

時系列解析を応用した碎屑物の円磨度の測定方法

大 矢 芳 彦

1. はじめに

砂礫および砂礫岩の研究は、その碎屑物の成因や運搬プロセス、さらには堆積環境などを知る手掛りとなり、古くから堆積物の流出機構や堆積岩の古環境の推定などに役立ってきた。中でも砂礫の形状や大きさに関する研究はその基礎をなすものであり、1960年代の堆積学の発展に伴って議論が重ねられ、1990年代にはほぼ確立した。そして、それ以降は目立った進展はみられず、最近では砂礫の組成鉱物の岩石学的な手法による定量分析などが主流をなし、砂礫の形状や大きさなどのデータはあくまで補助的なものとなっている。しかしながら、最近の太陽系探査の進展によってその研究は新たな段階を迎えようとしている。すなわち、月や火星はもちろんタイタンやイトカワなどの衛星や小惑星などの表面の画像データが大量に得られ、研究が行われるようになったからである。そして、多くの場合サンプリングが不可能なので、その天体の成因や形成過程を推定するためには、画像中の碎屑物の大きさや形状などに頼らざるを得ないのである。例えば、Vile ら（2005）は火星のローバーから得られた画像データを Heslop ら（2004）が提唱した *facet mapping* のテクニックを利用して、火星の Ephrata Fan の礫が地球における河川成の堆積物と類似していると結論づけ、さらに Gusev Crater の礫については、風化期間が長く様々なプロセスの

影響を受けているが、河川成ではないのではないかと推定している。このように、実際にサンプルを採取することが不可能な礫や碎屑物においては画像解析が研究の重要な指標となるのである。

さて、碎屑物の形態 (shape) に基づく指標には一般的に、表面構造 (surface texture)、円磨度 (roundness)、球形度 (sphericity)、形状 (form) の4種類がある (Blatt ら, 1980)。この中で、円磨度は砂礫の形成プロセスやその後の風化および移動プロセスの結果として表現されるもので、それを解析することは各天体の形成プロセスおよびその後の歴史、または古環境の推定に極めて重要である。円磨度については古来から研究されており、様々な円磨度の測定方法 (Wadell, 1935, Krumbein, 1941, Powers, 1953 など) が提案されてきたが、現在一般的に Krumbein や Powers などが示した円磨度のイメージスケールが用いられている。この方法は測定する礫がそのプレートに示された像のどれに最も近似しているかによって円磨度を測定するもので非常に短時間で測定することができる反面、主観的な要素がかなり入るという問題点がある。特に人間の感覚として球形度が高い (球形に近い) 礫は円磨度も高いと判断してしまう傾向があるのは否めず、また個人差もあるので詳細に円磨度の数値で議論するのはあまり意味がない場合が多い。

より客観的な方法としては Wadell (1932) の方法、すなわち、碎屑粒子の角に内接する円の半径の合計を碎屑粒子に内接する最大円の半径で割ることにより算出する方法、があるが、多量の碎屑物を扱う場合は膨大な時間を要してしまう。

これらのことから、筆者は以前より短時間で客観的に円磨度を算出する方法について模索しているが、今回は二次元の画像データから一般に市販されている画像解析ソフトなどを用いて比較的短時間に客観的に円磨度を測定する方法について紹介してみたい。さらに、この手法で行なわれた Krumbein のプレートとその応用として行なわれた Powers のプレートの結果より、2つのプレートがある指標で定量的に比較できるかどうかを試み

