

球面収差補正用薄膜レンズを用いた走査透過電子顕微鏡の
高分解能化に関する研究

研究課題番号 61850069

昭和62年度科学研究費補助金（試験研究（2））
研究成果報告書

昭和63年3月

研究代表者 日比野 倫夫
（名古屋大学工学部教授）

KAKEN
61850069

図・本館

昭和62年度科学研究費補助金（試験研究(2)） 研究成果報告書

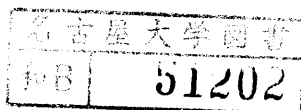
研究課題番号 61850069

研究課題 球面収差補正用薄膜レンズを用いた走査透過電子顕微鏡の
高分解能化に関する研究

1. はしがき

走査透過電子顕微鏡（STEM）は、微細構造の像観察の機能と微小領域の分析機能を合わせ持ち、新素材の開発への応用が期待できる。また、信号電子の検出効率が通常形透過電子顕微鏡（CTEM）に比して高いため、電子線照射損傷を受けやすい生物試料の観察に適している。このような利点にもかかわらず、従来のSTEMは分解能がCTEMより劣るという欠点があり、その普及率は必ずしも高いとはいえなかった。このことは逆に、CTEMと同程度あるいはそれを上回る空間分解能を持ったSTEMが実現できれば、その応用分野が格段に広がることを意味している。STEMに限らず、一般に電子プローブ装置の空間分解能は電子プローブ径によって決まり、その電子プローブ径は、電子ビームを細く絞るプローブフォーミングレンズの球面収差によって究極的に制限される。このため、電子レンズの球面収差の補正は、今日に至るまで常に電子光学における中心的課題の一つとして研究が続けられてきている。しかしながら、種々の技術的困難により、これまでに提案された補正法はどれも実用化に至っていない。

本研究は、プローブフォーミングレンズの球面収差を補正することにより、通常では得られない極微小電子プローブを実現し、それによりSTEMの分解能を向上させることを目的としたもので、61年度、62年度の2ヶ年にわたり遂行された。球面収差補正に用いたのは、当研究グループで開発し、過去15年間に渡って実績を積み重ねてきた薄膜レンズと呼ばれる特殊な静電レンズである。この薄膜レンズに対する従来の基礎研究の成果を踏まえて、その実用化を目指すという観点から研究を行った。研究の結果は、薄膜レンズによる球面収差補正が電子プローブの高電子流密度化に極めて有効であり、STEMの高分解能化に対する有力な手段となる可能性を示唆している。



2. 研究組織

研究代表者 : 日比野倫夫 (名古屋大学・工学部・教授)

研究分担者 : 下山 宏 (名古屋大学・工学部・助教授)

研究分担者 : 杉山 せつ子 (名古屋大学・工学部・助手)

研究分担者 : 花井 孝明 (名古屋大学・工学部・助手)

3. 研究経費

昭和61年度	3,800 千円
昭和62年度	1,500 千円
計	5,300 千円

4. 研究発表

(1) 学会誌等

発表者	テーマ名	学会誌名等	巻号頁年
日比野倫夫, 花井孝明	Foil Lens -Correction of spherical Aberration-	Electron Microscopy, 1986	1, p. 255 (1986)
花井孝明, 日比野倫夫, 丸勢進	A Shadow Image Method for Measurements of Axial Geometrical Aberrations of A Probe-Forming Lens	Electron Microscopy, 1986	1, p. 307 (1986)
杉山せつ子, 日比野倫夫, 丸勢進	Calculations of Discrimination Limit in Bright and Dark Field STEM	Electron Microscopy, 1986	1, p. 429 (1986)
日比野倫夫, 山田憲幸, 丸勢進	Resolution in Scattering Contrast Imaging by Means of Bright and Dark Field STEM	Electron Microscopy, 1986	1, p. 431 (1986)
丸勢進, 日比野倫夫	A High Voltage Scanning Transmission Electron Microscope Developed at Nagoya University	Electron Microscopy, 1986	2, p. 901 (1986)
日比野倫夫, 山本充剛, 山村龍司, 山田憲幸, 丸勢進	Observation of Atomic Number Dependent Contrast Using Signal Manipulation in High Voltage STEM	Electron Microscopy, 1986	2, p.919 (1986)
日比野倫夫	磁界型電子レンズの球面収差補正の研究	電子顕微鏡	21, 2, p.99 (1986)
花井孝明, 日比野倫夫, 丸勢進	Measurement of Axial Geometrical Aberrations of the Probe-Forming Lens by Means of the Shadow Image of Fine Particles	Ultramicroscopy	20, 3, p.329 (1986)
日比野倫夫 林逸樹	High Voltage Electron Energy Loss Spectroscopy Evaluated from Signal to Noise Ratio	J. Electron Microscopy	35, 4, p.422
丸勢進, 日比野倫夫	A High Voltage Scanning Transmission Electron Microscope Developed at Nagoya University	電子光学研究のあゆみ	10, p.2 (1985- 1986)
丸勢進, 日比野倫夫 他	Constraction of a high voltage scanning transmission electron microscope	Hawaii Seminar on Electron Microscopy	p.15 (1987)
下山 宏	Develope of field emission gun for 1MV electron microscope	Hawaii Seminar on Electron Microscopy	p.21 (1987)

(2) 口頭発表

発表者	テーマ名	学会等名	発表年月
日比野倫夫 他	STEMにおける各種信号電子像のSN比の検討	昭和61年電気関係学会東海支部連合大会	1986.10
下山 宏 他	加・減速電子レンズの電子光学的特性	昭和61年電気関係学会東海支部連合大会	1986.10
下山 宏 他	有限プローブ径に対する Boersch Effect の計算機シミュレーション	昭和61年電気関係学会東海支部連合大会	1986.10
日比野倫夫, 花井孝明 他	電子レンズの球面収差低減の話	日本電子顕微鏡学会分科会	1987.5
日比野倫夫 他	STEMにおける各種信号電子像のSN比	日本電子顕微鏡学会第43回学術講演会	1987.5
下山 宏 他	Boersch 効果のモンテカルロ計算結果の評価法	日本電子顕微鏡学会第43回学術講演会	1987.5
日比野倫夫 他	不均一支持膜上のAu原子のSTEM観察におけるSN比	昭和62年電気関係学会東海支部連合大会	1987.10
花井孝明, 日比野倫夫 他	超高压STEMにおける無染色タバコモザイクウイルス像のSN比	昭和62年電気関係学会東海支部連合大会	1987.10
花井孝明, 日比野倫夫 他	薄膜レンズ特性の形状による変化	昭和62年電気関係学会東海支部連合大会	1987.10
花井孝明, 日比野倫夫 他	走査透過電子顕微鏡における像ノイズの測定	昭和62年電気関係学会東海支部連合大会	1987.10
下山 宏 他	Boersch 効果に起因する電子ビーム中の密度分布の変化	昭和62年電気関係学会東海支部連合大会	1987.10
下山 宏 他	Remolding によるW Field Emitter の再生	昭和62年電気関係学会東海支部連合大会	1987.10
花井孝明	電子レンズの高次軸上収差	日本電子顕微鏡学会分科会	1987.12

