

# 形状モデルによる静電偏向電極の性能の評価と改善

出澤 正徳, 相馬 嵩 (理研)

1. はじめに 超LSI等の微細パターンの描画には電子ビーム露光装置が使用されている。描画速度を向上させるためにターンの形状に応じて電子ビーム断面形状を電子的速度で変化して露光するRDS (Riken Double Slit Scheme) 方式(図1)による可変断面型の露光装置が実用化され<sup>1)</sup>、研究開発用から生産ラインへと導入されようとしている。さらにスループットを向上させるため、1チップの大きさまでを電子的走査のみでカバーできるように $10\text{mm}^2$ まで走査領域を拡大した高性能収束偏向システムが実現された。<sup>2),3)</sup> 従来実現されているものでは $2\text{m}^2$ までを電子的に走査し、これ以上の領域はXYステージを移動し、電子的走査領域を貼合せることによって1チップの領域をカバーしている。新しく開発された高性能収束偏向システムでは、 $10\text{mm}^2$ の領域にサブミクロンのパターンを $0.1\mu\text{m}$ の精度で描くもので、機械的移動の回数も減少でき、スループットも著しく向上できる。今回実現した収束偏向システムでは、2段の磁気レンズの中に2個の主偏向用と1個の補助偏向用静電偏向器を配置したインレンズ方式の静電偏向システムを採用した。このために用いる静電偏向器としては、小型で広い領域に亘って一様な電界を得られることが必要とされ、従来から多重極の静電偏向器が多用されている。静電偏向器の特性は、その形状によって定まり、理論的形状にできるだけ一致するよう製作することが重要である。しかし、実際には種々の原因によって生ずる誤差を避けることは不可能である。製作された静電偏向器の形状を計測し、形状モデルを構成できれば、それより偏向システムの特性を推定できるはずである。本報では、大偏向システム用に試作したこの極不等分割円筒型静電偏向電極の形状を計測し構成された形状モデルから偏向特性を推定し、実験結果と比較検討した。また、形状モデルの一部を変更し、効果的に修正箇所および修正量を推定し、電極形状を改造し、偏向特性の向上を図った。

2. 静電偏向器と形状モデル 図1はRDS方式による可変断面型電子ビーム露光装置の概念図を示した。2つのスリット間でビームを偏向することによって、ビーム断面形状を電子的速度で変化できる。この部分で露光すべきパターンに適合した形状にビーム断面を整形し、Work Piece との間配置された投影レンズと偏向器により、Work Piece 上の所望の位置に投射する。 $10\text{mm}^2$ の領域にサブミクロンのパターンを $0.1\mu\text{m}$ の精度で描く、高精度大偏向システムの性能は、この最終段の収束偏向システムの性能によって左右される。今回実現したインレンズ方式の大偏向システムの構成を図2に示した。

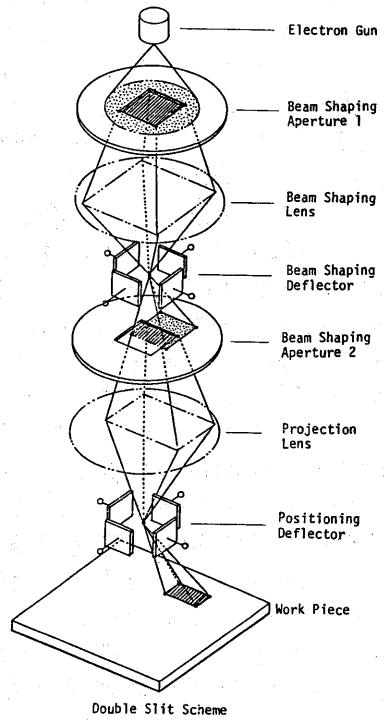
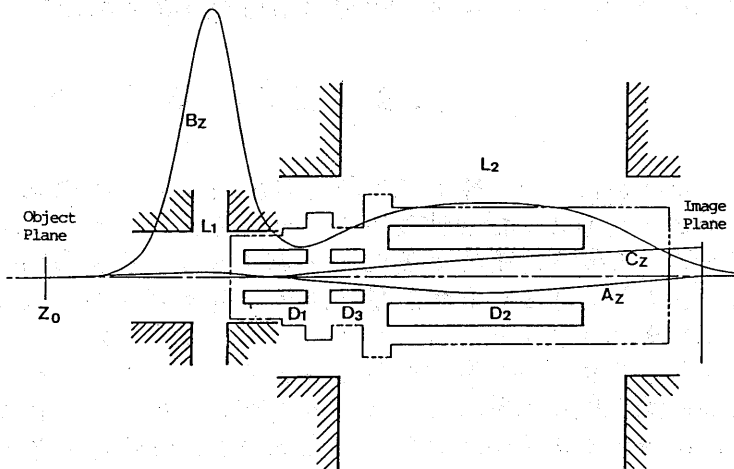