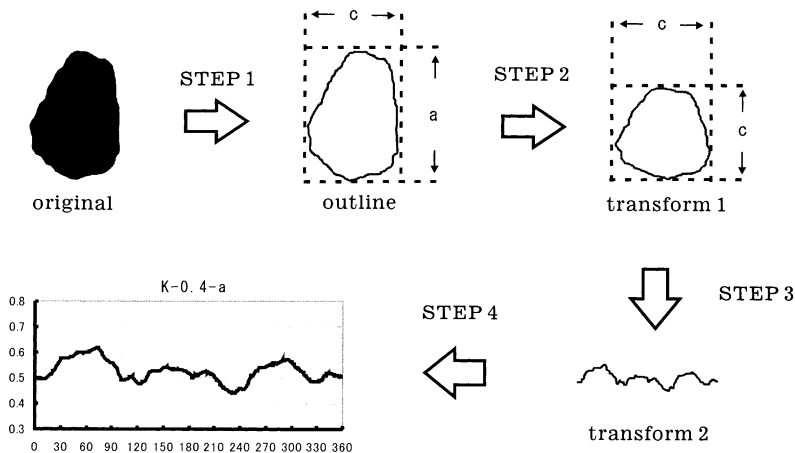


Fig. 1 Transforming processes from sillhouette of a pebble in Krumbein's plate to a graphic form in this study.

たのでこれについても報告をすることにする。

2. 方法

今回の円磨度の測定対象として Krumbein (1941) の Plate 1 “pebble images for visual roundness”の礫のシルエット図を使用した。この図を用いた理由としては、1)円磨度測定に広く利用されており普遍性が高いこと、2)円磨度が0.1~0.9まで9段階に分割されており他の指標（例えば Powers, 1953）よりデータ解析に向いていること、3)個々の円磨度の値にそれぞれ9つの画像があり、各円磨度値の平均値などが取れること、4)いわゆる「割れ円礫」（broken pebbles）も別枠で描かれており、普通の礫との比較ができること、などである。

作業としては、まず、プレート上に存在する礫のシルエット画像87個をスキャナーを用いて300×300 pixel 程度の大きさの画像データとして取り

込んだ (Fig. 1, original)。得られた礫画像を画像ソフトを用いてその輪郭を抽出した後、礫画像の向きを縦方向が長径(a)になるよう回転させた。さらに各礫画像の大きさを統一するために画像の拡大・縮小を行い横方向の径(c)の長さを固定 (300 pixel) した (Fig. 1, STEP 1 及び outline)。次に、球形度 (sphericity) の影響を取り除くために、最大径 (a) = (c) となるように垂直方向のみ縮小させる変形作業を行った (Fig. 1, STEP 2 及び transform 1)。これらの変形作業を行うことにより、礫の大きさや球形度の影響を排除した礫の形状 (form + roundness) を比較することができる。次に、このほぼ円形に近い礫の輪郭画像の中心を極と考え画像ソフトの極座標変形を行い、円形状の礫の外周を折れ線グラフの形状に変形させた (Fig. 1, STEP 3 及び transform 2)。そして、この折れ線グラフ状画像をグラフ画像自動数値化ソフトを用いて数値化した。y 軸を半径 $0.5c$ の円周ラインが $y=0.5x$ になるようにし、x 軸は円周であるので360に分割し、その x の各値を取り込みグラフ化を行った (Fig. 1, STEP 4 及び Fig. 2)。最後に、これらの数値データ及び得られたグラフの解析を行った。

本研究の特徴として、円磨度は礫表面のばらつき度という仮定に立ち、これらのデータを時系列データとして統計処理した点である。解析は自己相関法と移動平均法の2つの手法を用いた。まず自己相関は得られた数値データの周期性の存否を確認するために行われた。周期性については円磨度に関係するもの、或いは形状に関係するもの、或いは画像変形処理などに伴うノイズ的なものが考えられ、その特徴を把握しておくことが次の段階の解析に必要不可欠であるからである (Fig. 3)。得られた周期性について考慮した後に、ある基準線におけるばらつきを調べるために、移動平均法で基準線を求め、各値との標準偏差を算出した。このデータから円磨度と標準偏差の相関について算出し、もし十分な相関が見出されれば、それを他の円磨度の指標 (Powers, 1953など) などに応用してみるということを試みた。

