

SEM・SAM 用画像処理システム II

—ソフトウェア—

徳高 平蔵・西守 克巳・石原 永伯
渡部 靖彦・岸田 悟

電気電子工学科

(1989年9月1日受理)

Computer Image Processing for SEM and SAM II —Development of the Software—

by

Heizo TOKUTAKA, Katsumi NISHIMORI, Naganori ISHIHARA
Yasuhiko WATANABE and Satoru KISHIDA

Department of Electrical and Electronic Engineering

(Received September 1, 1989)

The software for the image processing microcomputer system for the SEM-SAM (scanning electron microscope-scanning Auger electron microscope) apparatus, SAM-1000S was developed. Each of the programs satisfied our purpose of the image processing. Here, some of the programs were reviewed and their effects and the results were discussed. The histogram stretching method was introduced for the enhancement of the image contrast. The edge detection technique was used for the feature extraction of the images. The bird's eye view method was employed for enhancing a three-dimensional expression. These methods improved the picture quality and the recognitions of the images became easier using the SEM and SAM image processing.

Key words : Image processing, Scanning electron microscope, Scanning Auger electron microscope, Histogram stretching, Edge detection, Feature extraction, Bird's eye view expression.

1. はじめに

走査型電子顕微鏡 (SEM) や走査型オージェ電子顕微鏡 (SAM) は、材料表面のさまざまな形状や表面元素の組成分布をそれぞれ局所的な2次元画像として得ている。それゆえ表面形状と構成元素の濃度分布が同時に表現できれば直感的な理解が得られやすい。さらにこれら2次元画像をデジタル処理¹⁾することにより、さらに進んだ画像理解が期待できる。そこで我々は工学部共同利用の島津製作所製SAM-1000S装置にコンピュータを結合するためのハードウェアを製作し、その測定ならびに画像データの収集、記録、処理などの機能を大きく向上させた。

2. プログラム開発環境

2.1 OS9/68000オペレーティングシステムとそのモジュール構造

2.1.1 OS9/68000オペレーティングシステム

画像処理を行うコンピュータを選択する場合にはプログラム開発環境と実行環境及びプログラムのメンテナンスが問題になる。開発ソフト (言語など) が多数有るといふ事ではパソコン上のMS-DOSが有利であるが、実行環境としては640Kbyteしかメモリが使用できない、拡張バスが特別であり (その機種のみ) 信頼性に乏しいなど問題がある、このシステムではMPUに16Mbyteリニアアドレスが使用できるMC68000を採用し、標準バスの一つであるVMEバス (IEEE1014) 上にシステムを構築した。オペレーティングシステム (以下OS) として、UNIXスタイルのユーザインタフェース、階層化ファイル構造をもち、モジュール構造、少メモリスペースでマルチユーザ、マルチタスクOSである、マイクロウェア社のOS9/68000 ver 2.2²⁾を使用した。

2.1.2 モジュール構造

図1にOSの基本構成をしめす。OS-9では各機能の徹底的なモジュール化、階層化を行い、それぞれのモジュールでは特定の機能を分担して、これらのモジュールが有機的に結び付いて1つの高度なマルチタスクOSとして成り立っている。従って、システムの構成により不要なモジュールを削除したり新しいモジュールを追加したりすることが可能である。例えば、小規模のROM

