画像解析による砥石作業面の評価 (第1報)*

—砥粒および切れ刃摩耗面分布のポストプロセス測定—

細川 晃** 安井平司** 鐘尾幸久*** 佐藤 郁†

Characterization of the Grinding Wheel Surface by Means of Image Processing (1st Report)
— Post-process Measurement of Abrasive Grain and Cutting-Edge Distribution on the Wheel Surface —

Akira HOSOKAWA, Heiji YASUI, Yukihiisa KANAO and Kaoru SATO

The working surface of a grinding wheel is characterized by means of an image processing, in which a picture of a wheel surface is taken by the CCD camera through the optical microscope on the grinding machine and analyzed with the personal computer. In this study, surface distributions of abrasive grains and wear-flat area of cutting edges on the wheel surface — the static number of abrasive grains G and cutting edges C per unit area, the successive cutting-edge spacing λ and the cutting-edge ratio η — are measured as a first step. Abrasive grains and wear-flat areas can be extracted mainly by the hue and the brilliance informations of the picture, respectively for resin bond diamond wheel (SDC 140 N 75 B) with relatively high accuracy. Overall processing time required for measuring these parameters is about 150 seconds per picture. The value of G is distributed in the range of 20 to 25 mm^{-2} in the circumferential wheel direction. The mean value of η is about 3.1% even in the initial stage after the truing and dressing. Those values do not change very much with grinding of normally sintered Si_3N_4 at a certain grinding condition because that few grains are fractured or fallen off.

Key words: image processing, diamond wheel, wheel topography, abrasive grain, wear-flat area, cutting-edge spacing, cutting-edge ratio, silicon nitride

1. 緒 言

砥石作業面上の切れ刃の分布や形状、すなわち砥石表面トポグラフィの測定と定量化は形直し・目直し過程や研削機構の解明において極めて重要な作業である。このため、これまで多くの研究者によって種々の方法が考案され、行われている。

最も基本的な方法は顕微鏡による砥石表面の直接観察であろう^{1)~3)}。この方法は切れ刃の微視的形状が視覚的に得られ最も正確であるが、切れ刃密度や逃げ面摩耗面積などを求めるには写真撮影など多大の労力と時間を要する。これに対し、最も汎用的な手法としては2次元的な砥石断面プロフィールを測定する触針法⁴⁾⁵⁾があり、砥石深さ方向の切れ刃分布や突出し量などが容易に求められる。しかし、砥粒と結合剤の正確な分離が難しく、測定時間が長いなどの難点を持っている。砥粒逃げ面摩耗面を測定対象にしたものでは、回転している砥石表面からの反射光を光電素子で受光し、光電パルスやスペクトルパターンの解析などから切れ刃摩耗面積や連続切れ刃間隔などを求める光電走査法^{6)~10)}がある。この方法は砥石作業面をインプロセスで測定できる特長があるが、照射光のスポット径や反射強度の確保などの制限より、粒度数十メッシュ程度の比較的粒径の大きい在来砥石を測定対象としたものが多く、微粒砥石への適用は難しい。その他、熱電インパルス法¹¹⁾、レーザーブレード法¹²⁾、クラスタ状砥石片を測定する方法¹³⁾、研削条痕を測定する転削法¹⁴⁾などがあるが、いずれも煩雑で特別の操作が必要であり、一般の研削作業へは簡単に適用できない。

このように、砥石表面トポグラフィの測定法は数多くあり、それぞれ相応の実績があるものの、実際の研削作業へ容易に適

用できるものは少ない。特に砥石作業面上の砥粒や切れ刃の表面分布の測定とその消長の観察が可能なものは見あたらない。

そこで本研究では、砥石作業面を顕微鏡を介して CCD カメラで撮影し、その映像データに種々の画像処理を行うことにより、砥石作業面上の砥粒および切れ刃の表面分布をポストプロセスで測定・評価する手法を考案し、その手法の有効性について検討している。本報では、その第一段階として、レジンボンダイダイヤモンド砥石を測定対象として、砥粒密度、切れ刃密度、連続切れ刃間隔および切れ刃面積率を求める処理を行った。

