

走査電子顕微鏡 (SEM) を用いた表面粗さ測定
—デジタル方式による—

Surface Roughness Measurement Using Scanning Electron Microscope
—by Digital Method—

佐藤 壽芳*・大堀 真敬*
Hisayoshi SATO and Masanori OHHORI

1. まえがき

SEMの反射電子画像を構成する信号の強度が面の傾きに比例することにもとづき、これを積分することによって電子ビームが走査した部分の表面粗さ曲線が求められることを明らかにし、SEMに搭載したアナログ積分器を用いてこれを行う方式についてよい結果を得ていた。本速報では、SEMとミニコンピュータを光ファイバで結ぶシステムとし、デジタル方式で検討することを試みた。これによって、画面上で走査線を指定して粗さ曲線が求められること、SEM出力信号の計算機内の多様な処理が容易になること、求められた粗さ曲線の出力に計算機の周辺装置が利用でき、2次元表示をはじめ多様な表示の出力が可能となること、粗さ曲線の校正をより確実におこなえること、信号を処理する際のノイズの影響を効果的に抑制できること、等を明らかにした。

2. 装置の概要

SEMの出力信号をAD変換してミニコンピュータにとりこみ処理できるようにしたシステムのブロック図を図1に示す。システム内の各装置は下記のとおりである。

- * SEM: JSM T-20 (日本電子製)
* 計算機: HP-21MX
ディスク装置: HP-7900A
ディスプレイ: HP-2648B
(以上3点ヒューレットパッカード製)
* X-Yプロッター: V-80 (ヴァーサテック製)
* AD変換器: ADC-149
サンプルホールド: SHM-2
(以上2点ディテル製)
* 信号転送ファイバ: TOML-70 (東芝製)

このシステムはSEMの一画面の中で所要の領域について走査信号をAD変換し、ミニコンピュータ内にとり

こんで演算処理をおこなうことを基本としている。この装置では、データとしてとりこむ走査線の開始位置、何本おきとするか、全体で何本とするか、また走査線内のAD変換開始位置、クロックパルスに対し何個おきとするか、一本の走査線あたりのAD変換数等を指定することができる。指定した結果は図1のモニター回路でCRT上に示すことができ、画面上での箇所をAD変換しているかが容易に確認できる。これはどの箇所を粗さ測定をしているかがわかることであり、従来の測定法にない特徴である。

AD変換は10MHzを基準周波数としている。画像モニターモードの場合走査線一本の走査時間が約2.8msであるから、上記のサンプル周波数にたいし、最大約280点をAD変換できることになるが、実際には、走査線の

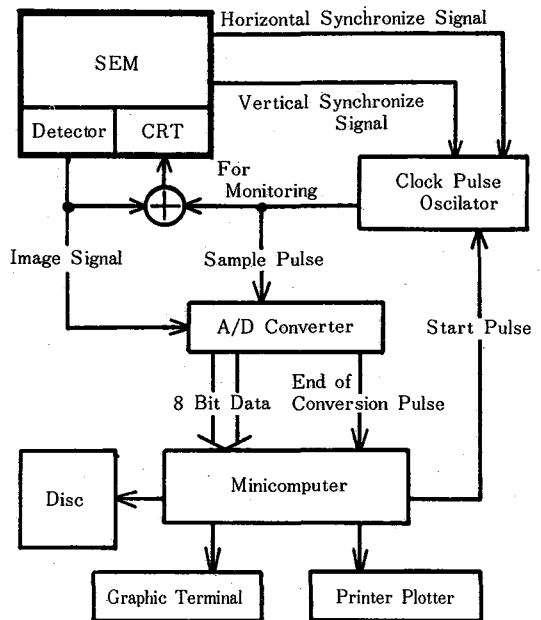


図1 装置のシステムブロック図

* 東京大学生産技術研究所 第2部

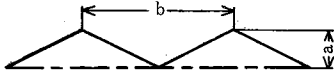


図 2 標準粗さ試験片の断面曲線

表 1 標準粗さ試験片の寸法

単位：[μm]

	a	b
I	11	100
II	1.5	15

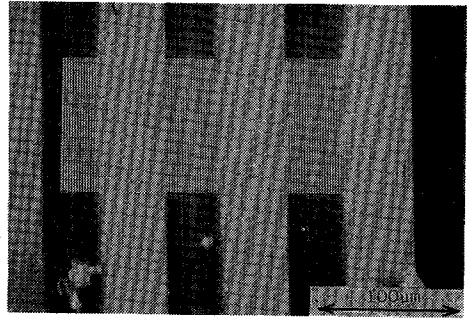


図 3 標準粗さ試験片の反射電子画像 (350 倍)

