

電子超顯微鏡の試作とこれに関する二三の實驗

只 野 文 哉*
白 神 毅

内 容 梗 概

電子幾何光學の所産たる電子超顯微鏡は、最近獨逸に於て數十萬倍の倍率を有するものまで製作さるゝに至り、微視的世界の探究に偉大なる貢献をなしつゝある。日立製作所に於ては本研究の重要性に鑑み、その性能向上及び實用化を目標として、一兩年前より試作實驗を開始し今日に及んでゐる。然るに本年初頭より實驗が進行し、第十八乃至第二十圖に示す如き二、三萬倍程度の像が得られる様になつた。これを機會に第一回試作品の構造大要、並びに二三解像能に關係する事項につき實驗せる結果を報告することゝした。

本報告に於ては先づ超顯微鏡の性質と題し、主として獨逸に於て發展した超顯微鏡理論の大要を紹介した。そして超顯微鏡の收差は檢鏡試料（以下單に試料と云ふ）に投射せらるゝ電子線の開口角（コンデンサ開口角）に至大の關係を有することを明らかにし、電子放射部の設計方針、コンデンサレンズの使用法を指示した。次に試作超顯微鏡の構造に移り、各部の配置並びに作用を説明し、適當と思はるゝ電子放射部の寸法を掲げた。電子レンズは超顯微鏡の心臓部に相當するものであるが、吾々はこれについて殆ど實驗資料を持合せてゐない。これまで判つたことは磁極の孔径と極間隔を略等しくとり、孔径を 1~3 mm としてパーメンゲールを磁極の材料とすれば、焦點距離 2.5~10 mm のレンズが得られ實用に供し得ることである。第三に超顯微鏡に於ては色收差の見地から電壓加速電壓の變動を原電壓に對し 10^{-4} 程度に安定化せねばならぬが、これについては脈動電壓中和裝置及び電源電壓自動安定裝置を考案し使用してゐる。これらは何れもラジオ用受信球を 2~3 箇用ひたもので、大きさも家庭用ラジオ受信機程度に納つてゐる。第四に試料作製法につき吾々の取扱つた極く狭い範圍の問題を簡単に述べた。試料作製は超顯微鏡研究問題の重要事項の一つで、今後も實驗を重ね手技に練達することが必要である。第五は顯微鏡の分解能に影響を及ぼす要素の中、主として外部的の原因によるものについて實驗した結果を記述した。そして超顯微鏡の機械的振動が何にも増して悪影響を持つものであることを指摘した。

以上に述べた第一回試作品は本格的な超顯微鏡を作るのに必要な基礎資料を得るために製作したもので、構造は極めて簡單であるが實用上不便な點が尠くない。そこで實用の點を重視して新に設計したのが第二回試作品である。これは目下日立製作所戸塚工場に於て工作中で近々完成の見込である。（*日立製作所 中央研究所）

〔I〕 緒 言

電子幾何光學の急速な發達により、最近獨逸に於て 3 mm 程度の分解能を有する電子超顯微鏡が製作さるゝに至つた。實に超顯微鏡こそは、細菌學、コロイド化學、金屬組織學、纖維工學等を新たなる領域に展開せしめんとするものである。

超顯微鏡を實用化するに當つて問題となる點は、高倍率の電子レンズの設計、製作、高真空技術及びその取扱を容易ならしめるための精巧な機械的構造、安定な陰極線を放射するための電子放射裝置及び加速用高壓電源、發光能率高き螢光物質等である。斯くの如く電氣、機械、物理及び化學の近代的成果たる本裝置を急速に實用するには、一研究所又は特定の問題を専門とする小人數の研究者を以てしては到底目的を達し得ない。

吾が國に於ては昭和十四年日本學術振興會に於て長岡半太郎先生が超顯微鏡の必要なることを強調されたのに應じ、日立製作所研究部長故笠井博士等が主唱され第十常置委員會内に第三十七小委員會が結成され、廣く各方面の研究者を集めて研究事項を分擔し研究の促進を圖つてゐる。日立製作所に於ても敍上の趣旨に基き本委員會に参加し性能向上と製品化を目標として試作實驗を開始した。

茲に報告する電子超顯微鏡は透過型のものである。即ち檢鏡せんとする物體（以後單に試料と云ふ）を、電子線の透過を許すやうな薄膜、例へば厚さ 10~20 m μ のコロヂウム膜上に載せ、一方向より高速度の電子線を以て照射すると、物體の質量と厚さの分布状態によつて決定される粗密の彩どりを受けた透過電子線が

得られる。この電子線に電子レンズを作用させ、粗密の彩の像を結ばせて擴大像を得る型の顯微鏡である。透過型超顯微鏡は電子レンズとして磁界を使用するか、靜電界を使用するかにより、磁氣型と靜電型とがあるがこゝでは専ら磁氣型について説明する。

第一圖は光學顯微鏡と磁氣型超顯微鏡との對比圖、第二圖は日立製作所に於て試作し實驗中のものである。第二圖の超顯微鏡は笠井博士自ら設計に當られ、多忙なる日常にも拘らず、急逝される直前まで筆者等を指導されたのである。本文に入るに先立ち、博士の靈に對し深甚の謝意を表する次第である。

〔II〕 超 顯 微 鏡 の 性 質

(1) 顯微鏡より超顯微鏡へ オランダの眼鏡屋 Janssen 等が初めて二段擴大の光學顯微鏡を作つたのは 1590 年と云はれてゐる。19 世紀の中頃に至つて光學顯微鏡の倍率を略 1,500 倍以上に上げて無駄で何等新しいものを觀測し得ないことが判つた。

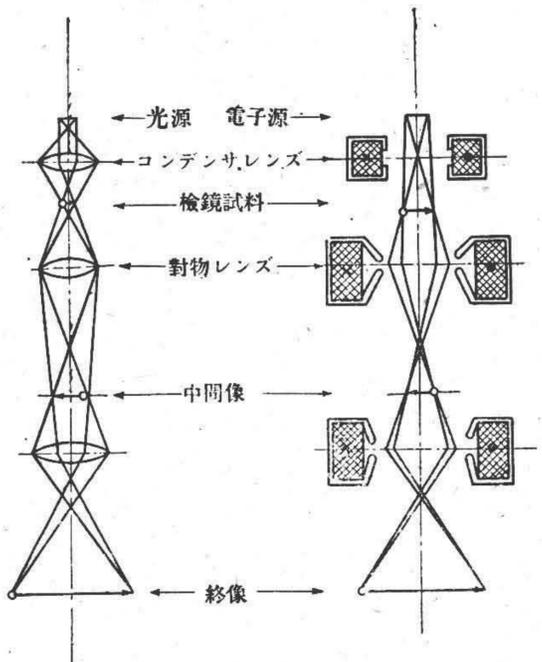
これは周知の光の廻折原理に基くもので、見分け得る二點間の距離を δ 、照明用光線の波長を λ 、對物鏡の開口數を α とすれば

$$\delta = \frac{1}{\text{分解能}} = \frac{\lambda}{2\alpha} \dots\dots\dots (1)$$

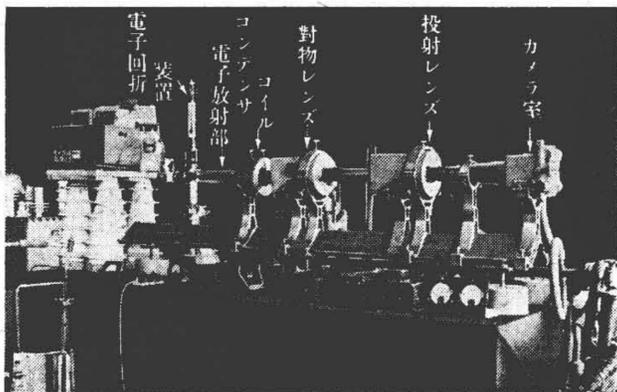
で與へられる。即ち顯微鏡の分解能は對物鏡の開口數に比例し、使用光線の波長に逆比例する。もし油浸式の場合の最大の $\alpha = 1.4$ を用ひれば

$$\delta = \frac{\lambda}{2.8}$$

となる。このことは光線の波長の約 $\frac{1}{2.8}$ 程度の間隔にある二點を見分け得るのが光學顯微鏡に於ける分解能の極限であることを示し



第一圖 光學顯微鏡と電子顯微鏡との比較



第二圖 試作横型電子超微顯鏡 (全長 1.9m)

てゐる。例へば $\lambda=550\text{ m}\mu$ (綠色) の光を用ひれば $\delta \approx 200\text{ m}\mu$ となる。

然るに波動力學により電子の波動性が認められ、 E (ボルト) に加速された電子の波長は

$$\lambda = \sqrt{\frac{150}{E}} \times 10^{-1} \text{ m}\mu \dots\dots\dots (2)$$

