

電子線を用いた表面形状評価技術

田口 佳男*, 小俣 有紀子*

*㈸エリオニクス(〒192-0063 東京都八王子市元横山町 3-7-6)

The Surface Analysis to Evaluate Its Profile by Electron Beam

Yoshio TAGUCHI* and Yukiko OMATA*

*Elionix Inc.(3-7-6, Motoyokoyama-cho, Hachioji-shi, Tokyo 192-0063)

Keywords : SEM, Secondary Electron Detector, Tilt Angle Effect, Emphasized Fopographical Image

1. はじめに

MEMS 技術やナノテクノロジーのめざましい進歩によって生み出されるさまざまな高機能材料や高付加価値製品、そのほとんどは表面に特殊な処理を施し新たな機能を持たせている。とりわけ表面の凹凸形状そのものが重要な役割を担っているケースが多く、その表面は最新のマイクロ・ナノ加工技術によって微細かつ高精度に仕上げられている。

一方、加工とは対象分野である計測分野においても、これら高機能表面を評価し、品質を管理し、あるいは更なる開発促進の手掛かりとするための表面測定、分析技術も日々進歩している。そのなかでも対象表面の微細な形態や形状を「見たい」、また定量的に把握したいという要請は最も基本的かつ差し迫ったものではないだろうか。

SEM(走査電子顕微鏡)の実用化は、人間が光の波長による分解能の限界を克服することを可能にした。高分解能で焦

点深度の深い SEM 像は、無機材料、有機材料、生物試料などの、それまでは「見る」ことのできなかった形態を見せてくれる。SEM は科学技術の進歩に計り知れない貢献をしてきたと言える。

SEM を用いて定量的に試料表面の凹凸形状を求める手法は、立体航空測量を応用したステレオ法があるが、1985 年に本測定法の起源とも言える SEM に 2 個の二次電子検出器 (A と B) を設置し、その差信号(A-B)から試料表面の X-Z の 2 次元凹凸プロファイルを求める手法¹⁾が実用化された。当時、アナログレコードから CD への転換期であり、CD の開発においてピット形状の測定に本測定法は大いに貢献した。その後、さらに二次電子検出器を 2 個追加して 4 ch とし三次元定量測定が可能になり現在に至る。

本稿では、電子線を用いた表面のセンシング手法について、何がどのように「見える」か、また「測定できる」か、その特徴と幅広い応用の可能性について述べる。

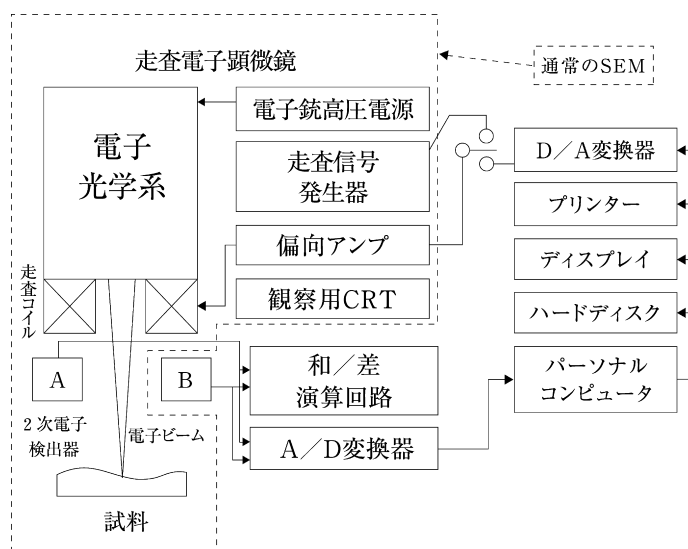


図1 2個の二次電子検出器を設置したSEMの構成

2. SEM による表面形状の定量化

通常、SEM 画像の明暗コントラストは、試料表面の凹凸形状に起因し、二次電子検出器に捕捉された二次電子の量に対応している。これは、傾斜角効果と呼ばれ、電子ビームが入射する方向と試料表面とのなす角度によって二次電子の発生量に変化し、これが平行に近くなるほど二次電子の発生量が増加する。本センシング手法は、二次電子の発生量が試料表面の傾斜角度に依存し、0°~75°付近の間で単調に増加することを応用したものである。

2.1 装置の構成と測定原理

図1は、試料表面の凹凸プロファイルが得られる二次電子検出器を2個設置したSEMの構成であり、基本的には通常のSEMとほぼ同じである。2個の二次電子検出器AおよびBは入射電子ビームに対して対称に、ビームの走査方向に設置されている。

