

日立 HU-9 型 高性能 電子 顕微鏡

只野文哉* 大沼嘉郎**

Hitachi Type HU-9 Universal Electron Microscope

By Bun'ya Tadano, D.S.E.
Central Research Laboratory, Hitachi, Ltd.
Yoshirō Ōnuma
Taga Works, Hitachi, Ltd.

Abstract

This is a report of how the writers established a lens system which is compensated for chromatic aberration by using objective and projection lenses under strong excitation, and how brought it in the field of utility as a new product, Type HU-9 electron microscope.

In this electron microscope consisting of a three lens system, magnification range continuous from 800 to 15,000 times can be covered. Both the axial chromatic aberration and the spherical aberration are reduced to a fractional value and the chromatic field aberration to one tenth of the value that had been taken as common. This has accorded the instrument one salient feature that it suffers only a negligible decrease in its resolution for image under the comparatively large variations of high tension from the source.

An electron diffraction chamber is provided between the intermediate lens and the projection lens, and by a proper selective use of the objective, intermediate, and projection lenses the instrument affords three ways of observation, i.e. bright field, dark field and shadow image, and as viewed in terms of electron diffraction, affords four types of usage, i.e. electron diffraction of selected variable areas of the specimen (microdiffraction), high resolution electron diffraction, shadow microdiffraction, and Kossel-Möllenstedt diffraction. The resolving power in bright field image is $2\sim 3\text{ m}\mu$. The resolving index of microdiffraction is 2×10^{-4} , and that of high resolution electron diffraction is 1×10^{-5} .

The writers who shared a major portion of researching and engineering efforts in the development of this new electron microscope, are inviting in the end the readers' sincere comment on its highly versatile function.

〔I〕 緒 言

電子顕微鏡の像拡大に使われている電子レンズは大きい収差をもっているため、使用上やかましい制限がある。たとえば対物レンズの球面収差による像の“ぼけ”を減らすためには試料を照射する電子線の開き角を $10^{-3}\sim 10^{-4}\text{ rad.}$ 、(光学顕微鏡の場合は 1 rad. 、程度)としなけ

ればならない。又色収差に至つては、電子加速用の高圧電源の電圧変動を 0.01% ぐらいに安定化しないと像の“ぼけ”が目立つてくる。こんにち電子顕微鏡の実用性が認められながらも、研究室的存在から出て広く普及されないのは、高価であるということのほか、デリケートな機械だということがその理由になつている。

0.01% の電圧変動は加速電圧 50 kV に対して 5 V である。レンズ励磁電流の許容変動⁽¹⁾は加速電圧の約半分であるから 0.005% に安定化せねばならない。このよう

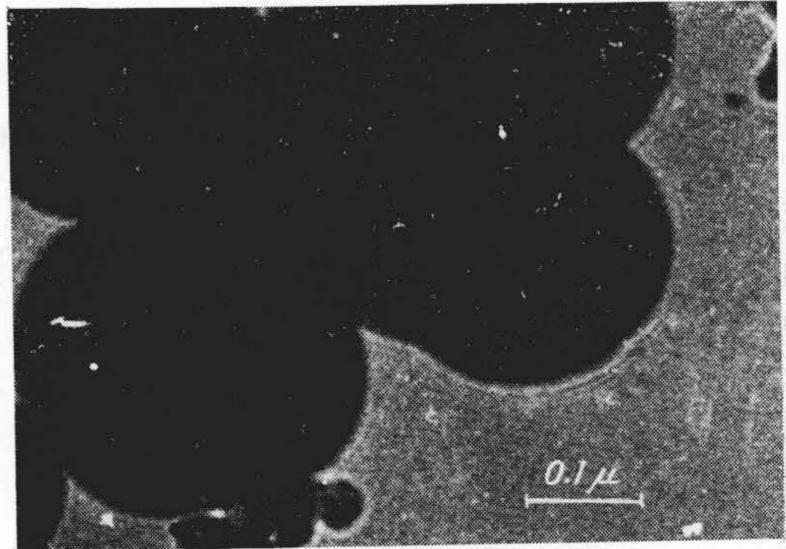
* 日立製作所中央研究所 (工博)

** 日立製作所多賀工場

な高度の安定を必要とした装置は、電子顕微鏡出現以前にはあまり無かつたから、多くの研究者がその解決にかなりの力を注いだ。

一方、電子レンズの色収差を補正して電源に対する苛酷な要求を緩和し、電子顕微鏡像の質的向上を図ろうとする配慮がなされたのは当然である。電子レンズには軸上の色収差と軸外の色収差の二つがあり Zworykin⁽²⁾ らは軸外色収差補償の可能性に就いてはじめて言及している。我々は 1950 年のはじめに、磁界レンズの色収差の研究に着手したが、その結果対物レンズ及び投射レンズを最小焦点距離近くで動作させ、投射レンズ磁極の孔径に対する間隔の比を適当にとれば、軸外色収差が完全に補償できると同時に、軸上色収差、球面収差の少ない優れたレンズ系が得られることを実験的に見出し、その理論を確立することができた。我々は新しいレンズ系を色収差補償レンズとよんでいるが、従来製品化されていた電子レンズ系に対し、軸外色収差係数は約 1/10、軸上色収差係数は約 1/3、球面収差係数は約 1/5 であつて、加速電圧が 1% (従来の 100 倍) 変動してもなお 5 m μ の分解能⁽³⁾ が得られるという結果を得た。最近オランダ Delft 大学の Le Poole 教授の私信⁽⁴⁾ によれば、我々と略々同様なレンズ系で実験した結果、加速電圧 75 kV に於て電圧変動 1% に対し、像回転角は 20° (軸外色収差係数 0.15) で 8 m μ の分解能が得られたといつている。

軸外色収差の補償法が、具体的実験的でないにせよその可能性が指摘⁽²⁾ されていたにかゝらず、実現をみなかつたのは何故であろうか。その第一は、対物レンズの倍率色収差係数の 0 となるレンズ励磁アンペア巻数が、これまでの常識では普通レンズの 2.5~3 倍⁽⁵⁾ になつて設計製作が容易でないと考えられたこと、第二はこのような強いレンズでは試料が対物レンズの中に深く入るため、所謂試料前磁場の影響⁽⁶⁾ で試料照射角が大きくなり、球面収差 (試料照射角の 3 乗に比例) や軸上色収差 (試料照射角に比例) が著増して、例え軸外色収差の補償に成功したとしても使いものにならないと考え⁽⁷⁾ されたこと、第三は軸外色収差を補償しても何等得るところがないとしていたことなどである。我々は 1949~1950 に磁界型電子レンズの焦点距離、像回転角、主面位置等の測定と非点収差の研究を行つていたが、対物レンズの最小焦点距離近くに於ても、予想に反して第 1 図の如く数本のフレネルフリッジが現われることを見出したので前に述べた第二の疑懼である試料前磁場の影響を再検討したところ、電子顕微鏡像に対して悪影響どころか、見方によつては好影響さえあるという逆の結果⁽⁸⁾ が得られた。それに力を得て軸外色収差の実験的研究を行い、対物レンズの倍率色収差 0 のアンペア巻数 IN (アンペア



第 1 図 対物レンズ ($IN/\sqrt{\phi} \approx 19$) として使つた時のカーボンブラック粒子周辺に現われたフレネルフリッジ (3 本出ている軸上より 3 μ 離れた位置)

Fig. 1. Fresnel Fringes of Carbon Black with a Strong Objective Field ($IN/\sqrt{\phi} \approx 19$)

巻数) は加速電圧を E (V) としたとき、 $IN/\sqrt{E} \approx 19$ であつて普通レンズより数十%大きくすれば足りることを知つた。また軸外色収差による解像度の低下は、加速電圧の変動、軸調整不良などの実用的な面からは決して無視し得ないことが明らかとなり、1951 年 3 月色収差補償レンズ系の特許申請⁽⁹⁾ を行つた。軸外色収差の補償は、3 段レンズ系でも、中間レンズを倍率縮小レンズとして使えば実現可能⁽¹⁰⁾ で、表題の HU-9 型電子顕微鏡は、倍率可変、制限視野廻折等を考慮し、3 段レンズ色収差補償レンズ系として設計した。

HU-9 型電子顕微鏡の製作目標は、上述の色収差補償法の実現にあつたが、倍率を変えるために投射レンズに Revolver⁽¹¹⁾ を使つたことから、高性能電子廻折装置としての設計が容易になつて、高分解能電子廻折、陰影顕微廻折、Kossel-Möllendorf 廻折 (K-M 廻折)、陰影顕微鏡の 4 つの使用法が更に加わることゝなつた。

以下 HU-9 型電子顕微鏡の原理、構造の大要と使用結果に就いて詳述する。

〔II〕 磁界型電子レンズの色収差とその補償

電子顕微鏡の色収差は、球面収差及び非点収差と共に、解像度に対して重要な役割を占めている。この色収差は、加速電圧及びレンズ励磁電流の変動及び試料透過の際の電子エネルギーの損失によるものと考えられる。

色収差には軸上色収差と軸外色収差とがある。軸上色収差はレンズを強励磁で使うほど小さくなるが完全に色消しとすることは不可能⁽¹²⁾ であるとされている。軸外色収差は、動径方向の偏位 (ずれ) を生ずる倍率色収差と、回転方向のずれを生ずる回転色収差の二つに分けられる。

対物レンズでも、投射レンズでも弱い励磁では電子速度が増す(加速電圧が高くなる)と倍率は小さくなるが、或る励磁の強さでは速度が少く変つても倍率は不変となり、更に強い励磁では速度が増すと倍率が逆に大きくなる。即ち倍率色収差の0になる特定の励磁アンペア巻数が存在する。これに反し回転方向の像のずれの量は、励磁の強さの増加と共に単調に大きくなり、符号を変えたり0となることはないが、2つのレンズを逆極性につなげば、合成の回転方向のずれは相殺できる。従つて対物投射両レンズを適当な励磁条件で組合せれば、倍率回転を含めた合成の軸外色収差を0とすることが可能である。レンズが2箇以上の場合も、また3段レンズで中間レンズを倍率縮小レンズとして使つた場合も同様である。

(1) 軸上色収差⁽¹³⁾

幾何光学的に見た軸上色収差は、電子速度の変化に対応する物面の位置変化によつて生ずるものと解釈される。即ち像面に共軛な物面 Z_f の変位を ΔZ_f とすると、ぼけ円の半径 δ_{Fa} は

$$\delta_{Fa} = |\alpha \cdot \Delta Z_f| \dots \dots \dots (1)$$

但し α : 物点に於ける電子線の傾き
と書かれ、一方

$$\delta_{Fa} = \left| C_{Fa} \cdot \alpha \cdot \frac{\Delta\phi}{\phi} \right| \dots \dots \dots (2)$$

但し C_{Fa} : 軸上色収差係数
 $\Delta\phi/\phi$: 電子速度 (V) の変動

より軸上色収差係数 C_{Fa} は

$$C_{Fa} = \left| \Delta Z_f \cdot \frac{\phi}{\Delta\phi} \right| \dots \dots \dots (3)$$

となる。(4) 式の磁場を仮定すれば

$$H(Z) = \frac{H_0}{1+(Z/a)^2}, \quad w^2 = 1 + \frac{e}{8m\phi} H_0^2 a^2 \dots (4)$$

但し e/m : 電子の比電荷
 H_0 : レンズ中心磁場の強さ
 a : 半減幅

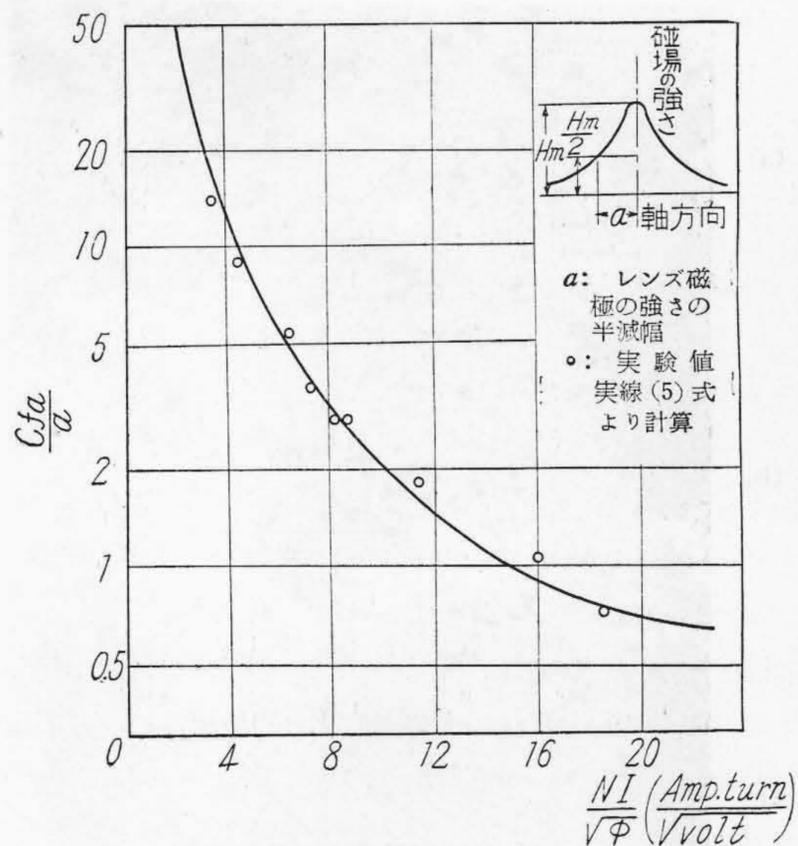
$$C_{Fa} = \frac{a\pi(w^2-1)}{2w^3 \sin^2 \pi/w} \dots \dots \dots (5)$$

となる。片桐氏は ΔZ_f をフレネルフリンジから求め、実験的に $\Delta Z_f \cdot \Delta\phi/\phi$ を出して(5)式と比較したが、第2図の如く両者はよく一致している。この際 a は焦点距離の実験から求めた値を用い、 w は

$$\frac{IN}{\sqrt{\phi}} = 16.81 \sqrt{w^2-1} \left(\frac{\text{アンペア巻数}}{\sqrt{\text{Volt}}} \right) \dots (6)$$

で換算している。

この実験から、 a が小さいほど(磁極の孔径、間隔の小さいほど)また強いレンズとして用いるほど収差係数 C_{Fa} が小さくなることが判つた。例えば孔径 5 mm ϕ , 間



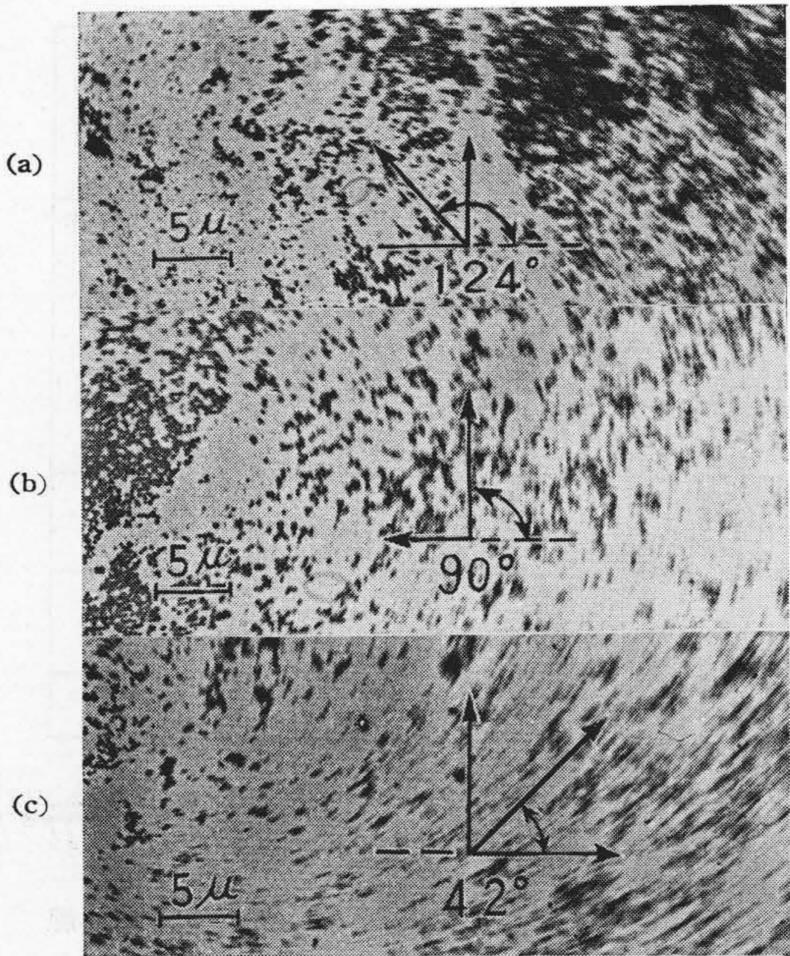
第2図 軸上色収差係数曲線
Fig.2. Axial Aberration Coefficient for $IN/\sqrt{\phi}$

