

粗粒土質材料と視覚印象図の形状評価～フラクタル次元を中心として～

名城大学大学院 学生員 姫野 圭、神谷圭吾
名城大学理工学部 正会員 板橋一雄

1. はじめに

土の物理的・力学的性質に影響を与える要因は、構成粒子自体の基本的性質と構成粒子の集合状態の二つに分けられ、前者の要因の一つに粒子形状が挙げられている。その粒子形状の評価には種々の方法が提案されてはいるが、それらの長所、短所や物理的性質などとの関係については、まだ十分には検討されていないと思われる。そこで、本研究では、粒子形状の評価方法を整理するとともに、研究の第一段階として、粒子形状評価に対するフラクタル解析の有効性の検討を試みた。この目的のために、ここでは、Krumbein, Powers, Pettijohnが提案した円磨度の視覚印象図の98個の粒子図形と原位置から採取した粒子形状の異なる3種類の粗粒土質材料（海砂・川砂・まさ土、各40粒子）のフラクタル解析を実施し、得られたフラクタル次元と円磨度との関係、ならびに各土質材料の粒子形状の特徴を明らかにしたので、報告する。

2. 粒子形状の表現方法とフラクタル解析

2.1 従来の粒子形状の表現方法

粗粒堆積物の粒子形状の表現に関する研究は、堆積学の分野で始められたと思われる。多くの研究者により、三次元的な粒子形状の表現方法や球形度、円磨度が定義されている。しかし、円磨度を求めるための作業は煩雑で、時間がかかるため、一般には視覚的印象により円磨度を推定する図が種々提案されている。こうした視覚的印象図は、原位置において円磨度の値を推定するために、用いられている。

粒子形状を評価する研究には、上記の研究のほかに、吉村による凹凸係数FU値、フーリエ係数に基づく方法、フラクタル次元に基づく方法などがあるが、従来の粒子形状の表現方法に関して文献調査を行なった結果、現在のところ、下記の6つに分類できる。それらの方法と特徴を示すと次のようになる。

①三軸径(a, b, c)による表現…粒子が収まる直方体の箱を考え、その各辺の長さ(長軸a、中軸b、短軸c)で表現する方法である。最も安定する方向に粒子を置き、その高さが短軸cとなる。また、粒子の平面形状を最も細長くなる長方形で囲み、その各辺を長軸a、短軸bとなる。こうした三軸の長さの種々の比率の関係によって、粒子形状を分類する試みであり、Zingg(1935)やSneed & Folk(1958)の研究がある。

②球形度S (sphericity)による表現…礫が運搬されるときに、徐々に扁平さが無くなり、球状に近くなる現象を捉えるために、提案されている。Wadell(1932)¹⁾は、粒子の表面積とそれと同等の体積を持つ球の表面積の比と定義している。一般には、二次元で評価され、最大投影面と同じ面積を持つ円の直径と最大投影面を囲む最小円の直径との比として計測されている。この定義から考えると、球形度Sは表面の凹凸状態というよりは、粒子形状の全体的特徴を表現しているものと思われる。

③円磨度RN(roundness)による表現…礫が運搬される時、岩片の角が削られ、徐々に丸くなる。こうした現象を捉えるために、粒子の角のみに着目したものが円磨度である。Wadell(1932)は、粒子の全ての角(n個)に内接する円の半径の平均値($\sum(r_i/n)$)と粒子に内接する最大円の半径(R)との比として、定義した。この定義によれば、円磨度RNは粒子の全体形状というよりは、角の丸さを表現しているものと思われる。これは、礫に対して提案されたが、計測には時間が掛かるとともに、原位置で求めたり、より細粒の砂粒などに適用するには、かなりの困難が伴うため、Krumbein(1941)²⁾は、円磨度を視覚的に決定する視覚印象図を提案している。視覚印象図については、Powers(1953)³⁾やPettijohn(1975)⁴⁾によっても提案されている。

Shape Analysis of the Coarse Granular Materials and the Roundness Images

based on the Fractal Dimension, HIMENO Kei, KAMIYA Keigo and ITABASHI Kazuo (Meijo Univ.)