で與へられるから

$$E=150\text{ V} \quad \text{では} \quad 0.1\text{ m}\mu$$

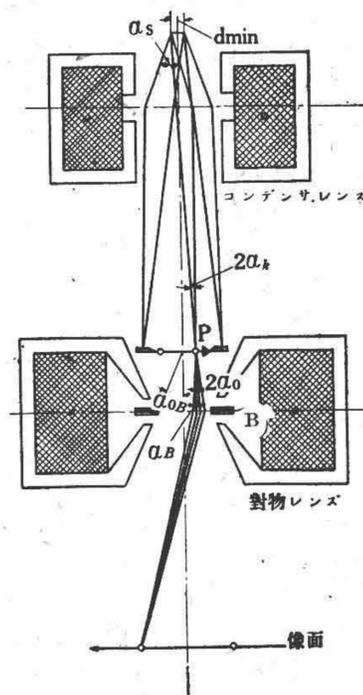
$$E=80\text{ kV} \quad \text{では} \quad 0.0042\text{ m}\mu$$

となり、光の波長に比して著しく短いものである。故に數萬Vで加速された電子線を光線の代りに用ひ、光學レンズの代りに電子レンズを使用すれば、分解能の高い電子顯微鏡を作り得る譯である。

斯る考への下に獨逸の M. Knoll がベルリン工科大学に於て電子顯微鏡の研究を開始した。光學顯微鏡の發達に偉大な足跡を残した Abbe が 1878 年の公開演説⁽¹⁾ に於て「兎も角吾々の今日有つ知識から推すと吾々の視覺の達し得る限界は光の本質によつて限定されてゐて、この限界は今日考へられる如何なる科學的武器を以てしても打勝ち得ないのである。只天地の間には吾々の現在の知性の夢想だにもし得ない多くのものがあつて、多分將來はこの制限を打破することに成功するに至るであらうと考へて自ら慰めるだけである。又必ずこれは實現するに至るであらうと信ずる。然しその新器械は多分その名前以外は現在のものと共通する點はないであらう」と云ふ豫言的意見を發表した。この新器械が電子超顯微鏡で、1931年に命名せられ、以來一般に用ひられてゐる。

(2) 電子線の経路と像が形成される機構 第三圖は磁氣型超

顯微鏡の電子線通路を示せるものである。電子源としては熱陰極が用ひられ、その周りに負電壓を與へたウエーネルト圓筒 (Wehnelt Cylinder) があつて電子線を集束し、陰極の直ぐ近くに d_{\min} なる最小直径のところ出来る。電子線はコンデンサレンズに對し α_s なる角度で投射されるが、このまゝでは擴散し過ぎ試料に入る電子流が少なくなるのでコンデンサレンズに電流を通じ、集束して試料のところの電子流密度を増加する。コンデンサレンズに電流を通じてゐないときは、試料上の一 P が電子源に對する開口角 (Kondensator apertur) α_K は最小となり約 10^{-4} の程度である。しかし普通はコンデンサレンズに電流を通じ $\alpha_K \approx 10^{-3}$ 程度で使つてゐる。 α_K を増せば試料上の電流密度は増し像は明るくなるが、後述の如く球面收差を著しく大きくするので $\alpha_K \approx 3 \times 10^{-3}$ 以上では使はぬ方が宜しい。



第三圖 磁氣型超顯微鏡の電子線経路 (Ruska 原圖)

超顯微鏡像のコントラストは、緒言でも一寸觸れた様に、試料の場所によつて密度 r と厚さ x 或はその積 rx (Massendicke) が相違してゐるため電子の或ものは素通りし、或ものは吸収され、又或ものは速度損失を受けて散亂することから起る。廣角度に散亂した電子線はレンズの球面收差のため、像面に達しても適當な像點に焦點を結ばないで、單にコントラストを悪くするだけであるから、對物レンズの機械的絞り B で取去つてゐる。機械的絞りの開口角 α_{0B} は $0.01-0.1$ 程度であつて $\alpha_{0B} \gg \alpha_K$ が普通である。 α_{0B} と像のコントラストの関係については、B. v. Borries 及び E. Ruska が重要な實驗⁽³⁾ を行つてゐる。それによれば $\alpha_K = 10^{-3}$ 一定とし、 $\alpha_{0B} = 0.01$ のときよくコントラストがついてゐたものが 0.032 では稍不鮮明となり、 0.31 では著しく悪くなる。

コントラストは又電子線速度に至大の関係があつて、速度を上げれば密度、厚みの大きい物質もよく透過する様になる。京大醫學部木村、東兩氏の研究⁽⁴⁾ によれば、多くの場合問題となる厚み $0.2-2\mu$ の細菌では、加速電壓 50 kV 以下で内部構造の見られるものは殆どない。更に高壓を用ひる必要があることを強調されてゐる。今日獨逸では 220 kV ⁽⁵⁾ のものが作られたとの報告がある。

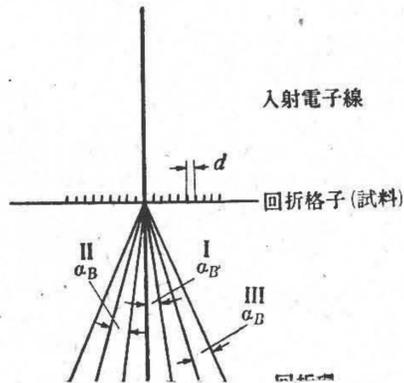
(3) 收差と分解能 透過型超顯微鏡の像の鮮鋭度、即ち分解能を制限する收差に球面收差、廻折收差、色收差、擾亂磁界その他の收差がある。Glaser の理論的研究⁽⁶⁾ によれば、回轉對稱電界及

び磁界レンズは色収差の外に光學レンズに現れる總べての収差が起る。即ち球面収差、非點収差、コマ、像の彎曲及び歪曲である。

電子レンズは光學レンズに比し、収差は格段に大きいのであるが、今日まで収差の修正を行つたレンズは超顕微鏡に使用されてゐない。収差の量としては物體上で分解することの出来る二點間の最短距離 δ を以て表してゐる。

(A) 廻折収差 δ_R 光學に於ける Abbe の理論に對應して超顕微鏡では $\alpha_{0R} \gg \alpha_K$ ならば

$$\delta_R = \frac{\lambda}{\alpha_0} = \frac{\lambda}{\alpha_K + \alpha_R}$$



第四圖 格子常数 d なる格子による電子線の回折 (Ruska 原圖)

第四圖の如く縞状格子から成る試料では $\alpha_R \approx \sin \alpha_R = \frac{\lambda}{d}$ であるから、廻折による収差は次式で與へられる。

$$\delta_R = \frac{\lambda}{\alpha_K + \lambda/d} \quad (3)$$

(B) 球面収差 δ_s 磁氣型レンズの球面収差は非常に大きくそのために 2×10^{-3} 程度の小さい開きの電子線を使つても像が不鮮明になる。球面収差については多數の理論的研究がなされて居り、特に W. Glaser, O. Scherzer, 我が加藤、井上の諸家の研究が著名である。

B. v. Borries と E. Ruska の研究によれば球面収差を計算するために、二つの異つた場合を區別する必要がある。

第一の場合は $\alpha_K > \alpha_R$ なるときであつて

$$\delta_s = C \cdot \alpha_0^3 \quad C \text{は常数} \quad (4)$$

第二の場合は $\alpha_K \ll \alpha_R$ で

$$\delta_s = 8C \cdot \alpha_R^2 \alpha_K \quad (5)$$

である。C の値はレンズの作り方で異り磁氣型レンズで約 1,500 程度である。

(C) 色収差 δ_c これは像を結ぶのに用ひる電子線の速度が一様でないために生ずるのである。電子線速度の不均一は、互に關係のない種々の原因によつて起るもので、電子を加速するために用ひる直流高壓變動並びに脈動、電磁レンズ用勵磁電流の變動電子源より出る電子初速の不揃、試料中に於ける電子速度の低下等である。最初の二つは技術的問題で色収差を無害の程度まで低下する様これらの装置を設計せねばならない。後の二つは避け得られないものである。

W. Glaser の計算によると磁氣型對物レンズに對しては次の様になる。

$$\delta_c \leq \left(\frac{\Delta E}{E} - 2 \cdot \frac{\Delta H}{H} \right) \cdot f \alpha_0 \quad (6)$$

茲に E = 電子加速電壓

ΔE = 加速電壓の變動又は對物中に於ける速度低下

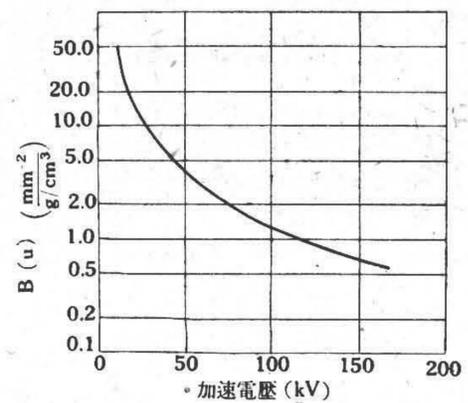
ΔH = 對物レンズに於ける磁界強度の變化

f = 對物レンズの焦點距離

電子線が物質を透過する際減速され色収差を生ずるが、これは加速電壓と共に變化する。Lenard は Al 及び空氣に就て最も確からしい相對的速度損失の實測値を得てゐるが、超顕微鏡に關係ある様な原子量の小さいものに於ては速度損失は質量に比例してゐる故、Lenard の値を任意の他の密度のものに換算することが出来る。即ち Al に於て求められた値を密度・厚み (Massendicke) (rx) 1 に換算し、それから實際に用ひられた試料の密度・厚みを乘じ、任意の物質に對する速度損失を求めるのである。密度 r , 厚さ a の Al 箔に就ての相對的速度損失 $\Delta E/E$ を測定しそれを $r \cdot a$ で除し、加速電壓のみの函數 $B(u)$ を得る。さうすれば密度 r , 厚さ x なる他の物質内の速度損失は次式で與へられる。

$$\frac{\Delta E}{E} = B(u) \cdot rx \quad (7)$$

B. v. Borries 及び E. Ruska が Al に就て Lenard が得た値を密度・厚み 1 に換算した $B(u)$ なる函數は第五圖⁽¹⁰⁾の如くである。



第五圖 電子線電壓と試料中に於ける速度損失の關係 (Ruska 原圖)