5. 研究成果

(1) 薄膜レンズの球面収差補正特性の計算

電子レンズの球面収差係数を次式で定義する。

$$\delta r = C_{s3} \alpha^3 + C_{s5} \alpha^5 \quad (1)$$

ここで δr はレンズ像面における球面収差量、 α はプローブ収束半角、 C_{s3} 及び C_{s5} はそれぞれ3次と5次の球面収差係数である。図1に示すように薄膜レンズをプローブフォーミングレンズに組み合わせて球面収差補正を行う場合、3次と5次の球面収差係数が同じ薄膜レンズ電圧（図1の V_f ）で零になるのが理想的であるが、このことはこれまで実現されていなかった。¹⁾ その理由は、3次と5次の球面収差のそれぞれに対する薄膜レンズの補正力を、薄膜と円孔電極の距離（図1の d ）を調節することでバランスさせようとする、補正力の不足のためプローブフォー

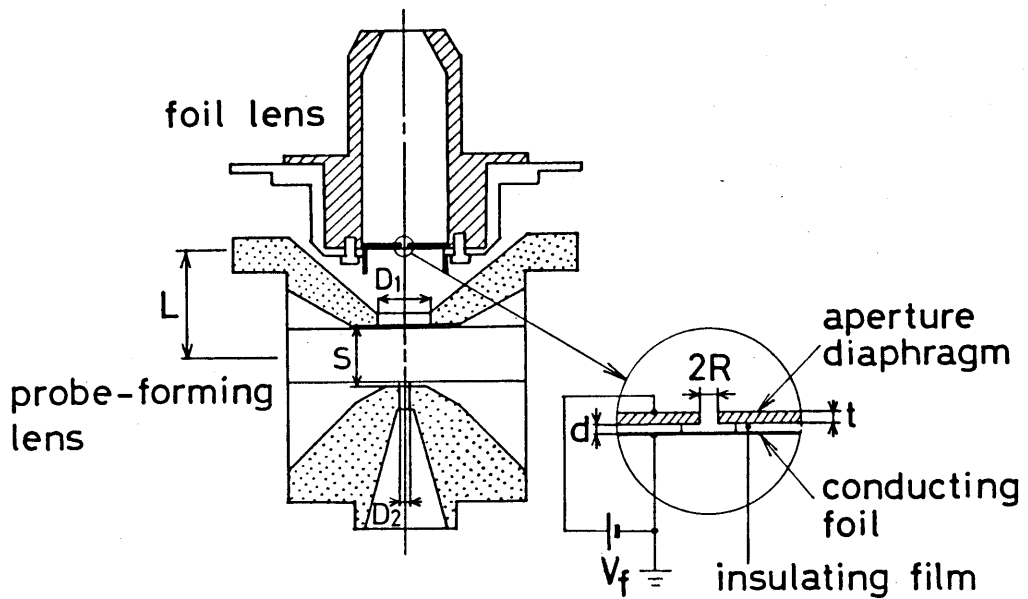


図1 薄膜レンズの構成

ミングレンズの収差が補正しきれずに残ってしまうためである。

この問題について、まず薄肉レンズ近似を使った検討を行った。図2に示すような薄膜レンズ（焦点距離 f_F 、3次球面収差係数 C_{SF} ）とプローブフォーミングレンズ（焦点距離 f_0 、3次球面収差係数 C_{S0} ）の組合せを一枚のレンズと考えた合成レンズの焦点距離を f 、球面収差係数を C_s としたとき、 $f_F \gg f_0$ の条件の下で次の関係が成立する。

$$C_s / f^4 = (C_{S0} / f_0^4) - \{C_{SF} / (f_F + |D|)^4\} \quad (2)$$

ここで、 D は薄膜レンズとプローブフォーミングレンズ主面間の距離である。この式で、右辺第2項が薄膜レンズの補正力を表すと考えられる。したがって、薄膜レンズの形状を保ったまま補正力を増すためには、 D の値を小さく取る、即ち薄膜レンズをプローブフォーミングレンズの磁界中に置くのが有効であることが分る。この観点から、実際のプローブフォーミングレンズのポールピースギャップ内に薄膜レンズを組み込むことを想定した補正特性の計算を行った。

図3に計算結果を示す。この場合、 D の値はポールピース形状を考慮して -2mm に選んである。図3(a)

は3次球面収差係数が零になる薄膜レンズ電圧を、図3(b)はそのときの5次球面収差係数の値を、それぞれ d/R (R は円孔電極の円孔半径) に対してプロットしてある。図3(a)で V_r を d で除してあるのは、薄膜に加わる静電力を評価するためであり、 V_r/d の値が 10kV/mm 以下ならば、薄膜として用いる厚さ 10nm 程度の炭素蒸着膜が破損しないことが経験的に分っている。図3(b)より、 R にほとんど無

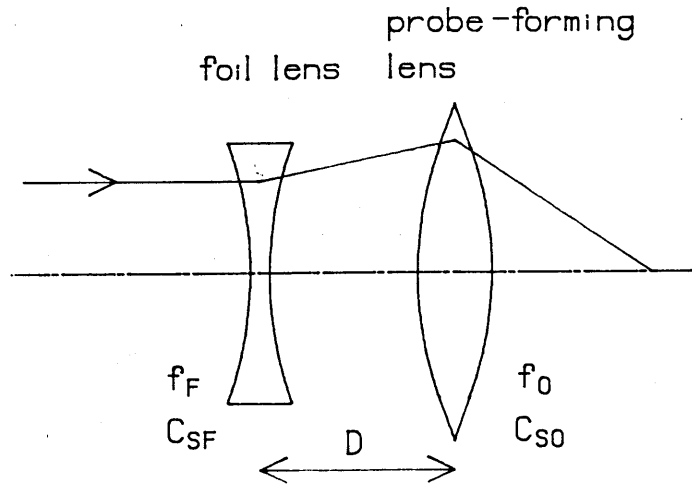
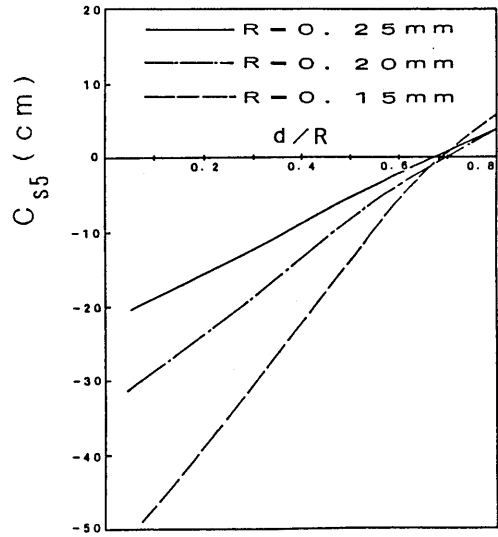
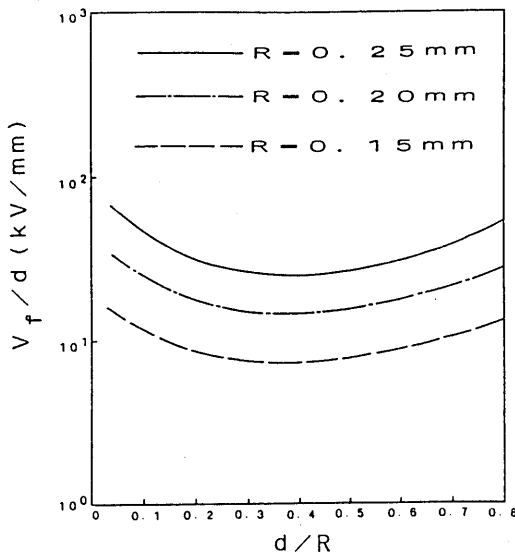