図1. RDS方式の概念図 (Riken Double Slit Scheme)

このように高精度電子ビーム収束偏向システムにおいては、電子相互の反発によるボケが問題となるため、電子ビームの走行距離をできるだけ短くすることが要求される。また、ビーム径路周囲に絶縁物等が存在するとその帯電により、偏向位置のずれや像の歪やボケの原因となる。従って、これらを十分に配慮した構造とすることが必要とされる。ビーム径路を短くするためにインレンズ方式が、また絶縁物の帯電の影響を避けるため、特別な電極支持構造が採用されている。



L1: 縮小レンズ, L2: 投影レンズ,  
 D1, D2: 主偏向器, D3: 補助偏向器  
 Bz: レンズ磁束密度, A2: 結像軌道, C2: 偏向軌道

図2. インレンズ式偏向システム

円筒型の静電偏向器においては、円周方向 ( $\theta$  方向と呼ぶ) に対する電位分布がコサイン状となる場合に偏向器内部の電界が理想的に一樣となる。このような偏向器の実現は実際上困難であり、通常は円周方向の電位分布のフーリエ成分の高次 ( $2\theta$  以上) の成分をできるだけ小さくする構成が採用されている。また低次の成分ほど偏向器中心部まで大きな影響を及ぼす。このため適当な円弧巾を有する電極片を円筒面上の適当な位置に配置した構造の多重極静電偏向器が広く用いられている。特に円筒面を8等分した8重極静電偏向器では、理論的に偶数次成分と  $5\theta$  成分までを零にでき、偏向特性もすぐれているため、古くから広く使用されている。しかし、 $\pm X$ ,  $\pm Y$  に加えて、 $\pm(X+Y)/\sqrt{2}$  および  $\pm(X-Y)/\sqrt{2}$  の偏向信号が必要とされ、電子ビーム露光装置のように高速かつ高精度の偏向システムでは駆動アンペアが極めて高価となる。 $\pm X$ ,  $\pm Y$  の2対の偏向信号のみで駆動できる型の静電偏向器として各電極の円周方向に対する面積分布をコサイン状としたデフレクトロンと呼ばれるものがCRTや撮像管などに広く用いられているが、電子ビーム露光装置のような高精度偏向システムには適さない。そこで  $4+8n$  ( $n=1, 2, \dots$ ) 個の円筒電極片をそれぞれ適当な円弧巾で円筒面上の適当な位置に配置し、偶数次成分と  $(2n+1)\theta$  成分までを除き得る不等分割円筒型静電偏向電極を考案した<sup>4)</sup>。図3にこれに基づいた20極不等分割円筒型静電偏向電極の配置を示した。実際の電極では印加電圧に応じたギャップが必要とされる。図4には、大偏向実験システム用に試作した20極不等分割円筒型静電偏向電極の構造と写真とを示した。いずれも電極材を絶縁支持体を介してケーシングに固定した後、ワイヤ放電加工により内部電極片が設計形状となるように切断して残塊を除去して製作され

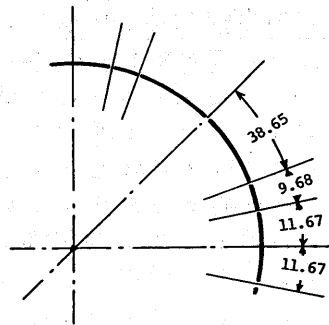
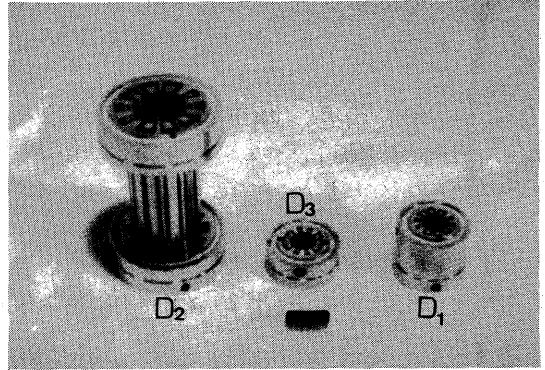
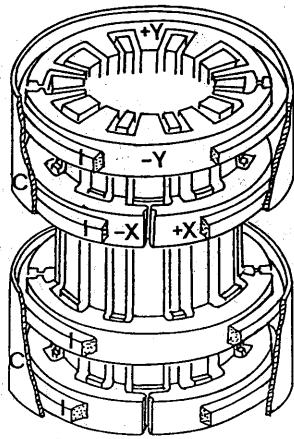


