

静滴法における画像解析法の特徴と適用範囲

檀 武弘 原田幸明 村松祐治

金属材料技術研究所

J. Japan Inst. Metals, Vol. 59, No. 8 (1995), pp. 846-850

Characteristics of Image Data Processing Techniques for Sessile Drop Method

Takehiro Dan, Kohmei Halada and Yuji Muramatsu

National Research Institute for Metals, Tsukuba

Both profile fitting and curvature plotting methods have previously been submitted as new image processing techniques in the sessile drop method by the authors. The purpose of this research is to elucidate the characteristics and the applicable limits of these data processing methods (including the traditional Bashforth and Adams method) and in turn submit a guide to their choice. Both theoretical sessile-drop profile as a solution of Laplace equation and sessile drop profile from the present experiment are processed by the above methods. As a result, the precision and the optimal applicable range of these methods are discussed.

The results obtained are as follows. (1) Under the present processing conditions, the precision of the profile determination is estimated to be $\pm 1.3 \mu\text{m}$. This value is comparable to that obtained with an optical projecting magnifier which is usually used in the traditional Bashforth and Adams method. (2) The error in the data processing through the use of the profile fitting method is determined to be less than 0.1%, independent of the number of profile data points (more than 130 points). (3) The precision of the presumed β -value, which was defined by Bashforth and Adams, by the curvature plotting method is dependent on the number of profile data points definitely. However, the curvature plotting method is optimal in order to inspect a local little change in the sessile drop profile. (4) The traditional Bashforth and Adams method is very simple and requires only a few measuring points. However, it is apparent that the confirmation of fitting of an experimental profile with a recalculated profile from the obtained β -value is indispensable. (5) The surface tension of an Au20 at%-Ag80 at% alloy at 1375.15 K in Ar-7 vol% H_2 atmosphere was determined to be 914.0 mN/m. This value was in good agreement with the reference data.

(Received December 26, 1994)

Keywords: profile fitting method, curvature plotting method, sessile drop, Bashforth and Adams method, Laplace equation, image processing

I. 緒 言

著者らは先に、表面張力を求めるための静滴法においてデータ解析に画像処理を導入し、輪郭フィッティング法⁽¹⁾および曲率プロット法⁽²⁾⁽³⁾の二方法を新たに提案し、それぞれについて詳細な報告を行った。そしてこれら二方法を用いることにより、精度を向上させ、データ処理時間を大幅に短縮しながら、表面張力のみならず、接触角、密度の三物性を同時に求めることができることを明らかにした⁽³⁾。本報では Bashforth と Adams の数表⁽⁴⁾⁽⁵⁾を用いる従来法(以下従来 BA 法と呼ぶ。)をも加え、静滴法の画像解析について総合的な検討を行い、各解析法の精度、適用範囲等のそれぞれの特徴と選択にあたっての指針を明らかにしたので、その結果を報告する。

II. 静滴プロファイルの数式表示

Fig. 1 に示すように、静滴頂点を通る水平軸を x 軸、静滴

の中心を通る垂直軸を y 軸とする xy 平面上に、二次元で表された静滴輪郭上の任意の一点 P の座標を (x, y) とする。静滴が均一な重力場にあると仮定すると、静滴にかかる静水圧を考慮

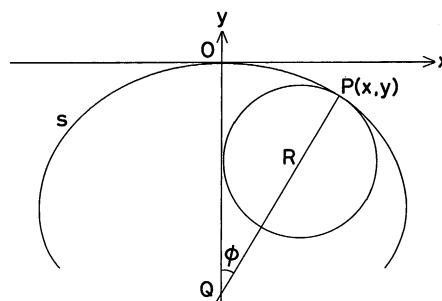


Fig. 1 Contour of a sessile drop. s is a sessile drop profile on the xy -plane. $P(x, y)$ is a point on this profile. The normal line of this profile at P point crosses with the y -axis at Q point, making an angle ϕ . Two principal curvatures at P are $1/PQ$ and $1/PR$, respectively. O is the top of this sessile drop profile.