④吉村の凹凸係数FUによる表現…吉村と小川⁵⁾は、金属組織学の分野の形状表現方法を参考にし、平面の粒子外形の面積と外周長の比を考えている。円の場合を基準(FU=1)として、凹凸の度合いが激しくなるほど小さくなる凹凸係数FUを定義している。

⑤フーリエ係数による表現…粒子の平面図形をその重心を中心とした極座標表示し、そのデータのフーリエ解析を行ない、種々の係数で表現する試みである。Schwarcz & Shane(1969)⁶⁾は、粒子の平面図形をフーリエ解析し、フーリエ係数の二乗和や絶対値の和、データと計算値の誤差がある一定値になる次数などを、形状パラメータとして提案している。その他にも、Meloy(1977)⁷⁾、山口・遠藤ら(1979)⁸⁾の研究などがある。

⑥フラクタル次元FDによる表現…Mandelbrot(1977)⁹⁾が新しい幾何学としてフラクタル幾何学を提案して以来、海岸線の評価、岩盤・コンクリート・アスファルトの亀裂の評価など、種々の領域でフラクタル次元が求められている。粒子形状に関しては、Kaya(1978)¹⁰⁾、Orford & Whalley(1983)¹¹⁾やVallejo & Zhou(1995)¹²⁾の研究がある。特に、Vallejoらは、Krumbeinの円磨度に関する視覚印象図のフラクタル解析を行ない、求めたフラクタル次元が円磨度と一次式の相関関係にあることを示している。

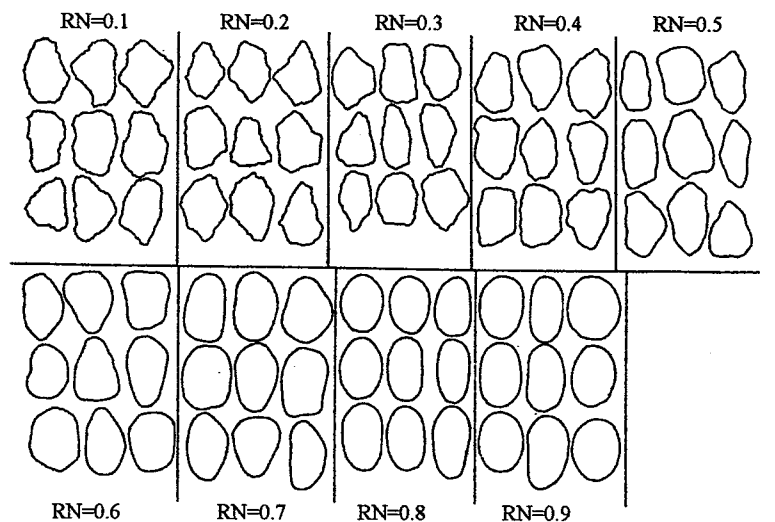
以下の本論文では、簡単な一つの係数で表現できるフラクタル次元を用いるが、その他の種々の粒子形状評価方法との比較に関しては、今後の研究課題としたい。