図2 薄膜レンズとプローブフォーミングレンズの合成レンズ



(a)

(b)

図3 薄膜レンズの球面収差補正特性

関係に、 $d/R = 0.7$ 付近で3次と5次の係数が同時に零となり、理想的な補正特性が得られることが分る。このとき実際に補正が可能であるためには、 V_f/d が過大とならないという条件を満たさなければならないが、これは図3(a)よりRが比較的小さい場合に限られることが分る。

(2) 非回転対称収差のプロローブ径に対する影響

前節において、5次までの球面収差が完全に補正できることを示した。球面収差以外にプロローブ電子流密度分布に影響を与える軸上幾何収差には、レンズの工作精度の不足や磁性体の不均一性によって生ずる軸上非回転対称収差がある。従来、非回転対称収差の中でその大きさが開口角に比例する2回対称非点収差だけが問題とされ、通常の電子プロローブ装置にはその補正のための非点補正器が備えられている。これに対し、開口角の2乗に比例する2次の軸上非回転対称収差は球面収差と比較して非常に小さいため無視されてきたが、球面収差補正が補正された場合

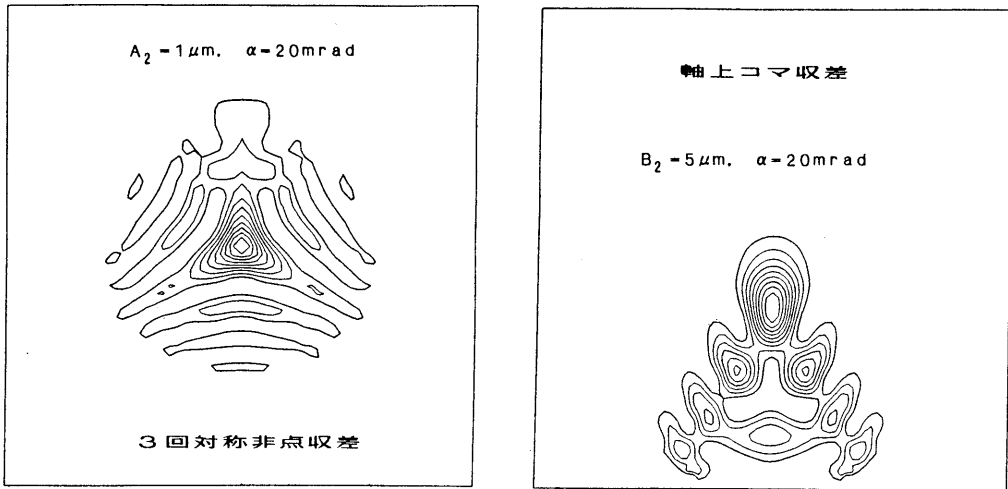


図4 非回転対称収差が存在するときのプローブ電子流密度分布
(枠の1辺の長さが2nmに相当する。)

にこの2次収差が最終的にプローブ径を決める要因となる可能性が生じてきた。

2次の軸上収差には、3回対称非点収差と軸上コマ収差がある。²⁾ 図4にこれらの収差があるときのプローブ電子流密度分布を等高線表示により示す。分布は非回転対称に変形されると共に、径が広がっている。このような計算された電子流密度分布から、ピークを中心に全電子流の80%を含む円を描き、その径をプローブ径としてプローブ収束半角 α の2乗に対してプロットしたのが図5である。 α の小さいところでは回折収差が、 α の大きいところでは2次収差が支配的であり、2次収差が α の2乗に比例している様子が分る。このような計算結果を基に、2次収差の収差係数とプローブ径 d_p との関係を与える近似式を導くと次式が得られる。

$$d_p = 3.0 A_2 \alpha^2 \quad (\text{3回対称非点収差に対して}) \quad (3)$$

$$d_p = 2.3 B_2 \alpha^2 \quad (\text{軸上コマ収差に対して}) \quad (4)$$

ここで、 A_2 は3回対称非点収差係数、 B_2 は軸上コマ収差係数である。

(3)、(4)式を用いて2次収差のプローブ径に対する影響を評価するためには、収差係数 A_2 、 B_2 の値を知る必要があるが、これまではそのための手法が確立され

ていなかった。そこで本研究において、微小な粒子の陰影像を用いてこれら収差係数を測定する方法を開発した。その原理を図6に示す。プローブフォーミングレンズの球面収差により生じた火面の中に微小な粒子からなる試料Sが置かれたとき、S上でちょうど光軸を切る電子線が軸上の粒子を倍率無限大で観察面にリング状に投影する³⁾。図7はそのようなリングの一例であるが、このリングはレンズ界の非対称性に敏感であり、回転対称性のよい場合に図7(b)のように完全な円であったリングが、2回対称収差の存在により(a)のように変形される。また、2次収差があるときには、図8(b)

及び(c)に示すようなリング形状となることを、理論的に示すことができる。さらにそれらのリングの軌跡の動径の最大、最小値を試料面での電子の傾斜角に換算した値 θ_{max} 、 θ_{min} から、収差係数を次式により求めることができる。