実際の測定では、電子ビーム入射点において発生する二次電子は、入射点の傾斜に応じてAおよびB検出器で同時に分配検出される。その後、検出器AおよびBの出力信号量は、12ビットのA/D変換機を経てPCに記憶される。

ここで試料表面の電子ビーム入射点における勾配は次の近似式で表すことができる。

$$\tan\theta = k \frac{A^2 - B^2}{(A_n + B_n)^2} \dots\dots\dots(1)$$

θ : ビーム照射点の試料傾斜角

k : 定数

A, B : 二次電子検出器の出力

A_n, B_n : 試料が水平な時の二次電子検出器の出力

図2は、検証に用いた真球度に優れる $\phi 7 \mu\text{m}$ ラテックス粒子(ポリスチレン製)の断面プロファイルデータである。

また、図3は、データより計算で求めた傾きと実際の傾きとの対比グラフである。電子ビーム入射が前提であるため、粒子下部のオーバーハング形状は得られていないが、傾斜角度では $\theta < 75^\circ$ の範囲でよく一致していることがわかる。

前述の近似式は実験から求めたもので、信号AとBの差分をとることで、試料表面の組成の影響を相殺し、また、 $(A_n + B_n)^2$ で割ることで式(1)は入射電子の強度に対するキャリブレーションにもなっている。さらに、次式(2)に

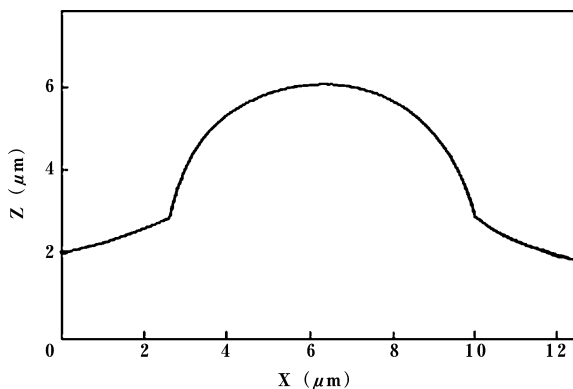


図2 $\phi 7 \mu\text{m}$ ラテックス粒子の断面プロファイル

よってX-Z方向の断面プロファイルが得られる。

$$\Delta Z = \sum_{i=1}^n \Delta X_i \cdot \tan\theta_i \dots\dots\dots(2)$$

ΔZ : 高さ, ΔX_i : サンプリング間隔

一度のスキャンで、走査ライン上の測定点を十分多数等間隔にとり、傾斜を積分することで断面プロファイルを得る。

実機では、二次電子検出器を4個設置しており、ビームの走査方向だけでなく、それに直交する方向の傾斜角度も測定することができる。4個の検出器A~Dは電子光学軸に対して対角に配置され、走査方向の傾斜角は(A+C)-(B+D)の組み合わせ、また、それに直交する方向の傾斜角は(A+B)-(C+D)の組み合わせによりそれぞれ計算される。すなわち、試料表面の特定エリアに対し、電子線をマトリクス状にデジタル走査しながら各ポイントで発生した二次電子を同時に4個の検出器で分配検出を行い、前述の計算により三次元凹凸形状の再構築を行っている。図4に、エリオニクス社製 TFE 電子銃搭載の電子線三次元粗さ解析装置(ERA-8900FE型)の外観を示す。

