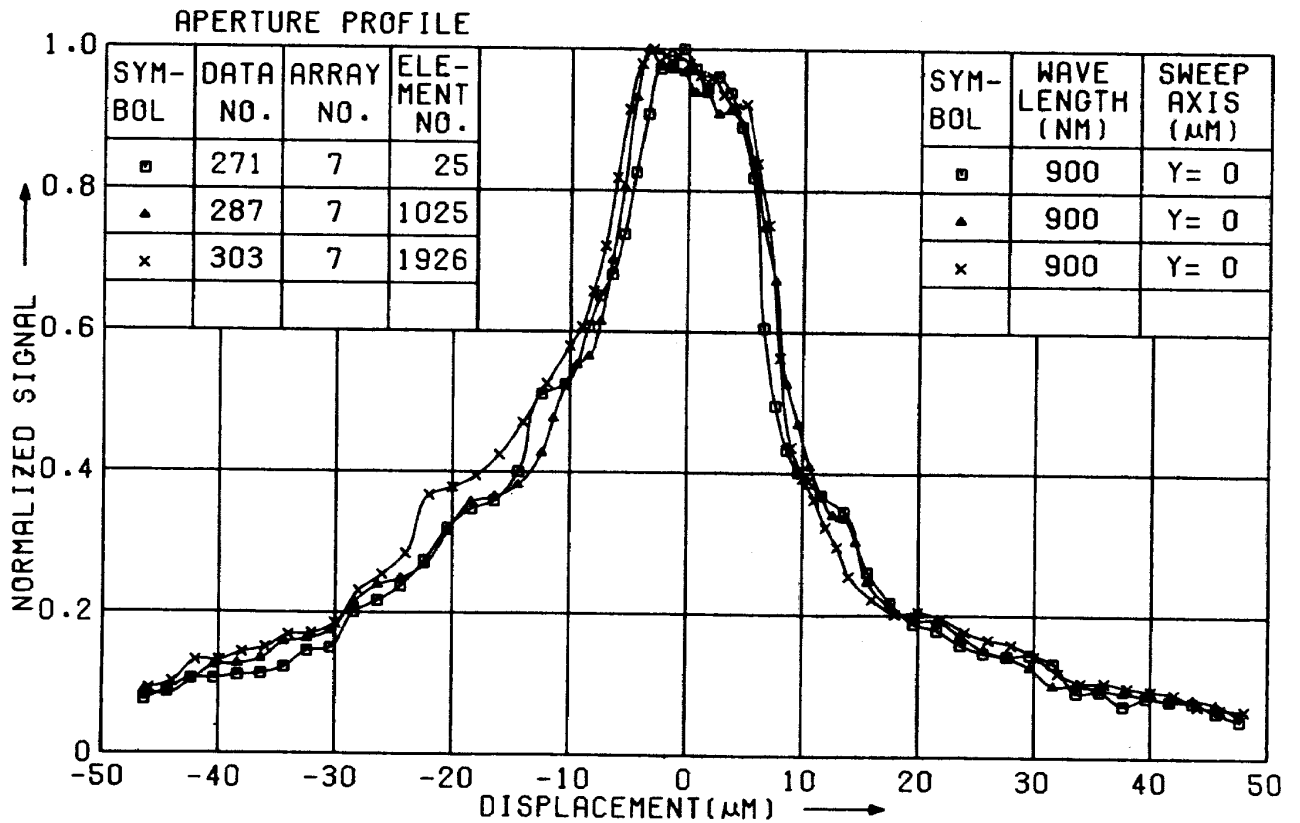
付図 3.33



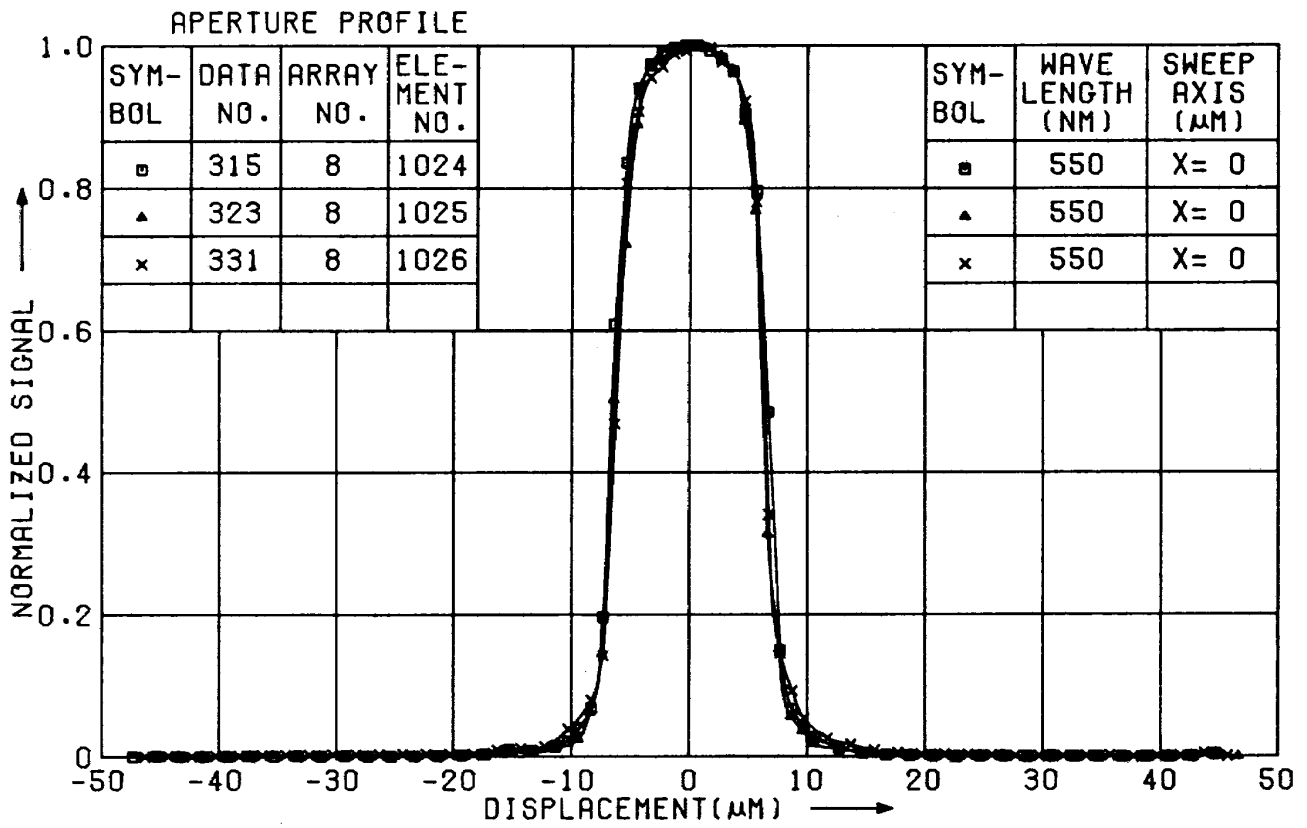
付図 3.34



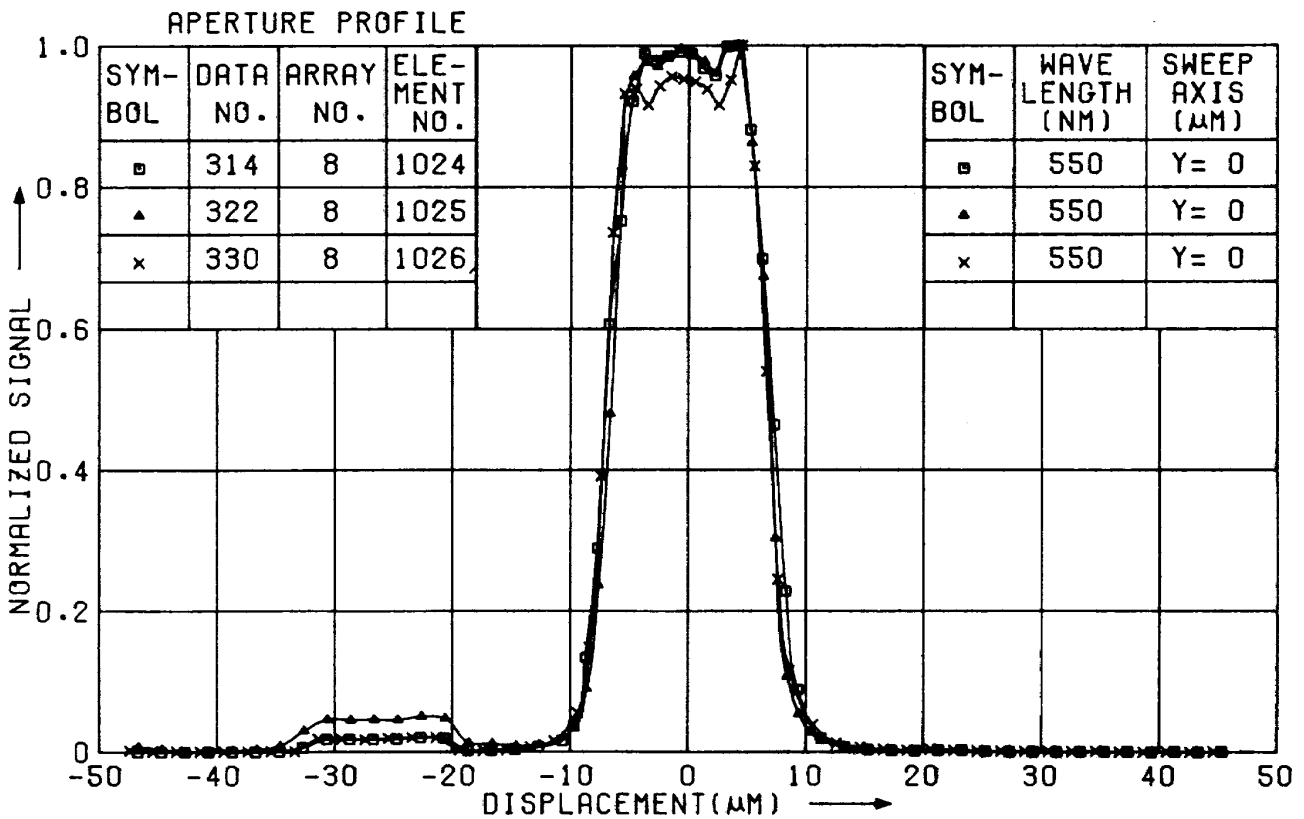
付図 3.35



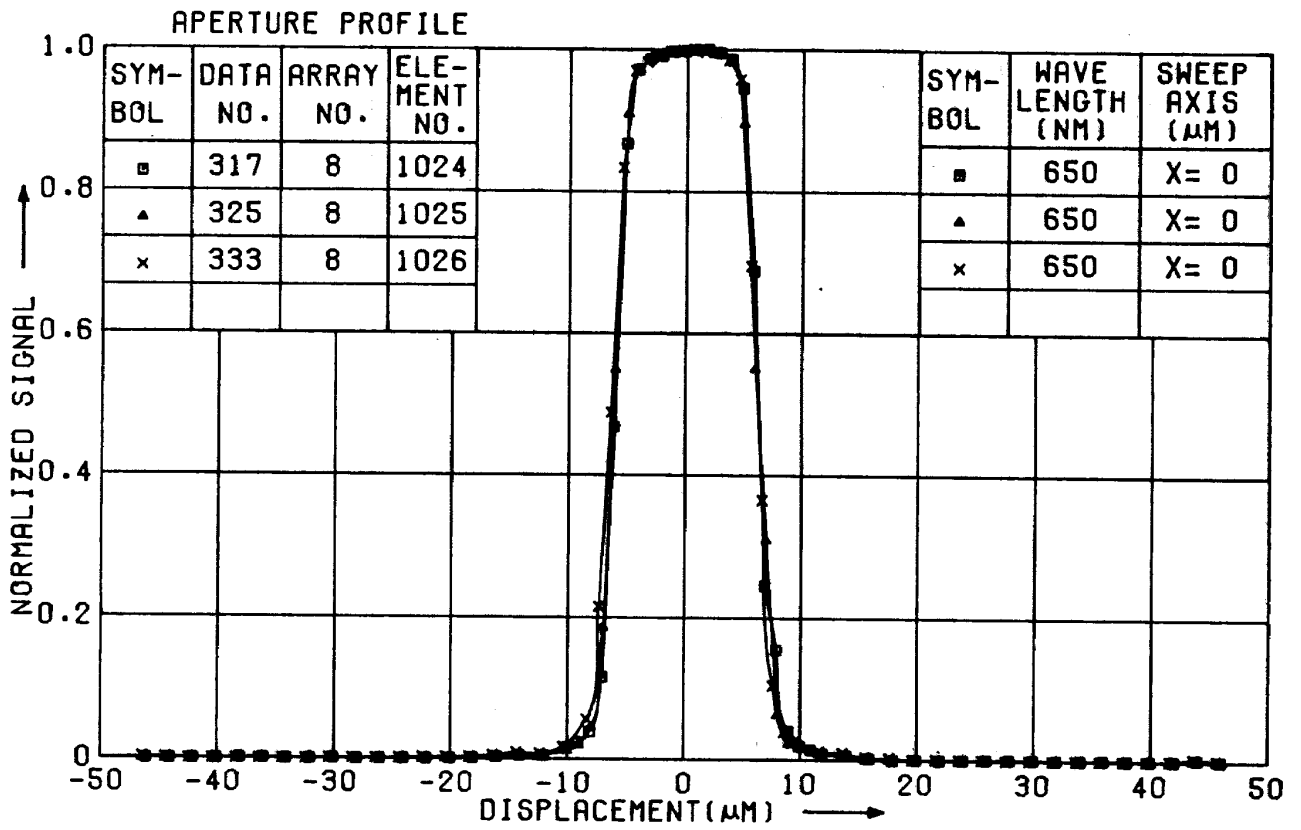
付図 3.36



