

電子顕微鏡の永久磁石励磁方式とその特性

Permanent Magnet Lens Systems of Electron
Microscope and these Characteristics木村 博 一*
Hirokazu Kimura

内 容 梗 概

電子顕微鏡などにおける電子レンズの励磁に永久磁石を使用すれば、その高度の安定性から高分解能が期待でき、また励磁電源を必要としないことから、保守操作が容易となる。本文は永久磁石励磁電子レンズ系の各種型式とその特性について記すとともに、焦点距離の可変方法、性能、減磁に対する安定性について記した。そのうち並列励磁2段レンズ系は日立 HM 型電子顕微鏡として、また内磁型3段レンズ系は日立 HS 型電子顕微鏡として、実用に供せられている。

〔I〕 緒 言

電子顕微鏡などにおける電子レンズ系の永久磁石励磁方式に関する研究は、最近磁石材料の進歩とともに発展しつつある。永久磁石励磁方式の特長とする点は次のごとくである。

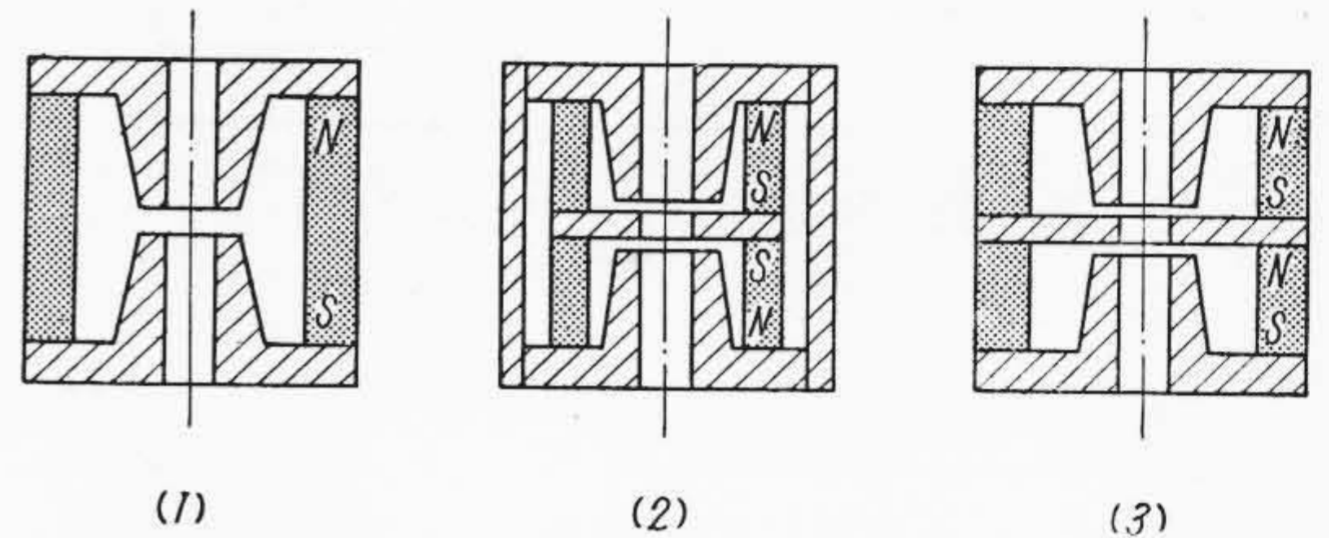
- (1) 電子レンズの励磁にコイルおよびその安定電源、制御装置などを必要としない。
- (2) 取扱いが容易で故障が皆無である。
- (3) 製作費が低廉で済む。
- (4) 永久磁石の高度の安定性のため高分解能が期待できる。
- (5) 従来の電磁石方式におけるごとく電源の開閉によるヒステシスの現象がない。
- (6) 電磁石方式におけるごとくコイル電流を流すことによるエネルギー損失がなく、維持費が安くなる。
- (7) 設計を適当に行えば、永久磁石の経年変化はまったく無視できる程度で、電磁石方式において永年の使用の結果生ずる真空管の老朽劣化、標準乾電池の交換などの保守の面倒と経費を要しない。

しかしながら、電磁石方式に代る高分解能多能性をもつレンズ系の研究はこれまでほとんどなされていない。その理由はかかる性質を与えるためには、漏洩磁場を生じない新電子レンズ系の構成、電子レンズの焦点距離可変方式の検討、十分な起磁力を与えるための磁気回路の設計、経年変化、外部磁場に対する永久磁石の十分安全な設計が必要であつて、それらについて基礎的な研究がなされていなかつたためである。筆者はそれらの点に関し詳細に実験的検討を加え、電磁石方式に比べて遜色のない各種電子レンズ系の設計法を与えることができたが、以下各種励磁方式とその特性、焦点距離可変の方法、性能などについて記す。

〔II〕 1 段電子レンズ系とその特性

(1) 1 段電子レンズ系の諸型式

* 日立製作所中央研究所

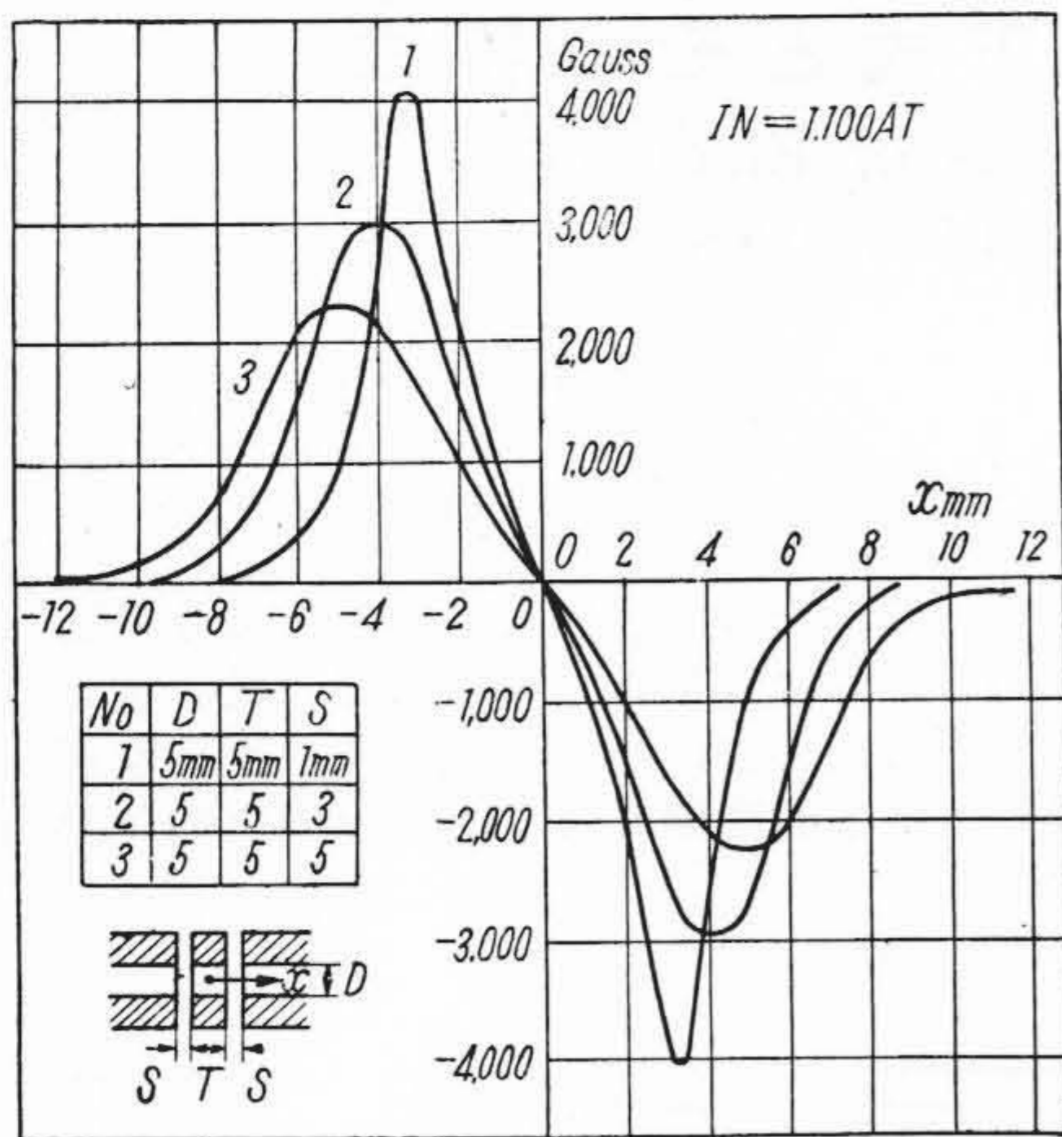


第1図 1 段電子レンズ系の諸型式

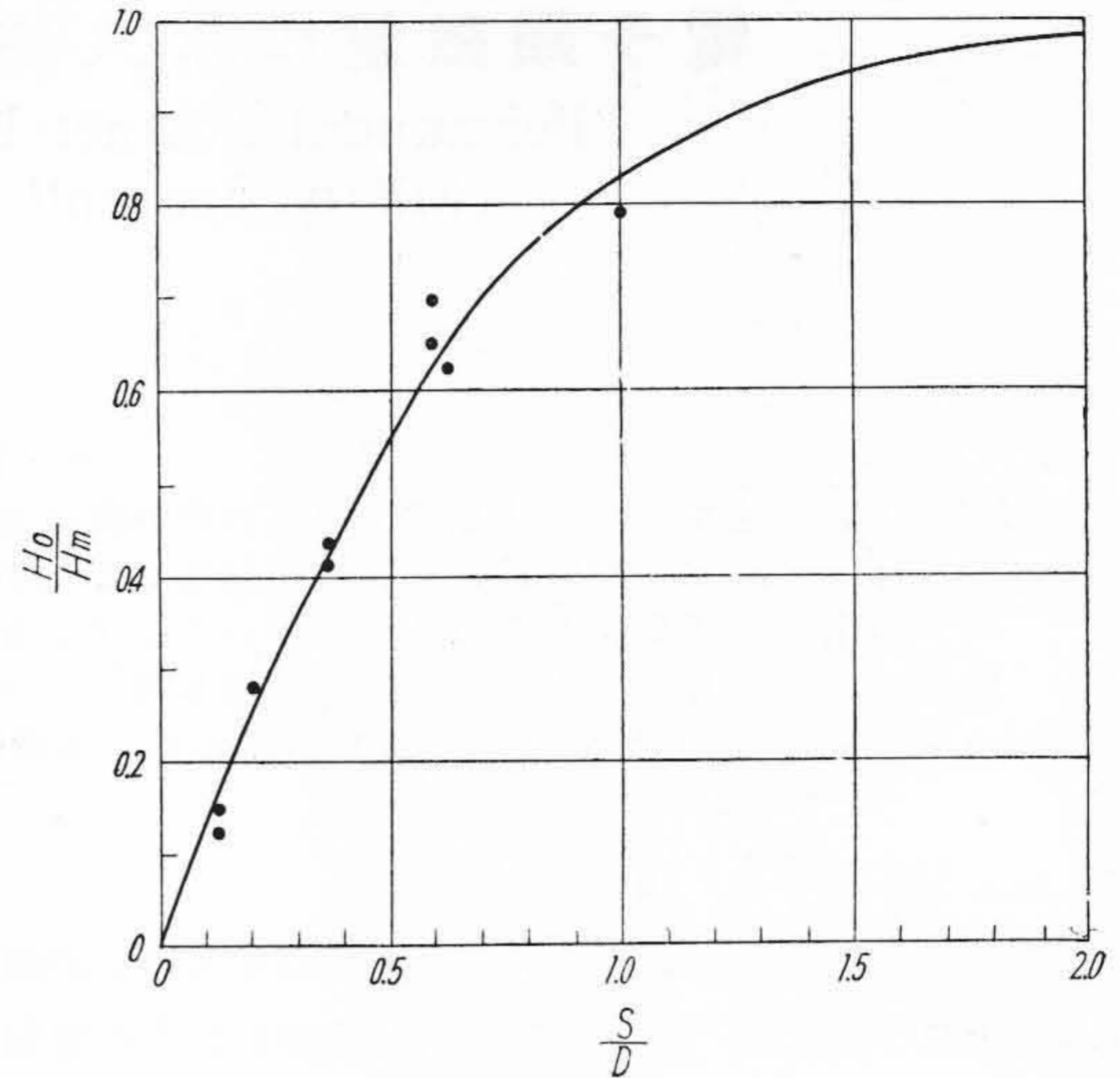
永久磁石で励磁される1段電子レンズ系としてもつとも簡単な型式は第1図(1)に示すごとく普通の一つの間隙と二つの磁極からなる電子レンズの両磁極をそれぞれ一組の永久磁石の両極に結び、その永久磁石の起磁力を間隙に与えるもので、初期の B. V. Borries 氏および E. Ruska 氏⁽¹⁾の実験に使用されている。しかしこれを単独に使用することは、外部漏洩磁場を生ずるため実用的でなく、また電子線に擾乱を与えるので高分解能を期待できない。これに対し同図(2)に示すごとく二つの間隙と三つの磁極からなる電子レンズの中央磁極を二組の永久磁石の1極に、他の2磁極を永久磁石の他極に結び、永久磁石は対称に互に同極を結ぶごとく配置し、外部円筒をもつて遮蔽させた型式は筆者らの提案⁽²⁾で、外部磁場を生ずることなく一つのレンズ作用をするので1段レンズ系として優れている。またこの場合永久磁石として一組のみ使用し二つの間隙を並列に励磁することも可能であつて、特に焦点距離を広範囲に変化する場合望ましい型式である。本レンズ系を並列励磁3磁極レンズ系と称する。第1図(3)に示すごとく二つの間隙と三つの磁極からなる電子レンズの二つの間隙をそれぞれ二組の永久磁石で直列に励磁する型式は、単一レンズの場合と同様外部漏洩磁場を生じ単独に使用するに適しない。