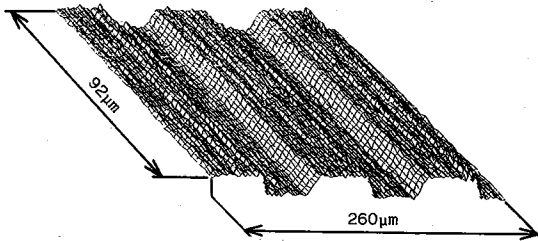


図 4 標準粗さ試験片の反射電子信号の表示

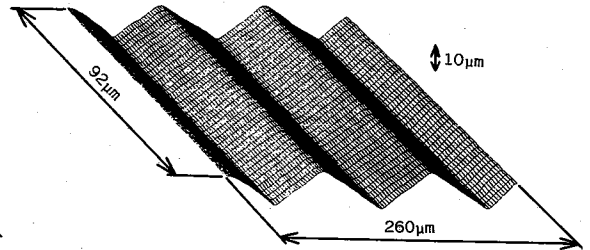


図 5 図 4 を積分してえた表面形状の俯瞰図

長さ一杯にはとらず中間部分で最大 256 点をとれるようにしている。計算機にとりこまれたデータは直ちにディスクに書きこみ記憶されるが、その容量は 10 k 点が限度であり、上記走査線一本のデータにたいして、この容量を限度とする個数までが垂直方向にはとりこめることとなる。

3. 粗さの計測例

まず、断面が図 2、寸法が表 1 で示される三角山形状の標準粗さ試験片を対象に基礎的な検討をおこなった。図 3 は粗さ試験片 I の 350 倍の反射電子画像である。この画像で信号のとりこみは縦 92 μm 、横 260 μm の領域をそれぞれ 38 点、128 点の離散値としておこなった後、俯瞰図として表示したものが図 4 である。図 4 に表示されている信号は、従来の SEM では Y モジュレーションとして CRT 上に走査線に対応して縦並びに表示されるが、デジタル方式ではこのように視覚になじむ立体的な表示とすることができる。

図 4 の波形を走査線方向に積分すると粗さ曲線がえられ、結果は同じく俯瞰図として図 5 のようになる。これも既報では CRT 上に縦ならびで平面的に示されていたが、表面形状そのものを示すものだけに、立体的な表示がより効果的である。反射電子信号から直流分、画面全体にわたる一次の変化分をノイズとして除去した後シン普森法で積分している。アナログ方式の場合、直流分、

一次の変化分は積分を不安定とする性質を有するが、デジタル方式の場合、これらの成分の除去を数値計算で処理することができ、アナログ方式よりも多様な対処が可能となる。

4. ノイズに関する検討

デジタル方式を実際に試みた結果として、反射電子信号には、低倍率にした時に画面の中央部が明るくなることによる低周波数のノイズ、一走査線を注目する時に、回路特性や検出器の特性等によって生ずる高周波数のノイズ等の存在することが明確となった。本速報では、デジタル方式の特徴を生かしたフィルタや平均化の手法により、これらを除去することについて検討した。

4.1 低倍率時の低周波数ノイズについて

まず、一画面内で半波長の成分をもつ低周波数ノイズについて検討をおこなった。図 6 は倍率を 150 倍と低くし、標準粗さ試験片を観察した画像である。画面中央部で明るく、周辺では暗い照度変化となっている。低倍率に顕著な特性であるが、反射電子信号中に一走査線を半波長とするノイズとして現れており、その形状から 2 次関数として近似が可能と考えられる。図 7 は反射電子信号を積分した結果であるが、ノイズを除去する前処理を全くおこなわない同図 (a) の場合、粗さ曲線に図 6 の照度変化に対応したノイズがのっていることが明らかである。一方、2 次関数を最小二乗法によって決め、その分

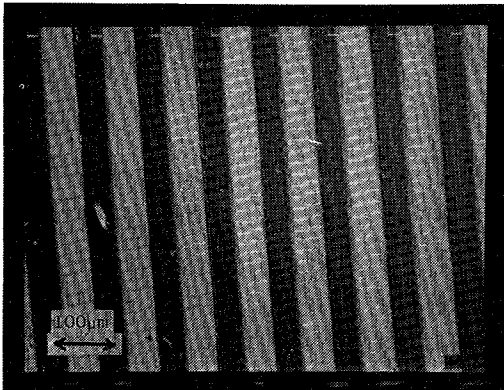


図6 低倍率反射電子画像(150倍)

