凸形粒子の球形度の評価

An Evaluation of Sphericity of Convex Particle

岩 田 博 行, 大 矢 仁 史, 遠 藤 茂 寿,

Hiroyuki IWATA, Hitoshi OHYA, Shigehisa ENDOH,

古 屋 仲 茂 樹, 増 田 薫

Shigeki KOYANAKA, Kaoru MASUDA

Digital image processing technique with various threshold levels was applied for a single particle to collect three-dimensional parameters such as particle volume and sphericity. The volume of a sampled particle measured from various directions was different because of the extrusions on the surface. However, the cross-sectional shapes of a particle were reflected on the images obtained by varying the threshold levels since the minimum volume measured by the present technique was in agreement with the volume obtained through the measurement of buoyancy with an accuracy of 0.1 cubic millimeter. Subsequently, in order to evaluate the three-dimensional shape of fractioned particles, the degree of deviation from a sphere, the normalization of which gives the sphericity, was introduced. The practical usefulness of present technique was demonstrated for a spherical aluminum dioxide granule.

Key Words : Three-dimensional Shape Measurement, Digital Image Processeing, Convex Particle, Sphericity

1. まえがき

固体粒子の形状は、従来は二次元投影画像の解析を通じて評価されてきたが、各種のプロセスにおける粒子の挙動との関係をより精確に理解するためには、三次元的なパラメータの把握が必要になる。物体の立体的な形状測定にはホログラフィーを応用する方法が知られているが、なかでも二波長法においては粒子像に等高線に相当する縞が映し出される¹⁻³⁾ので、この縞による二次元情報を解析することによって、例えば体積のような三次元パラメータが得られるものと考えられる。しかしながら、ホログラムの記録・再生には特殊な道具立てと熟練が必要であり、おもに単一物体(粒子)が対象となるため、粉体のような多数粒子の集合体に対して統計的な取り扱いが必要となる系に、直ちに適用しうる手法とは言い難い。ここでは、複数の角度から投影した画像の処理によって、形成された

粒子の二次元スライス画像相当を集積して三次元のイメージを構築する手法により、まず、凸型粒子に適用できる三次元情報の収集の可能性を検討し、それに基づいて球形度の評価法を提案した。そして、この評価法を球形を目標に調整された酸化アルミニウム造粒体に適用した。

2. 実験及び考察

2.1 試料粒子と画像の取り込み

単一粒子に対して、映像を二値化する際に適用されるしきい値が一種のフィルターの役割を果たし、その変化により粒子の異なった断面を表すスライス像相当が得られるか否かをチェックするところから出発する。試料粒子としては、本来ならば三軸長が既知の楕円体を用いると測定結果の評価に好都合であるが、適切な寸法の理想的粒子を入手するのが困難であったのと、仮にそのような粒子が入手出来たととしても、その場合は特別な形状に対してのみの議論となり、一般によく見られる粒子の場合に現れる現象を見逃すことが考えられるので、出来るだけ全方向に凸な約3~5mmの海砂を選び、これを接着剤でテーパのついた金属棒の先端に固定した。この金属棒をさらに回転ス

1999年9月13日受付
粉体工学会1999年度春期研究発表会(1999年5月、京都)にて発表
資源環境技術総合研究所
(〒305-8569 茨城県つくば市小野川16-3) TEL 0298-58-8460
National Institute for Resources and Environment
(Onogawa 16-3, Tsukuba, Ibaraki 305-8569)

Fig. 1 Recording arrangement

Fig. 2 12 recordings of sample particle with numbers indicating positions and rotation angles in parentheses

ステージに取り付け、任意の角度位置での撮影を可能にした。まず、 $\pi/6 \text{ rad}$ の回転毎に粒子画像をコンピュータに取り込み、その二次元輪郭に基づく面積、周囲長などの12のパラメータを測定した。したがって、一つの粒子について六つの方向から $\pi \text{ rad}$ 間隔で記録した画像の組み合わせを取り込んだことになるが、測定装置の配置は、Fig. 1に示すように試料粒子に対して光源とカメラの作る角度が $\pi/40 \text{ rad}$ なので、記録画像の偏角方向の寸法を $\cos(\pi/40 \text{ rad})$ で除する補正が必要となる。実験では試料粒子が出来るだけ一様かつ平行な光で照明されるように、レーザー光をコリメータレンズを通してあげ粒子に照射した。 $\pi/6 \text{ rad}$ 間隔で撮影した12の映像をFig. 2に掲