図3. 20極不等分割円筒型静電偏向器の電極配置

図4. この型の  
 静電偏向器に  
 において、各  
 電極片の内弧  
 中とその位置  
 とが偏向器の  
 特性を左右す  
 る重要なパラ  
 メタである。  
 従って性能評  
 価に用いる形  
 状モデルの構  
 成には、これ  
 らを精度よく  
 計測すること  
 が大切である。



(a) 静電偏向器の構造(D2)

(b) 試作偏向電極

(±X, ±Y: 電極, C: ケーシング  
 I: 絶縁体)

(D1, D2: 主偏向器  
 D3: 補助偏向器)

図4. 20極不等分割円筒型静電偏向器の構造および試作した静電偏向電極

種々の計測法を検討したが適当な計測法が見あたらず、結局万能投影顕微鏡に各  
 軸1μmの分解能のデジタルに値として読取可能であるXYステージを装備し、電  
 極の上および下面の輪郭上の点のXY座標値を計測し、中間部の形状もこれで  
 代表させることとした。偏向器ケーシングの外周と内周および電極の外周はそれ  
 ぞれの円周上の8点のXY座標値を計測した。また各電極片については、電極内  
 周上の3点、角の2点および両側面上にそれぞれ3点の計測点のXY座標値を計  
 測した。これらの計測データより、偏向電極中心の座標値、外周中心と偏向電極  
 中心のずれ、電極平均内径、各電極片の内弧中および位置等を算出し、静電偏向  
 器の形状モデルを構成した。同一円周上の計測点の集合{(x<sub>i</sub>, y<sub>i</sub>)}より円の中心  
 (x<sub>0</sub>, y<sub>0</sub>)および半径Rを求めるには、最小二乗法で導かれた次の式を用いた。

$$\begin{aligned}
 \bar{x} &= \sum x_i / n, & \bar{y} &= \sum y_i / n \\
 X_0 &= \frac{\sum (y_i - \bar{y})^2 \{ \sum (x_i - \bar{x}) + \sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \} - \sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \{ \sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) + \sum (y_i - \bar{y}) \}}{\sum \{ \sum (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum (y_i - \bar{y})^2 - \{ \sum (x_i - \bar{x}) \cdot \sum (y_i - \bar{y}) \}^2 \}} \\
 Y_0 &= \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2 \{ \sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) - \sum (y_i - \bar{y}) \} - \sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \{ \sum (x_i - \bar{x})^2 + \sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \}}{\sum \{ \sum (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum (y_i - \bar{y})^2 - \{ \sum (x_i - \bar{x}) \cdot \sum (y_i - \bar{y}) \}^2 \}} \\
 R^2 &= X_0^2 + Y_0^2 + \{ \sum (x_i - \bar{x})^2 + \sum (y_i - \bar{y})^2 \} / n \\
 x_0 &= X_0 + \bar{x}, & y_0 &= Y_0 + \bar{y} \quad \dots \dots (1)
 \end{aligned}$$

これらの式を用いて、試作電極の各部の径を求め、各電極片のずれ等を調べた。  
 図5は各電極片の平均内径からのずれを半径方向に40倍に拡大して表示したも  
 のの一例である。これらのずれは、加工時に材料内部の残留応力が解放されたた  
 めに生じたものと解釈される。さらに各電極片の内弧中は、推定された偏向器中  
 心より、各電極片の角および側面を見る角度より算出した。また電極片の内周方  
 向位置は求められた内弧中の中心角度の位置とした。偏向器の軸方向の形状につ  
 いては、計測できなかったため電極上面と下面の形状を線形内挿して求めた。

3. 形状モデルからの性能評価 構成された静電偏向器の形状モデルから偏向器の特性を評価するため、まず、各偏向器について電極円周方向電位分布のフーリエ成分、偏向器内部の電位分布および電界分布を求め検討した。図6は不等分割円筒型静電偏向器に±X, ±Yの偏向電圧を印加した場合の円周方向電位分布の一例である。ギャップにおける電位は両側電極の電位を線形内挿した値になるものとすれば、 $\theta_i$ および $\theta_{i+1}$ の区間の電位 $P_i(\theta)$ は、

$$P_i(\theta) = \left( \frac{V_{i+1} - V_i}{\theta_{i+1} - \theta_i} \right) (\theta - \theta_i) + V_i \dots (2)$$