することにより、曲面内外の圧力差と表面張力の関係を表すラプラスの式から⁽⁵⁾、その輪郭の形状について

$$1/r + \sin \phi/x = -(\rho g/\gamma) \cdot y + 2/b \quad (1)$$

なる関係式を得る。ここで、 γ は静滴の表面張力、 ρ は静滴の密度(正確には静滴と雰囲気ガスのそれぞれの密度の差)、 g は重力加速度、 ϕ はP(x,y)点における輪郭面の法線がy軸となす角、 r はP点における紙面上にある主曲率半径PR、この時、紙面に垂直なもう一つの主曲率1/PQは左辺第二項で表される。 b は静滴頂点Oにおける輪郭面の主曲率半径である。通常BashforthとAdamsに従い $\beta = (\rho g/\gamma) \cdot b^2$ と置くが、 r, ϕ はx,yとの間に一定の幾何学的関係があるため、 β, b を決めると静滴のプロファイルが一義的に決まる。 b が静滴の大きさに関連するのに対し、 β は静滴の形状を決定するという意味で重要である。したがって、以下で静滴プロファイルを論ずる際、 β をパラメータとして用いることとする。

III. 実験で得られる輪郭点データ

画像処理の詳細については既に前報⁽¹⁾⁽³⁾で記述しているので、ここでは主要な点についてのみ簡潔に述べる。横型の電気抵抗炉内に水平にセットしたグラファイト基板上でAu20 at%-Ag80 at%合金を保持熔融し静滴とする。雰囲気はAr-7 vol%H₂、温度は1375.15 Kである。自発光像あるいは試料後方に置いた光源によるシルエット像として、印画紙上に焼付けられた静滴像は、CCDカメラを通して画像処理装置(EDEC IMAGE-PC ED1182)に読み込まれ、基板面ならびに静滴輪郭の座標が抽出される。この画像処理装置は512×512の画素をもち、256階調の濃度レベルを識別することができる。

著者が先に提案した輪郭フィッティング法は、測定した静滴プロファイルに最もフィットした理論プロファイルを、対応する点間の残差自乗和の総和が最小になるとの条件の下で決定するものである。他方、曲率プロット法は、各測定点における二つの主曲率の和を、yに対してプロットすると、式(1)から明らかなように直線となることを利用したものであり、その勾配は $\rho g/\gamma$ であるので、密度 ρ が既知であれば、表面張力 γ が決定できる。最後にBashforth and Adams法は、静滴の赤道半径ならびに赤道面と静滴頂点との間の距離を測定し、BashforthとAdamsの数表から β, b 値を割り出し表面張力を求めるものである。

まず最初に、画像処理で実際に得られる輪郭点データがどのようなものであるかを以下に示す。Fig. 2(a), (b)に示したのが、Au20 at%-Ag80 at%合金の同一の静滴についてはほぼ同一時点で撮影したシルエット像および自発光像の写真からCCDカメラを通して画像メモリ上に濃度データを取り込み、このデータをもとにして得た静滴プロファイルである。実際に実験で得られる静滴のプロファイル(a), (b)はかなり凹凸の多いものであることが分かる。特に自発光像から得られた静滴プロファイル(b)はシルエット像から得られた静滴プロファイル(a)に比して明らかに凹凸が多い。これは静滴表面の軽微な汚れ、あるいは表面に周囲の物体(炉芯管、基板等)の影が映ることが一因と考えられる。なお、次節で述べるような根拠に基づいて、ラプラスの方程式をみたす理論的プロファイルに±0.1画素の