2. 画像処理システム

2.1 画像計測システムの構成

画像計測システムの構成を図1に示す。研削盤砥石ヘッドに装着した光学顕微鏡で観測した砥石作業面を CCD カメラで撮影する。カメラからの出力ビデオ信号は A/D 変換ボードによってデジタル化され、パーソナルコンピュータのフレームメモリーに取り込んで種々の画像処理を行う。画像データは、横 640 画素、縦 400 画素、1 画素あたり R, G, B (赤, 緑, 青) それぞれ 8 ビットの階調を持つフルカラー画像である。こ

Fig. 1 Image processing system

* 原稿受付 平成 8 年 1 月 29 日

** 正 会 員 熊本大学工学部 (熊本市黒髪 2-39-1)

*** 学生会員 熊本大学大学院 (現, 三井松島産業(株)ニューガラス開発研究所; 福岡市博多区山王 1-2-30)

† 正 会 員 九州松下電器(株)材料部品研究所 (熊本県玉名郡菊水町高野 1080)

Fig. 2 Appearance of the optical device

で、カラー画像を用いるのは、後述するように、モノクロ画像の濃度成分だけでは砥粒や摩耗面を正確に抽出することが難しいためである。図2に装置の外観を示すが、本システムは光学顕微鏡とCCDカメラおよびパーソナルコンピュータからなる比較的簡単な構成であり、顕微鏡の対物レンズの倍率を変えることによって広範囲の粒度の砥石に適用できる。また、砥石カバーをすればこれらを装着したまま目直し・形直しおよび研削作業が可能で、ポストプロセスで砥石作業面が測定・評価できる。

なお、図1に示すように、砥石軸には砥石駆動用モータとは別にエンコーダ内蔵型サーボモータ（分解能：0.01°）を直結しており、パソコン指令による砥石の正確な回転速度制御と位置決め（精度：2 μm）が可能になっている。これより、研削過程における同一砥石作業面の変化を調べることができる。

2.2 砥石作業面評価パラメータ

図3は顕微鏡で撮影した砥石作業面を模式的に示したものである。本研究ではこのような入力画像をもとに、算出する砥石作業面の評価パラメータとして以下のような4つの特性値を選定した。

- (1) 砥粒密度 $G = n_g / A \text{ (mm}^{-2}\text{)}$
(平均砥粒間隔 $w = \sqrt{G} \text{ (mm)}$)
- (2) 切れ刃密度 $C = n_c / A \text{ (mm}^{-2}\text{)}$
- (3) 連続切れ刃間隔 $\lambda \text{ (mm)}$
- (4) 切れ刃面積率 $\eta = \sum S_i / A \text{ (%)}$

ここに A は観測面積、 S_i ($i=1 \sim n_c$) は切れ刃摩耗面積、 n_g 、 n_c はそれぞれ観測面内の砥粒および切れ刃の数である。連続切れ刃間隔 λ は、他の報告¹³⁾⁶⁾と同様に、研削方向に引いた幅 b の線上に並ぶ切れ刃の間隔で定義している。なお、本研究では線幅を1画素とし、図に示すように1画面内で8本の走査線を設定した。ただし、画素単位であれば任意の走査線幅で λ を算出することができる。また、 n_g 、 n_c の算出においては一方の側線にかかるもののみを算入し、同一砥粒内の複数切れ刃はこれの一つとした。これらの評価パラメータは砥粒の摩滅摩耗、破壊および脱落など砥石性能を直接的に表す重要な特性値である。

Fig. 3 Schematic view of grain and cutting-edge distribution on the wheel surface

なお、解析に先立ち、縦・横両方向1画素あたりの実際の長さは、基準格子（メッシュ間隔 20 μm）によって校正している。

2.3 画像処理手順

砥粒や切れ刃の分布や形状を求めるためには、まず、砥石表面画像から砥粒あるいは切れ刃摩耗面を正確に抜き出さなければならない。本研究では、画像の持つ色彩情報を定量的・定性的に取り扱うことによって測定対象物の抽出を行っている。

ところで、計算機で取り扱う色彩画像は一般に R (赤)、 G (緑)、 B (青) の3原色の濃淡（本システムではそれぞれ256階調）の組合せで構成されており、これら RGB 信号から以下の関係式によって色の性質を表すことができる¹⁵⁾。

$$Y = 0.30R + 0.59G + 0.11B \quad (1)$$

$$h = \tan^{-1} \left(\frac{R - Y}{B - Y} \right) \quad (2)$$

$$s = \sqrt{(R - Y)^2 + (B - Y)^2} \quad (3)$$

ここに、 Y は輝度、 h は色相、 s は彩度で、それぞれ画像の明るさ、色合いおよび色の濃さを表している。これらの色彩情報を抽出対象物に応じて適切に利用することによって、より正確に物体の抽出が可能になる。