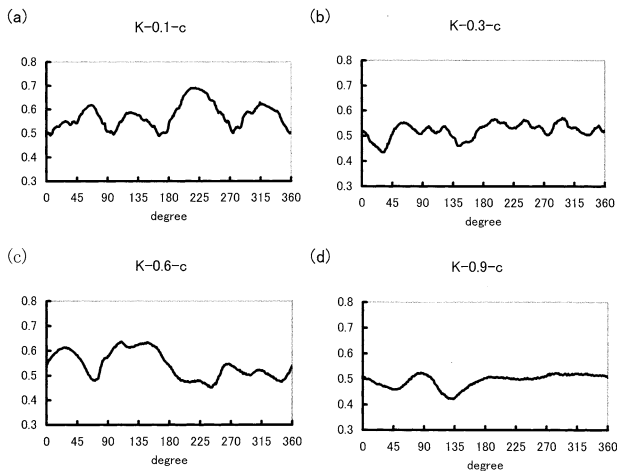


Fig. 2 Examples of the transformed line from the outline of pebbles shown in Krumbein's plate at degree. (a) is an example of roundness 0.1 by Krumbein (1941), (b) is for 0.3, (c) is 0.6 and (d) is 0.9, respectively.

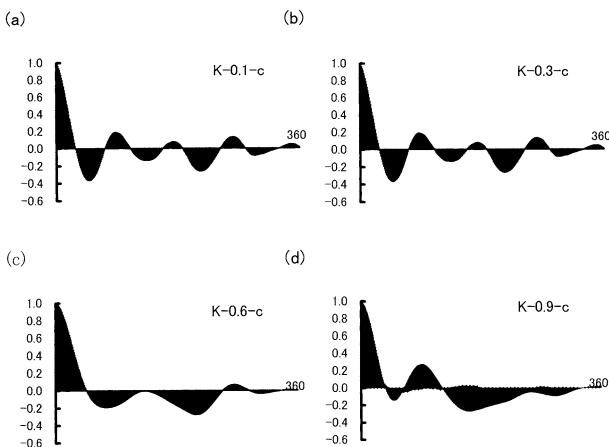


Fig. 3 Examples of Correlogram obtained from outline data of pebbles. (a) is an example of roundness 0.1 by Krumbein (1941), (b) is for 0.3, (c) is 0.6 and (d) is 0.9, respectively. These are the same samples as Fig. 2.

3. 結果

礫のシルエットを変形して得られたグラフの例を Fig. 2 に示す。この例では、Krumbein の最も円磨度が低い 0.1 (Fig. 2-(a)、K-0.1-c、K は Krumbein の K、次の小数は円磨度、最後のアルファベットは同じ円磨度の礫を区別するための便宜上の名)、円磨度が高い 0.9 (Fig. 2-(b))、その中間の 0.3 (Fig. 2-(c)) と 0.6 (Fig. 2-(d)) のものであるが、大極的に眺めた場合、大きな周期性が認められるものや一部だけ上下に振れているものなど様々である。この大きな曲線の変化は特に円磨度とは無関係な礫の形状 (form) を表していると考えられる。この大きな曲線の変化の特徴は、割れ円礫に明瞭に認められ、円磨された部分と破断された部分がはっきり区分できる (Fig. 4-(a))。少し視野を絞って見るとこれらのグラフの最大の特徴として円磨度の低いものから高いものへ小さな凹凸が減少している傾向があることがわかる。この小さな凹凸が円磨度を表していると考えられる。

次に各礫についての自己相関係数のコレログラムを作成しその傾向を分析した (Fig. 3)。Fig. 3 のコレログラムに用いた礫の例は比較可能なように Fig. 2 と同じものを表示してある。全体的な傾向としては、1.0 から急激に値が減少し、その後低い相関あるいは負の相関で波打つという傾向にあ

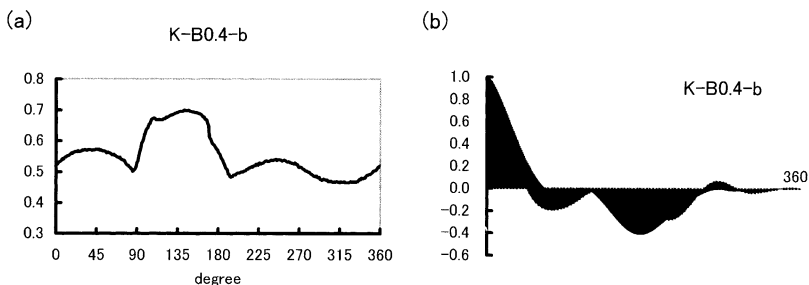


Fig. 4 Example of the transformed line (a) and the change in autocorrelation coefficient (b) for broken pebbles.