(2) 3 磁極レンズの特性

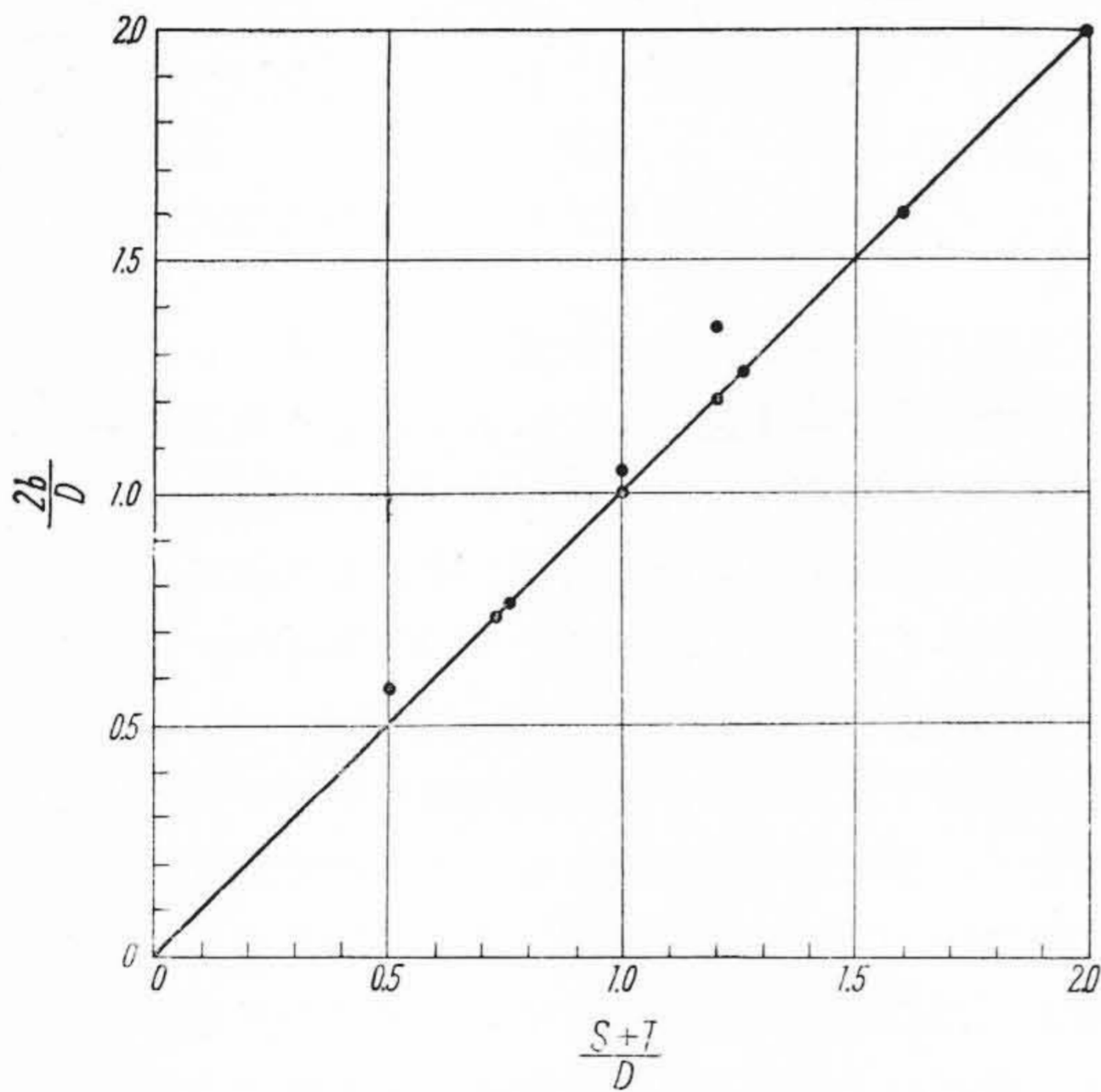
第1図(2)に示した前後対称な並列励磁3磁極レンズの軸上磁場分布は、第2図に実測例を示すごとく、従来の2磁極レンズの場合に与えられる鐘型近似の単なる



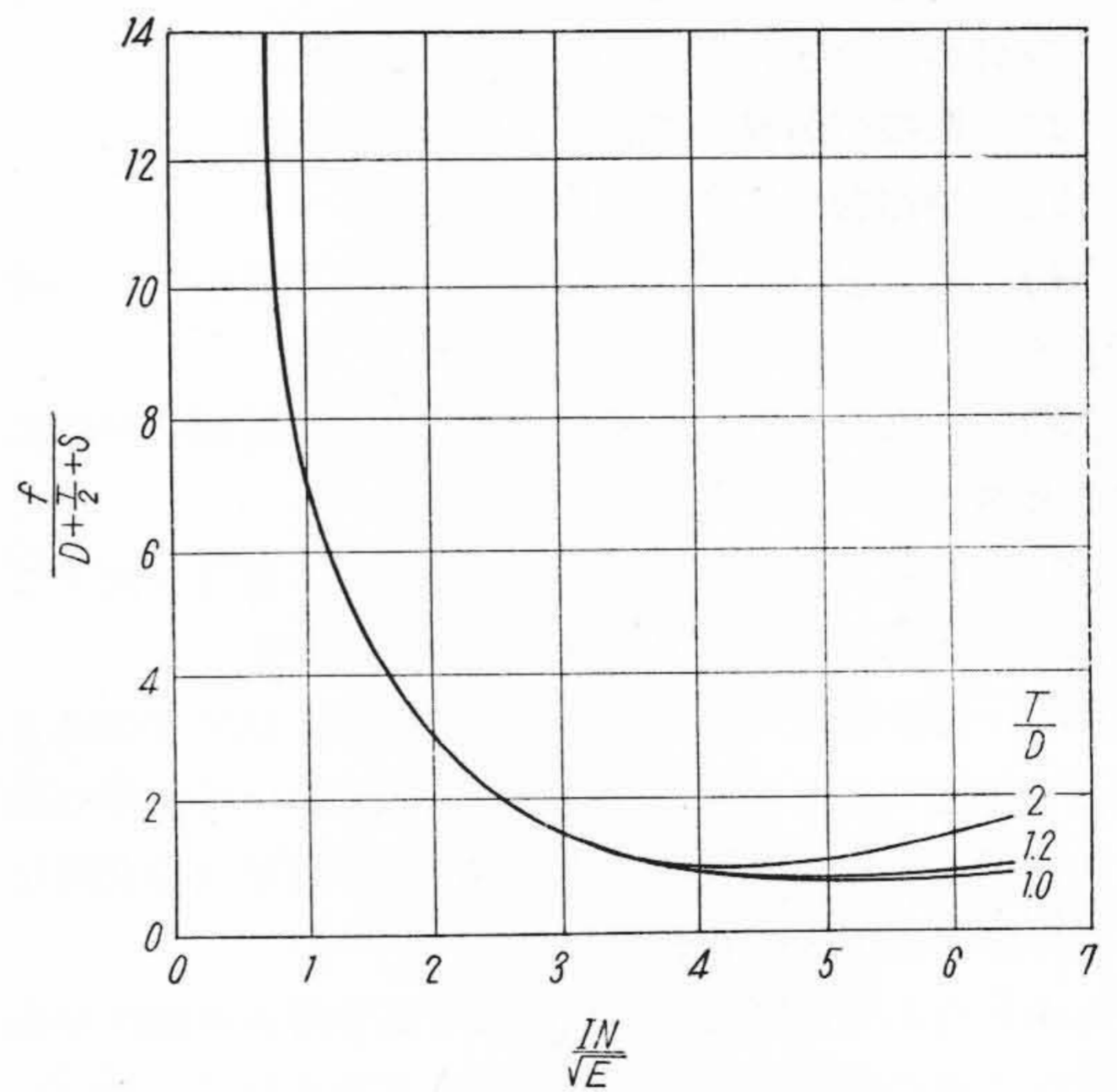
第2図 3磁極レンズの磁場分布



第4図 $\frac{H_0}{H_m}$ と $\frac{S}{D}$ の関係



第3図 $\frac{2b}{D}$ と $\frac{S+T}{D}$ の関係



第5図 3磁極レンズの焦点距離

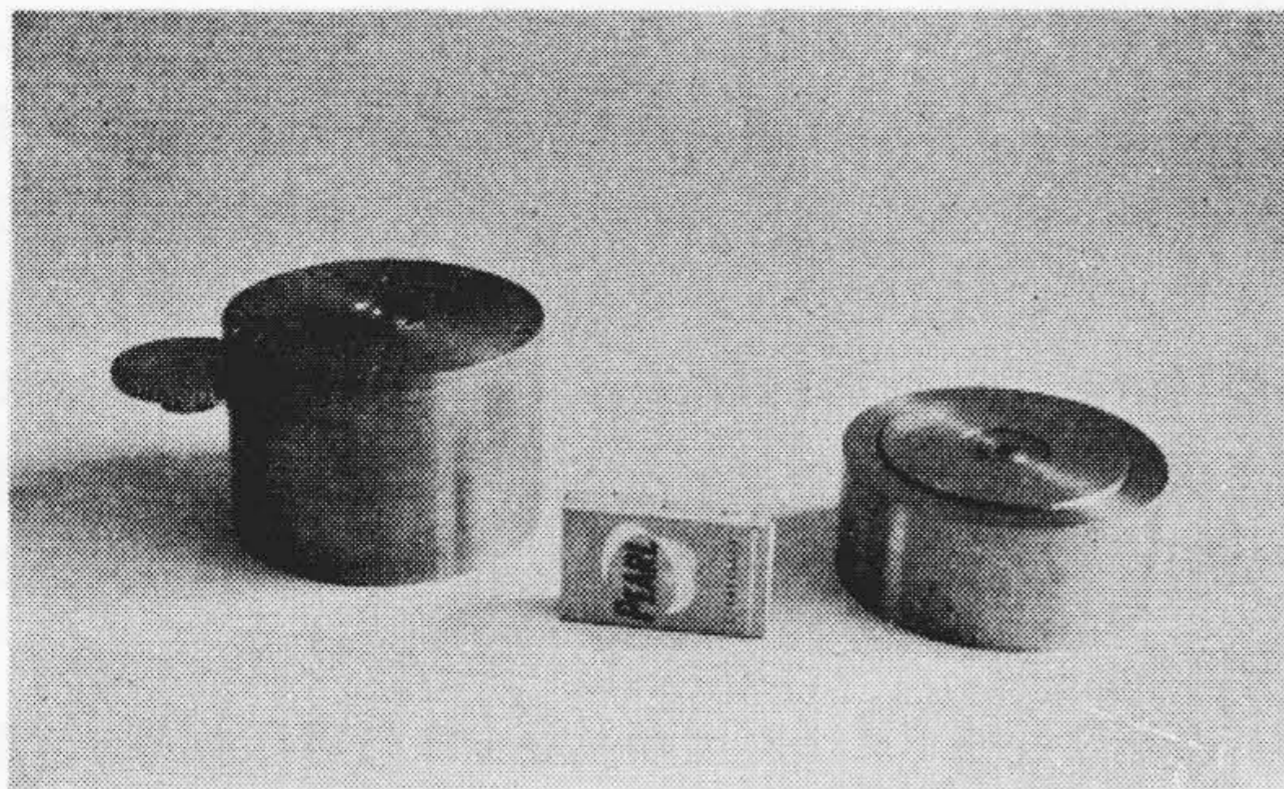
組合せで与えることはできず、中央磁極部分で鋭い変化を示す。この磁場分布は相似電極の電解槽における電位分布の一次微係数から与えたものとよく一致する。したがって軸上磁場分布はその積分値が鐘型分布をするものとして補正項を加え次のごとく与えることができる。

$$H(Z) = \frac{16^2 H_0 \left(\frac{x}{b}\right)}{\left\{13 + 2\left(\frac{x}{b}\right)^2 + \left(\frac{x}{b}\right)^4\right\}^2}$$

ただし中央磁極の中心を原点Oにとる。また $x = b$ において $H(b) = H_0$ で与えられ、 H_0 は軸上磁場分布の最大値を与えるものとする。上式において H_0 および b を知ればその軸上磁場分布がわかる。孔径 D 、間隙 S 、中央磁極の厚さ T を異にする種々の3磁極レンズにおいて b および H_0 を実測すれば、第3図および第4図のごと

く与えることができる。ただし H_m はレンズの平行部分の磁場の強さである。

3磁極レンズの焦点距離は第5図で与えることができる。同図は孔径 D 、間隙 S 、中央磁極の厚さ T を異にする種々の3磁極レンズの焦点距離 f を求め一般化したもので、縦軸に $\frac{f}{D + \frac{T}{2} + S}$ をとり、横軸に $\frac{IN}{\sqrt{E}}$ をとつてある。ここに IN は起磁力、 E は加速電圧で、中央磁極の磁気飽和のない範囲で、10%程度の誤差内で正しいことが認められる。同図より $\frac{f}{D + \frac{T}{2} + S}$ の最小値は0.7~1にあり、その最小値を与える $\frac{IN}{\sqrt{E}}$ の値は $\frac{T}{D}$ が



第6図 3磁極レンズ系

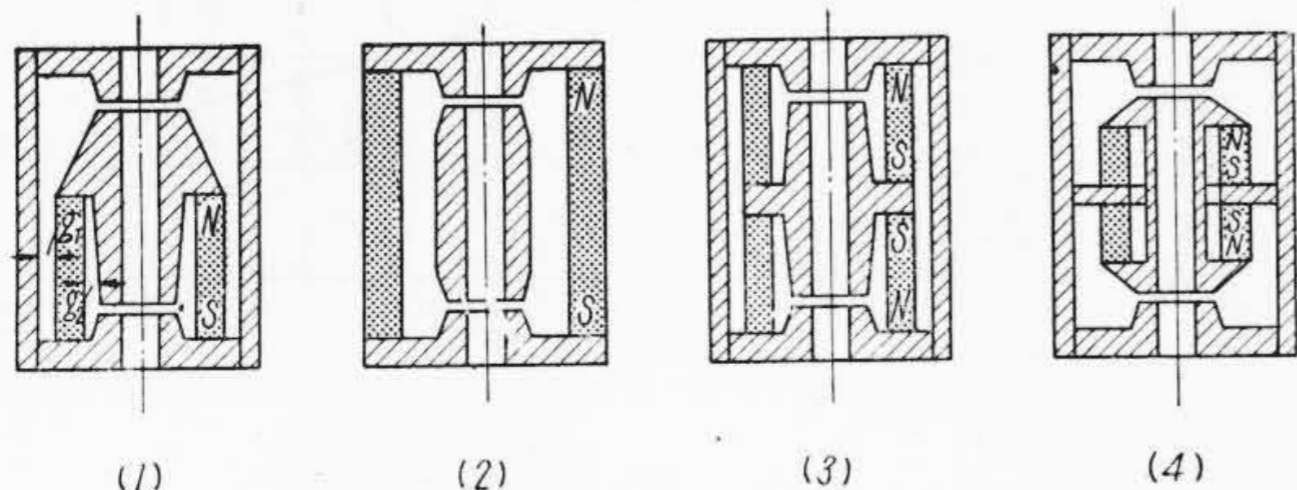
大になる程小さくなる。その場合 $\frac{IN}{\sqrt{E}}$ の値は4~6の範囲にあり、磁極孔径、間隙、中央磁極の厚さが小さくなる程、焦点距離は減少する。中央磁極は磁気飽和のため余り薄くできないので、3磁極レンズの焦点距離は普通の2磁極レンズの場合程小さくとることができない。しかし3磁極レンズは投射レンズまたは中間レンズとして使用する場合、回転色収差係数は常に0であり、倍率色収差係数は比較的小さい起磁力で0になる利点がある。また3磁極レンズの球面収差係数は2磁極レンズの場合と大体同じ程度である。

