

第 7 編 イメージアンプリファイヤ

第 1 章 解 説

津 田 元 久 1 頁

- 1 イメージアンプリファイヤが開発されるにいたった背景
- 2 量 子 雑 音
- 3 過 程
- 4 イメージアンプリファイヤのレスポンス関数応用例

第7編 イメージアンプリファイア

第1章 解説

1. イメージアンプリファイアが開発されるにいたった背景

1-1 X線被曝と透視環境

従来から行なわれて来たケイ光板による透視を行なうには、充分な暗室が必要になる。暗室中では患者および医師の行動が制限されるばかりでなく、暗闇におかれた患者の心理的な動揺が、しばしば検査の進行に影響を与えることがある。一方医師の側からみると、透視を行なう前に20分以上の暗調応を行なう必要があり、時間的な不経済が問題にされる。

暗室にしなければ透視ができないということは像が暗いからであり、部屋を明るくすると、像の中の輝度の微細な変化は周囲の明るさの中に埋もれてしまって識別できなくなるからである。したがって、もしX線量率を極端に高くして、非常に明るい像をケイ光板上に作るならば、多少部屋を明るくしても透視が行なえるはずである。

要するに、像を明るくすればよいことになるわけであるが、X線量率を高くして像を明るくすることは、人体に対する生物物理的な影響から許されない。一般に透視による患者および医視の被曝線量は非常に大きいものであり、これを軽減させることが以前から要望されていたものである。(ICRU勧告にも、透視は特に必要な場合にだけ行ない、漫然と透視をすることはつづまなければならないという意味の記述がある)

そこで、X線量率を上げることなく、像を明るくする手段の出現が望まれていたわけである。

1-2 ケイ光板透視におけるX線像の質

元来、人間の眼は暗いところではよく物が見えないもので、普通の室内照明のもとでは新聞の字はすべて読めるが、月夜の屋外では新聞の大見出しがやっと読めるというような経験をした人も多いと思う。これは後に3.3で述べる画像のSN比が暗いところで悪くなるということに起因しているが、そのほかに眼の網膜細胞に明るい時に動作するものと、暗い時に動作するものがあり、暗いときに動作するものの方が密度が低く、したがって解像度も悪いということも原因している。

明ルサと眼の識別度の関係を図1に示す。

このような関係からもわかるように、非常に暗いX線像をなんらかの手段で明るくしてやれば、像の細部の識別が容易になり、像の質が向上するはずである。

従来のケイ光板透視では、像の質がかなり悪く、その改善も要望されてきた。

1-3. 具体的解決策としてのイメージアンプリファイア

以上1.1, 1.2で述べてきたように、ケイ光板上のX線像を、X線量率を高くすることなく、(むしろ従来のケイ光板透視よ

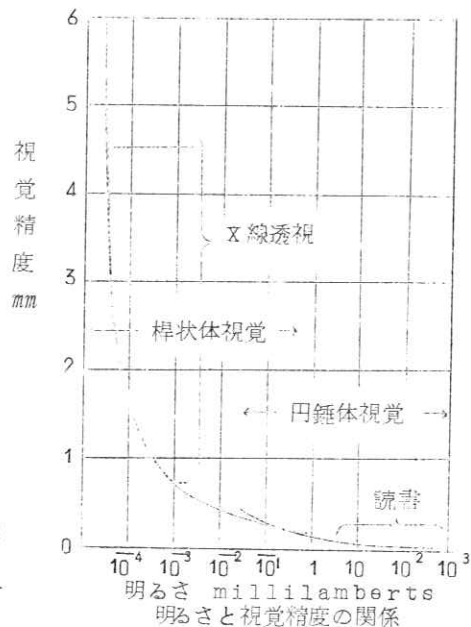


図 1

りもX線量率を低くして)隔段に明るくする手段があれば、多くの点で有利に透視ができることになる。これを具体化したものがイメージング管である。

イメージング管は、これに外部から電気エネルギーを与えて像の輝度を増強する装置で、輝度倍率としては1000倍以上が得られる。

イメージング管が開発されると、それ以前には不可能であったり、考えてもいなかったことが可能になってきた。すなわち、X線映画、X線テレビジョン、イメージング管を使った間接撮影などがそれである。

X線映画は、ケイ光板上の光像を映画に撮ればよいわけであるが、患者の被曝線量という点から、従来は不可能とされてきたものであった。しかし、仮に1000倍の輝度倍率を持つイメージング管を使えば、ケイ光板を撮影する場合の1/1000の線量率でよいことになり、はじめてX線映画が実用に供されるようになったわけである。

X線テレビジョンについても映画と同様で、X線像が非常に明るくされたので、はじめて撮像が可能になったばかりでなく、むしろ従来のケイ光板透視より少ない線量率で、はるかに良質の像が見られるようになった。そのほかに、X線テレビジョンには、多人数で同時に透視が行なえること、速くはなれたところで透視が行なえるので医師のX線被曝が全くなくなることなど、従来のケイ光板透視にはなかった新しい利点が数多くある。