図4に画像処理プログラムのフローチャートを示す。砥石の種類や取込み画像の画質などによって個々の処理は多少異なるが、後述するレジソンド砥石の場合には、基本的には図4の手順に従って砥粒および切れ刃摩耗面を抽出し、 G 、 C 、 λ および η を算出する。以下に主な画像処理の詳細¹⁶⁾を説明する。

(1) 入力画像の平均化：同一画像を複数回サンプリングし、各画素ごとの時間平均を取ることにによりCCDカメラやビデオレコーダからのランダムな雑音を除去する。入力画像の良否が処理精度に大きく影響するためこの処理は非常に重要になる。なお、以後、平均化後の画像をその測定箇所における“原画像”として記述する。

(2) 平滑化処理：原画像に含まれる種々の雑音をメディアンフィルタによって平滑化し、2値化後のごま塩雑音を減少させる。メディアンフィルタは普通モノクロ画像の濃度値に対して行われるが、ここでは R 、 G 、 B それぞれについて行っている。なお、平滑化処理はその形状を微妙に変化させるため摩耗面の抽出には用いない。

Fig. 4 Flow chart of the image processing

Table 1 Photographing conditions

	Grain extraction	Wear-flat extraction
Grinding wheel	SDC 140 N 75 B	
Microscope	Nikon OPTIPHOT XF-UNR	
Objective lens	×5	
Depth of a focus μm	56	
Viewing area μm^2	1 100 ^b ×800 ^v (640×400 pixels)	
Support light	necessary	unnecessary

(3) 2 値化： 画像データに対し、輝度 Y 、色相 h 、彩度 s の各色彩ヒストグラムを算出し、その分布形状より物体の抽出に最も適した色彩情報を選択する。そして、そのヒストグラムに対して適切なしきい値を設定して物体を抽出し、2 値化画像に変換する。

(4) 雑音除去： 2 値画像に含まれる微小なごま塩雑音を平滑化もしくは孤立雑音の除去処理によって除去する。

(5) ラベリング処理および不要画像の除去： つながっているすべての画素を一つの連結成分としてラベル（番号）を付けていく。これにより、抽出画像を個別に扱うことが可能となり、物体の形状・面積・位置・個数などを調べることができる。そして、これら連結成分個々の形状特徴を解析することにより、不要な物体を除去することが可能になる。

3. 画像処理結果とその評価

本章では 2.3 節で述べた個々の画像処理の特性とその効果について、レジンボンドダイヤモンド砥石を測定対象として検証している。本来、図 4 の処理は 1 枚の画像より行うのが望ましいが、顕微鏡付属の落射照明だけでは密着した砥粒のボンド付近に影ができ、正確に分離できないため、砥粒抽出用画像の撮影に際しては補助光源を用いている。表 1 に撮影条件を示す。

3.1 砥粒抽出処理

3.1.1 入力画像の平均化

図 5 (a) は同一画像を 3 枚入力し平均化した後の原画像、同図 (b)～(d) はそれぞれその輝度 Y 、彩度 s および色相 h ヒストグラムを示したものである。また、同図 (e) は 1 回の入力画像に対する色相ヒストグラムである。生画像では分かりにくい (d) と (e) の色相ヒストグラムで比較すると、(e) ではノイズのため離散的な山が多数みられるのに対し、(d) では山と谷が明確な連続的な分布となっており、雑音が減少していることがわかる。このように、平均化処理によって、後述する 2 値化処理においてしきい値の同定が容易になるとともに、得られる 2 値画像においても雑音が大幅に低減される。なお、平均化の枚数については 5 枚程度までは雑音の低減効果が顕著に認められたが、処理時間や測定精度などから本研究では 3 枚とした。

