イメージ管用静電レンズ

正会員 加藤 隆 仁[†], 正会員 木 下 勝 之[†]
正会員 鈴 木 義 二[†]

あらまし 不可視情報を可視化する画像化技術の方法としてイメージ管がある。光電面、電子レンズ、増倍部、蛍光面で構成されるイメージ管において、電子レンズはイメージ管の性能を決定する重要な要素である。3種類の異なる電極構成からなる静電集束型マイクロチャンネルプレート内蔵イメージ管に対しコンピュータシミュレーションにより検討し、それに基づく試作実験により、それぞれの最適設計条件と、3種のイメージ管の相対的優劣を明らかにした。湾曲したガラス入力窓を持つ構造では、光学レンズの結像面と光電面が周辺で一致せずぼけた入力像となり周辺解像度が低下する。入力窓に繊維光学板(F.O.)を用いた構造では、結像面と光電面が一致したことと等価になり高性能となる。またF.O.の使用できない紫外領域では、平板の入力窓で平板光電面に近接メッシュを用いた構造の電子レンズにより、F.O.を用いたイメージ管と同等の性能が得られた。

1. ま え が き

人間の肉眼は380~780 nmの波長の光に感度を持っているが、それ以外の光には感じない。また、可視域でも 10^{-4} lx以下の低照度下では人間の眼は物体を見ることができない。このような不可視情報を可視化する種々の画像化技術の開発が進められている¹⁾。光電面と蛍光面とを組合せたイメージ管はその画像化技術のひとつである。

不可視像を明るく可視像に変換するイメージ管は、基本的に光電面、電子レンズ、増倍部、蛍光面で構成されている。光学レンズにより光の像が結像された光電面はその強度に応じた光電子を放出する。この光電子は電子レンズで加速集束作用を受け、増倍部で個数を増し、蛍光面上に電子像を結ぶ。蛍光面は電子像に応じて発光し、可視像を再生する。電子レンズには、静電集束レンズと電磁集束レンズがある。電磁集束レンズは像ひずみ、明るさの一樣性などの点で有利な反面、集束コイル等により重く、大型となり取り扱いも面倒な欠点をもつ。また、微弱な像を明るい像に変換する増倍機構で分類すると、繊維光学板(Fiber-Optic

Face Plate, 以下F.O.と略称)をイメージ管の入出力面板に用い、イメージ管を数個連結するカスケード型、透過型2次電子増倍面を用いた型、マイクロチャンネルプレート(MCP)で電子増倍を行うマイクロチャンネルプレート型、等がある。これら種々の型の中から電子レンズに静電集束レンズを、増倍機構にMCPを使用した小型、軽量、取り扱いの簡単な静電集束型MCP内蔵イメージ管が主流となってきた。

静電集束型MCP内蔵イメージ管の電子レンズは、光電面からの光電子像をMCP入力面に結像させる静電集束レンズと、MCPで増倍され放出された電子を蛍光面に集束させる近接集束レンズに分けられる。なかでも静電集束レンズは像拡大率、像ひずみ、解像度などのイメージ管の諸特性に大きく影響する。よって、イメージ管の性能を向上させるためには、静電集束電子レンズの最適化が不可欠である。

イメージ管では静電集束レンズにより生ずる像面湾曲を補正するために、光電面を湾曲させる必要があり、管軸(以下、主軸と呼ぶ)に垂直な平面状の結像面を得る最適な光電面の曲率が存在する。光電面に曲率を持たせるために、イメージ管の入力窓に湾曲させたガラス窓が用いられる。このようなイメージ管では、光学レンズの結像面と光電面が一致せず、周辺でぼけた光学像が光電面に入力されることになり、解像度の低下をきたす。この欠点をなくすために、入力窓

[†] 浜松ホトニクス株式会社
"Electrostatic Lens for Image Tubes" by Takahito Kato, Katsuyuki Kinoshita and Yoshiji Suzuki (Hamamatsu Photonics K.K., Hamamatsu)