げる（実際の像とは上下左右が逆転している）。

各粒子像の下に、positionを示す番号と、括弧内に回転角度を記入した。映像中には支持棒および接着剤が同時に写し込まれているが、それらは金属と樹脂のため粒子とは光の反射特性が異なるので、粒子が認識されないしきい値で認識され、計測の際には画像解析ソフトにあるdrawの機能を用いてその部分を予め除去した。誤差が出ると見られるのは、粒子の認識される部分が大きくなったときであるが、サンプル粒子の表面が比較的平滑であることと画像解析ソフトウェアに拡大機能が付いているため、マウスによる操作での誤差は小さく抑えられたものと意識している。position 1 から 6 までの映像（position 7 から 12 は

Fig. 3 Two dimensional parameters depending on particle orientation

position 1 から 6 と回転角度が π rad だけずれているのでそれらの二次元投影像は 1 から 6 に一致する) から得た各種の二次元パラメータの値と、平面上で自然の姿勢 (安定な姿勢, あるいは最も確率の高い姿勢に相当, これを position x とする) を取ったときに撮影した映像から得られた値を比較のために Fig. 3 に示すが, ここまでが従来の画像解析法によって得られる情報である*。直感的にも想像できるように, 粒子が平面上で安定な姿勢を取った時, その平面上への投影像の面積は, その他のどの姿勢における値よりも大きく, 最大の投影面積を示すものと言える。しかしながら, これらの情報からただちに粒子の三次元的なパラメータ (体積, 等価楕円体の三軸長, など) を抽出することはできない。さらに, 特に平坦な粒子の場合には, 二次元投影画像の情報から直ちに立体的なイメージを判断するのは危険が伴う。

2. 2 三次元計測

二次元的計測において粒子の投影像の重心のまわりの動径 (一次元) を偏角の関数としたように, ここでは粒子の形態を表す一つの特性値として, Fig. 4 に図解するように, ある方向に沿った奥行き z に対する切り口の面積 (二次元) S とその代表径, 例えば平均径, 最大径, 円相当径, 長径, 短径, フェレー径などとの関係を追求する。この関係は一つの三次元的特徴を表す指標で, それに基づいて例えば体積などの計測が可能であるとの見解に立ち, 以下に述べるように便

f_v is equivalent to L

Fig. 4 Front- and side views of particle illustrated for construction of three dimensional image

宜上, 特に垂直フェレー径, f_v を引き合いに出すことにする。ある方向 z に沿った切り口の面積と垂直フェレー径の関係を

$$S = g(f_v) \quad (1)$$

とし, さらに垂直フェレー径と z の関係が

$$f_v = h(z) \quad (2)$$

のように表されれば, 切り口の面積と z の関係は

$$S = g(h(z)) \quad (3)$$

の形で示されるから, 例えば三次元のパラメータの一つである体積 V は

$$V = \sum S_i \cdot dz_i \quad (4)$$

によって算定できる。ただし, S_i , dz_i は i 番目のスライスの面積と厚みを表す。

*) 通常, circularity (円形度) は (投影面積の等しい円の直径) / (粒子の周長) として用いられているが, Fig. 3 では, 画像解析ソフトによる計算式を使用した。

Fig. 5 Positions corresponding to recording orientation for volume measurement

Fig. 6 Relation between Feret's vertical diameter and reference area accounting for particle image recorded at position 1 in comparison with sphere

次に、三次元計測のために採用したしきい値スライド法について述べる。デジタル画像処理においては二値化のレベルが一種のフィルターの役割を果たすと考えると、しきい値をずらすことにより陽画像が変化し、その結果粒子の奥行き方向に沿った切断面に相当するものが得られる。この場合、一つのポジションからの映像では実際の深さの半分程度までしか測定できないので、粒子全体を計測するには π rad だけ回転した位置での映像について測定したものが一対となる。

Eq. (1) の関係を求める場合には、粒子の形状によっては、あるしきい値（本研究で使った画像解析ソフトでは256階調）が設定されたときに複数の領域が現れることがあるが、これも粒子の形状を特徴付けるものであるからそれぞれを単独にEq. (1) の要素に組み入れた。粒子の周辺部に孔の開いた状態が現れたときには、一画素分の膨張、収縮と穴埋めを施すことに

Fig. 7 Assessed crosssectional area with respect to the depth for the images recorded at positions 1 and 7

よって近似的に単一の領域をつくる処理を行った。このようにして、しきい値をずらしながら可及的多数の f_v と S の組み合わせを測定してEq. (1) の関係を求めた。Eq. (2) の関係を測定するには各位置での側面の映像を必要とするので、例えば1-7の方向に測定しようとするときFig. 5に示すように、position 1と4、およびposition 7と10で記録した4個の映像が必要になる。