2.2 提案されている円磨度に関する視覚印象図

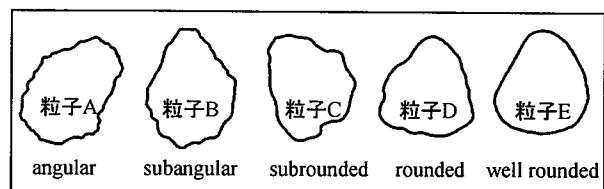
前述したように、円磨度を求めるには、非常に煩雑で時間の掛かる作業が伴う。そこで、円磨度に関する視覚印象図が提案され、用いられている。図-1(a)には、Krumbein(1941)が示した円磨度の視覚印象図を表わしてある。円磨度を0.1から0.9までの9段階に区分し、各円磨度毎に9個の粒子形状のサンプルを示している。また、その後、Powers(1953)やPettijohn(1975)が図-1(b), (c)に示す視覚印象図を提案している。Powersは、円磨度の値を示してはいないが、円磨度を6段階(Very Angular, Angular, Sub-angular, Sub-rounded, Rounded, Well-rounded)に区分し、球形度の異なる2粒子、合計12個の粒子形状を示している。また、Pettijohnも、円磨度の値を示してはいないが、円磨度を5段階(Angular, Sub-angular, Subrounded, Rounded, Well rounded)に区分し、それぞれ1個の粒子を示している。その他にも、Rittenhous(1943)の球形度に関する視覚印象図、Krumbein & Sloss(1951)による円磨度と球形度との視覚印象図などがある。

2.3 フラクタル解析

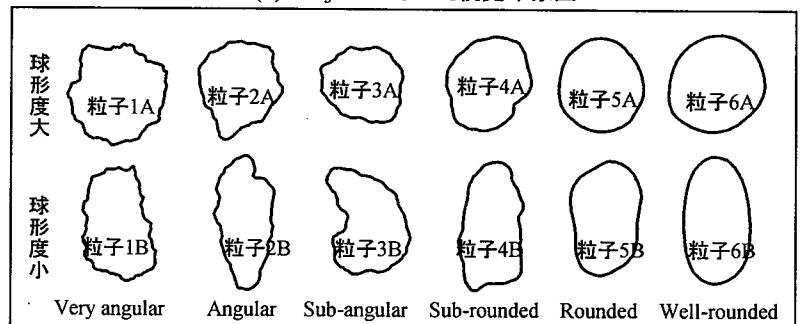
Mandelbrotがフラクタル次元を提案して以来、種々の分野において、フラクタ



(a)Krumbeinが示した円磨度RNの視覚印象図



(b)Pettijohnの示した視覚印象図



(c)Powersの示した視覚印象図

図-1 粒子形状に関する種々の視覚印象図

ル解析が実施され、種々の方法が提案されている。ここでは、折れ線で近似する方法(Structured Walk Method)を用いるので、図-2に示す模式図に従って、フラクタル次元FDの求め方を簡単に示すこととする。

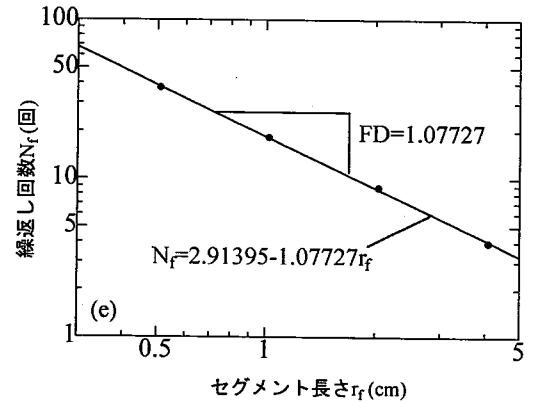
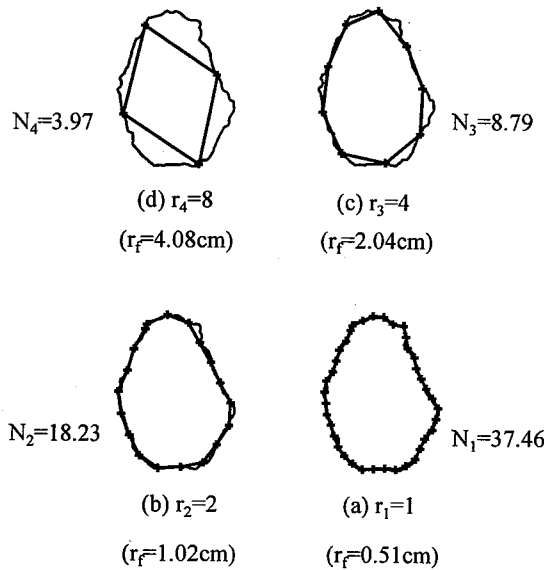