イメージング管を使った間接撮影では、直接X線撮影の1/10従来の間接撮影の1/50程度のX線量で、70mmフィルムに撮影ができるようになり、必要線量を隔段に引き下げることが可能になった。

このように、イメージング管の応用とそれに伴う新分野の開拓は、今後もますます盛になると予想される。

2. イメージング管の原理と構造

2-1. 原理

イメージング管の主要部はイメージング管である。このイメージング管は一般に像変換管と呼ばれるもの一種で、その動作はつぎのようなものである。(図2参照)

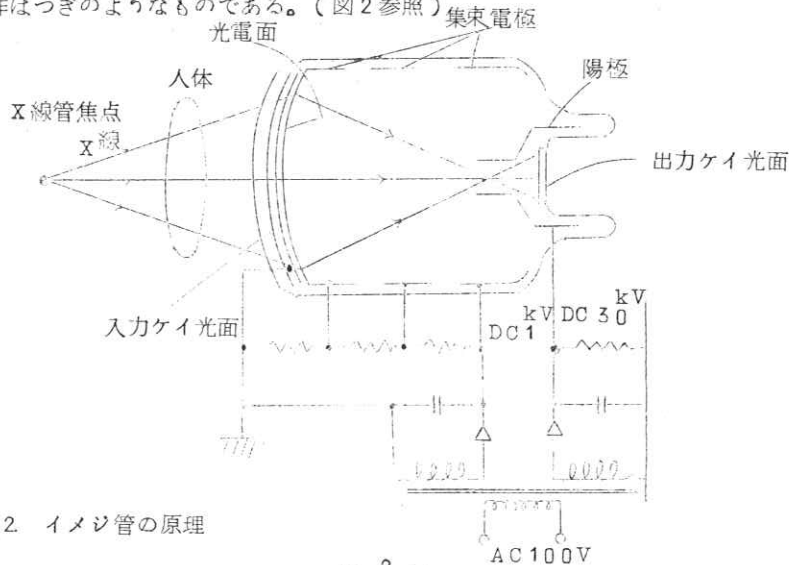


図2. イメージング管の原理

- 1) X線焦点から放射されたX線は物体を透過し、イメージ管の入力ケイ光面上にX線像を作る。
- 2) X線像は入力ケイ光面で可視光線に変換され、この可視光線は入力ケイ光面に接して作られた光電面(陰極)から光電子を放出させる。
- 3) 光電子は集束電極および陽極で作られる静電レンズの作用で、集束、加速されて出力ケイ光面上に電子像を作る。
- 4) 電子像は出力ケイ光面で可視光線に変換される。
- 5) 出力ケイ光面の輝度は(像の縮小率)²×(陽極電圧)に比例する。(像の縮小率)²の項は電子密度の上昇による利得を示し、(陽極電圧)の項は電子エネルギーの上昇による利得を示している。
- 6) 出力ケイ光像は縮小されているので、光学系で拡大して観察するか、テレビジョンカメラで撮像してブラウン管で観察する。
- 7) イメージ管の出力像を光学系で拡大して眼で観察する場合、像の明ルサは出力像を直接眼で見る場合に比べて減少することはない。

イメージアンプリファイアは上に述べたイメージ管を主要部とし、これに電気的なエネルギーを与えるための電源部、イメージ管を保護する管容器、出力像を拡大観察したり各種カメラに送るための光学系を組合わせてなる。

電源部はイメージ管内で電子を加速集束させる電源を内蔵し、その電圧は直流25~30kVである。このほか後に述べるゲッタイオンポンプ(イメージ管に組込まれている)を作動させる電源をも内蔵している。

管容器はイメージ管を保護するばかりでなくX線の遮蔽および高電圧の遮蔽も兼ねている。

イメージ管内に残留ガスがあると、陽極付近の電子が最も集中するあたりでガス分子のイオン化が起こる。このイオンは陰極の中心部に集まり2次電子を放出させる。この電子は再び加速されて出力ケイ光面に達して輝点を作る。これをイオンスポットと呼んでいる。

このイオンスポットは像の診断のさまたげになるばかりでなく、陰極の光電面を破壊するおそれもあるので取除く必要がある。そのために、イメージ管にゲッタイオンポンプを組込んで残留ガスが発生したら適時このポンプを動かしてガスを吸着させてしまうようにしている。

2-2 構造

イメージアンプリファイアの像質を支配するのはイメージ管である。そこでここではイメージ管の構造について述べることにする。

イメージ管の主な構成要素は1)入力面、2)電子レンズ、3)出力ケイ光面がある。

1) 入力面

入力面は出力像の歪(中心部と周辺部で像の縮小率が異なるために起きる)を少なくするために出力ケイ光面に対して凹になるような球面状に作られている。(図2参照)