隔 2.25 mm の対物レンズでは、弱いレンズとして用いた場合 ($IN/\sqrt{\phi}=8.8$) C_{Fa} は 3~4 mm, 強いレンズとして用いた場合 ($IN/\sqrt{\phi}=19$) では C_{Fa} は 0.7~1 mm に減少する。

(2) 軸外色収差の実験⁽¹⁴⁾

軸外色収差は普通の明視野像の場合、カーボンブラック等の粒子を試料とし電圧或いは電流変化を加えれば容易に観察できる。対物、投射両レンズに就いては電圧、電流の両方法で、中間レンズに就いては電流法で実験的に係数を求めた。電圧法で対物レンズの係数を求めるときは投射レンズを妨かせず、投射レンズの収差を求める時には試料を投射レンズの上方に置いた。中間レンズの場合には他レンズの影響が入るので電流法に限られた。

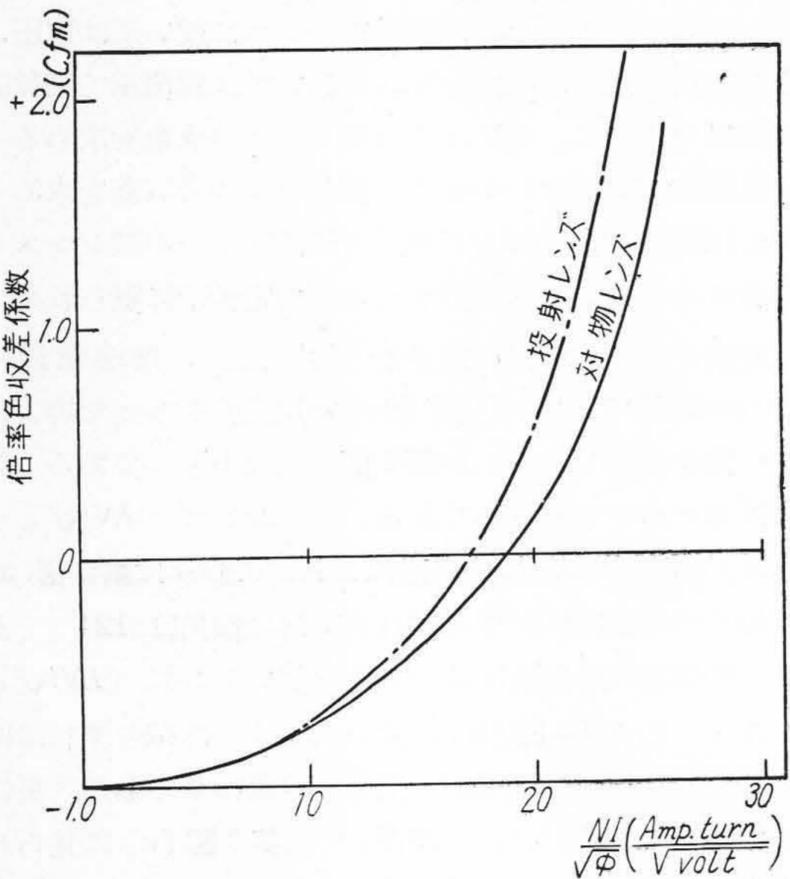
対物レンズの励磁の強さを次第に変え、加速電源に $\Delta\phi/\phi=2.35 \times 10^{-2}$ の交流 50 \sim 電圧変動を与えた場合の像の動きを示したものが第3図(次頁参照)である。試料はカーボンブラックである。弱いレンズ ($IN/\sqrt{\phi}=11.7$) の状態では、電圧変動による像の動きは第3図(a)の如くで、動径に対するずれの方向の傾角は 124 $^\circ$ であり、倍率色収差係数は負である。強いレンズ ($IN/\sqrt{\phi}=18.7$) では第3図(b)に見られるように像のずれは回転方向のみで傾角は 90 $^\circ$, 倍率色収差は0である。更に強いレンズ ($IN/\sqrt{\phi}=25.5$) では第3図(c)に見られるように、弱いレンズにくらべて動径方向(倍率)の動きが正反対となり、ずれの傾角は 42 $^\circ$, 倍率色収差は正になる。



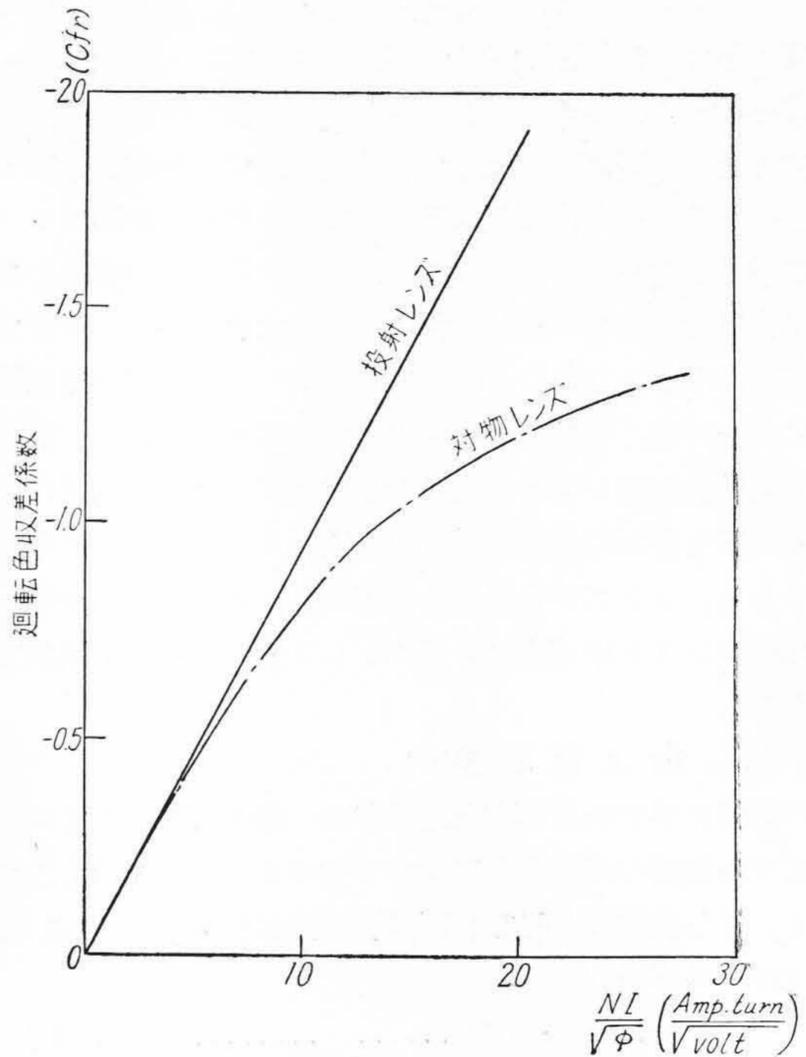
第 3 図 高压電源に $\Delta\phi/\phi=2.35 \times 10^{-2}$ の電圧変動を与えた時の像の動き

- (a) $IN/\sqrt{\phi}=11.7$
- (b) $IN/\sqrt{\phi}=18.7$
- (c) $IN/\sqrt{\phi}=25.5$

Fig. 3. Electron Micrograph of Carbon Black Showing Excesive Displacement due to Chromatic Field Aberration Voltage Variation ($\Delta\phi/\phi=2.35 \times 10^{-2}$)



第 4 図 倍率色収差係数曲線
Fig. 4. Coefficient of Chromatic Difference of Magnification for $IN/\sqrt{\phi}$



第 5 図 廻転色収差係数曲線
Fig. 5. Coefficient of Chromatic Difference of Rotation for $IN/\sqrt{\phi}$

これらの写真から励磁の強さと倍率色収差係数 (第 4 図) 及び廻転色収差係数 (第 5 図) の関係が求められる。即ち対物レンズの倍率色収差係数は、レンズの弱いとき約 -1 でレンズの強さと共に増し、 $IN/\sqrt{\phi}$ が約 19 で 0 を通り、正になった。投影レンズの場合も同様な傾向で、係数が 0 になる $IN/\sqrt{\phi}$ は磁極間隔と孔径の比によつて第 6 図のように変り、 $12 \sim 18$ の値をとつた。中間レンズ (倍率縮小に使用) では係数は常に正で、レンズを強くし、倍率の縮小を行うほど係数が大きくなる事が認められた。

廻転色収差係数に就いては、中間、投影両レンズに対して $IN/\sqrt{\phi}$ と直線関係が得られ、対物レンズの係数はレンズの強さが増すに従つて飽和の傾向を示すことがみられた。

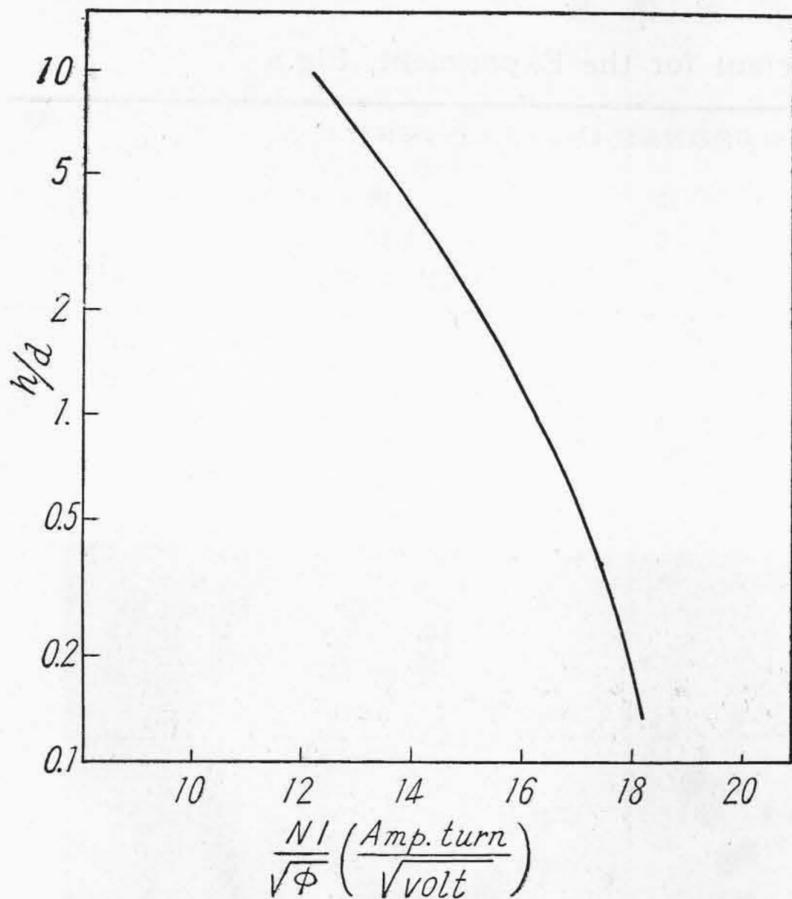
(3) 軸外色収差の計算⁽¹⁵⁾

廻転色収差の計算は軌道方程式から求めても、像の廻転角を微分しても同じ結果

$$C_{Fr} = -\frac{\psi}{2} \dots \dots \dots (7)$$

が得られる。 ψ は廻転角の大ききで負号は加速電圧が増すと像点が廻転角の少い方へ偏倚することを意味する。

倍率色収差に就いては Glaser が (4) 式の磁場を仮定して求めているが実験と合わない。Zworykin らの著書



第 6 図 投射レンズの倍率色収差係数が 0 となる $NI/\sqrt{\phi}$ とレンズ寸法 h/d の関係
 Fig. 6. $h/d-NI/\sqrt{\phi}$ Curve of Projector (Coefficient of Chromatic Difference of Magnification is Zero)

には対物レンズの倍率色収差係数はレンズの弱いとき -1 で、強くなるに従って 0 を通り正になることが述べられ、他の箇所でも軌道方程式より係数を求め前の箇所でも述べたものに相当するようについているが、その係数 C_1 はレンズの弱いとき 0 に近づき、この点では彼等は誤っている。森戸氏は写像の主電子線を考え、物面に於ける主電子線の傾きを考慮し、(4)式の磁場と $Z \rightarrow -\infty$ で軸に平行な主電子線を仮定して

$$(C_{Fm})_0 = -\frac{\pi(w^2-1) \cos w\pi}{2w^2 \sin w\pi} \dots\dots(8)$$

を得た。この式は実験と大体一致し、レンズの弱いとき -1 に近づき、Zworykin らの C_1 とは物理的意味が異なる。

投射レンズの倍率色収差に就いては焦点距離の変化から求めても、軌道方程式から求めても同じ結果になり、(4)式の仮定の下で

$$(C_{Fm})_p = \frac{(w_p^2-1)(1-w_p\pi \cot w_p\pi)}{2w_p^2} \dots\dots(9)$$

となる。第 4 図及び第 5 図は (7)~(9) 式による計算結果である。

中間レンズの倍率色収差に就いては余り報告されていない。対物レンズと同様の考察から中間レンズ単独の倍率色収差係数を求めることができ、実験ともよい一致を示す。結果のみ示せば係数 $(C_{Fm})_i$ は中間レンズによる

倍率縮小率 R のみの函数となり、

$$(C_{Fm})_i = \frac{1-R}{R} \dots\dots\dots(10)$$

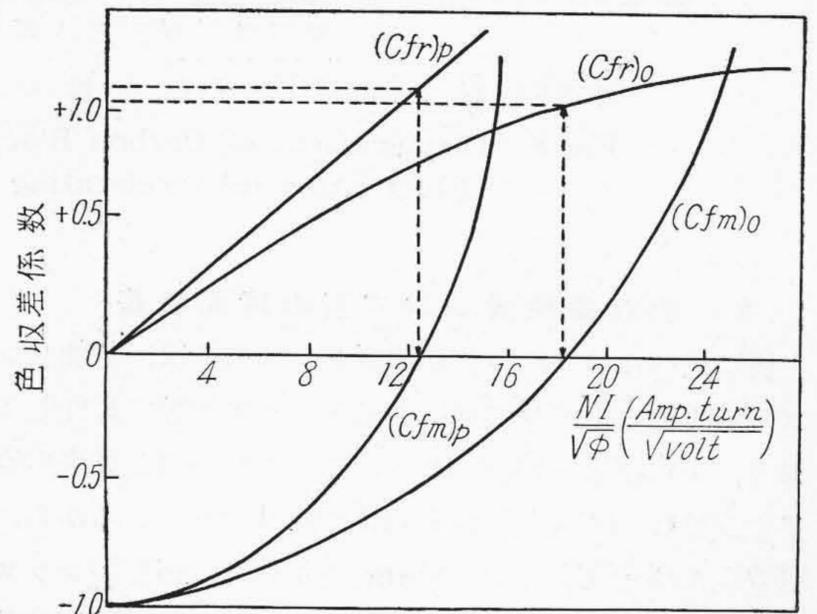
で表わされる。中間レンズを薄いレンズとすれば(10)式は

$$(C_{Fm})_i = \frac{k\left(\frac{IN}{\sqrt{\phi}}\right)^2}{1-k\left(\frac{IN}{\sqrt{\phi}}\right)^2} \dots\dots\dots(11)$$

と書くことができる。ここに k は中間レンズの対物、投射両レンズに対する相対位置並びにレンズ孔径等に関する常数である。

(4) 軸外色収差の補償⁽¹⁸⁾

2 筒又は 2 筒以上の組合せから成る電子レンズ系の合成軸外色収差係数は、各レンズの倍率及び回転色収差係数のベクトル和である。倍率色収差係数の励磁の強さの加減によつて正、負、 0 とすることが可能であり、回転色収差係数はレンズの励磁極性を反対にすれば打消すことができ、中間レンズを倍率縮小に用いれば倍率色収差係数が正になることから、設計と使用条件を適当にすれば軸外色収差の完全補償が可能である。例えば第 7 図の特性をもつ対物投射二レンズ系に於て、両レンズの倍率色収差 0 なる条件の組合せでは各色収差係数は第 1 表(次頁参照)に示すようになる。即ち合成軸外色収差係数 C_{Fmr} は、励磁極性逆の場合 0.12 、同方向の場合 2.24 である。普通の二レンズ系では軸外色収差係数は $1.2 \sim 1.6$ 程度(逆極性励磁)であるから約 $1/10$ に減少できる。第 8 図(次頁参照)は第 1 表の 2 つの組合せレンズに対して、電圧変動 $\Delta\phi/\phi = 6.3 \times 10^{-2}$ を加えた場合の写真であるが、励磁極性が逆の場合は殆ど像のずれはみとめられない。

