

ORIGINALS (1)

高分解能 2 次電子像の像質改善のための デジタル画像処理法

於保 英作・佐々木俊英・金谷 光一

工学院大学電気工学科 〒160 新宿区西新宿 1-24-2

(1984 年 7 月 11 日 受理)

Digital Image Processing Methods for Improvement of Quality of High-resolution Secondary Electron Images.

Eisaku OHO, Toshihide SASAKI and Koichi KANAYA

Department of Electrical Engineering, Kogakuin University
1-24-2, Nishishinjuku, Shinjuku-ku Tokyo

(Received July 11, 1984)

A scanning electron microscopic image suffers various degradation processes. As a result, a SEM image is blurred and disturbed by electronic noise and can have unsatisfactory contrast. It is difficult to reduce the effects of these degradations only by various improvements in the intrinsic instrument. Certain image enhancements using digital image processing are the most powerful methods for improvement of the results of an unknown degradation process. Ways to compensate each degradation by using the appropriate image processing, have been tried. As a result of the application of these digital processings, we achieved better quality of the SEM image these were taken under high-resolution conditions by using combinations of these methods.

1. はじめに

走査電子顕微鏡 (SEM) は、卓越した分解能 (解像度) をもち、又、非常に深い焦点深度を有していることから、多くの分野で日常的に相当台数が稼動している。

しかしながら SEM は、入射電子の二次効果を利用して情報を得ているので、観察対象となる試料によっては満足のいく SEM 像が得られないことも多い。たとえば、二次電子像について考察してみると二次電子放出量が少ない試量においては信号対雑音比 (S/N) が悪く、コントラストもつきにくい。また、このような場合に、S/N の改善とコントラストを増す目的で入射ビーム電流を増加させるが、結果的に分解能を規定する入射ビーム径が大きくなり、ぼけた像しか得られないことが多い。このように二次電子像には、多かれ少なかれ像質劣化の原因となる“ぼけ”、“ノイズ”、“コントラストの低下”などが生じることになる。これらの影響は、二次電子以外の信号、たとえば反射電子、オージェ電子、X線、

カソードルミネセンスなどを用いた像においても同様である。像質劣化は高分解能観察を目的とする場合に特に重要であり、解決すべき問題は多い¹⁾。これまで SEM 使用者は、CRT 上の像を観察しながら経験的に装置側の条件 (照射電流、加速電圧、光電子増倍管の増幅率など) を選択して最良の画像を得るように努めてきた。それらが理想的な値に設定されていても、種々の劣化の影響を受けて、像観察及び構造解析等を難しくしている場合が少なくない。

それ故、SEM による表面構造等の研究の発展のために、著者らはデジタル画像処理法の導入が必要不可欠であると考え、種々の像質劣化の原因を明らかにして、その改善にそれぞれ適した画像強調法を導入した²⁾。

走査電子顕微鏡像のデジタル画像処理は、White et al. 1968, Fiori et al. 1974, Smith et al. 1977, Erasmus et al. 1980, Kanaya et al. 1982, Oho et al. 1984³⁾⁻⁸⁾ によって試みられているが、著者らが意図するような実際の研究に利用できる報告 (たとえば、装置の性能限

界で撮影された、像質劣化が甚だしい電顕像の為の処理法など)は、ほとんどなされていないのが現状である。加えて画像処理の分野でも比較的新しい局所的性質を良く捕らえた非線形処理の SEM 像への応用も報告された例はほとんどない。

本報告では、数多い画像処理法の中から選択した SEM 像の像質改善に有効と考えられる手法について SEM 像に有効に作用し、かつ、画像処理によるアーティファクトを生じさせない条件を明らかにする。まず、その目的を達成するために、理想条件下で撮影された像質劣化の原因をほとんど有していない既知の SEM 像に、各種像質劣化を人工的に起こしたいくつかのシミュレーション像を考えた。そして、それらの像質を適切な画像処理を施すことによって改善する実験を試みた。また、応用として、複数の像質劣化の原因を有する高分解能 SEM 像に対して、実験によって明らかにしたデータを基に、いくつかの画像処理法を組み合わせる像質改善に成功した例を報告する。