入力面の構造は図3に示すように薄いガラスをはさんで、ケイ光体層と光電面が作られるもの、図4のようにアルミニウムなどの板の出力ケイ光面側にケイ光体層を作り、その上に透く薄い透明物質層を被着した上に光電面を作るもの、または図4のアルミニウムの代りにイメージ管の管壁のX線入射部分の内側に直接入力面を作るものなどがある。

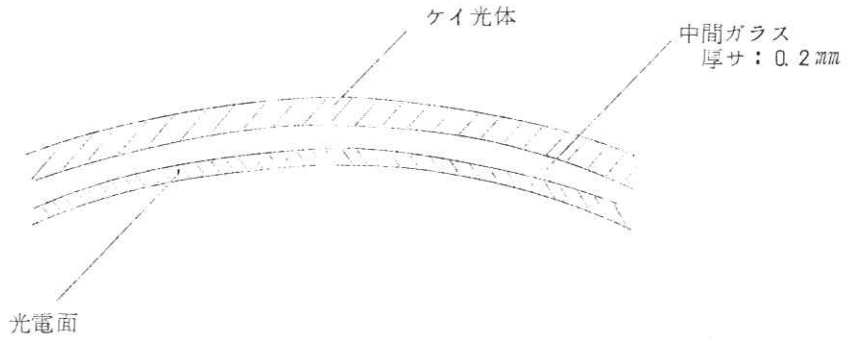


図3 入力面の構造(中間ガラス使用)

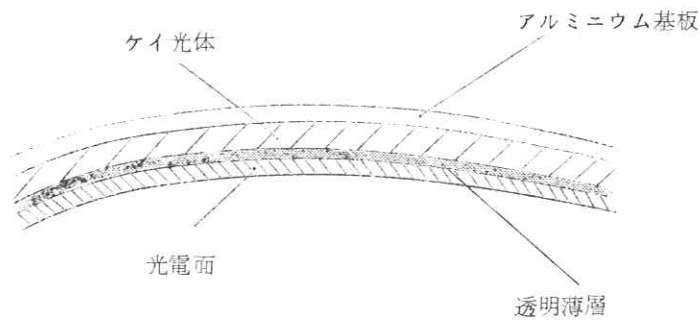


図4 入力面の構造(中間ガラスなし)

ケイ光体はX線に対して発光効率のよいZnS・Agや(Zn, Cd)S・Agなどが使われている。いずれの場合も光電面は管全体を排気して真空にした後、蒸着によって作られる。

2) 電子レンズ系

イメージングアンプでは一般に静電レンズ系が用いられており、入力面もレンズ電極の一部を構成する。レンズ電極は図2に見られるように、管壁内面に導電被膜を付けたもの、図5に見られるように金属製の円筒状電極を用いたものがある。

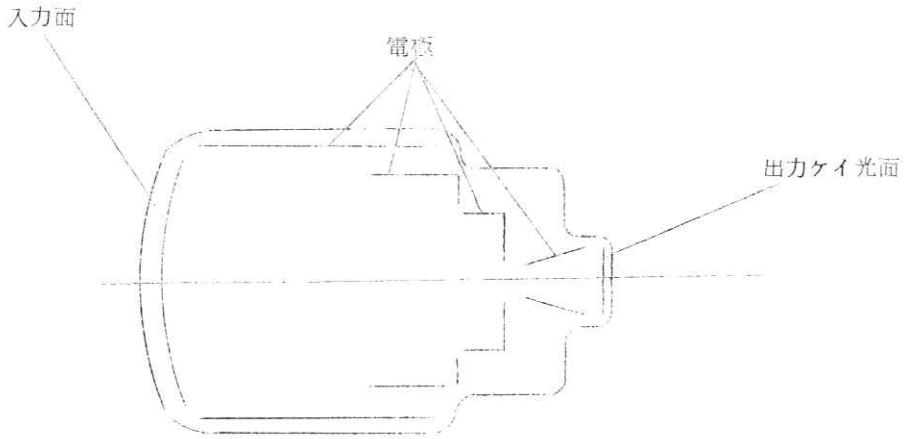


図5 全属電極を使用したイメージ管

これらの電極に適当な電位を与えて、入力面と出力ケイ光面との間に適当な電界分布を与えると、光電面から出発した電子は出力ケイ光面上に縮小像を作るわけである。

イメージアンプリファイアのレンズ系では結像をすることのほかに、電子にエネルギーを与えて出力ケイ光面の発光をうながすことが重要な役割になっている。

電子レンズ系では、光電面を出発する電子の初速度は、方向および絶対値が一定ではなくある分布を持っていて、これが収差の原因になっている。

3) 出力ケイ光面

出力ケイ光面の構造は、厚さ1mm程度のガラス板に被着されたケイ光体、テレビジョン用のブラウン管のケイ光面と同様である。ケイ光体としては、視感度に適合する黄緑色の発光のものが選ばれる。イメージ管の出力像は必ず何らかの方法で拡大されるので、充分細かい粒子のケイ光体を使っておく必要がある。目安としては、入力ケイ光体粒子の大キサと出力ケイ光体の粒子の大キサの比を、像の縮小率に等しくしておけばよい。

