

走査電子顕微鏡 (SEM) による表面形状測定

—法線検出法による—

Measurement of Surface Shape by Scanning Electron Microscope Using Detection of Normal Direction

佐藤 壽 芳*・大堀 真 敬*

Hisayoshi SATO and Masanori O-HORI

1. ま え が き

光学的方法に比して容易に測定精度をあげやすい粗さ測定法として、走査電子顕微鏡を用いた表面粗さ測定法について研究をすすめてきた¹⁾²⁾。これまでの方法は、反射電子信号の強度が面の傾斜に比例することにもとづき、走査線方向に積分することによって粗さ曲線を求めるものであった。これによれば、比較的簡単かつ迅速に粗さ曲線が求められた反面、面が任意の方向をむき、傾斜が走査線方向のみでない試料にたいしては、十分対処できないことに難があった。このような場合については、反射電子画像の検出素子を4個とし、表面の任意の方向の傾斜に対する反射電子信号の強度の関係を較正し、それによって表面形状の断面曲線を求める解析が材料の疲労破面の解析の観点からすすめられている³⁾。しかし、これも著者らがおこなってきた面形状全面にこれを適用すること等については、その後の進展をみていない。

本研究では、試料と並べて標準小球をおき、試料の輝度と等しい球の輝度の位置から、球の法線方向を求め、これをもって試料の法線方向としたのち、この法線に関する情報から表面形状を求める方法を提案した。これによって、従来の方法では対処が難しかった、傾斜が急な面、あるいは、緩い面についても、標準球の傾斜との比較によって面形状を求めることを可能にした。さらにこの方法をヴィッカース硬さ試験の圧痕の形状測定に適用し、よい結果をえた。以下ではこれについて簡単に報告する。

2. 装置の構成

装置の構成は基本的に既報²⁾と同様であり、その概要を図1に示す。パーソナルコンピュータ (NEC 製, PC9801-F2) を新たに付しているが、これは、データの計算機内への取りこみは速度に優れた在来ミニコンピュータに委ね、画像の処理表示についてはパーソナルコンピュータの特徴を生かすことを意図している。また実

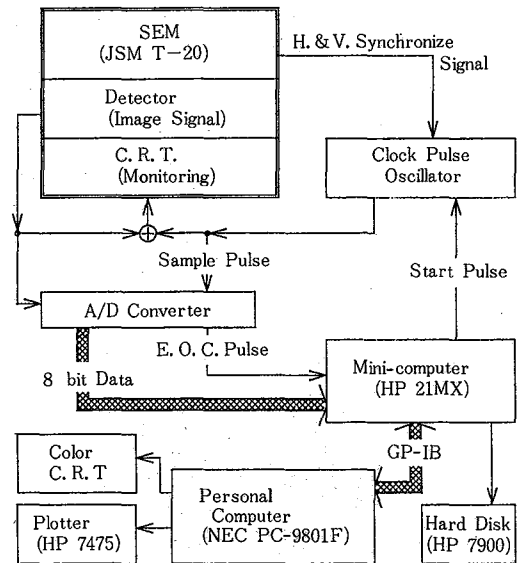


図1 装置の構成

用的な見地からはパーソナルコンピュータが付設されることが望ましいことも考慮している。

反射電子の検出素子は菊川らの研究³⁾と同様4個を備え、視差によって傾斜面の輝度が変わることを、十分広い範囲の傾斜面に対応できるようにしている。小球は(株)モリテックス製の鋼球で、直径50~100 μm の球が混在している中から適切な大きさのものを選択して用いている。

3. 標準球の反射電子画像と濃淡像

図2は直径約50 μm の反射電子画像である。図3は4個の検出素子の内1個によってこの反射電子信号を検出し、図の縦横を64×64点でAD変換してとりこんだのち、1点について8×8階調で表示している。他の3検出素子によっても同様な画像が求められるが、それぞれ検

* 東京大学生産技術研究所 第2部

研 究 速 報

出素子側が明部に対応した濃淡階調の図がえられる。濃淡階調、輝度に対応して法線方向を求めるためには、球の輪郭を円として認識することが必要である。このため図3の濃淡像から等高線を描き、その最外縁をもって輪郭としてこれに2次曲線を適合し、その頂点をもって半径の一端とした。これを4枚の画像についてすすめることから円上のさしわたし4点が求まり、円の方程式を求めることが可能となる。