図-2 フラクタル次元の求め方(模式図)

一定線分長さ $r_1=1$

(実距離0.51cm,これをセグメント長さという)として、粒子外形を一周するために必要な回数(繰返し回数という)を求めると、 $N_1=37.46$ 回となる。なお、少数以下の部分は、最後の残りの距離を表現している。同様に、同図(b)では、一定線分長さを2倍とした、 $r_2=2$ (実距離1.02cm)の場合を示しているが、繰返し回数 $N_2=18.23$ 回となり、 N_1 の(1/2)倍以下となっている。これは、粒子表面を粗く読み取ったため、表面の微細な凹凸部分が読み飛ばされて、少ない回数によって粒子外形を1周できたことを意味している。以下同様に、線分長さを(c) $r_3=4$ 、(d) $r_4=8$ として、この操作を繰返すが、やはり、それぞれの繰返し回数は N_1 の(1/4)倍以下、(1/8)倍以下となっており、この低下傾向が粒子形状や粒子表面の凹凸状態の程度を表わすこととなる。

以上の計算により、ここでは4組のデータ(r_i, N_i)が得られることになり、両対数グラフである同図(e)を描くことができる。図に示すようにデータは図上で相関性の高い直線関係を示し、この直線勾配の絶対値がフラクタル次元FDとなる。もしも完全な直線に対して上述の操作を行なうと、セグメント長さが半分になれば、繰返し回数は2倍になるので、この図上で勾配は1となることが明らかである。しかし、図の粒子の場合には、 $FD=1.07727$ となっており、 $FD=1$ よりわずかに大きくなっている。なお、有名なコッホ曲線のフラクタル次元は $FD=1.26186$ である。

3. 視覚印象図のフラクタル解析

3.1 データ作成方法と解析方法

3名の研究者が示した円磨度の視覚印象図(図-1に示した98粒子)の図形をデジタイザーによってパソコンに入力し、ビットマップ(CRT上で指定した点の座標がわかる)によって外形座標を、5~6ビット間隔の点として読み込んだ。その結果、図形の大きさや凹凸具合によって異なるが、各図形が約260~450点の座標値で表現できた。なお、このデータ点数の多少は、計算されるフラクタル次元や後述する最小セグメント長さなどに大きな影響を及ぼす可能性があるが、今後の検討課題としたい。

フラクタル次元を求める方法には、種々の方法があるが、ここでは、図-2に示したように、粒子外形を一定長さ(セグメント長さ r_i という)の線分の折れ線で近似する方法(Structured Walk Method)とした。すなわち、種々のセグメント長さ r_i を用い、それに対応する繰返し回数 $N_i(r_i)$ を求める方法である。

この方法に対しては、開始点の位置、粗視度の上限・下限の問題が指摘されている¹³⁾が、ここでは、解析の開始点は固定した(開始点の相違による結果の違いについては、今後検討したい)。また、粗視度の下限としては、今村ら¹³⁾によれば、データ間隔の平均値にほぼ等しいことが指摘されているので、ここでは最小データ間隔を考慮し、セグメント長さ r_i の最小値を4ビットとした。まず最初に、 $r_i=4$ ビットとし

て、粒子外形を一周するに必要な繰返し回数 N_f ($r_f=4$)を求めた。この最小セグメント長さの場合の繰返し回数は、粒子によって異なるが、 N_f ($r_f=4$)=480~620回の範囲となった。なお、この方法では一般に最終点は始点に一致せず、4ビット以下の半端な距離が最後に残る。そこで、その差をその時のセグメント長さ(今の場合には $r_f=4$)によって除した値を繰返し回数に加えたため、繰返し回数は、一般に整数値ではなくなる。また、図形の倍率は、1ビット当たり0.0085cmとして解析結果を表示することとした。