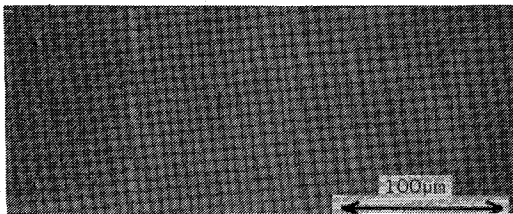


図8 ダイヤモンドバイトにより切削された真ちゅう面の反射電子画像

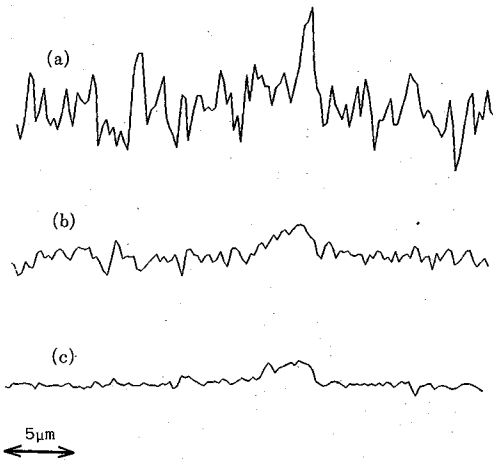


図9 反射電子信号の平均化の効果
 (a) 平均化をしていない場合
 (b) 10回平均をした場合
 (c) 100回平均をした場合

を除去する前処理をおこなった図7(b)には、一応妥当な結果がえられている。アナログ方式では、このようなノイズへの対処もアナログフィルタによらざるをえず、実際問題としては信号とノイズを分離するフィルタの設計が難しかったが、デジタル方式によって対応が可能となった。

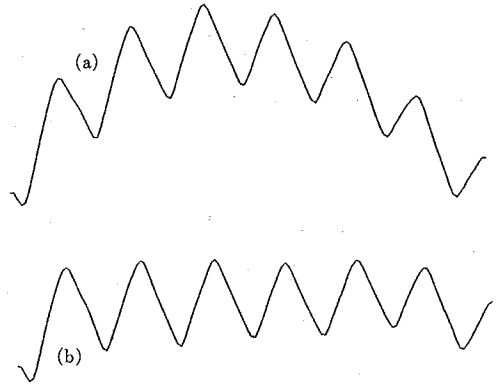


図7 低倍率に対する粗さ曲線
 (a) 前処理なし,
 (b) 2次関数成分除去の処理

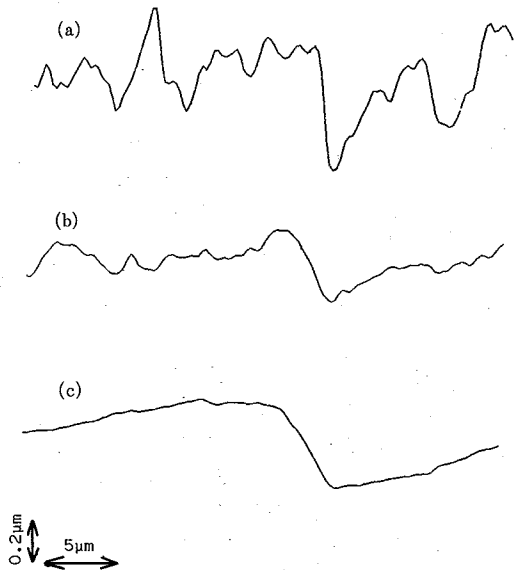


図10 図7の積分による粗さ曲線
 (a) 平均化していない場合
 (b) 10回平均をした場合
 (c) 100回平均をした場合

4.2 高周波数ノイズの平均化処理
 図8はダイヤモンドバイトを用いて切削した真鍮面の反射電子画像である。送りマークの段差で輝度が最大となっており、バイトで削られた部分は平坦で明確な像がえにくくなっている。