よつて試料中の速度低下による色収差 δ_c は次の式で與へられる。

$$\delta_c \leq \frac{\Delta E}{E} \cdot f \alpha_0 = B(u) \cdot rx \cdot f \alpha_0 = K \cdot \alpha_0 \quad (8)$$

例へば $rx = 10^{-4}$ ($r=1, x=10^{-4}$ mm の有機物の試料) で $f=2$ mm, $E=50$ kV, $\alpha_0=10^{-3}$ とすれば、 B は (u) 第五圖から約 5 であるから

$$\delta_c \leq 5 \times 10^{-4} \times 2 \times 10^{-3} \text{ mm} = 10^{-6} \text{ mm} = 1 \mu$$

となる。

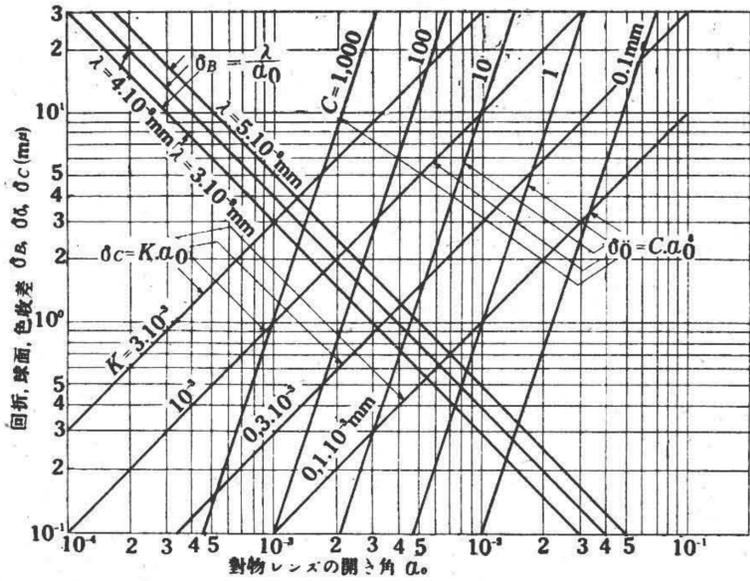
以上述べた廻折収差、球面収差、色収差を對物レンズの開口角 α_0 に對して表せば第六圖の如くである。尙 α_0 は $(1 \sim 3) \times 10^{-3}$ の範圍で使はれてゐる。

(4) 像の深度 (Tiefenschärfe) 對物レンズの焦點距離を一定として置いて、試料を光軸の方向に距離 Δa だけ移動したとき、間隔 δ にある試料上の 2 点が象面に於て分離した像を作るとすると、 $\Delta a / \delta$ を像の深度と云ひ

$$T = \frac{\Delta a}{\delta} \sim \frac{1}{\alpha_0} \quad (9)$$

で與へられる。

例へば $\alpha_0=10^{-3}$, $\delta=10^{-6}$ mm であれば、 $\Delta a=10^{-3}$, $T=1,000$ である。これに對し光學顯微鏡に於ては T が 1 とか 2 とかの程度で



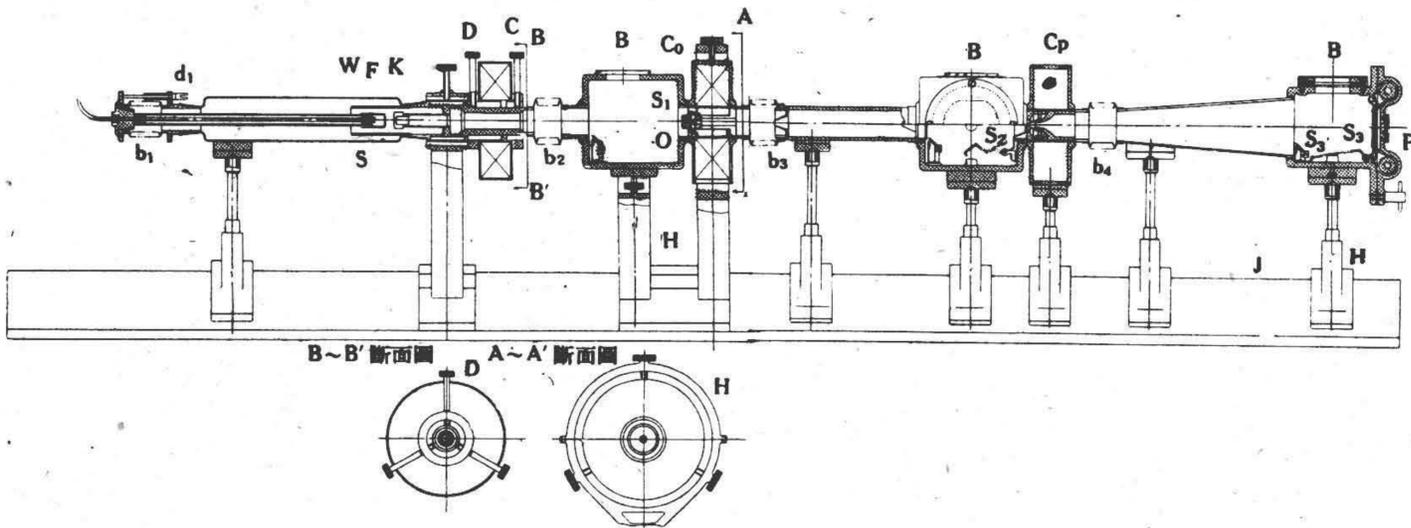
第六圖 廻折、球面及び色収差と対物レンズ開口角 (α_0) との関係 (Ruska 原圖)

あるから、超顕微鏡は光學顕微鏡に對し數百倍もの深度を有することになる。

この性質を利用して容易に實體寫眞が得られる。即ち試料を對物レンズの軸に對して兩側に5~15°傾け、同じ場所の寫眞を2枚撮ればそれが一組の實體寫眞⁽¹²⁾となる。

〔III〕 試作超顕微鏡の構造

第七圖は日立製作所で試作した横型超顕微鏡の断面圖である。全長約1.9mで各部は上下及び左右に調整出来る支持棒によつて定盤上に支へられてゐる。左端より電子放射部、コンデンサレンズ部、試料室及び對物レンズ部、投射レンズ部、カメラ室の五



第七圖 横型電子超顕微鏡構造圖(全長約1.9m)

部分に分れこれ等は互に可撓ベローを中介として接続されてゐる。

熱陰極フィラメントFから放射された電子は Wehnelt 圓筒Wで集束せられ、W及び陽極K間の靜電場で加速されて陽極孔より高速度電子線となつて飛出す。コンデンサレンズCは電子線の擴がりを小さくし、試料を強く照射するためのものである。電子線が試料を照射してゐるか否かは、その直前にある螢光膜S₁で見られる。S₁の中心には直徑約2mmの小孔があつて、これを通つた電子線は試料支持臺 (Objektträger) Oに支へられた試料を透過し、對物レンズC₀で擴大され、第二の螢光膜S₂上にその像を結ぶ。これを中間像(Zwischenbild)と云つてゐる。S₂にはS₁と同様中心に2mm徑の小孔があり、電子線の一部はこれを通つて投

射レンズC_pにより再び擴大され、第三の螢光膜S₃上に像を結ぶ。これを終像(Endbild)と云つてゐる。S₃の背後には寫眞フィルム(プロネー12枚撮り)Pが裝架されてゐる。

Hは顕微鏡の本體を支へる支持臺で、同時に各部の相互位置を調整するのに用ひてゐる。最下部の長い金物Jは定盤である。

寫眞を撮影するには先づコンデンサレンズの位置調整用螺子Dを動かして電子線の方向を變へ、丁度S₁の中心を照射する様にする。Bは觀測用の窓である。次で對物レンズC₀の電流を加減し、S₂上に中間像のピントを合せる。投射レンズの電流を所要の値に調整し、終像を見ながら再び對物レンズ電流を加減して終像倍率のピントを合せるのである。最後に螢光膜S₃を外部より把手で回してS₃'の位置に倒し、フィルムを露出して寫眞を撮影する。撮影時間は1~3秒である。

次に主要部分の構造を詳説する。

(1) 電子放射部 この實驗を初めた頃は、電子源に陰極線オシログラフと同じ構造の冷陰極放射管を用ひてゐたが、放射電子流が尠ないのと不安定なため使用を斷念した。次で熱陰極放射管について豫備實驗を試み、第七圖左端に見られる様な構造とした。電子源は開き角の小さい、而も強い電子流を放射する如きものを要するので、織條、Wehnelt 圓筒、陽極、保護圓筒Sの配置、寸法等が問題となる。