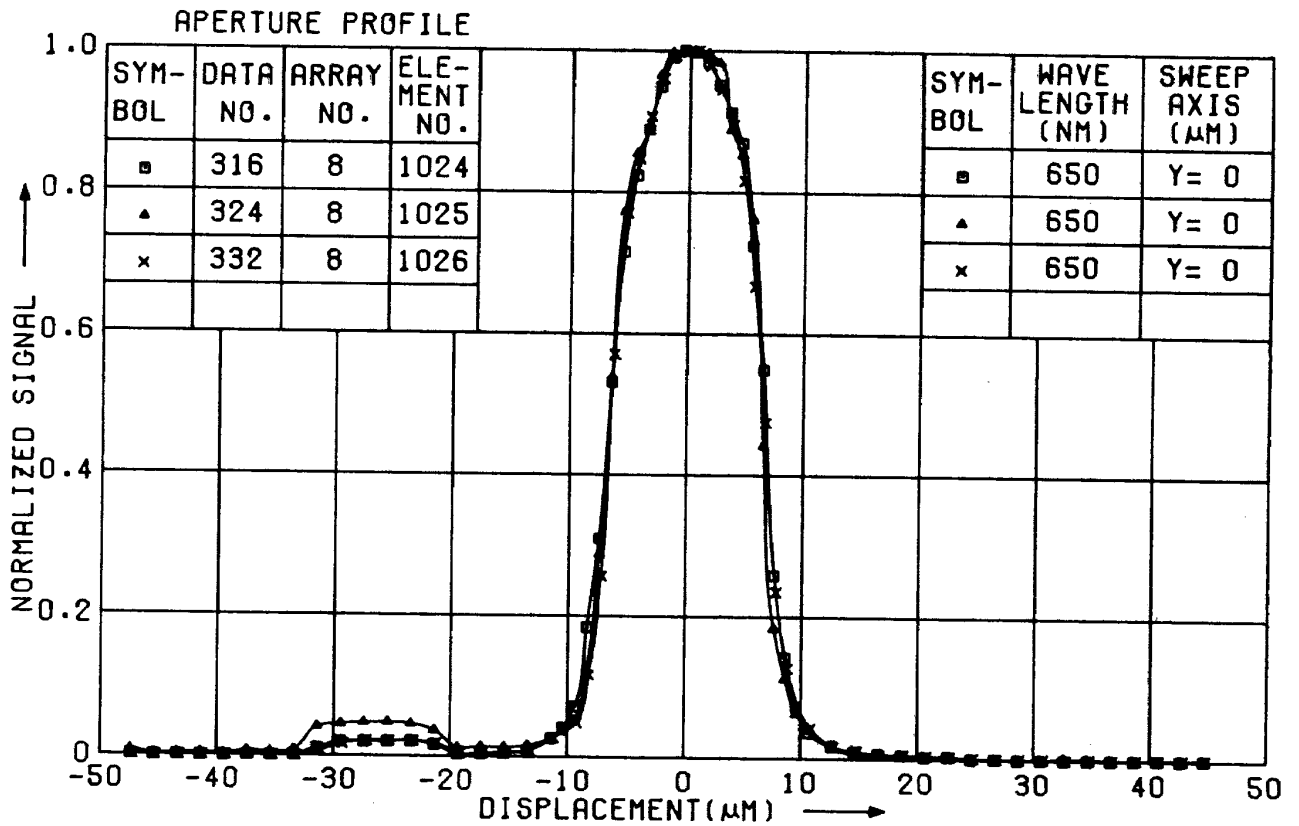
付図 3. 37



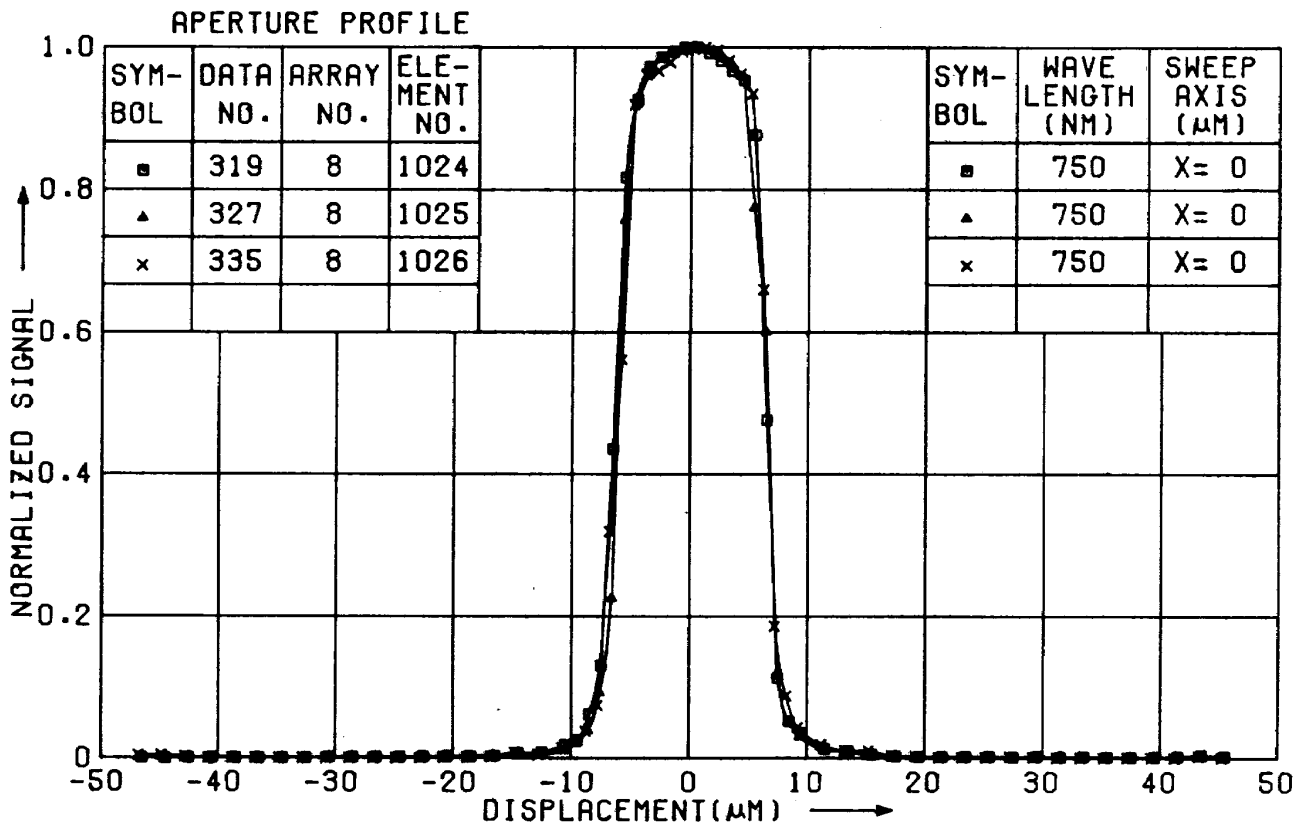
付図 3. 38



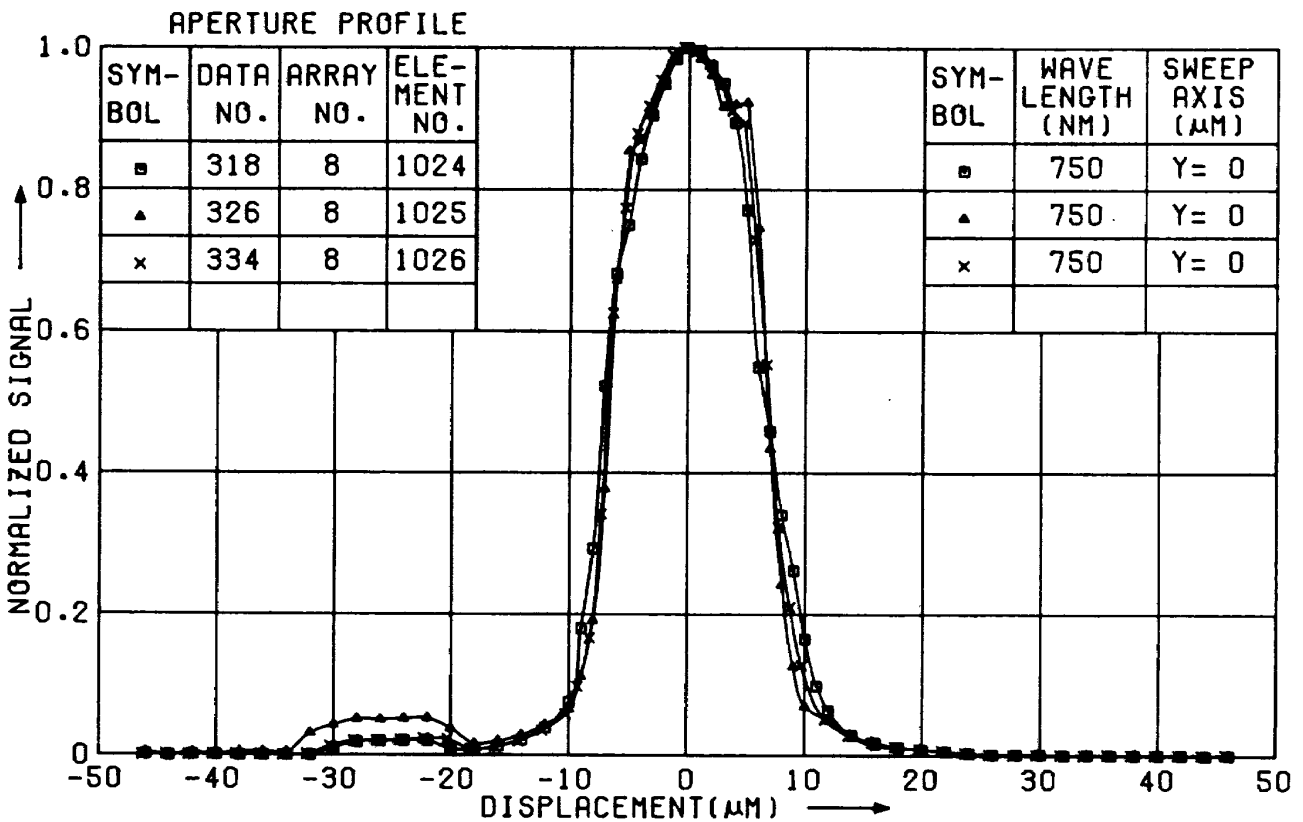
付図 3. 39



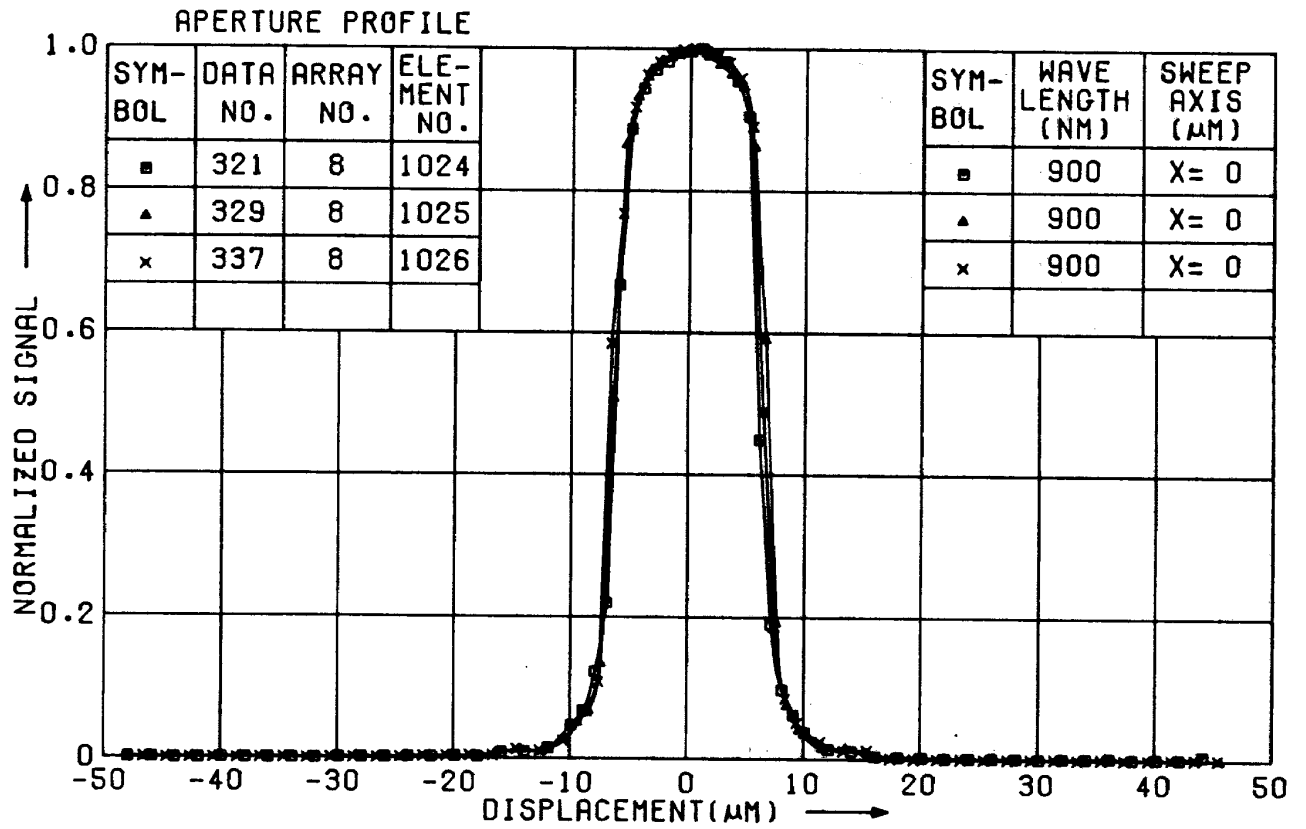
付図 3. 40



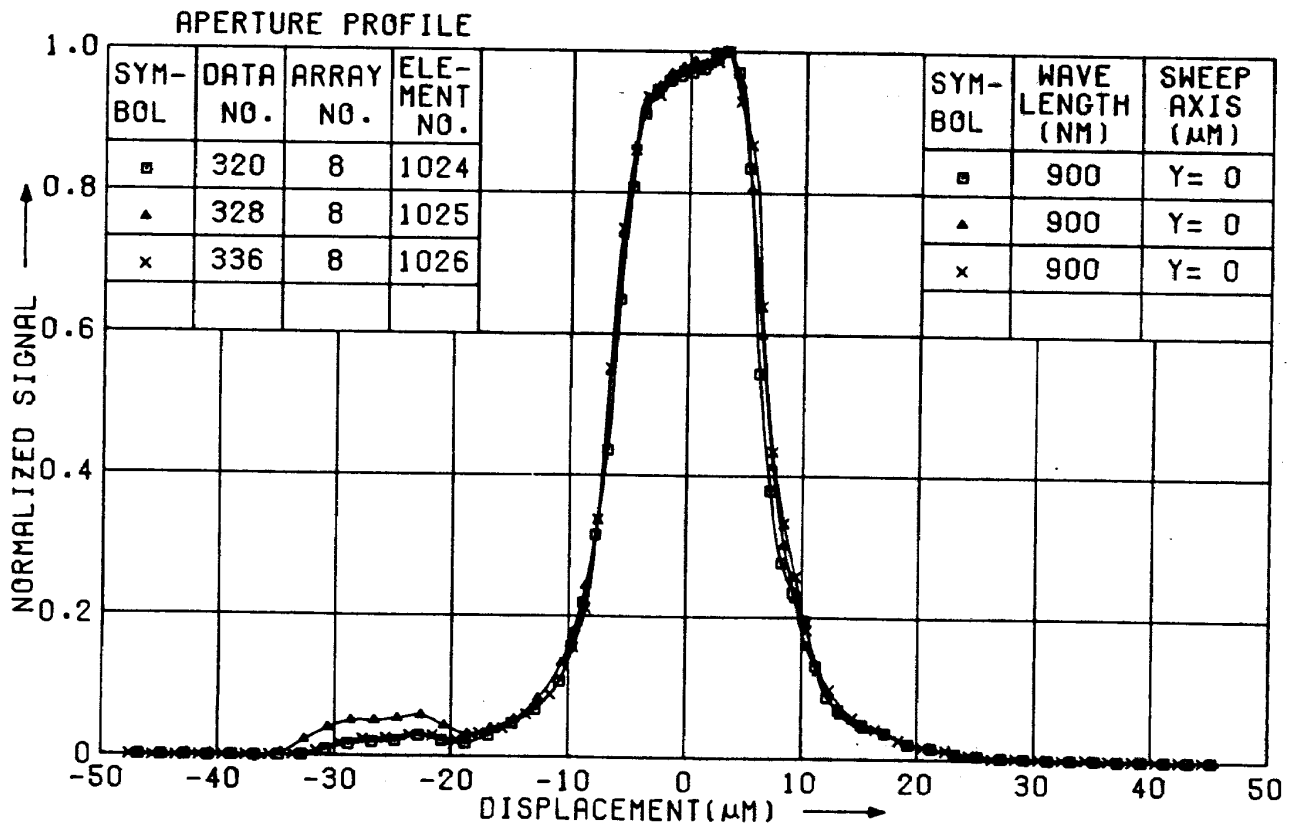