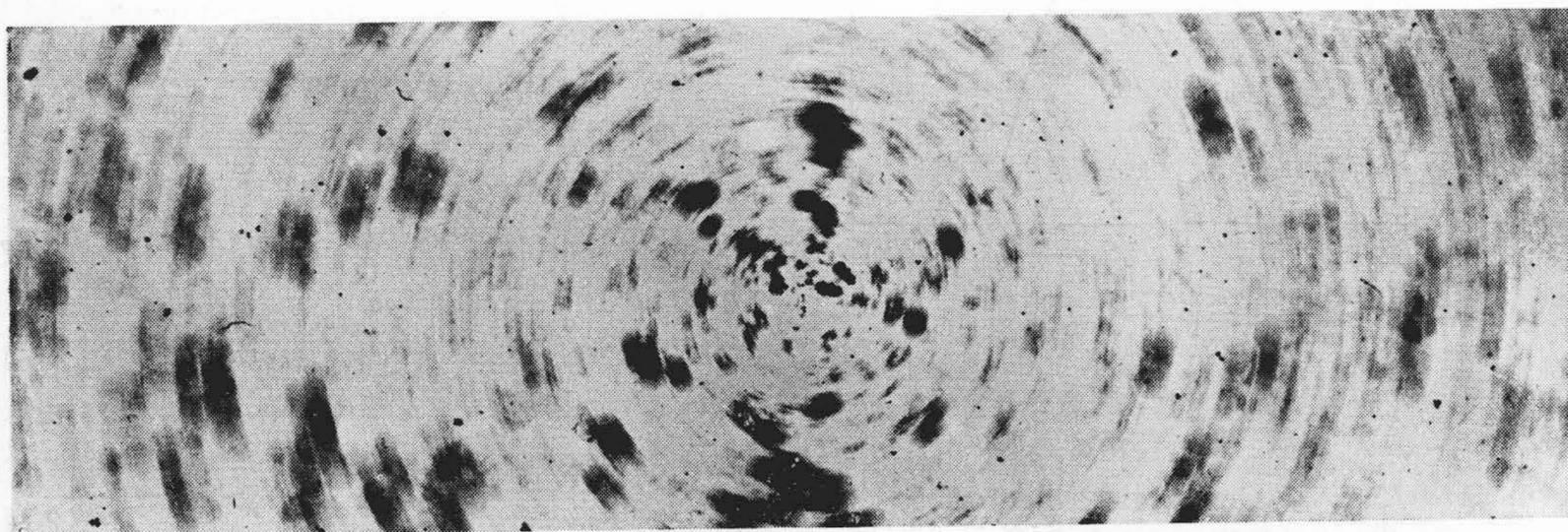


第 7 図 色収差補償原理図
 Fig. 7. An Example of Coefficient of Chromatic Field Aberration of the Compensated Instrument

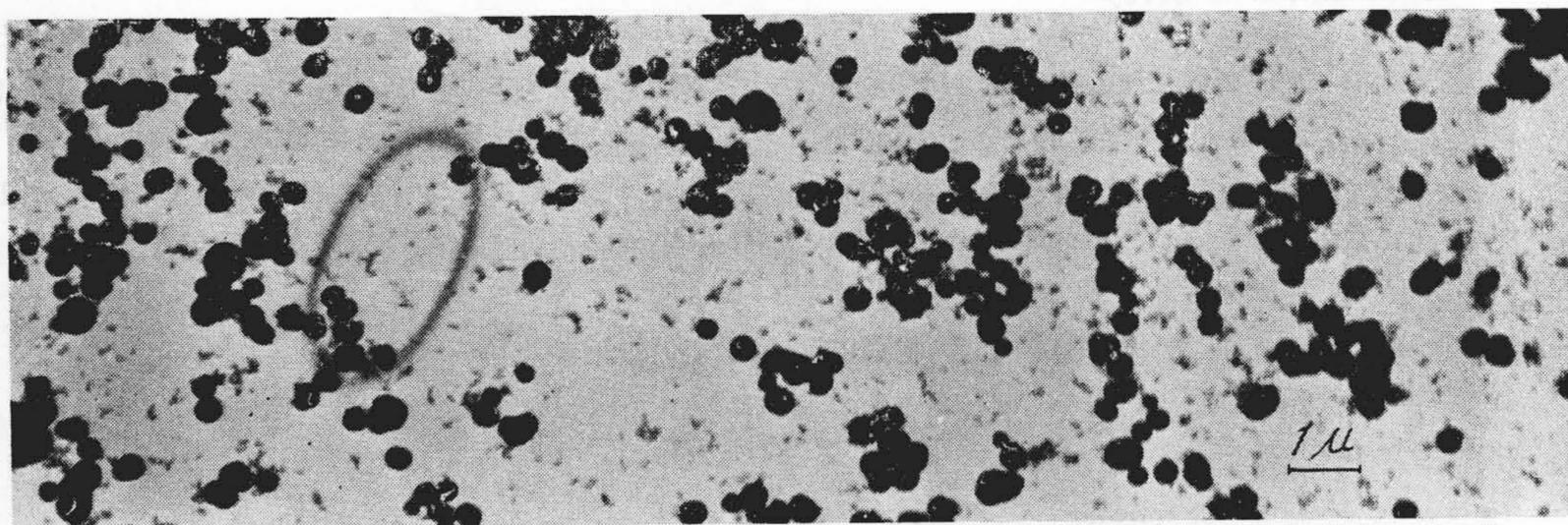
第1表 第8図の実験の色収差係数
Table 1. Chromatic Aberration Coefficient for the Experiment, Fig.8

	$IN/\sqrt{\phi}$	軸上色収差係数 C_{Fa}	倍率色収差係数 C_{Fm}	回転色収差係数 C_{Fr}	合成軸外色収差係数 C_{Fmr}
対物レンズ	18.3	1.0 mm	0	1.06	0.12*
投射レンズ	14.0		0	1.18	
合成				0.12* (2.24†)	
実験 (第18図a)					2.24†
実験 (第18図b)					0.12*

(註) * 逆極性励磁 † 同極性励磁



(a) 対物投射両レンズ同極性, 合成軸外色収差係数 2.24



(b) 対物投射両レンズ逆極性, 合成軸外色収差係数 0.12

第8図 軸上色収差係数と像の動き 高圧電源の変動 $\Delta\phi/\phi=6.3\times 10^{-2}$

Fig.8. Displacement of Carbon Black Image due to Chromatic Field Aberration
(Fluctuation in Accelerating Voltage $\Delta\phi/\phi=6.3\times 10^{-2}$)

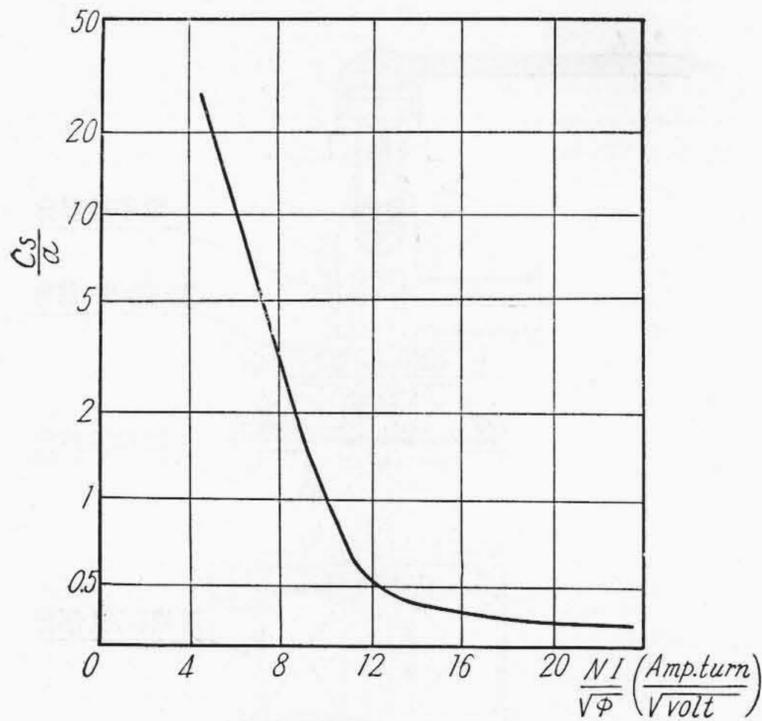
(5) 色収差補償レンズ系の球面収差

既に述べたように色収差補償レンズ系では、対物レンズの倍率色収差が0に近い励磁アンペア巻数で動作しており、 $IN/\sqrt{\phi}$ は凡そ19である。これに対し従来の電子顕微鏡は $IN/\sqrt{\phi}$ が8~12に設計されているから、球面収差係数 C_0 は3~5mmであつて、新しいレンズ系の $C_0=1$ mmにくらべて3~5倍大きい。球面収差の少ないということは色収差補償レンズ系の大きい特長になつている。第9図は励磁の強さ $IN/\sqrt{\phi}$ と球面収差係数の関係を示したものである。

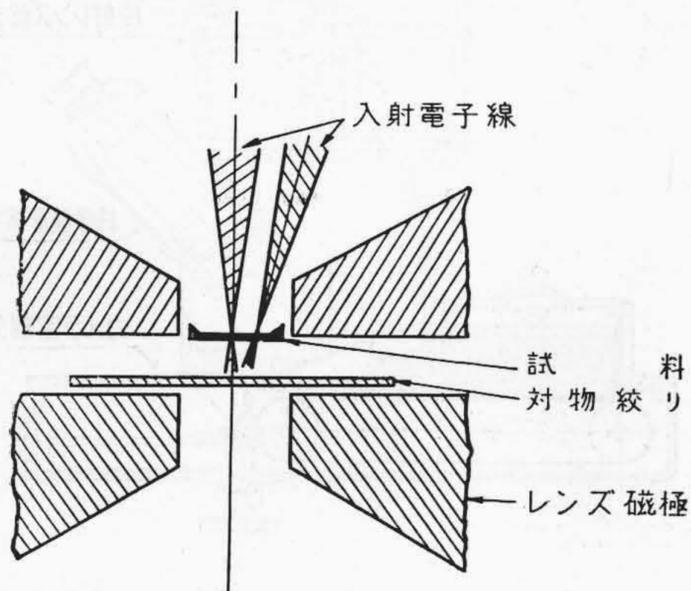
(6) 試料前磁場の検討⁽¹⁹⁾

色収差補償対物レンズは強励磁で使うために試料をレンズ磁場内に深く挿入せねばならないがそうすると試料前磁場が強くなりその影響で照射角が大きくなつて解像度を下げのおそれがある。これまでも前磁場による解像度の低下に就いては多くの発表があり、 $IN/\sqrt{\phi}<10$ でなければならないという悪影響過大視説もあつて納得することができなかつたが、森戸氏は計算によつて詳しい検討を行い次の結果を得た。

(1) 軸上照射角に就いては試料前磁場の影響は、試



第9図 球面収差係数曲線
Fig. 9. Spherical Aberration Coefficient for $NI/\sqrt{\phi}$



第10図 試料前磁物の影響図
Fig. 10. Field Effect for Illuminating Beam

料をレンズ内に深く挿入した場合 ($NI/\sqrt{\phi}=20$ ぐらい) でも小さく、実用的には問題はない。

- (2) 軸外の電子線に対しては、その傾きを大きくはするが照射角の増加は軸上の場合と同様に小さい。このことは強励磁の状態でも軸より数 μ 離れた物点の周りにも数本のフレネルフリンジが出ていることから裏書きされる。
- (3) レンズの球面収差を考えれば写像に関与する電子線が、レンズ内を軸付近で通るほど球面収差による像の劣化は少くなる筈である。ところが計算結果によれば前磁場は一般に第10図に示すように照射電子線束がレンズ内を軸付近で通るように作用するので前磁場は悪影響どころか好影響を及ぼすこともあり得る。

以上のことは照射角の計算結果とフレネルフリンジの

実験からいえることで、軸外の試料点であること自身による悪影響は他の収差面から当然存在し、試料による散乱もあるので、実験的に前磁場に基づく好影響は確かめられていない。しかし従来の説のように強励磁のための前磁場によつて解像度が低下するという事にはならない。

[III] HU-9型電子顕微鏡

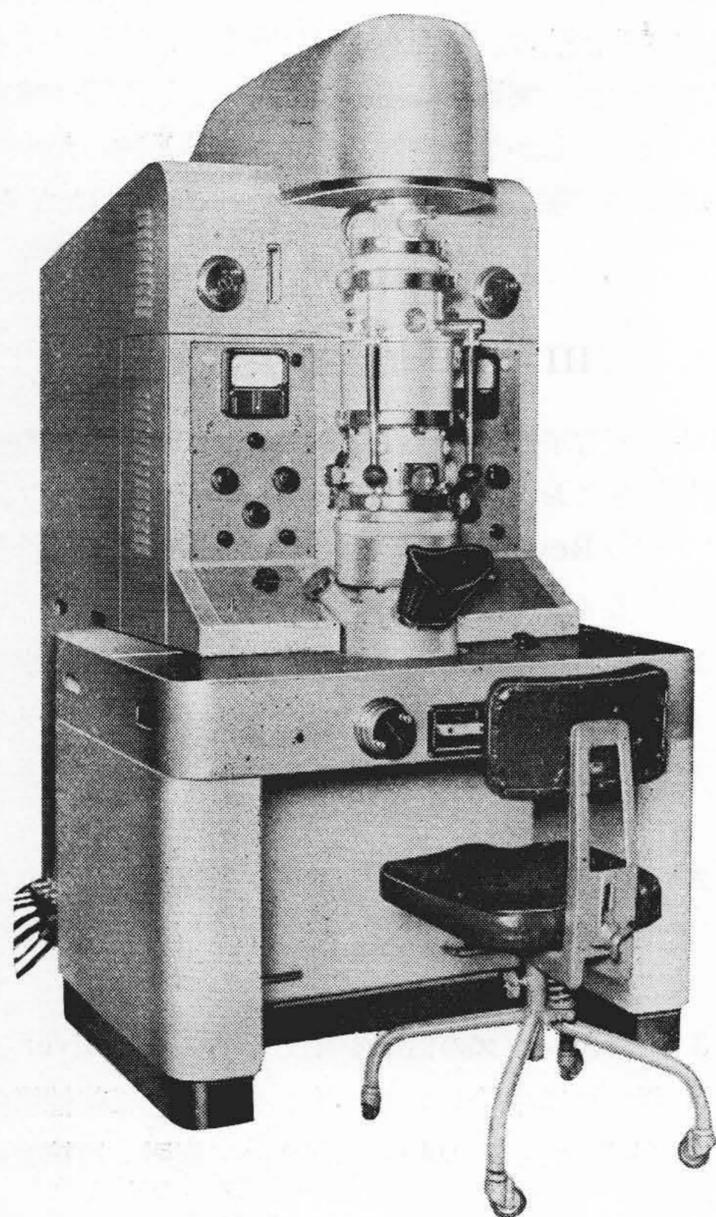
HU-9型電子顕微鏡は、像拡大レンズの設計基礎を色収差補償法におき、多能化の面から3段レンズとし、投射レンズの Revolver を活用して高分解能電子廻折法も実施できるように設計した。即ち

- (1) 色収差補償レンズ系で高圧電源に対する安定度の負担を軽減し、併せて対物レンズのコントラスト絞りの交換を容易にして厚い試料の観察を容易ならしめた。
- (2) 3段レンズとして、電子顕微鏡試料位置に於ける全視野又は制限視野に対応する廻折像が得られる。
- (3) 投射レンズの倍率を変えるのに Revolver 方式を用い更に中間レンズを併せて、色収差補償条件を満足しながら 800~15,000 の広範囲に連続変倍とした。
- (4) 中間レンズと投射レンズの間に電子廻折部を設け廻折アダプタを常備し、高分解能可変分散電子廻折、K-M 廻折、陰影顕微廻折 (Hillier 廻折)、陰影顕微鏡の4種に使える。
- (5) 電子廻折部には、必要に応じ、試料加熱装置、スプレーガン (電荷中和用) を取付け得る。
- (6) 暗視野像の撮影ができる。
- (7) 据付調整後は鏡体の解体を不必要とするため、コンデンサレンズ絞り、対物レンズ絞り、視野制限絞りは電子線を出したまま μ で中心合せが外部からでき、絞りの大きさも大中小の3段に変えられる。
- (8) 多数枚撮りカメラを考案し、撮影能率を著しく上げた。
- (9) 排気系統を新しく設計し、排気速度を上げ誤動作がない。
- (10) 高圧電源部は防電撃構造とし、安全装置を附した。

等である。第11図 (次頁参照) は全装置の写真、第12図 (次頁参照) は鏡体断面図である。以下各部の構造特長に就いて略述する。

(1) 電子光学系

電子顕微鏡のみでは物質の形態は知り得ても内部構造 (原子配列) は明らかにし得ないので、物質が何であるか



第 11 図 HU-9 型 電 子 顕 微 鏡
Fig. 11. General View of Type HU-9 Hitachi Electron Microscope