また、図5は、真球度に優れる $\phi 2 \mu\text{m}$ ラテックス粒子の三次元測定例である。

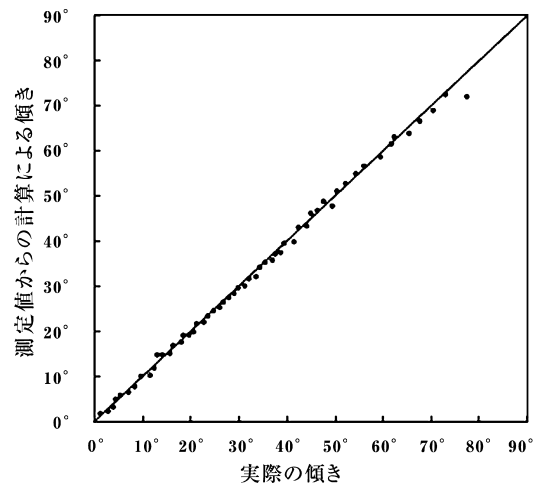


図3 測定値から計算で求めた傾きと実際の傾き

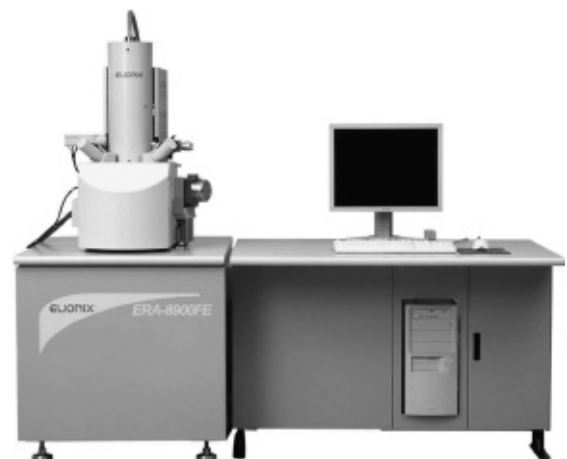


図4 電子線三次元粗さ解析装置 (ERA-8900 FE 型)

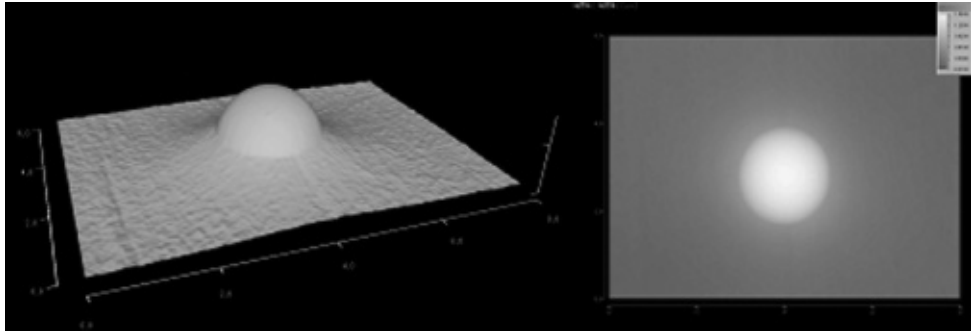


図5 $\phi 2 \mu\text{m}$ ラテックス粒子の三次元測定例

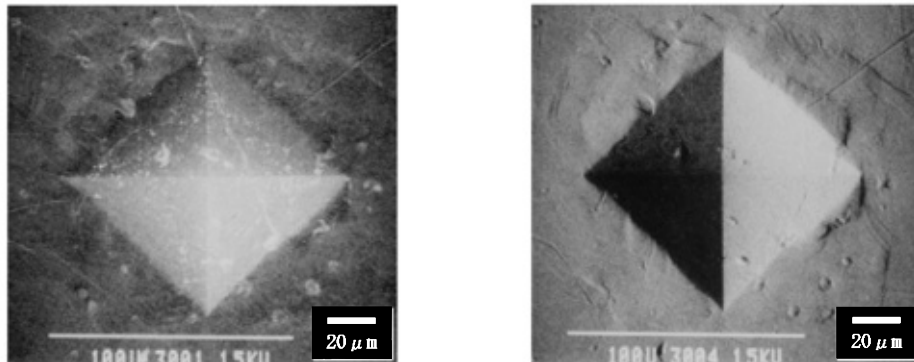


図6 通常のSEM画像(左)とSEM凹凸画像(右)

2. 2 凹凸SEMの特徴と注意点

2. 2. 1 主な特徴

- 1) 焦点深度の深いSEM画像を観察しながら測定箇所を探査が容易にできる。また、複数の二次電子検出器の差信号画像により凹凸形状が定性的に即座に判断できる。図6は、ビッカース硬度計による圧痕(窪み形状)のSEM画像である。左は通常のSEM画像であり、凹凸感が曖昧であるのに対し、右の差信号画像(SEM凹凸画像)では、左方向からの強い照明効果による陰影コントラストによって定性的に窪み形状であることが判断できる。
- 2) 他の測定法と比べて横方向分解能が高い。一般に微細形状測定では縦方向のみが強調されがちであるが、横方向の分解能も非常に大きな意味を持つ。本方式では、横方向分解能は1.2nm(TFE電子銃)、縦方向分解能1nmである。
- 3) 測定レンジが横方向、縦方向ともに広い。測定エリアはサブミクロン角から数ミリ角、凹凸レンジでは、ナノメートルから数十ミクロンである。
- 4) 試料表面の傾斜角では、 $0 \sim 75^\circ$ の範囲で測定可能である。
- 5) 機械的には非接触方式であり、試料表面に傷をつけない。通常5kV以下の低加速電圧で測定し(Wヘアーピン電子銃では、10kV以下)、照射電流は 10^{-12} Aオーダーである。ただし、試料が絶縁物の場合、金、タングステンなどによる導電コーティング処理が必要である。
- 6) 測定試料の組成の影響は受けない。
- 7) 試料は固定し、機械要素は使用せず、電子ビームをデジ