図9(a), (b), (c)は同一箇所の走査線の信号につ

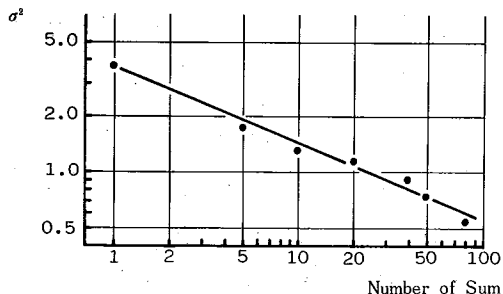


図11 平均化の回数と標準偏差との関係

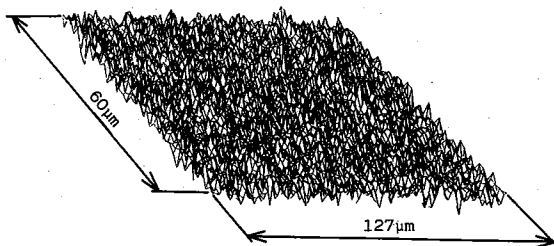
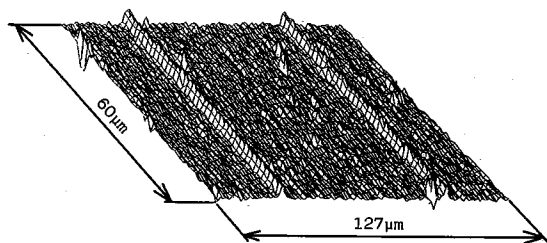
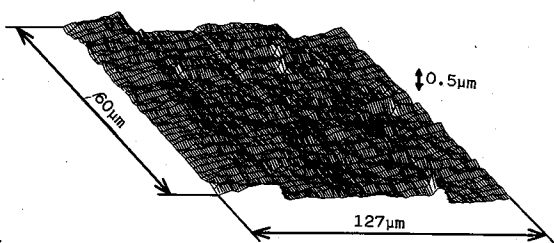


図12 図8の反射電子信号の表示



(a) 図8の50回平均化した反射電子信号



(b) (a)を積分した表面形状

図13

いて、平均化をしていないもの、10回平均したもの、100回平均したものをそれぞれ示している。平均化の回数を多くするにしたがって、ノイズとみられる成分が除去されて、送りマークにあたる段差の信号が明瞭になっている。これに対し一本の走査線のみをAD変換したものでは高周波数成分のノイズが非常に多く、段差との違いが小さくなっている。積分の性質から高周波数成分の影響を小さくできるとしても、これらの結果は平均化の前処理が望ましいことを示している。図10は図9についてそれぞれ粗さ曲線を求めているが、(a)は(c)に比べて精度の悪い結果になっていることが理解される。

図11は平均化の回数とノイズ成分の低減の関係を調べたものである。N回平均化したときのノイズとして $R_N = m_N - m_{100}$ とあらわして、 R_N の標準偏差 σ_N を縦軸に、横軸にNをとって示している。N=10までの間に大きくノイズ成分を低減できている。N=80とすることによってさらにσを小さくしているが、低減の割合と計算時間の増大を考慮し、図10の結果も参考にN=10とする対処の一つの方法としている。アナログ方式ではこのような平均化の処理も困難であったが、デジタル方式では高速でこれをおこない、測定精度を高めうることを示した。

図12は図8について一画面の反射電子信号の俯瞰図表示したものである。送りマークに対応する所で信号の変化の顕著な箇所をみることはできるが、全般にノイズが

多く、前処理の必要が認められる。図13は平均化処理によったものであり、同図(a)は50回の平均をした反射電子信号の俯瞰図、同図(b)はこれを積分した結果である。送りマーク以外の所で周方向にゆらぎが観察されるが、これは平均化処理が各走査線内ごとの平均化で、走査線相互間の処理をしていないことによるとみられ、実際の形状との関連、走査線相互間のノイズ処理法等については、今後の検討が必要である。

5. おわりに

SEMを用いて表面粗さを測定する方法について、その出力をデジタル化し、ミニコンピュータにとりこんで処理する方式について検討した。これによって、画像上の位置を固定して粗さ曲線を求めうること、表面形状を立体視できる俯瞰表示とすること、ノイズの処理が容易になること等に特徴を有することを明らかにした。

有益な討議をいただいた谷泰弘助教授、論文とりまとめに助力をえた鈴木美佐子事務官、尾高宏昭技官に感謝する。本研究は一部技研56460074によっておこなわれたことを記し、関係各位に感謝する。

(1983年11月22日受理)

参考文献

- 1) 佐藤, 大堀: 機論, 49-438, C(昭58), 227