4. 試料の法線方向の測定

図4は、以上によって求められた球の輝度のデータを標準として、試料の反射電子信号から法線方向を求める説明図である。試料上の点 P に注目するとその輝度ベクトル L_p は、4個の検出素子によってえられる輝度 p_i ($i=1, \dots, 4$) を用いて、

$$L_p = \{p_1, p_2, p_3, p_4\} \quad (1)$$

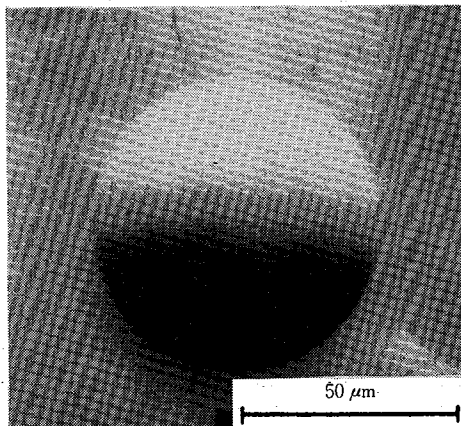


図2 球の反射電子画像

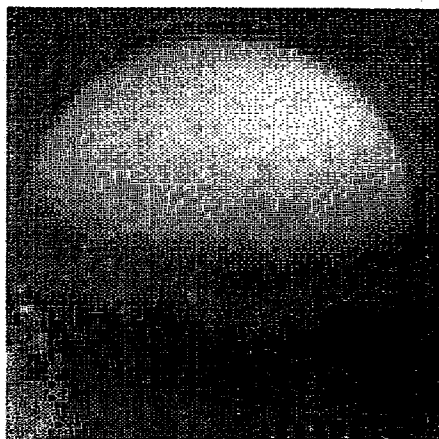


図3 1個の検出素子による反射電子濃淡画像

と表すことができる。一方、球上の点 P' について、輝度ベクトル $L_{p'}$ は同様に

$$L_{p'} = \{p'_1, p'_2, p'_3, p'_4\} \quad (2)$$

と書ける。いま

$$L_{p'} = L_p \quad (3)$$

とできる P' が見い出せれば、 P' における単位法線ベクトル $N_{p'}$ をもって P における単位法線ベクトルとすることができる。この過程は、

$$\varepsilon = |L_{p'} - L_p|^2 \leq \sum_{i=1}^4 (p'_i - p_i)^2 \quad (4)$$

なる ε を考え、これを最小とする P' を探索することによってすすめることができる。現在のところかなり広い範囲のデータをそのまま用い、(4)を演算することによって、これを満足する P' を求めている。

図6は図5に示すヴィッカース硬さ試験圧痕の反射電子像から、上述の方法によって求めた法線方向を、規準長さを定めて平面上へ投影した図である。四角錐の押しこみによって形成された圧痕の法線方向が、よく表現されている。反射電子信号の強さが面の傾斜と比例しなく