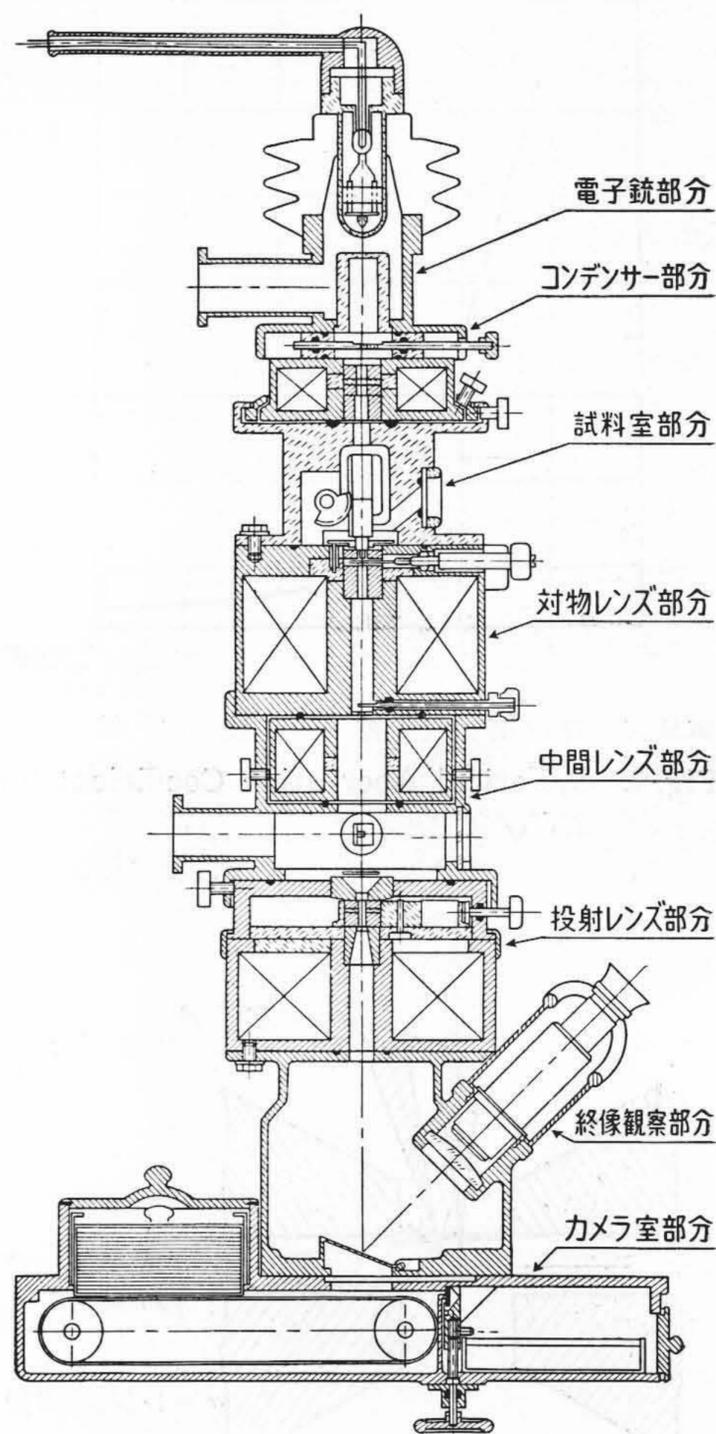
を決めることは難かしく、このため最近電子廻折の方法が併用されるようになった。また電子廻折法は電子顕微鏡製作技術の進歩によつて分解能が高まり、廻折像の異常が容易に観測されるようになって、それらの或るものは試料の大きさ、外形によるものであることが判り、電子顕微鏡による観察が解析の助けになつている。

HU-9 型電子顕微鏡の設計に当つては、電子顕微鏡と電子廻折との緊密な結合を企画し、以下に述べる如き多性能を発揮出来ることゝなつた。

(A) 明視野法 [第13図 (1),(2)]

第13図(1)は中間レンズを切り対物レンズと投射レンズを動作させ軸外色収差完全補償の条件で使用するものである。高い解像度の写真をとる場合はこのレンズ組合せが最も良い。

第13図(2)は倍率を広範囲に変える必要のある場合の使用法で、中間レンズと投射レンズの励磁電流を、定められた関係に於て変化し、倍率の変化にかゝらず軸外色収差を小さく保つようにしてある。この場合中間レンズは倍率縮小に用いている。



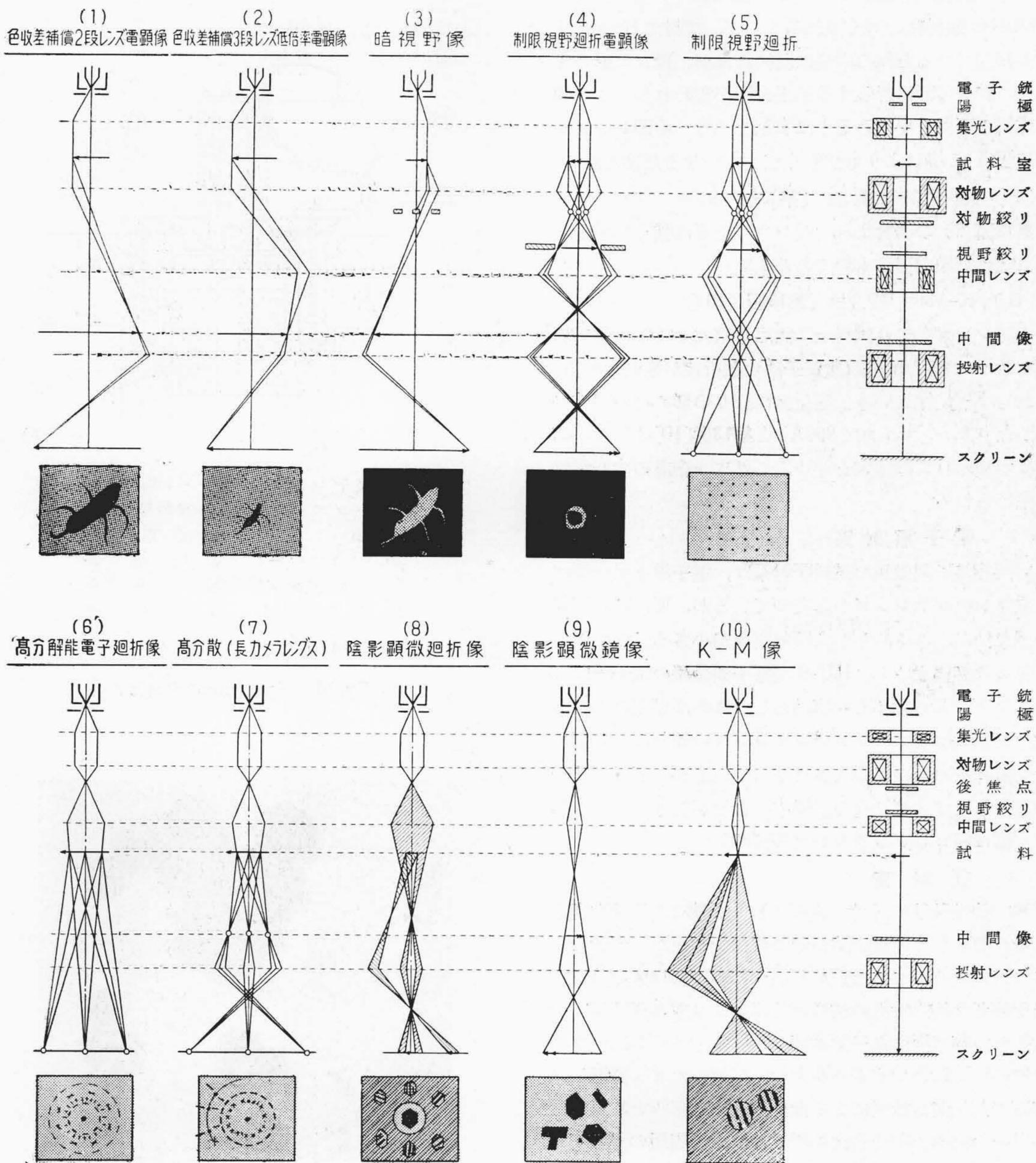
第 12 図 HU-9 型 電 子 顕 微 鏡 鏡 体
Fig. 12. Section of Principal Parts of the Type HU-9 Hitachi Electron Microscope

(B) 暗視野法 [第13図 (3)]

暗視野法は主電子ビームをストップし試料からの散乱電子のみで結像させるもので、明視野法では観察し難い厚い試料の内部構造や結晶試料の観察に適している。HU-9 型電子顕微鏡では、対物レンズに対して入射電子線の方向を傾ける方法、対物レンズコントラスト絞りを中心から外す法、対物投射面レンズの軸をずらせる法の何れによつても暗視野像が得られるが、後述の如く操作の難易、像の質にかなりの差がある。

(C) 制限視野廻折法 [第13図 (4),(5)]

第13図(4)の如く、対物レンズによる試料の拡大像を中間投射面レンズで拡大すると電子顕微鏡像が得られ、第13図(5)の如く対物レンズ後焦面の小さな廻折像を中間レンズで投射レンズの前に作るとこれが拡大されて廻折像が観察される。このとき中間レンズの前焦面附近で



第13図 電子光学系図

Fig.13. Representation of Electron Path in the HU-9 Electron Microscope

試料像を視野制限絞りによつて制限すると螢光板上の像も制限され廻折像に切り換えたとき、その部分のみの廻折像が現われる。この方法を制限視野廻折法とよんでいる。なお廻折えの切換えに当つては対物レンズのコントラスト絞りを取除き、視野制限絞りで所望の試料像を捕えるのであるが HU-9 型電子顕微鏡では外部から容易に操作できる。

(D) 高分解能廻折法 [第13図 (6)]

この場合は電子源のクロスオーバーの像をコンデンサレンズ及び対物レンズで縮小し、その縮小像を中間レンズによつて乾板上に結ぶもので、試料は中間レンズと投射レンズの間に置かれている。更に第13図(7)の如く投射レンズを動かせばカメラ長を変えることもできる。高分解能廻折像を得るためには高圧電源、レンズ電源に電子顕微鏡と同程度の安定を要求するが、この機械の性質上全然問題はない。

(E) 陰影顕微鏡廻折法 [第13図(8)]

Hillier 廻折法ともよばれるもので、試料で Bragg 反射が起つていると像の中央に明視野像が、絞りの影のまわりに試料の形に対応する暗視野像が現われる。この像は試料の面指数を決めるのに有用である。中間レンズは第13図(7)の場合よりも少しく強く働かせるだけである。

(F) 陰影顕微鏡法 [第13図(9)]

第13図(8)の場合より中間レンズを更に強くして全視野に明視野像を出すものである。

(G) K-M 廻折法 [第13図(10)]

中間レンズにより試料上に焦点を結ばせると(照射範囲は数十~数百 $m\mu$) 収斂電子線の廻折像が観測される。これを K-M 像という。廻折像は絞りの形になるが試料がかなり厚い(マイカで 900\AA) と第13図(10)のように廻折線が現われて副極大を伴い、これより結晶の内部電位が求められる。

(2) 電子照射系

高性能電子顕微鏡の試料照射系は、電子銃と単一又は二重コンデンサレンズから成っているが、要は試料照射の開き角が小さく、しかも照射面積が小さく且つ加減できるものが望ましい。HU-9 型電子顕微鏡の電子銃は、ファイラメントの芯出しを容易としたほかは従来のものと大きな差異はない。コンデンサレンズの絞りにには3箇の異なる孔径のものが挿入されており、必要に応じて電子線を出したまゝ絞りの交換中心合せができるようにした(第12図コンデンサレンズ部参照)。

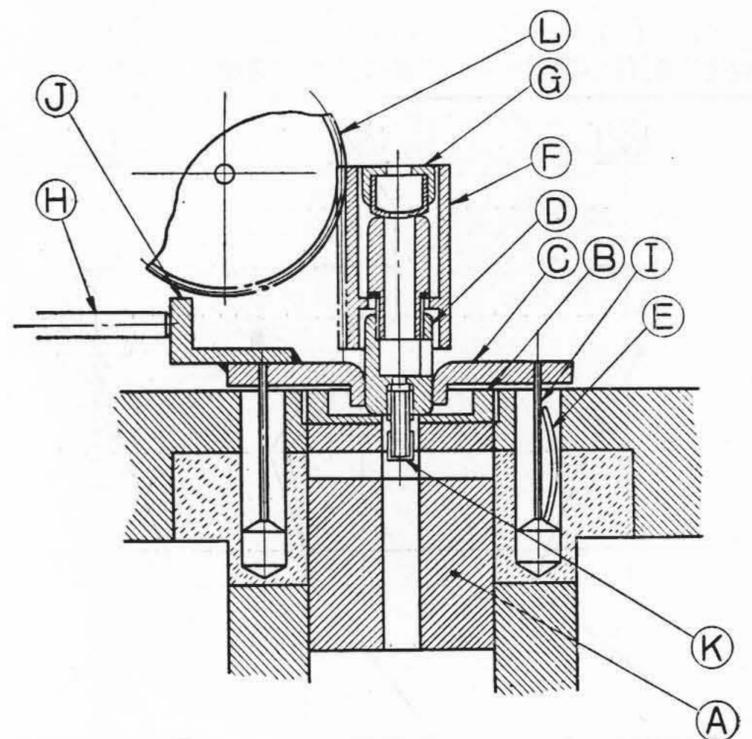
(3) 試料室

特に試料微動が円滑であることゝ振動による像障害除去を目標として従来の試料室に改造を加えた。両者を同時に満足させることは難かしかつたが、第14図の吊籠式微動装置と特殊設計の試料保持器により或る程度目的を達した。第15図は電子顕微鏡キャビネットの卓上(カメラ室の横)にハンドドリルをおいて廻したまゝ撮影した写真であるが、振動による像の動きは殆どみとめられない。そのため除振土台は不用となり設置場所の制限がらくになった。

対物レンズの焦点距離は屢々変える必要がある。たとえばコントラストのつき難いヴェールズ等に対しては長焦点レンズとして小さい孔の絞りを使う方がよいし、制限視野廻折に対しては試料の廻折角の広がりに応じて焦点距離を変えねばならない。幸いこの試料室は試料面を光軸上の任意の位置に止められる構造になつているので上に述べた焦点距離の調節は可能であるが、別に長さの異なる試料トレーガーも附属している。

(4) 対物レンズ

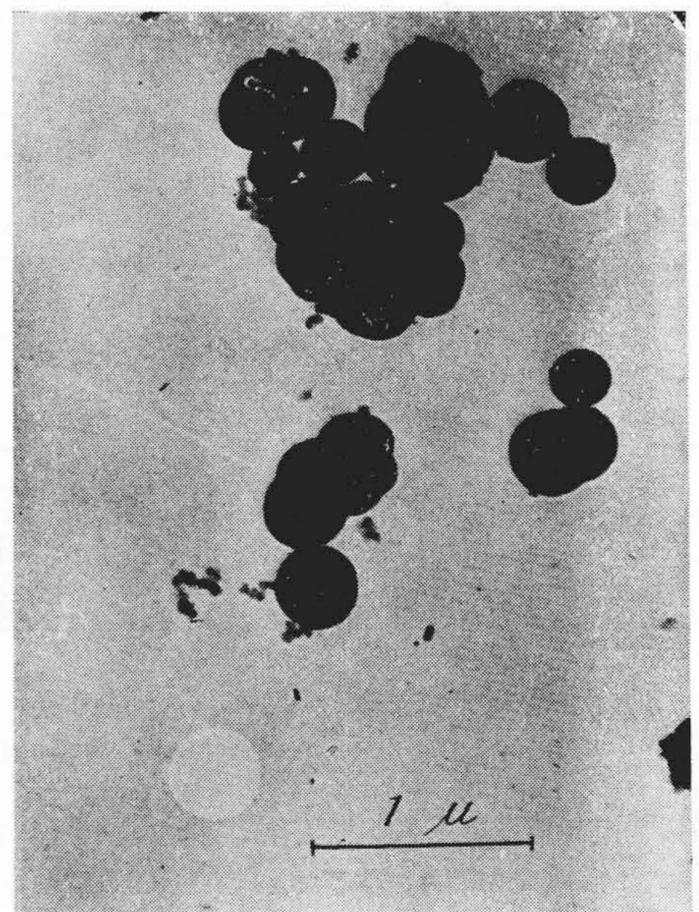
対物レンズは色収差補償条件を満足させるため最大励



- | | |
|-----------|-------------|
| (A) 電子レンズ | (G) バネ調節用ねじ |
| (B) レンズ押え | (H) 微動用押し棒 |
| (C) 皿 | (I) ピアノ線 |
| (D) ホルダー | (J) L 金具 |
| (E) スプリング | (K) トレーガー |
| (F) 筒 | (L) ギヤ |