で与えられる。従って、円周方向電位分布のn次のフーリエ成分( $A_n, B_n$ )は次式によって算出される。

$$A_n = \frac{1}{\pi} \sum_{i=1}^{m-1} \int_{\theta_i}^{\theta_{i+1}} P_i(\theta) \cos n\theta d\theta$$

$$B_n = \frac{1}{\pi} \sum_{i=1}^{m-1} \int_{\theta_i}^{\theta_{i+1}} P_i(\theta) \sin n\theta d\theta \quad (3)$$

このようにして算出されるフーリエ成分のうち、1次を除いたすべての項が零となる時偏向器内の電界は理想的に一樣となるが、通常はある値となり、偏向器内の電界は理想的な電界からずれたものとなる。2次

以上の成分ができるだけ小さくすることが望ましい。軸方向に無限に伸びた円筒型偏向器内部における電位分布 $\phi(r, \alpha)$ は偏向器円周上の電位分布が定まると次式で与えられる。ただし、 $a$ は偏向器の半径である。

$$\phi(r, \alpha) = \frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^{m-1} \int_{\theta_i}^{\theta_{i+1}} P_i(\theta) d\theta + \frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{r}{a} \right)^{n-m-1} \sum_{i=1}^{m-1} \int_{\theta_i}^{\theta_{i+1}} P_i(\theta) \cos n(\theta - \alpha) d\theta \dots (4)$$

この式を微分することにより電界分布も算出することが出来る。式(3)を用い偏向電極円周方向に対するフーリエ成分を算出し、検討することにより、単なる幾何学的形状の比較では検知不可能である電極配置の非対称性や電極円弧巾のずれなどを評価することが出来る。また式(4)により、静電偏向器内部の電位分布あるいは、電界分布についても各次数成分について個別に検討することが可能となる。図7は8極、12極、20極、28極の理想的な形状の不等分割円筒型偏向電極について、各次数成分の偏向電極内電界変異(一樣電界からのずれ)への寄与係数を求めグラフ表示したものである。図8は試作した20極不等分割円筒型偏向電極に対する寄与係数を表示したものである。同図(a)に対応した偏向器では2次および3次成分の電界変異への寄与が大きく、高精度大偏向システムに適用するには偏向収差が大きすぎ不適当であることが予想され、また実験によってもこの予想が裏づけられた。そこで、どの部分の形状をどの程度修正したら最も効果的に性能改善ができるかを形状モデルより推定し、一部の電極形状を改造した。

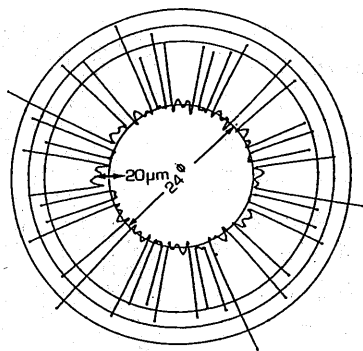


図5. 試作偏向器(D2)

各部の径および各電極片の平均内径からのずれ(半径方向に40倍に拡大表示)

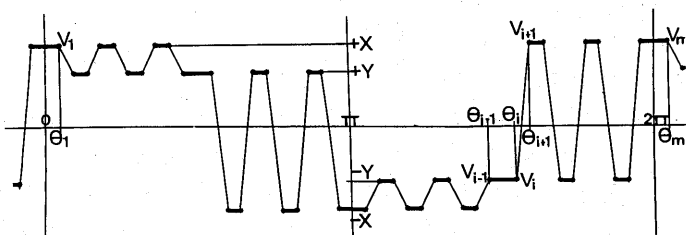


図6. 不等分割円筒型静電偏向電極の円周方向電位分布: 偏向電圧±X, ±Yを印加, ギャップの電位は両側の電極片の電圧を線形内挿

図8 (b) に示したグラフが改造後の偏向電極における寄与係数の計算例である。同図 (a) に比べ著しく改善されていることが分る。また実験結果もこの形状モデルからの推定性能と極めてよく一致した。図9は、試作電極内における電位分布、電界分布および電界変異分布の計算結果を図形表示した例である。同図 (b), (c)