第6図は試作した3磁極レンズの外観を示し、左は起磁力約800 ATの可変焦点距離のもので、右は起磁力約500 ATの固定焦点距離のものを示す。

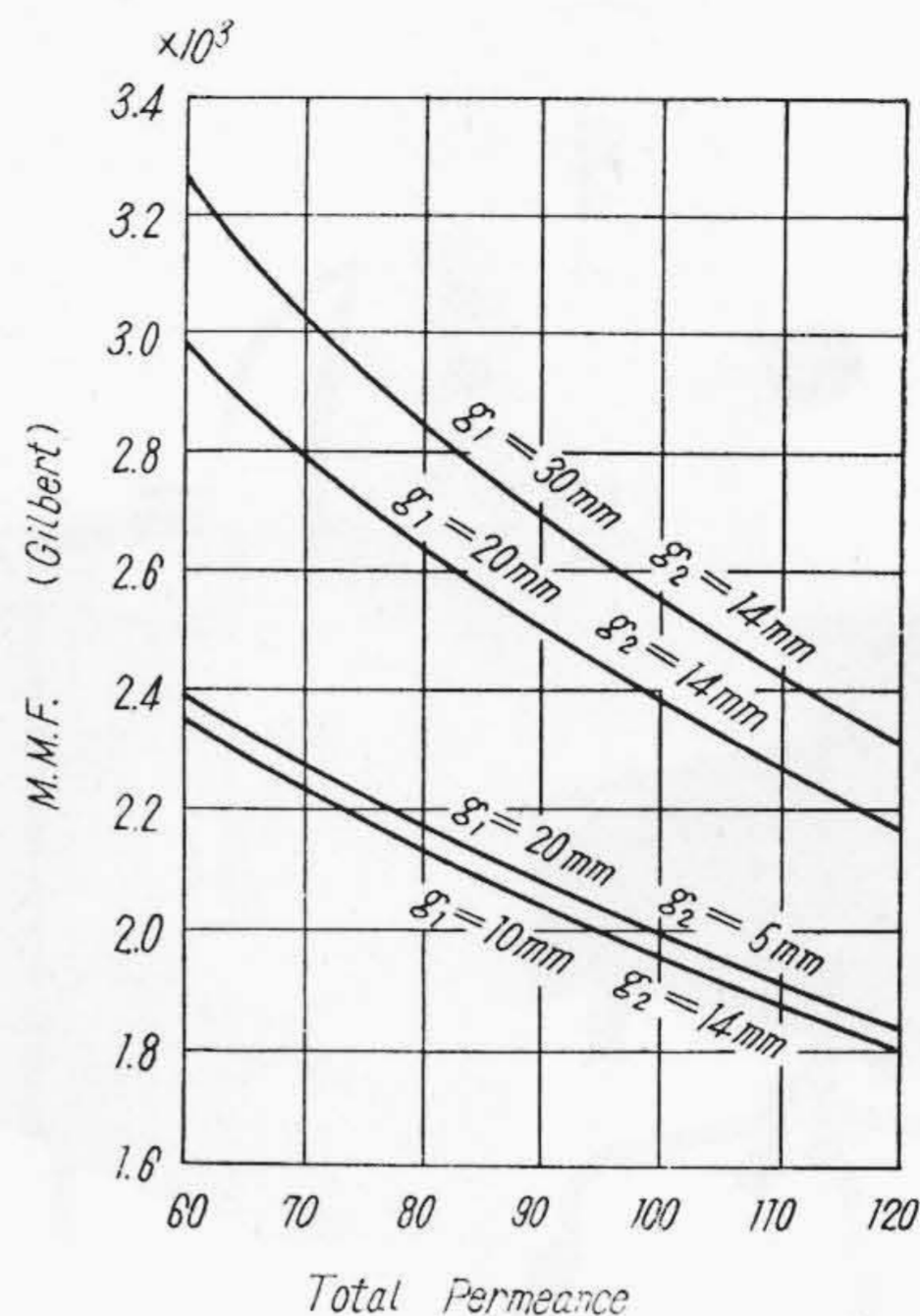
〔III〕 2段電子レンズ系とその特性

(1) 2段電子レンズ系の諸型式

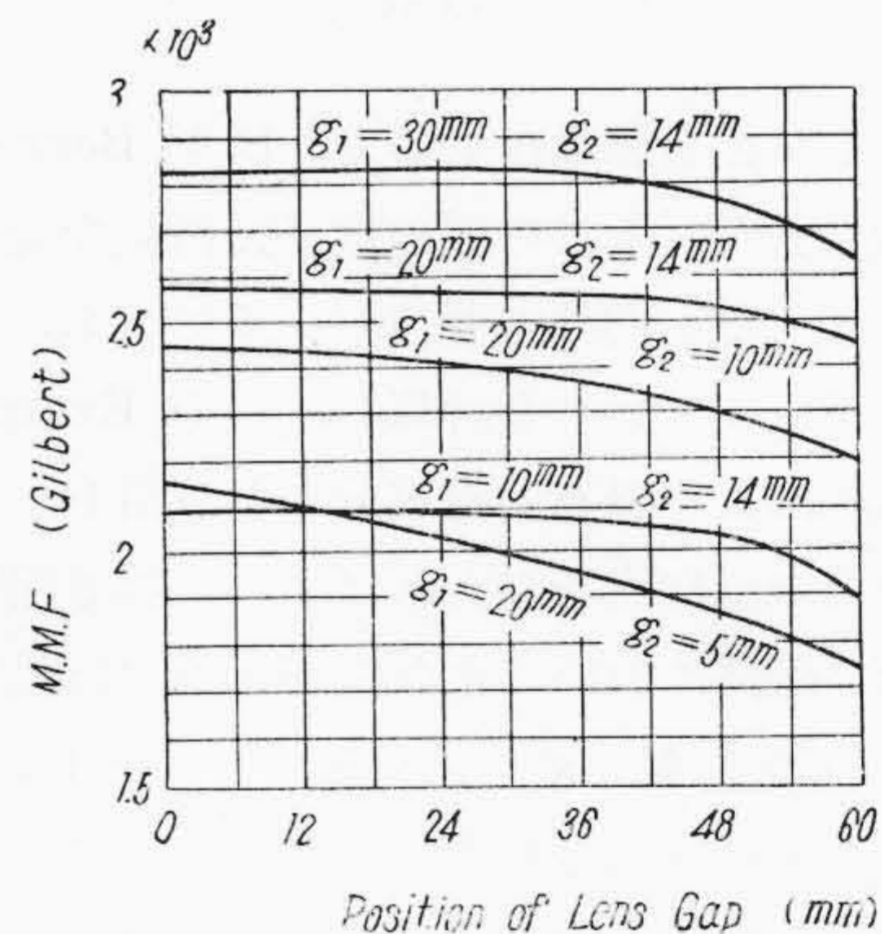
1段電子レンズ系は拡大率が低く単独に利用されることはほとんどなく、実用上有効なのは2段レンズ系またはそれ以上のものである。第7図は2段レンズ系の各種型式を示してある。同図(1)に示す型式は対物および投射レンズを一組の永久磁石で並列に励磁するもので、従来使用されている永久磁石励磁型電子顕微鏡⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾はすべてこの型式である。本型式を並列励磁方式と呼ぶ。同図(2)に示す型式は二組の電子レンズたとえば対物および投射レンズを直列に励磁するもので、外部漏洩磁場のため実用性に乏しいが、後記の直並列3段レンズ系



第7図 2段電子レンズ系の諸型式



第8図 電子レンズ間隙の全パーミアンスと起磁力の関係

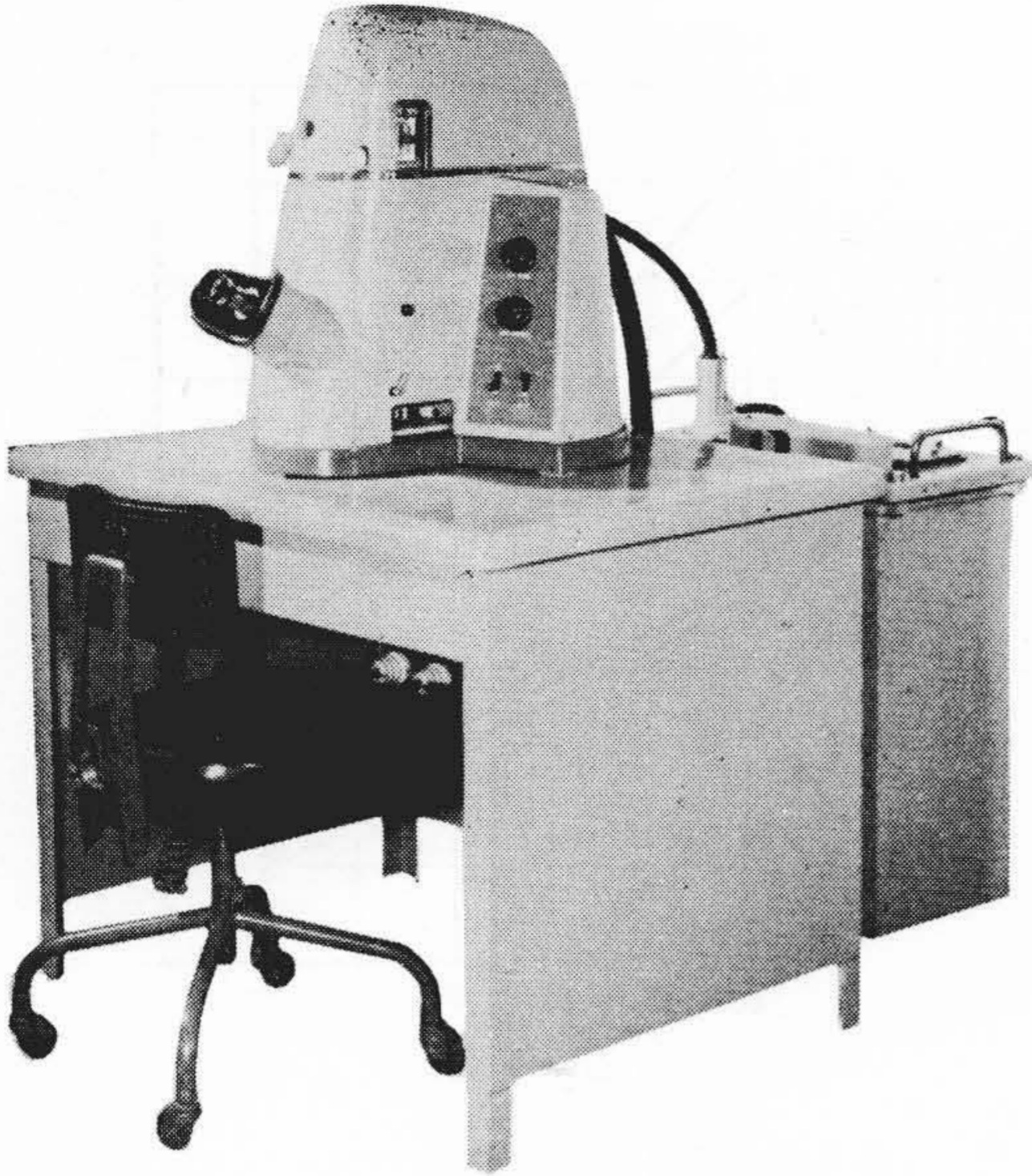


第9図 電子レンズの位置と起磁力の関係

の設計の基礎となるもので注目される。また第7図(3)に示す型式は E. G. Ramberg 氏⁽⁶⁾の提案によるもので、同図(1)の型式に比べ特にすぐれているといえないが、後記の内磁型3段レンズ系の設計の基礎となるもので、本方式を内磁型励磁方式と呼ぶ。同図(4)に示す型式は新しい提案で、磁気回路は永久磁石の一極から外部遮蔽継鉄を経て電子レンズの一磁極に結ばれ、永久磁石の他極は電子レンズのほかの磁極に直接結ばれ、電子レンズ間隙を励磁する。かかる磁気回路を二組対称に配置し永久磁石の同性の極を互に結合する型式では、当然漏洩磁束が多く磁石の利用率は悪いが反面おのおの起磁力の差の相互に対する影響は少い。本方式を外磁型励磁方式と呼ぶ。

(2) 並列励磁2段レンズ系

対物および投射レンズを一組の永久磁石で並列に励磁



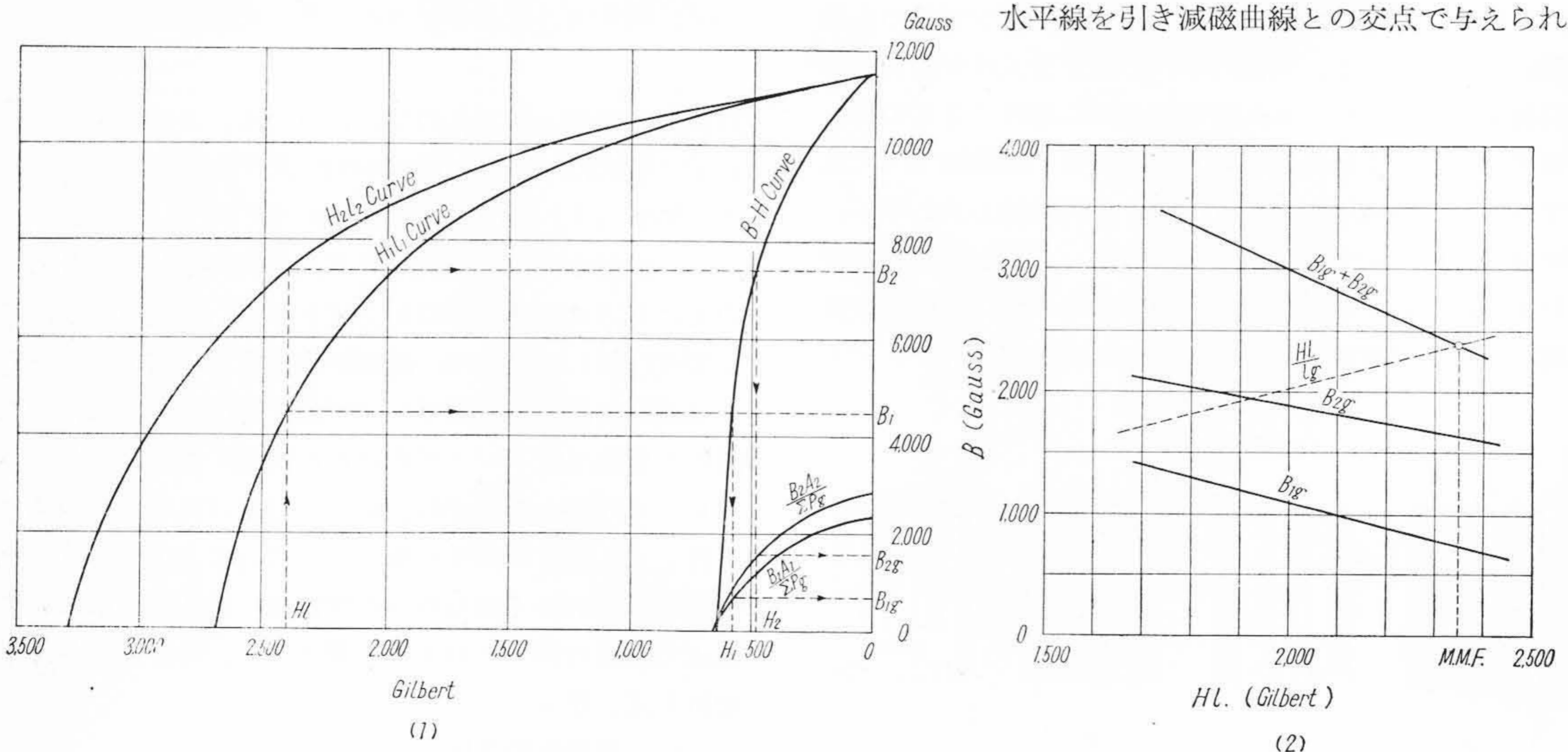
第 10 図 HM-2 型電子顕微鏡
 分解能 100 Å
 直接倍率 5,000 倍