3.1.2 色彩情報の選択と 2 値化処理

図 5 のヒストグラムに見るように、輝度や彩度では 1 つの山があるのみで、砥粒と結合剤の違いを示す明確な傾向は見られず、これらのヒストグラムより砥粒を画像より抽出することは困難である。一方、色相ヒストグラムには砥粒と結合剤を示す 2 つの明確なピークが現れており、砥粒抽出に対しては色相情報が有効なことがわかる。図 5 (a) の原画像にメディアンフィルタによる平滑化処理を 2 回施した後、しきい値 $310^\circ < h < 350^\circ$ によって 2 値化し、かつ孤立雑音の除去処理¹⁶⁾ を 2 回行った結果を図 6 に示す。図の白色および赤色の部分が抽出結果であるが、図 5 の原画像と比較すると、所々に雑音が残っているが、

全体的には比較的正確に抜き出されていることがわかる。なお、しきい値の同定はモード法¹⁶⁾ を基本とし、若干の補正を加えた。

3.1.3 ラベリングおよび不要画像の除去

孤立雑音の除去処理後でも比較的大きな雑音、すなわち不要画像が残っており、これらを除去しなければならない。そこで、図 6 において抽出された物体（連結成分）にラベル（番号）を付け、その物体の持つ特徴によって抽出対象を特定する処理を行った。砥粒は砥石仕様（粒度 140）によってその大きさが規定されるため、ここでは、物体の大きさを判定基準とし、ある面積 S_{cr}^* 以下の物体は有効な砥粒でないとして判断し、除去した。図 6 の赤色の領域が不要画像として除去した部分である。

図 7 は砥粒抽出の結果の一例を示したもので、図 5 の原画像に抽出された砥粒の輪郭線を重ねて表示している。図に見るように、全体として砥粒は精度よく抽出されており、現段階では最大で 1.5% 程度の抽出精度となっている。なお、図中の“a”のように密着した砥粒は分離できていない場合があるが、このような場合、1 つの砥粒としてカウントしている。

3.2 切れ刃摩耗面抽出処理

3.2.1 色彩情報の選択と 2 値化処理

切れ刃摩耗面は砥粒先端の平坦化した部分（砥石の曲率は無視できる）であるため、落射照明のみによる正反射光の明るい部分が相当すると考え、輝度ヒストグラムにしきい値処理を施して抽出を行った。しかし、この処理だけでは結合剤の平坦部分も一部抽出されてしまう。そこで、この輝度処理で抜き出された領域内の原画像に対して色相ヒストグラムを求め、結合剤とみなせる色相の部分除去する 2 段階処理手法を採用した。図 8 (a)～(c) にそれぞれ原画像、輝度ヒストグラムおよび 2 値画像を示す。なお、摩耗面抽出処理では照度一定の落射照明のみを用いており、撮影環境を常に一定状態に保てるため、上述したしきい値処理においては Y, h とともに固定しきい値処理¹⁶⁾ で行っている。

3.2.2 雑音および不要画像の除去

切れ刃摩耗面測定においてはその面積を算出するため、形状が変化する平滑化処理は行わず、孤立雑音の除去処理を 2 回施した後、ラベリング処理を行った。そして、先の抽出砥粒の結果と重ね合わせ、砥粒の部分以外にある連結成分を不要画像として除去した。図 9 に抽出結果を示す。図において、実線が抽出砥粒の輪郭、青色の部分が摩耗面、赤色の部分が不要画像であり、同一砥粒内の摩耗面には同じ番号をつけている。図より、角の部分は多少丸まった傾向にあるが、摩耗面は比較的正確に抽出されていることがわかる。

以上のような処理手順によって砥粒および摩耗面を抽出した後、前述した砥石作業面評価パラメータを計算する。なお、本研究では上記の画像解析は普及形のパーソナルコンピュータ（CPU: 486 DX 4, 100 MHz）を用いているが、1 枚の画像処理に要する時間は砥粒分布が約 90 秒、切れ刃分布が約 60 秒である。

4. 研削過程への適用

4.1 実験方法および実験条件

本手法の有効性を検討するため、研削作業に伴う砥石作業面

* 径 d_g の球形砥粒を考え、突出し量を h_t とすると砥石上方より見た砥粒の投影面積は $S_{pr} = \pi \{ (d_g/2)^2 - (d_g/2 - h_t)^2 \}$ で表される。 d_g は残留率 3% のふるい目の大きさ¹⁷⁾、 h_t は d_g の 25% とし砥粒の長短比を考慮して $S_{cr} = S_{pr}/2$ とすると、粒度 140 では $S_{cr} = 1.227 \mu\text{m}^2$ となる。