2. 像質劣化の一般的な性質を考慮した像質の改善

既知の像質劣化過程や推定された劣化過程を補正するためのフィルタリング理論(たとえばウィナーフィルタなど)が数多く考案されているが、SEM 像への適応には劣化過程の推定が難しく汎用性に欠けるものが多い。また、処理時間がかかることも難点のひとつである。そこで著者らは SEM 像に作用した像質劣化過程の推定をほとんど行わず、劣化の一般的性質を考慮したいくつかの画像強調法が、我々の目的にとって最も実際的であると考え、これらを SEM 像の像質改善に応用した。

Fig. 1a は、実験に用いた硬貨の二次電子像で、S/N, コントラスト, 鮮鋭度, 共に満足のいくものであると仮定する。Fig. 1b は、Fig. 1a において白枠で囲まれた部分のデジタル化像を示している。

a) ノイズの除去

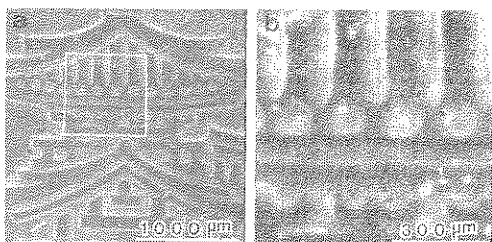


Fig. 1 A SEM image taken under optimum conditions: (a) original SEM image of a coin; (b) enlarged image of (a), (identified by a square).

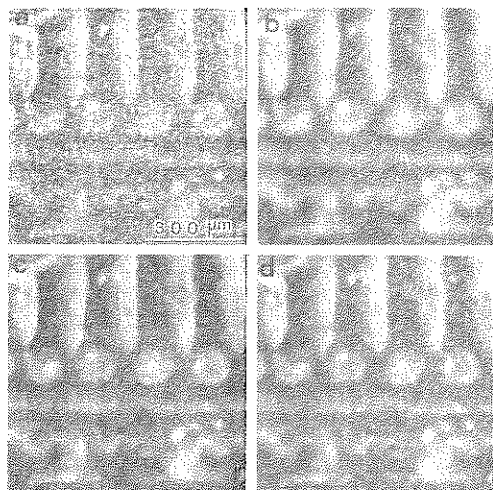
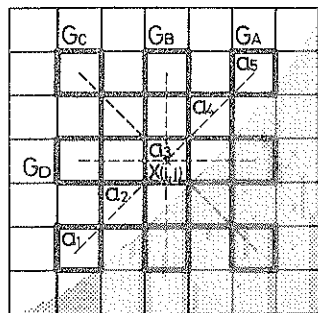


Fig. 2 Noise removal of a SEM image: (a) a noisy image; (b) noise removed image by smoothing by neighborhood averaging; (c) noise removed image by smoothing by averaging along edges; (d) noise removed image by median filtering.

使用する SEM の最高の分解能を引き出す為に、照射電流を絞る、あるいは、試料自身の二次電子放出量が少ないなどの条件下では、S/N の良くない像が得られることがしばしばあり、像観察を困難にしている。

Fig. 2a は、ノイズだけを撮影したものと、この実験の原画像である Fig. 1b を合成した像であり、人工的に S/N を悪くしてある。Fig. 2b は、一般的な線形の平均化操作によってノイズを減少させた場合を示す。ノイズと共にエッジ等の情報も壊れてしまい、結果としてぼけた処理像しか得られない。これは、線形の平均化によるノイズ除去の原理的限界であり、Fourier 変換を用いた高周波成分を抑制する方法においても同様の結果となる。

情報を残したまま SEM 像のノイズを除去するには、画像の局所的な性質を把握できる非線形の平均化処理法を導入しなければならない^{2), 8)}。Fig. 2c, d にその非線形処理の例を示す。Fig. 2c ではエッジや線 (SEM 像において情報となりうるもの) が存在する点において、その方向を検出しそれに沿った近傍だけを使う濃度平均をとる方向つき平均化を行ない、それ以外の点では、普通の等方的な平均化を行なう。すなわち、Fig. 3 に示したように平均化される点 $X(i, j)$ がエッジ付近に存在する場合は、エッジの方向を検出し (この場合は G_A 方向)、次に $X(i, j)$ の濃度値 a_3 を G_A 方向の濃度の平均値 $\left\{ \frac{1}{5}(a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5) \right\}$ によって置き換え、本来同程度の濃度値であるはずの近傍だけを使って平均