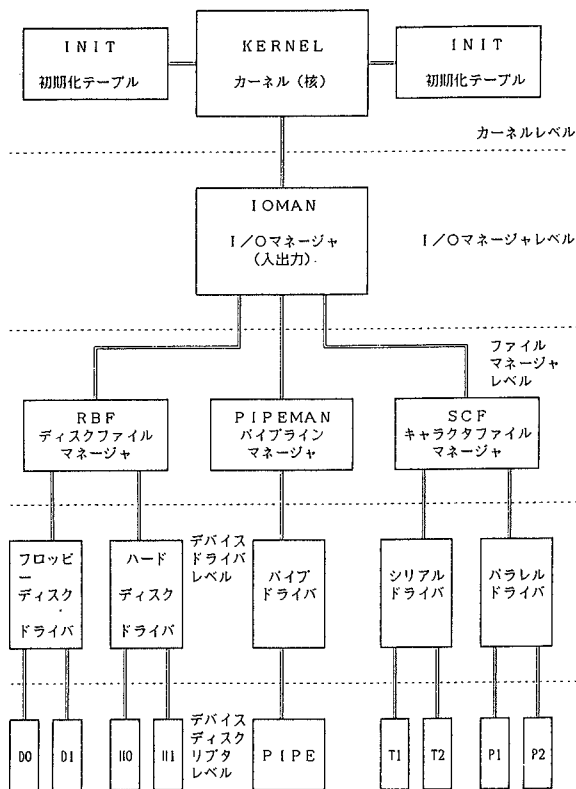


図1. OS9/68000のモジュール構造

ベースの制御用システムの場合はデスク関係のモジュールは不用であるため削除する事ができる。また、OS-9ではOS自身をはじめプログラムや定数表などがメモリ・モジュールという構造になっている。モジュールはリエントラント (マルチタスクにおいてプログラムの変数を独立に取れる方式) であり、かつ、ポジションインディペンデント (プログラムをどの番地から記憶しても実行可能な方式) である。そしてモジュールは個々に独立している。また、メモリ上のモジュールとファイル上のモジュールも全く同一に扱うことができる。それらによりOSの改造やROM化が容易であり、メモリ効率の良い大きなプログラムが作りやすい。プログラムの実行に際して特別なローダやリンカを必要としないと言うメリットがある。

2.2 C言語

プログラム開発言語としてマイクロウェア社のC言語³⁾を使用した。C言語⁴⁾はベル研究所のデニス・リッチーによって開発されUNIXオペレーティングシステムがCで書かれたことで一般化し、様々なOS上で動作する物が商品化されるようになっていく。C言語は「ポータブルアセンブラ」とも呼ばれ、C言語で書かれたプログラムはわずかなソースレベルでの変更か、場合によってはまったく変更無しに様々なコンピュータ上で動作させることが可能である。また、C言語は機器を制御する上でアセンブラと同じ様な威力を発揮する。この様にC言語は効率を最重要課題として考えるシステムレベルのツールを開発する上で非常に理想的な言語となっている。

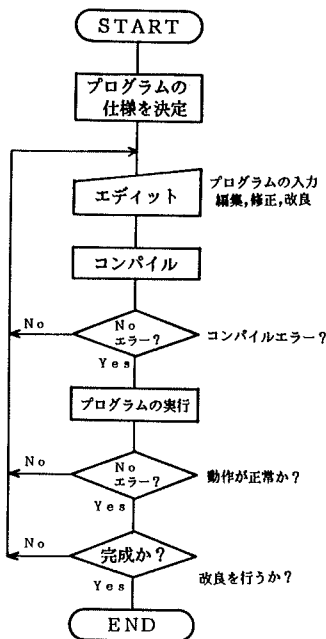


図2. プログラム開発のフローチャート

2.3 開発手順

プログラム開発を数人で継続して行なうために、パラメータや共通変数、ポインタなどをヘッダーファイルにまとめソースに挿入して使用する事により、仕様を統一する。また、よく使用する関数をライブラリー化して、コンパイル時にオプション指定によりリンクして使用することで関数を共通にし、開発効率を上げることができ、メンテナンスがしやすくなる。図2にプログラム開発のフローを示す。

3. 開発した画像処理プログラム

表1に開発した画像処理プログラムの一覧を示す。プログラム開発は現在も進行中であり実際の数はこれよりも多くなっている。また、このほかユーザーライブラリー関数として50以上のルーチンを開発している。画像処理の手法は一つの画像に対していくつかの処理を行なって目的とする画像を得ることがよくあり、このような場合にはC言語プログラムの中で処理をライブラリー関数として呼び出して順次実行させるか、または、コマンド・インタプリタにより処理プログラムを連続して実行する。