に F.O. が用いられる。このイメージ管では光学レンズによる入力像のぼけがなくなり、主軸に垂直な平面状の結像面を得る最適な光電面の曲率が選択され、高解像の特性が得られる。また、F.O. が使用できない紫外の波長領域には平板の紫外線透過面を用い、平板光電面に近接して細かなメッシュを置いて、静電集束電子レンズを工夫したイメージ管が開発された²⁾³⁾。

本論文では、上記の 3 種類の異なる電極構成から成る静電集束型 MCP 内蔵イメージ管の特性をコンピュータシミュレーションにより検討し、それに基づく試作実験により、それぞれの最適設計条件を明らかにし、さらに 3 種のイメージ管の相対的優劣を明らかにする⁴⁾⁵⁾。

2. 電子レンズの解析

静電集束型 MCP 内蔵イメージ管の構成を図 1 に示す。イメージ管を光学レンズ、静電集束レンズ、近接集束レンズに分け、別々に解析し、各レンズによる像のぼけを点広がり関数の半値幅によって求める。そして全体の広がり関数は各段の点広がり関数のコンボリューションによって求め、イメージ管を評価した。

蛍光体は $2\mu\text{m}$ 径のものを使用し、蛍光面の厚みはほぼ 2 粒子程度になっていると考えられるので、蛍光面での出力像の広がり関数は電子レンズの広がり関数と比較して小さいので解析では無視した。F.O. による広がり関数は F.O. の穴径 ($4\mu\text{m}$) 程度と考えられるので、蛍光面と同様無視した。MCP は $12\mu\text{m}$ のチャンネル径のものを使用し、解析条件 (放出角度分布、エネルギー分布) は後述する実測値を使用した。

2.1. 光学レンズによる光学像の広がり関数

光学レンズによりイメージ管の光電面の中心に理想的に焦点を結ばせたとき、曲率を持った光電面が結像面から外れる距離に対する光学像の広がり関数を計算する。無収差レンズを仮定した光路を図 2 に示す。光学レンズの明るさを F 、光電面が光学レンズの焦点面から外れる距離を l 、物体から光学レンズまでの距離

図 1 MCP 内蔵イメージ管の原理的構成
Configuration of image tube with MCP.

図 2 光電面の湾曲による光学像の広がり
Optical image spread caused by curvature of photocathode.

を a 、光学レンズの焦点距離を f で表すと、光学像の広がり関数 x は、

$$x = \frac{l}{F} \left(1 - \frac{f}{a} \right) \quad (1)$$

で表される。ここで、物体は遠方にあり $a \gg f$ の条件が成り立つとする。また、広がり関数をガウス分布と仮定し、その半値幅を x の $1/2$ と仮定する。

2.2 電子レンズによる電子像の広がり関数

電子レンズによる広がり関数は、光電面からの光電子を MCP 上に集束させる静電集束レンズによるものと MCP と蛍光面間の近接集束レンズによるものを合成したものである。広がり関数の算出には両者を分けて行うが、解析手法は全く同じである。

(1) 電位分布解析^{6)~8)}

静電集束型 MCP 内蔵イメージ管では MCP による増倍後の蛍光面 (有効径 15 mm) に流入する電流は $50 \sim 100\text{ nA}$ で、非常に少ないため、ここでは空間電荷効果を考慮せずに、ラプラス方程式を扱う。軸対称系のラプラス方程式は、

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (2)$$

で表される。電位 ϕ を求めるには、電極で囲まれた閉領域を格子状のメッシュ構造に置き換え、各格子点の電位の値を未知数とする多元連立方程式を解く。まず、 z, r 方向の i, j 番目の格子点 P_{ij} における電位微係数を求め、(2) 式に代入すると、差分方程式

$$V_{ij} = \frac{1}{2(1+T^2)} \left[V_{i+1,j} + V_{i-1,j} + T^2 \left\{ \left(1 + \frac{k}{2r} \right) V_{i,j+1} + \left(1 - \frac{k}{2r} \right) V_{i,j-1} \right\} \right] \quad (3)$$