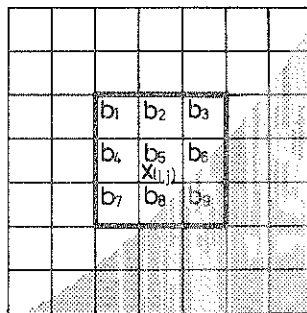
Smoothing by averaging along edges

$$G_{\min} = \min(G_A, G_B, G_C, G_D)$$

If $G_{\min} = G_A$

The value of the point $X(i,j)$ is replaced by the average $\{ \frac{1}{5}(a_1+a_2+a_3+a_4+a_5) \}$ in the direction of minimum edge value $G_{\min}$

Fig. 3 A schematic diagram showing the operation of a smoothing by averaging along edges.



Smoothing by median filtering

For a 3x3 neighborhood,

The value of the point $X(i,j)$ is replaced by the fifth largest value (=median value) in a neighborhood of the point $X(i,j)$.

Fig. 4 A schematic diagram showing the operation of a smoothing by median filtering.

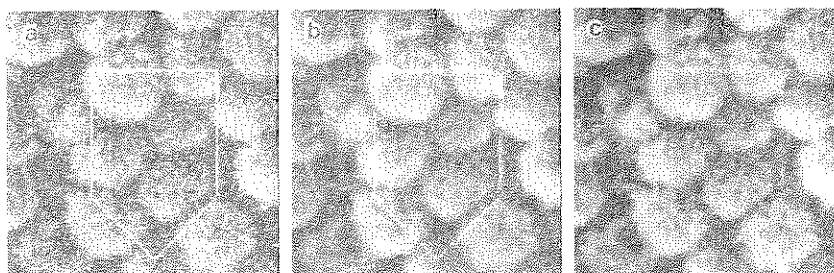


Fig. 5 Simulation for confirming the effect of the noise removal from a simulated image involving supposed structural details by using two non-linear filter: (a) compounded image; (b) result of the averaging along edges; (c) result of the median filtering.

化している。その結果、Fig. 2c に示したように画像をぼかすことなくノイズを除去することができる。

Fig. 2d は、メジアンフィルタ（中央値フィルタ）を用いた例である。処理内容は Fig. 4 に示したように、平均化される点 $X(i,j)$ と回り 8 近傍を使いフィルタの出力として 9 個のサンプル値のうち大きい方から 5 番目の値（中央値）を採用したものである。これは、ノイズの濃度値が高低に偏ることが多く、中央値をとりにくいことを利用している。

これら 2 つの非線形フィルタは、一般的な SEM 像に対してはほぼ同等のノイズ除去の効果が望めるが、特殊な画像に関しては大きな差を生じることがある。それらを明らかにするため以下のシミュレーションを行なった。

Fig. 5a～c は、エッジに沿った平均化がメジアンフ

ィルタよりも効果的な画像の例である。S/N の良くないラテックスの SEM 像とノイズの大きさと同程度の細線で構成されている図形を合成したもの（すなわち、微細構造とノイズの大きさがあまり変わらない画像）が Fig. 5a、それからエッジに沿った平均化によってノイズを除去した像が Fig. 5b、メジアンフィルタによるものが Fig. 5c に示されている。前者では細線が良く保存されているが、後者においては、ノイズと共に細線まで除去されていることが判る。

次にメジアンフィルタが特に有効な画像の例として、ごま塩ノイズを発生させたシミュレーション像を Fig. 6a に示す。SEM 像にはこの種のノイズは存在しない。しかし、複雑に組み合わせられた処理過程において、各処理間の整合性に問題がある場合に生じやすいものである。Fig. 6b はメジアンフィルタ、Fig. 6c には

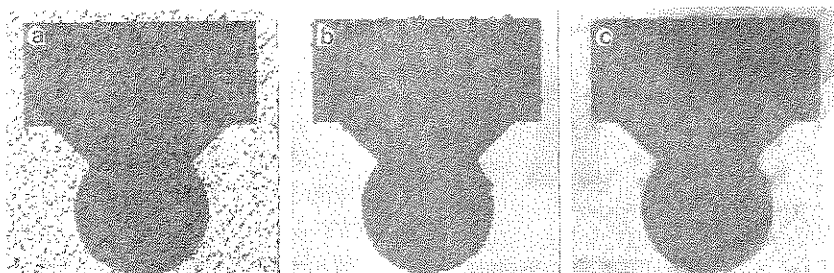


Fig. 6 Simulation for confirming the effect of the removal of the salt-and-pepper like noise by using two non-linear filter: (a) simulated noisy image; (b) result of the median filtering; (c) result of the averaging along edges.