垂直フェレー径は切り口を側面からみたとき、深さ方向に垂直な直線が粒子映像を切り取る線分の長さに対応するので、その長さは図中では L で表されているが、これが垂直フェレー径に相当すると判断した。

2. 3 画像法による体積測定

position 1における映像について測定したEq. (1)に相当する関係をFig. 6に示す。他のpositionでも、同様にして測定した垂直フェレー径と陽転した部分の面積の関係を二次式で近似して、Eq. (2)と組み合わせてEq. (3)の関係を導く。しきい値をずらしながら二値化の条件を変えたときに陽になる部分の面積とその部分の垂直フェレー径の関係は、粒子の立体的な特徴を表すひとつの特性で、球形粒子の場合には粒子の寸法によらず、 $S = \pi \cdot (f_v)^2 / 4$ となるが、不規則粒子

Table 1 Volumes measured from different angles in comparison with that obtained by way of buoyancy (unit: mm³)

direction	volume		
1-7	24.31		
2-8	23.56		
3-9	24.31	average	23.645
4-10	22.48	stnd. dev.	1.1698
5-11	22.09		
6-12	25.12		

Volume measured by way of buoyancy ; 21.6

では形状に応じた様々な関係となる。そして、球形粒子の表すプロットからの隔たりがその粒子の球形度を表す尺度であると考えられる。

Fig. 7は、position 1 と position 7 の映像に対して、それらの側面に当たる position 4 と position 10 で記録した映像と Eq. (2) の関係を用いて測定した、Eq. (3) でいう S と z の関係を表したものである。各曲線を z 方向に積分すれば Eq. (4) に従って position 1 から見た部分と position 7 から見た部分の体積が算定される。

本報告で述べた方法には、粒子の一部が歪んでいて等高線が単調に推移していない場合にも、Eqs. (1) ~ (3) の関係を用いてその部分の切り口の面積を近似的に推定できる特徴がある。しかし、粒子の歪んだ部分は、側面から見える場合とそうでない場合があり、本研究では前者の場合のみを対象にしている。

2. 4 浮力法による体積測定値との比較

測定の原理は **Fig. 8** に示すように、粒子を接着剤で直径既知の出来るだけ細い糸（たとえば釣り糸）につなぎ、液中に懸垂させたときの重量変化が浮力と同等になるので、この値を液体の比重で除したものが粒子の体積となる。この測定においては、一万分の一グラムの感度を有する電子天秤を使用した。それに先立ち体積が既知の物体（直径 6.4mm の球体）を測定して 0.1mm³ の精度で体積が求まることを確認している。その際、液の蒸発が観察されたので、予め測定条件における液の蒸発量の時間変化を測定しておき、天秤の指示値が安定してから数分間の数値変化を記録して蒸発の補正を行い結果を求めた。

各方向から測定したデータに光源とカメラのなす角度の補正を加えて算定した体積と、浮力法で測定した体積を比較すると **Table 1** のようになった。

Fig. 8 Volume measurement by way of buoyancy

以上の結果から、海砂粒子の体積は、測定方向によって異なる値となったが、これは主として粒子の表面に凹部が存在するためであると考えられる。したがって、各種の方向から測定した値のうちで最も小さい値が実際の値に近いと推定しうる。はたして、体積測定値の最小値は、浮力の測定によって得られた体積値と非常に良好な近似（誤差約 2%）となった。以上のことから、2 値化のしきい値をスライドさせることによって、粒子の深さ方向のスライス画像に相当するものが得られると考えられる。

2. 5 酸化アルミニウム造粒体の球形度評価

多数粒子の統計処理により、粒子群の三次元パラメータの一つである球形度の実用的評価法を検討する

Fig. 9 Plane view of inclined vibrating plate equipped with collectors numbered for preparation of Al_2O_3 granule and trajectories of particle depending on the friction factor between particle and the plate, assessed by a material point model