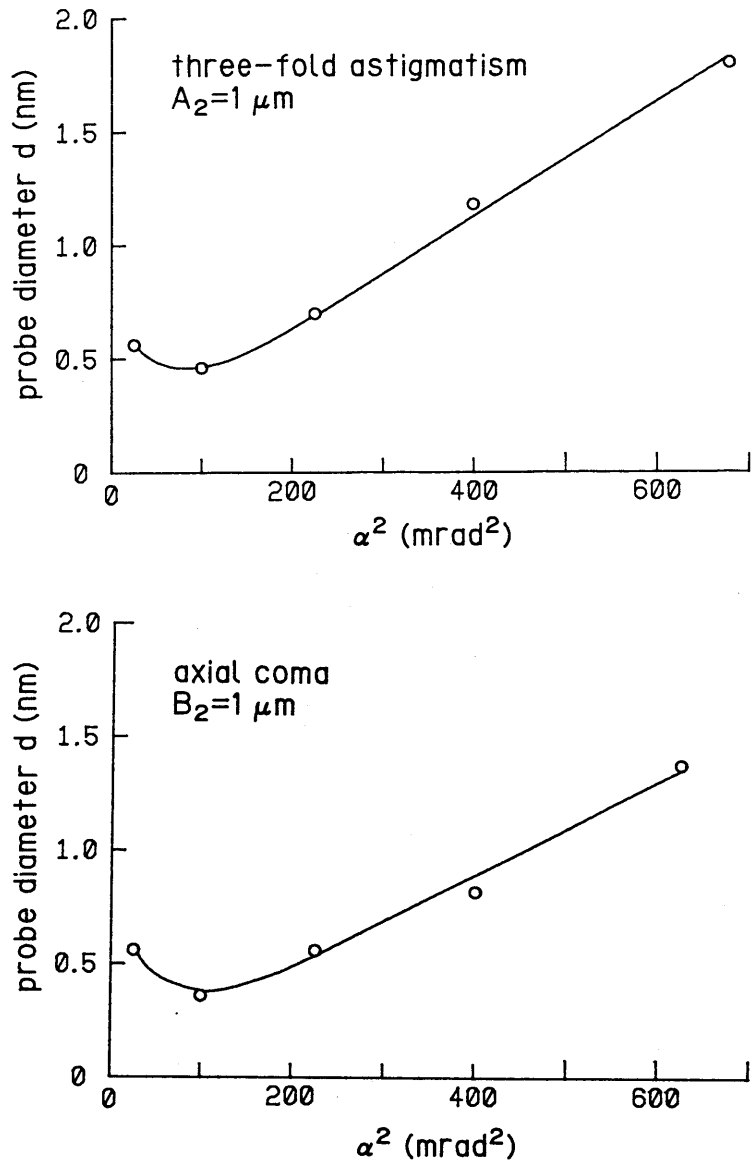
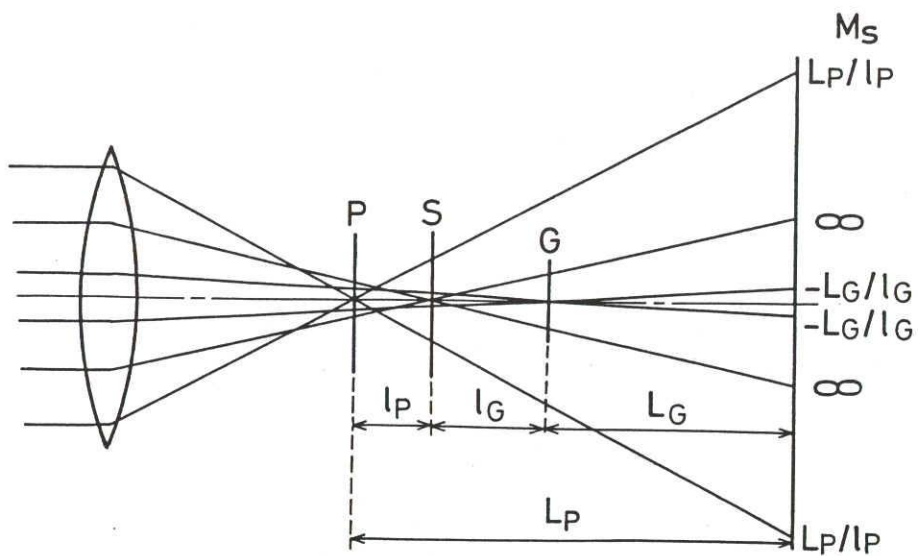


図5 2次収差のプローブ径への影響



S : Specimen G : Gaussian image plane
 M_S : Magnification of the shadow image

図6 倍率無限大リングの生ずる原理

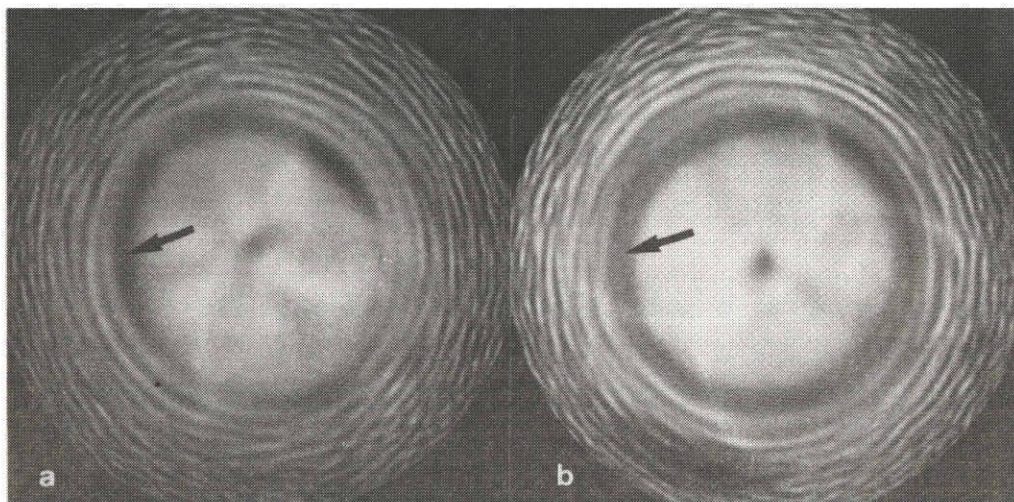


図7 白金パラジウム粒子の陰影像 (a) 2回対称非点収差のあるとき (b) レンズの軸対称性がよい場合 (矢印が倍率無限大リングを示す。)

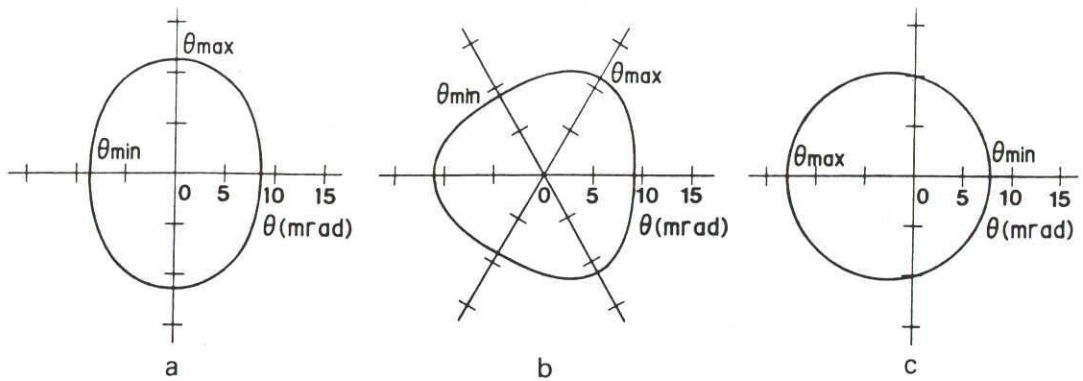


図8 非回転対称収差があるときの倍率無限大リング (a) 2回対称非点収差 (b) 3回対称非点収差 (c) 軸上コマ収差

$$|A_2|, |B_2| = |C_{S3}| (\theta_{\max} - \theta_{\min}) \quad (5)$$

ここで C_{S3} は、defocus量が Δz だけ異なる2枚の陰影像から測定した θ_{\max} 、 θ_{\min} の値を使って、次式により求められる。

$$C_{S3} = \Delta z (\theta_{\max}^{(1)} + \theta_{\max}^{(2)} + \theta_{\min}^{(1)} + \theta_{\min}^{(2)})^{-1} \\ \times \{ (\theta_{\max}^{(2)} - \theta_{\max}^{(1)})^{-1} \\ + (\theta_{\min}^{(2)} - \theta_{\min}^{(1)})^{-1} \} \quad (6)$$