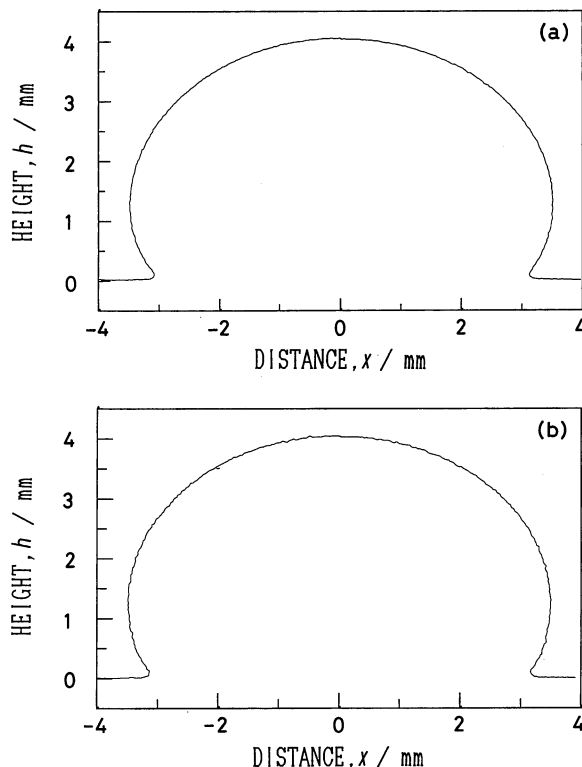


Fig. 2 Typical profiles of sessile drop.
(a) Silhouette image of Au20 at%-Ag80 at% alloy.
(b) Self-radiant image of Au20 at%-Ag80 at% alloy.

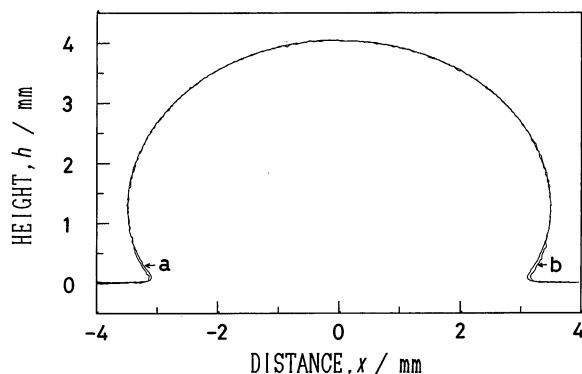


Fig. 3 Comparison of a silhouette image with a self-radiant one.
a is a silhouette profile (cf. Fig. 2(a)).
b is a self-radiant profile (cf. Fig. 2(b)).

乱数処理を加えて得たプロファイルは、実プロファイル(a), (b)に比してずっと滑らかである。このことは実プロファイル(a), (b)に見られる凹凸が、読み取り誤差以外のファクターによるものが大きいことを示している。

ここで、Fig. 2(a), (b)に示した同一の静滴のシルエット像と自発光像の写真から得られたプロファイルを、重ね合わせたものをFig. 3に示す。当然のことながら二つのプロファイルは極めて良く似通っている。しかしながら、詳細に観察するとかなり重要な相違点が存在する。一つは上述したようにプロフ

ファイルそのものは明らかにシルエット像の方が滑らかである。二つには Fig. 3 に示すように両プロファイルを重ね合わせてみてはじめて分かることであるが、基板近傍で両プロファイルの形状には大きな違いが観察されることである。シルエット像のそれに比して自発光像のプロファイルは静滴の外側への拡がりが見事に観察される。これは明らかに輝度の高い基板の像が静滴の表面に映りフィルム上でこの部分を実際よりも大きく感光させているためである。したがって、実験で得られたプロファイルを表すデータすべてを使用することは問題を生じることとなる。すなわち自発光像の場合、基板近傍のデータを除外してデータ処理を行わねばならない。このような場合、前報⁽³⁾でも述べたごとく、曲率プロットにも大きな屈曲が観察され、その勾配が小さく評価される危険のあることが分かる。したがって、曲率プロット法においては、自発光像のデータ処理にはこの屈曲部分を除外し、曲率プロットの直線部分のみを使用することが必要である。ここで述べた基板近傍の静滴プロファイルの問題は、接触角を決定する際にも極めて重要で、単純に静滴像のみから直接接触角を決定することが危険であることを示している。もちろん、光源の強さとの関連で高温の実験試料ではシルエット像が得られないなどの制約があり、シルエット像と自発光像をどのように使い分けかが実験テクニック上の重要なファクターになることはいうまでもない。