する型式はもつとも簡単なもので、B. V. Borries 氏⁽³⁾、H. Reisner 氏⁽⁴⁾ ともこの種の電子顕微鏡を発表している。設計は永久磁石内外の漏洩パーミアンス、レンズ間隙におけるパーミアンスを計算し、一方 Evershed 氏⁽⁷⁾ の逐次計算法により磁石の磁束分布を算出し、永久磁石の減磁曲線上の動作点を与えればよい。第 8 図は第 7 図 (1) に示す磁路において永久磁石と外部継鉄および内部継鉄の間隙 g_1, g_2 をパラメータとし、電子レンズの間隙を含む永久磁石両端の全パーミアンスとその起磁力の関係を数値計算した結果で、同図より外側間隙

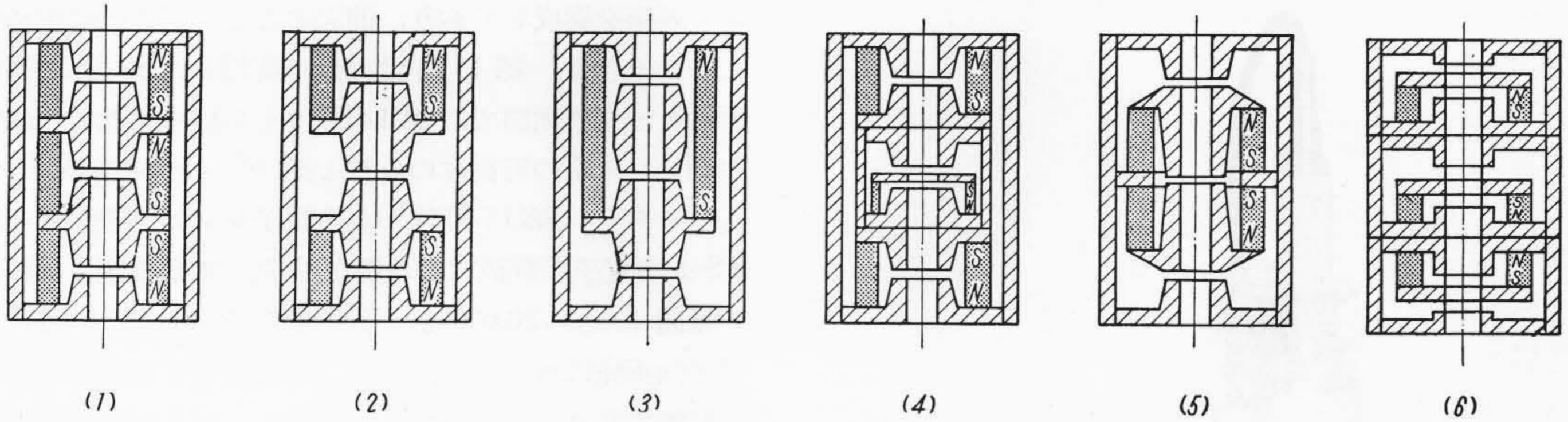
としては約 10 mm 以上、内側間隙としては約 5 mm 以上にとるのがよいと思われる。第 9 図は磁石内にある電子レンズの位置と起磁力の関係を示したもので、パラメータとして内外継鉄と磁石との間隙をとっている。同図の 0 mm の位置で 1 個の電子レンズは磁石の中央にあり、60 mm の位置ではほかの電子レンズからもつとも離れた所にある。同図から電子レンズが永久磁石中央より多少ずれた位置にあつてもその起磁力の低下は少いが、磁石の端に近づくにつれて漏洩磁束は急速に増大し起磁力が低下することが明らかである。第 10 図はかかる並列励磁 2 段レンズ系の磁路をもつ HM 型電子顕微鏡⁽⁵⁾ の外観を示したものである。本顕微鏡は直接倍率 5,000 倍、分解能約 100 Å の性能をもち、操作が簡単で保守の容易な特長がある。

(3) 内磁型 2 段レンズ系

第 7 図 (3) に示す内磁型 2 段レンズ系では、二組の永久磁石を並列に使用している。かかる場合おのこの減磁曲線上の動作点を計算により求めることはきわめて煩雑である。筆者は図式解法により簡単に起磁力を与えることができた。第 11 図はその一例を示し、同一磁石材料からできており、長さおよび断面積を異にする二つの永久磁石の並列使用の場合の図式解法を与えたものである。まず減磁曲線を与え次に残留磁気を与える、縦軸はそのままとし、抗磁力を与える横軸をそれぞれの磁石長 l_1, l_2 倍して描く。また一方磁石により二組の磁石により並列に励磁される間隙のパーミアンス Pg を計算し、同図 (1) に示すごとく横軸をそのままにそれぞれ $\frac{BA_1}{\sum Pg}, \frac{BA_2}{\sum Pg}$ を縦軸にとる。次に横軸上に垂線を立て、 $H_1 l_1, H_2 l_2$ の交点を求めれば、それぞれに相当する磁石の抗磁力 H_1, H_2 はそれぞれ交点より水平線を引き減磁曲線との交点で与えられ

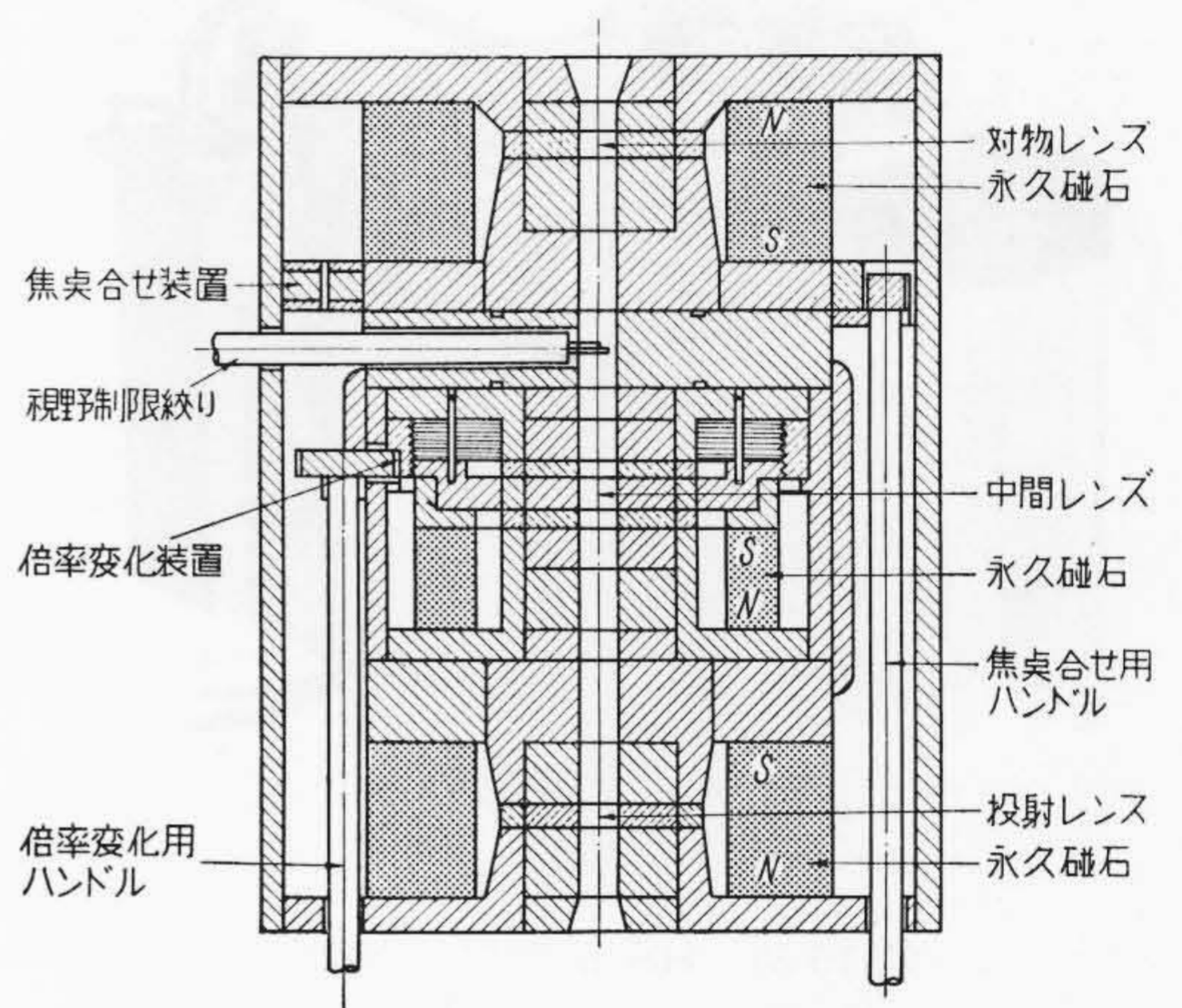


第 11 図 内磁型 2 段レンズ系の図式解法



第12図 3段電子レンズ系の諸型式

る。これに相当する磁束密度はそれぞれ B_1, B_2 で与えられる。それぞれの磁石の全磁束は B_1A_1, B_2A_2 であるから、二つの磁石により並列に励磁される間隙における磁束密度はそれぞれ $\frac{B_1A_1}{\sum Pg}, \frac{B_2A_2}{\sum Pg}$ の曲線との交点 B_1g, B_2g で与えられる。第11図(2)に示すごとく任意の Hl に対する B_1g+B_2g を求め、一方 $\frac{Hl}{lg}$ を計算すれば、その交点が $Bg=B_1g+B_2g$ を与える点で、この Bg を与える起磁力がそれぞれの磁石の起磁力となり、それに相当する抗磁力 H_1, H_2 がそれぞれの磁石の動作点である。ただし $H_1l_1=H_2l_2=Hl$ で、また lg は二つの磁石により並列に励磁される間隙の長さである。もし永久磁石の材料を異にするときは、二つの減磁曲線を同一スケール上に描けばまったく同様に求めることができる。外磁型2段レンズ系の場合も同様に図式的に求めることができる。