図9は、実際に薄膜レンズを用いて補正を行っている状態で得られた陰影像である。三角形の黒いリングが、3回対称非点収差の存在を示している。このような陰影像から、(5)式と(6)式により3回対称非点収差係数の測定値として $3.9 \mu\text{m}$ が得られた。この収差係数の値は、現在研究室で作製している薄膜レンズの工作精度がよくないために比較的大きな値となっていると考え

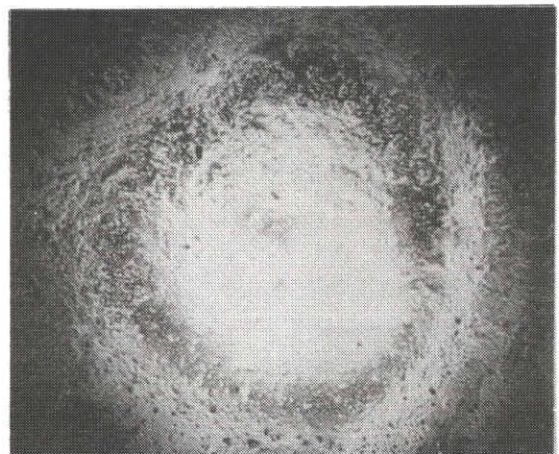


図9 球面収差補正時の陰影像

られ、実用化の段階でこの工作精度を1桁程度向上させることはそれほど困難でないと思われる。したがって、例えば $A_2 = 0.3 \mu\text{m}$ と仮定して、(3)式の2回対称非点収差と

$$d_D = 1.22 \lambda / \alpha \quad (7)$$

で与えられる回折収差の2乗平均で定義されるプローブ径

$$d = (d_A^2 + d_D^2)^{1/2} \quad (8)$$

を α に対してプロットすると、図10が得られる。加速電圧は100kVである。図10から、得られる最小のプローブ径は約0.3nmであり、球面収差補正によりSTEMの原子レベルの空間分解能を達成しようとする際には、2次収差が制限となる可能性があることが分る。

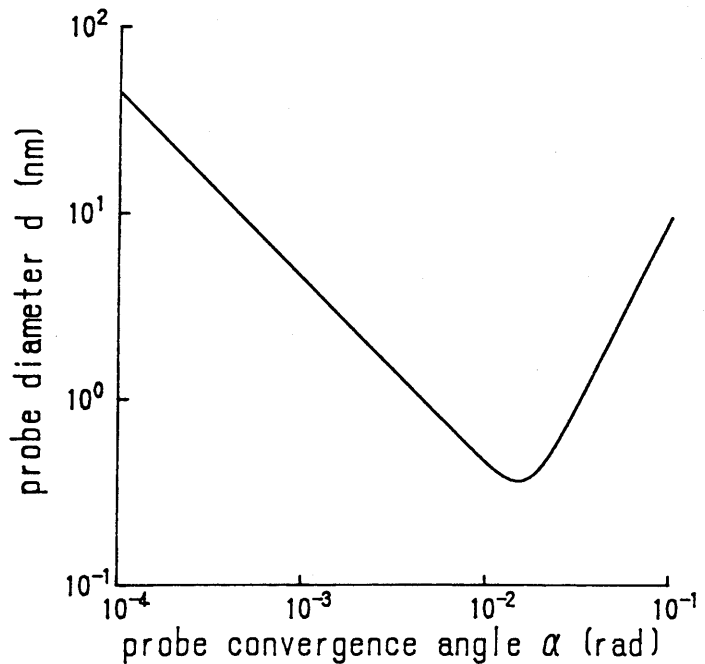


図10 3回対称収差による最小プローブ径の制限

(3) 球面収差補正による走査透過電子顕微鏡 (STEM) の像質改善

上記の補正特性の計算を基にして、プローブフォーミングレンズのポールピー

スギャップ内に組み込み可能な薄膜レンズの設計を行った。その際、従来の薄膜レンズで問題となっていた薄膜のコンタミネーションによる性能の劣化も併せて改善するために、①STEMの真空排気系統の改善、②薄膜に不必要な電子線照射を与えないような薄膜レンズの構造、の2点を実現することに留意した。

①の真空排気系統の改善については、従来実験に用いてきた走査像観察装置の付いた日立H-500H電子顕微鏡の試料室付近の排気を行うポンプを、油拡散ポンプからターボ分子ポンプに交換すると同時に、ポンプから試料室に至る配管の排気コンダクタンスを極力大きく取るようにした。この結果、到達真空度こそ大幅な改善がみられなかったものの、炭化水素系残留ガスの分圧の減少により、数十時間にわたる補正実験の間、薄膜のコンタミネーションはほとんどみられなかった。

図11に、新しく設計製作した薄膜レンズの外形を示す。この薄膜レンズは、可動絞りの機構を利用して電子線の通路上から容易に引き抜け、最大4枚の薄膜レンズを真空を破らずに交換できる構造とした。電圧は、薄膜レンズを保持する板ばねを通して印加するようになっている。

この薄膜レンズを用いて、実際にプローブフォーミングレンズの補正を行いながら撮影したSTEM像を図12に示す。(a)は薄膜レンズに電圧を印加しない場合、(b)は450Vの補正電圧を印加した場合の金粒子の像である。加速電圧は100kV、プ

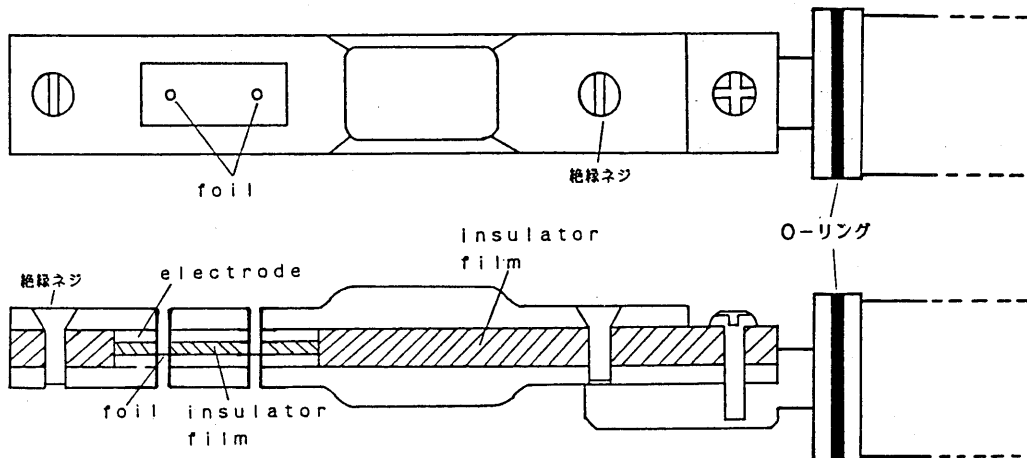


図11 新しく作製した薄膜レンズの構造

プローブ収束半角は 43.6mrad である。(b)では補正効果により、(a)と比べて像質が向上していることが分る。今回の実験の場合、理論から予想される最適補正電圧は 1.1kV であるが、電圧の増加とともに2回対称非点収差が増大し、備え付けの非点補正器の補正能力を越えてしまったため、最適電圧まで印加することができなかった。この原因は、薄膜レンズをポールピースに保持する部分の工作精度が極端に悪く、結果として薄膜レンズが光軸に対して傾いてしまっているためと考えられる。この点については現在改善中である。