タル走査することで測定点を移動させるため位置精度が高い。

- 8) PC制御により測定時間が短く、特別な操作技術を必要としない。

2. 2. 2 注意点

- 1) $\pm 75^\circ$ を超える急傾斜部、オーバーハング部などでは正しく測定されない。
- 2) 本測定法では、試料水平面に対して電子ビームが垂直に入射することを前提としているが、測定エリアが $500 \mu\text{m}^2$ を超えるような広領域測定では、振り子状のビーム走査を行っているため、測定端部ではこれを満足しない。その結果として測定データのベースラインが凸型に湾曲する。但し、スプライン関数を用いた低周波除去フィルターを用いることで補正が可能になり、処理後の実形状変化もほとんど見られない。
- 3) 表面のチャージアップ(帯電)の影響が測定結果に反映されることがあり、その場合には、十分な導電処理を行うなどの配慮が必要である。

2. 3 装置の校正

2. 3. 1 校正用標準試料と校正方法

我々が校正に用いているのは、米国の国立研究機関であるNIST(米国標準技術研究所)にトレーサブルなVLSIスタンダード社(米国)の触針式、光学式表面粗さ測定機を対象としたSHS薄膜段差スタンダード²⁾という標準試料である。これは表面形状検査装置の校正用標準試料として市販されており、シリコン基板上の酸化膜表面に高精度なエッチングに

よって段差が形成されている。図7に標準試料のSEM凹凸画像を示す。

なお、段差の大きさは目的に応じて多数用意されており、我々は測定可能なレンジ内で4水準の標準試料を入手し校正に用いている。



図7 標準試料のSEM凹凸像

図8に、保証値14.9nmのスタンダード試料を凹凸SEMで測定したSEM凹凸画像とプロファイルデータを示す。

2. 3. 2 校正の頻度

本測定法では、通常、二次電子検出系のハードウェアに異常がなければ、測定毎に校正作業などを行う必要はないが、管理上定期的に行うことが望ましい。

3. 測定例

3. 1 微小領域測定例

図9は、4種のめっき条件の異なるクロムめっき表面をSEM倍率5万倍の微小領域(2.4×1.8μm²)において測定を行なった例である。本測定法の特徴である電子ビーム径相当の優れた横方向分解能によりナノオーダーの粗さの違いが明確に現れている。

3. 2 広領域測定例

図10および図11は、独自のスティッチング手法を用い、圧延鋼板表面の広領域測定を行った例である。1回の測定でSEM倍率100倍の領域(1.2×0.9mm²)を設定し、隣接する3×3=9箇所について、接合部のデータオーバーラップ領域20%を設け連続的にステージを移動し測定したものであ

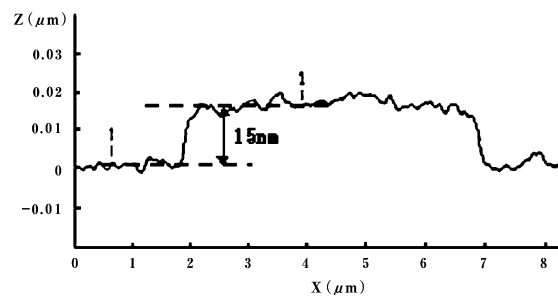
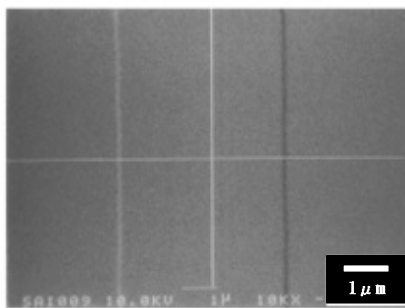


図8 標準試料の凹凸像(左)とそのプロファイル(右)