現在使つてゐるのはW-Sの間隔7mm、W-Kの間隔12mm W及びKの孔2mmである。織條Fは0.2mmの酸化被膜白金線を用ひてゐる。

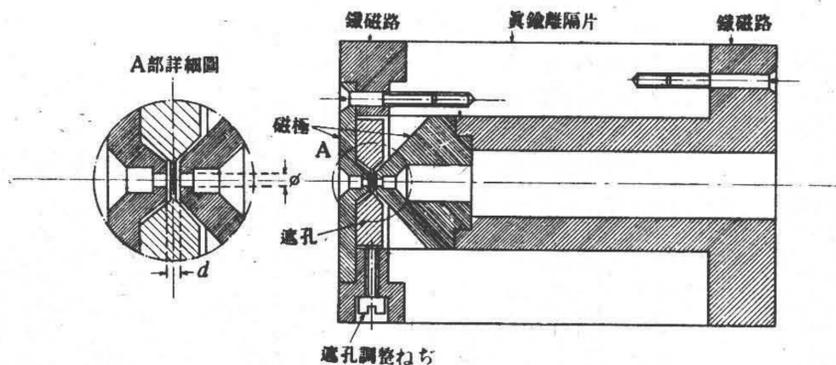
ベローb₁及び螺子d₁は織條と陽極孔の中心を合せるためのものである。この放電管は硝子で絶縁してあるのと、内部の眞空が

十分上らぬため、現在最高60kVで常用42.5kVとしてゐる。この程度の電壓では内部で放電を起すことは先づない。

コンデンサレンズCは電子を集束すると同時に方向の調節も利く様その面を光軸に對して少しく變へられる様になつてゐる。

る。

(2) 電磁レンズ 電子顕微鏡の試作に當つては電磁レンズの設計が一番難かしかつた。勵磁用線輪のアンペア巻數から、磁極片の形狀、寸法に至るまで不明のところ多く、現在に於ても尙種々試作實驗中である。現在使つてゐる磁極の形狀は第八圖の通りで、斜線で示してあるところは軟鐵、他は眞鍮を用ひてゐる。磁極の尖端は高磁束密度に於ても極端な磁氣飽和を起さざる様パーメンデュール(50%軟鐵、50%コバルト)を使つたが效果の程は明らかでない。相對向する磁極の間には眞鍮製の絞板(blende)があつて、その中心に約0.1mmの孔があり、球面収差を減少させると同時に廣角度の散亂した電子を遮つて像にコントラストをつける役目をしてゐる。



第八圖 對物及び投射レンズ用磁極片の構造

磁極の孔径 ϕ , 間隔 d は、収差、焦點距離等から吟味を要するところであるが、M. v. Arden ne⁽¹³⁾ に従ひ $\phi=d$ とし、對物レンズを $\phi=3\text{mm}$, 投射レンズを $\phi=1\text{mm}$ とした。レンズの焦點距離は加速電壓 50 kV 勵磁線輪のアンペア巻數 3,000 に於て、對物レンズが 9 mm, 投射レンズが 3~4 mm であつた。

相對向する磁極及び絞り孔の中心が外れてゐると非點収差を生ずる原因となる。第八圖の構造では絞り孔の位置を磁極の孔に對して動かし得る様になつてゐる。

〔IV〕 電子加速電源

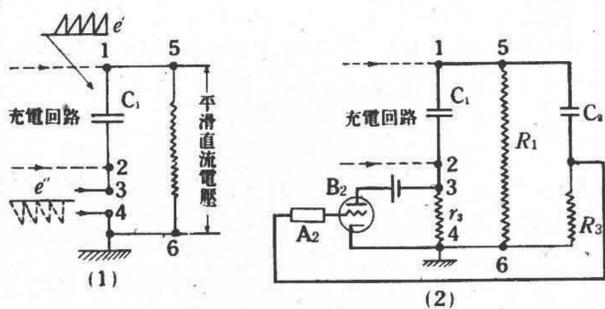
磁氣型超顕微鏡に於ては加速電壓の變動に基く色収差を避けるために、電壓の變動をなるべく小さくすることが要求される。このことに就ては既に〔II〕章(3)項の(C)に於て述べたところで、加速電壓の變動による色収差を δ_c , 加速電壓を E , 變動電壓の大きさを ΔE , 對物レンズの焦點距離を f , 開口角を α_0 とすれば(6)式より

$$\delta_c \leq \frac{\Delta E}{E} \cdot f \alpha_0$$

で與へられる。今 $f=5\text{mm}$, $\alpha_0=2 \times 10^{-3}$ に於て $\delta_c=1\text{m}\mu$ を得るには $\Delta E/E$ は 10^{-4} となり、電壓變動を 0.01% 以下に抑へることが必要である。

電壓の變動には、整流回路の脈動によるものと、電源電壓の變動に基くものがある。兩者を一つの裝置で安定化するのが望ましいのであるが、脈動電壓は極めて早い電壓變動であるのに対し電源電壓に基く變動は比較的緩慢であるので實現性に乏しい。吾々は次に述べる如く、脈動電壓と電源電壓の變動とを別々に補償するやうな回路⁽¹⁴⁾を組立てた。

(1) 脈動電壓中和裝置 第九圖は本裝置の原理を示すものである。第九圖(1)の回路に於て、平滑用蓄電器 C_1 の充放電により

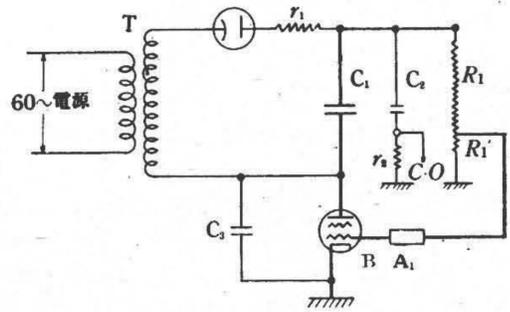


第九圖 脈動電壓中和回路

端子 1.2 間に現はれる脈動電壓 e' と同一波形、反對極性の脈動電壓 e'' を端子 3.4 間に加ふれば、 e' は中和せられ、端子 5.6 間には脈動なき電壓を得ることが出来る。これを實現するために第九圖(2)の如く、端子 5.6 間の脈動電壓を $0.01\mu\text{F}$ なる蓄電器 C_2 を通じて R_3 端子に導き、UY-33球 2 段増幅器 A_2 を通じて電力増幅管 B_2 (UX-2A3) の格子に加へ、陽極抵抗 r_3 に脈動電壓 e'' を發

生せしめて e' を中和する。 r_3 の値は端子 3 から 2 の方向に見た脈動電壓に對する對地インピーダンスに比して小さくある様な値でなければならぬ。實驗の結果整流電壓 50 kV, 負荷電流 2 mA, 平滑用蓄電器容量 $0.35\mu\text{F}$ に於て、中和裝置を使用せざる時の脈動電壓は 83V(1/600)であつたが、これを動作せしめることにより最大振幅 2.8V(1/18,000) に低下し得た。

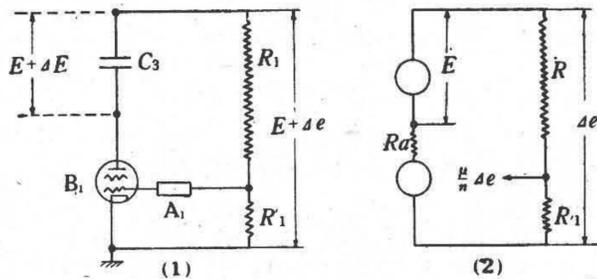
(2) 電源電壓安定回路 第十圖は電源電壓の變動に對する電壓安定回路である。整流された電壓を抵抗分壓器 R_1, R_1' で分壓し、これを直流増幅器 A_1 で増幅して電壓調整用真空管 B_1 の制御格子に加へ電壓調整をなさしめるのである。尚 B_1 と並列に接続した蓄電器 C_3 は變壓器 T の高壓巻線の對地靜電容量により、 B_1



第十圖 電源電壓安定回路

端子に現はれる交番電壓分を抑へるために必要なものである。次に交流電源側の電壓變動が數%である場合直流電壓の變動を 10^{-4} 程度に抑へるためには $A_1 B_1$ の綜合増幅率をいか程にせねばならぬかと云ふことについて考へて見る。先づ簡單のため $C_3=0$ と假定する。

第十一圖(1)は變動電壓のみに對する回路である。圖に於て整流電壓 E が ΔE だけ變動すればこの變動電壓は増幅器 A_1 を經て真空管 B_1 によつて調整せられ、負荷抵抗 $R_1+R_1'=R$ にかゝる電壓は $E+\Delta e$ となる。今 A_1 及び B_1 の綜合増幅率を μ とし、又