4. 画像処理の応用例

ここでは、SEM、SAM用に開発した画像処理プログラムの内、得られた画像を見やすくするための画質改善を目的とした、1) 画像変換⁵⁾；コントラスト強調の例、画像の特徴を抽出するための、2) 特徴抽出⁵⁾；エッジ検出の例、とくにSEM像での表面形状が、一目でわかるようにした、3) 画像表示⁵⁾；画像の3次元(鳥瞰図)表示の例を示す。

1) コントラスト強調(ヒストグラムストレッチ)プログラム

一枚の画像における各画素の濃度(SAM、SEM画像では輝度)を横軸にとり、縦軸にその輝度を示す画素数をとった棒グラフが、濃度(輝度)ヒストグラムと呼ばれる。ここではコントラストを強調するために、この輝度ヒストグラムが、ダイナミックレンジいっぱい広がるように、ヒストグラムストレッチを行なった。使用したプログラム名は、"v_strech"と呼ばれるものである。図3に、これをICパターンのSEM像に(倍率×200)適用した例を示した。図3(a)のコントラスト強調前のものでは、輝度ヒストグラムは、ほぼ一ヶ所に集

(その2)

画像記録・再生

プログラム名	内容
v_save	その1の作成
v_load	その1の作成
v_makpf	その1の作成
v_che_pa	その1の作成
v_cha_me	その1の作成
i_save	その2の有無
i_load	その2の有無
i_makpf	その2の有無
vs_id_acq	12bit画像の記録
vs_id_acq2	12bit画像の記録
v_saveh	濃淡画像の記録
v_loadh	濃淡画像の再生
v_saves	濃淡画像の記録
v_loads	濃淡画像の再生

画像結果出力

プログラム名	内容
v_pr_g	濃淡画像の出力
v_pr_gb	濃淡画像の出力
v_pr_b	濃淡画像の出力
v_dsp_merr	濃淡画像の出力
v_dsp_ave	濃淡画像の出力
v_dsp_ord	濃淡画像の出力
v_dsp_pat	濃淡画像の出力
v_dsp_mord	濃淡画像の出力
v_dsp_derr	濃淡画像の出力
v_plot1	濃淡画像の出力
v_plot2	濃淡画像の出力
v_pr_pa	濃淡画像の出力

VIPボードのコントロール

プログラム名	内容
v_fmset	撮像機の設定
v_fnset	撮像機の設定
v_blevel	撮像機の設定
v_crshr	撮像機の設定
v_gth	撮像機の設定
v_bth	撮像機の設定
v_grecl	撮像機の設定
v_grec2	撮像機の設定
v_brec1	撮像機の設定
v_brec2	撮像機の設定
v_gpback	撮像機の設定
v_gppback	撮像機の設定
v_bpback	撮像機の設定