今村ら¹³⁾によれば、セグメント長さを取る回数は、1オーダ上がる間に5~7点を選択することで十分であると指摘されているが、ここでは、より詳細な検討をするために、以上のような計算を、セグメント長さを1ビットずつ増加させ実施し、各セグメント長さ r_f に対応する繰返し回数 N_f (r_f)を求めた。また、粗視度の上限値としては、Vallejoらの計算結果との比較を目的としたため、 $N_f \approx 5$ 回とした。この時のセグメント長さは、粒子によって異なるが、 $r_f=313\sim 461$ ビット(実距離2.66~3.92cm)の範囲となっている。この結果として、各図形に対して、繰返し回数 N_f とセグメント長さ r_f の組合せデータが約310~460点の範囲で取れた。

3.2 解析結果

図-3には、フラクタル解析結果の例として、Krumbeinの示した視覚印象図の2図形の場合、すなわち円磨度 $RN=0.1$ の最も表面凹凸が激しい場合と円磨度 $RN=0.9$ の最も表面が滑らかな場合の例を示している。繰返し回数 N_f (回)は、セグメント長さ r_f (cm)の増加に伴い、両対数グラフ上でほぼ直線的に減少していることがわかる。前述したように、この両対数グラフの直線勾配の絶対値がフラクタル次元 FD となるが、図を詳細に見ると、考慮する区間によって直線勾配がわずかに異なっている。今回解析した図形では、全ての事例において、繰返し回数あるいはセグメント長さの区間を幅広く取るほどその直線勾配は小さくなり、フラクタル次元 FD が小さくなっている。これは、このプロットがわずかに上に凸になっていることを示しており、コッホ曲線($FD=1.26186$)のように完全な自己相似性を有していないことの現われである。粗視度の程度を低くすると、すなわち、セグメント長さが長い部分においては、粒子の全体形状の影響がフラクタル次元の値に現われ、 $FD=1$ (直線のフラクタル次元)よりもかなり高い値を示している。逆に、粗視度の程度を高くすると、すなわち、セグメント長さが短い部分においては、フラクタル次元は1に近づいている。このことは、元の粒子図形を5~6ビット間隔の折れ線で近似したことによる当然の帰結である。しかし、どの範囲を取ったとしても、(a)と(b)の両図を比較すると、円磨度の高い(表面凹凸の少ない)粒子の方が小さなフラクタル次元 FD を示しており、この値によって、粒子形状や表面凹凸の相違を表現できる可能性の高いことがわかる。

すべての範囲の関係を考慮するために、図上での二次曲線関係を仮定することや拡張フラクタル次元を導入することも可能であるが、以下では、繰返し回数 $N_f=5\sim 600$ の範囲でのフラクタル次元 FD について示すこととする。ただし、Vallejoらの結