が得られる。ここで、 $T = h/k$ で、 h は z 方向、 k は r 方向の格子間隔である。この方程式を解くには逐次加速緩和法を用いて反復計算を行う。いま、 V_{ij} の第 n 回目の反復値を $V_{ij}^{(n)}$ で示し、ある z に対し、 r 方向へ各格子点の電位を順次計算させていくと、

(3)式は,

$$\begin{aligned} V_{ij}^{(n+1)} &= V_{ij}^{(n)} + \frac{\omega}{2(1+T^2)} \left[V_{i+1,j}^{(n)} + V_{i-1,j}^{(n)} \right. \\ &\quad \left. + T^2 \left(1 + \frac{k}{2r} \right) V_{i,j+1}^{(n)} + \left(1 - \frac{k}{2r} \right) V_{i,j-1}^{(n)} \right] \\ &\quad - 2(1+T^2) V_{ij}^{(n)} \Big] \\ &= V_{ij}^{(n)} + \omega R_{ij} \end{aligned} \quad (4)$$

に書き直される. R_{ij} は反復 1 回当りの V_{ij} の変化量である. ω は加速緩和係数である⁹⁾. R_{ij} がある値以下になったら繰り返し計算を終了し, そのときの電位を解とする.

(2) 電子軌道解析⁷⁾¹⁰⁾

電子の運動方程式は,

$$\begin{aligned} \frac{d^2 r}{dt^2} &= \frac{e}{m} \frac{\partial V}{\partial r} \\ \frac{d^2 z}{dt^2} &= \frac{e}{m} \frac{\partial V}{\partial z} \end{aligned} \quad (5)$$

与えられる. ここで, m, e はそれぞれ電子の質量, 電荷である. 現在の電子の位置 P_0 点の座標を r_0, z_0 とし, 時間 Δt 後の電子の位置 r, z を r_0, z_0 を用いて, テーラー展開して求めると,

$$\begin{aligned} r &= r_0 + \left(\frac{dr}{dt} \right)_0 \Delta t + \frac{1}{2} \frac{e}{m} \left(\frac{\partial V}{\partial r} \right)_0 \Delta t^2 \\ &\quad + \frac{1}{6} \frac{e}{m} \left\{ \left(\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} \right)_0 \left(\frac{dr}{dt} \right)_0 \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{\partial^2 V}{\partial r \partial z} \right)_0 \left(\frac{dz}{dt} \right)_0 \right\} \Delta t^3 \\ z &= z_0 + \left(\frac{dz}{dt} \right)_0 \Delta t + \frac{1}{2} \frac{e}{m} \left(\frac{\partial V}{\partial z} \right)_0 \Delta t^2 \\ &\quad + \frac{1}{6} \frac{e}{m} \left\{ \left(\frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right)_0 \left(\frac{dz}{dt} \right)_0 \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{\partial^2 V}{\partial z \partial r} \right)_0 \left(\frac{dr}{dt} \right)_0 \right\} \Delta t^3 \end{aligned} \quad (6)$$

となる. 電位微係数の決定は現在の電子の位置 P_0 点の周囲の 4 つの格子点の中で, P_0 点との距離が最小である格子点を基準点とし, その基準点の電位微係数をテイラー展開して求め, これらより, P_0 点の電位微係数を求める. 電位微係数を展開式 (6) 式に代入して時間 Δt 後の電子の位置, 速度を求め, 順次繰り返して電子軌道を追跡する.

(3) 広がり関数の計算

イメージ管の電子像の広がり関数は電子の放出角度分散, エネルギー分散, さらに加速電圧によって決まる. 光電面からの光電子と, MCP から 2 次電子の放出角度分布とエネルギー分布は実測による値を用いた. 光電子の放出角度分布は cosin 分布を, エネルギー分布は数 eV にピークを持つポアソン分布とした.

2 次電子の放出角度分布は数度の半値幅を持つガウス分布を, エネルギー分布は数十 eV にピークを持つポアソン分布とした. また加速電圧は, 静電集束レンズ, 近接集束レンズともに 3 kV である. これらの条件をモンテカルロ法により上記 (2) の軌道解析手法に取り込んで, 広がり関数を求める. 静電集束レンズによって MCP 入力面に集束された電子の空間広がり関数を, また近接集束レンズによる蛍光面上の空間広がり関数を求める.