付図 3.41



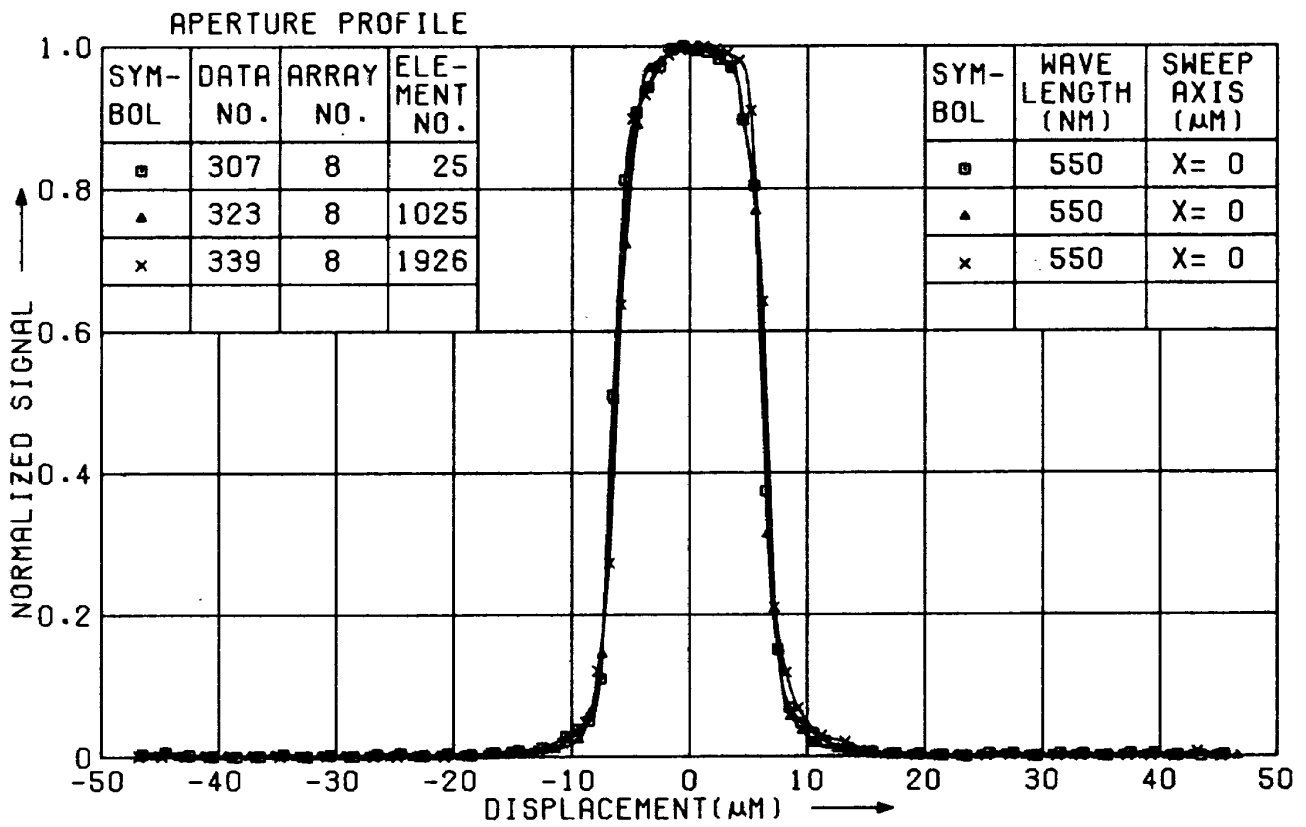
付図 3.42



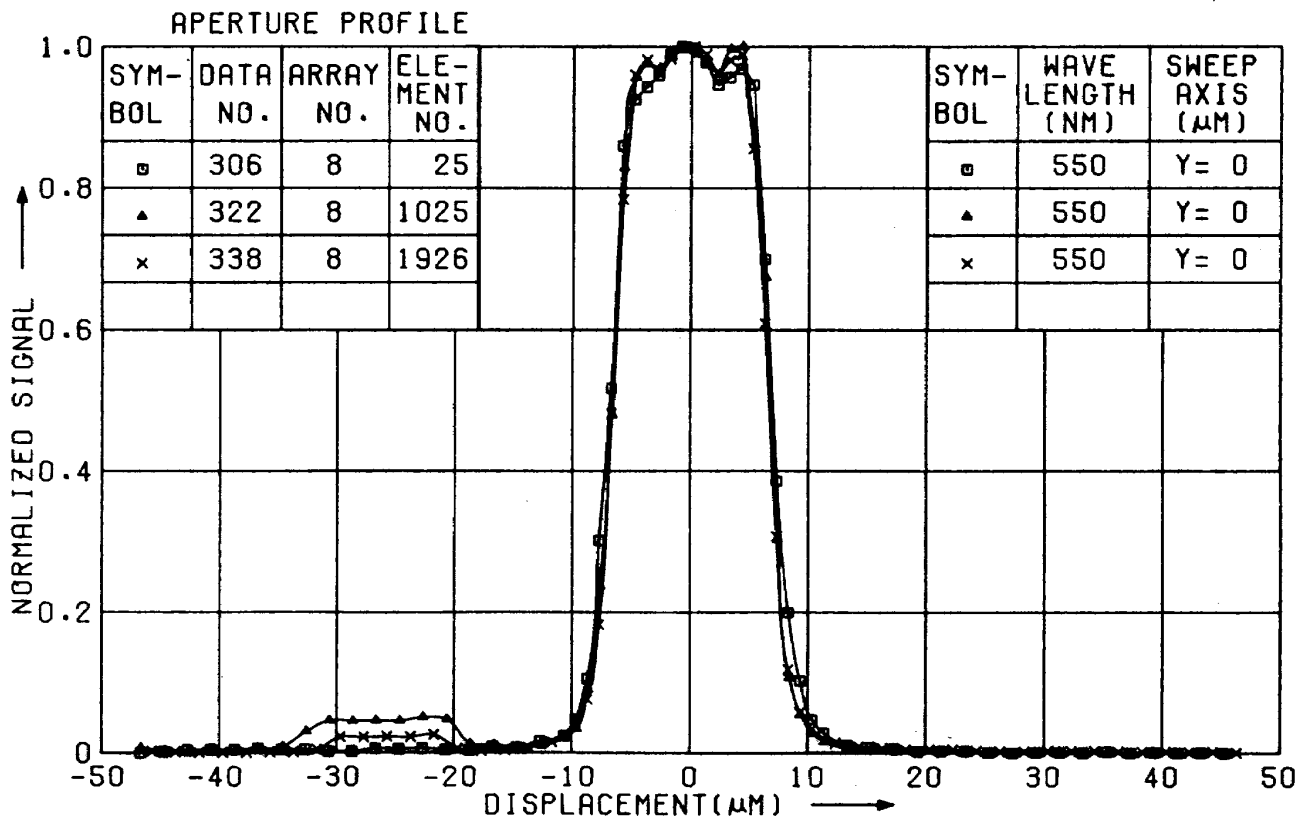
付図 3. 43



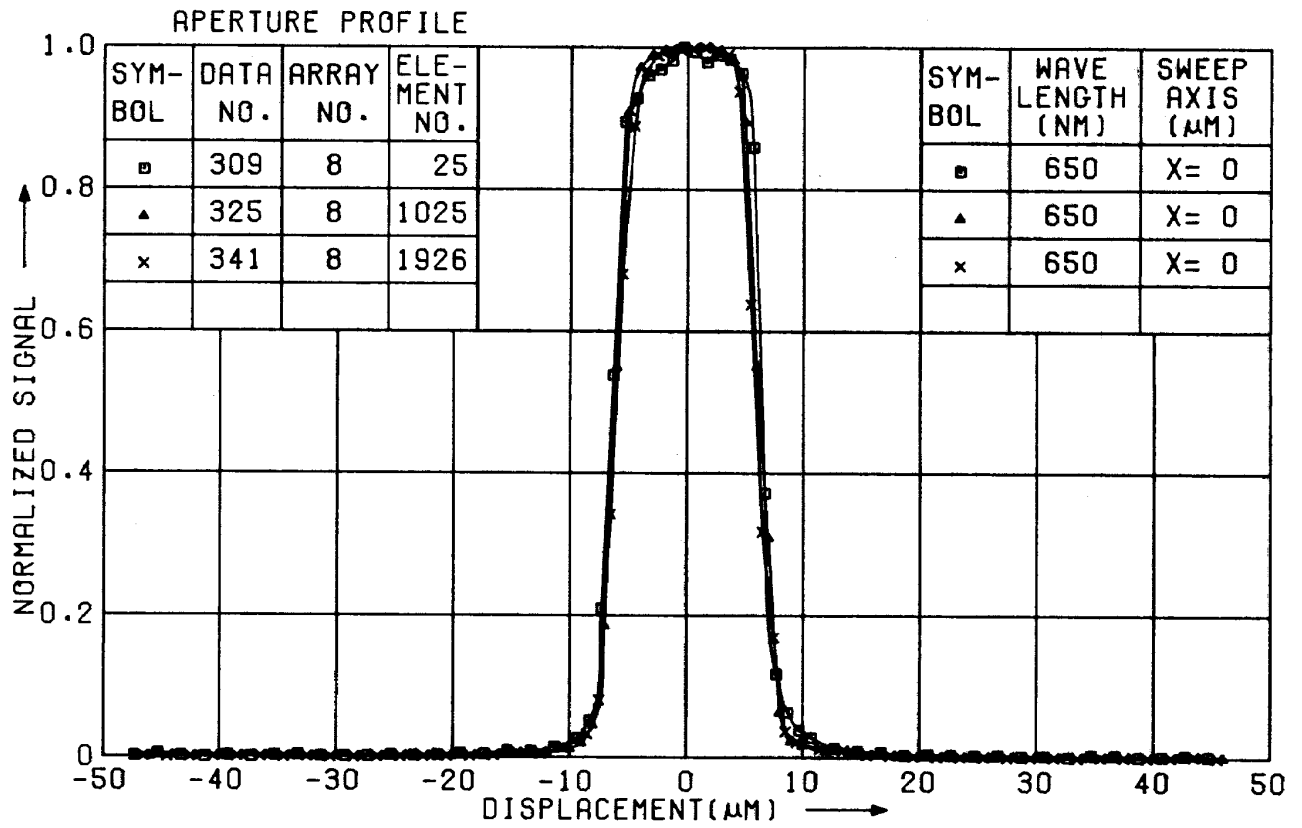
付図 3. 44



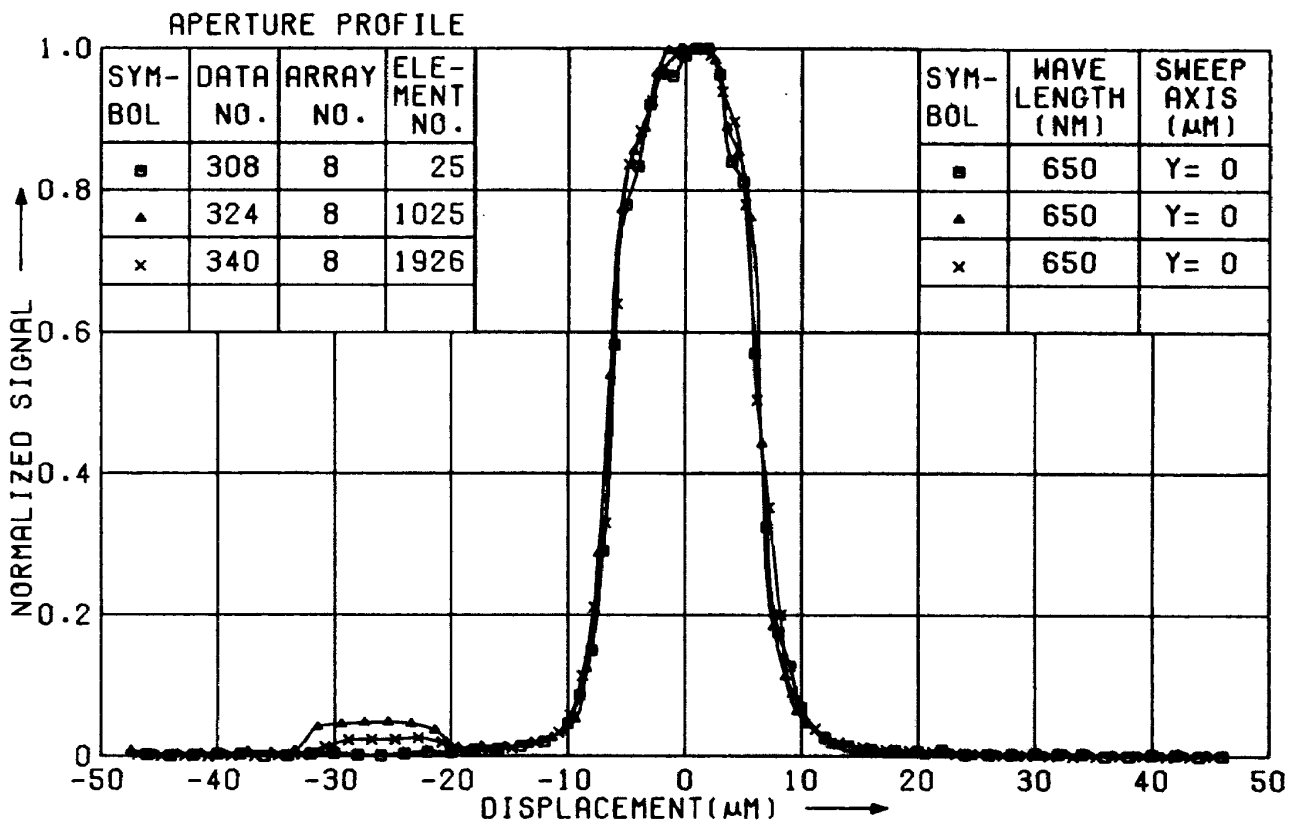