IV. 輪郭点データの精度

以下の検討を行うにあたっては、画像処理に用いた一連の装置に光学的、電子工学的な歪はないものと仮定する。まず、画像処理によって得られる輪郭点データの精度について検討する。写真あるいはビデオカメラから画像メモリの該当画素上に、256階調の識別が可能な状態で濃度が読み込まれる。すなわち濃度の読み取り精度は ± 1 階調と見なしてよい。一方、静滴像の輪郭部分に相当する、濃度の急変部分の実測データを二例、Fig. 4 に示す。縦軸は濃度、横軸は水平距離を画素単位で表したものである。この急変部分の勾配がリニアであると仮定すれば、おおよそ15階調/画素である。上記の関係を用いると、

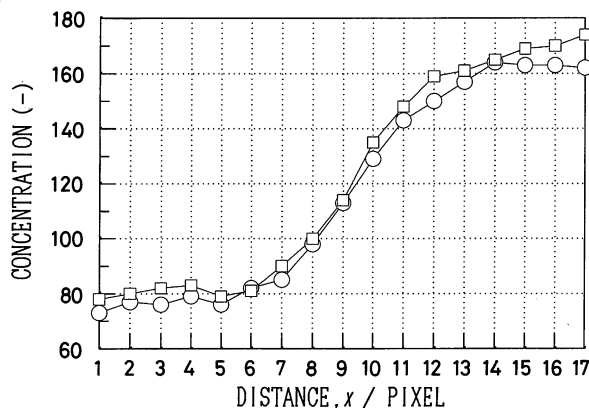


Fig. 4 Two examples of concentration gradient at sessile drop profile edges. Au20 at%-Ag80 at% alloy, at 1375.15 K, Ar-7 vol% H₂ atmosphere, self-radiant image.

決定される輪郭点の位置の精度は ± 0.07 画素と見積もられる。

実際の輪郭点データの読み取り精度は、例えば本実験条件下では赤道直径 10 mm の静滴の像が画像メモリー一杯に読み込まれた場合、19 μm /画素となり、したがって、輪郭点の位置決定の精度は $\pm 1.3 \mu\text{m}$ と見積もられる。この大きさは従来 BA 法で使用されている光学的拡大投影装置の公称読み取り精度 $\pm 1 \mu\text{m}$ と比較してオーダー的に同程度である。実際に投影装置で輪郭の位置座標を読み取って見ると、曲面上の一点での法線方向の位置の決定は比較的容易であるが、接線方向の位置決定は特に曲率半径が大きい場合容易ではなく、 $\pm 1 \mu\text{m}$ の精度で読み取ることは熟練者でも至難の技である。その点、画像処理による読み取りは熟練度を問わず、極めて機械的であり客観性に優れている上、多数の点の測定が短時間(例えば旧型パソコン PC9801F でも 50 点/分)で可能であるという特徴を有する。ここでは画像処理法の精度が、既に現状でも上述のごとく従来法に比肩する精度を有していることを強調したい。また、読み取り精度をさらに向上させるには、画像メモリの画素密度の増加が必要であるが、コストの制約を考慮する必要があるれば現時点でもさらに高性能の装置の利用が可能である。

V. モデルデータを用いた処理結果

Bashforth と Adams⁽⁴⁾は既に110年前にぼう大な手計算を行い非常に有用な数表を発表しているが、現代の研究者は電子計算機を用いて、彼らの数表よりさらに細かい任意の間隔と任意のパラメータ値で、短時間にプロファイルを得ることができる。ラプラスの方程式を満たす理論的静滴プロファイルデータ ($\beta=2.0$, $b=4.305 \text{ mm}$) をルンゲ・クッタ・ジル法⁽⁶⁾による数値計算で求め、これよりデータ点数の異なる一連のデータグループ (BA09: 130 点, BA18: 262 点, BA36: 524 点, BA72: 1050 点) を作成し、これらを従来 BA 法、輪郭フィッティング法および曲率プロット法を用いてデータ処理した。なお、ここで言う従来 BA 法とは、実験者が行う必要最小限の処理過程(静滴の赤道半径および頂点と赤道面間の距離の決定)をコンピュータに機械的に代替させるものである。その結果を Table 1 に示す。表よりいずれの方法でもデータ数の増加とともに、得られる β の値が真の値に近づくことが分かる(厳密には従来 BA 法では特定の点数の位置データのみを使用しているため、データ数の数に依存しない)。

輪郭フィッティング法と曲率プロット法では前者はデータ数

Table 1 Results of data processing according to different methods.