2.3 解析結果

図 3 に, 解析を行った 3 種の電子レンズの構造を示す. (a) は湾曲したガラス入力窓で光電面も湾曲している構造, (b) は入力窓に F.O. を用いた構造, (c) は平板入力窓で平板光電面に近接メッシュを用いた構造である. 解析により求めた広がり関数は半値幅で示す.

近接集束レンズによる電子像の広がり関数は MCP 出力面と蛍光面間の電界に依存し, MCP 有効面全面にわたって同じである. 計算の結果, 約 4 kV/mm の電界で 40 μ m 程度の広がりである.

まず, (a) の湾曲入力窓の構造は光学レンズと電子レンズ (静電集束レンズ + 近接集束レンズ) によって

図 3 代表的な 3 種のイメージ管における電子レンズの模式的構造

- (a) 湾曲入力窓を用いた構造
- (b) F.O. 入力窓を用いた構造
- (c) 平板入力窓に近接メッシュを用いた構造

Structure of electrostatic lenses in three kinds of image tubes.

- (a) Using a spherical input glass, faceplate and photocathode.
- (b) Using a fiber optic faceplate.
- (c) Using a flat input faceplate, a flat photocathode and a mesh electrode.

全体の広がり関数が決定される．光電面を平板（曲率半径無限大）から曲率半径を小さくしていくときの広がり関数の様子を，また，その広がり関数をフーリエ変換し，変調度 5% の値を図 4(a) に，拡大率，ひずみの様子を図 4(b) に示す．横軸は光電面の半径方向の距離を示す．(1) 式の計算に使用したレンズは F1.4 である．広がり関数は MCP 入力面での広がり関数と蛍光面上での広がり関数を示す．MCP 入力面での広がり関数は光学レンズによる光電面上での広がり関数と，静電集束レンズによる MCP 入力面における広がり関数をコンボルーションした値である．蛍光

面上での広がり関数は上述の広がり関数に加えて近接集束レンズによる蛍光面上での広がり関数をコンボルーションした値である．図には光電面の曲率半径が無限大（平板），50，30，25，20 mm の広がり関数を示してある．ひずみ特性は，

$$D_r = \frac{M_r - M_c}{M_c} \times 100 \quad (7)$$

より求めた．ここで， D_r は r 点（軸から径方向に距離 r 離れた点）でのひずみ， M_r ， M_c は r 点と中心での拡大率を表す．

光電面の曲率半径が小さくなるに従って，光電面から垂直に放出された電子の軌道が交わる点，すなわちクロスオーバーが光電面側に近づき，拡大率は大きくなり，ひずみは減少してくる．さらに曲率半径を小さくすると，ひずみはかえって大きくなる．また，広がり関数は曲率半径が小さくなるに従って周辺が改善されてくるが，さらに小さな曲率半径になると，広がり関数は大きくなり，広がり関数が最小の曲率半径は 50 mm である．広がり関数は周辺になるに従って大きくなり，解像度の低下をもたらす．

図 3(b) の F. O. 入力窓の構造は電子レンズ（静電集束レンズ＋近接集束レンズ）によって，全体の広がり関数が決定される．光電面の曲率半径は広がり関数が中心から周辺まで小さく，かつ，ひずみが小さくなるように選択される．解析の結果，最適な光電面の曲率半径は 25 mm であることがわかった．この条件下における MCP 入射面と蛍光面上での広がり関数の計算値を，また，蛍光面上の広がり関数のフーリエ変換後の変調度 5% の値を図 4(a) に，その拡大率，ひずみの計算値を図 4(b) に示す（結果は湾曲入力窓で曲率半径 25 mm のデータと重なっている）．中心より 8 mm におけるひずみは 4% 以下と小さく，また広がり関数も中心から周辺にわたって小さく，像面湾曲も小さい．この F. O. 入力窓の構造の蛍光面上での広がり関数は MCP 入力面までの静電集束レンズによる広がり関数よりは MCP 出力面からの近接集束レンズによる広がり関数が支配的となる．したがって，解像度はこの近接集束レンズに依存する傾向になる．この F. O. 入力窓の構造の等電位線と電子軌道，ならびに結像面を図 5 に示す．