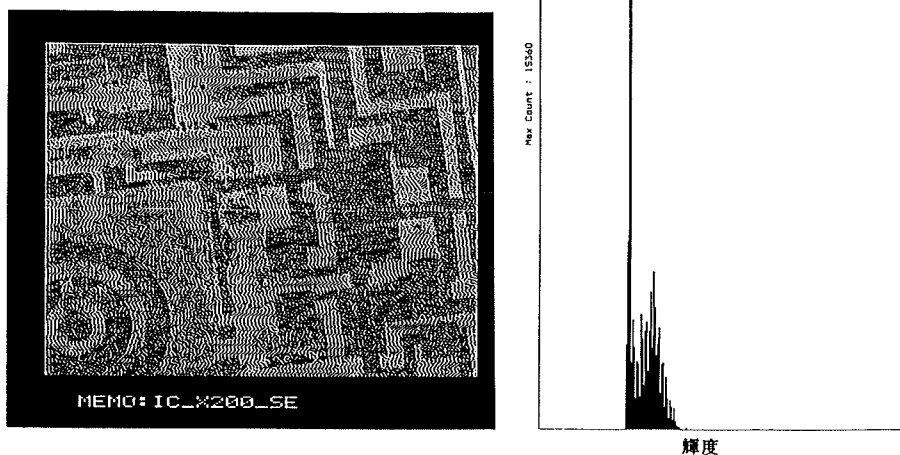
その他

プログラム名	内容
v_full	画像の表示
v_mask	画像の表示
v_scroll	画像の表示
v_cursor	画像の表示
vs_acq_aes	AESスキャンの表示
vs_ld_aes	AESスキャンの表示
vs_plot_aes	AESスキャンの表示
vs_line_scan	AESスキャンの表示
vs_sub_acq	SAM画像の表示
vs_mosa_acq	12bit画像の表示
vs_aucu	AUCU画像の表示
vs_hist	12bit画像の表示
vs_scan	SEM画像の表示
vs_makpf	12bit画像の表示
vs_ld_para	12bit画像の表示

中しており、その像は一様に暗くはっきりとしたコントラストが見られない。この輝度ヒストグラムをダイナミックレンジいっぱい広げたのが図3であり、その像は明瞭なコントラストが得られ、ICパターンが細部まで明確に認識できる。

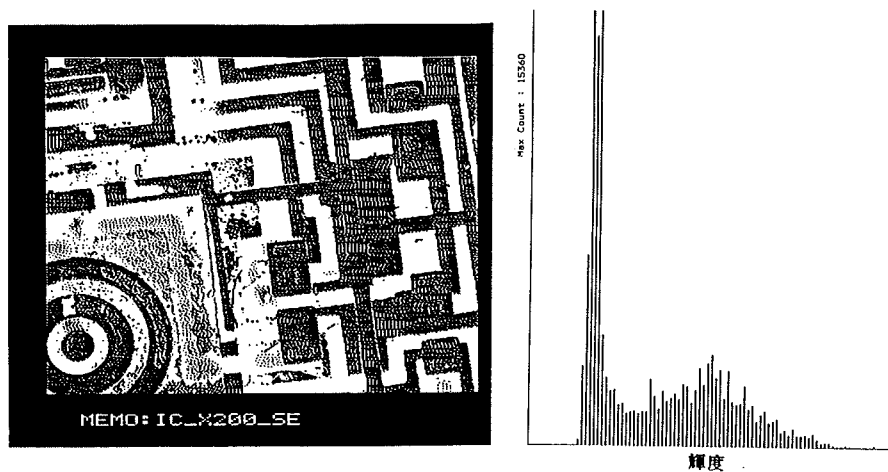
2) エッジ検出プログラム

一般的に画像のエッジを検出するには、画像を微分すればよい。その際、画像は二次元で、x方向の変化とy方向の変化があるため、微分演算子による演算が基本となる。これをフィルタマスクで表現すると、図4 (f) の(1) (v_dif1 と名づける)である。さらに、 3×3



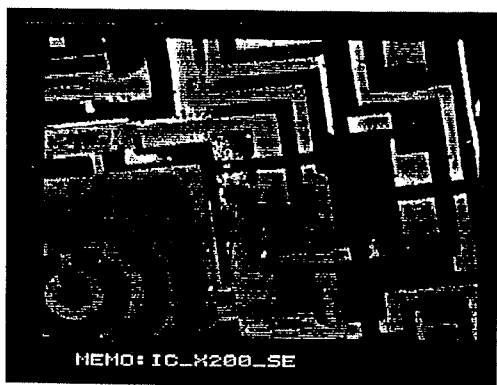
(a) コントラスト強調処理前のICパターンのSEM像とヒストグラム。

50 μm



(b) コントラスト強調処理後のICパターンのSEM像とヒストグラム。

図3. コントラスト強調処理の実行例



(a) 原画像 (ICパターンのSEM像)

-2	1
1	0

(1)