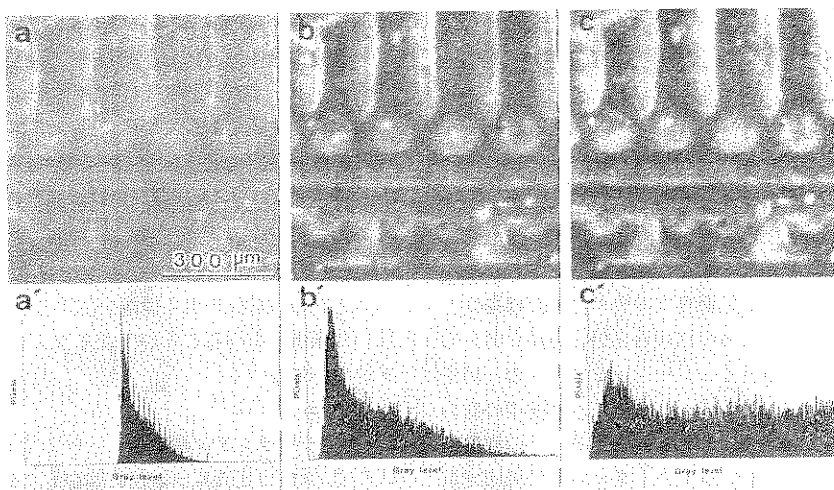


Fig. 7 Improvement of a SEM image in contrast: (a) low contrast image; (a') histogram for (a); (b) contrast stretched image; (b') histogram for (b); (c) histogram flattened image; (c') histogram for (c).

エッジに沿った平均化を行なった結果を示す。前者では、ほぼ完全にノイズが除去されているのに対して、後者には平均化されて振幅が減衰したノイズがある程度残っている。

このように、各ノイズ除去法はそれぞれの特徴を踏まえたうえで使用しなければ効果が半減し、極端な場合には、アーティファクトを観察することにもなりかねない。

b) コントラストの強調

SEM 像にノイズが多く生じるような条件下では、像コントラストにおいても不満足な場合が多い。

Fig. 7a は、原画像 **Fig. 1b** のコントラストを人工的に低下させた像であり、その画像の濃度ヒストグラムは **Fig. 7a'** のように濃度変化がかなり狭い範囲に偏っている。このような場合には、濃度変化を許容範囲全体に広げるコントラストストレッチを行えばよく、その

結果を **Fig. 7b, b'** に示す。これによって原画像と同等以上のコントラストを得ることが出来る。

Fig. 7c は、画像を最も効率よく表現する為の一方法であるヒストグラムの均一化を用いてヒストグラムを **Fig. 7c'** のように修正した処理像である。このように、濃度ヒストグラムを平坦にすると、**Fig. 7a** の像中で、多くの画素で構成されているような濃度範囲はその範囲が広げられ、逆に画素数が少ない範囲は圧縮されて、全体としてコントラストが強調された鮮明な像が与えられる。

しかしながら、観察対象物が電頭像の一部にしかないような場合には、処理の原理上、同程度の濃度値で構成されている画素数の多い背景の方がより強調されてしまう結果となり改善が望めないこともある。このような画像は、SEM 像よりも STEM や TEM による生物試料の観察時によく見られるが、その様な場合には、前処

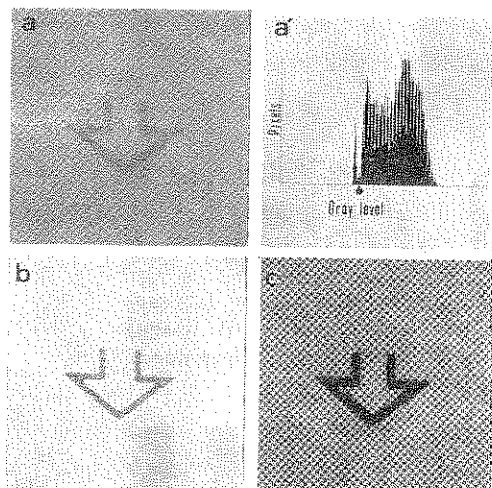


Fig. 8 Simulation for confirming the effects of the contrast stretching and histogram equalization: (a) Simulated image with its histogram (a'); (b) result of the contrast stretching; (c) result of the histogram equalization.