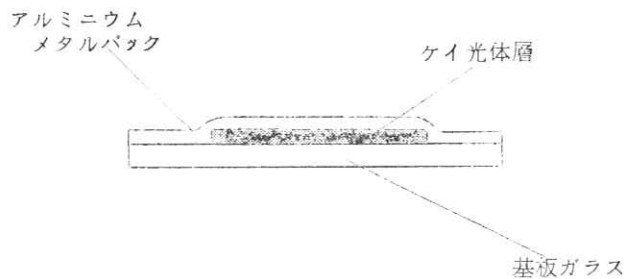


図6 出力ケイ光面

図6に見られるアルミニウム・メタルバックは、出力光を増すだけでなく、出力ケイ光面の光が入力面にフィードバックされるのを防ぐ役目も果たしている。メタルバックは周知の通りイオン焼の防止効果もある。

3. 画質に影響を与える諸因子

3-1 各段階におけるレスポンス関数

イメージングアライア中に含まれる各要素はすべて出力像の画質に影響を与えている。

1) 入力面

入力面ケイ光体層のレスポンス関数はX線用ケイ光板のそれと同じと考えてよい。

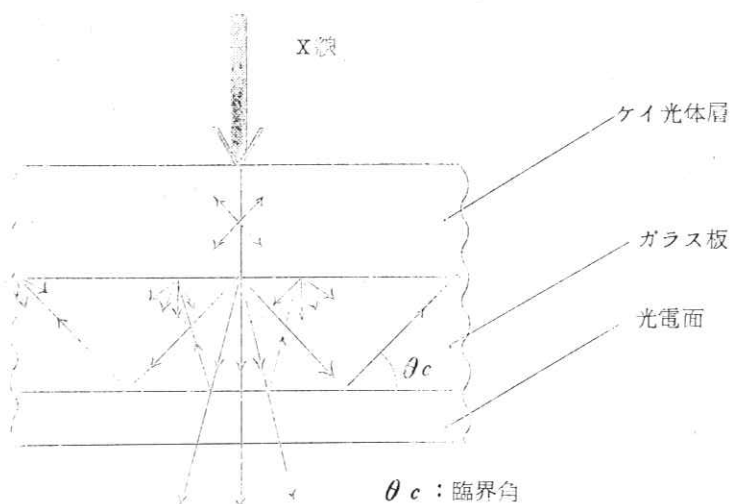


図7 入力面での光の拡散

図7は入力面の断面を示す。この構造では中間ガラス層の光電面側では、ケイ光体層からの光が反射を起こす。これらの反射光は再びケイ光体層にもどるが、ケイ光体層は拡散面なので光はこの点からすべての方向に向って放射される。この成分は高周波域でのレスポンス関数の値を低下させる。

また、このような構造では光の入射角によっては全反射を起こす。図7の θ_c は臨界角を示し、 θ_c 相当の円の外は光量が一段少なくなるはずであり、これもレスポンス関数の形に影響を与えるはずである。

次に光電面では、斜に入射した光の方が光電子放出効率がよいといわれている。このためにガラスと光電面の境界で測定した強度分布と、光電面から放出される電子の強度分布では形が違ってはいるはずである。

このようにイメージングアライア入力面のレスポンス関数測定については、かなり問題が多いようである。

2) 電子レンズ系

光電面から放出された電子はランダムな初速度を持っている(方向および速度の絶対値)ので、光電面の一点から出発した電子群は電子レンズの中である太さを持ったビームになる。これが光学における色収差に相当する。このほかにも電子レンズの不完全さに起因する収差も考えられる。電子レンズのレスポンス関数

については、線状の光電面からの電子ビームの中における電子分布を求めて、計算した報告がある。

3) 出力ケイ光面

出力ケイ光面は入力ケイ光面とよく似た構造であるが、出力側に光電面がないこと、ケイ光面自体が非常にうすい点が違っている。したがってレスポンス関数としては入力ケイ光面よりかなりよいものになるが、前にも述べた通り拡大して観察するために、入力ケイ光面の場合よりかなりよい性能が必要とされる。