Fig. 10 Photograph of Al_2O_3 granules accounting for 12th collector

ために、球形を目標に調整された、かさ比重 2.66、平均粒径 1.245mm の酸化アルミニウム造粒体を試料粒子に選定した。

この粒子を、傾斜振動板で摩擦特性に応じて 13 の粒群に分割した。試料粒子の調整については、既報⁴⁾で詳述したのでここでは省略する。傾斜振動板の操作条件において、質点モデルで計算した粒子の相対摩擦係数に基づく軌道と捕集位置（コレクター番号）の関係を **Fig. 9** に示す。各粒群中の粒子を一つの粒子が示す多様な形態の一場面とみなし、以下のような手順で簡易的な三次元形状評価を試みた。まず、3cm × 5cm 程度のやや厚手の黒色紙片の片面に 1.5cm 角程度の両面接着テープを貼り、この紙片を無作為に各粒子群の集合体の中に差し込んでそのとき接触した粒子を粘着面に採取した。使用した接着テープ（NICHIBAN, NW-K15）は強力タイプで粘着力は相当強いので、粒子は接触したときの姿勢で固定されて

Fig. 11 Relationship between reference area and Feret's diameters in comparison with sphere

いると想定した。各試料について数面を取り、それらの各面から、一場面に最少十数個の粒子が存在している位置を選び、数場面を CCD カメラ（30 万画素）でコンピュータに取り込んだ。照明には十分遠方からの複数の電灯光を用い、カメラと光源の角度補正を省いた。粒子表面は光沢がないので、粒子の表面での光の反射の影響は認められなかった。記録された粒群の画像の一例を **Fig. 10** に示す。場面毎にしきい値を数段階にずらしながら撮影し、存在している各粒子について画像解析ソフトウェアを用いて、二次元投影像の面積と水平および垂直フェレー径、円形度の関係を検討した。各場面に多数の粒子がランダムな配向で存在しているときは、ある一つのしきい値では、粒子によってスライスのレベルが異なってくる。記録された画像データについては、どのスライスのレベルに対してもデータの数が同じになっていることが理想的であるが、多数の、異なった姿勢で固定された粒子を取り扱う以上、予めこの条件を満足するように画像を取り込むことは困難である。適切な取捨選択を施して各スライスレベルにおける画像数の分布を一樣にする方法も考えられるが、今回はこの操作は行わず、取り込んだ全てのデータを使用して、後に示すような定義に基づく球形度を算定した。その際、最小限、投影面積の分布が極端に偏っていないように努めた。この分布が例えば投影面積の大きい方に偏っていると、円盤状の粒子と球形粒子の判別が付かなくなることが考えられる。

Fig. 11 に、一例として 12 番のコレクターで採取された粒群について、測定した二次元投影面積と両フェレー径の関係を球形粒子の場合と比較した形で示す。両フェレー径の値は、粒子が球形ならばそのスライス面が円となるため等しくなるはずで、その値は（4・

Fig. 12 Three dimensional shape assessment for Al_2O_3 granule fractioned by inclined vibrating plate in terms of sphericity based on Feret's diameters or long and short diameters with reference to collecting location

$S/\pi)^{0.5}$ となる。したがって、この値からの両フェレー径の偏差は、粒子形状の球からの隔たりを表すものである。そこで、各粒群について、次のような計算式を用いて平均偏差率 τ を求めた。

$$\tau = \frac{\sum_{i=1}^N \sqrt{\left(\frac{Q_i - f_{v_i}}{Q_i}\right)^2} + \sum_{i=1}^N \sqrt{\left(\frac{Q_i - f_{h_i}}{Q_i}\right)^2}}{2N} \quad (5)$$

$$\text{ただし } Q_i = (4 \cdot S_i / \pi)^{0.5}$$

球形粒子の場合の球形度を 1 で表すと、偏差は 0 になるので、フェレー径に基づく球形度 p_f は

$$P_f = 1 - \tau \quad (6)$$

で定義することができると考えられる。

また、球形度はフェレー径の代わりに長径と短径をベースにして算定することもできる。その場合、Eq. (5) の f_{v_i} と f_{h_i} に対応する長径と短径の値を代入することになる。Fig. 12 に、13 箇所採取した粒群について算定したフェレー径、および長、短径に基づいた球形度を示す。フェレー径に基づく球形度と長、短径に基づく球形度は極めて良く一致していることがわかる。したがって、いずれを用いても実用的には差し支えない。Eqs. (5), (6) による球形度の定義は一つのマクロ的な量的表示であり、これだけでは十分な情報とは言えない。例えば、ある軸方向の偏差の分布といったような質的な情報を取り出すことが今後の課題である。一方、球形度には Wadell によって定義されたものが知られているが、それを求めるには多数の粒子の体積と表面積が必要で、これらの測定には相当の時間と手間が要求され、しかも粒子が微細になると画