理として観察対象物がどのような濃度範囲にあるかを調べ、他の濃度を犠牲にして必要な部分の濃度だけをコントラストストレッチによって広げるという方法が考えられる。この方法によるシミュレーションテストの一例を **Fig. 8a ~ c** に示す。Fig. 8a において、画像中心部の矢印像のみが必要な情報であると仮定する。その濃度値は Fig. 8a' に示されているヒストグラムでは矢印で示される濃度の谷の左側部分として現われてくる。この濃度範囲のみを広げた処理像が Fig. 8b であり、微細な濃度差が観察され、コントラストの改善が見られる。一方、ヒストグラム均一化操作を施した結果が Fig. 8c であるが、背景の方がより強調された像となり、情報内部にコントラストの差異は観察できない。ただし、背景部分を情報と考えれば、この処理が最も効果的である。

c) 鮮鋭度の改善

SEM 像の S/N を改善する為に照射電流を増加させ

ると入射ビーム径が大きくなり、像にぼけを生じさせる。また、装置の分解能限界を越えた微細構造の観察も同様に鮮明な像は期待できない。

SEM 像は、ノイズ等を見捨てた場合、無限に小さいビームで試料面上を走査した場合の応答関数と、ガウス分布で規定される実際の入射ビームとの畳み込み演算によって得られると仮定する^{6), 8)}。その仮定に基づいて、コンピュータ上で原画像 Fig. 1b をある程度大きなビーム径で走査することによって得られたぼけ像が **Fig. 9a** に示されている。

ぼけた像は、線形の平均化処理などの積分演算によって得られるから鮮鋭度を改善する為には画像に微分演算を施せばよいことになる。Fig. 9b は、(1)式に示されている、画像関数 $f(x, y)$ を座標 (x, y) で微分するグラジエント・オペレータでぼけ像を処理したもので、高周波成分を多く含んでいるエッジ等が抽出され、それ以外の点の濃度は低くなっている^{5), 7)}。

$$|G[f(x, y)]| = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2} \quad (1)$$

次に(2)式に示されている、ぼけ画像 a からそのラプラシアン⁹⁾の整数倍を引く操作を施すことによってぼけを除いた画像 g を得ることができるラプラシアン・フィルタについて述べる。

$$g = a - k\tau \nabla^2 a \quad (2)$$

∇^2 : ラプラシアン演算子

ここで、 $k\tau$ は走査ビーム径に関係した値であるが、鮮鋭化の度合に応じて試行錯誤で選ばれることが多い。**Fig. 10** は、エッジを電子ビーム $h(x)$ で走査した場合の出力信号 $a(x)$ と、それにラプラシアン・フィルタを用いて鮮鋭度を改善した結果を図式的に示している。実際に Fig. 9a を処理したものが Fig. 9c であり、原画像 Fig. 1b との比較から、処理像がアーティファクトを生じさせることなくぼけを修復し、忠実に原画像を再生していることが判る^{8), 9)}。しかし、ノイズの多い画像に対して、ラプラシアン、グラジエント等の高周波成分を

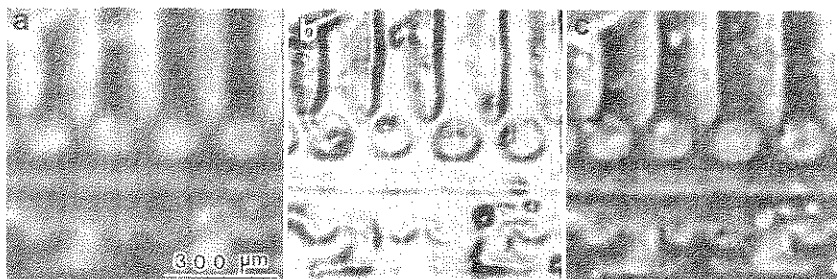


Fig. 9 Improvement of a SEM image in sharpness: (a) blurred image; (b) gradient image; (c) Laplacian filtered image.