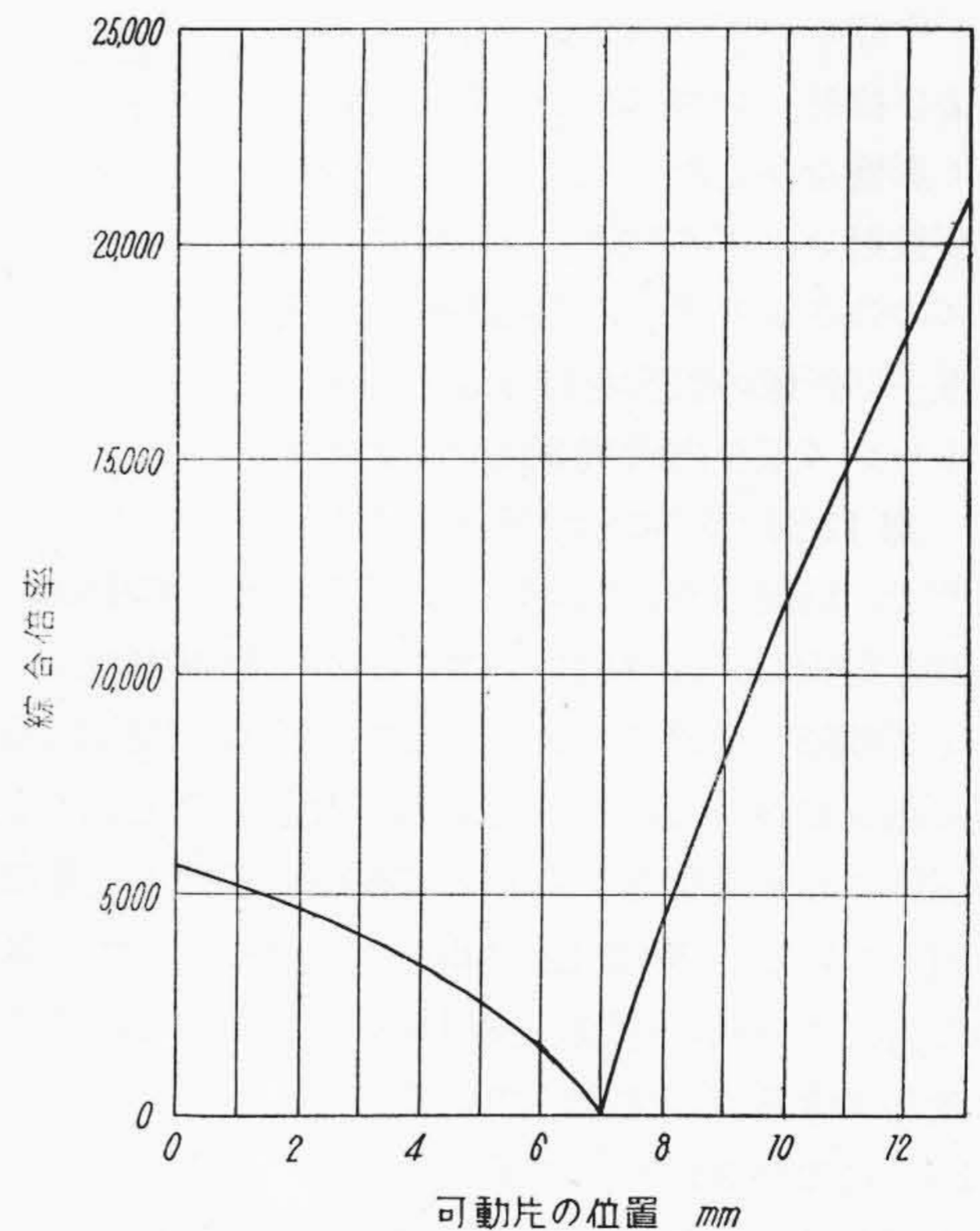


第13図 内磁型3段レンズ系の構造

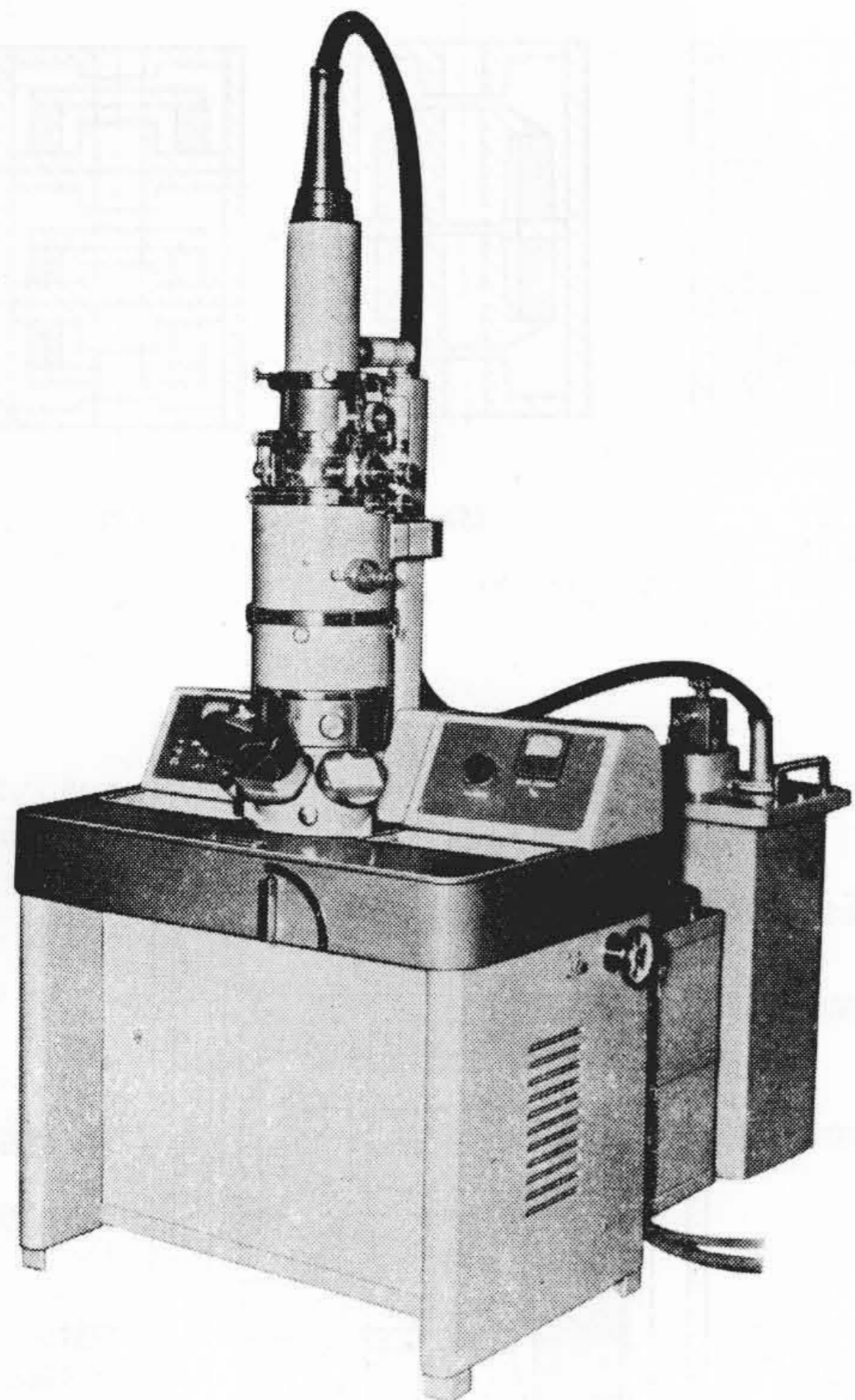
〔IV〕 3段電子レンズ系とその特性

(1) 3段電子レンズ系の諸型式

第12図は3段レンズ系の諸型式を示したものである。同図(1)に示すごとく電子レンズをそれぞれ一組の永久磁石で励磁し、上下の永久磁石の同極を結ぶごとく外部に遮蔽円筒をおく型式は、O. Wolf氏らにより提案されているが、倍率変化の困難な点で実用的でない。また同図(2)(3)に示すごとく一組または二組の永久磁石でそれぞれ一組または二組の電子レンズを励磁するとともに、他の一組または二組の電子レンズを並列に励磁する型式は、比較的簡単であるが、たとえば一つの電子レンズ間隙を変化してその焦点距離を変化せんとする場合、他の電子レンズの起磁力にも影響を与えるので、レンズ系として十分の効果を期待できない。かかる型式を直並列励磁方式と呼ぶ。第12図(4)に示す型式は筆者らの新しい提案⁽⁸⁾で、中間レンズとして前記の3磁極レンズを使用し対物および投影レンズとして従来の2磁極レンズをそれぞれ一組の永久磁石で励磁するもので、二つの永久磁石は互に同性の極を結ぶごとく配置され、外部円筒で外側の漏洩磁束は完全に遮蔽されている。中



第14図 可動片の位置と終像倍率の関係



第 15 図 HS-5 型電子顕微鏡
分解能 25 Å
直接倍率 2,000~20,000 倍

レンズ系を構成しており、前記のごとく図式的に求めることができる。第 13 図は実験に使用した本レンズ系の構造を示す断面図で、第 14 図はその倍率特性の一例で中間レンズ系の可動片の位置と総合倍率の関係を示したものである。第 15 図はかかる電子レンズ系を使用した HS-5 型電子顕微鏡⁽⁹⁾の外観を示す。本顕微鏡は使用倍率範囲 2,000~20,000 倍、分解能約 25 Å で、制限視野電子回折像はもとより透過および反射電子回折像の撮影も可能であり、実用型電子顕微鏡としてもつと適した磁路の構成の一つといえることができる。

〔V〕 永久磁石励磁電子レンズ系の焦点合せ

磁界型電子レンズの焦点距離は近似的に次式で与えられる。

$$f \cong 48.4 \frac{D \cdot E}{(IN)^2} K$$

ただし f はレンズの焦点距離 (mm)

E は加速電圧 (V)

D はレンズ磁極孔径 (mm)

IN はレンズにかかる起磁力 (AT)

K はレンズ形状により定まる定数

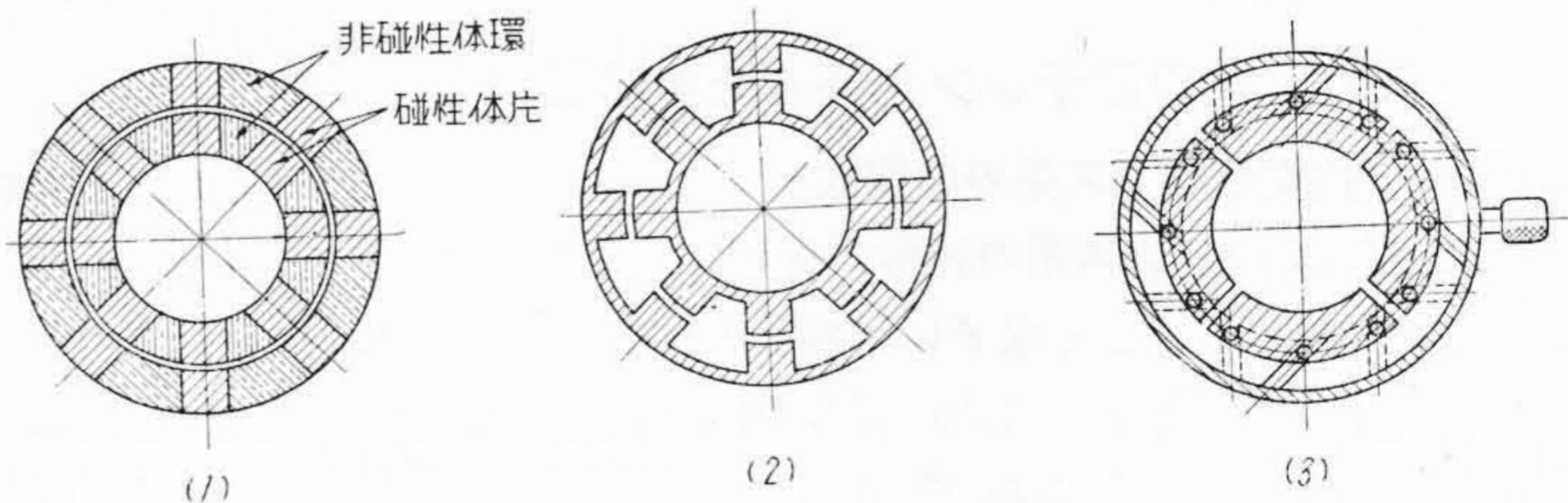
上式より焦点距離を変化するには、 D 、 E 、 IN のいずれかを変化すればよい。したがって対物レンズの焦点合せには、(1) 直接試料位置を移動して集束させるか、(2) 試料位置はそのままし、加速電圧を変化するか、

間レンズ系を構成する磁気回路は対物および投射レンズの磁気回路と別になつており、中間レンズの強さを変化しても対物および投射レンズにかかる起磁力にまったく影響を与えない。したがって対物および投射レンズの強さに無関係に中間レンズの強さを変化し、広範囲の倍率変化、電子回折像の撮影を行うことができる。本レンズ系を内磁型 3 段レンズ系と呼ぶ。第 12 図 (5) に示す型式も新しい

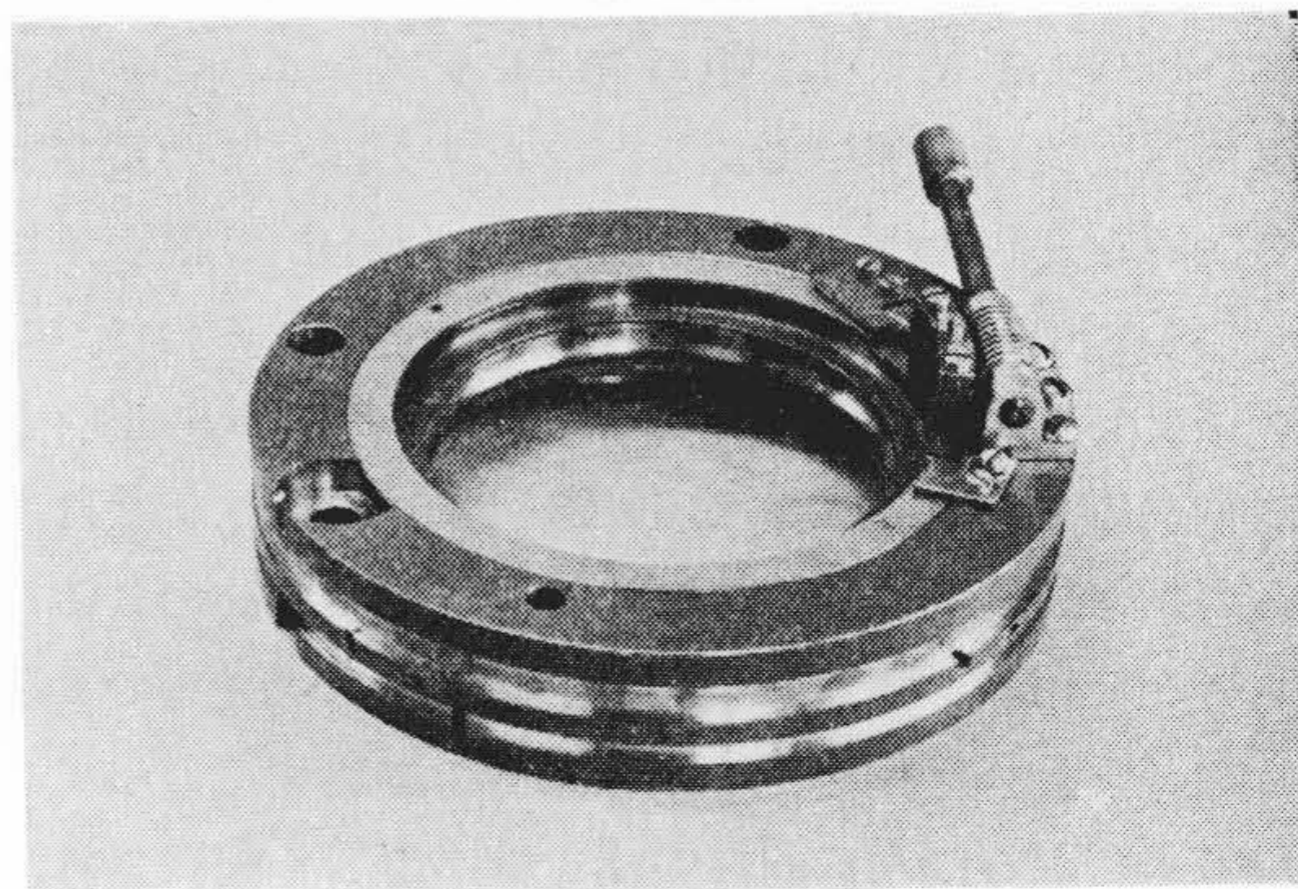
提案⁽⁸⁾で、前記の外磁型 2 段レンズ系の中央に中間レンズをおき対物および投射レンズにかかる起磁力の差でこのレンズ間隙を励磁せんとするものである。磁気回路の一方に磁気側路を設けその起磁力を大きく変化しても、他の磁路に与える影響がきわめて少いので倍率変化の目的に適している。第 12 図 (6) は 3 磁極レンズを 3 段重ねた方式で対物、中間、投射レンズ系共単独に焦点距離を変化できる点ですぐれている。