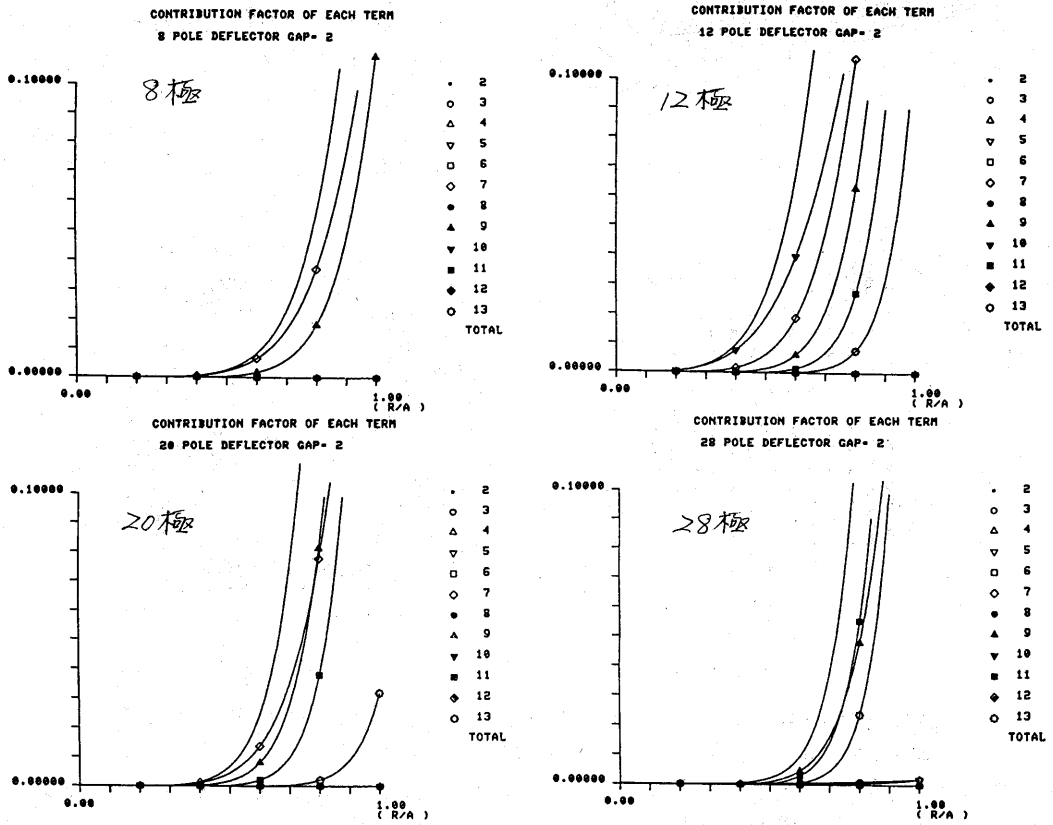


図7. 理想的形状の円筒型偏向器における各次数成分の偏向電界変異 (一様電界からのずれ) への寄与係数の例

における矢印は大偏向実験システムにおける偏向器 ( $D_2$ ) 内でのビーム中心軌道を示している。電位分布、電界分布は各次数

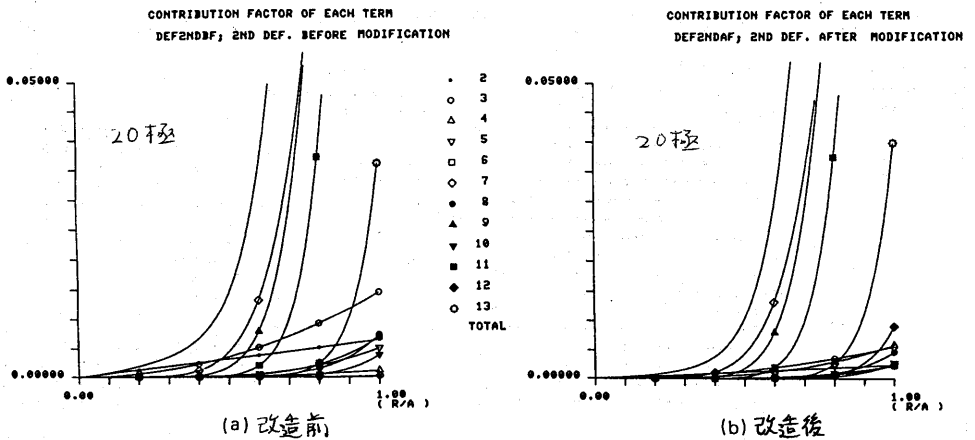
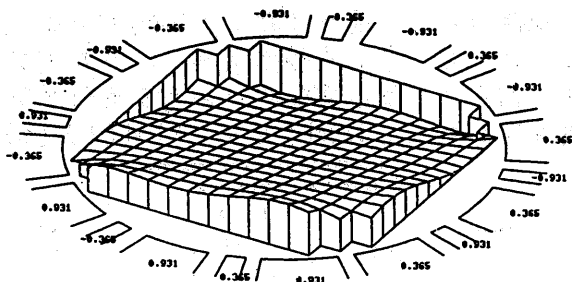
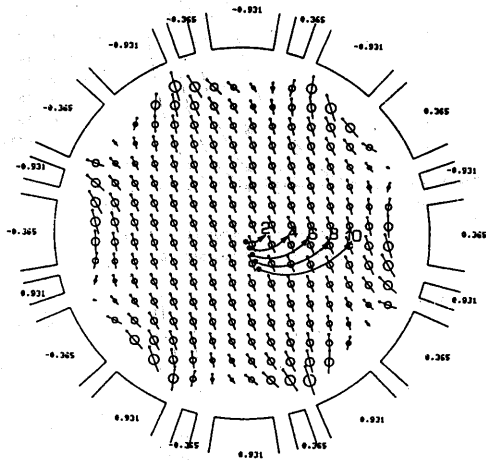