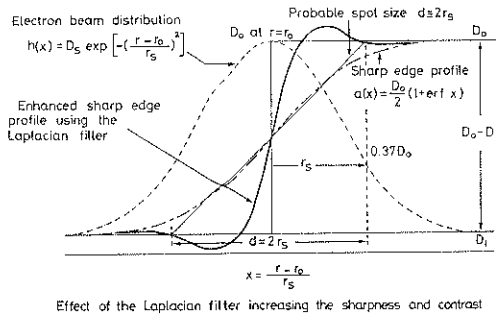


Fig. 10 A schematic diagram showing the effect of the Laplacian filter increasing the sharpness and contrast.

強調する微分フィルタを使用する場合は十分にアーティファクトに注意しなければならない。著者らは、原画像にある種のローパスフィルタを通した像（原画像と比較して、処理像からはノイズ及び微細な構造が除去されるが、大まかな構造はよく保存され、アーティファクトを生成することもほとんどない）と微分フィルタによる処理像を相互に比較して、アーティファクトの有無を確認している。

3. 種々の像質劣化の原因を有する高分解能 SEM 像の像質改善

装置の性能限界で撮影される高分解能 SEM 像の像質

劣化は、複数個の原因によって引き起こされる。したがって効果の大きい像質改善を行なうには、前述した処理法を組み合わせる用いなければならない。この場合、各処理間の適合性に問題があることも多く（たとえば、ある処理を施したなめらかさが十分でない像に、次の処理として、微分フィルタを通す場合）、処理像中にアーティファクトを生じさせてしまうことがある。また、最良の方法を見つける為には、用いる処理法の性質を把握しつつ相当の試行錯誤をして、適正な処理法を構成していかなければならない。

Fig. 11 a～eは、メジアンフィルタ、ラプラシアンフィルタ、ヒストグラムの均一化を組み合わせた処理の例を示す。この方法によって、局所的な2次電子放出量のちがいを強調し、かつ、ぼけを取り除くことに成功した。これは、ラプラシアンフィルタを SEM 像に用いる場合、前処理としてノイズ成分を除去しなければ、ノイズに多くの高周波成分が含まれている為に良い結果は望めず、加えて前述された非線形のノイズ除去法にも画像のなめらかさに問題があり、線形の平均化しかラプラシアンフィルタと組み合わせることが出来ない、という事実を克服したものである。Fig. 11 a は、日立製 SEM, S-450 で撮影した、カーボン上の金粒子であり、ノイズ、ぼけ等による像質劣化が見られる。

Fig. 11 a からメジアンフィルタを用いてノイズを除去した像が Fig. 11 b である。それにラプラシアンフィ

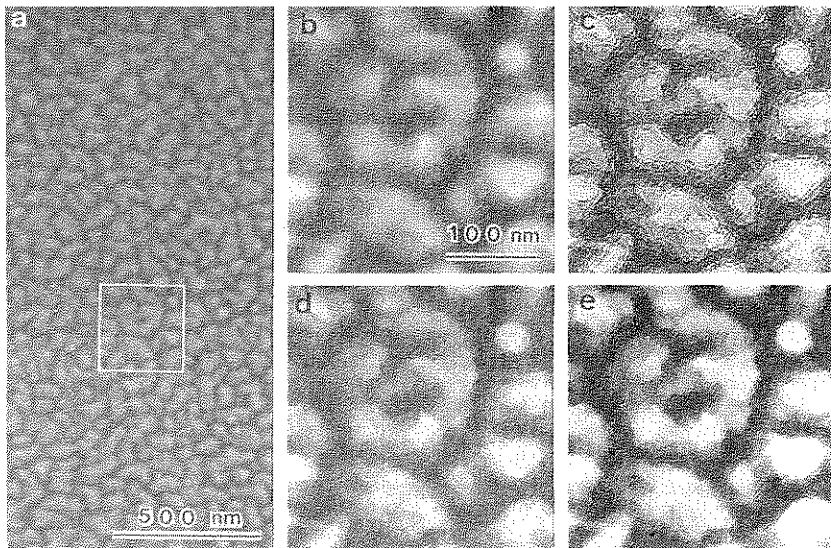


Fig. 11 Combinations of various methods for improving the quality of a high-resolution SEM image: (a) SEM image of gold particles deposited on a carbon thin film; (b) median filtered image of (a); (c) Laplacian filtered image of (b); (d) processed image after removing the artifact by the median filtering; (e) histogram equalization of (d).