Type of processing method		Number of profile date point			
		1050 (BA72)	524 (BA36)	262 (BA18)	130 (BA09)
Presumed β value	Traditional BA method	2.0002	2.0002	2.0002	2.0005
	Profile fitting method	2.0000	2.0000	2.0000	2.0003
	Curvature plotting method	1.9928	1.9796	1.9275	1.7774

にほとんど依存せず、比較的少数のデータ点(ここでは130点)でも正しい値を推定していることが分かる。これに対して、後者はデータ数に強く依存することが特徴的である。これは前者が一次データである輪郭点の座標データのみを使用しているのに対して、後者はこれらのデータから二次的に計算により取得される曲率値を用いており、これより β を逆算するため、曲率の値が正しく推定されたかどうかにより大きく依存するからである。この場合のように輪郭点の列が滑らかであっても、データ点数が多ければ多いほど、曲率の値は容易かつ正確に求められる。このことから分かるように、曲率プロット法では、輪郭データからいかに正確に曲率を求めるかが鍵になる。そのためには、滑らかなプロファイルの場合でもデータ数の多いことが必要であることが分かる。本実験で用いた装置では500点程度のデータ数しか得られないので、本実験条件では、曲率プロット法の適用には問題があることに留意すべきである。なお、従来BA法はこのように乱れがなくかつ滑らかな理論的プロファイルに対しては、 β を十分正しく算出することが分かる。これは、滑らかなプロファイルでは突出したデータは存在せず、静滴の最大径、最大高さの位置座標がコンピュータプログラムによる機械的処理でも容易に正しく求められるからである。しかし、次節以下で述べるように、平滑でなく凹凸の多い実際のプロファイルでは突出データを捨てる可能性が大きくなり、その精度は急激に低下する。

VI. 読み取り誤差を考慮した静滴プロファイルデータの処理結果

第IV節で輪郭データの読み取り精度が ± 0.07 画素のオーダーであることを明らかにした。そこで、前節で用いた理論的輪郭データに ± 0.1 画素の乱数処理を加えたデータを作成し、データ処理を行った。これは三つのデータ処理法に読み取り誤差がどのような影響を与えるかを評価するものである。輪郭点データ数524での、一連の計算結果をTable 2に示す。計算の結果はTable 2から明らかのように、従来BA法では $\beta = 2.036 \pm 0.124$ 、輪郭フィッティング法では $\beta = 1.998 \pm 0.003$ 、曲率プロット法では $\beta = 2.023 \pm 0.011$ となり、従来BA法、曲率プロット法の β 推定値の真の値との差はそれぞれ1.8%、1.2%で標準偏差も大きいものに対して、輪郭フィッティング法の β 推定値のそれは0.1%、標準偏差は従来BA法、曲率プロット法に比しオーダーでそれぞれ1ないし2桁も小さいことが分かる。なお、推定した β 値からあらためて数値計算により理論静滴プロファイルを逆算し、これと静滴像とを重ね合わせてフィット状態が良好であるかどうかを図上での観察と残差自乗和とからチェックをした。

従来BA法で、実際に研究者が肉眼で該当位置座標を決定する場合には、突出点が存在したとしても、周辺のデータ点の状況をも考慮しながら判断を下すため、コンピュータが単純に決定した上記の結果ほど真の値との差は大きくならない。しかし、この方法には本質的に測定データ数が少ないという問題点⁽³⁾が存在するので、従来BA法を用いる場合には、上述のような逆算プロファイルとの重ね合わせによるチェックは比較的簡単、有効かつ必須であり、従来BA法の信頼度を高める

Table 2 Results of BA36 data with ± 0.1 pixel randomizing processing.