付図 3. 45



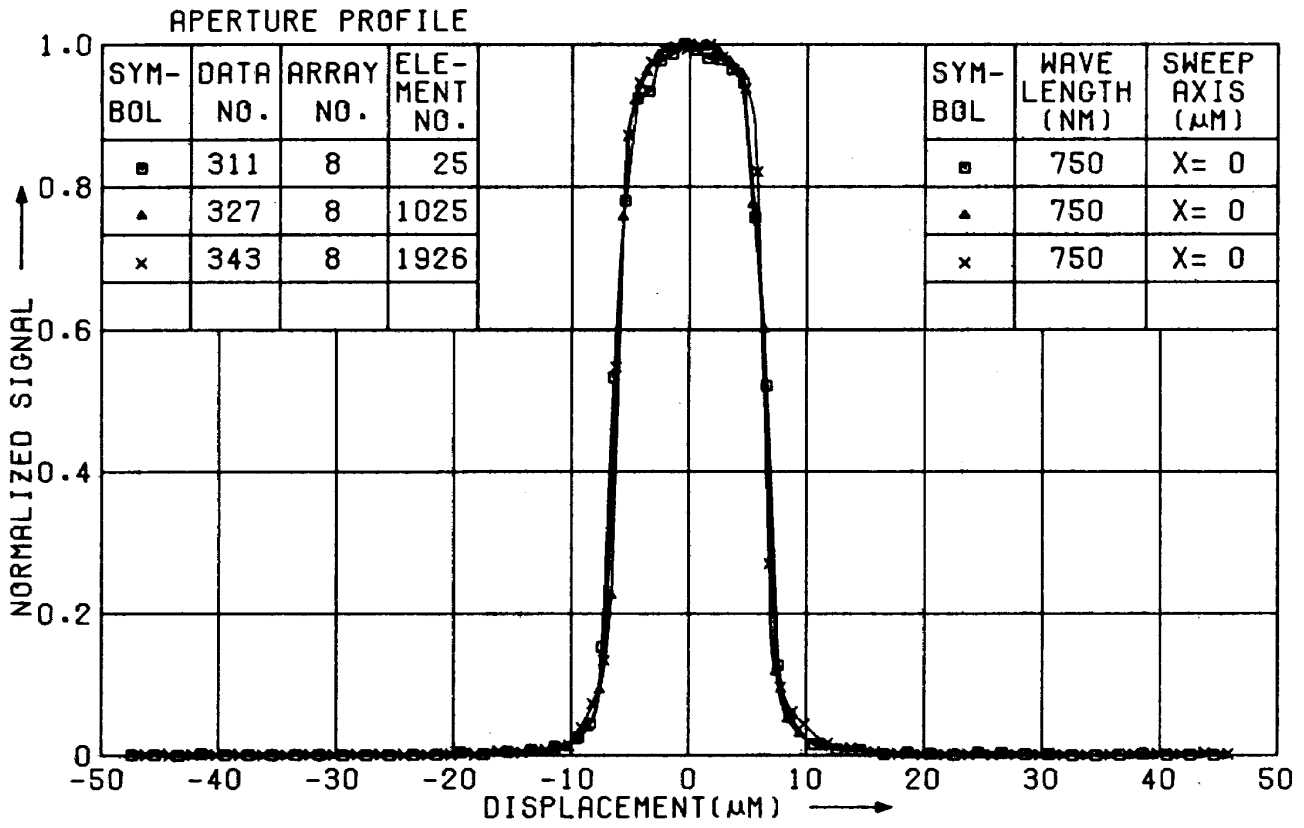
付図 3. 46



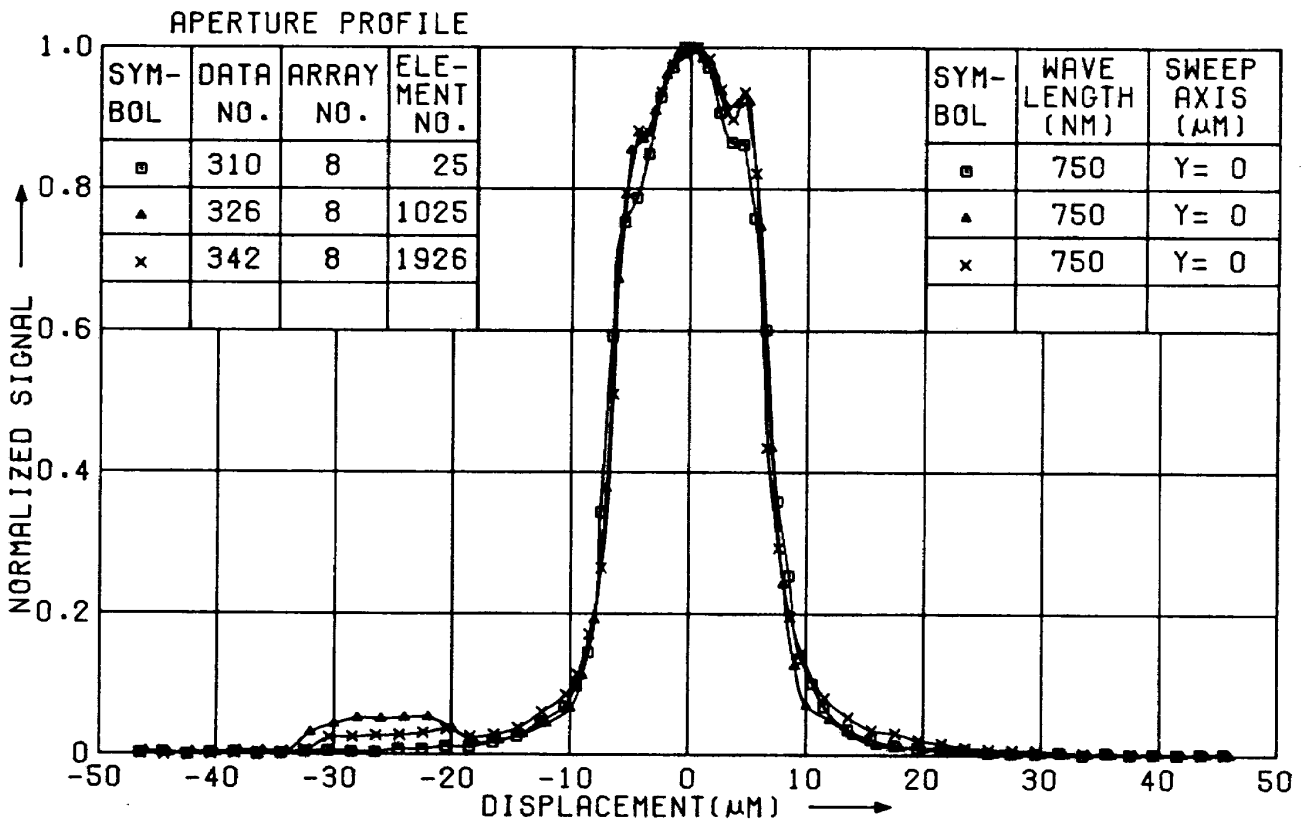
付図 3.47



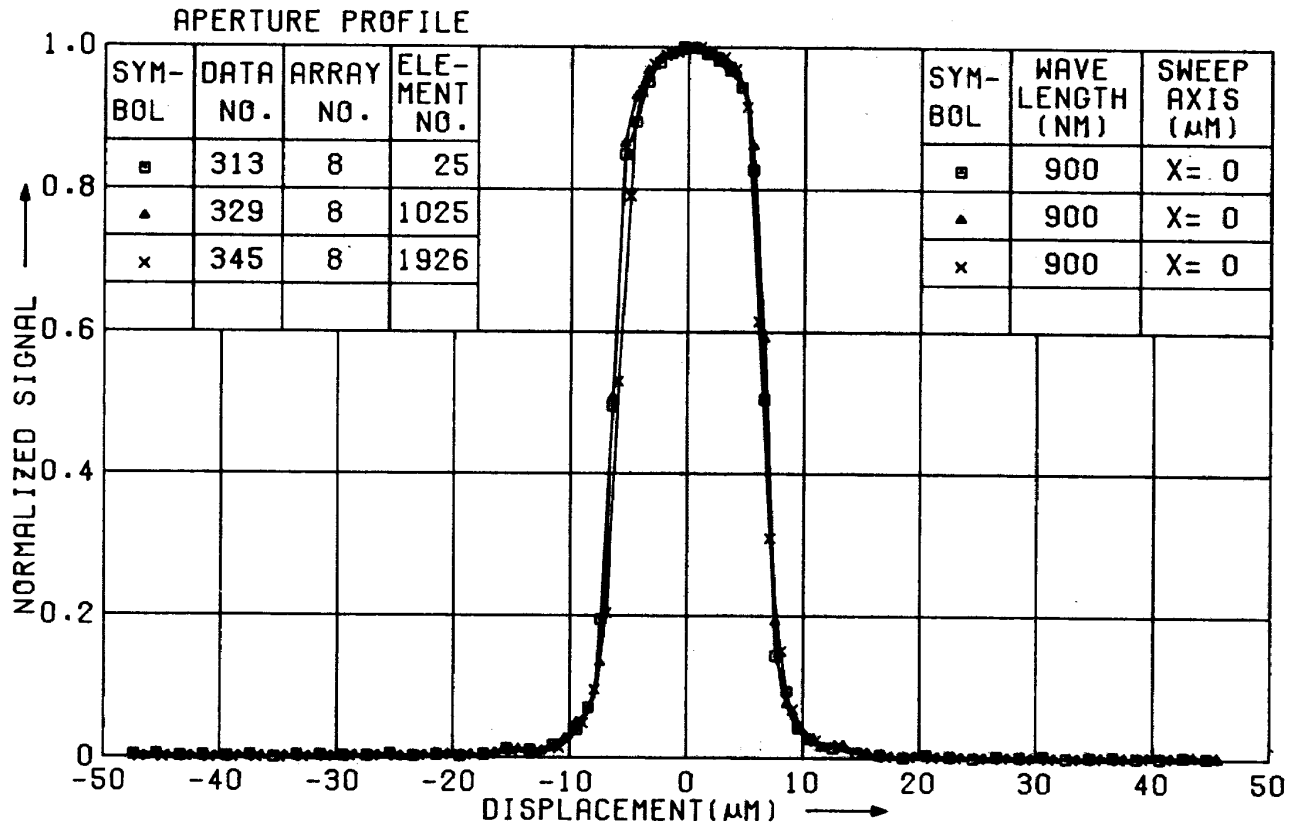
付図 3.48



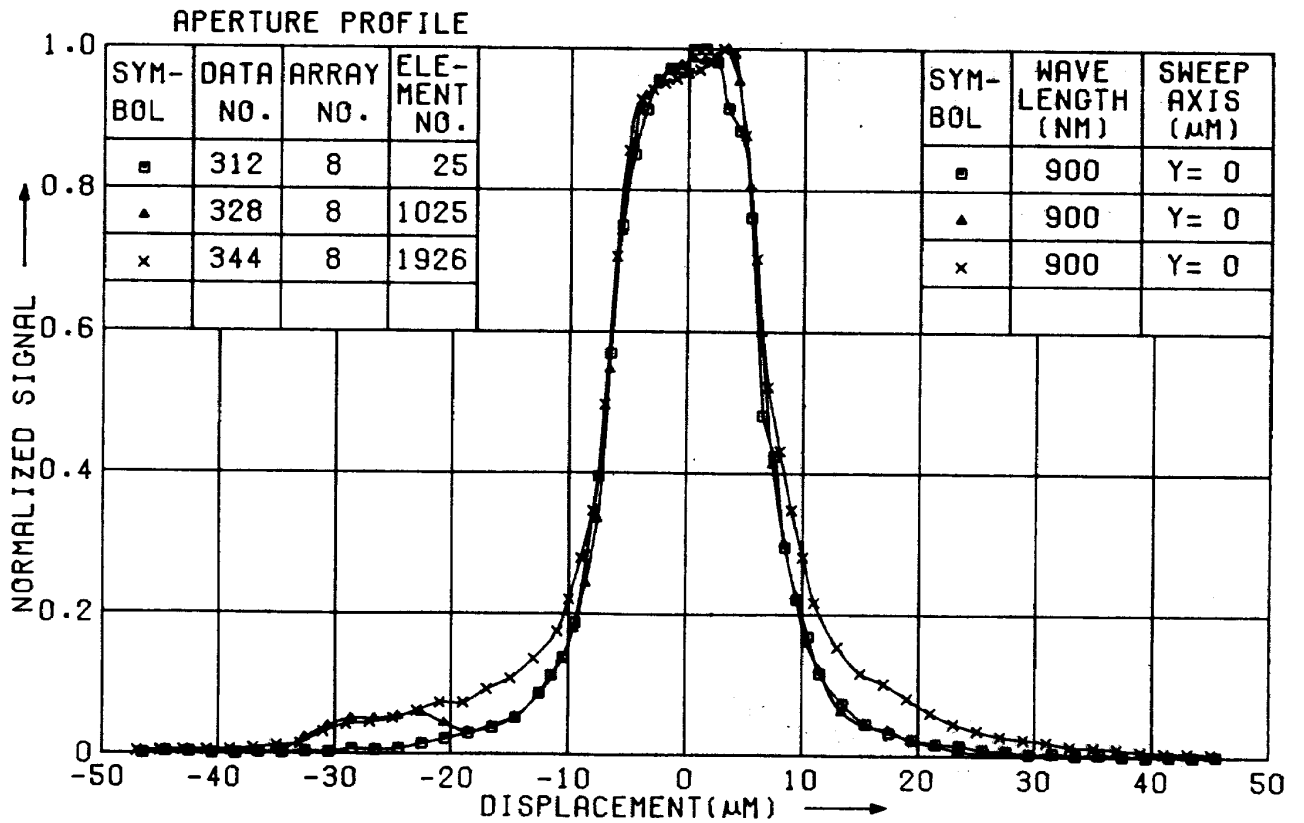
付図 3. 49