第十一圖 變動電壓に對する等價回路

抵抗分壓器の分壓比 R_1/R_1' を n とすれば、 B_1 の端子電壓は $-\frac{\mu}{n} \Delta e$ である。又増幅器が A_1 及び B_1 を含む真空管増幅特性の直線部分に於て動作するものとすれば變動部分に對し、次式が成立する。

$$\frac{\Delta E - \frac{\mu}{n} \Delta e}{R + R_a} = \frac{\Delta e}{R}$$

茲に R_a は真空管 B_1 の内部抵抗である。然るに $R \gg R_a$ であるから上式は

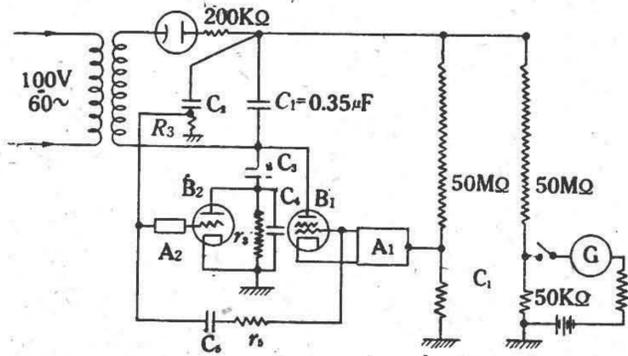
$$\mu \approx n \left(\frac{\Delta E}{E} / \frac{\Delta e}{E} - 1 \right) \dots\dots\dots(10)$$

と書ける。(10)式に於て $\Delta E/E$ は電源電壓の變動による整流電壓の變動であつて大きく見ても 0.1 以下と考へてよい。又 $\Delta e/E$ は超顕微鏡電源の許容電壓變動であつて 10^{-4} とする。 $n=R_1/R_1'$ は 10^3 程度であるから

$$\mu = 10^3 \left(\frac{10^{-1}}{10^{-4}} - 1 \right) \approx 10^3$$

即ち増幅率を 10^6 程度に上げれば電圧の變動を 10^{-4} 程度に低下し得る筈であることが知られる。而して B_1 には交番電圧の電圧變動に相當する電圧が印加されることを考へて置かねばならぬ。吾々の場合直流増幅器 A_1 としてUY-32球2段抵抗増幅とし真空管 B_1 にはUY-511Bを用ひた。増幅器第1段の格子に $0.42 \times 10^{-3} V$ の變化を與へたとき B_1 の端子電圧は $600 \sim 800 V$ 變化したから、前記の綜合増幅率 μ は 10^6 倍以上になつてゐることが知れる。

以上は第十圖の電圧安定回路に於て B_1 と並列にある蓄電器 C_3 を閉却したため、電圧調整が瞬時に行はれることになるが、實際は $(0.5 \sim 2) \mu F$ の容量が入るので速應的に動作し得ない。これに就ては既に詳細な考察⁽¹⁴⁾をしてゐる通り電源電圧が約7%急變したとき、短時間 10^{-4} 程度の電圧變動を生ずる程度で問題にならない。

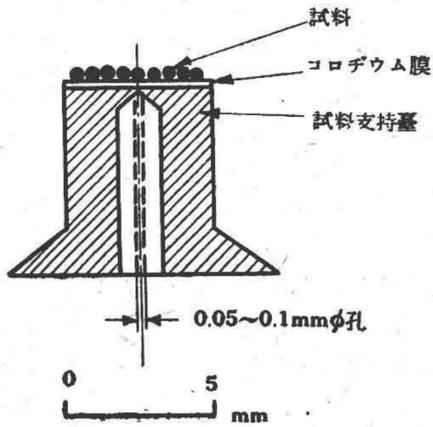


第十二圖 脈動電圧中和回路と電源電圧安定回路とを組合せた回路 (C₅, r₅ は亂調防止回路)

脈動電圧中和装置又は自動電圧安定装置の何れか一方のみが働いてゐるときに安定であつても、第十二圖の如き接続として兩者を同時に働かせると不安定になり跳躍振動を起し易い。この振動は電源電圧の變動とか、増幅器セットの機械的衝撃などによつて突然發生するが、圖示の如く B_1 の制御格子と脈動電圧増幅器第1段の制御格子とを適當なインピーダンスを通じて結合することによつて抑へられる。第十二圖の回路を用ひることにより工場に供給されてゐる60~電源を用ひて、數分間の短時間ではあるが電圧の變動を $(1 \sim 2) \times 10^{-4}$ に抑へ、電源に關する限り何の心配もなく實驗してゐる。

〔V〕 檢鏡試料の作製⁽¹⁵⁾

細菌や微粉を檢鏡するためには先づこれらを固定する膜を作らねばならない。膜は電子光學的に無構造であつて且透明であることが必要である。吾々は第十三圖の如き中央部に約 $0.2 mm$ の孔を有する眞鍮製試料支持臺(Objektträger)を使用し、これに薄膜をつけ、その上に檢鏡試料を固定してゐる。支持臺の孔徑は 0.05



第十三圖 試料支持臺

$\sim 0.1 mm$ であることが望ましいが穿孔が面倒である。

(1) 薄膜附着法 孔につける薄膜はコロヂウムが適當してゐる。薄いコロヂウム膜を作る方法は古く W. Treuktrog により、近くは E. V. Angerer によつて考案されてゐる。試料固定用コロヂウム膜の厚さは $10 \sim 20 m\mu$ が適當である。

扱て

- Δx 膜の厚さ mm
- n_1 コロヂウムの量 g
- S_1 コロヂウムの比重 (約1.63)
- n_2 醋酸アミールの量 g
- S_2 醋酸アミールの比重 (約0.88)
- D シャーレの直 cm
- m 径シャーレに落すコロヂウムの溶液の量 cm^3

とすれば

$$\frac{\Delta x}{10} \cdot \frac{\pi D^2}{4} = m \cdot \frac{\frac{n_1}{S_1}}{\frac{n_1}{S_1} + \frac{n_2}{S_2}}$$

であるから

$$\Delta x = m \cdot \frac{n_1 S_2}{n_1 S_2 + n_2 S_1} \cdot \frac{40}{\pi D^2} \dots \dots \dots (10)$$

となる。今コロヂウム $1.5 g$ を醋酸アミール $100 g$ に溶解するものとすれば上式は

$$\Delta x = 0.1 \frac{m}{D^2} mm$$

吾々は直径 $12 cm$ の容器を使つたから $\Delta x = 15 m\mu$ の膜を作るには $0.02 cm^3 (20 mm^3)$ のコロヂウム溶液を水面に滴下すればよいことになる。然し實際は膜が水面全部に擴がらぬから幾分滴下量を減らすがよい。又同じコロヂウム溶液を長く使つてゐると段々濃縮するので時々醋酸アミールで稀釋することが必要である。

(2) 試料固定法 試料固定技術は、超顯微鏡に於て極めて重要な部門である。吾々はこれまでのところ主として無機物の粉末のみを相手とし、有機物細菌等は手がけてない。

無機の粉末の試料を作るには二通りの方法がある。第一は粉末を密閉容器内で吹上げ、或時間經過した後、試料支持臺の膜面上にして容器内に入れ短時間放置して後取出す。第二は粉末を水に入れてよく振盪し、その水滴を細い白金耳の先へつけて、白金耳を支持臺面に觸れない様に注意しつつ静かに膜上に滴下する。そして30分~1時間乾燥させる。乾燥した後は粉末は相當強く膜に附着する。

膜上に於ける散布状況は倍率 $50 \sim 200$ 倍の顯微鏡でのぞき、若し密集し過ぎてゐたら超音波を與へるとよく散れることを経験した。

細菌の場合⁽¹⁶⁾は先づ固形培養基上の菌を蒸留水に浮遊せしめ、相當高濃度の菌浮遊液を作る。その一滴を白金耳に取り第二の方法と同様にして膜上に滴下する。この際試料作製の途中に於て塵埃及び雑菌の迷入を避ける様周到の注意を要する。

〔VI〕 分解能に影響する諸因子に關する實驗

如何なる因子が映像の分解能に影響を及ぼすであらうか、その主なるものを列挙すると次の如くである。

(A) 外部的原因によるもの

(a) 顯微鏡装置が機械的振動を受けると像が動き不鮮明と

なる

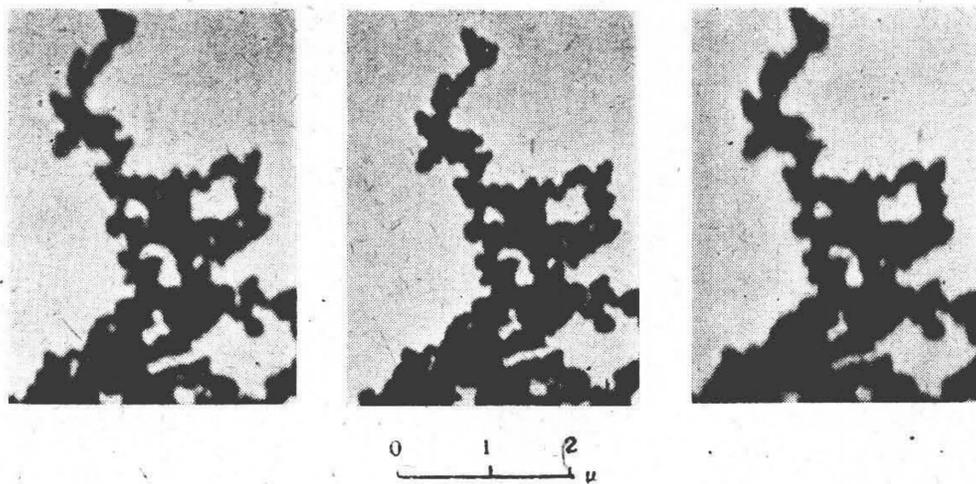
- (b) 外部の擾亂磁界が電子線に作用し像が動く
- (c) 加速電圧又は磁氣レンズの勵磁電流の變動による所謂色収差
- (B) 内部的原因によるもの
 - (d) 試料に於て電子波が廻折することによる収差
 - (e) 對物レンズの球面収差及びこれに關聯する収差
 - (f) 試料及び試料支持膜内に於ける電子速度の減退及び分散による色収差