り、特別な周期性は認められない。Fig. 5-(a)は各円磨度における各礫の自己相関係数の最大値（最初の部分は除く）を表したものであるが、すべて0.5未満であり、円磨度ごとの特徴も認められない。この結果は、礫のシルエットおよびそれを変形させたものに明瞭な周期性がなく、得られたデータが変形過程や誤差によって生じる周期とは独立しているということを示しており、ある意味で妥当な結果であると思われる。

得られた数値データから円磨度を算出するには、グラフで認められる細かな凹凸を数値化する必要がある。そのため、ここでは移動平均と元の値との偏差を求めるという手法を用いることにした。すなわち、円磨度が高い＝表面がなめらか＝グラフの凹凸が少ない＝移動平均との偏差が小さい、また逆に、円磨度が低い＝表面が角ばっている＝グラフの凹凸が多い＝移動平均との偏差が大きい、という仮説を考えてみた。ここでの問題は移動平均項数（MA）をどのように決定するかである。MAの値を小さくすれば、画像変換に基づくノイズの影響を受けることが考えられ、逆にMAの値を大きくとれば礫の円磨度ではなく、形態の影響を受けることになる。また、自己相関係数が低いポイントの方が、礫固有の周期から独立していると考えることができる。さらに、今回のいわゆる時系列として扱っているグラフは、礫の一周であり、便宜上360に分割している。そのためMAの値は便宜上15や30の倍数が適切ではないかとも考えられる。これらのことを考慮して、まず、自己相関係数が最初に最小になるポイントを調べた結果、Fig. 5-(b)に見られるように15～70度の範囲となり、その平均値は41.37であった。したがってこれらの値に近いMAが適当であると考え、MA=15、30、45、60について各円磨度で礫を3個ずつ選び、その移動平均との標準偏差を算出した（Fig. 6）。その結果、どの移動平均をとっても円磨度と標準偏差との相関が高い値を示した。特にMA=30の時、 $r=0.946$ ($r^2=0.895$)、MA=45の時、 $r=0.936$ ($r^2=0.876$) と非常に高い相関を示した。以上の考察および結果から、今回は移動平均項数としてMA=30を用いることにした。

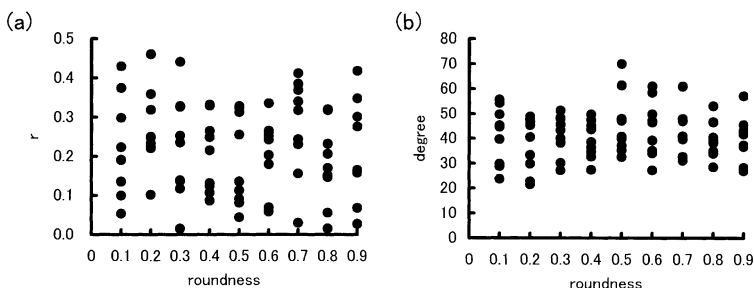


Fig. 5 Relationship between roundness and the maximum autocorrelation coefficient in each pebble (a). Graph (b) shows the relationship between roundness and the smallest degree where the autocorrelation coefficient indicates zero value.