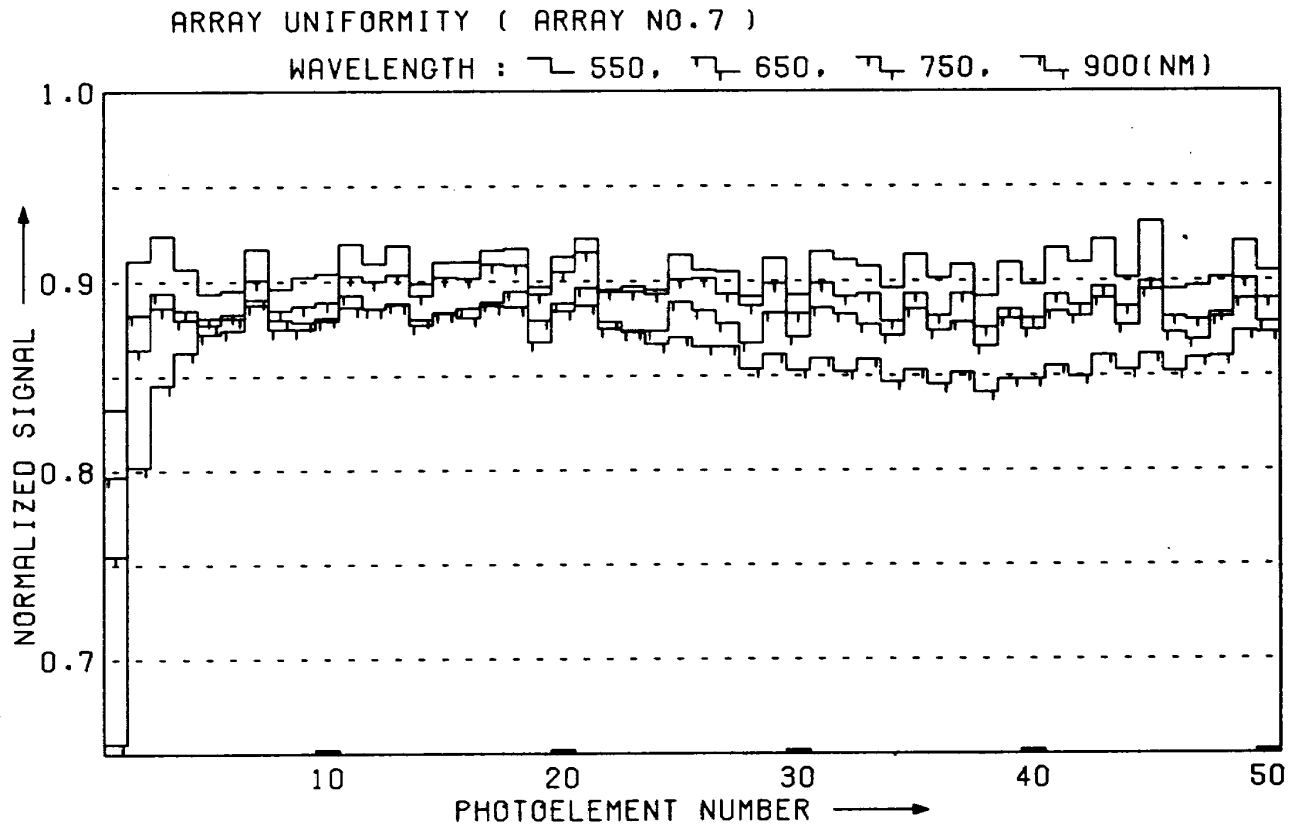
付図 3. 50



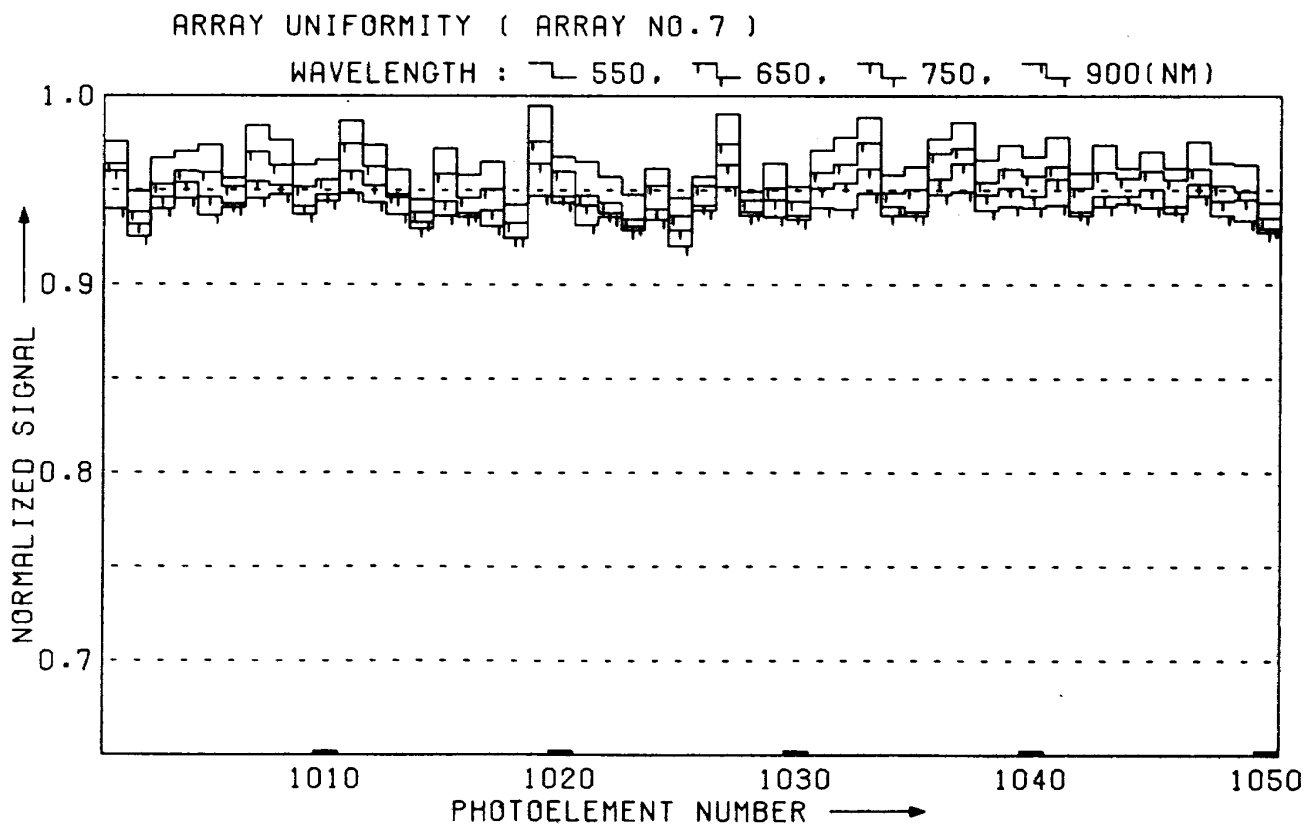
付図 3. 51



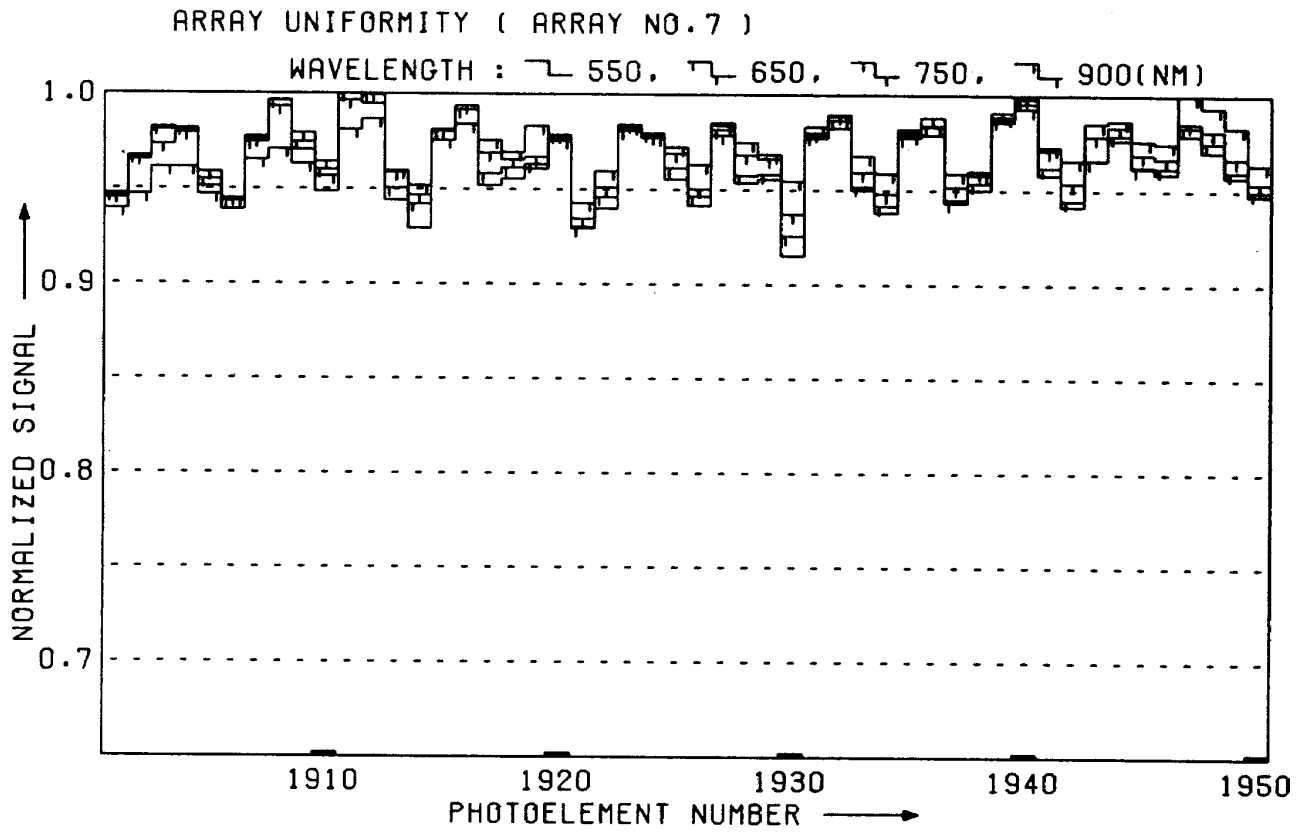
付図 3. 52



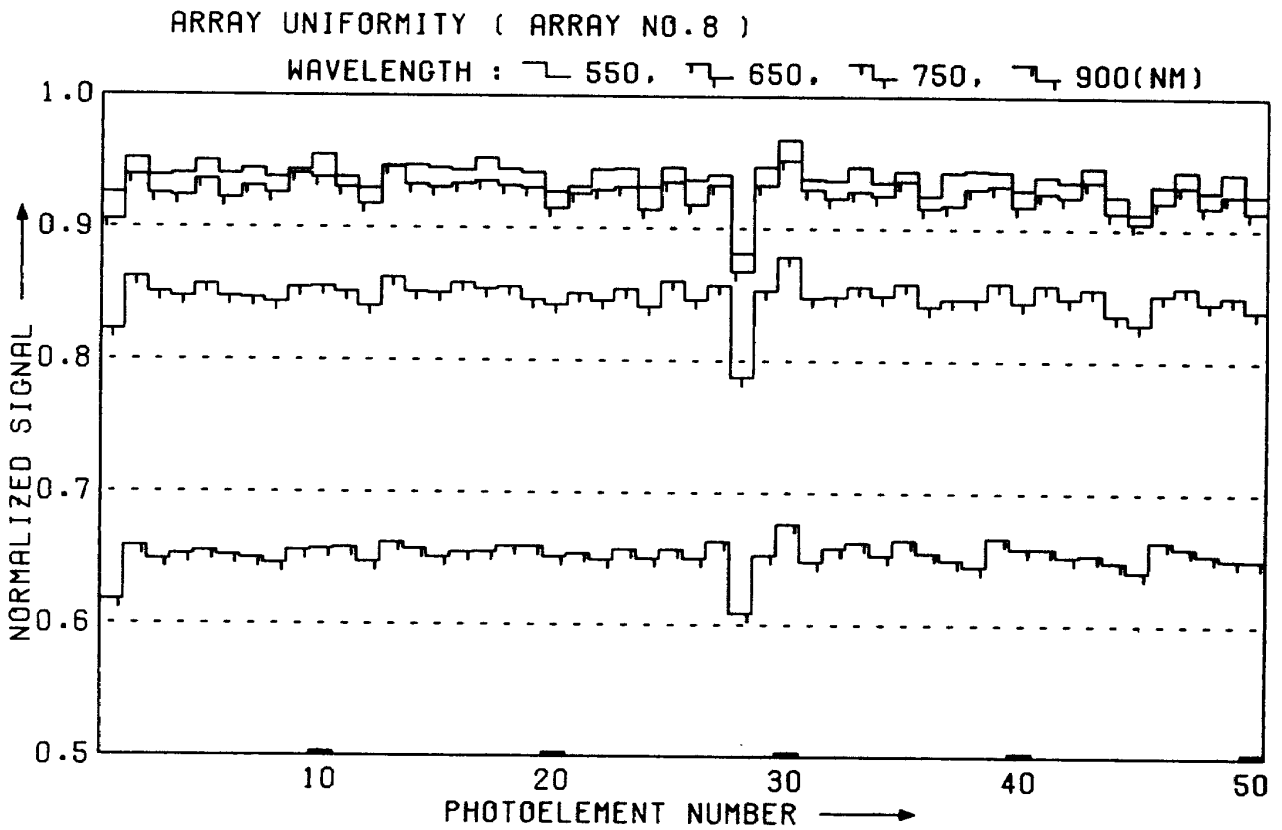
付図 4.1



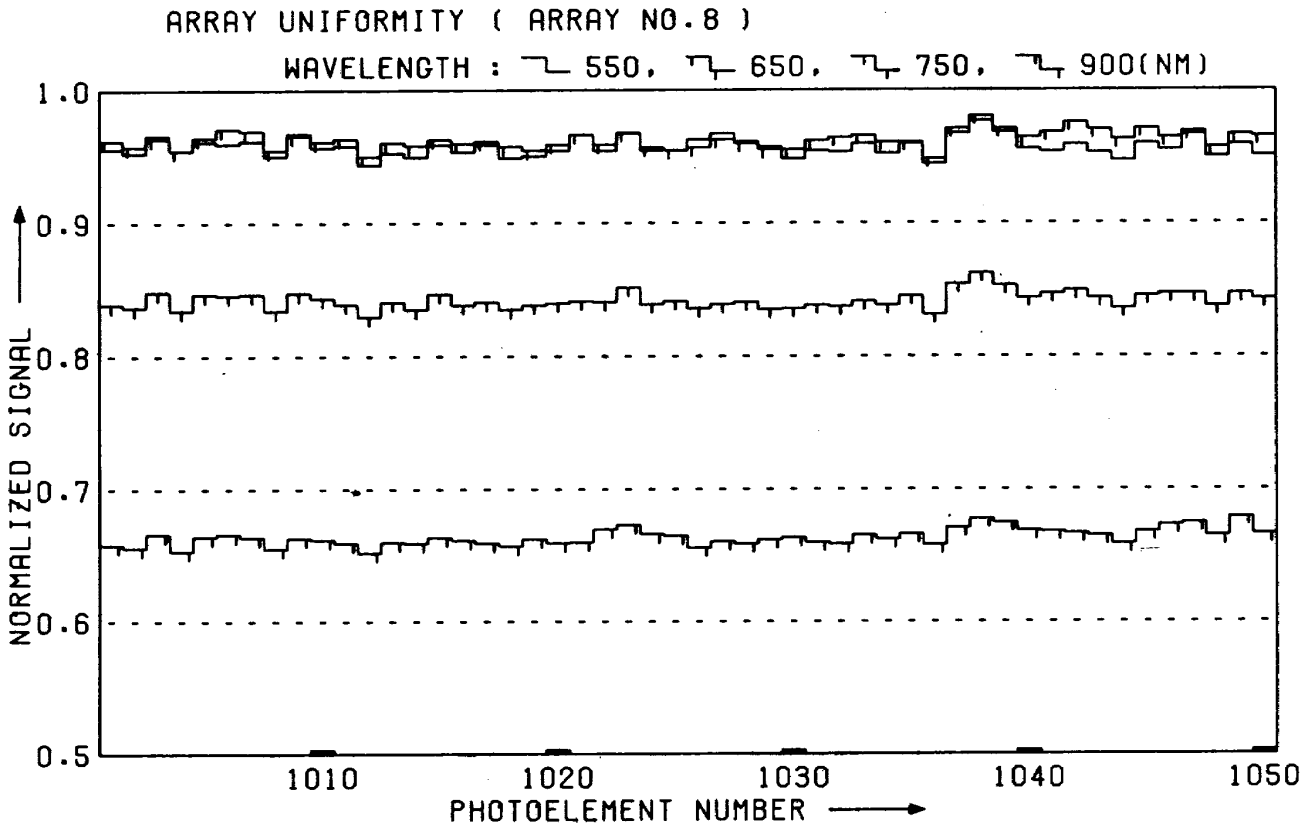