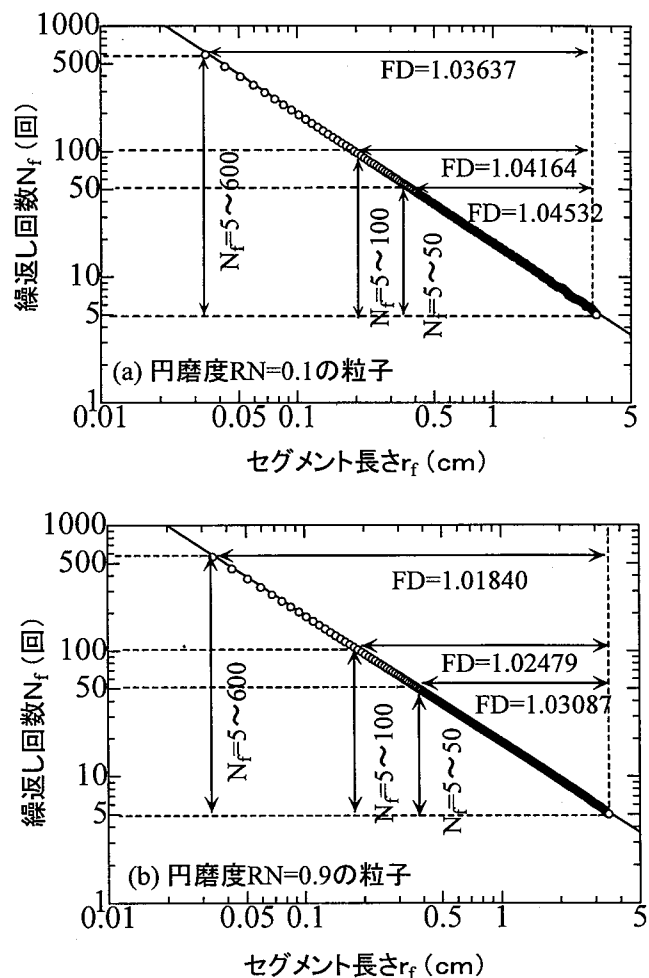


図-3 繰返し回数とセグメント長さとの関係

果と比較する場合には、Vallejoらが用いたと思われる繰返し回数の範囲 $N_r = 5 \sim 50$ で求められる値を用いることとする。

表-1は、Krumbeinの円磨度の視覚印象図の粒子図形をフラクタル解析した結果であり、各円磨度毎のフラクタル次元FDの平均値、標準偏差、変動係数、最小値、最大値が示してある。また、図-4には、フラクタル次元FDとKrumbeinの円磨度RNとの関係が示してある。

この図の回帰分析の結果、式(1)で示すような、比較的相関性の高い二次式が得られており、粒子の表面凹凸を表現しているKrumbeinの円磨度RNに代わって、フラクタル次元FDを用いることができることを示唆している。

$$FD = 1.05251 - 0.04934 \cdot RN + 0.01276 \cdot RN^2$$

(相関係数0.847) … (1)

ただし、円磨度が0.1~0.5の間では、フラクタル次元の幅はかなり広く、それ以上の円磨度になると急激に変動幅が小さくなっており、このことは、円磨度が小さく表面凹凸の激しい粒子ほど、種々の粒子形状や表面凹凸があることが原因と考えられる。

さらに、フラクタル次元の下限值を見ると、円磨度区分が大きく3区分

(①0.2以下の範囲、②0.3~0.5の範囲、③0.6以上の範囲) される。また、上限値を見ると、円磨度区分が5区分 (①0.3以下の範囲、②0.4~0.5の範囲、③0.6、④0.7、⑤0.8以上の範囲) される。そこで、こうした各円磨度毎のフラクタル次元の下限值や上限値に基づいて、円磨度を再区分すると、図中に示したA~Fの6区分にまとめることができる。すなわち、Krumbeinが示した円磨度の視覚印象図をフラクタル次元の分布範囲から見ると、円磨度RN=0.1と0.2の粒子、円磨度RN=0.4と0.5の粒子、円磨度RN=0.8と0.9の粒子には、相違が認められないことになる。

図-4の下側には、PettijohnとPowersが示した視覚印象図のフラクタル解析の結果が示してある。ただし、両者の示した視覚印象図では、前述したようにKrumbeinのように円磨度を数値として示していないので、計算されたフラクタル次元FDと回帰式(1)を用いて、対応する円磨度を求め、円磨度の軸上に図示してある。Pettijohnの示した5つの粒子図形(円磨度区分5、粒子A~E)の円磨度を見ると、粒子Dと粒子Cで円磨度が逆転し、ほぼ同じ円磨度を示していることが特徴的である。すなわち、フラクタル次元に基づけば、粒子DとCの相違が認められず、円磨度は4区分が適切であると考えられる。ただし、ここに現われた円磨度の逆転は、フラクタル次元を計算する際の繰返し回数の範囲が関係する可能性が残されているので、今後検