Trial number	β values		
	Traditional BA method	Profile fitting method	Curvature plotting method
1	2.005	1.996	2.022
2	2.009	1.997	2.021
3	2.107	2.002	2.023
4	2.003	1.996	2.022
5	2.035	1.992	2.021
6	1.796	1.999	2.043
7	2.280	1.996	1.998
8	2.061	2.002	2.029
9	2.111	2.000	2.032
10	1.951	1.998	2.019
Average	2.036 ± 0.124	1.998 ± 0.003	2.023 ± 0.011

ものといえる。

VII. 実際の輪郭データの処理結果

実際にAr-7 vol% H_2 雰囲気、1375.15 KにおけるAu20 at%-Ag80 at%合金の静滴のシルエット像を写真に撮影し、これを画像メモリに読み込んで得た輪郭データ(Fig. 2(a))の処理結果のCRT画面をそのままFig. 5に示す。 β 値は従来BA法で $\beta = 2.545$ 、輪郭フィッティング法で2.159、曲率プロット法で1.988が得られた。これら推定 β 値の相違はTable 2に示された読み取り誤差による違いよりかなり大きい、これは実際に得られた静滴プロファイルの凹凸等が読み取り誤差よりもはるかに大きい影響を与えることを示している。これらの推定 β 値からプロファイルを逆算し、実際の静滴プロファイルと重ね合わせることで、最適の値を決定することになる。この場合、静滴プロファイルを最も良く表しているプロファイルが、輪郭フィッティング法により得られた β 値2.159のプロファイルであることは、Fig. 5左下のプロファイル図のフィッティング状態および残差自乗和の比較から判断される。この時表面張力、接触角がそれぞれ914.0 mN/m、138.2度と算出される。この結果は文献値⁽⁷⁾から推定される値とほぼ一致する。この時の表面張力値の標準偏差は、前節の例を参照し、さらにこの場合データ数(317点)が少ないことを考慮すると ± 1.2 mN/m程度と見積もられる。

VIII. 結 言

静滴法の画像データ処理法として先に提案した輪郭フィッティング法と曲率プロット法の二方法に従来BA法をも加えて解析精度を中心としてその最適な適用範囲について検討した結果、以下の結論を得た。

(1) 画像メモリ上のデータから、静滴プロファイルを決定する場合の位置決定の精度は、本実験の装置構成および条件では ± 0.07 画素のオーダーである。したがって、座標決定の精度は $\pm 1.3 \mu\text{m}$ となる。この値は従来BA法で使用される光学的拡大投影装置での読み取り精度 $\pm 1 \mu\text{m}$ と比較してオーダー的に同程度である。しかもこの精度は画像メモリ機器の画素密度