図8. 試作偏向電極 ( $D_2$ ) における各次数成分の偏向電界変異への寄与係数

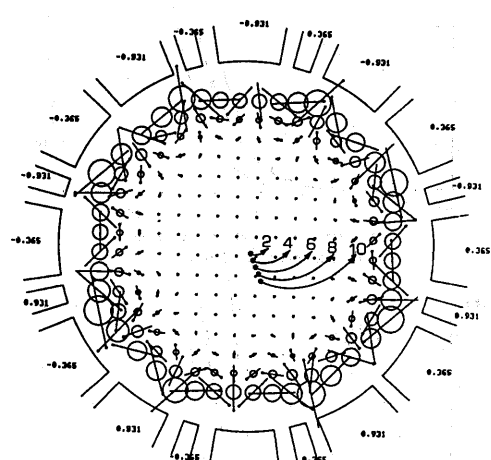


(a) 電位分布

成分ごとに表示することも可能であり、どの次数成分がパターン歪や偏向歪に大きく寄与しているか等を視覚的に見つけることができる。図10は試作した静電偏向器(D<sub>2</sub>)について、電界分布の1次から6次の成分までそれぞれ分けて表示した例である。いずれにおいても、線の向きが電界の向きを、円の半径および



(b) 電界分布



(c) 電界変異分布

図9. 試作静電偏向器(D<sub>2</sub>)内における電位分布、電界分布、電界変異分布とビーム軌道(2, 4, 6, 8, 10mm偏向)の表示例

線の長さが電界の大きさを表している。高次の成分は見やすい大きさとなるように表示のための拡大係数が乗じられている。性能改善のための効果的な修正箇所およびその程度を推定する過程においては、図8に示した各次数成分の寄与係数と合せて、各次数成分ごとの電界分布を表示し、視覚的に性能の変化を推定し、モデル形状を変更する操作を対話的に繰り返した。また理想モデルからのずれの