0	1	0
1	-4	1
0	1	0

(2)

1	1	1
1	-8	1
1	1	1

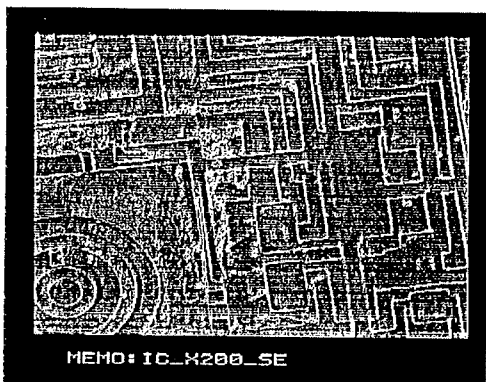
(3)

A	B
C	

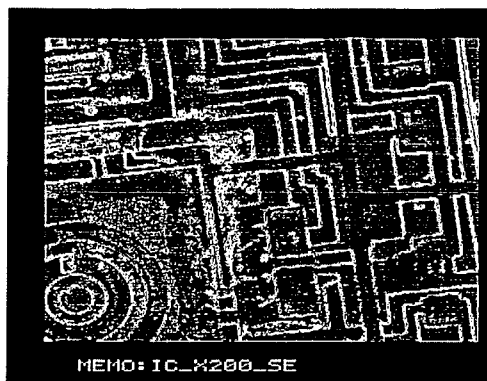
(4)