図 3(c) のメッシュ付き平板入力窓の構造は入力窓が平面であるため，光学レンズによる光学像のぼけは無視できる．したがって全体の広がり関数は電子レンズ（静電集束レンズ＋近接集束レンズ）の広がり関数によって決定される．平板光電面でもこのような構造の電子レンズにすることによって，結像面が主軸に垂

図 4(a) ビーム広がり関数の光電面曲率依存性（計算値）
Dependence of beam spread on curvature of photocathode (calculated).

図 4(b) 拡大率，ひずみの光電面曲率依存性（計算値）
Dependence of magnification and distortion on curvature of photocathode (calculated).

図 5 F.O. 入力窓の管の等電位線と電子軌道図
Equipotential contours and electron trajectories in image tube using a fiber optic faceplate.

図 6 平板入力窓の管の等電位線と電子軌道図
Equipotential contours and electron trajectories in image tube using a flat input faceplate, a flat photocathode and a mesh electrode.

直近くなるため(a)の構造と比較して広がり関数が顕著に改善される。広がり関数の計算値を、また、フーリエ変換後の変調度 5% の値を図 4(a) に、また拡大率、ひずみの計算値を図 4(b) に示す。この静電集束レンズでは像面湾曲の改善に加えて光電面と近接メッシュ間の高電界により、光電面の一点より放出された光電子束の径が大きくならないため、電子レンズの収差の影響が少なくなる利点が期待できる。平板入力窓の平板光電面でも、このような(c)の構造にすれば、F.O. 入力窓の構造に近い特性が可能であることがわかった。この構造の等電位線と電子軌道、ならびに結像面を図 6 に示す。

3. 試作管の特性の比較

湾曲したガラス入力窓をもつ構造で、最適設計を行った光電面の曲率半径 50 mm を用いた管、入力窓に F.O. を使用した構造で、光電面の曲率半径を 25 mm とした管、平板入力窓で平板光電面に近接メッシュを用いた管を試作し、特性の比較を行った。試作管の外観を写真 1 に示す。3 者ともに試作管の光電面は S-20、蛍光体は P-20 を使用し、MCP による電子増倍を行っている。MCP はチャンネル径 $12\mu\text{m}$ 、チャンネルピッチ $15\mu\text{m}$ 、開孔率 60% である。光電面の有効径は湾曲入力窓の構造の管と F.O. 入力窓の管はともに $20\text{ mm } \phi$ で、蛍光面はともに $16\text{ mm } \phi$ である。F.O. 入力窓の管に使用した F.O. はファイバ径 $4\mu\text{m}$ 、

写真 1 試作管の外観写真

- (a) 湾曲入力窓を用いた構造
- (b) F.O. 入力窓を用いた構造
- (c) 平板入力窓に近接メッシュを用いた構造

Photographs of three experimental tubes.

(a) Using a spherical input glass faceplate and photocathode, (b) using a fiber optic faceplate, (c) using a flat input faceplate, a flat photocathode and a mesh electrode.

ピッチ $5.5\mu\text{m}$ である。平板入力窓の構造の管は光電面、蛍光面ともに有効径は $16\text{ mm } \phi$ であり、メッシュは 750 線/インチである。また、光電面とメッシュの間隔は、強い電界が印加され、ビーム束が細くなるように、より狭い方がよいが、放電を防止するために 3 mm とした。

3.1 解像度特性

5000 Å の単色光で、F1.4 の光学レンズを用いて測定した 3 者の解像度特性を図 7 に示す。周辺の解像度

図 7 試作管の解像度特性

Resolution characteristics of three experimental tubes.

図 8 試作管の拡大率とひずみ特性
Characteristics of magnification and distortion of three experimental tubes.