像の記録に特別な工夫が必要なため実用的とは言えない。サンプル粒子群のなかに球形の標準粒子を入れて撮影する方法も考えられるが、その場合にはサンプル粒子と光の反射特性が同じ標準粒子を調達する必要がある。1 番目のコレクターで採取された粒子群の球形度が必ずしも最大になっていないのは、この粒子群の中には供給時に輸送方向と反対方向に運動し、壁面に当たって跳ね返ってきた粒子が多数含まれているためであると考えられる。すでに報告したように、ここで取り上げた酸化アルミニウム造粒体粒子のうち、1 番から 6 番までのコレクターで採取された粒子は、傾斜振動板上で確率的な挙動を示しており⁴⁾、そのような粒子の挙動を三次元的な形状パラメータと関連付けるのは興味深い。すなわち、ある程度以上の球形度を有する粒子がそのような粒子に属するものであると判断される。7 番から 13 番までのコレクターで採取された粒子の球形度と採取位置の関係は、傾向は明らかであるがばらつきが大きい。これは、一つには球形度の算定に用いたデータの数十分であるかという問題と関連していると考えられる。撮影の際固定された各粒子の姿勢はランダムでなければならず、そのランダムネスを裏付けるには十分な粒子数が必要となる。粒子形状が球形から隔たるほど粒子の姿勢の測定値への影響が大きくなることは直感的にも想像できる。球形度の高い粒子の運動には転がりの要素が大きいと考えられるので、その場合、粒子形状のわずかな欠陥が複雑な挙動につながり、傾斜振動板では球形度の高い粒子間でのシャープな分離は困難ではないかという見解に到達する。採取位置 1 から 8 までの産物の球形度測定値には、この見解を裏付けるものがある。

3. 結 言

しきい値スライド法によって測定した海砂粒子の体積は、測定方向によって異なる値となったが、これは主として粒子の表面に凹部が存在するためであると考えられる。したがって、各種の方向から測定した値のうちでは、最も小さい値が実際の値に近いと推定する。

体積測定値の最小値は、浮力の測定を通じて求めた体積値と非常に良好な近似となった。以上のことから、2 値化のしきい値をスライドさせることによって粒子の深さ方向のスライス画像相当を得ることが出来たと考えられる。そこで、ある粒子群の形状を三次元的に評価する場合、全ての粒子について多数の方向から撮影して得られた画像を解析して三次元のイメージ

を構築する代わりに、十分多数の粒子およびしきい値レベルについての二次元画像から得られる情報（例えば投影面積と、垂直，ならびに水平フェレー径の関係）が存在すれば，球からの隔たりの程度（偏差）を抽出することが出来，この偏差を規格化することによって，いわゆる球形度を求めることが出来ると考えられる。以上は凸型粒子にのみ適用可能な三次元形状評

価手法であるが，球形を目標に調整された酸化アルミニウム造粒体の形状評価において，実用的な役割を果たせたものと判断している。ここで導入した球形度はあくまで簡易的なものであり，さらに厳密な評価の尺度の導入と，より複雑な形状の粒子に対する取り扱い，今後の課題としたい。

Nomenclature

f_h : Feret's horizontal diameter	(m)	z : distance from surface of particle in depth direction	(m)
f_v : Feret's vertical diameter	(m)	θ : configuration angle between recording- and lighting- directions	(rad)
l : perimeter of two dimensional image of particle	(m)	μ : friction factor between particle and inclined vibrating plate	(-)
L : length corresponding to side view of a cross section of particle	(m)	ρ : specific gravity of liquid used for the measurement of buoyancy	(kg/m ³)
N : number of images to be accounted for evaluation of sphericity	(-)	τ : averaged deviation ratio of fractioned particles in terms of Feret' diameters from spheres having equivalent profile areas	(-)
P : sphericity of particle	(-)	suffix	
Q : circle diameter based on the projected area of reference particle	(m)	f : Feret's diameter	
S : projected area of two dimensional particle image	(m ²)	i : ordinal number	
V : volume of sample particle	(m ³)		
W : mass of sample particle	(kg)		

References

- 1) Friesem A. A. and U. Levy : "Fringe formation in two-wavelength contour holography", *Applied Optics*, **15**, 3009-3020 (1976)
- 2) Kubota, T. : "Horogurafyi Nyuumon", p. 109, Asakura Shoten (1997)
- 3) Yatagai, T. : "Ouyou Kougaku Hikari Keisoku Nyuumon", p. 140, Maruzen (1998)
- 4) Iwata H., S. Endoh, H. Ohya and S. Koyanaka : "Behavior and Possible Shape Arrangement of Al₂O₃ Granules on Inclined Vibrating Plate", *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **36**, 606-612 (1999)