Fig. 5 Brilliance, saturation and hue histograms of the input image data and effect of averaging

Fig. 6 Binary image of grain extraction by thresholding

Fig. 7 Superimposed outlines of extracted abrasive grains

Fig. 8 Wear-flat extraction by thresholding

Fig. 9 Binary image of wear-flats in the abrasive grains

の変化を測定することを試みた。このとき、測定位置は砥石幅の中央部で、砥石周方向に 30° ずつ 12 か所とし、1 か所につき周方向に連続した 4 画面をサンプリングしている。研削実験は定切込み湿式プランジ研削方式で行い、工作物には常圧焼結窒化けい素 Si_3N_4 (SSN) を用いた。表 2 に研削条件を示す。

4.2 砥石作業面の評価

図 10 は単位幅あたりの研削量 V_w' によって変化する G , C , λ および η を砥石周方向の各位置 ψ について示したもので、●印は $V_w' = 2 \text{ mm}^3/\text{mm}$ (形直し・目直し後数パス研削した状態)、○印は $V_w' = 150 \text{ mm}^3/\text{mm}$ の結果である。まず砥粒密度 G について見ると、その砥石周方向分布は $300 \sim 30^\circ$ 付近で若干小さいものの、 $20 \sim 25$ 個/ mm^2 の範囲ではほぼ一様に分布しており、平均値はおおよそ 22 個/ mm^2 となっている。また、研削前後でほとんど変化していないことから、砥粒の脱落は極めて少ないことがわかる。なお、一部で研削後に G が若干増えているが、これは当初側線にかかって算入されなかった砥粒が、微小破壊や局部欠損によって研削後でカウントされたものと考えられる。

次に、切れ刃密度を見ると、 C は $16 \sim 22$ 個/ mm^2 の範囲ではほぼ一様に分布しており、 G と同様、研削前後においても大きな変化は生じていない。また、 C の値が G に比べてそれほど小さくないのは、形直し過程で砥粒先端をそろえた結果、有効切れ刃が多くなったためと考えられる。他方、連続切れ刃間隔 λ はおおよそ $0.80 \sim 0.92 \text{ mm}$ となっており、 C に比較して場

Table 2 Grinding conditions

Grinding wheel: SDC 140 N 75 B	• Truing (SD 120 Q 75 M)
Wheel speed: $v_s = 25$ m/s	$v_w = 2$ m/min
Work speed: $v_w = 10$ m/min	$s_t = 50$ μ m/rev
Depth of cut: $a = 20$ μ m	$a_d = 2$ μ m
Grinding fluids:	Soluble (1 : 50)
Water-based soluble	• Dressing (WA 600 H 7 V & # 600)
(W 2-1-1, 1 : 50)	$v_w = 2$ m/min
Workpiece:	$a_d = 50$ μ m/pass
Si_3N_4 ($\rho_w = 3.20$ g/cm ³ , HV 1 600)	Soluble (1 : 5)

Fig. 10 Change of the two dimensional wheel topography with grinding

所によって偏りが少なからず見られる。これは図10の各プロット点に対応する λ の算出基準長さが約4.4 mm (4画面分)と短いことや、切れ刃摩耗面の分布にやや偏りがあるためと考えられる。

ところで、砥粒摩耗を最も端的に表す切れ刃面積率 η は形直し・目直し後でおよそ3.1%であり、研削に伴って2.4%に減少する結果となった。このことは、砥粒切れ刃は摩滅摩耗によって定常的に損耗するのではなく、切れ刃先端の微小破壊や局所的な欠損が生じた結果と考えられる。今回測定した砥石は新たに付け変えたもので、砥石交換後の外周面の振れを取り除くため相当量の形直しを行っている。そのため、形直し時に少なからず砥粒先端に負荷を与えた可能性も考えられ、図10の結果が必ずしもSSNの湿式研削における砥粒の挙動を代表するものでないと考えている。また、在来砥石ではあるが η が8%程度で砥石寿命とされていることからすると²⁾、形直し・目直し後においても比較的大きな摩耗面を有しており、形直し・目直し条件に検討の余地があろう。さらに、本実験では η の増加傾向に砥石周方向の偏りがあまりない結果となったが、これは砥石作業面の初期状態によって変化するものと思われる。なお、研削過程における砥石作業面の変化とその特性に及ぼす研削条件や加工材料による影響については、他の仕様の超砥粒砥石での適用性ととも、次報で報告する予定である。