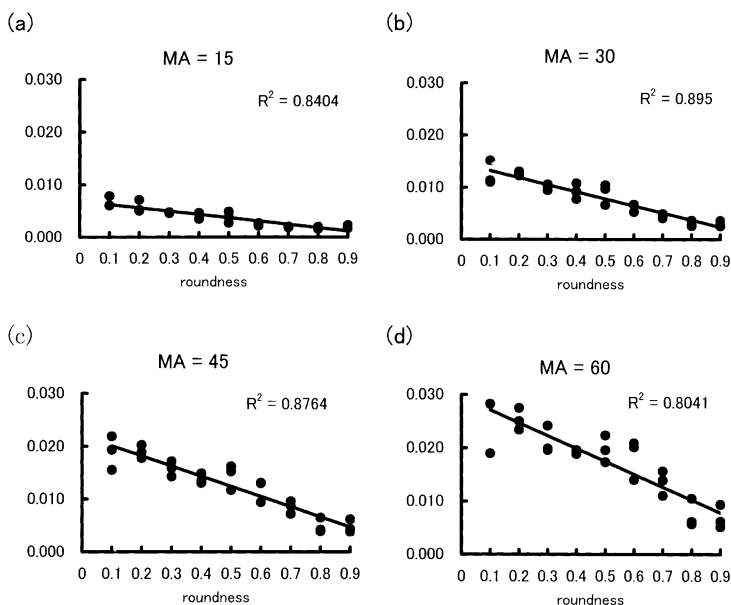


Fig. 6 Examples of the relationship between roundness and the standard deviation which is based on original value and the moving average. (a) shows the relation graph at moving averages 15, (b) is for 30, (c) for 45 and (d) for 60, respectively.

割れ円礫を除く81個の礫についての $MA=30$ における標準偏差と円磨度の関係を Fig. 7-(a) に示す。円磨度の高い礫ほど標準偏差は減少し、その相関係数は $r=0.947$ の極めて高い値となった。この関係式は次のように表される。

$$y = -0.0139x + 0.0148 \quad (1)$$

ここで y は $MA=30$ における標準偏差、 x は Krumbein による円磨度である。すなわち、礫の2次元画像データがあれば、今回の作業を機械的に行うことにより、 y が求められ、上記の式に代入することにより、円磨度が客観的に得られることになる。

さて、Krumbein のプレートに載せられている5個の割れ円礫について同様の処理をしたところ Fig. 7-(b) の黒三角の位置にプロットされた。割れ円礫を加えると相関はわずかに下がるが、ほぼ他の礫と調和的であることが認められた。このように割れ円礫は主観的に（肉眼だけで）円磨度を決定するには困難であるが、今回の手法を使うことにより一般の礫と同様に客観的に円磨度を求めることができることが示唆された。

4. 応用

今回の手法は他の円磨度の指標とはどのような関係にあるのか、Krumbein のプレート同様によく試用されている Powers (1953) のプレートに応用することを試みた。Powers (1953) では円磨度を低いほうから「very angular」、 「angular」、 「subangular」、 「subrounded」、 「rounded」、 「well-rounded」の6段階に分けている。そして Wadell (1935) で得られた値と対応させてさらにそれらのクラスの幾何平均を求めている (Table 1)。さらに段階ごとに球形度が高い碎屑粒 (high sphericity) と球形度が低い碎屑粒 (low sphericity) の2つの碎屑粒 (particle) が図示されている。この10個の

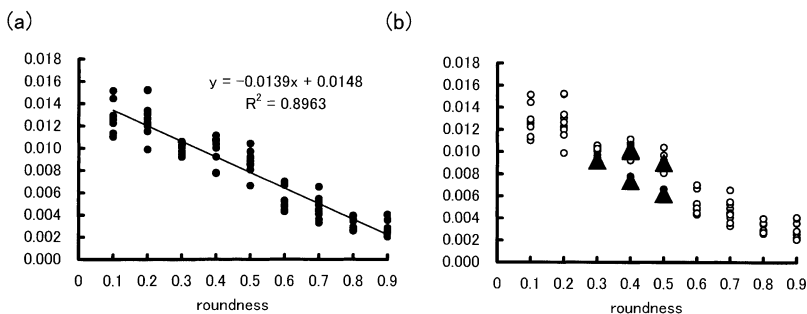


Fig. 7 (a) shows the relationship between roundness and the standard deviation at moving average = 30. The regression curve is $y = -0.14x + 0.0148$ with correlation coefficient $r = 0.947$. The black triangles in (b) indicate the value of broken pebbles.