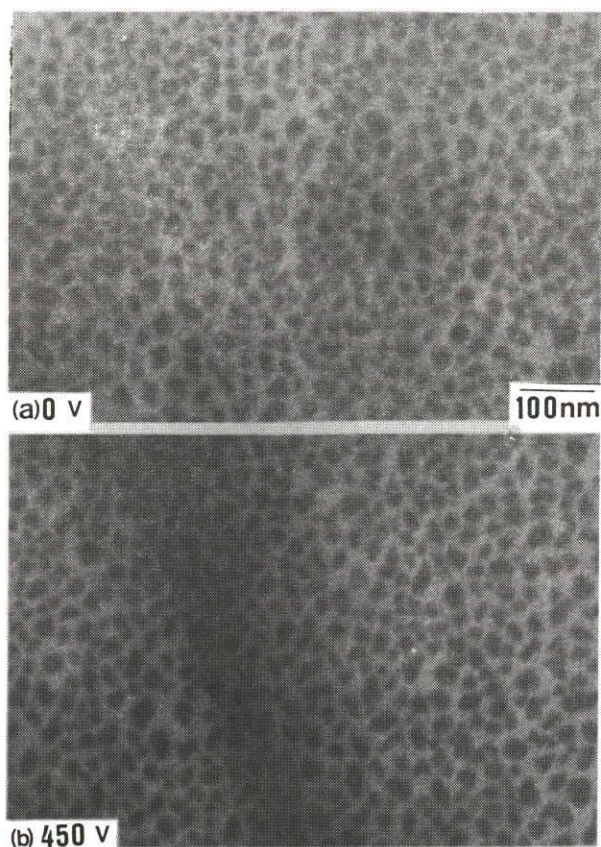


図12 薄膜レンズのSTEM像に対する効果

(4) 像質の定量的評価法

これまで既に薄膜レンズの性能評価として球面収差の測定¹⁾、プローブ径の直接測定⁴⁾、薄膜の電子線透過率の測定⁵⁾を行い、薄膜レンズの有用性を証拠づける多くのデータを得ている。しかし、STEMが本来像観察を行う手段である以上、最終的には、現存するSTEMの像質を薄膜レンズを用いて改善できることを直接的に実証する必要がある。ところが、像質の評価には多分に任意性があり、像質の善し悪しを決める基準はこれまで曖昧であった。特に、補正前と補正後ではプローブ収束角やビーム電流の最適値が異なるため、それぞれの最適条件でとった像が非常に異った印象を与え、このことが像の比較を一層困難にしていた。そ

ここで、薄膜レンズの像に対する効果を定量的に評価する手法の開発を行った。

STEMでは像コントラストは電氣的に任意に増幅できるので、解像度は像信号のSN比で決まる。ここでSN比は、1画素に渡って積分した信号と雑音のパワーの比

$$\gamma = P_S / P_N \quad (9)$$

で定義し、信号の直流成分は除いて考える。一般に γ の値は、同一視野の2枚の像の相関係数 r から

$$\gamma = r / (1 - r) \quad (10)$$

により、画像全体に渡っての平均値として推定される⁶⁾。しかしながら、もし信

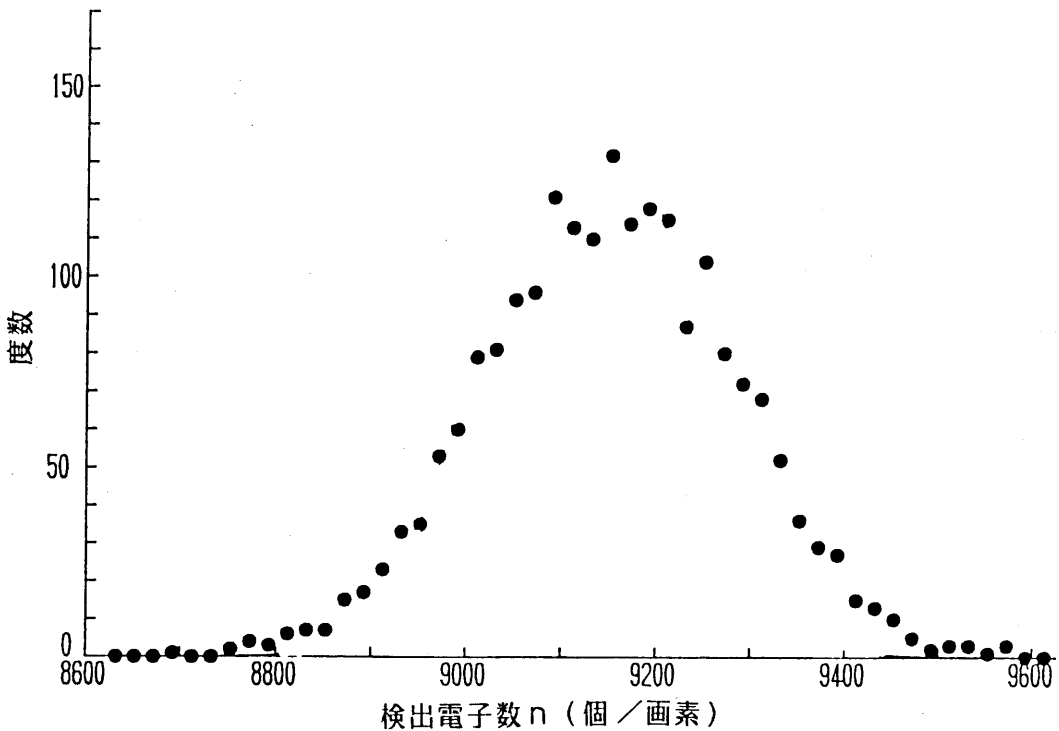


図13 1画素当りの検出電子数の度数分布

号と雑音が共に正規分布の母集団からのサンプルとみなせ、さらに何等かの方法で雑音のパワー P_N を知ることができれば、 γ の最尤推定量として

$$\gamma = -1/2 + (4NP_N)^{-1} \sum (x_i + y_i)^2 \quad (11)$$

を使うことが有力である。ここで、 x_i と y_i は2枚の像における画像データ、 N は1画面の画素数、 \sum は全画素についての和を表す。(11)式による推定は、(10)式による推定と比較して推定の誤差を半分にできることが知られている⁷⁾。