ケイ光の反射の効果は入力面の場合と同様であるから、反射防止膜なども考えねばならない場合がある。

メタルバックを施すと実効的なケイ光体層の厚サが増したと同様の効果をおよぼすはずで、メタルバックは輝度を増すが、レスポンス関数は低下させているはずである。

3-2 バックグラウンドの増大によるコントラストの低下

イメージ管内では各種の原因からバックグラウンドが発生する。これは全体として画像のコントラストを低下させることになる。その原因はつぎのようなものが考えられる。

1) 入力ケイ光面からの可視光線が管内で反射して、ふたたび光電面にもどって電子を放出させ、出力像全体に付加的な輝度を与える。

2) 光電面製作過程で管壁や電極もわずかながら光電効果を持つ。入力面からの光によって、これらの面からも電子が放出されバックグラウンドを作る。

3) 極く微弱な管内放電で生じたイオン、電子によるバックグラウンドもあり、光電面からの熱電子放射もバックグラウンドになる。

4) X線が直接に出力ケイ光面を発光させてバックグラウンドを作る。

3-3 雑音

画質を論ずるうえで、雑音は必ず考慮に入れなければならない重要な問題であるが、イメージ管に現われる雑音としては、量子の統計的な変動による量子雑音と、ケイ光面の粒状性にもとづく時間的にも空間的にも変化しない雑音がある。

1) ケイ光面の粒状性

ケイ光体の粒子の大キサの分布にもとづく粒状性のほかに、ケイ光体層の作成過程で粒子がかたまって粒子群をなすために、この粒子群を単位とする粒状性が現われる。実際に観察される粒状性は、後者に起因するものの方が支配的である。このほかにもケイ光体層の厚サのムラも雑音として認められることになる。イメージ管では入力ケイ光面、出力ケイ光面にそれぞれ粒状性があり、両者を合成した粒状性が出力像中に観察される。

2) 量子雑音

像はなんらかの量子の分布で成立しているものである。したがってその量子の統計的な分布がある。X線量子、電子、光子などの分布はポアソン分布であるとされている。

ある量子が一様に入射している面を考え、この面の上の一辺が単位長の正方形を取出してみたとき、この中に単位時間内に落ち込む量子数を継続的に観測すると、その値は平均体 n の上下にランダムにバラつく。このバラツキを標準偏差で示すと \sqrt{n} になる (ポアソン分布の性質から)。すなわちいま考えている正方形に入射する量子数は $n \pm \sqrt{n}$ と表現できるわけで、この \sqrt{n} が雑音と考えられる。

雑音は絶対値で評価するより、信号との相対的な値で評価する方が実際的である。そこで通信工学の方では信号対雑音比が用いられる (SN比)。この場合のSN比は

$$S/N = n/\sqrt{n} = \sqrt{n}$$

となる。これからわかるように量子数が大きくなるほどS/N比が大きくなり、したがって雑音が相対的に小さくなる。

このような雑音はイメージ管の中の各量子過程で起っている。

- 1) X線がイメージ管入力ケイ光面に吸収される過程
- 2) 吸収されたX線がケイ光体を発光させる過程
- 3) ケイ光体からの可視線が光電面から光電子を放出させる過程
- 4) 光電子が出力ケイ光体を刺激して可視線を放射させる過程
- 5) 出力光が光学系および人間の瞳孔を通して網膜を刺激する過程