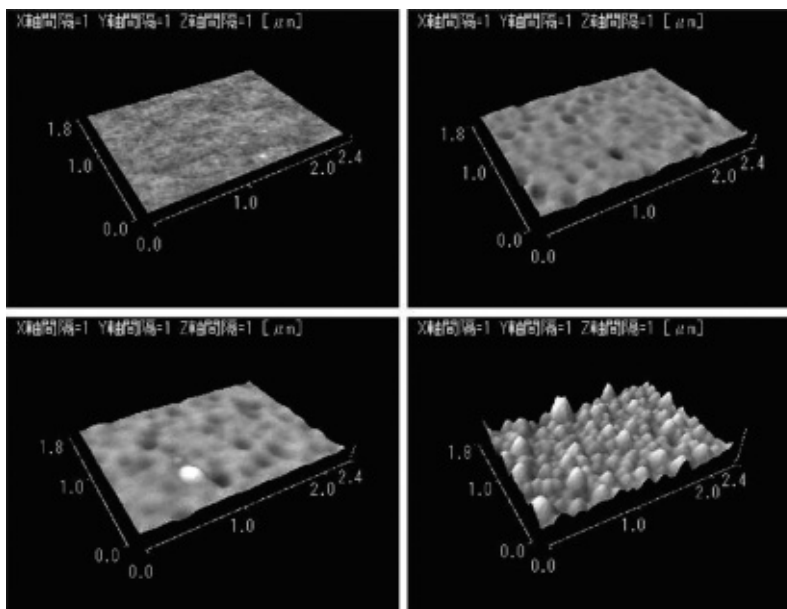


図9 4種のめっき条件の違いによる粗さ比較

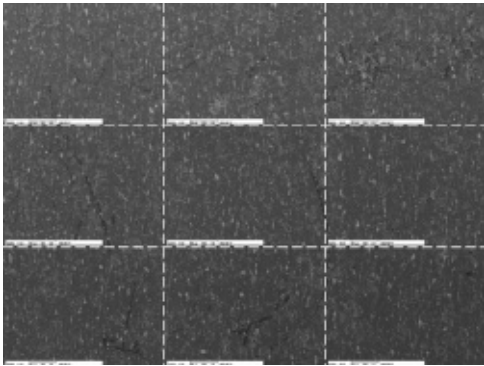


図 10 圧延鋼板表面の広領域測定結果

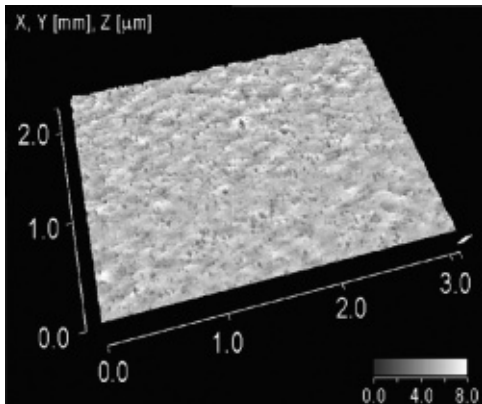


図 11 圧延鋼板表面の広領域測定結果

る。データ取得後、それぞれのデータのオーバーラップ領域について低周波成分を除去した後、データの接合を専用ソフト上でやっている。

4. 今後の課題

PC の性能が日々進歩している中で、本装置を含め市販の表面粗さ測定機では、測定データを高速に処理し、あざやかな三次元 CG 表示や多種多様な粗さ評価パラメータの算出が瞬時に行える。ややもするとデータの洪水の感さえある。計測の現場においては、使用する測定機の原理・原則、特徴を把握しておき、得られたデータの信頼性を見極める努力が必要になってくる。しかし、粗さ評価パラメータは同じであっても、異なる原理の測定機から得られた情報を比較することは難しいのが現状である。ユーザーの立場で考えるとこれは非常に不都合である。データの客観性という意味でも、対象表面を評価するのにふさわしいキャラクターゼーション、評価方法³⁾が必要である。本装置のリファインとともに、誰が、いつ、どこで評価しても差が生じない条件の提示が課題と考える。

(2006-6-15 受理)

文 献

- 1) Tadao Suganuma ; *J. Electron Microsc.*, 34, (4), 328 (1985)
- 2) SHS 薄膜段差スタンダード (VLSI スタンダード社) 製品カタログ
- 3) 柳, 小林, 田口 ; *トライボロジスト*, 3, (2), 98 (1994)