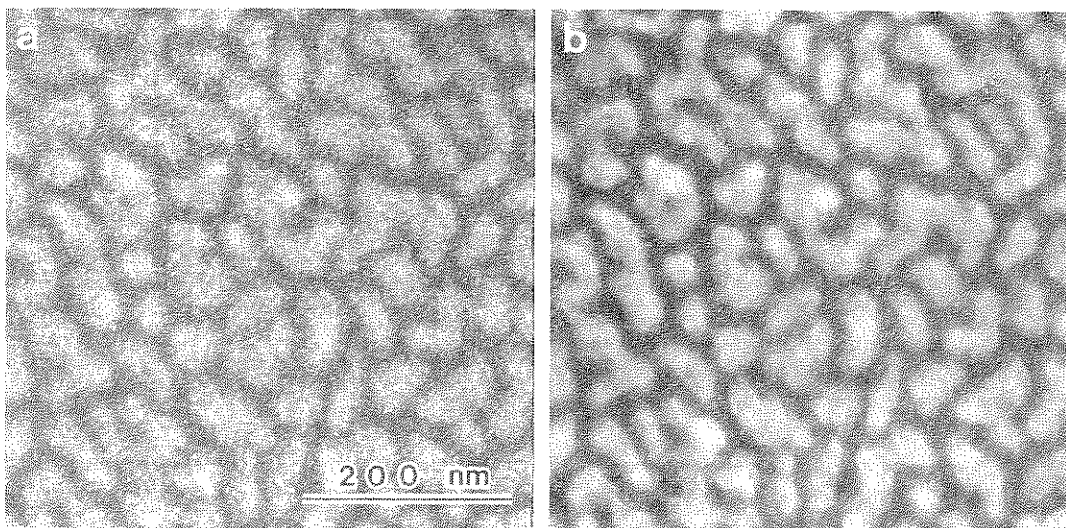


Fig. 12 High-resolution SEM image of gold particles deposited on a carbon thin film: (a) original SEM image; (b) processed image by the smoothing by averaging along edges and contrast stretching.

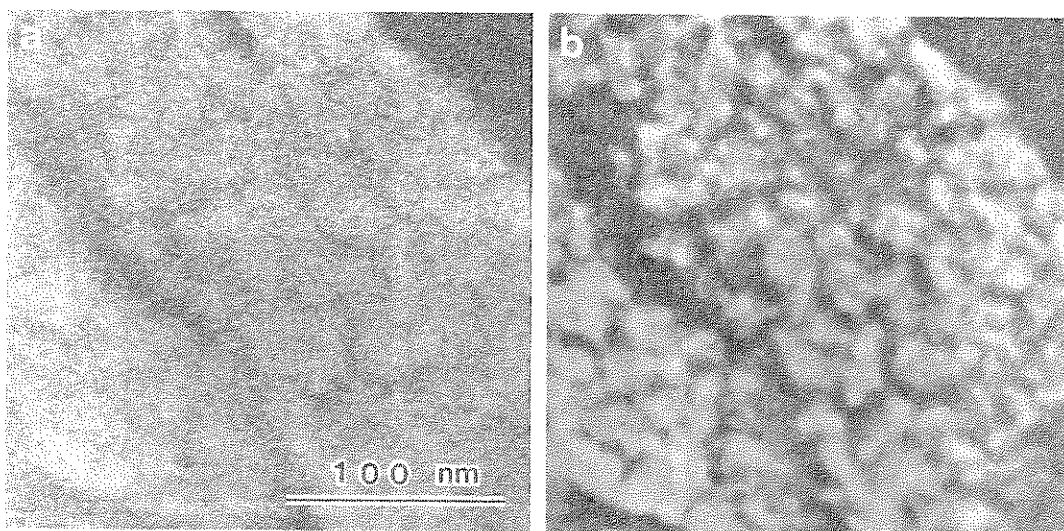


Fig. 13 High-resolution SEM image of gold coated magnetic tape: (a) original SEM image; (b) processed image by the median filtering, smoothing by weighted averaging, Laplacian filter and histogram equalization.