MAX |B-A|, |C-A|

(f) エッジ検出用各種微分フィルター

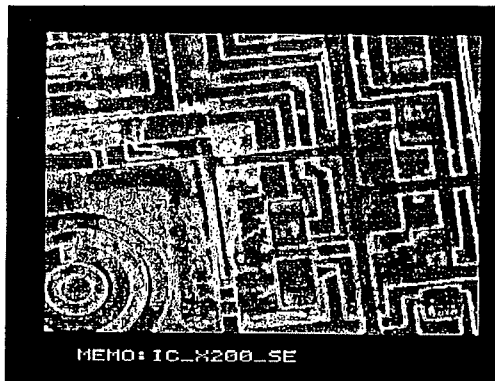


(b) "v_diff1"によるエッジ検出

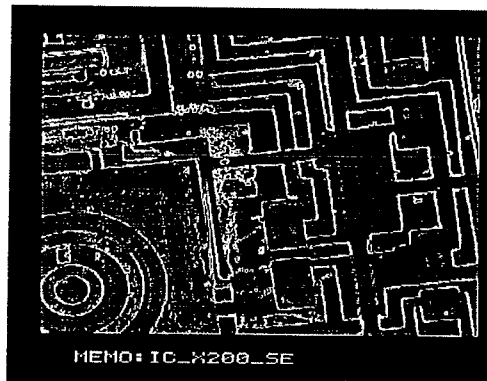


(c) "v_diff2"によるエッジ検出

50 μm



(d) "v_diff3"によるエッジ検出



(e) "v_diff4"によるエッジ検出

図4. 各種微分フィルターによるエッジ検出

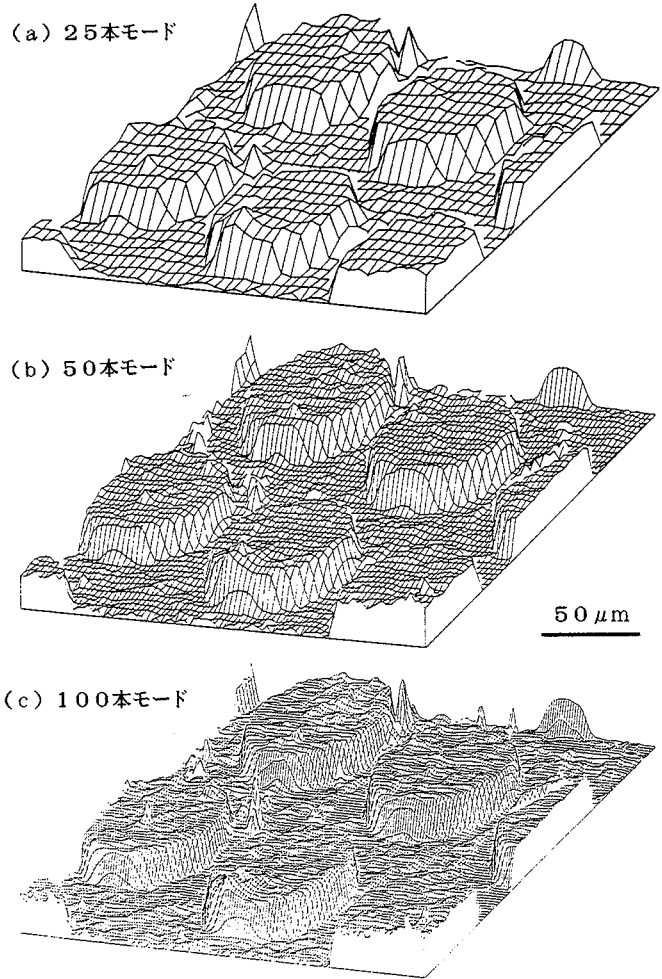


図6. Cu上にAuを蒸着した試料のSEM像の鳥瞰図

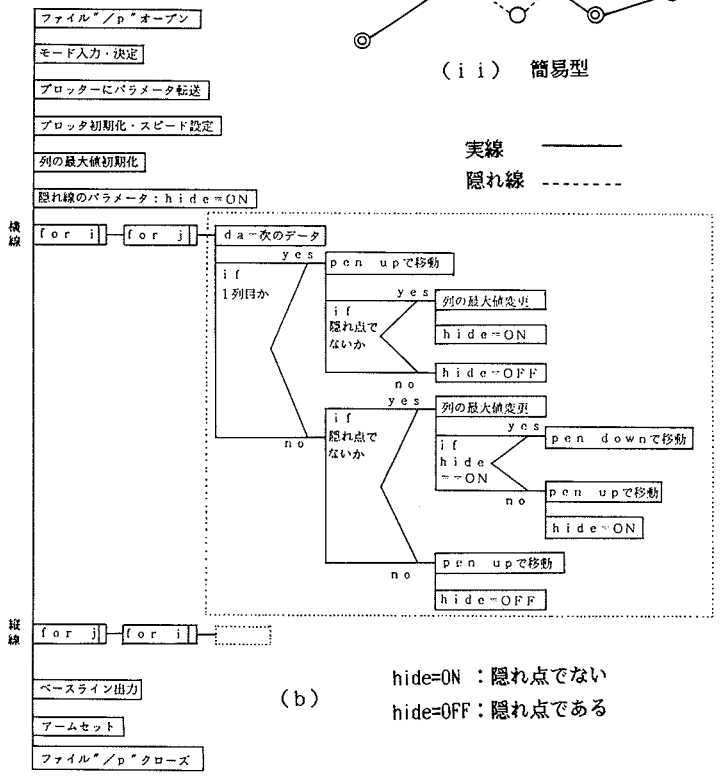
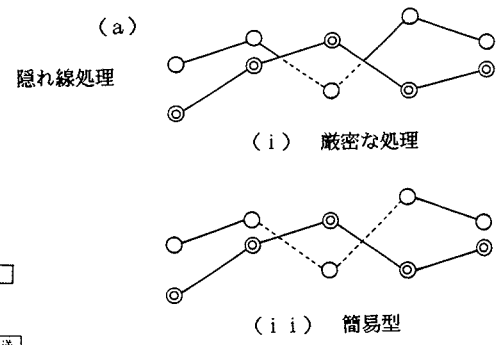