付図 4.2



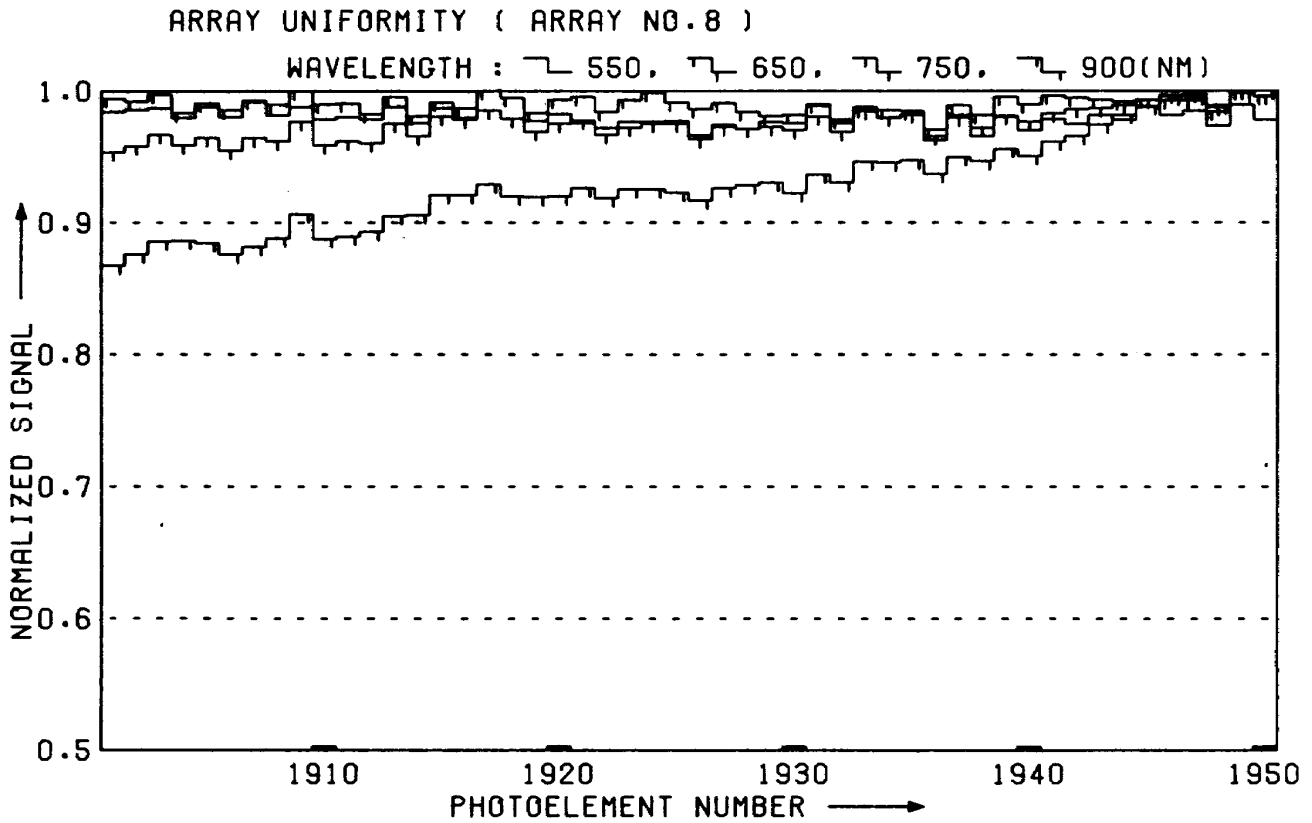
付図 4.3



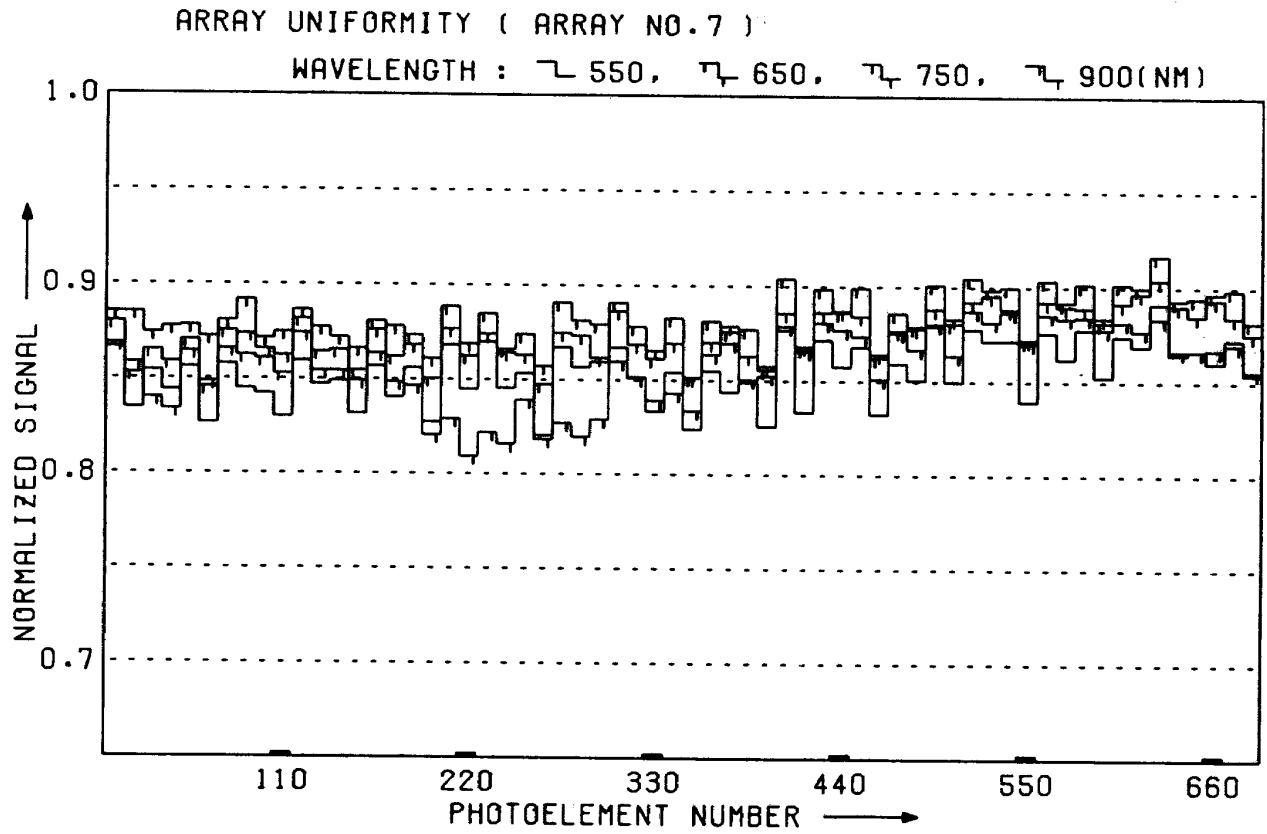
付図 4.4



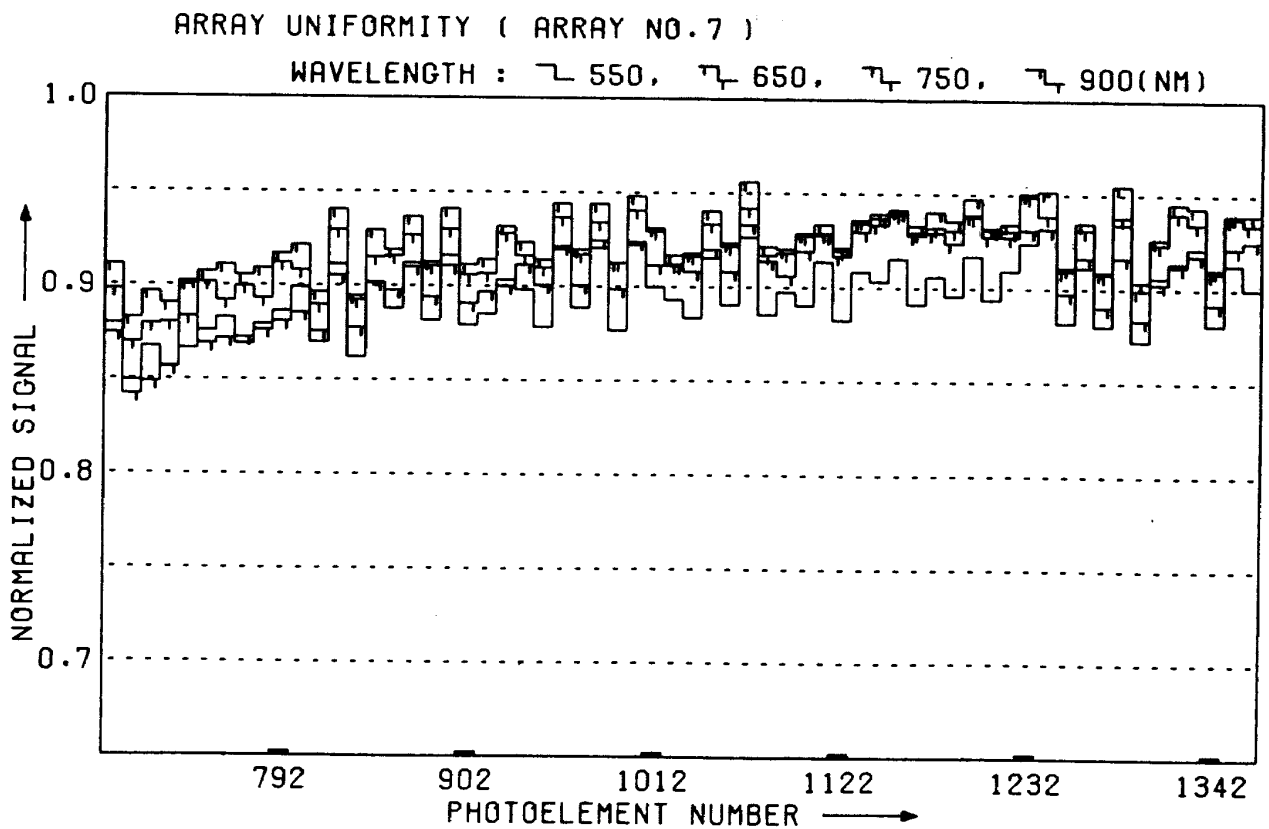
付図 4.5



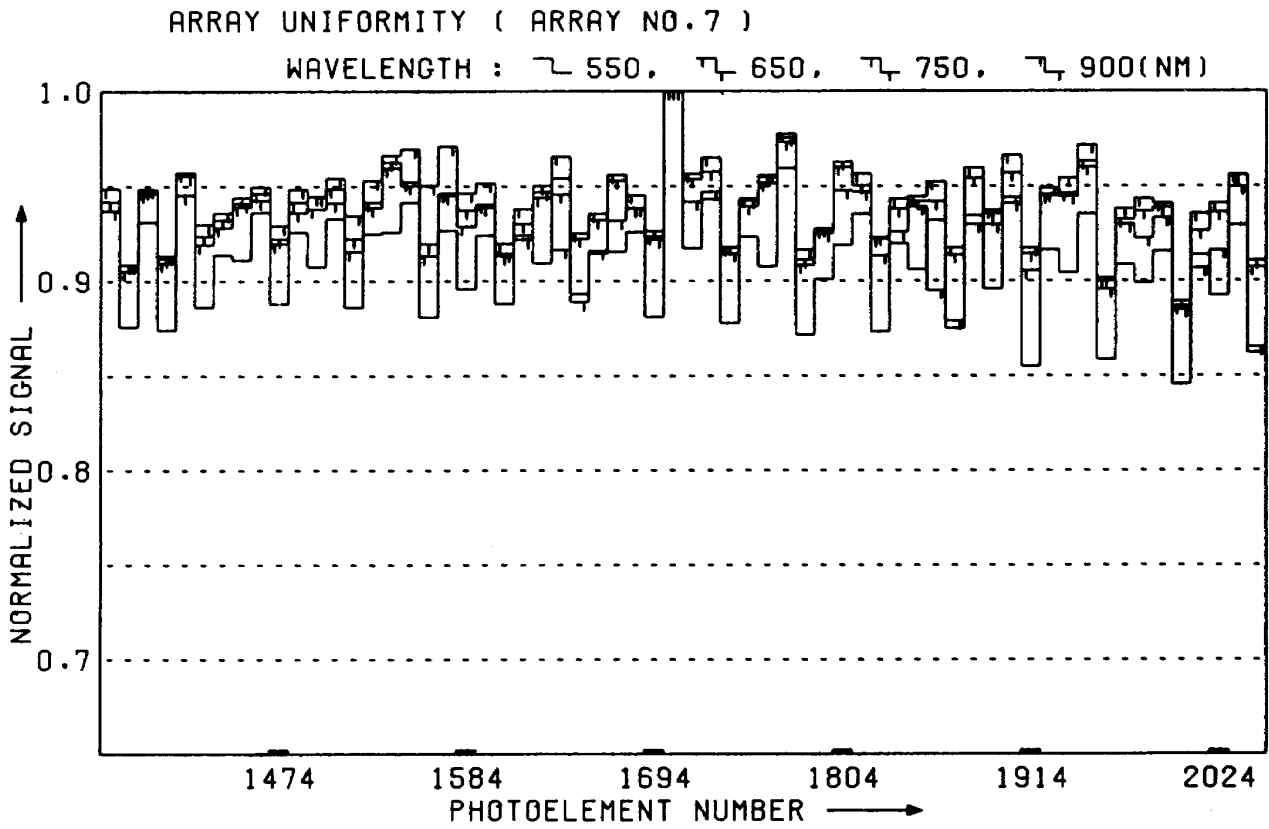