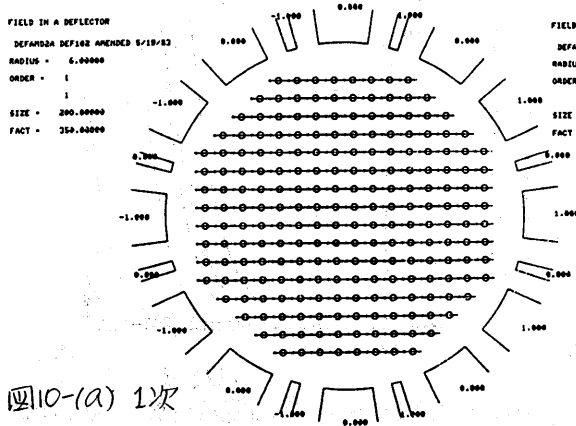


図10-(a) 1次

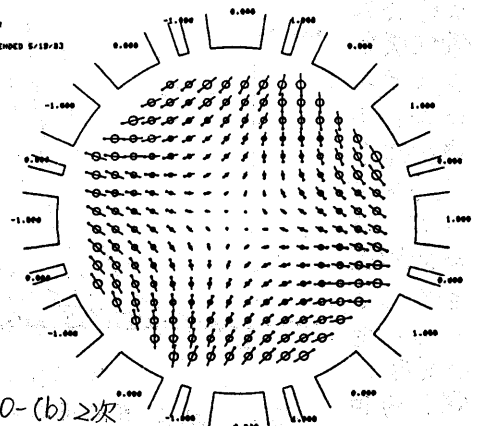


図10-(b) 2次

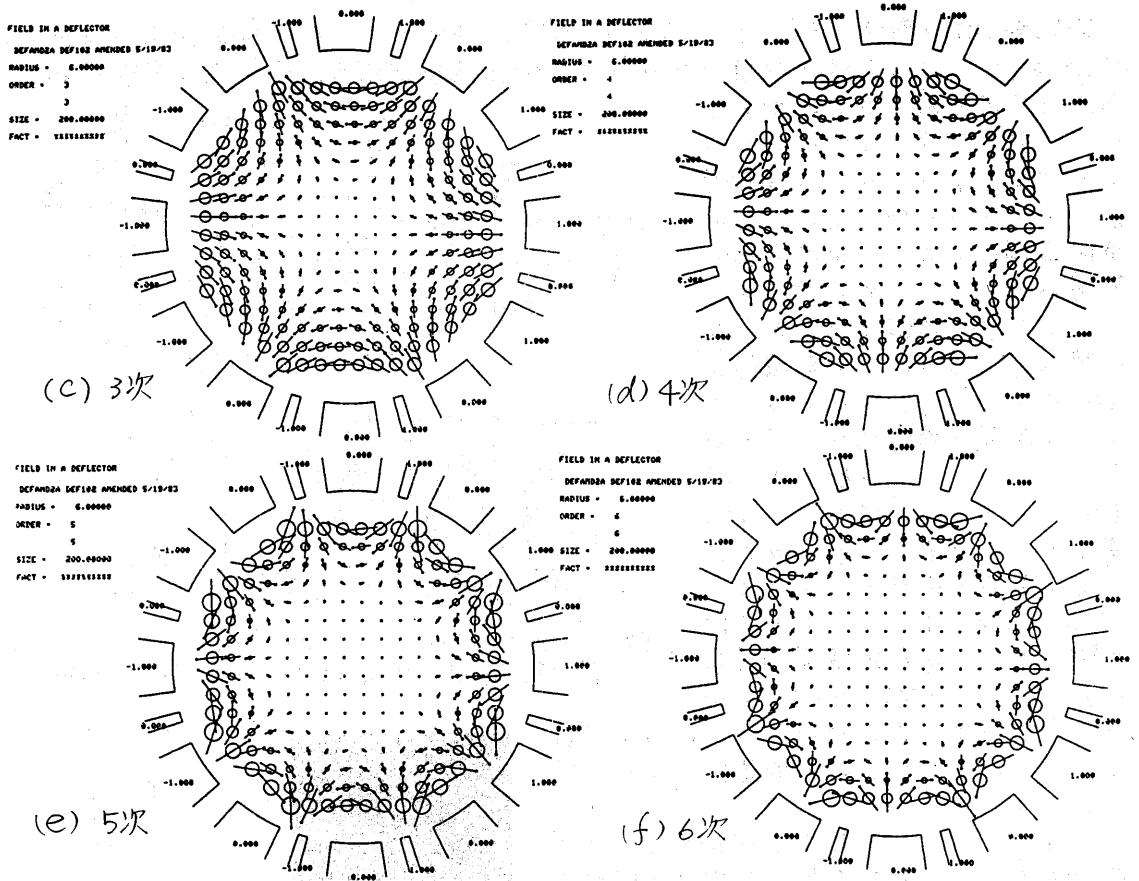


図10. 試作偏向器(D<sub>2</sub>)内電界分布の各次数成分の表示例  
(線の向きが電界の向きを、その長さおよび円の大きさが電界の強度を示す)