(2) 内磁型 3 段レンズ系

内磁型 3 段レンズ系における対物および投射レンズ励磁用磁石は中間レンズ系にまったく無関係で内磁型 2 段

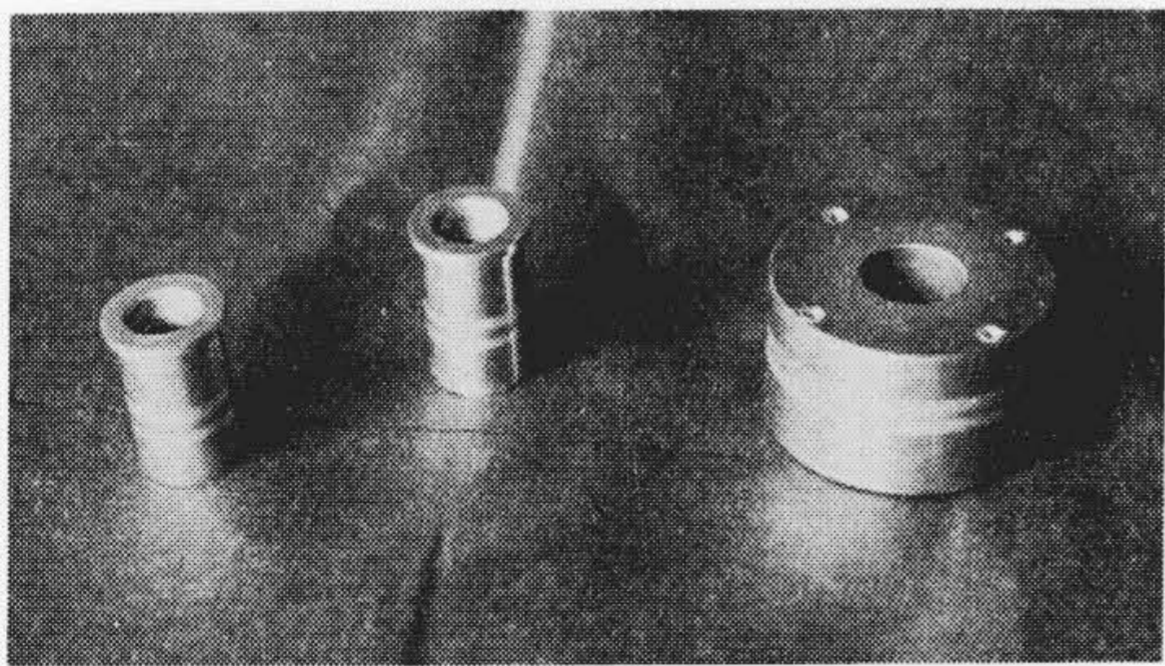


第 16 図 磁氣的焦点合せの各種型式

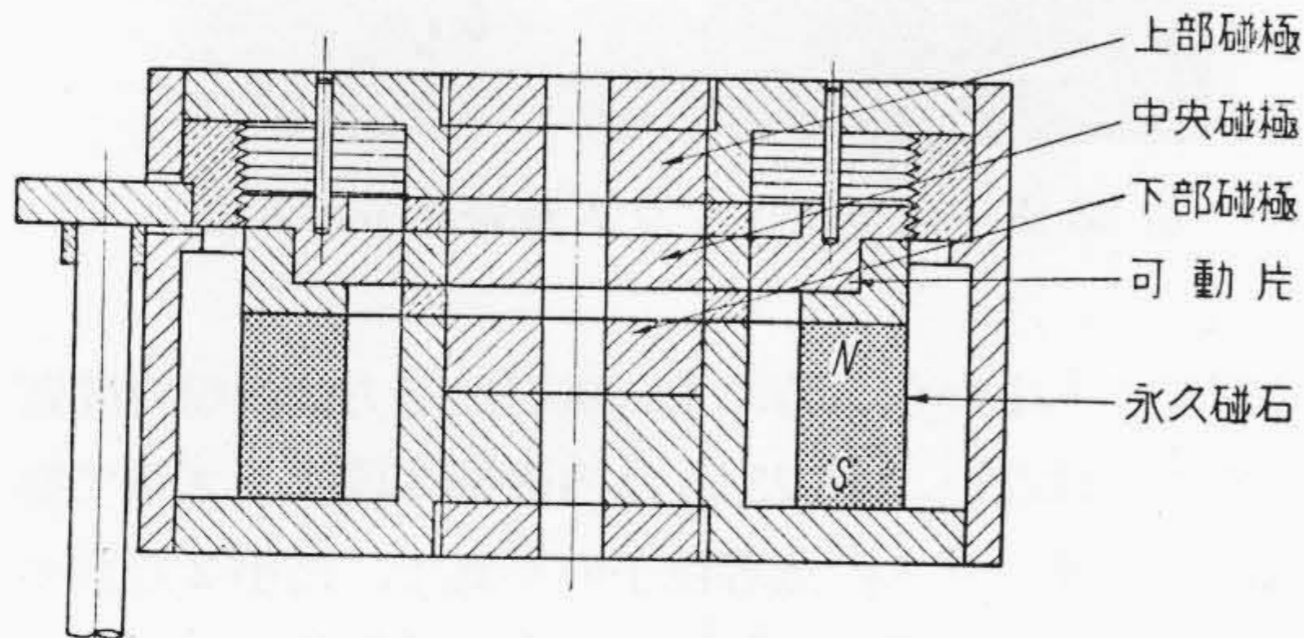


第 17 図 磁氣的焦点合せ機構

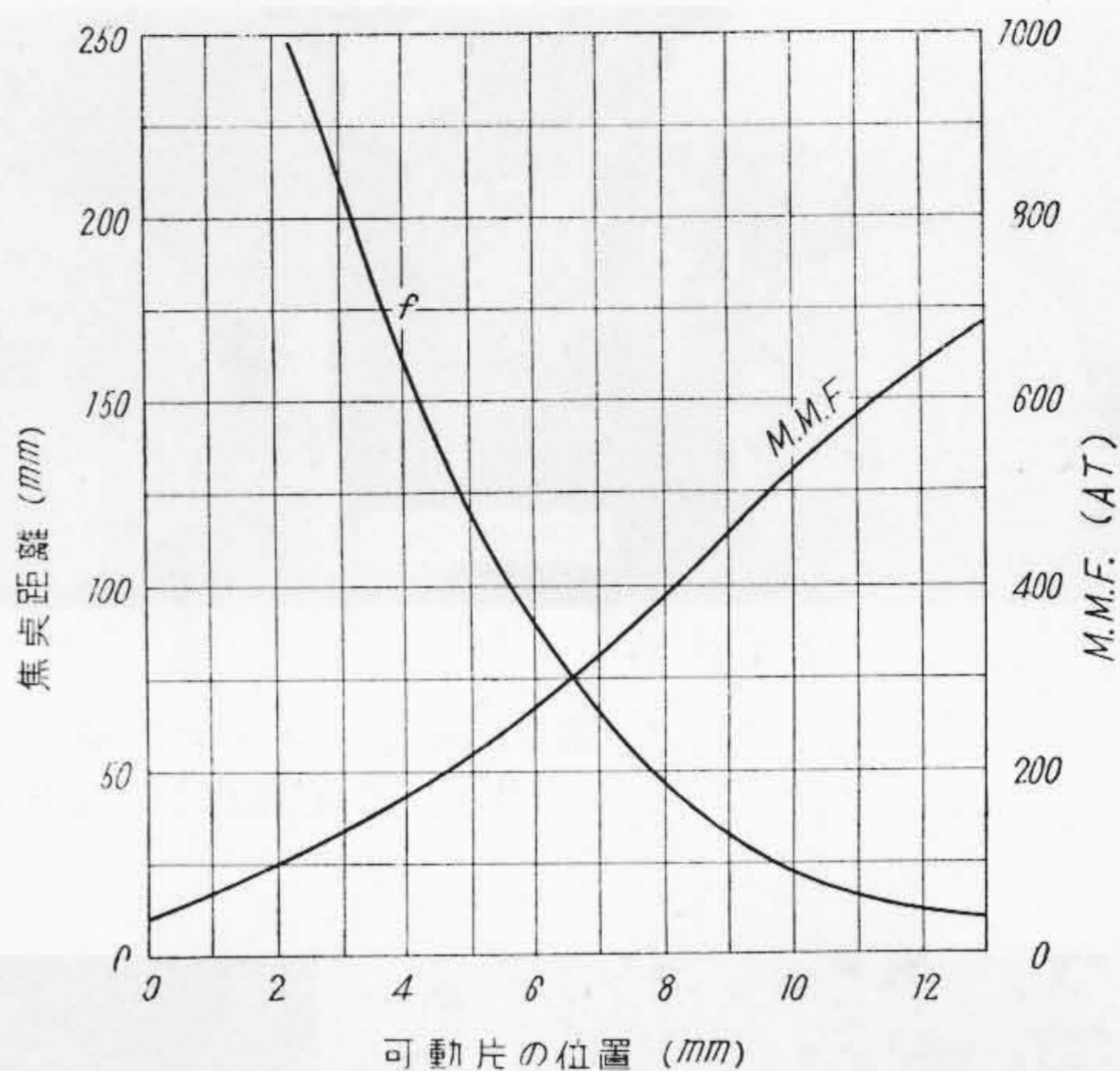
(3) レンズにかかる起磁力を変化すればよい。(1)の方法は B. V. Borries 氏によつて行われており、(2)の方法は RCA の EMT 型電子顕微鏡に採用されている。しかし(1)の方法は視野微動とともに三次元的な運動を試料に与えることが必要で、 1μ 程度を真空外より微細かつ確実に操作することはきわめて困難であり、実用的にも性能的にも問題がある。また(2)の電圧変化による方法は加速電源の接地側に別個の電源を設ければ簡単に行うことができるが、この方法の欠点は対物レンズの焦点距離とともに投射レンズの焦点距離も(3段レンズ系では中間レンズの焦点距離も)同時に変化するので終像倍率にも影響する。したがつて比較的簡単ではあるが完全なものではない。(3)による方式は B. V. Borries 氏らにより行われているが、いずれも主励磁回路の磁気抵抗を変化して行わんとするもので、外部漏洩磁束の生ずることに難点がある。筆者は主励磁回路に並列に磁気側路を設けることにより、確実な設計法を与えるとともに微細かつ一様な起磁力の調整を行うことに成功した。第16図はそれらの方法を示すもので、同図(1)は永久磁石に並列に非磁性体からなる二つの円環を配置し、そのなかに磁性体片を適当数埋没し、一方の円環を固定し他方を外部より歯車機構により回転せしめ相互の位置の変化により漏洩磁束量を変え、もつて磁石の減磁曲線上の動作点を変化し、対物レンズの焦点合せを行うものである。第17図は内磁型3段レンズ系に使用した磁氣的焦点合せ機構を示す。第16図(2)は磁性体片を埋没した二つの円環の代りに断面積の一様でない二つ



第18図 二重投射レンズ



第19図 焦点距離可変3磁極レンズ



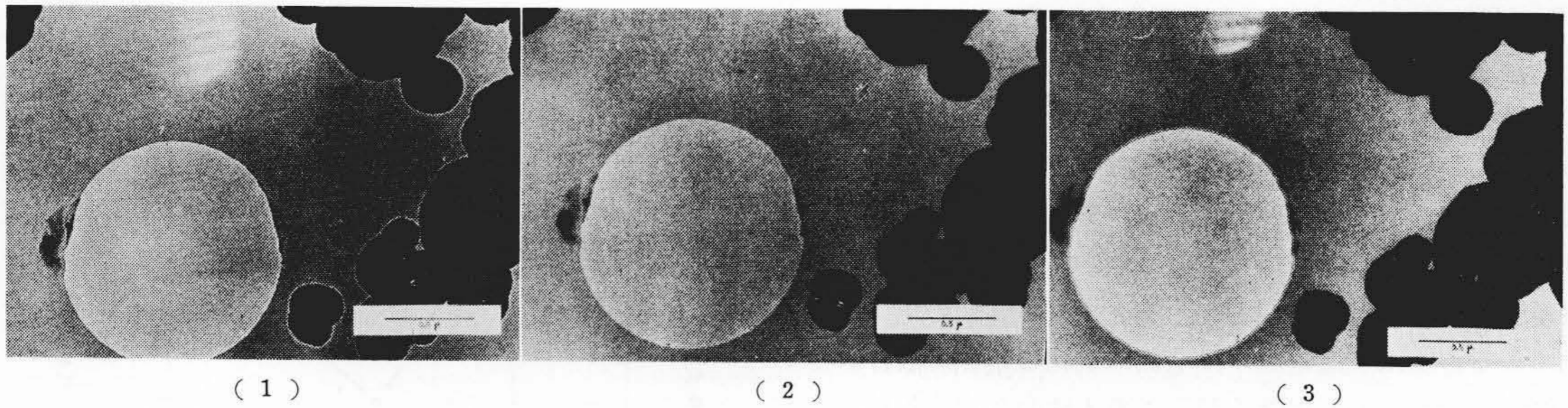
第20図 可動片の位置と起磁力および焦点距離の関係

の磁性体環を配置し、同様に相互位置の回転により漏洩磁束量を変化せんとするものである。第16図(3)に示す方式は外部レバーの操作により四つの可動片がリング状に磁気側路を生ずるとき構造である。いずれの場合も約 300μ 程度の可変範囲を与えることは容易である。

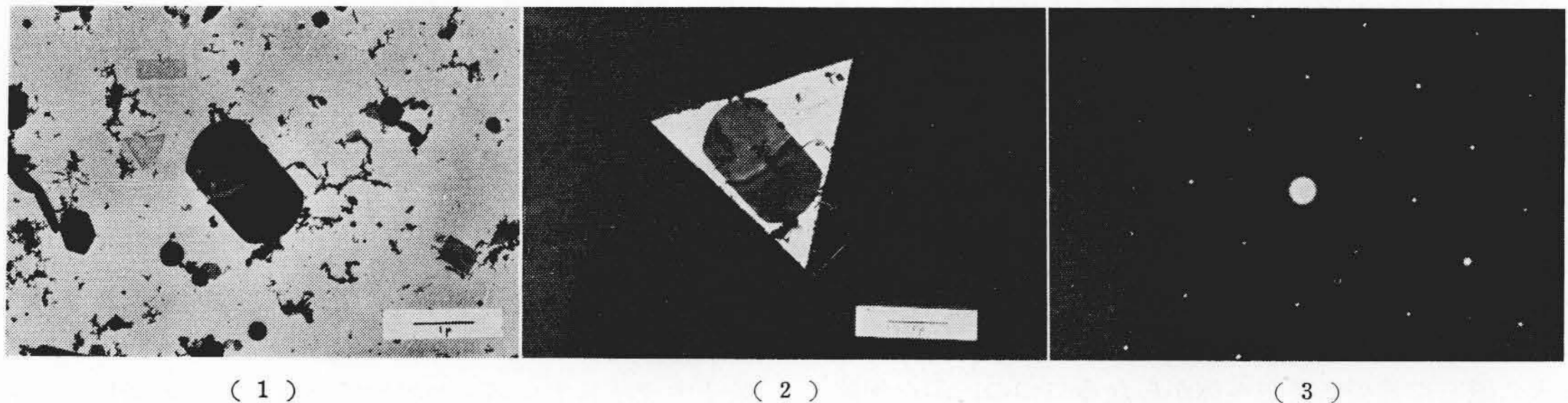
〔VI〕 永久磁石励磁電子レンズ系の倍率変化

従来永久磁石励磁電子レンズ系において倍率変化を行うには、機械的に孔径を変化する方法を採用している。筆者らも前記の HM 型電子顕微鏡において、投射レンズを二重挿入式とし孔径を変化して、倍率を3段階に変化するようにした。第18図は投射レンズおよびその挿入磁極片を示す。一方内磁型3段レンズ系では、中間レンズの強さを变化して終像倍率を大巾に変えた。中間レンズの強さを变化するには、第19図に構造断面を示すごとく可動片の移動により、励磁用永久磁石両端からみたパーミアンスを変化して、磁石の動作点を移動させるとともに、磁石の一端から中央磁極に至る磁気回路を開き電子レンズにかかる起磁力の变化を大きくとつた。かくすることにより電子レンズの焦点距離の变化を大きくとることができる。第20図は第19図に示すごとく、焦点距離可変機構をもつ3磁極レンズにおいて、可動片の位置と電子レンズに与えられる起磁力および焦点距離の実測例である。