吾々は取敢へずこれらの諸因子の中、外部的原因によるもの即ち磁氣レンズの勵磁電流、電子加速電圧の變動、機械的振動及び外部の擾亂磁界の影響に就て實驗を行つた。内部的原因による収差に就ては目下實驗準備中である。

(1) 磁氣レンズの勵磁電流 或特定の磁氣レンズの焦點距離は、電子線加速電圧とレンズの勵磁電流に左右される。従て與へられた加速電圧に對して、レンズより一定の距離にある像面に最も鮮鋭な像を結ぶ勵磁電流なるものが存在する。

螢光膜上の終像の明るさが十分ならば、先づ對物レンズの電流を大幅に加減して投射レンズの前にある螢光膜上に中間像を結ばせ、次に投射レンズ電流を加減して所要の擴大像をフィルムの前の螢光膜上に投じ、この終像を見ながら對物レンズの電流を微細に調整してピントを合せるのである。

ところが吾々の場合は電流密度が低いことゝ、螢光物質の發光能率が悪いため終像が暗くこの様な方法では十分なピント合せが出来なかつた。それで投射レンズ電流を一定とし、對物レンズ電流を少しづつ變化し、その都度寫眞を撮り現象した上でピントの合ふ對物電流を求めた。第十四圖(1)(2)(3)は實驗の一例で、投射レンズ電流 $I_2=2A$ を一定とし、對物レンズ電流を $I_1=1.85A, 1.81A, 1.77A$ に變へたときの寫眞である。略 $1.81A$ 附近に最適電流のあるのが判る。この様に或加速電壓に對してピントのよく合ふ對物及び投射レンズ電流を一度求めて置けば、これを以てピント合せの補助手段とすることか出来る。



(1) $I_1=1.85A$ (2) $I_1=1.81A$ (3) $I_1=1.77A$
(試料 酸化マグネシウムの煙)

第十四圖 對物レンズ電流を變へたときの像の鮮鋭度
但し投射レンズ電流 $I_2=2A$ 一定

螢光膜上でピント合せをやらずに對物及び投射レンズだけから上述の様な方法で鮮鋭な像が得られるかと云ふこれは困難の様である。それは[II]章の(4)項で述べた像の深度の考へ方から、分離して見分け得る二點間の距離を δ 、對物レンズのところに於ける電子線の開口角を α_0 、試料面の許し得る距離の不定さを Δa

とすれば(8)式より

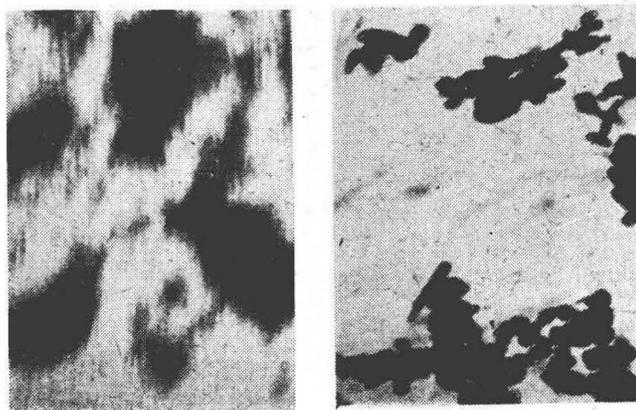
$$\Delta a = \frac{\delta}{\alpha_0}$$

である。

さて $\delta=2m\mu$ 、 $\alpha_0=2 \times 10^{-3}$ とすれば $\Delta a=10^{-3}mm$ となる。試料支持臺は檢鏡試料を取かへる度毎に出入れせねばならぬから毎回この様な精度で試料面を合せることは先づ不可能に近い。即ちこの方法は螢光膜上でピント合せをするときの補助となるに過ぎない。

この様に考へて來ると螢光膜上に明るい像を結ぶことがよい像を得るための必須條件となるが、それには發光能率の高い螢光物質を使ふことゝ、電子流密度を上げることが先決問題である。

超顕微鏡では視野、螢光膜上の像の明るさ、寫眞乾板の寸法等の關係で、先づ數千乃至數萬倍の倍率の寫眞を取り、畫面上の所要部分を光學的に 3~10倍に擴大して所要の部分を使ふやうにしてゐる。従て螢光膜上の像を直接肉眼で見たのでは不十分で、數倍に擴大して見る事が望ましい。それには螢光物質を吟味せねばならなくなり、こゝに超顕微鏡用としての螢光物質研究の重要性が強調されるのである。



(1) 電子顯微鏡の振動 $3\sim 5\mu$
(2) 電子顯微鏡の振動 1μ 以下

第十五圖 機械的振動と像の鮮鋭度

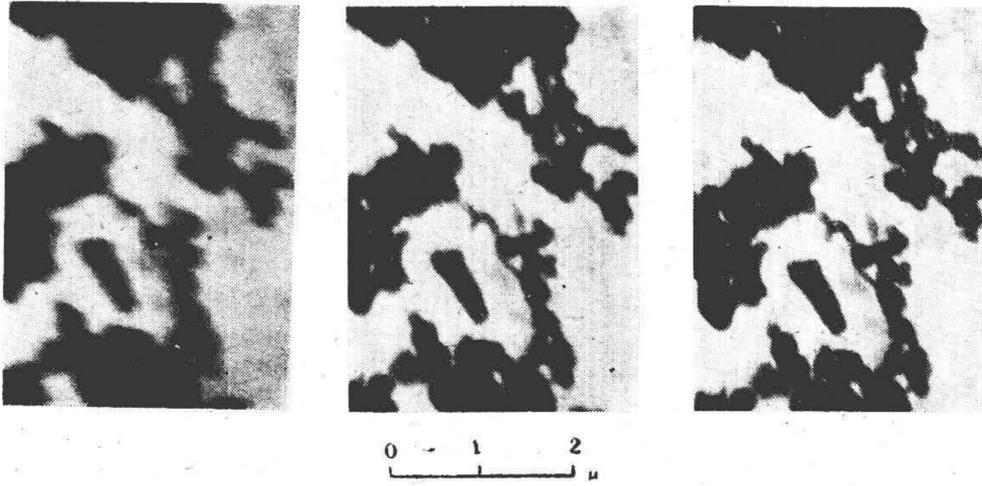
(2) 機械的振動の影響 本年一月中旬頃までに撮影した寫眞は、何れも像が或方向に流れる様に寫つた。(第十五圖(1)参照) 初めその原因を擾亂磁界の影響と考へ、種々對策を講じたが全然利目がなかつた。そこで夜間非常に静かなときを見計らつて寫眞を撮つた結果第十五圖(2)の如く相當鮮鋭な像が得られ、これまでの像障害は大部分振動であることを確めた。

顯微鏡の振動が、分解能の上にとどの程度の影響を及ぼすかについて考へて見る。試料支持臺と對物レンズとの間の光軸に直角な相對的變位を δ_1 、對物レンズ、投射レンズ間の光軸に直角な相對的變位を δ_2 、對物レンズの倍率を A_1 とすれば、試料上で分解し得る二點間の最小距離 δ_v は最悪状態に於て凡そ

$$\delta_v \simeq \delta_1 + \frac{\delta_2}{A_1} \dots\dots\dots(11)$$

で與へられる。即ち試料支持臺の振動が最も有害でありこれに次で對物レンズ、投射レンズ間の振動が問題となる。この點は超顕微鏡の設計、据付等に注意を要するところである。

(3) 加速電壓の變動 吾々の使用した電壓安定裝置は第十二圖の如く脈動電壓中和裝置と電壓安定裝置とより成つてゐるから



(1) 脈動電壓 0.12% (2) 脈動電壓 0.05% (3) 脈動電壓 0.01%
 第十六圖 脈動電壓と像の鮮鋭度

後者を十分働かせて電圧の緩かな変動を0.01%以下に抑へ、前者を調整して脈動電圧をそれぞれ0.12%、0.05%及び0.01%の三段にかへて寫眞を撮影した。第十六圖(1),(2),(3)がそれである。この例によれば0.05%の脈動で既に像の輪廓が不鮮明となり、0.12%では著しく悪くなる。吾々の電圧安定装置は0.01%の安定度が得られるので、今後他の收差が除かれた場合に於てもこのまゝで實用に供し得る見込である。

(4) 外部擾亂磁界の影響 電子顯微鏡の附近に磁氣漏洩の多い電磁装置があれば、その漂遊磁界が電子線に作用し、物點が線になつて投射される。これを試料面に引戻したときの長さ即ち收差 δ_{st} は、試料から中間像までの空間に亘つて電子線に直角な磁界の強さの變化 ΔH に比例する。