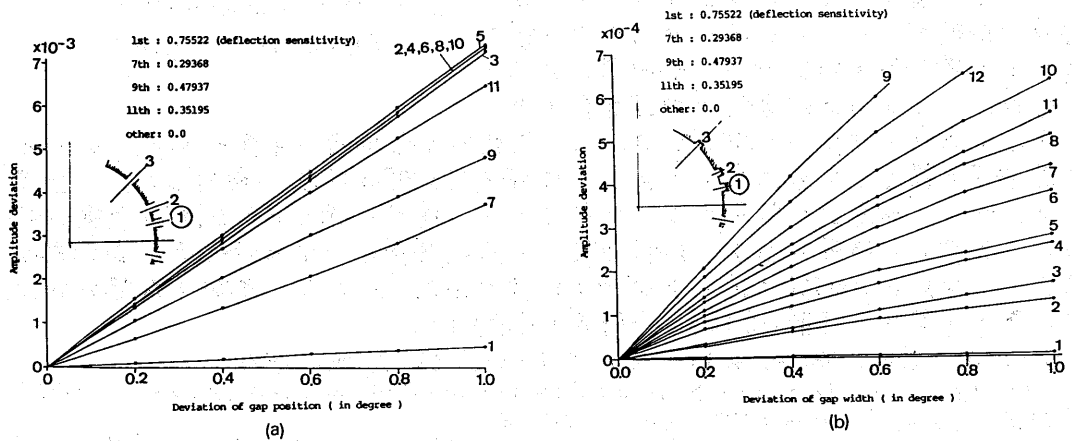


図11. ギャップ位置およびギャップ巾変動の各成分への影響

うちの部分のずれが偏向特性に最も影響を与えるか調べた。ギャップ巾およびギャップ位置の変動に対する各次数成分の変動の一列を図11に示した。これらよ

り静電偏向器の製作に際してどの部分の精度に注意すべきかの目安が得られた。図12はインレンズ大偏向実験システムの最終段偏向器端部付近の電位分布を偏向電極の各次数成分を有限要素法による電位計算プログラムに入力し算出したものを等高線表示したものの一例である。この偏向器端部における電界変動の影響はフリッジ効果と呼ばれ、これが全体の特性にどのような影響を与えるかは、まだ検討されていないばかりである。そのためには各偏向器の形状モデルのみでなく、これらを組合せた収束偏向システム全体としての形状モデルが必要とされ、そのための計測法の開発が望まれる。図13(b)は、インレンズ大偏向実験システムの最終段偏向器内におけるビーム軌道に沿った電界変動から推定されたパターン歪の例であり、同図(a)に示した実験結果とよく一致している。

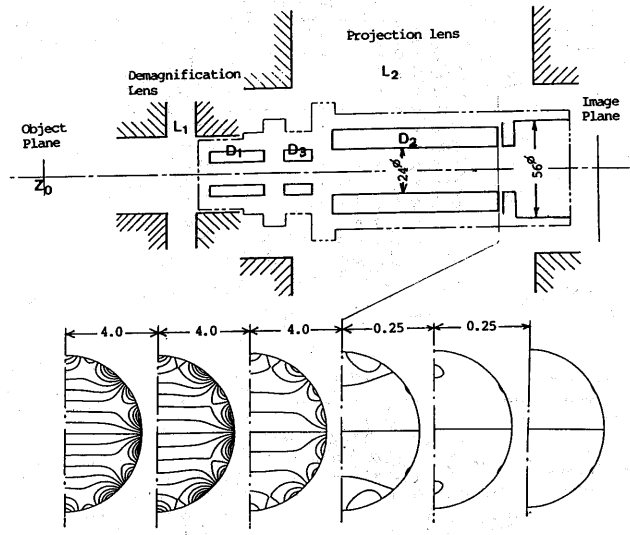


図12. 有限要素法による大偏向実験システム最終段偏向器端部における電位分布の計算例

4. おまじ 超LSI回路パターン描画用電子ビーム露光装置に使用する静電偏向器の特性をその形状モデルから推定し、偏向特性の改善を試みた。その結果、形状モデルから偏向システムの性能をかなりの精度で推定できることが確かめられた。製作された偏向器の内部応力の解放等による歪を補正するための効果的な改造箇所とその程度を形状モデルから推定でき、より高性能な偏向器の製作が可能となった。性能推定の精度をさらに高めるためには偏向器内部の形状、偏向システム全体としての形状を精度よく計測でき、形状モデルの構成に適した計測法の出現が望まれる。最後に本研究にあたり御指導頂いた理研後藤英一主任研究員、偏向電極の試作および計測に御協力頂いた理研工作部白石氏、松本氏、実験に御協力頂いた日本電子栗谷氏、後藤(俊)氏、今野氏に感謝する。

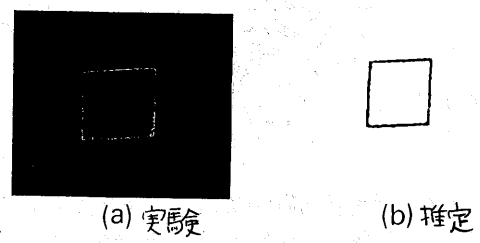


図13. パターン歪の推定例 (ビームサイズ  $\approx 2\mu\text{m}^2$ )

文獻

- 1) E. Goto et al. Journal of Vac. Sci. and Technol. No.15, 883 (1978)
- 2) E. Goto et al. Proc. 10th Symp. on Electron Ion Beam Sci. and Technol. 103 (1982)
- 3) E. Goto et al. 1983 EIPB Symp. (1983-6)
- 4) E. Goto et al. Extended Abst. 161st Meeting of Electro-chem. Soc. Vol. 82-1 Ab. No. 299 488 (1982)
- 5) M. Idesawa et al. 1983 EIPB Symp. (1983-6)
- 6) 相馬, 有限要素法による軸上ポテンシャル関数の計算, 情報処理学会第7回全国大会(1983-10)
- 7) 相馬, 他, 電子ビーム偏向電極の形状計測と性能評価, 理研エレクトロニクス第4回「非接触計測と画像処理」8(1983-9)