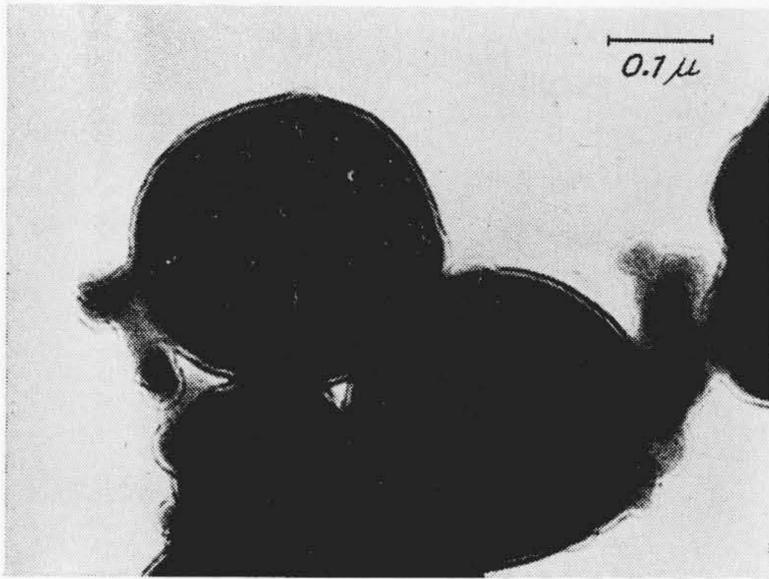
第14図 試料微動

Fig.14. Specimen Stage



第15図 HU-9 型の耐振性
キャビネット卓上でハンド電気ドリルを
廻して振動をさせながら撮影した

Fig.15. Vibration Proof Property of the Type
HU-9 Electron Microscope



第 16 図 強いレンズで用いた時非点収差の小さいことを示す過焦点像のフリッジ
試料カーボンブラック

Fig. 16. Overfocused Contour Fringe of Carbon Black Obtained with a Strong Objective Field (Very Small Astigmatic Aberration)

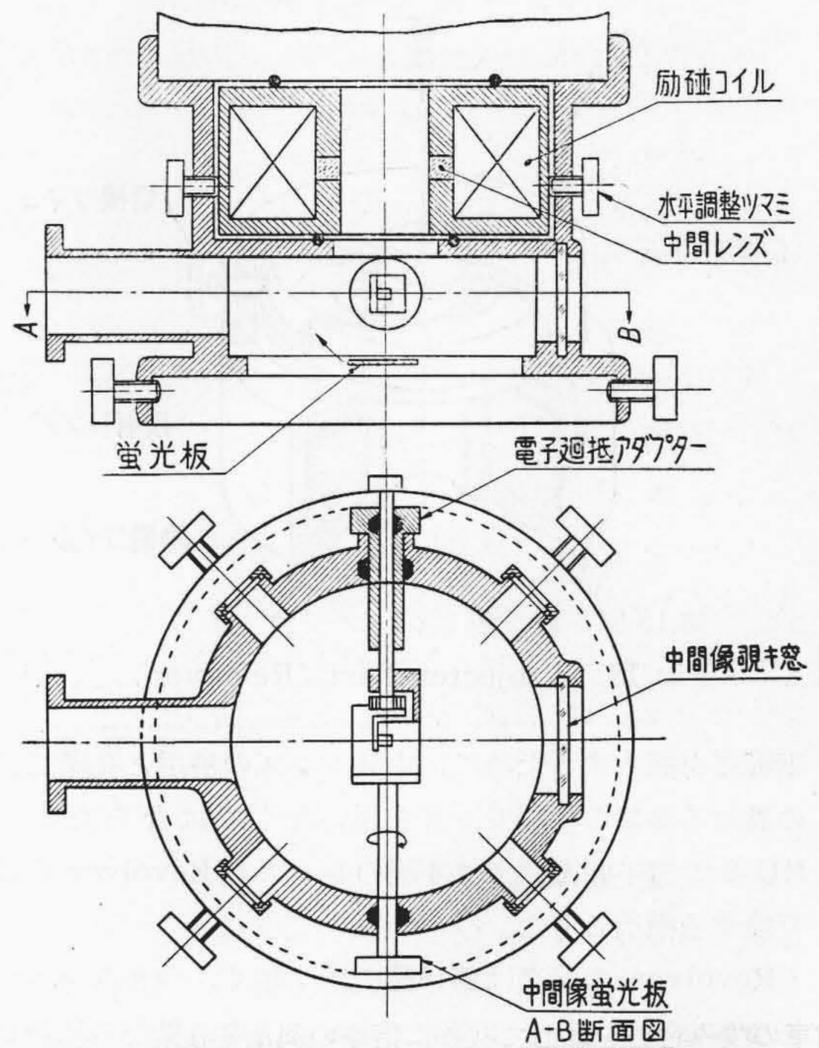
磁では $IN/\sqrt{\phi} \approx 20$ ぐらいまで使えるように設計してあつて、従来のコイルよりもかなり大きい。しかし必要によつては弱励磁でも使うことがあり、レンズスタビライザの電流可変範囲を広くとつてある。

対物レンズを強励磁で使う利点の一つは、非点収差が著しく小さくなることである。その理由はレンズ磁極素材に残存する磁氣的異方性の減少と考えられる。第16図にカーボンブラックを高倍率で撮つた場合の過焦点フリッジを示す。

電子顕微鏡の使用時、試料の性質によつてコントラスト絞りの孔径を変えたいことや、制限視野廻折では外部廻折環がコントラスト絞りに遮られないために、大きい絞りと取かえる必要が起る。HU-9型電子顕微鏡では対物レンズの絞りはコイルの側面から真空パッキングを通してレンズ磁極の下面に挿入する構造になつており、同時に大、中、小3箇の絞りを保持できる。そのため像を出したまま外部から絞り孔の交換と中心合せができ、試料に応じて適当な絞り孔径のものを選択使用することが可能となつた。絞り孔の交換に要する時間は僅か10secである。なお絞り板には厚さ0.05~0.1mmの白金板を用いている。

(5) 中間レンズ及び高分解能電子廻折装置

中間レンズを倍率縮小レンズに使つた場合、倍率色収差係数 $(C_{Fm})_i$ は常に正で、(10)式から判るように倍率縮小率1のとき $(C_{Fm})_i = 0$ 、0.5のとき $(C_{Fm})_i = 1$ 、0.33のとき $(C_{Fm})_i = 2$ である。回転色収差係数は励磁アンペア巻数の増加(縮小率の減少)に比例して増す。投射レンズの励磁電流を減じて倍率を下げると、投射レ



第 17 図 中間レンズ部及び廻折室

Fig. 17. Intermediate Lens Part and Diffraction Specimen Chamber

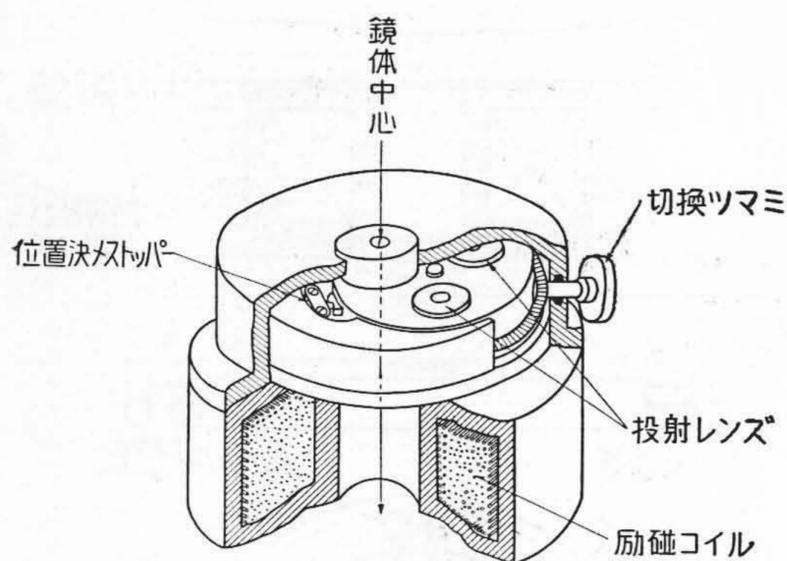
ンズの回転色収差係数は小さくなり、倍率色収差係数は負符号で絶対値を増すから、これと中間レンズを適当に加えて軸外色収差係数の総和を極小に保ちながら、かなりの範囲に亘つて総合倍率を変えることができた。

制限視野廻折を行う場合、中間レンズの非点収差や球面収差が輝点の大きさに影響するので、精密に工作された大きい孔径のレンズを用い、電子光学的に対物投射両レンズに対して軸合せを行つて、レンズの中心部のみを利用するようにしなければならない。そのため対物投射両レンズと関係なく、中間レンズのみを動かす方向調整装置を設けてある(第17図参照)。

中間レンズと投射レンズとの間に高性能電子廻折室が設けてある。廻折室には中間像覗窓、中間像蛍光板及び排気抜口の他に、アダプター取付口が4箇あり、普通は栓をしてあるが、必要に応じて透過反射両用の廻折アダプター、試料加熱装置、スプレーガン等を取付けられるようになつている。

(6) 投射レンズ

投射レンズは軸外色収差補償のため、アンペア巻数は倍率極大(倍率色収差0)となし得る如く設計され、同時に回転色収差も補償されるよう磁極孔径と間隔の比を適当に選んである。投射レンズのこのような使いかたでは、対物レンズと組合せたとき倍率は固定するので、倍



第 18 図 投影 レンズ 部
Fig. 18. Projector Part (Revolver)

率範囲を拡大するために、中間レンズの併用と孔径間隔の異なる多数の投影レンズを用いなくてはならない。HU-9 型電子顕微鏡では 4 箇のレンズを Revolver 式に交換する構造とした。

Revolver の構造は第 18 図に示す如く、つまみを廻すと傘歯車の咬み合いを通して次々に倍率の異なる投影レンズが光軸上に出て来る。正確に工作されたストッパーがあり常に投影レンズ磁極は光軸上で止るようになっている。

(7) カメラボックス

像の観察には明るい視野を楽に覗いて正しくピント合わせができ、高能率撮影の可能なカメラボックスを設計した。

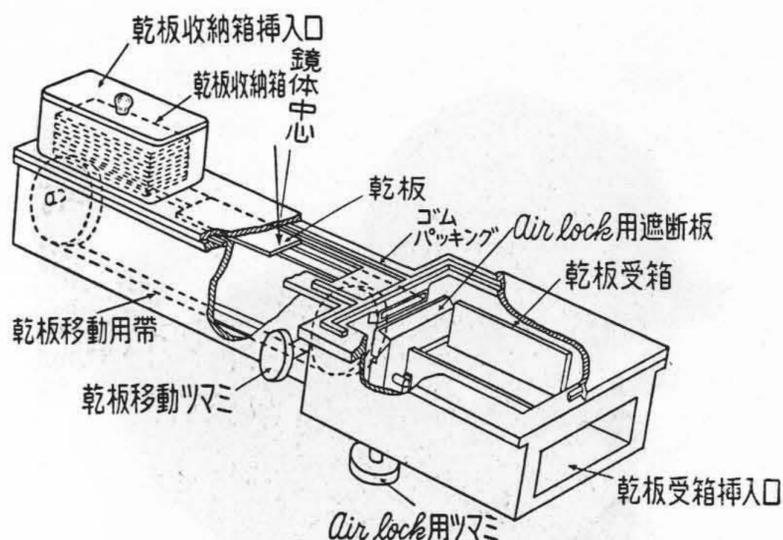
蛍光板は 55×60 mm 角で水平に対し 30° の角度で斜めに立つており、両眼で 2.5 倍の拡大鏡を通して全視野を観察することができる。ピント合せの場合は 10 倍のルーペが附属しているので極めて正確に合せられる。

レンズ類はすべて無反射処理を施して視野の明るさの減少を防いでいる。また正面の主視窓の他に両側にも別の視窓を設けて多人数の観察を便にした。電子廻折の場合主スポットの遮断にスプーンを取付けてある。

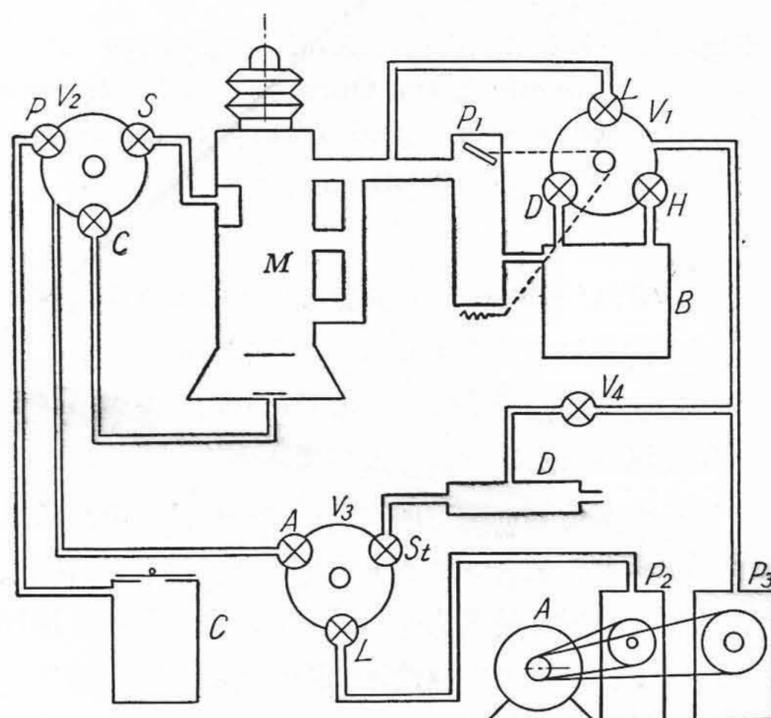
カメラ室は高能率撮影を実現するため従来の方式をやめて第 19 図の如き多数枚撮影用カメラを考案設計した。これによりキャビネ 1/3 載 18 枚 (乾板 1 枚の大きさ 120×50 mm, 50×50 mm 36 駒, 50×20 mm 72 駒) 同時に装架でき、連続撮影も、また途中で露出済みの乾板を任意枚数だけ像を出したまま取出して現像することもできる。

(8) 真空排気系

従来の高真空排気系が、排気抵抗と誤操作の立場からみて、かなり不合理に作られていたことは否めない。排気抵抗の主なものは、排気管の抵抗とバルブの開きの足



第 19 図 カメラ室 (36 枚撮り)
Fig. 19. Photographic Chamber

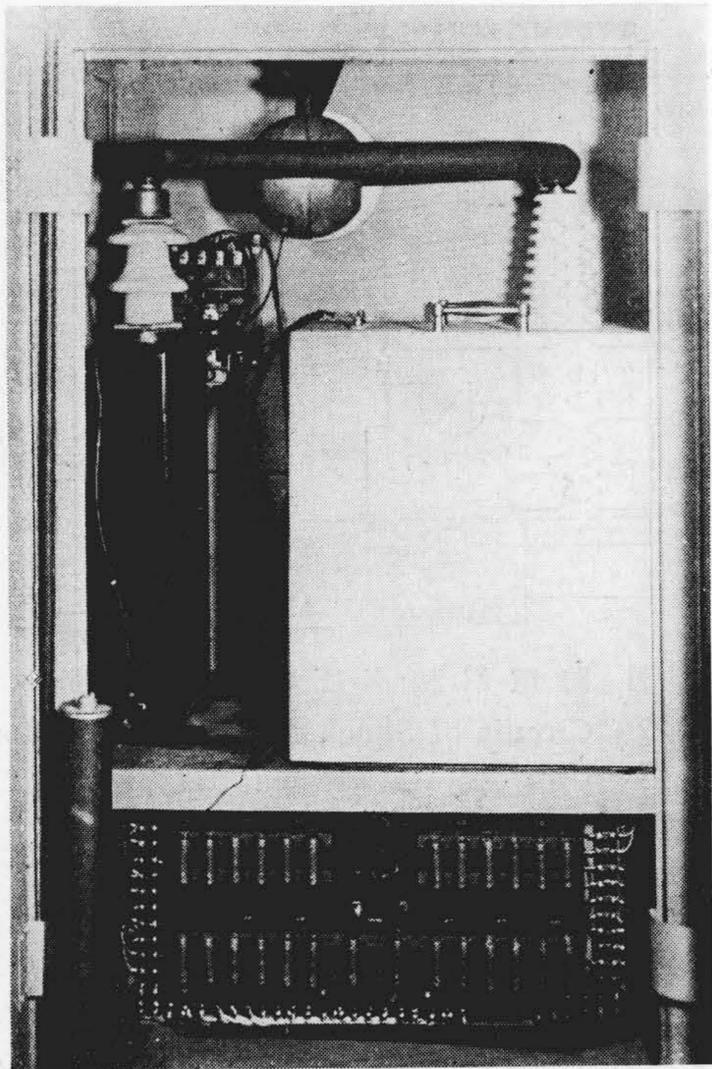


- V₁~V₄: バルブ
- P₁: 油拡散ポンプ
- P₂~P₃: 油廻転ポンプ
- M: 鏡体
- A: モータ
- B: 真空タンク
- C: 乾板予備排気室
- L: 低真空排気
- D: 乾燥剤室
- H: 高真空排気
- S: 試料室排気
- C: カメラ室排気
- P: 乾板予備排気
- A: リーク
- St: 停止