碎屑粒の画像を今回試みた Krumbein のと同じ手法で行った結果を Table 1 および Fig. 8 に示す。Fig. 8-(a)は横軸を very angular から well rounded までの段階で表示してある。この結果から、Krumbein で行ったときと同様に円磨度が高くなるにしたがい、MA = 30での標準偏差が小さくなることがわかる。また、球形度が小さいものが大きなものより標準偏差が小さい値を示す傾向がある。用いられた画像は幾何平均値のものであるため、横軸を幾何平均値に置き換えたものがFig. 8-(b)である。この場合の近似曲線は次のような対数曲線となる。

$$y = -0.0073 \log(x) + 0.0019 \quad (2)$$

ここで y は標準偏差、 x は円磨度の等級 (roundness grade) である。この場合も $r = 0.960$ と極めて高い相関が認められる。

これら (1) 式と (2) 式および Table 1 から、Krumbein と Powers の円磨度の関係を示したのが Fig. 9 である。このことから Powers の very angular は Krumbein の 0.1 に、angular は 0.2 に、subangular は 0.3 に、subrounded は 0.4

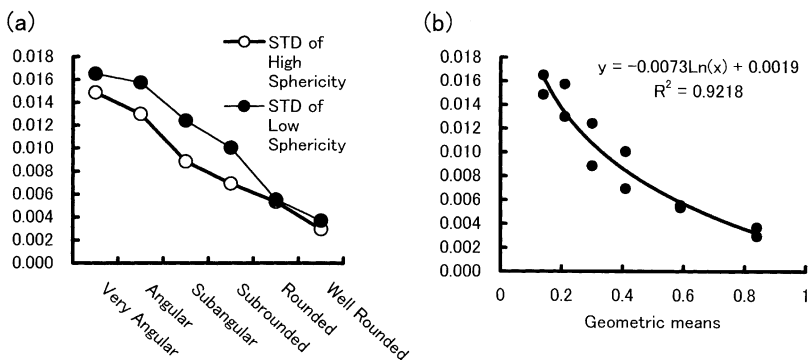


Fig. 8 The relationship between roundness based on Powers' classification and standard deviation at moving average 30. (a) shows standard deviation of high sphericity (white circles) and that of low sphericity (black circles). (b) shows the same data as (a), but horizontal axis is converted to geometric means by Powers. The regression curve is $y = -0.0073 \cdot \log x + 0.0019$ with correlation coefficient $r = 0.960$.

Table 1 Comparison between Power's roundness and the standard deviation at MA=30 obtained from Powers' plate.

	Very Angular	Angular	Subangular	Subrounded	Rounded	Well Rounded
Class Intervals*	0.12–0.17	0.17–0.25	0.25–0.35	0.35–0.49	0.49–0.70	0.70–1.00
Geometric Means*	0.14	0.21	0.30	0.41	0.59	0.84
STD of High Sphericity	0.0148	0.0130	0.0088	0.0069	0.0053	0.0029
STD of Low Sphericity	0.0165	0.0157	0.0124	0.0100	0.0055	0.0037

*Powers (1953)

−0.5に、rounded は0.6–0.7に、wellrounded は0.8–0.9にほぼ対応していることが認められた。また、標準偏差を基準に考えると、Powers の場合はほぼ均等に分類されているのに対し、Krumbein のプレートは円磨度の低い方の範囲が広い傾向にあることも確認できる。

5. まとめ

現在まで円磨度の測定は、時間を消耗する手法以外はほとんど観測者の主観によるもので定量的な意味に乏しく、他のデータの補足的な役割に留まっていたが、今回の手法を用いることにより、客観的で定量的な円磨度の解析が可能になったと思われる。今回は一般的に円磨度の指標として用いられている Krumbein のプレート进行分析し、それを Powers の指標に応用し

た。その結果、

- 1) 市販のソフトで簡単に 2 次元画像をグラフ化し、データ解析ができること、
- 2) グラフ化した個々の礫の輪郭データは、個々の形状の影響とは別に細かな凹凸が認められ、これが円磨度と密接な関係があること、
- 3) 個々の礫データにおける自己相関分析では特に明瞭な特徴は認められず、周期性も存在しないこと、
- 4) 移動平均と実測値との標準偏差は円磨度が低いほど大きく、円磨度が高いほど小さいこと、
- 5) 移動平均値 (MA) は円周であること、自己相関分析、円磨度と標準偏差との相関などから MA=30 が適