これら各過程での量子密度を n_i とすると(各段階で縮小率を考慮に入れて密度を算出する), 最終的なS/N比は

$$S/N = 1/\sqrt{\sum_i \frac{1}{n_i}}$$

となり, n_i のうち最も小さい値のものが, 最も大きく最終のS/N比に影響する。

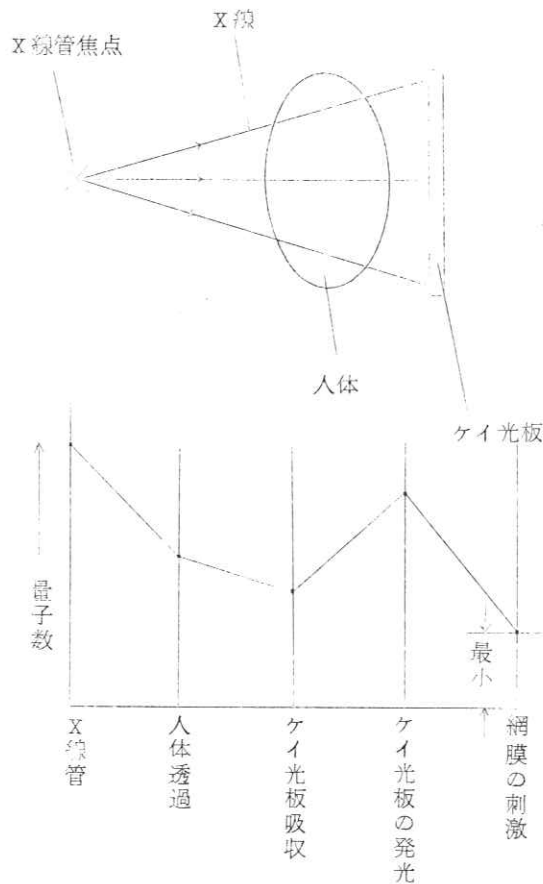


図8 ケイ光板による透視

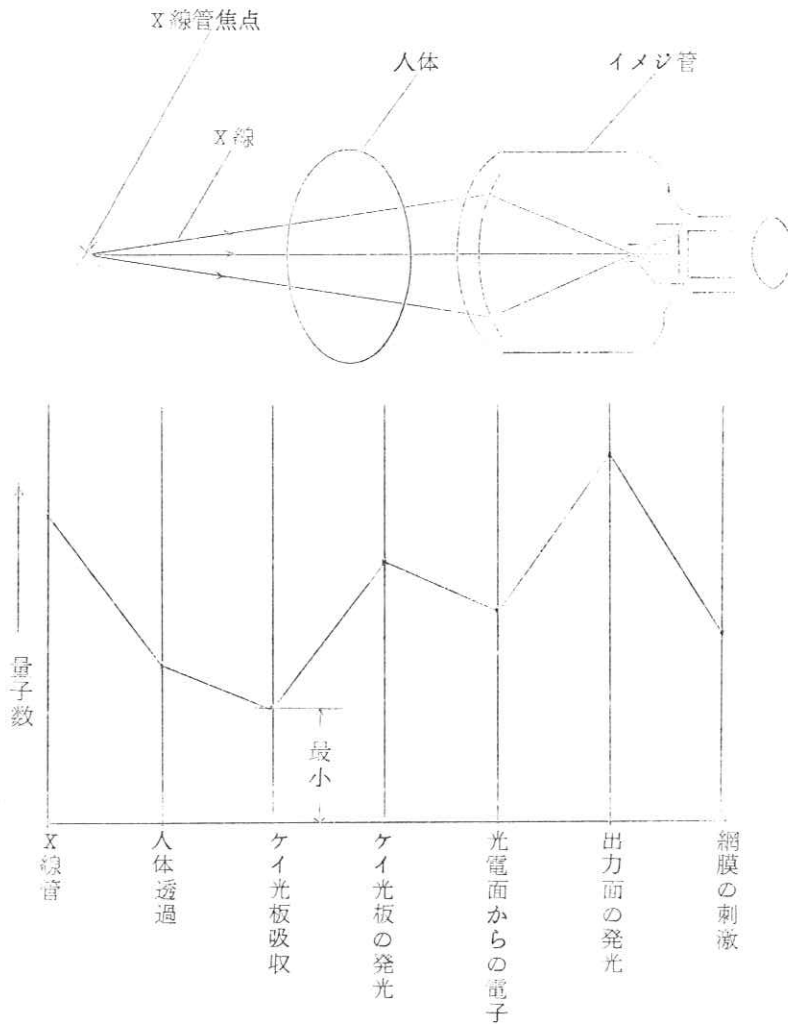


図9 イメージアンプリファイアによる透視

ここでX線透視の過程を、ケイ光板の場合とイメージアンプリファイアの場合とで比較してみると図8および図9のようになる。両者の場合、最小量子密度はそれぞれ眼及びケイ光電でのX線量子吸収の過程で起こりケイ光板の場合の方がずっと量子密度が低い。したがって最終像のSN比はイメージアンプリファイアの方がはるかにすぐれている。

4. イメージアンプリファイアへのレスポンス関数応用例

4-1 入力ケイ光面のレスポンス関数

入力ケイ光面の構造には2-2, 1)で述べたような2種類がある。製作上の問題は別として、レスポンス関数を使って両者の比較を試みるために、つぎのような測定を行なってみた。