かかる3磁極レンズを中間レンズとして使用した内磁型3段レンズ系において、対物および投射レンズの焦点距離を一定とし、中間レンズの強さを上記のごとく変化することにより、総合倍率は前記第14図のごとく変化できる。



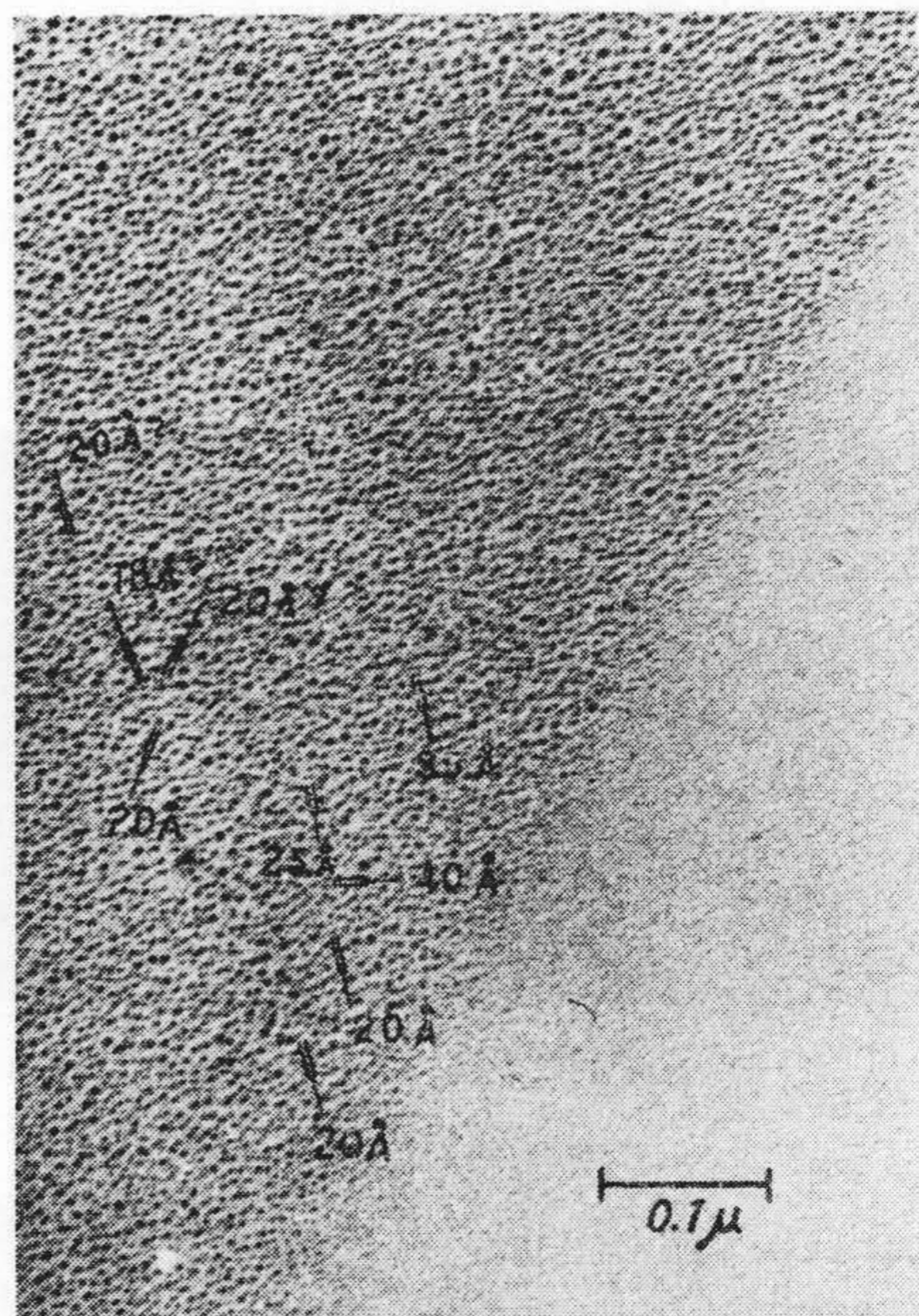
第 21 図 コロジオン膜の膜孔の写真
(1) 不足焦点 (2) 正焦点 (3) 過焦点



第 22 図 酸化モリブデンの制限視野電子回折像
(1)(2) 電子顕微鏡像 (3) 電子回折像

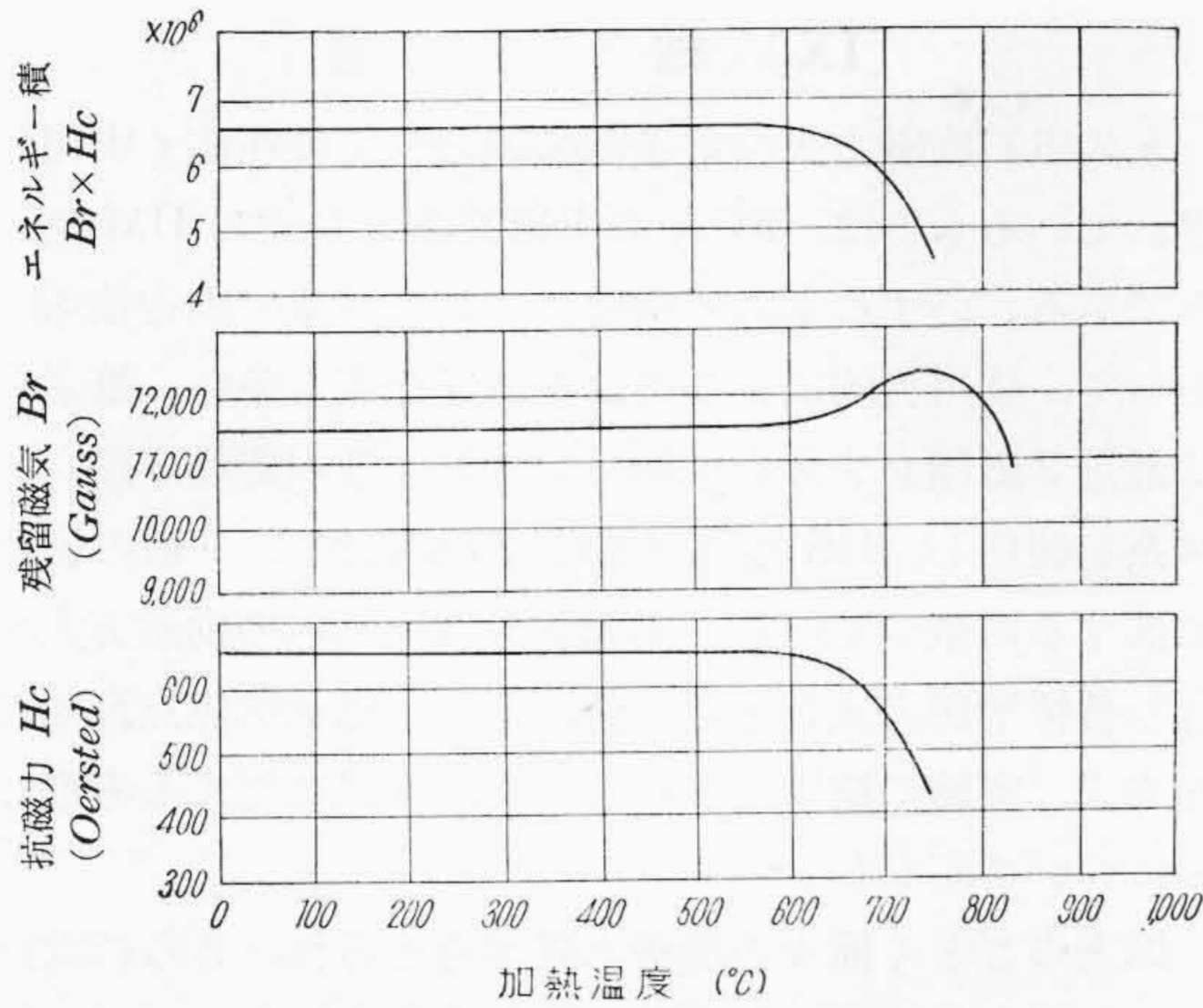
〔VII〕 永久磁石励磁電子レンズ系の性能

永久磁石励磁方式の電子レンズ系は、目的に応じた適当な磁気回路の構成と焦点距離変化方式の採用により一般の電磁石励磁方式の磁路におきかえることができる。しかも永久磁石の高度の安定性は従来問題とされていたコイル電源の安定度に関する危惧をなくし、コイル電源の変動による色収差を除去するのに役立つ。したがって起磁力の変動による色収差に関しては分解能の向上がみられる。一方永久磁石材料の非対称性に基因する非点収差も、普通使用せられる比較的強励磁の場合は問題とならない程度である。電子顕微鏡像のみならず制限視野電子回折像あるいは一般電子回折像の撮影も電磁石方式に比し遜色のない性能をもつことができる。第 21 図は内磁型 3 段レンズ系において対物レンズの焦点をわずかずらずらして、不足焦点から正焦点を経て過焦点に至る場合のコロジオン膜の膜孔を撮影したもので、そのフレネルフリッジの一様性は非点収差の少いことを示している。第 22 図は内磁型 3 段レンズ系における対物レンズ試料位置における試料の電子顕微鏡像、その一部を制限した電子顕微鏡像ならびにこれに対応する電子回折像の写真である。かかる場合電子顕微鏡像と電子回折像の対応を害する大きい原因は対物レンズの球面収差であることが知られているが、対物レンズとして普通の 2 磁極レンズを使用する場合、励磁方式に関せずその程度はま

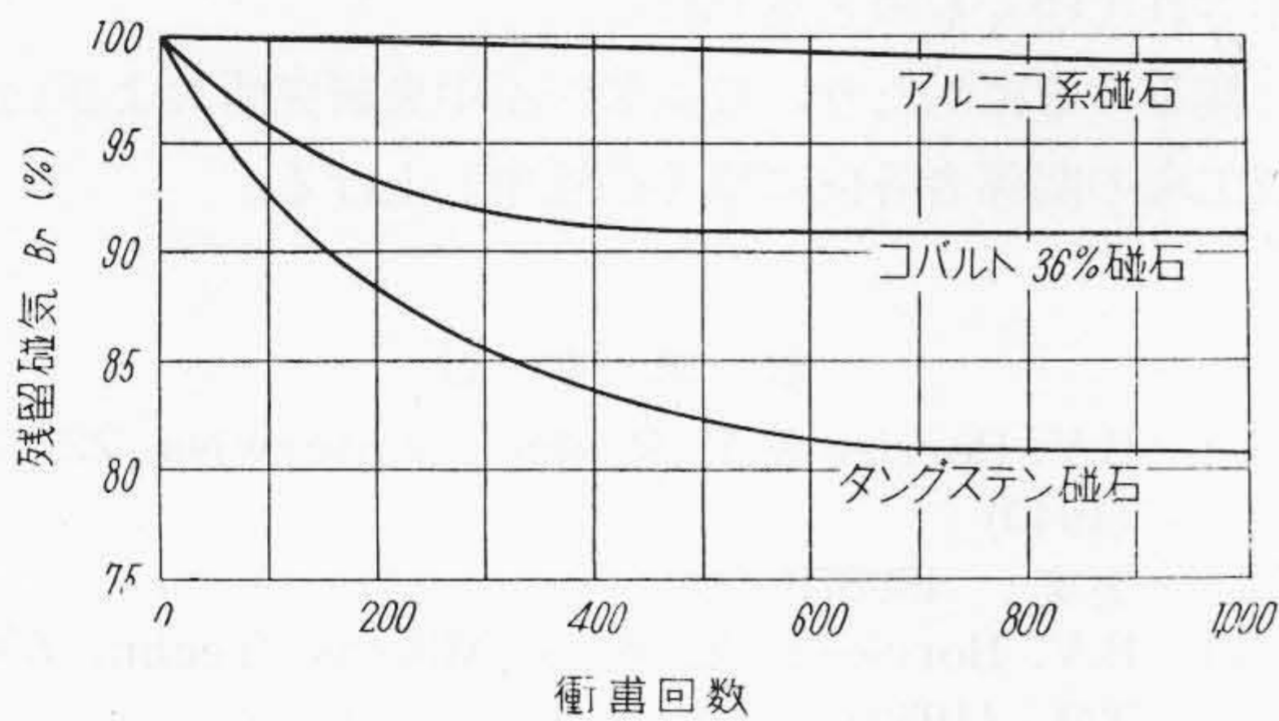


第 23 図 白金イリジウム蒸着粒子の写真

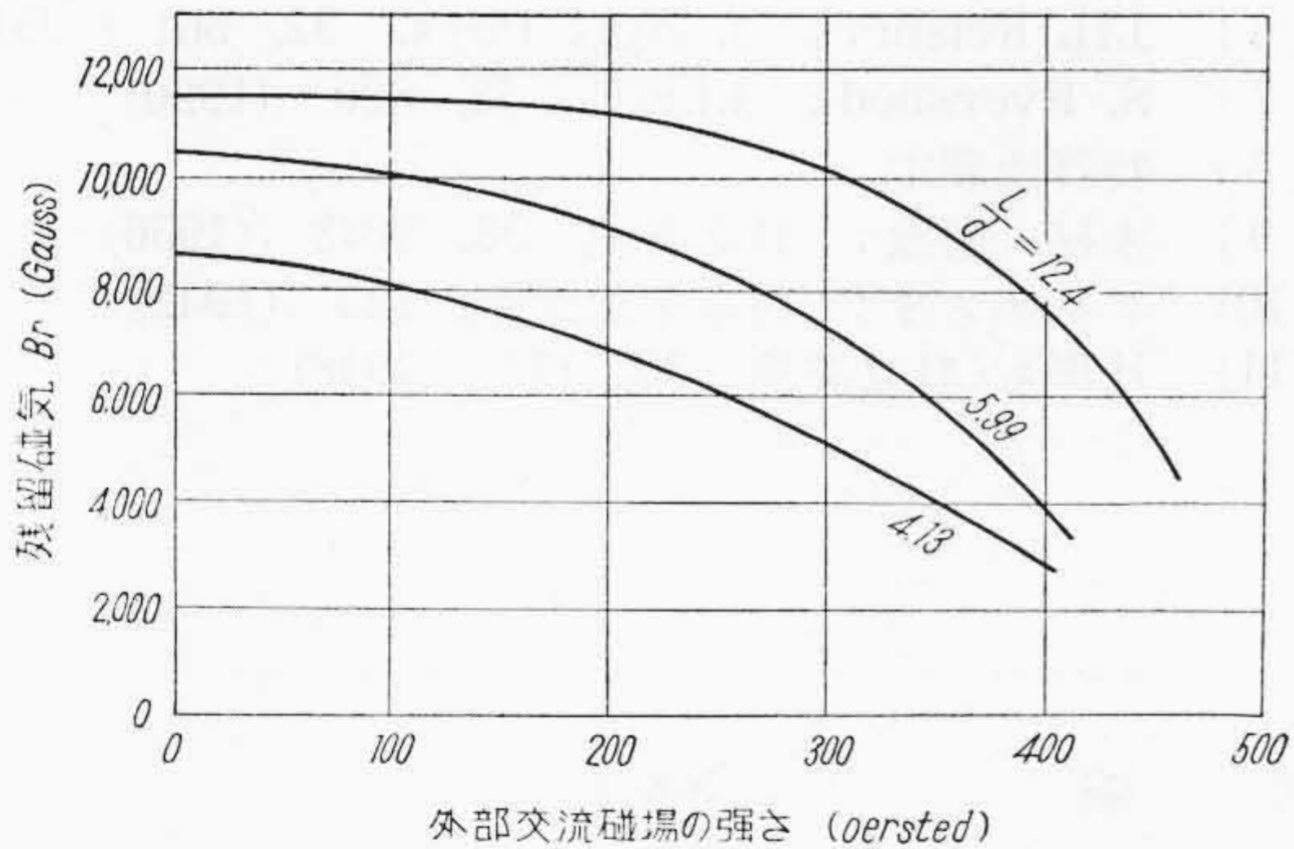
たく同じであるから、特に永久磁石励磁方式の場合問題となることはない。第 23 図は内磁型 3 段レンズ系で撮った白金イリジウムの蒸着粒子の写真で、最小 2 点間の距離から本レンズ系が 25 \AA より良い分解能をもっていることが明らかである。