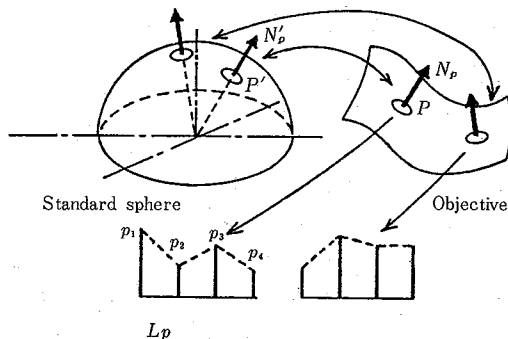


図4 試料の法線方向を求める概念図

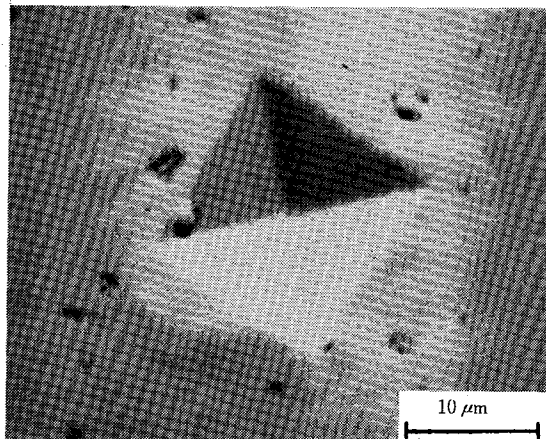


図5 ヴィッカース硬さ試験圧痕の反射電子画像

なる傾斜が急な場合、あるいは緩い場合、また面が任意の方向を向いている場合には、従来の方法では対処しえなかった。精度の問題は課題としても、標準球の輝度を介して法線方向を求める本方法によって、このような場合についても、面形状のより正確な情報をうることが可能となった。

5. 法線情報をもとにした面形状の構成

法線情報をもとに面形状を構成することについては、わが国では池内⁵⁾⁶⁾によっておこなわれている。しかし、これらの研究では、面形状構成の方法の詳細が明確でないこと、本研究の意図としては、面形状の測定精度に関心があること等から、構成の方法を明らかにしておく必要もあって、以下にその概要を示す。

基本的な面の構成は、まず 3×3 点、9 個のデータを用いることとし、面を表す関数形とし、

$$f(x,y) = a_1 + a_2x + a_3x^2 + a_4x^3 + a_5y + a_6xy + a_7x^2y + a_8y^2 + a_9xy^2 + a_{10}y^3 \quad (5)$$

なる関係を用いることとした。 x, y, z 直交座標系における法線方向余弦を l, m, n とすると、一般に

$$\partial f / \partial x = -l/n, \quad \partial f / \partial y = -m/n \quad (6)$$

で与えられる。したがって、(5) で表される面に対して、計測された法線情報をもとに、(6) を介して係数をきめる演算をおこない、(5) を求めることが可能となる。この過程は、

$$\varepsilon = \sum_{x=-1}^1 \sum_{y=-1}^1 \left[\left\{ \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right) - \left(-\frac{l}{n} \right)_0 \right\}^2 + \left\{ \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right) - \left(-\frac{m}{n} \right)_0 \right\}^2 \right] \quad (7)$$