ルタをかけると、先に述べた理由で、Fig. 11 cに示すように1画素程度の大きさのするどい振幅を持ったアーティファクトが生じてくる。しかし、この種のアーティファクトは、先のシミュレーションから再びメジアンフィルタをかけることによって完全に除去出来ることが確認されている。Fig. 11 dに、ラプラシアンフィルタの鮮鋭化効果を残したままでアーティファクトを除去した結果を示す。Fig. 11 eは、ヒストグラムの均一化によ

てそのコントラストを強調したものである。処理像はメジアンフィルタだけの処理像よりも2次電子放出量のちがう領域を明確に区別することが出来る。

Fig. 12 aは、照射電流を減らして走査ビーム径を小さくした為、極端にノイズが多くなってしまったカーボン膜上の金粒子のSEM像を示す。この像に対して、エッジに沿った平均化処理でノイズを除去し、コントラストストレッチを用いてコントラストを増加させた像が

Fig. 12bに示してある。処理像では、ノイズによる解像度のあいまいさが減少し、このSEM像の解像度が金粒子間隔を測定することによって正確に測定出来た。

Fig. 13aは、一般的に用いられている解像度測定用の金蒸着磁気テープを二次電子像として観察出来る限界の条件下で撮影した像であり、S/Nの悪さに加えて、低コントラスト、像のぼけが表面構造の観察を妨げている。この像質を改善する為に、メジアンフィルタ、線形の平均化、ラプラシアンフィルタ、ヒストグラムの均一化を組み合わせた処理を施した。その結果を Fig. 13bに示す。原画像からは難しかった試料表面の形状観察が、S/N、コントラスト、鮮鋭度の改善に伴って可能となった。

4. 結 論

走査電子顕微鏡像における種々の像質劣化の原因を考慮した像質改善に、それぞれ適したデジタル画像処理法を提案した。また、これらの手法を有効に使用する為には、処理される画像との適合性等を考慮しなければならず、それが悪い場合には、アーティファクトが生じて、偽りの情報が得られる可能性のあることを示した。加えて、画像処理法の応用として最も処理が困難で、かつ、処理をしなければ表面形態が判らないような複数の劣化の原因を受けた高分解能SEM像の処理を行ない、良好な結果を得た。今回の報告は、構造解析などを行なう場合の前処理に当たる部分であるが、この“前処理”が非常に重要であり、不適当な前処理は構造解析等の失敗を

まねく恐れがあることが判った。これらの比較的簡単なデジタル処理法を用いることによって、これまで困難であったような表面構造解析等のSEMによる研究がより一層進展するものと考えられる。

文 献

- 1) O. C. Wells: *Scanning Electron Microscopy*. (McGraw-Hill, New York) p. 20 (1974).
- 2) A. Rosenfeld and A. C. Kak: *Digital picture processing*, (Academic press, New York) p. 209 (1982).
- 3) E. W. White, H. A. McKinstry and G. G. Jr. Johnson: *SCANNING ELECTRON MICROSCOPY*, 95 (1968).
- 4) C. E. Fiori, H. Yakowitz and D. E. Newbury: *SCANNING ELECTRON MICROSCOPY*, 167, (1974).
- 5) K. C. A. Smith, B. M. Unitt, D. M. Holburn and W. J. Tee: *SCANNING ELECTRON MICROSCOPY* (Part. 1), 49 (1977).
- 6) S. J. Erasmus, D. M. Holburn and K. C. A. Smith: *SCANNING*, 3, 273 (1980).
- 7) K. Kanaya, N. Baba, M. Kai, E. Oho and Y. Muranaka: *SCANNING ELECTRON MICROSCOPY* (Part. 1), 61 (1982).
- 8) E. Oho, N. Baba, M. Katoh, T. Nagatani, M. Osumi, K. Amako and K. Kanaya: *JEMT*, 1, 331 (1984).
- 9) K. Kanaya, E. Oho and M. Naka: *BIOMEDICAL SEM*, 12, 12 (1983).