第24図 磁石鋼の温度特性



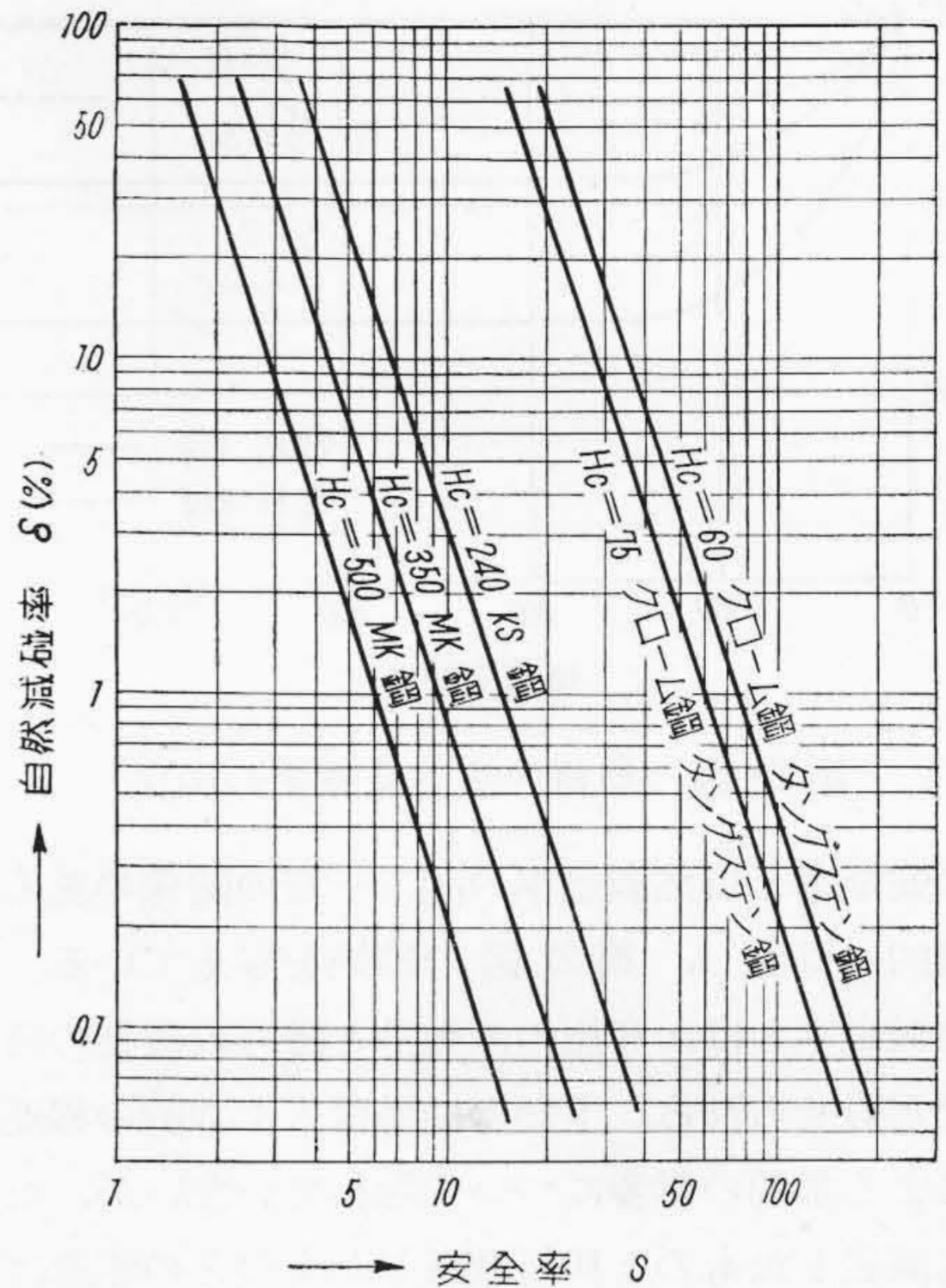
第25図 衝撃による残留磁気の変化



第26図 種々の寸法比に対する外部交流磁場の影響

〔VIII〕 永久磁石の減磁に対する安定度

永久磁石励磁方式であるため特に問題となるのは、永久磁石の減磁である。減磁の原因となるものに、熱的影響、外部衝撃の影響、外部磁場の影響、および自然減磁などが考えられる。また焦点合せ、倍率変化の場合のごとくパーミアンスを変化する場合の減磁についても考慮する必要がある。しかしこれらの点に関しては従来詳細に検討されており、設計にあたっては従来の結果を考慮



第27図 安全率と自然減磁率の関係

すればまったく問題はない。まず熱的影響については最近の優秀磁石鋼はきわめて安定で、たとえば第24図に示すごとく 600°C 以下ではまったく影響がない。外部衝撃の影響については、たとえば第25図に示すごとくで、優秀磁石鋼においては問題はない。

外部磁場の影響については、永久磁石の実質上の寸法比を大きくとれば、たとえば第26図に示すごとく問題はなく、しかも永久磁石励磁電子レンズ系は外部漏洩磁束を除くため十分遮蔽されており、その外部直流磁場の影響は次式⁽¹⁰⁾で与えられるごとく数十分の一乃至数百分の一になつており、外部交流磁場の影響は同一遮蔽の場合、さらに桁違いに良く遮蔽されることから、まったく考慮する必要はない。

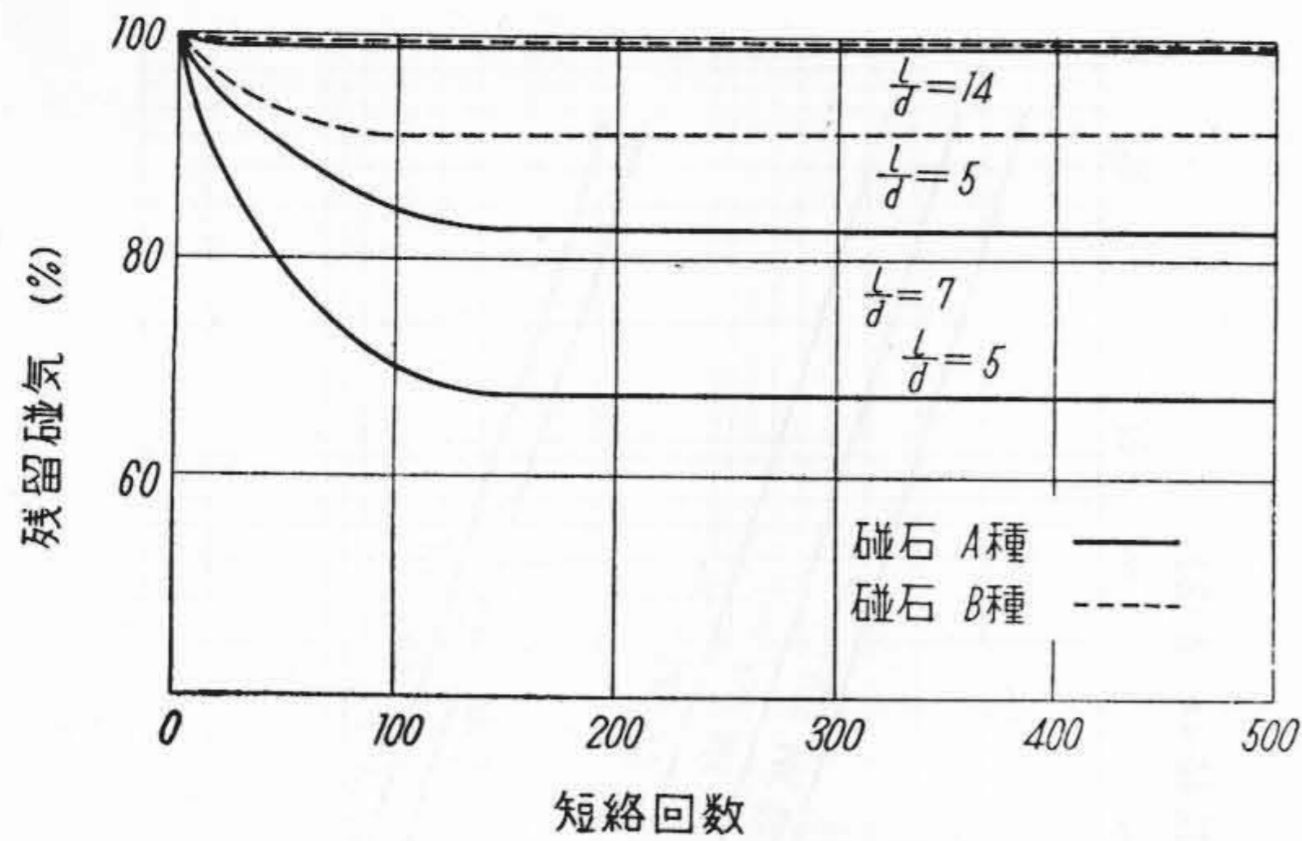
$$\eta = \frac{Hi}{H} = \frac{4}{\mu} \frac{R^2}{R^2 - r^2}$$

- ただし η は遮磁率
- H は外部磁場の強さ
- Hi は内部磁場の強さ
- μ は導磁率
- R は遮蔽円筒の外径
- r は遮蔽円筒の内径

永久磁石の経年変化に関しては辻田氏⁽¹¹⁾の詳細な報告がある。それによれば設計上の安全率 S を次式で与えている。

$$S = \Sigma P \frac{l_m}{A_m}$$

- ただし ΣP は全パーミアンス
- A_m は磁石断面積
- l_m は磁石長



第 28 図 短絡回数と減磁率の関係

この安全率と自然減磁率の間に一定の関係のあることを実験的に見出し、第 27 図の結果を与えている。ここに自然減磁率とは、究極の減磁量と磁石の最初の磁束との比で定義せられる。上記の結果は人工加齢の程度特に交流による加齢の影響について触れていないが、たとえば 20% 減磁したものと 10% 減磁したものととの相違は、外部磁界に対し、20% 減磁したものの方が安定であると考えられるが、通常受ける振動、室温変化などに関しては安定度に相違がないことが実験的に証明されており、現在取扱っている励磁方式はすべて外部に対し十分遮蔽されているので、磁石の耐久性を左右するものは抗磁力と安全率であると考えてよい。最後に永久磁石のパーミアンスを変化した場合の減磁の程度について考える。かかる場合も磁石両端の短絡回数と減磁率の程度について詳細な実験がある。第 28 図はその一例を示し、永久磁石の実質上の寸法比を適当に選択することにより、その減磁は無視できる程度にすることができる。

以上要するに、一般磁石設計の場合知られているごとく、設計上の安全率の選定特に実質上の寸法比の十分安全なとり方と、十分な人工加齢により減磁に対する危惧を皆無にすることができる。

〔IX〕 結 言

永久磁石励磁方式の電子顕微鏡として現在広く実用化されているものは、RCA の EMT 型と日立の HM 型のみである。いずれも並列励磁 2 段レンズ系で固定倍率であつて、使用目的によつては不満足な点も多い。筆者らは最近 3 磁極レンズを中間レンズとする内磁型 3 段レンズ系を使用し、HS 型電子顕微鏡を設計し、一般の使用に供するに至っている。本報告ではそれらの励磁方式を含む各種励磁方式とその特性、新しい磁氣的焦点距離可変方式、実験の結果得られた性能、減磁に対する考察などについて記した。

以上のごとく種々の励磁方式が考えられ、さらに改良すべき点もあるが、将来磁石鋼の発達と相まつて、一般普及型電子顕微鏡としては、永久磁石励磁方式が広く採用されてゆくものと思われる。

擱筆するにあたり、日立製作所中央研究所および同多賀工場の関係者各位に厚く御礼申し上げる。

参 考 文 献

- (1) B.V. Borries & E. Ruska: Naturwiss. 22, 350 (1940)
- (2) 実案: 439379 他
- (3) B.V. Borries: Z. Wiss. Mikros. Techn. 60, 329 (1952)
- (4) J.H. Reisner, E.G. Dornfeld: J. App. Phys. 21, 1131 (1950)
- (5) 木村, 藤岡: 日立評論 36, 1519 (1954)
- (6) J.H. Reisner: J. App. Phys. 32, 561 (1951)
- (7) S. Evershed: J.I.E.E. 58, 820 (1920)
- (8) 特許出願中
- (9) 木村, 菊池: 日立評論 38, 1043 (1956)
- (10) アルデンネ: 超電子顕微鏡, 123 (1942)
- (11) 辻田: 日立評論 30, 114 (1948)

Vol. 39

日 立 評 論

No. 4

- ◎東京電力株式会社鶴見第二発電所 280 t/h ボイラ
- ◎全幅せきにおける整流障害の測定精度に及ぼす影響
- ◎耐压防爆気中電磁開閉器
- ◎交流巻上機の自動制御
- ◎400 HP 高速循環ポンプ
- ◎佐久間発電所 TTV 装置について
- ◎佐久間発電所に使用された発泡ポリエチレン絶縁同軸ケーブル

- ◎自動車台上走行試験装置による気化器性能改善試験
- ◎ブラウン管蛍光膜塗布に関する諸問題
- ◎電力ケーブル用絶縁紙の熱劣化特性
- ◎ポリエステルガラス積層板の電気特性および吸湿特性
- ◎熔接の技術管理
- ◎高炭素工具鋼の熱処理に関する研究 (2)
- ◎球状セメントタイトの電子顕微鏡的研究
- ◎移動範囲による標準偏差の推定精度

発行所 日立評論社 東京都千代田区丸ノ内 1 丁目 4 番地 振替口座東京 71824 番
 取次店 株式会社オーム社書店 東京都千代田区神田錦町 3 丁目 1 番地 振替口座東京 20018 番