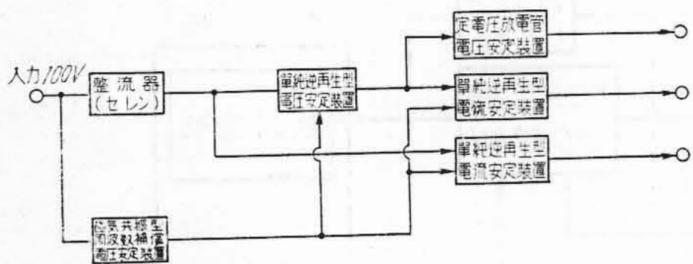
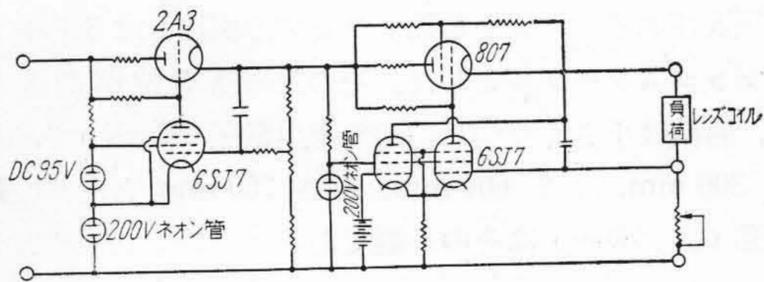
第 20 図 真空排気系統
Fig. 20. Schematic Diagram of the Vacuum System

りないことにあるが、HU-9 型電子顕微鏡に於ては、バルブを新しく設計し、拡散ポンプを鏡体に近づけて排気速度の増大を図った。第 20 図に総合排気系統を示した。

従来の主バルブはペローの伸縮を利用したもので、バルブのストロークを大きくするのに設計上無理があつたため、今回は第 21 図の如き回転開閉方式を採用し、低真空側の切換バルブにはカム溝で 3 箇のバルブが動作する星形バルブを作つた。主バルブと星形バルブとは、クランクとカムによつて連結して誤動作を防いだ。排気所要時間は、鏡体大気圧から使用可能まで 20 min, 又試料交換 30 sec, 乾板取出し 30 sec 程度である。



第 24 図 防 電 撃 型 高 圧 電 源
Fig. 24. Shock Proof High Tension Transformer



第 25 図 電 流 ス タ ビ ラ イ ザ ー
Fig. 25. Circuit Diagram for Current Stabilizer

レンズ励磁電源も従来の装置と大差なく、第25図の如き単純逆再生方式を採用した。電源の安定度は、凡そ高圧 0.01%，対物レンズ及び投射レンズ 0.01%，中間レンズ 0.01%，コンデンサレンズ 0.05% である。

電子顕微鏡の調整には電圧中心、電流中心が同一視野内にあることが望ましく、とくに色収差補償電子顕微鏡では電圧中心が螢光板の中央にあるように調整せねばな

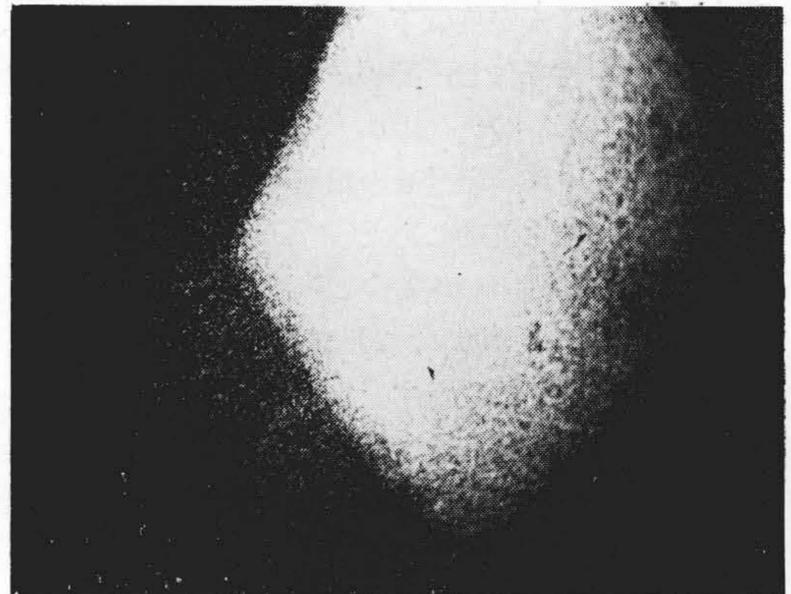
らない。電流中心はレンズ励磁電流の極性を切りかえたり電流を増減して合せているが、電圧中心の出しかたは極めて面倒であつた。HU-9 型電子顕微鏡に於ては第23図の如く高圧コンデンサの接地側を絶縁して小型変圧器を挿入し、一次側より電圧を加えて数百ボルトの交流を直流高圧に附加重畳し、大きい電圧変動を与えてそれによる像の動きから電圧中心を見出す方法をとつた。

配線の点検を容易にするため、配線をすべて配電盤に集め、開放容易な構造のケースに納めた。

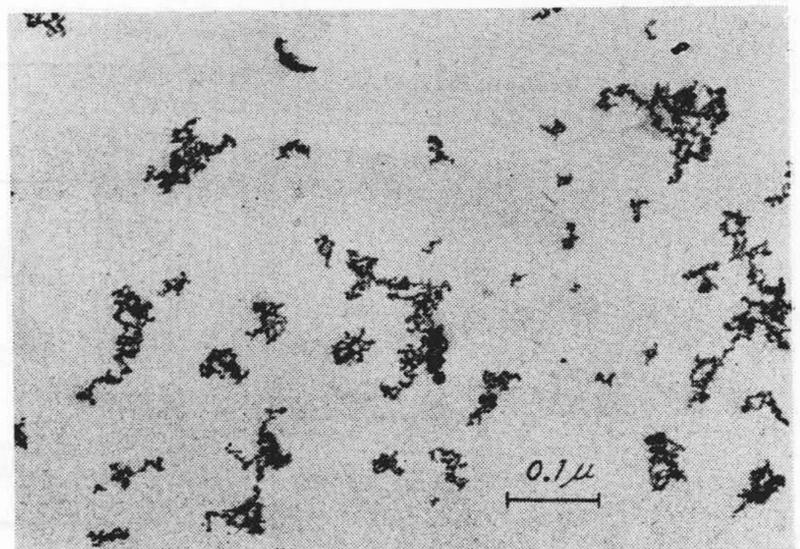
[IV] HU-9 型電子顕微鏡の性能

(1) 明視野像の倍率と分解能

Revolver 式投射レンズと中間レンズにより、直接倍率を $\times 800 \sim \times 15,000$ まで広範囲に連続に変えられ、その間すべて軸外色収差係数は 0.3 以内 (普通 1~2) におさえられている。とくに $\times 2,500$, $\times 5,000$, $\times 10,000$ 及び $\times 15,000$ の各倍率に於ては軸外色収差は完全に近く補償されている。終像焦点合せの場合は $\times 10$ の顕微鏡

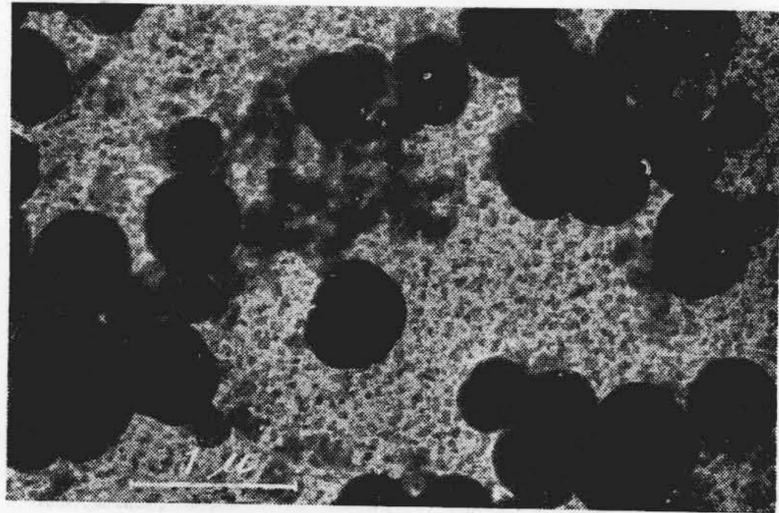


(a) ジョジアカオリン、角の鈍化より測定 $\times 420,000$

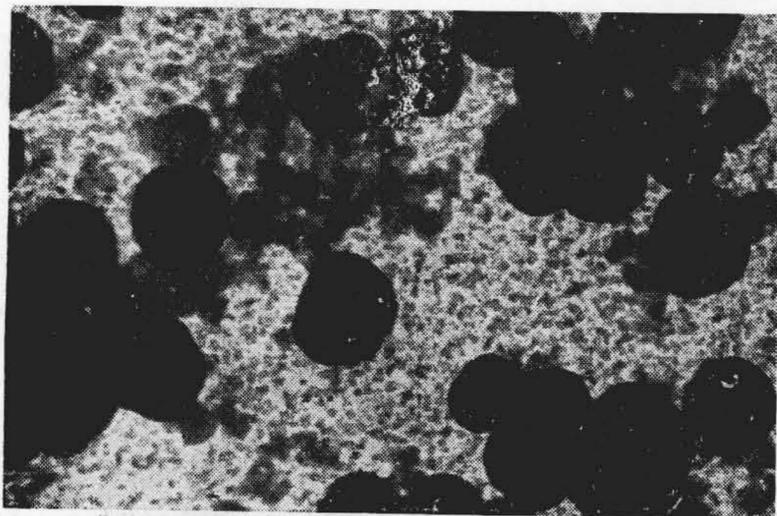


(b) 金コロイド 2 粒子間の見分け得る間隔より測定

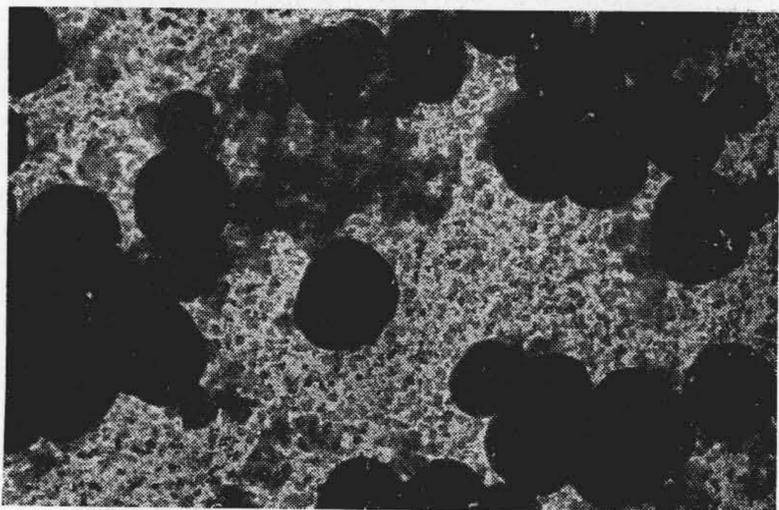
第 26 図 HU-9 型電子顕微鏡の解像度を示す写真
Fig. 26. Micrograph Representing the Resolution of the Type HU-9 Electron Microscope



(a) $\Delta\phi/\phi=0.01\%$



(b) $\Delta\phi/\phi=0.2\%$



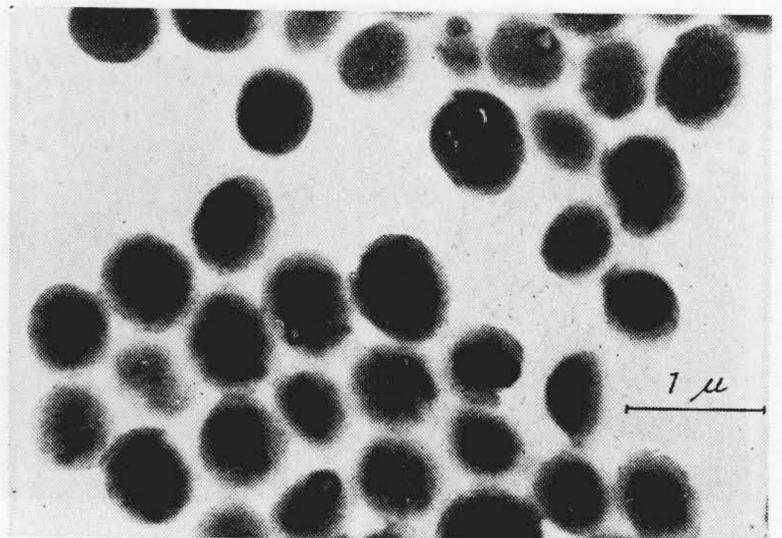
(c) $\Delta\phi/\phi=1.0\%$

第 27 図 高圧変動と解像度の低下を示す写真
(カーボンブラックとコロイド)

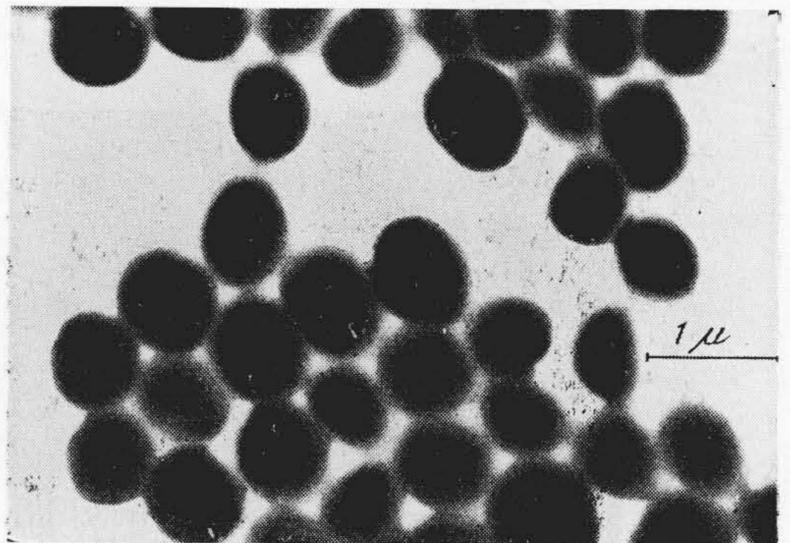
Fig. 27. Micrograph for Relation between the
Fluctuation in Accelerating Voltage
and Resolution
(Carbon Black and Colloid)

で拡大しているのので、最高 150,000 倍の像が肉眼で観察できる。終像の明るさはコンデンサレンズの強さや対物レンズ絞りの大きさが異なるが最高倍率でもらうに見られる。

分解能は測定の方法で種々の値を示すが、我々はカオリンの如く鋭角をもつ微粉末試料の角の鈍化と、金コロイド粒子の分解し得る二点間の距離の 2 方法で測つてみた。その結果角の鈍化からは $2.5\text{ m}\mu$ 、2 物点間の距離からは $2\text{ m}\mu$ の値が得られ、 $2\sim 3\text{ m}\mu$ の分解能を示した。第 26 図 (a)(b) はその写真である。



(a) 色収差補償



(b) 普通レンズ

第 28 図 黄色ブドウ状球菌の観察
(電圧 50 kV, 寒天培養 24 hr)