(11)式を用いて γ を推定するには、雑音成分のパワーを求める必要がある。STEMにおける雑音としては、一般に量子統計雑音が支配的であるといわれており、もしそうであるならば雑音のパワーは信号電子数の平方根として求められるが、実際の信号検出系において量子統計雑音以外の雑音がどの程度影響するかは明らかにされていない。そこで、シンチレータ・フォトマルチプライヤ及びビデオアンプからなる実際のSTEMの検出系において、検出電子数が一定のときの電子数の分散すなわち雑音成分のパワーの大きさを調べた。

図13は、1画素当りの検出電子数の度数分布を調べた結果の一例であり、STE

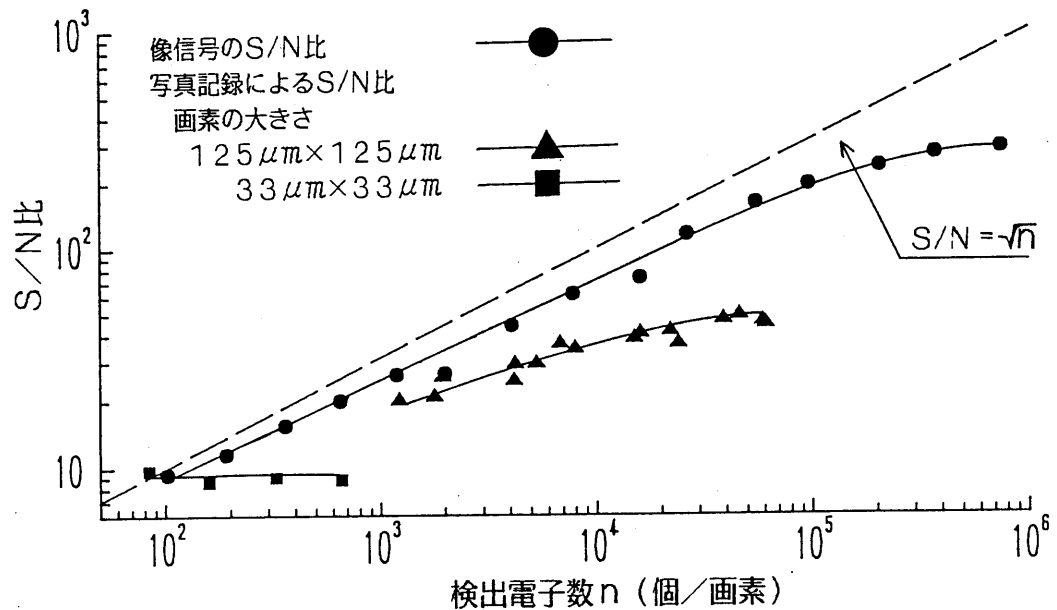


図14 検出電子数とS/N比の関係

Mの通常の結像条件である1画素当り100~10000個の平均電子数のときには、雑音は正規分布で近似できることが分った。次に、一定のビーム電流を検出器に入れたときの、1画素当りの平均検出電子数に対するSN比を図14に示す。この場合の信号は直流成分のみであり、 P_s は信号の直流レベルに対応している。破線で示したのは、量子統計雑音の場合に期待されるSN比である。この結果は、実用的な電子数の範囲内では量子統計雑音が支配的であり、SN比が約300程度になると他の雑音要因のために飽和することを示している。したがって、実際の試料があるときのビデオアンプの出力電圧をA/D変換してコンピュータに取り込み、同時にビーム電流をモニターして図14から雑音のパワーを決めれば、式(11)を用いて像のSN比を推定することができる。

図14には、STEM像を写真撮影した後にフィルムの黒化度から測定したSN比も併せて示してある。フィルムの粒状性によるSN比の低下が著しく、写真撮影した像を用いて像質の評価を行うのは得策でないことが分る。

SN比の評価のための具体的な処理は以下の通りである。2枚の連続して取られたSTEM像は、試料のドリフトのためにわずかに視野がずれるので、相互相関関数を利用して位置合わせを行ったのちにSN比の計算を行う。相互相関関数の計算は、高速フーリエ変換を利用しており、像の取り込み及び演算は、パーソナルコンピュータを利用したシステムにより行っている。本システムにより像質の評価を行えば、薄膜レンズの球面収差補正効果による像質の改善を直接的に示すことができると考えられる。

(5) 信号電子検出法に関する検討

薄膜レンズは、その原理上、電子線の通路に置いた導電性薄膜による電子の散乱が避けられない。薄膜の電子線透過率及び散乱電子の試料上での分布は既に実験的に調べており、通常薄膜として用いている約10nmの厚さの炭素蒸着膜の透過率は加速電圧100kVで約85%であり、散乱電子は試料上で一様なバックグラウンドとなることが分っている⁵⁾。一般に薄膜の透過率をTとしたとき、薄膜による散乱電子が全て検出器に入ったとすればSN比は約T倍に低下する。しかし、図15に示すように試料後にレンズを置いた場合、薄膜に対する共役面と試料に対する共役面が異なるので、試料の共役面上に絞りを挿入することにより、試料からの散