は中心より 6 mm 離れた位置で測定した。中心の解像度は 3 者ともにほぼ同程度で、限界解像度は 25 lp/mm である。周辺の解像度については湾曲入力窓の構造の管では大きく変調度が低下し、限界解像度は 10 lp/mm 程度である。F.O. 入力窓の管の周辺解像度はほぼ中心と同程度で、周辺での低下が少ない。また、メッシュ付き平板入力窓の管の周辺解像度は中心とほぼ同じで、F.O. 入力窓の管の周辺解像度とも同程度であり、平板光電面でも充分な解像度が得られた。試作管の特性は計算結果とわずかなずれを示した。これは MCP、蛍光面の広がり関数を無視したことと、光電子、2 次電子の放出角度分布、エネルギー分布の条件の与え方などによる誤差と考えられる。

3.2 拡大率、ひずみ特性

格子パターンを入射して測定した 3 者の拡大率、ひずみ特性を図 8 に示す。ひずみは湾曲入力窓の構造の試作管では 6% 程度、F.O. 入力窓の構造では 3% 程度で、3 者中最も少ない。平板入力窓の構造の試作管は 5% 程度で、平板光電面でも充分に小さなひずみ特性が得られる。また、拡大率、ひずみ特性ともに計算結果とほぼ一致した。

4. む す び

イメージ管では静電集束レンズにより生じる像面湾曲を補正するために、光電面を湾曲させる必要があり、主軸に垂直な結像面を得る最適な光電面の曲率が存在する。3 種類の異なる電極構成から成る静電集束

型 MCP 内蔵イメージ管の特性をコンピュータシミュレーションにより検討し、それに基づく試作実験により、それぞれの最適設計条件を明らかにし、さらに 3 種のイメージ管の相対的優劣を明らかにした。

入力窓に湾曲したガラス窓を用いたイメージ管では光学レンズによる入力像の広がり関数を考慮して、像面がなるべく平面となるように、仕様を定めた。中心解像度 25 lp/mm、周辺解像度 10 lp/mm、ひずみ 6% の特性が得られた。入力窓に F.O. を用いた構造のイメージ管では、光学レンズによる光学像の広がり関数は無視できるので、静電集束レンズのみによる主軸に垂直な結像面を得る最適な光電面の曲率が選択される。中心、周辺解像度ともに 25 lp/mm、ひずみ 3% の特性が得られた。平板入力窓で平板光電面のイメージ管では光電面における入力像の広がりはない。平板光電面でも垂直な結像面を得るために光電面に近接して細かなメッシュを置いた構造のイメージ管で、中心、周辺解像度ともに 25 lp/mm、ひずみ 5% の特性が得られた。

試作管の製作を担当した、白田要助加工グループ長および加工グループ諸氏に感謝する。

(昭和 60 年 4 月 1 日受付、昭和 61 年 1 月 14 日最終受付)

(参 考 文 献)

- 1) テレビジョン学会編：不可視情報の画像化，昭見堂 (1979)
- 2) 木下，加藤，鈴木：“紫外線用イメージ管”，テレビ全大，3-8 (1980)
- 3) B. J. Mayo, A. W. Bennett: “The Use of Meshes to Reduce the Effect of Errors in Certain Types of Electron Tube”, Adv. in Electronics and Electron Phys., **33A**, pp. 571-578 (1972)
- 4) 加藤，鈴木：“イメージ管における集束電子レンズの検討”，テレビ全大，4-15 (1981)
- 5) 加藤，木下，杉山，鈴木：“イメージ管における集束電子レンズの検討”，信学技報，ED 81-31 (June, 1981)
- 6) C. Weber: “Calculation of Potential Fields and Electron Trajectories Using an Electronic Computer”, Phil. Tech. Rev., **24**, pp. 130-143 (1963)
- 7) 小楠，三橋：“電界における大面積パターン結像の解析”，テレビ学電子装置委，第 29 号 (1968)
- 8) G. D. Smith: “偏微分方程式の解法”，サイエンス社 (1970)
- 9) B. A. Carre: “The Determination of the Optimum Accelerative Factor for Successive Over Relaxation”, Computer Journal, **4**, pp. 73-80 (1961)
- 10) J. R. Hechtel: “Electron Ray Tracing by Mean of Resister Network and Digital Computer”, I. R. E. Trans., ED-9, pp. 62-68 (1962)