図10のような配置で、面積形正弦波チャートを用いアナログ的にケイ光面のレスポンス関数を測定してみると、図11のような結果を得た。

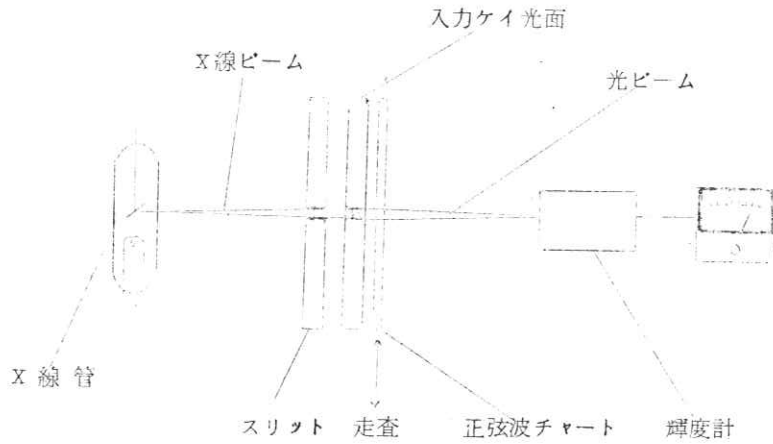


図10 レスポンス関数測定法

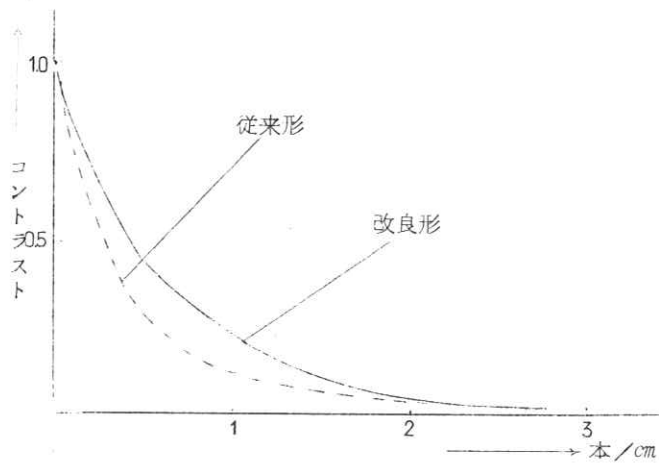


図11 入力ケイ光面のレスポンス関数

使用したケイ光体は $(Z. O.) S. A. g$ で 80 mB/cm^2 を用い中間ガラス板の厚さは 0.2 mm 、透明物質層としては亜酸化硅素の 500 \AA を用いた。

このレスポンス関数を比較してみると、中間ガラスを使わないケイ光面の方がかなりよいことがわかる。

4-2. 電子レンズ系のレスポンス関数

入力光電面上にスリットを作り、光電子を放出させると帯状の電子ビームができる。この電子ビームの巾方向の電子流密度を測定し、これをフーリエ変換すれば電子レンズ系のレスポンス関数が求められる。

このような方法で電子流密度分布を求めてみると、その分布はガウス分布に近いという。したがって、そのレスポンス関数もガウス分布になる。

イメージングプリファイア全体としてのレスポンス関数に最も大きく寄与するものは入力ケイ光面および出力ケイ光面であり、電子レンズ系のそれは上記2者に比べて少ないといわれている。