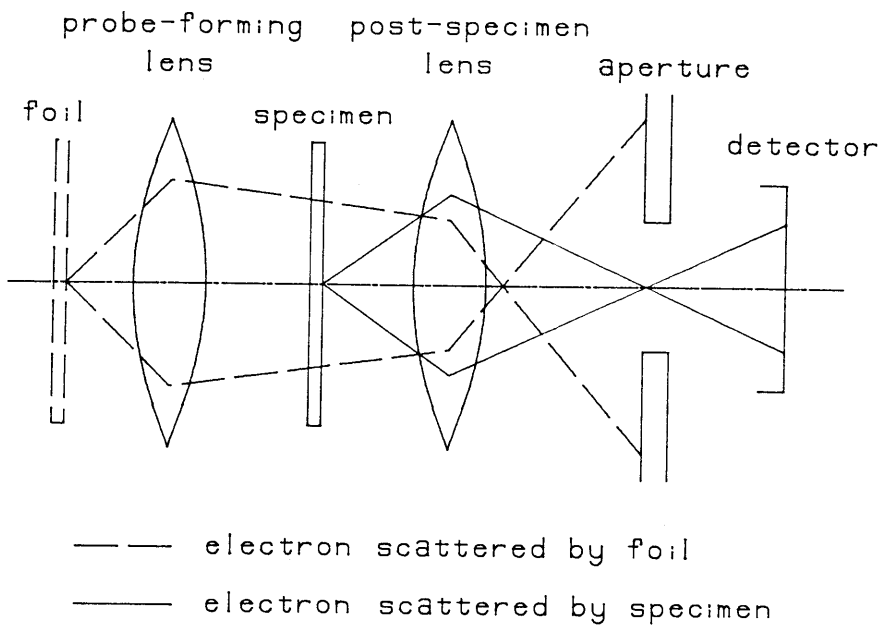


図15 薄膜による散乱電子の除去

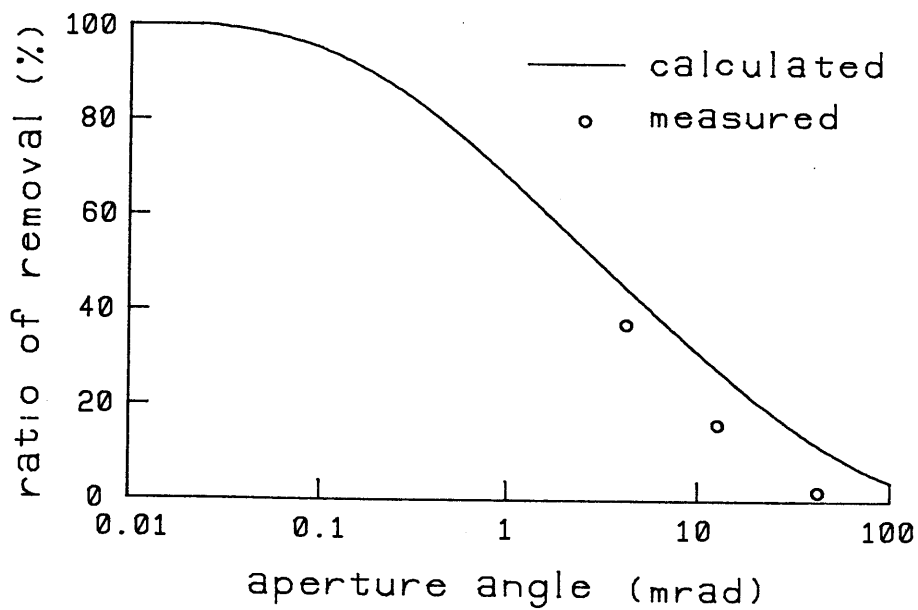


図16 絞りの角度に対する散乱電子除去率の変化

乱電子を失うことなく薄膜からの散乱電子の一部を除くことができる。この際、もちろんSTEM像の視野はこの絞りによって制限されるが、高倍率での観察には全く影響はない。いま、試料からその共役面への倍率をMとし、絞りの半径を r_a 、試料後方レンズの焦点距離を f_a とすれば、薄膜から

$$\theta = r_a / M f_a \quad (12)$$

の角度以上に散乱された電子は絞りによって除かれることになる。

このことを確かめるために、実際に試料の共役面に絞りを挿入し、薄膜からの散乱電子が絞りのないときと比べてどの程度減少するかを調べた。測定された散乱電子数 N_M と、薄膜の膜厚から理論的に導かれる全散乱電子数 N_T ⁵⁾から、絞りによる散乱電子の除去率Eを

$$E = N_M / N_T \quad (13)$$

と定義し、絞りの径による除去率の変化を求めた。加速電圧を100kV、薄膜の厚さを11nm、倍率を1としている。結果を図16に示す。実線は理論的な散乱の角度分布から求めた除去率であり、測定値は膜厚の誤差のため幾分理論値より低い値となっているが、最も小さい直径37 μm の絞りをを用いたときの除去率は約40%に達している。今回の実験では便宜的に $M=1$ としたが、高分解能の用途には視野の大きさは数 μm もあれば十分なので、直径37 μm の絞りで $M=10$ 程度にしてもよい。この場合(12)式から θ は $M=1$ のときの1/10となり、図16から約70%の除去率が期待される。したがって上記のように透過率を85%とすれば、薄膜により散乱され実際に検出器に入る電子は、入射電子の5%足らずに抑えられることが分る。

(6) おわりに

従来、薄膜レンズを用いた球面収差補正法の問題点として指摘されていたのは次の5点である。

①3次球面収差補正後に残る5次球面収差が大きい。②薄膜のコンタミネーションにより、薄膜レンズの寿命が短い。③薄膜レンズの工作精度の不足による非回転

対称収差が無視できない。④薄膜により散乱された電子が像質を悪化させる。⑤球面収差補正による像質の改善を定量的に実証する手段がない。

本研究においてこれらの問題点に対する対策を講じた結果、まず①については、薄膜レンズのプロープフォーミングレンズに対する配置と寸法パラメータの最適な選択により、3次と5次の収差を同時に補正できることを見いだした。

また、②に関しては、STEM装置の真空システムの改良と新しい薄膜レンズの設計製作により、実用上問題のない寿命が得られるようになった。

④については、従来から100kV程度以上の加速電圧の場合に散乱電子の量は少なく、球面収差補正により大きい角度の電子線を結像に使えることのメリットが散乱電子のデメリットを上回ることを主張してきたが、本研究で検出器にはいる散乱電子の量をさらに減少できることを示したことにより、散乱電子の像への影響はほとんど問題にならないレベルに抑えられるものとする。

⑤の像質評価の手法、及びその実現のためのシステムは開発済みであり、STEM像の取り込みからSN比の計算までの手順も確立した。しかし、本手法で推定したSN比の信頼性については今後確認する必要がある。その方法としては、雑音をほとんど含まない信号に既知のパワーの雑音を重畳し、そのSN比を本システムで測定して推定の精度を調べることを計画している。このようにして、推定されたSN比の信頼性を試験した後、実際に補正前と補正後の像質評価に用いる予定である。

以上述べてきたように、上記の問題点のうち③以外については本研究によりほぼ解決できたと考えてよい。したがって、薄膜レンズの実用化の成否を決める要因は、どの程度の薄膜レンズの工作精度が実現できるかに絞られてきた。(2)の項で述べたように、現在手作業で行っている薄膜レンズの作製及びセッティングを、精密機械なみの精度で行えるように外注した場合、もし現在の10倍の工作精度が実現できるとすれば100kVで0.3nmの解像度が期待できる。これはCTEMの解像度に匹敵するものであり、STEMの解像度をCTEMなみに引き上げるという当初の目的は達成されることになる。また、何等かの方法によりさらに工作精度を向上させることができれば、0.1nmレベルのプロープ径を実現する可能性も出てくる。ただし、この場合には十分なビーム電流を確保し、また色収差を小さく抑える必要から、輝度が高く電子のエネルギー広がり小さい電界放出電子銃を薄膜レンズと併用することが不可決となろう。

参考文献

- 1) M.Hibino, S.Sugiyama, T.Hanai and S.Maruse, J. Electron Microsc. 27
(1978) 259
- 2) H.Koops, Optik 52 (1978/1979) 1
- 3) J.M.Cowley, Ultramicroscopy 4 (1979) 413
- 4) T.hanai, M.Hibino and S.Maruse, J. Electron Microsc. 33 (1984) 329
- 5) S.Sugiyama, M.Hibino and S.Maruse, J. Electron Microsc. 33 (1984) 323
- 6) J.Frank and L.Al-Ali, Nature 256 (1975) 376
- 7) N.J.Bershad and A.J.Rockmore, IEEE Trans. Information Theory
(1974) 112