計算の結果⁽¹⁷⁾ δ_{st} は次式で與へられる。

$$\delta_{st} \approx 0.186 \frac{A_1}{\sqrt{E}} \cdot f^2 \cdot \Delta H \dots \dots \dots (12)$$

こゝに A_1 は對物レンズの擴大率、 f はその焦點距離である。斯様に漂遊磁界による收差は f によること大であるため、同一倍率に對しては焦點距離の短いことが望ましい。交流磁界ではその強さを實効値で表せば(12)式に於ける ΔH は實効値の2.8倍となり、又波高値の2倍となる。數値例として $f=5\text{ mm}$, $E=50\text{ kV}$, $A_1=100$ の場合 $\delta_{st} \leq 10^{-6}\text{ mm}$ であるための ΔH は 0.5×10^{-6} ガウス以下でなければならない。

外部擾亂磁界としては地球磁界、直流電鐵の如き直流磁界と變壓器、誘導電壓調整器等の交流磁界とが考へられる。地球磁界に就ては先づ電子線と直角をなす磁界の分力 H (ガウス) による電子線の偏傾を防がねばならない。 E を電子線加速電壓 (V), l を電子線の走行距離 (cm) とすれば、偏傾 r_0 (cm) は

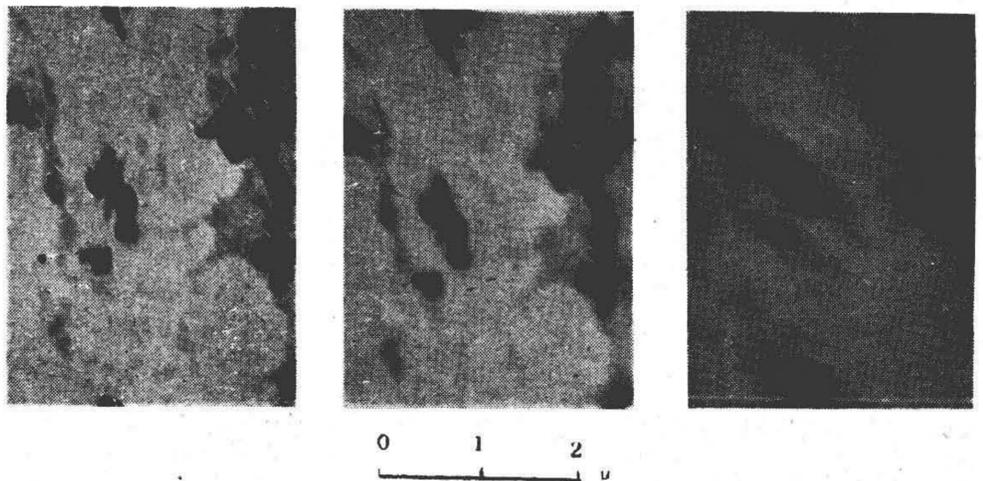
$$r_0 \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{l^2}{R} \dots \dots \dots (13)$$

但し $R = \frac{3.36\sqrt{E}}{H}$

で與へられる。今 $E=50,000$ (V), $H=0.3$ (ガウス), $l=150$ (cm) とすれば r_0 は 4.5 cm となる。この振れを 0.1 cm に減ずるためには、電子線の通路全體を約1/50程度に遮磁する必要がある。この程度の遮磁は μ メタル圓筒で容易に實施される。變動磁界に對する遮蔽は試料、投射レンズ間に重點を置くべきことは申すまでもない。吾々の場合は數秒以下の短時間で寫眞を撮影してゐるので、地球磁界の變動や、直流電鐵の影響は比較的少なく、多くは

商用周波磁界によるものである。幸なことに交流磁界に對する遮磁は直流磁界に比し桁違ひに効果があるので前記1/50遮磁に、試料、投射レンズ間を多少補強する程度で十分であらう。

顯微鏡の周圍には電源用變壓器を初めとして、真空ポンプ用電動機、ヒータ、各種整流装置用變壓器があり、これ等の漂遊磁界は相當の値⁽¹⁸⁾に達する。磁界によつて受ける像の擾亂の程度を知るため、漏洩磁束の特に多い飽和變壓器を利用し、これを顯微鏡の軸に直角に種々の距離に置いてその都度寫眞を撮影し、且光軸附近の磁界強度を、搜索線輪と整流器と檢流計を用ひて測定した。第十七圖はその實驗例で、飽和變壓器の位置及び檢流計の振れ(光軸に直角な方向の強さ)を



(1) 飽和變壓器と顯微鏡光軸との距離 5 m 檢流計の振れ 殆ど 0
 (2) 飽和變壓器と顯微鏡光軸との距離 2 m 檢流計の振れ 1°
 (3) 飽和變壓器と顯微鏡光軸との距離 0.7 m 檢流計の振れ 70°

第十七圖 擾亂磁界と像の鮮鋭度

示してゐる。

以上の實驗から、檢流計の振れが1°位(未較正のため磁界強度不詳)でも像が幾分不鮮明になることが知られる。磁界強度測定装置で種々の電磁機械の漏洩磁界の方向、強度等を測定した。第一表は檢流計の振れが殆ど零となる距離と機器名を示してゐる。

第一表 電子顯微鏡と電磁機器との離隔距離*

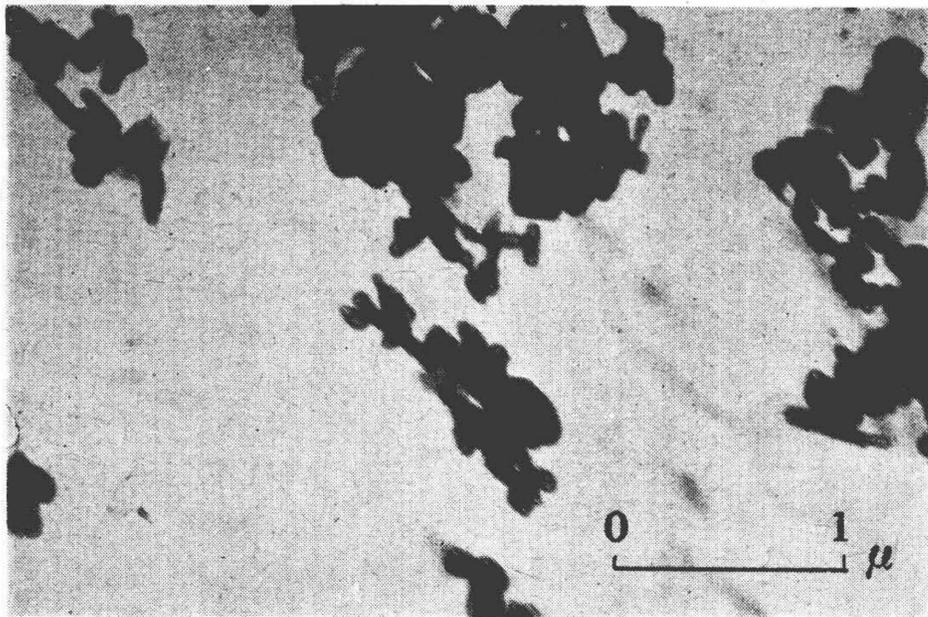
機 械 名	許容最短距離 (cm)	備 考
1/4馬力回轉ポンプ用電動機	50	漏洩磁界よりも振動について考慮を要す。鐵外被の有無及び置き方で相異あり。
ラジオ用小型變壓器	約 150	
油 擴 散 ポ ン プ	40	顯微鏡のすぐ近くで使用すること不可。なるべく遠くに置く必要あり。タンクの厚み容量等により相異あり。
マツダ・スライダック (10A用)	100	
磁氣飽和型電壓調整器	約 300	
60 kV 計器用變壓器	200	