図5. 鳥瞰図作成プログラムのPAD図

画素近傍の各4隅の画素にも上記と同様の2次微分演算を行なったのが同図(f)の(3)の8近傍ラプラシアンフィルター(v_dif3と名づける)である。以上は線形フィルターであるが図4(f)の(4)のように、演算後のAの値として $|A-B|$ と $|A-C|$ の微分(差分)のうち、大きい方を取るという非線形微分フィルター(v_dif4と名づける)をも作成した。これらの各種微分フィルターを使って前項の1)でのICのSEM像をエッジ検出処理したのが、それぞれ、図4の(b)、(c)、(d)、(e)である。図4の(b)~(e)へと進むに従って、そのICパターンのエッジがより鮮明になっているのがわかる。図4の(c)、(d)の両ラプラシアンフィルターでは等方的なエッジ検出が行なわれる。しかし、 2×2 画素近傍を取り扱っている図4(b)と(e)を比べてみると、(b)では、斜め方向成分が強調されやすいが、同図(e)では、x、yいずれの方向でも均等にエッジ検出できコントラストが良好である。

3) 画像の3次元(鳥瞰図)表示プログラム

このプログラムでは、画像の濃淡を線の高低で表現する。手前の線の影になる線は隠れ線として表示しないようにする。隠れ線の処理方法としては、図5(a)の(i)のように隠れ線(破線で表示)を厳密に処理する必要があるが、ここでは、同図(a)の(ii)に示した簡易型を用い、線が交差する点を求める計算を省いた。図5(b)に、3次元(鳥瞰図)表示プログラムの手順を表わすPAD⁹⁾(Problem Analysis Diagram)図を示した。これによって点線枠内で示された隠れ線処理方法を述べる。i番目の横線引きの場合、着目した点が隠れ線になるか否かは各点の縦列j番目毎に最大値を記録しておき、横線の送り幅(バイアス)量 considering 着目点(i, j)と今までの各点(m, j; 但し $m < j$)での最大値(バイアス量を含めた最大値)を比較することにより決定する(PAD図中“隠れ点でないか”の判断の所で)。そしてもし着目点の方が大きければ最大値を更新しておく。このPAD図では、斜めから見た図とするために、縦方向と横方向の2種類の線引きを行なっている。また線引きは、1画面当たりそれぞれ25本、50本および100本の線密度モードが選べる。それぞれの実行例を図6の(a)、(b)及び(c)に示した。もとにした原画像はCu基板上に円孔メッシュ(100メッシュ)をマスクとして蒸着したAuの円形パターン薄膜

からのSAM像である。線密度が大きくなるにつれて円形エッジでの立ち上がりやAu蒸着面の凸凹など微細な形状変化がよくわかる。

5. まとめ

複合型表面分析装置SAM-1000Sに導入されたマイクロコンピュータ画像処理システムのソフトウェアを構成し種々の画像処理プログラムを作成した。それぞれは初期の目的を満足させるものであった。そのうちで本論分では、SEM、SAM画像処理を行なう上でよく用いられると考えられる、コントラスト強調のためのヒストグラムストレッチ法、画像の特徴抽出のためのエッジ検出法、そして3次元表現の1つである鳥瞰図法の各種法について、それぞれその画像処理の効果を示した。これらの各手法によりSEM-SAM画像は画質改善され、画像の認識が大いに容易となった。これからさらに画像処理用ソフトウェアの充実が必要となると考えられる。

参考文献

- 1) 浅原雄二：昭和62年度鳥取大学大学院工学研究科修士論文、1987年
- 2) OS-9/68000 Ver. 2.2 ユーザーズ・マニュアル Rev. F：マイクロウエア・ジャパン 1987年
- 3) OS-9/68000 C COMPILER USER'S MANUAL Rev. G：Microware Systems Corp., 1987
- 4) B. W. カーニハン/D. M. リッチー、石田晴久訳：プログラミング言語C 第2版、共立出版、1989年
- 5) 例えば、田村秀行：コンピュータ画像処理入門、総研出版、1985年
- 6) 川合敏雄：PADプログラミング、岩波書店、1985年