とし、これが $a_i (i=2, \dots, 10)$ に対して最小になる条件として

$$\partial \varepsilon / \partial a_i = 0 \quad (i=2, \dots, 10) \quad (8)$$

を満たす 9 元連立一次方程式を解くことにより、 a_i が求

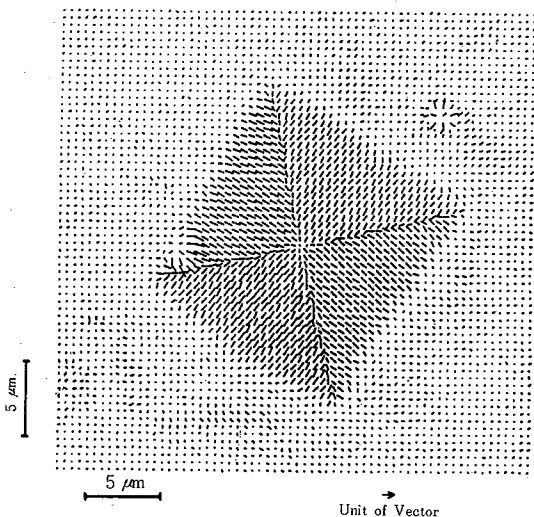


図 6 図 5 に対して求められた法線方向表示

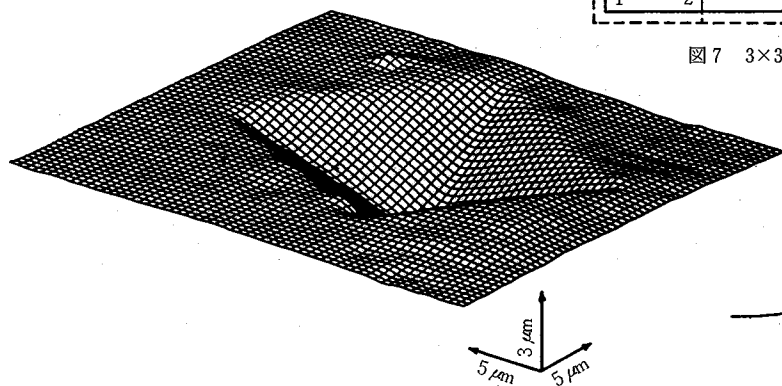


図 8 ヴィッカース硬さ試験圧痕の形状

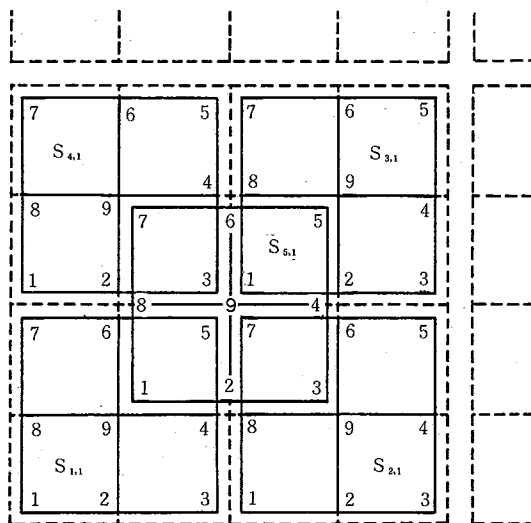


図 7 3×3 点の面からの 5×5 点の面の構成



図 9 圧痕の対面の断面曲線

研 究 速 報

められる。ここで $\left(-\frac{l}{n}\right)_0, \left(-\frac{m}{n}\right)_0$ は、各座標に対し測定された法線情報から導かれる偏微係数の値を意味している。

こうしてえられる 3×3 点の面 5 枚も図 7 の配置で求め、相互に接する点については平均化して 5×5 点の面に次に求めている。さらに 5×5 点の面の端点を共有する 5×5 点の面を隣接して構成し、共有する 5 点における相互の変位が最小になるように、最小二乗法で面の位置を (5) の α_0 で調整し、隣接する面の接合をおこなっている。

図 8 はこの方法によって図 6 から求められたヴィッカース硬さ試験圧痕の形状である。平均化や最小二乗法をおこなわない単純な面形状構成の方法に比べ、平滑なよい結果がえられている。図 9 は圧痕の頂点を通る対面の断面曲線である。これから求められた対面角は 132° であり、規定されている圧子の対面角 136° より小さいという問題は残している。しかし、圧痕の端部で約 $1 \mu\text{m}$ の盛り上がりを検出していることは、測定法として、また硬さ試験の解析の視点として興味深いと言える。

6. ま と め

以上の結果は次のようにまとめられる。

- 1) 4 個の反射電子画像検出素子を用い、対象試料の輝

度を標準球の輝度と比較することによって、標準に対応する法線方向を求めるようにした。これによって、傾斜の緩急を問わず、任意の方向に傾斜をもつ試料面の法線方向を求めることを可能とした。また法線方向の情報から面形状を構成する方法についても明らかにした。

- 2) ヴィッカース硬さ試験の圧痕を対象としてこの方法を適用し、形状の表示、対面の断面曲線、圧痕周辺の盛り上がり等の点でよい結果をえた。

(1985 年 9 月 5 日受理)

参 考 文 献

- 1) 佐藤, 大堀: 走査電子顕微鏡 (SEM) による表面粗さ測定の研究, 機論 C, 49-438, 昭 58-2, 227-233
- 2) 佐藤, 大堀: 走査電子顕微鏡 (SEM) による表面粗さ測定の研究 (デジタル方式による), 機論 C, 51-469, 昭 60-9, 2381~2388
- 3) 菊川, 城野, 安井, 安達, 稲田: 走査電子顕微鏡による疲労損傷についてのミクロな定量的測定, 材料, 23-252, 昭 49-9, 708-715
- 4) 池内: 反射率地図に基づき, 二次元濃淡画像より三次元形状を構成する二手法, 電子通信学会論文誌, Vol. J-65D, No. 7, 昭 57-7, 842-849
- 5) 池内: 被写体表面上の小図形の幾何学的ひずみから三次元形状を構成する一手法, 電子通信学会論文誌 Vol. J-65D, No. 7, 昭 57-7, 850-857