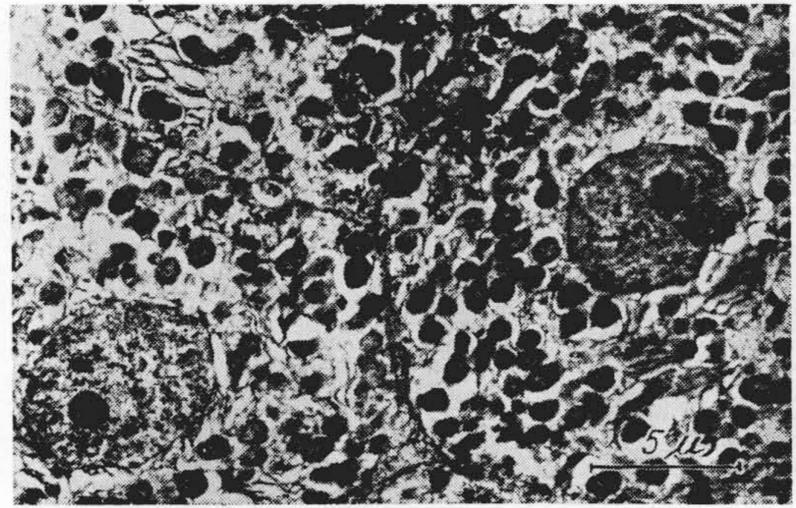
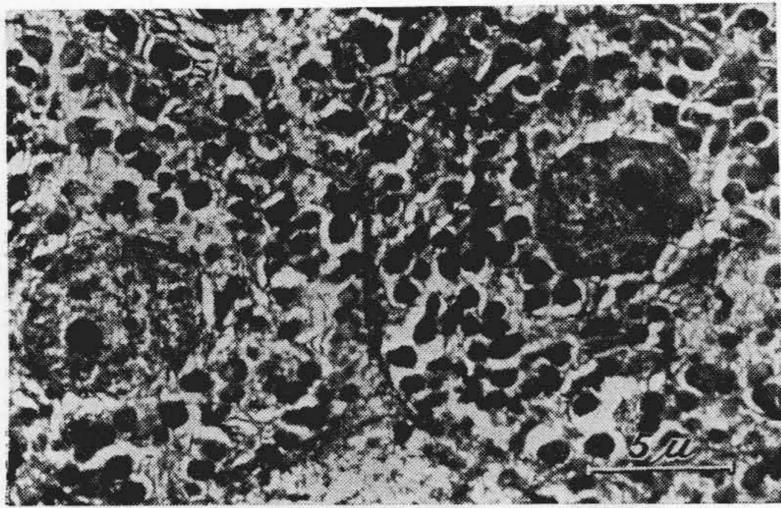
Fig. 28. Micrograph of Staphylococcus

高圧電源が変動すれば解像度が低下することは周知の通りであるが、HU-9 型電子顕微鏡に於ては色収差を補償しているため普通型にくらべて像障害の程度は著しく緩和されている。第 27 図はコロジオン膜上にカーボンブラックを分散させた試料の電子顕微鏡写真である。電圧変動の与えかたは、安定化された高圧電源の接地側から交流を重ねる方法をとつた。第 27 図 (a) は $\Delta\phi/\phi=0.01\%$ 、(b) は $\Delta\phi/\phi=0.2\%$ 、(c) は $\Delta\phi/\phi=1\%$ の場合であつて、 $\Delta\phi/\phi=1\%$ の大きい変動 (従来の 100 倍) に於てさえ、全視野に亘つて数十 $\text{m}\mu$ の解像度 (同じ条件で Le Poole は $8\text{ m}\mu$) をもち期待に近い写真が得られている。

(2) 明視野像のコントラスト調整

HU-9 型電子顕微鏡で対物レンズ絞りの孔径を大きくすると普通レンズの電子顕微鏡像にくらべて厚い試料の内部構造がよく観察されることが多い。第 28 図及び第 29 図 (次頁参照) はその一例である。

既に述べたように色収差補償の対物レンズは強レンズを使つているので軸上色収差と球面収差は普通レンズにくらべて著しく小さく、軸外色収差は殆ど 0 である。厚い試料の像が良くみえるのは、色収差が小さいためであ



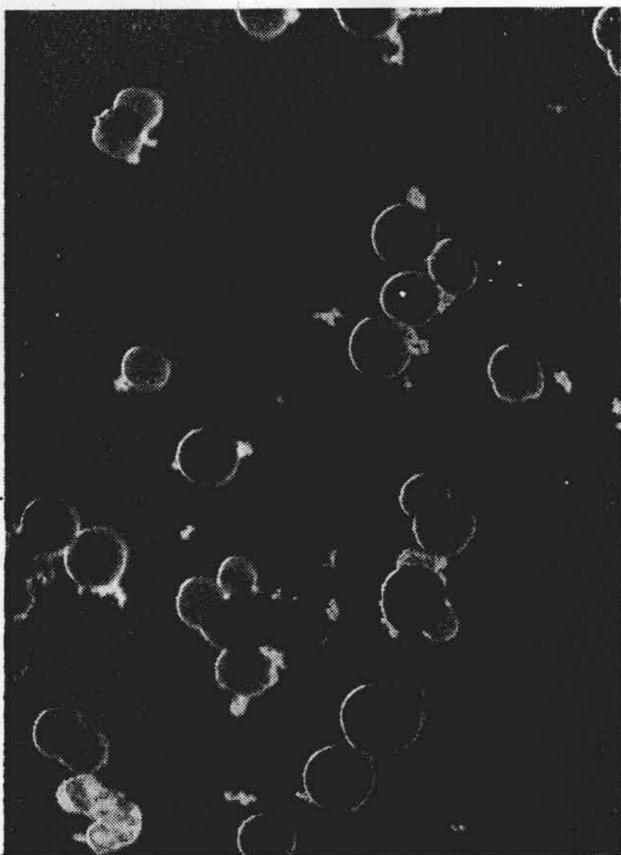
(a) 普通レンズ

(b) 色収差補償レンズ

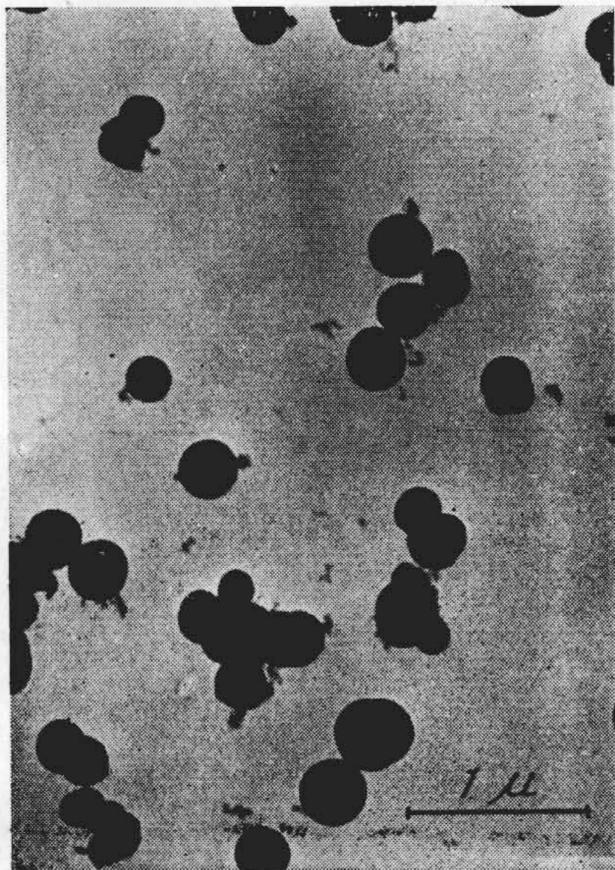
第29図 ラットの肝臓ミクロトーム切片 (電圧50kV)

Fig.29. Micrograph of Rat's Liver Obtained by Ultra Microtome

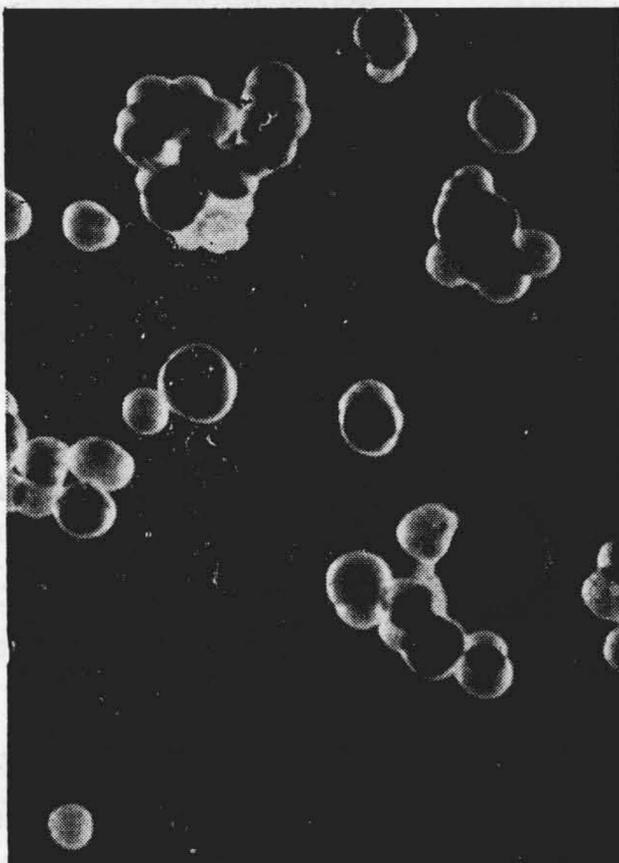
(a) 暗視野像



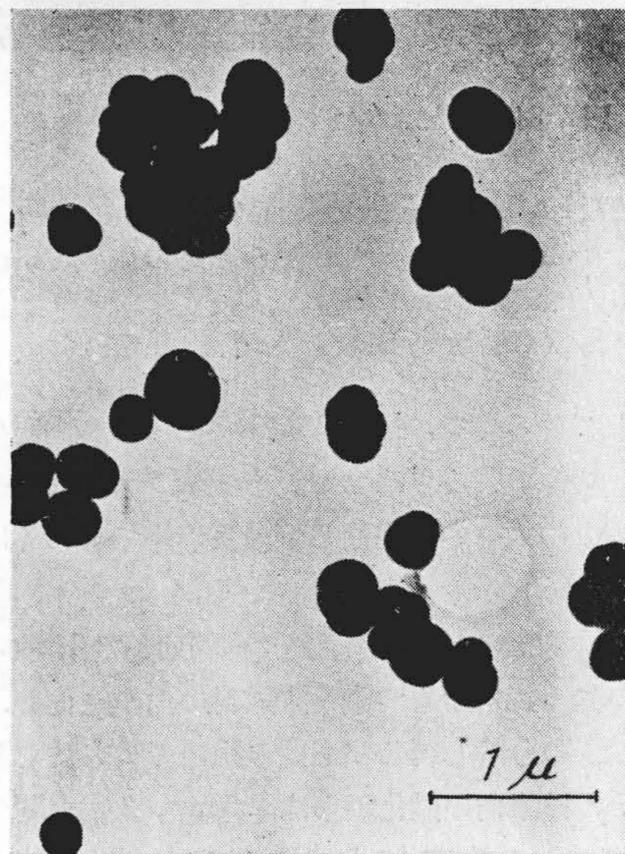
(a) 明視野像



(b) 暗視野像



(b) 明視野像



(a) 対物, レンズの絞りを中心から外した場合

(b) 対物, 投射レンズの軸をずらせた場合

第30図 HU-9型電子顕微鏡による暗視野像

Fig.30. Dark Field Image of Carbon Black

るとする説と、色収差と球面収差が或る励磁条件で補正する所謂スフェロアクロマチゼーションによる説とがあり、問題は今後に残されている。

ゲイールスや高分子微粒子の如くコントラストのつき難い試料に対しては試料を上げて対物レンズの焦点距離を長くし、対物レンズの絞り孔を小さいものと交換してコントラストを上げるようにする。絞り孔の交換は 10 sec ぐらいのできるのでコントラスト調整は容易である。

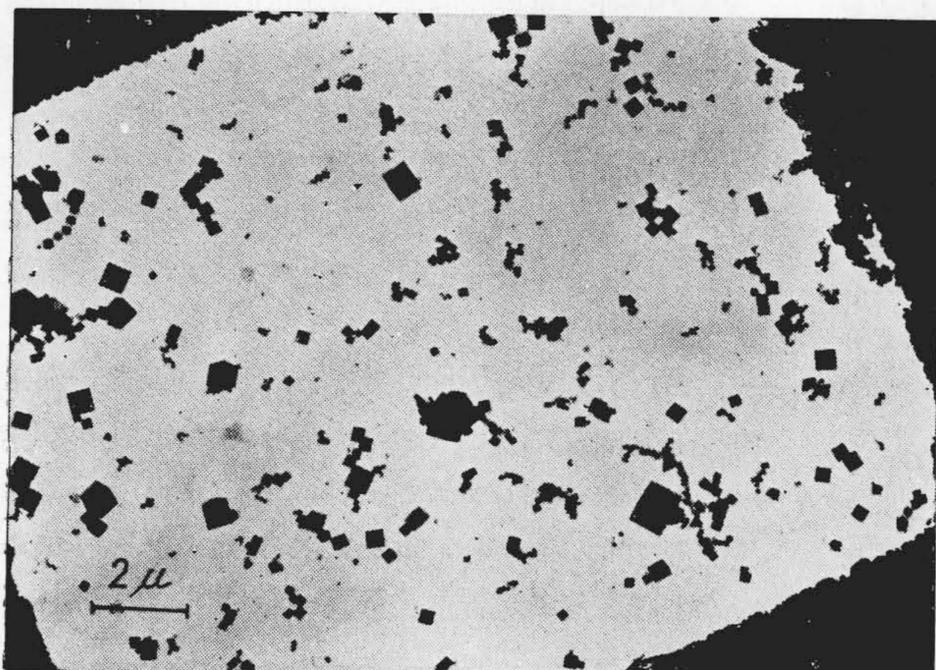
(3) 暗視野像

既に述べたように HU-9 型電子顕微鏡による暗視野像は 3 種の異なる方法で行えるが、像の質からは入射電子線を傾斜させる方法が、また操作の容易さからは対物レ

ンズ絞りの中心を外す方法が優れている。後者は絞り孔径を小さくし (20 μ 位) 絞りを光軸から外し過ぎないようにしなければならない。このような注意を払つても粒子像の縁のかぶやきは第30図(a)の如く対称を欠いている。その主因は球面収差よりもむしろ色収差によるものと考えている。対物レンズと投射レンズの軸をずらして撮つた暗視野像にはこのような現象はなく第30図(b)の如く美しい写真が得られる。

(4) 制限視野廻折

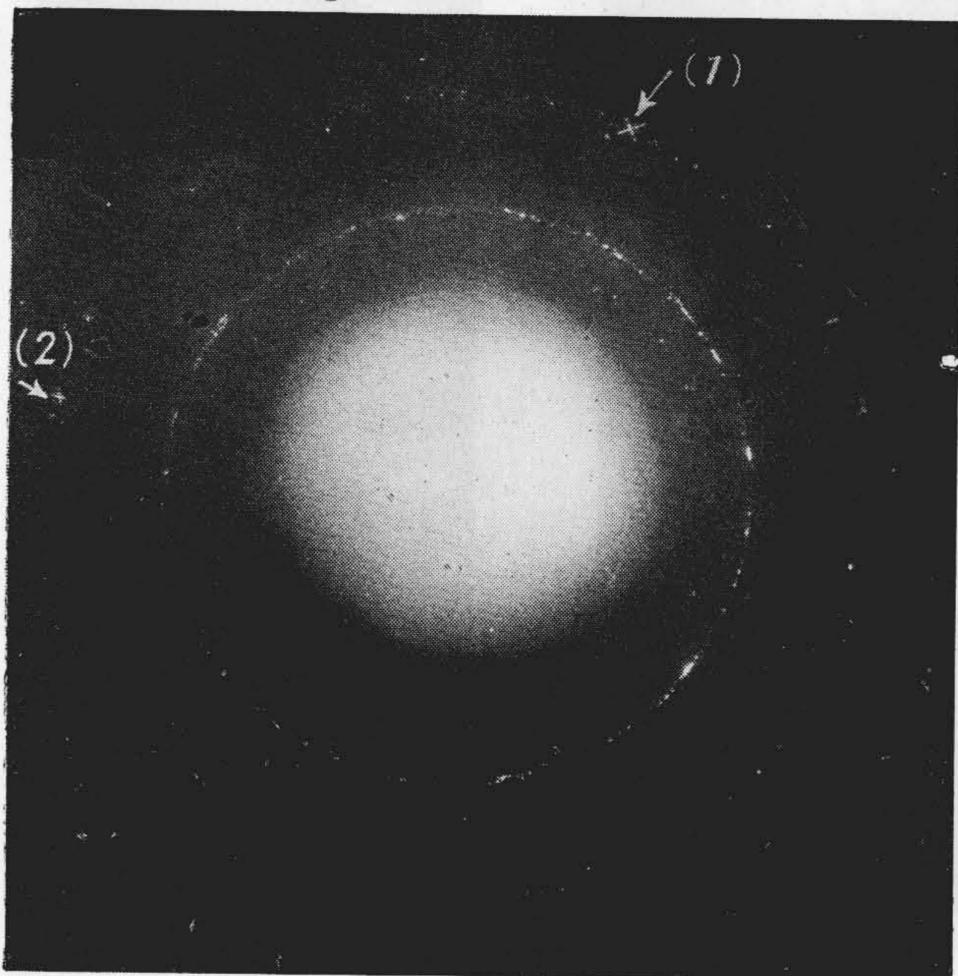
第31図は MgO 結晶の制限視野廻折像 (a) とそれに対応する廻折像 (b) である。(c) 図は (b) 図の一部を拡大したものであるが電子線の複屈折効果による斑点の分裂がみられる。(d) 図は (c) 図の矢印(1)の斑点を対