以上のように、本測定システムは研削加工に伴う砥石作業面の変化を十分な精度で測定できると言える。

5. 結 言

研削盤に装着した顕微鏡で砥石表面を撮影し、その画像データに種々の画像処理を行うことによって、平面的な砥石表面トポグラフィを測定する手法を考案し、以下の結果を得た。

- (1) 本システムは、砥石表面画像から砥粒および切れ刃逃げ面摩耗面を抽出することによって、砥石作業面上のこれらの平面的な分布をポストプロセスで測定することができる。
- (2) レジンボンドダイヤモンド砥石の場合、砥粒の抽出には砥粒と結合剤の色の違いから色相情報が有効である。摩耗面の抽出は、まず摩耗面の正反射光の明るさから輝度情報によって抜き出し、その後、色相情報によって結合剤からの反射部分を除去する2段階的な方法が有効である。
- (3) 砥粒の抽出誤差は最大で1.5%程度である。切れ刃摩耗面の抽出では、摩耗面積にほとんど影響を与えない程度の微細な要素は残留するが、同一砥粒内の複数切れ刃を1つと考えれば、切れ刃密度も比較的精度よく算出される。
- (4) 砥粒および摩耗面の抽出に要する時間は1枚の画像に対し、それぞれ90秒および60秒程度である。
- (5) 常圧焼結 Si_3N_4 の研削において砥粒密度や切れ刃密度に大きな変化がなかったことから、今回の実験では、砥粒の脱落や大規模な破壊は生じなかったと判定できる。

最後に、画像処理プログラムの開発に協力頂いた永江昌義氏(熊本大学大学院)と砥石および研削液のご提供を頂いたノリタケダイヤ(株)ならびにユシロ化学工業(株)の各社に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 津和秀夫：研削における砥粒の挙動について（第4報）——切れ刃の顕微鏡観察，精密機械，27，11（1961）719。
- 2) 吉川弘之：研削砥石の目立て間寿命判定基準，精密機械，28，5（1962）286。
- 3) 安井平司，津和秀夫：砥石作業面性状の定量化に関する研究（第1報）——切れ刃分布，精密機械，40，8（1974）639。
- 4) 中國 汎，安井平司，砂本 章：切れ刃の破壊・脱落に及ぼす研削条件の影響——高切込み研削における砥石半径減の定量化に関する研究（第1報），精密機械，42，9（1976）869。
- 5) 松井正己，田牧純一：砥石表面トポグラフィの測定に関する研究——触針法，精密機械，50，4（1984）672。
- 6) 田中義信，津和秀夫，河村末久：研削加工の諸条件が研削砥石の性能に及ぼす影響について（第1報）——切れ刃に及ぼす振動の影響，精密機械，30，11（1964）845。
- 7) 須藤徹也：砥石切れ刃の新しい測定装置，精密機械，34，9（1968）606。
- 8) 白井英治，井上 誠：砥粒面形状測定器の試作と測定例——砥石面性状の統計的研究（第1報），精密機械，40，5（1974）415。
- 9) 三好隆志，斎藤勝政：光学的フーリエ変換による砥石作業面性状の評価，精密機械，48，8（1982）1045。
- 10) A. M. Besuyen: The Measurement of the Grinding Wheel Wear with the Quantimet Image Analysing Computer, Ann. CIRP, 19, (1971) 619。
- 11) 玉井廉人，河村末久，寺田勝三：研削中における砥石切れ刃高さの分布について——実験の方法と二，三の結果（第1報），精密機械，36，4（1970）263。
- 12) 松井正己，庄司克雄：統計的手法による研削機構の考察（第3報）——二，三の実験的考察，精密機械，37，10（1971）708。
- 13) 松井正己，田牧純一：三次元粗さ測定器による砥石表面トポグラフィの測定，精密工学会誌，54，5（1988）871。
- 14) 中山一雄，M. C. Shaw: 研削仕上げのあらさ，日本機械学会論文集（第3部），37，293（1971）178。
- 15) 三谷公二：パソコンでできる画像処理入門，エレクトロニクスライフ，7（1989）153。
- 16) 田村秀行監修：コンピュータ画像処理入門，総研出版，（1985）14～162。
- 17) (社)精密工学会編：新版 精密工作便覧，コロナ社，（1992）293。