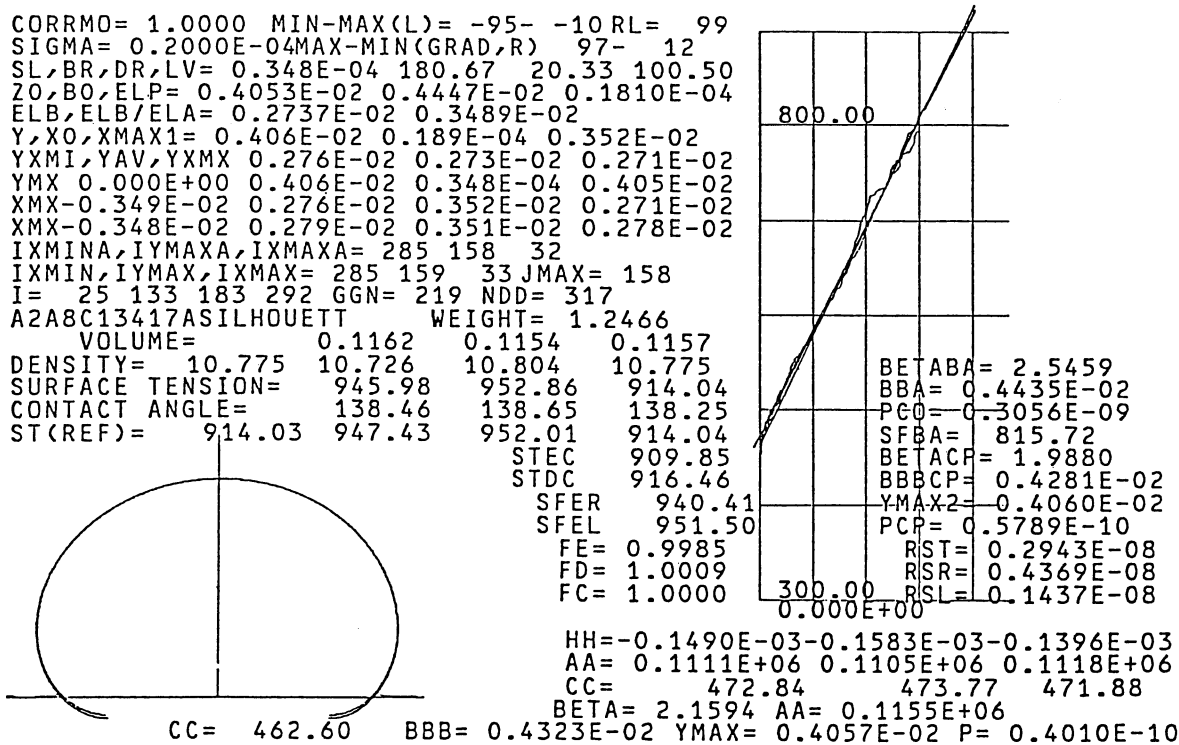


Fig. 5 The example of data processing of silhouett image (cf. Fig. 2(a)).

に比例して将来向上する余地が残されている。

(2) 輪郭フィッティング法における β 値の推定値と真の値との差は輪郭データ点の数130点以上ではデータ点数にほとんど依存せず、常に0.1%程度を示し、かつ精度も良い。このため、輪郭フィッティング法は比較的データが少数(本実験条件では130個以上)の実験結果にも適用可能な、汎用のデータ処理法といえることができる。

(3) 曲率プロット法の誤差は輪郭データの点数に強く依存する。また、輪郭データが滑らかでない場合、曲率を正しく算出することが困難である。本実験装置のごとくデータ点の数が500点程度の場合、その誤差は1.2%程度であり、輪郭フィッティング法に匹敵する精度を得るには、さらに画素密度の高い装置を用いることが必要である。しかし、曲率プロットに見られるように、静滴プロファイル上の局所的な変化を捉えることに優れており、そのような目的には非常に適したデータ処理方法である。

(4) 従来から使用されているBashforthとAdamsの数表を使用する方法を、コンピュータで単純に代替させた場合の β 値決定の誤差は1.8%と、上記二法と比べて大きく、標準偏差もオーダーで1~2桁大きい。研究者が肉眼で輪郭の位置を決定する場合は、周辺の状況をも考慮しながら判断し、突出したデータは排除可能なため、実際の誤差はこれより小さくなるが、少数の測定点でプロファイルを決める危険は本質的なも

のであるので、得られた β 値より静滴プロファイルを逆算し、これと静滴像を重ね合わせ、フィッティングが良好であることを確認するなどのチェック機能を準備することが望ましい。

(5) 実静滴プロファイルデータに上記三法を適用したところ、輪郭フィッティング法が最も良好な結果を与えた。Ar-7 vol% H_2 雰囲気、1375.15 KにおけるAu20 at%-Ag80 at%合金の表面張力は914.0 mN/mであり、これは文献値と良好な一致を示した。

文 献

- (1) 原田幸明, 村松祐治: 日本金属学会誌, 52(1988), 43.
- (2) K. Halada, Y. Muramatsu and T. Dan: *Proc. of World Conf. on Powder Metallurgy*, The Inst. of Metals, London, 3(1990), 8.
- (3) 檀 武弘, 原田幸明, 村松祐治: 日本金属学会誌, 55(1991), 1123.
- (4) F. Bashforth and J. C. Adams: *An Attempt to Test the Theories of Capillary Action*, University Press, Cambridge, (1883), Chapter III, 14.
- (5) 加藤 誠: 高温におけるスラグおよびメタルの物性測定, コンパス社, (1991), 340, 265.
- (6) 一松 信: 数値計算, 至文堂, (1966), 175.
- (7) Y. Kawai and Y. Shiraiishi: *Handbook of Physicochemical Properties at High Temperature*, ISIJ, Tokyo, (1988), 149.
- (8) 野城 清, 大石恵一郎, 荻野和巳: 日本金属学会誌, 52(1988), 72.