付図 4.6



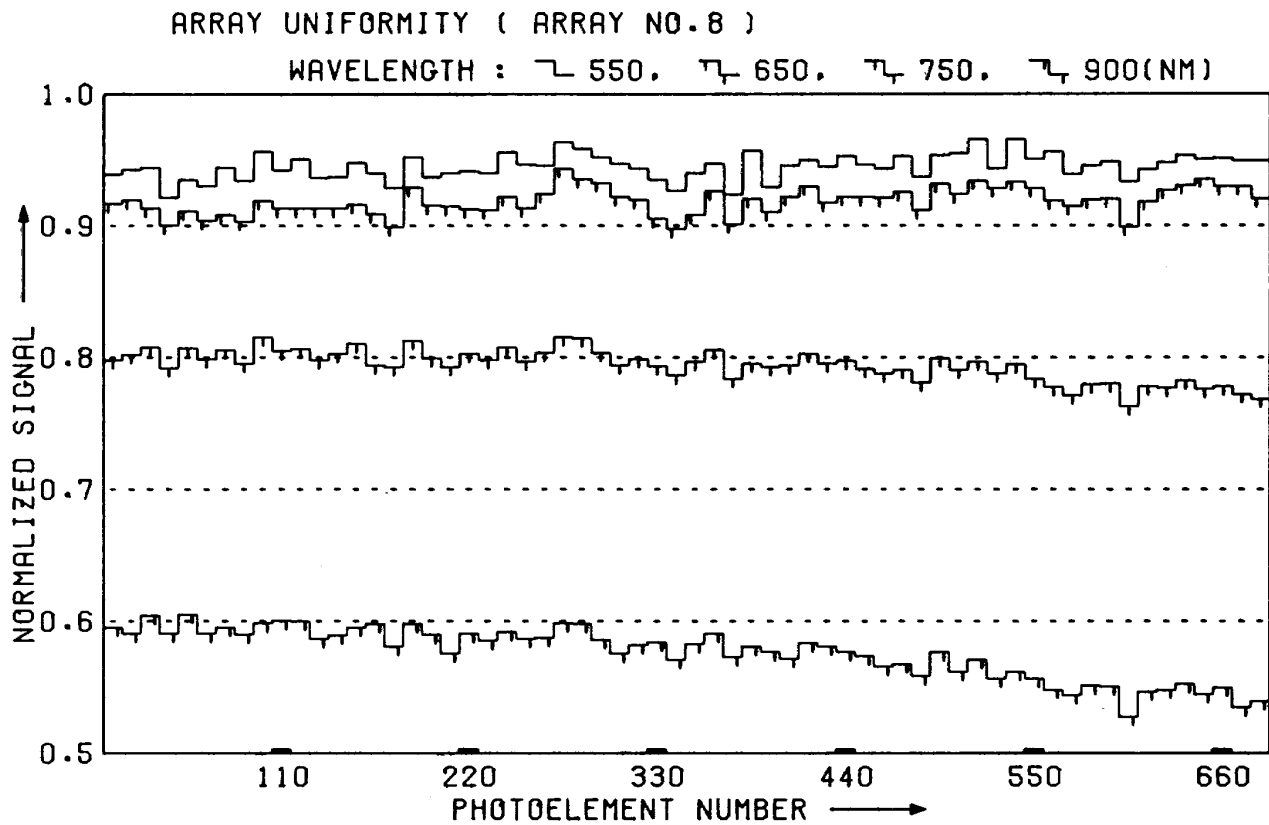
付図 4.7



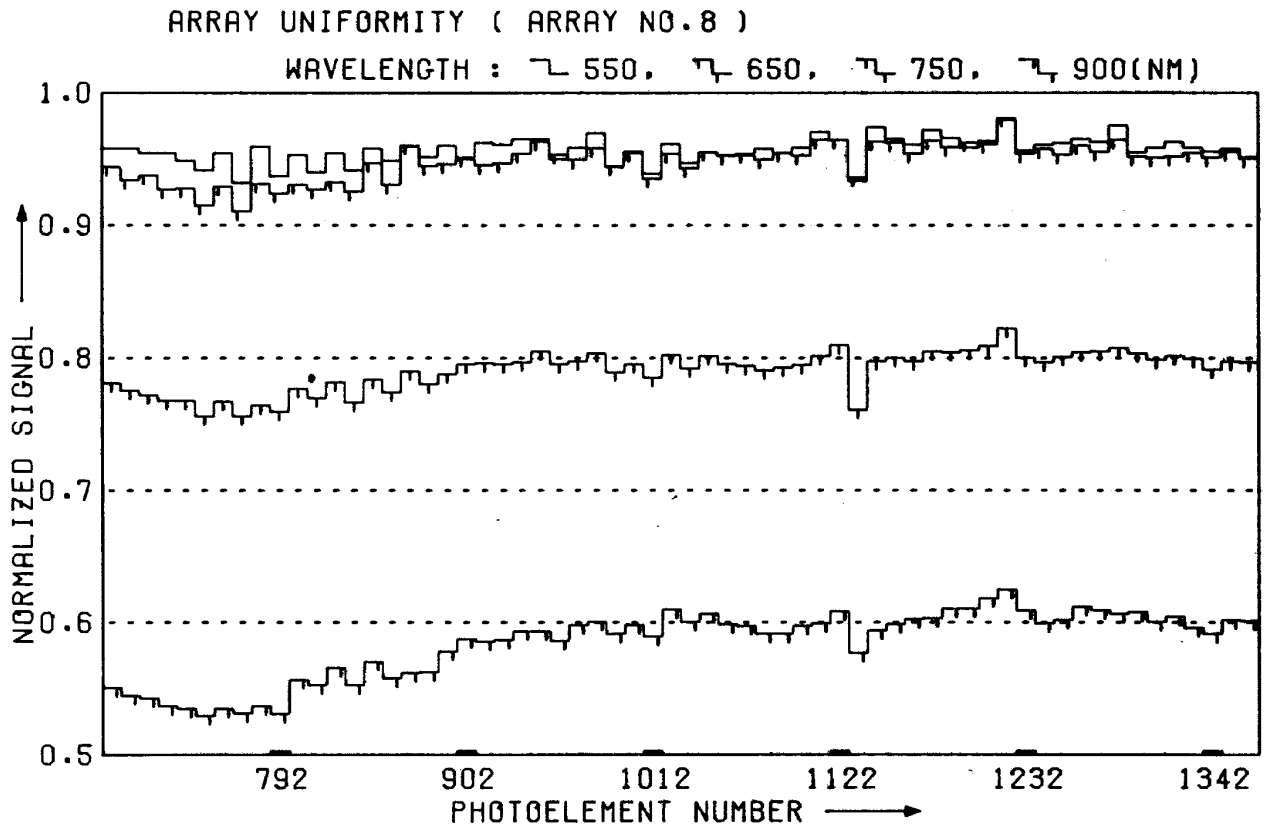
付図 4.8



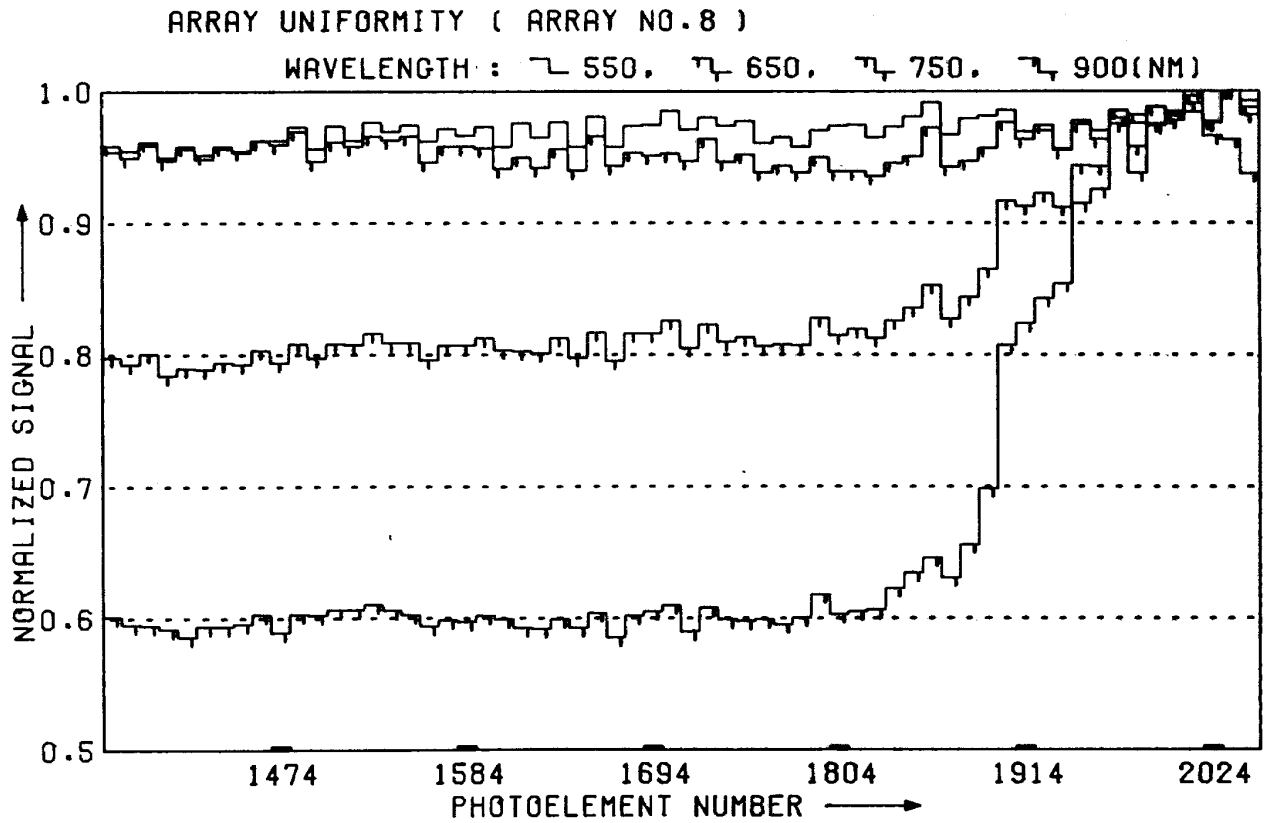
付図 4.9



付図 4.10



付図 4.11



付図 4.12

参 考 文 献

- 1) 桜井, 木村, 奥石, 倉益; 可視近赤外放射計用
CCD イメージセンサの評価試験, 航技研資料
TM- 398 (1979/11)
- 2) NASA-CR-132833 ; Solid State High
Resolution Multi-Spectral Imager CCD
Test Phase , 1973

航空宇宙技術研究所資料438号

昭和56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5-6-17