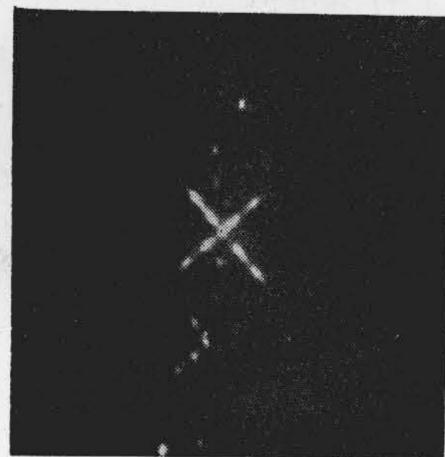
(a) MgO



(d) (a) の一部の暗視野像



(b) (a) に対する廻折像



(c) (b) 図 (1) 矢印の拡大像



(c) (b) 図 (2) 矢印の拡大像

第31図 制限視野廻折像

Fig.31. Boersch's Electron Diffraction Pattern

第 2 表 制限視野廻折の分解能指数
Table 2. Resolving Index of Boerch's
Electron Diffraction

カメラ長 (mm)	乾板上のスポットサイズ (mm)	分解能指数
350	0.06	1.7×10^{-4}
495	0.1	2.0×10^{-4}
1,700	0.3	1.8×10^{-4}

物レンズ絞りで拾つて暗視野像として見たもので、矢印の斑点は MgO の〔220〕面からの廻折であることが知られる。

制限視野廻折の場合の分解能指数 (resolving index) は次のようにして求めた。即ち廻折像を撮るときと同じレンズ動作条件で中間レンズにより乾板の上に正しく焦点を結び、乾板を動かして線を描かせその太さをマイクロメータで測つてカメラ長で割り分解能指数とした。

実験結果は第 2 表の通りであつて、カメラ長 350~1,700 mm の範囲で、分解能指数は 2×10^{-4} よりも幾分よいということが判つた。この場合コンデンサレンズの強さを変えると指数はかなり変り、電子源のクロスオーバーのスポットサイズを小さくすれば 1×10^{-4} ぐらいまで改善し得る。

(5) 高分解能廻折

HU-9 型電子顕微鏡では高分解能廻折に投射レンズを用いない場合、カメラ長は 350 mm であるが、投射レ

ンズを使うと 0~2,000 mm の範囲に変えられる。分解能を左右する乾板上のスポットサイズは制限視野絞りの汚れの影響と焦点合せの良否にかなり敏感であるが、注意して使えば 3~4 μ の太さまで縮小することができる。従つて投射レンズ無しの際の分解能指数は約 1×10^{-5} である。第 32 図に酸化亜鉛の高分解能廻折像を示した。

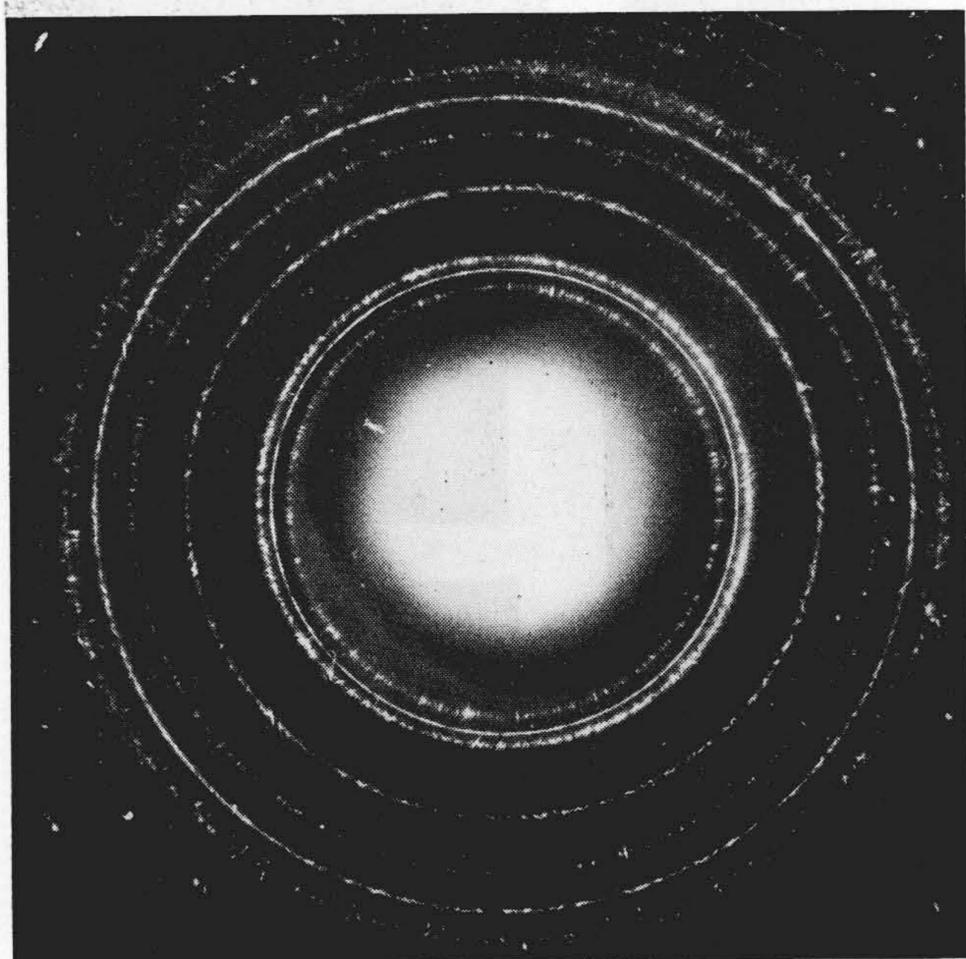
(6) 陰影顕微鏡廻折及び K-M 廻折

第 33 図及び第 34 図はこの装置で得られた陰影顕微鏡廻折像及び K-M 廻折像である。このほかこゝには例示しなかつたが陰影顕微鏡像も容易に得られる。

[V] 結 言

HU-9 型電子顕微鏡は、日立に於ける色収差補償レンズ系の研究に基礎をおき、多能化の面では最近の電子廻折装置の知識をとり入れ、電源、真空排気系、鏡体等は大部分新考案になるものを具体化したものである。本文の要旨を総括すると次の如くである。

- (1) 磁界レンズの色収差補償法を確立するに至るまでの歴史的背景に就いて述べ、その原理、実験、理論を詳論した。
- (2) 色収差補償法を実現した HU-9 型電子顕微鏡の設計目標に就いて述べ、投射レンズに Revolver を使い、中間レンズと投射レンズの間に電子廻折室を設けたことから、電子光学的に約 10 種に使える。
- (3) 更に鏡体設計、電源、排気系に就いて述べ、と



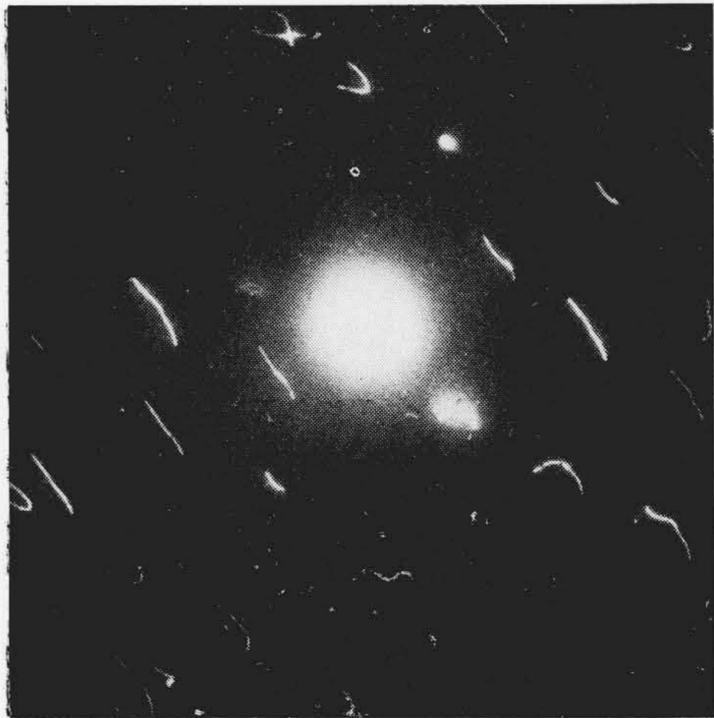
(a) ZnO 矢印粉末の高分解能電子廻折像



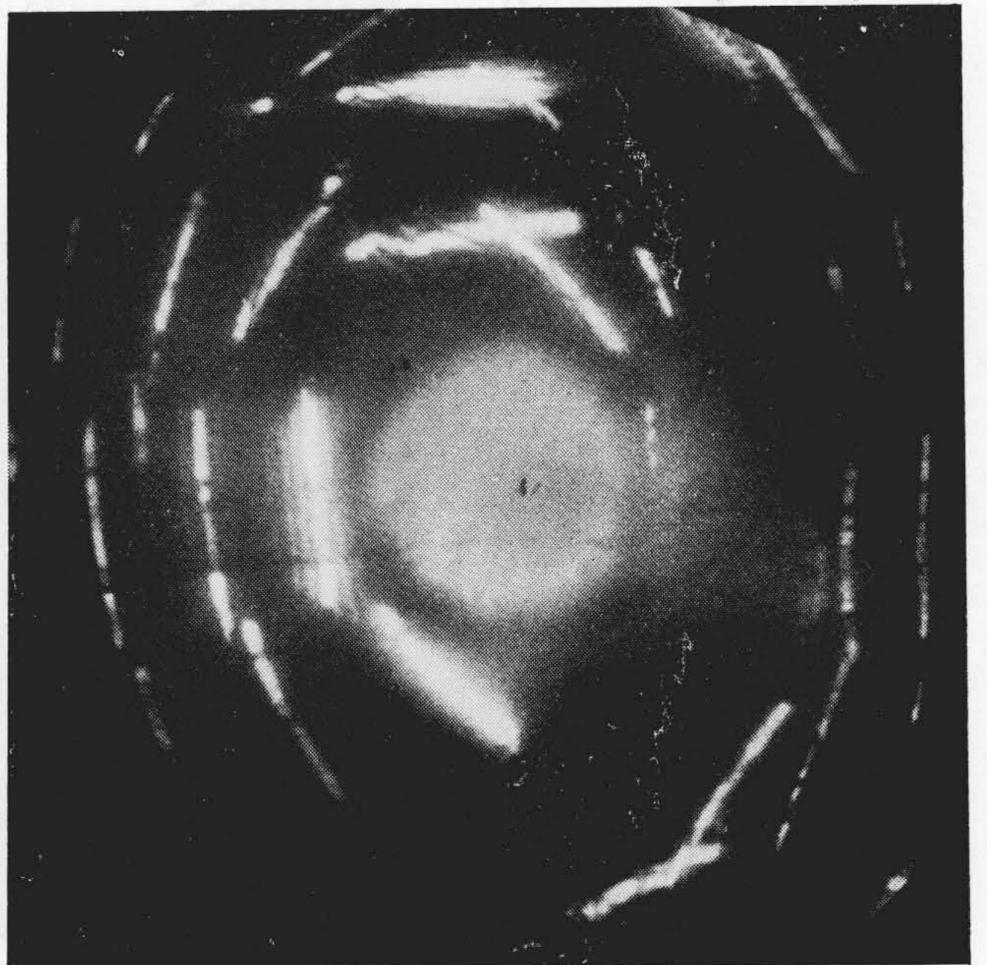
(b) (a) の一部拡大

第 32 図 高 分 解 能 廻 折

Fig. 32. Electron Diffraction Pattern of the High Resolution Camera



第33図 天然マイカの陰影顕微廻折像
Fig.33. Shadow Microscopic Diffraction Pattern of Mica



第34図 天然マイカの K-M 廻折像
Fig.34. K.M. Diffraction Pattern of Mica

くに高能率化のため多数枚撮影カメラボックスを新たに設計した。

- (4) 最後に、本電子顕微鏡の使用例を示したが、電子顕微鏡像の分解能 $2\sim 3\text{ m}\mu$ 、制限視野廻折の分解能指数 2×10^{-4} 、高分解能電子廻折の分解能指数 1×10^{-5} 、カメラ長 $0\sim 2,000\text{ mm}$ であることを実験から求めた。

HU-9 型電子顕微鏡は、既に数台受注決定し鋭意製作中であるが、この機会にその概要を述べ諸賢の御批判を仰ぐ次第である。

終りに臨み、HU-9 型電子顕微鏡の研究製作に際し、多大の御指導と御援助を賜った日立製作所中央研究所長菊田多利男博士、浜田秀則博士、第4研究室森戸主任はじめ研究室の方々、多賀工場平木工場長、木内計器部長、牧野精器課長はじめ精器課電子顕微鏡設計関係の方々、検査部その他関係各位に対し深くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) V.K. Zworykin et al: Electron Optics and the Electron Microscope, John Wiley and Sons Inc, (N.Y.) 1950, p. 214
電源の許容変動、高圧 $\leq 1.1\times 10^{-4}$ 、対物レンズ電流 $\leq 0.55\times 10^{-4}$ 、投射レンズ電流 $\leq 1.3\times 10^{-4}$
- (2) Ref (2) pp. 210~213
- (3) 片桐信二郎: 電顕学誌 3 25 (1953), 但し分解能

の測定はマイクロホトメータ及び Ardenne 法による。

- (4) J.P. Le Poole: Netherlands-Delft, 片桐信二郎及び森戸望の電子レンズ色収差補償に関する論文に対する批判私信 (5th Nov., 1953)
- (5) Glaser の仮定したベル型で対物レンズの磁界分布を近似すると倍率色収差係数の 0 となる $IN/\sqrt{\phi}$ は約 19 となる。普通レンズは $IN/\sqrt{\phi}$ が 8~12 で使われている。
- (6) 例えば、
金谷光一: 電顕委 50-A-8 (1949)
井上彌二郎: 電顕委 56-A-6 (1951)
金谷光一: 電試彙報 15 646~655 (1951)
- (7) 伊藤一夫: 電顕委 55-A-10 (1950)
試料前方磁場を考えると $IN/\sqrt{\phi} < 10$ でなければならない。普通はこの条件を満足しているといっている。
- (8) 森戸望: 第7回電顕学会講演 No. 41 (1952)
- (9) 片桐信二郎, 只野文哉: 特許出願公告 昭 27-5225, 5226 単独及び二箇以上のレンズによる色収差補償 (出願 1951-3)
片桐信二郎: 第18回電顕学会講演 (1952, 名大)
- (10) 只野文哉, 片桐信二郎, 森戸望: 特許出願公告 昭 28-571 中間レンズを縮小レンズとして使うレンズ系色収差補償 (出願 1951-5)

- 森戸望：電顕学会シンポジウム講演集 27~29 (1953)
- (11) B. v. Borries: Übermikroskopie 第53号 (1950)
- (12) O. Scherzer: Z. f. physik, 101 593~603 (1936)
- (13) 金谷光一他：電試彙報 15 257~263 (1951)
片桐信二郎：J. Electron Microscopy 1 13~18 (1953)
- (14) 片桐信二郎：第8回電顕学会講演 (1952-名大)
片桐信二郎：電顕学誌 3 21~29 (1953)
- (15) W. Glaser: Z.f. physik 117 285~315 (1941)
金谷光一他：第9回電顕学会講演 (1953)
伊藤一夫他：第6回電顕学会講演 (1951)
森戸望：第8回電顕学会講演 (1952)
森戸望：電顕学会シンポジウム講演集 27~29 (1953)
- (16) Ref. (2) pp. 210~213
- (17) Ref. (2) pp. 570~575
- (18) Ref. (14)
- (19) Ref. (8)



実用新案 第403440号

小沼武男

電子顕微鏡

電子顕微鏡に於ては、陽極1は筒体2を介して接地せられているのに対して、陰極ヒラメント3及びウエネルト円筒4は50,000 V程度の負電位が印加せられている。従つて筒体2を排気しこれを高真空となすと曲率半径の小さいリード線5よりは極めて容易に蓋6又は筒体2に小電して、電子顕微鏡の作動が不安定となる。これの対策としてはリード線を大径となすことが考えられるが、可撓性を犠牲としなければならない。

本案はこの点に鑑みウエネルト円筒4の上部を被う金属板製中空の略半球状のカバー7を載置したものであるから、このカバーによつて上記放電を抑え簡単な構造により従来の欠点を除き得たものである。

(田中)