*本表は部分的に厚さ 0.4 mm μ メタル1枚で遮磁した吾々の顯微鏡に於ける値である。

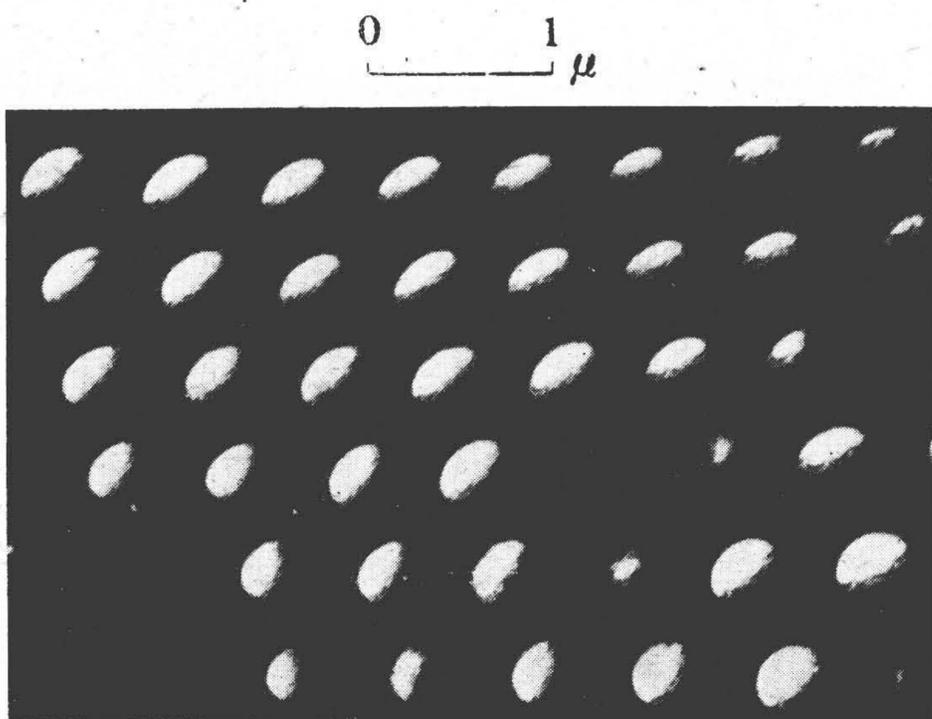
本表は檢流計の振れが殆ど零となる値である。

吾々の顯微鏡は部分的に μ メタル遮磁を行つて居り、地球磁界による曲りは大分減少したが交流磁界に對しては効果が明らかでない。それで離すことが最も有效な手段だと云ふ誘導障害防止の原則に従て真空ポンプを除く他の機器は2~3m以上離して配置してゐる。尙將來分解能が上れば第一表の値以上に離す必要が起るかも知れない。

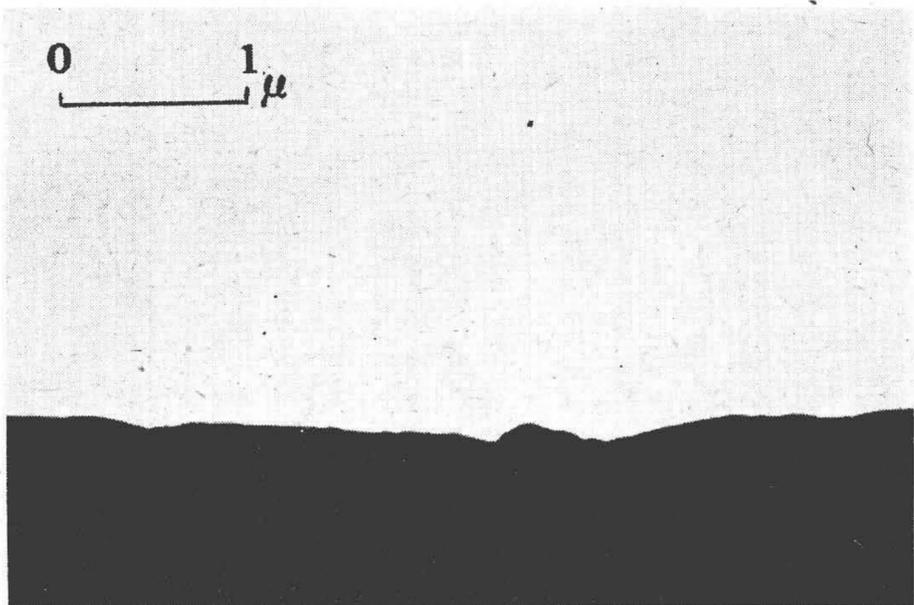
(5) 撮影例 以上に述べた像障害に留意しつつ撮影したのが第十八圖~第二十圖の寫眞である。第十八圖はコロヂウム膜上に亜鉛華粉末を載せたものである。重なり合はないところでは明らかに電子が透つて一粒の形が判別出来る。第十九圖はコロヂウム膜上に載せた珪藻土である。試料は日立研究所吉岡副所長の好意に



第十八圖 試料 亜鉛華 加速電壓 42.5 kV



第十九圖 試料 珪藻土 加速電壓 42.5 kV



第二十圖 試料 未だ使用せざる安全剃刀の刀先
加速電壓 42.5 kV

よつて得られたものである。光學顯微鏡では見られぬはつきりした孔が現はれてゐる。第二十圖は市販の安全剃刀の刀面の凹凸の寫眞である。以上の結果は本年二月末までに得られたものである。

(6) 今後の問題 吾々は愈々超顕微鏡自身の收差を検討すべき時期となつた。〔Ⅱ〕章に述べた如く電子線の開口角が收差と密接不可分の關係にあることから、電子線開口角がいか程の値になつてゐるかを調べる必要がある。又これと關聯して出来るだけ開口角の小さい、強い電子線を發生する電子放射装置を作らねばならぬ。電磁レンズに就ては更に多くの問題がある。然し開口收差を最小とする磁極の形狀寸法配置が判らぬ今日、大體の目安をつけて多數の磁極を試作し實驗を重ねるより外に方法がない。螢光膜、特に終像觀察用のものは分解能の良いことゝ明るいことが望まれるが、これは螢光物質の研究が進むにつれて段々所期のものが得られる様にならう。細菌學の方面の要求から電子線の加速電壓を 60~80kV に上げることも刻下の急務と心え、準備中である。

〔VII〕 第二回試作品に就て

これまで述べた第一回試作品はもともと本格的な超顕微鏡を作るのに必要な基礎資料を得ることを目的として製作されたもので、出来るだけ構造を簡單にし、取扱の便不便は問題外であつた。然し超顕微鏡をして實用的測器たらしめるには、性能の良いことは勿論、誰にでも簡便に、故障なく使へるものでなければならない。斯る目的を以て更に第二回目の超顕微鏡を設計し、近く工作完了の運びになつてゐる。今回設計したものはこれまでの實驗資料を或る程度取入れると共に、構造上二三新しい考案をも加味した。

主な特徴は次の通りである。

- (1) 電子加速電壓を 80kV 程度を目標とし、中心軸合せ、織條取換へ等も簡單に行へる様にした。
- (2) 試料交換装置は活栓を用ひる Ruska 型としたが、2 箇又は 3 箇の試料を同時に挿入出来る新しい交換方式を考案し實施の豫定である。
- (3) 寫眞乾板の取換へは、ゴムパツキンを用ひる Ardenne 型とした。乾板の寸法は 6×9 cm で 3 枚挿入される。
- (4) 眞空可撓接続に新しい方式を採用した。
- (5) 眞空接続はグリースを使ふ摺合せをやめ、全部ゴムパツキンとした。
- (6) 眞空漏洩の虞れある鑄物の使用を避けた。

この新しい顯微鏡は本文が發表される頃までに實驗的にかゝれる豫定である。

〔VIII〕 結 言

以上を以て第一回試作電子超顕微鏡の構造並びにこれに關する二三の實驗結果の報告を終る。本研究は現在も引續き實驗中のものであつて、本文は本年二月末までに得られた結果の中間的な報告である。本研究のその後の経過並びに第二回試作品の成績に就ては不日報告の豫定である。

擱筆に當り各方面に深い感謝を捧げたい。馬場研究所長

を初め日立研究所各部課長より常に激励と援助を賜り、日立中央研究所濱田秀則博士は本報告を詳細に校閲下された。又設計、製作に當つては日立工場計器部橋本部長、辻田、川畑兩課員より多大の援助を受けた。日立研究所工作室に於ては本装置の製作の一部を引受けられ、その後の數回に亘る改造に當つては中山工長より格別の助力を得た。同僚光石研究員は本研究の中最も困難なる初期の實驗を擔當され、その後も電磁レンズの他主として理論的な方面から協力を得た。水戸工場牧野課員は日立研究所在籍中筆者等と共に本研究を熱心に遂行された。日本學術振興會第三十七小委員會に於ては委員長初め委員一同から種々御教示を頂いてゐる。筆者等はこれら各方面の方々に萬腔の謝意を表し、駑馬に鞭ちつゝ更に精進したいと思ふ。(完)

参考文献

- (1) M. v. Ardenne: Elektronen Übermikroskopie, Vorwort XI (1940)
- (2) B. v. Borries u. E. Ruska: Naturwiss., **27**. 281 (1939)
- (3) B. v. Borries u. E. Ruska: ZS. f. techn. phys., **19**. 402 (1938)
- (4) 木村、東: 科學朝日 **2**. 90 (昭17-1)

- (5) H. O. Müller u. E. Ruska: Kolloid ZS., **95**. 21 (1941)
- (6) W. Glaser: ZS. f. phys., **97**. 177 (1935)
- (7) B. v. Borries u. E. Ruska: ZS. f. techn. phys. **20**. 225 (1939)
- (8) W. Glaser: ZS. f. phys., **116**. 56 (1940)
- (9) Lenard; Handb. d. Experimental phys. **B.d. 14**. 111-115 (1927)
- (10) (7)に同じ
- (11) (2)に同じ
- (12) M. v. Ardenne: Elektronen Übermikroskopie, 281 (1940)
- (13) 同上書 17
- (14) 笠井、只野: 第十九回聯合大會豫稿 (昭16-9)
- (15) H. Ruska; Naturwiss, **27**. 287 (1939)
- (16) 木村、東: 日本醫學及び健康保險 **3234**. 15 (昭16・5・24)
- (17) B. v. Borries u. E. Ruska: Ergebnisse der exakten Naturwiss. **19**. 170 (1940)
- (18) M. v. Ardenne: 上掲書 108