4-3. 拡大透視法

イメージングプリファイアで平行銅線群解像度試験片を透視する場合、X線管焦点として微小焦点を使って拡大透視を行なうと、解像度が最もよくなる拡大率がある。

このこともレスポンス関数を利用すると説明がつく。

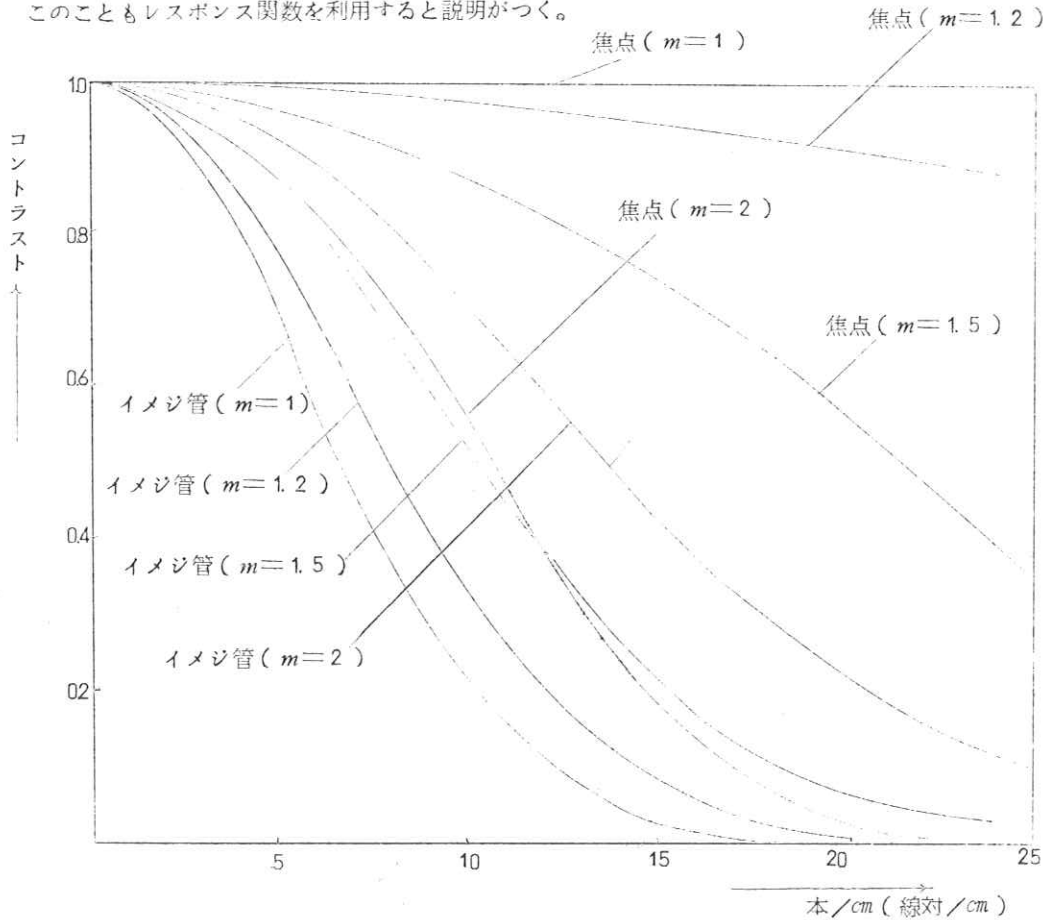


図12 イメージングプリファイアおよびX線管焦点のレスポンス関数

イメージングプリファイア：9インチ形
 焦点：0.5mm×0.5mm 巾方向
 m：像の拡大率

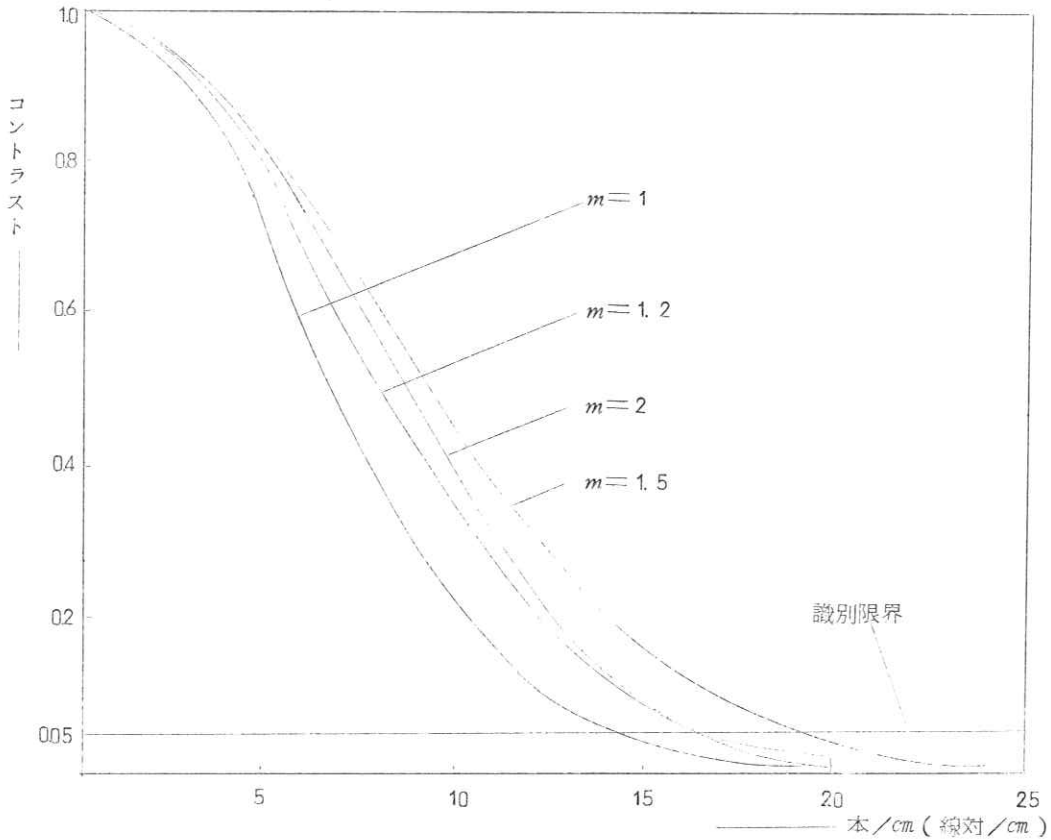


図 1 3 イメージングプリファイアと焦点の総合レスポンス関数

イメージングプリファイア：9インチ形
焦点：0.5mm×0.5mm 巾方向
m：像の拡大率

図 1 2 に 9 インチ形イメージングプリファイアおよび 0.5 mm×0.5 mm の X 線管焦点の巾方向のレスポンス関数を示す。

いま拡大率を m とすると、像は m 倍になり焦点は実効的に $(m-1)$ 倍の大キサで作用する。この場合イメージングプリファイアのレスポンス関数は、像が m 倍になるのであるから横軸を m 倍したものに、焦点のレスポンス関数としては横軸を $1/(m-1)$ 倍したものになる (図 1 2 参照)。したがって総合的にはこの両者の積を求めればよい。この結果を図 1 3 に示す。

この図からわかるように、人間の眼の識別可能コントラスト限界を 5% とすると、解像度は $m=1.5$ 、 $m=1.2$ 、 $m=2$ 、 $m=1$ の順によい。しかしレスポンス関数全体としては $m=1.5$ 、 $m=2$ 、 $m=1.2$ 、 $m=1$ の順によい。

このようなことは焦点のレスポンス関数が良い値を示しているときに起こるものであって、焦点が大きい

ときは最近拡大率をもっと1に近くなって、実質的には密着透視の解像度をもっともよくなる。