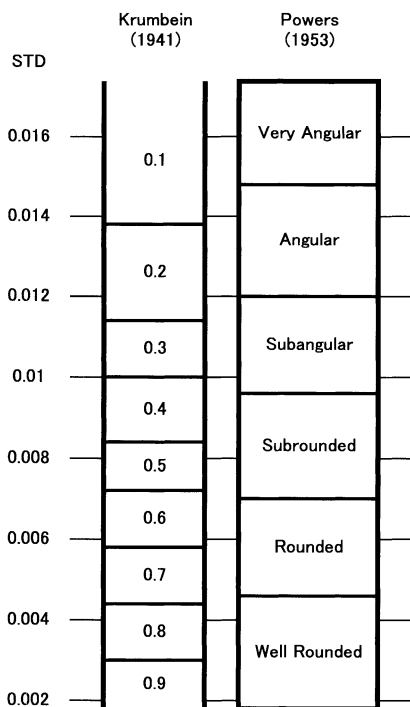


Fig. 9 Comparison between Krumbein's roundness and Powers' roundness based on the standard deviation at MA=30.

- 当であること、
- 6) MA=30での円磨度と標準偏差の相関は極めて高い ($r=0.947$) こと、
 - 7) MA=30での円磨度(x)と標準偏差(y)の関係式は $y = -0.0139x + 0.0148$ で表されること、
 - 8) Powers のデータでは、球形度が高いと標準偏差は相対的に低い値を示すこと、
 - 9) Powers のデータでも円磨度と標準偏差の関係は極めて高い相関関係 ($r=0.960$) にあること、
 - 10) この場合の関係式は、 $y = -0.0073\log(x) + 0.0019$ で表されること、
 - 11) 標準偏差を基準にすると Powers の方が均等にクラスの分割がなされていること、などが明らかとなった。

文献

- Blatt, H. Middleton, G. and Murray, R. (1980) *Origin of Sedimentary Rocks*, Prentice-Hall, 782pp.
- Borradaile, G. (2003) *Statistics of Earth Science Data*, Springer, 351pp.
- Heslop, E. E. M, Viles, H. A. and Bourke, M. C. (2004) Understanding Rock Break-down on Earth and Mars: Geomorphological Concepts and Facet Mapping Methods, *Lunar and Planetary Science XXXV*, abstract 1445.
- Krumbein, W. C. (1941) Measurement and Geological Significance of Shape and Roundness of Sedimentary Particles, *Jour. Sediment. Petro.*, vol.11, 64-72.
- Powers, M. C. (1953) A New Roundness Scale for Sedimentary Particle, *Jour. Sediment. Petro.*, vol.23, 117-119.
- Viles, H. A., Brearley, J. A., Bourke, M. C. and Holmlund, J. (2005) What Processes have Shaped Basalt Boulders on Earth and Mars? Studies of Feature Persistence Using Facet Mapping and Fractal Analysis, *Lunar and Planetary Science XXXVI*, abstract 2237.

Wadell, H.A. (1932) Volume, Shape, and Roundness of Rock-Particles, *Jour. Geol.*
Vol.40, 443-451.

ABSTRACT

Measuring Method of Roundness of Clasts Based on Time Series Analysis

Yoshihiko OYA

Roundness is one of the useful information derived from sedimentary clasts. As the measurement method, however, is ambiguous and objective, the discussion based on roundness has been not quantitative but qualitative until now.

This study shows new measurement method of roundness, which is obtained by transform from two dimension image of clasts in time series data. In concrete terms, the silhouettes of pebbles in Krumbein's plate are graphed with software on the market, and the data can be analyzed using time series methods.

As a result of that, an especially plain feature was not admitted in the autocorrelation analysis in individual pebble data. But it is found that the lower roundness shows the larger standard deviation of difference between the moving average (MA) and the physical value. The correlation of roundness and the standard deviation with MA = 30 is extremely high ($r=0.947$). At that time, the relational expression of roundness (x) in MA = 30 and the standard deviation (y) is shown with $y = -0.0139x + 0.0148$. The data from Powers' report has also the relation between roundness and the standard deviation in extremely high correlation ($r = 0.960$). The relational expression in this case is shown by $y = -0.0073\log(x) + 0.0019$.