表-1 Krumbeinの視覚印象図のフラクタル次元の一覧表

円磨度	平均値	標準偏差	変動係数	最小値	最大値
0.1	1.04429	0.00676	0.00647	1.03637	1.05210
0.2	1.04642	0.00625	0.00597	1.03584	1.05629
0.3	1.04070	0.00962	0.00924	1.02610	1.05666
0.4	1.03558	0.00664	0.00641	1.02736	1.04479
0.5	1.03123	0.00702	0.00680	1.02433	1.04661
0.6	1.02455	0.00431	0.00420	1.01888	1.03287
0.7	1.02357	0.00341	0.00333	1.02014	1.02917
0.8	1.02014	0.00221	0.00216	1.01800	1.02449
0.9	1.02046	0.00282	0.00276	1.01797	1.02575

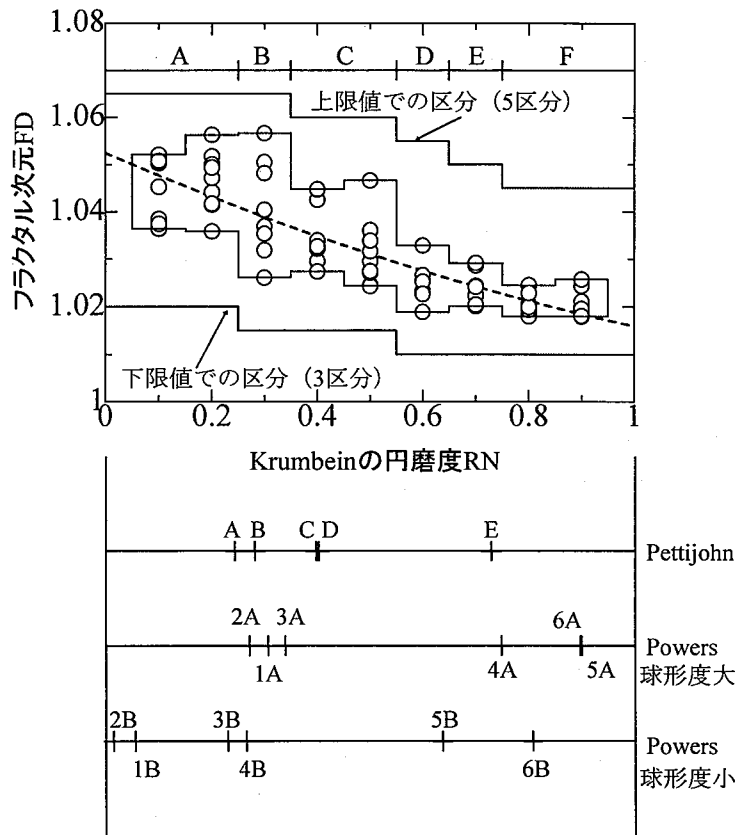


図-4 フラクタル次元と円磨度との関係 ($N_r = 5 \sim 600$ 回)

討したい。

一方、Powersは、球形度の異なる2組(円磨度6区分、合計12個)の粒子図形を示しているの、球形度別に見ると、粒子1Aと粒子2A、粒子5Aと粒子6A、粒子1Bと粒子2Bの円磨度が逆転しており、フラクタル次元に基づけば、4～5区分が適切であると考えられる。さらに特徴的な結果は、球形度が異なると、計算される円磨度が大きく異なることである。このことは、フラクタル次元が円磨度だけではなく、球形度にも大きく左右されることの現われである。すなわち、ここで計算したフラクタル次元は、繰返し回数の範囲を $N_i=5\sim600$ 回と広くしているため、粒子の全体形状の特徴から微小な表面凹凸の特徴までを含んだ数値となり、こうした球形度による相違が現われたものと考えられる。逆に言えば、 N_i の範囲の取り方によって、主に球形度に対応したり、円磨度に対応するフラクタル次元が求められることとなる。その詳細な検討は、今後の課題としたい。

Vallejoら^{1,2)}は、繰返し回数がほぼ5～50程度の範囲を用いて、セグメント長さを4段階のみとして(直接示していないが、文献のFig. 6から推定した)、Krumbeinの円磨度の視覚印象図のフラクタル解析を実施している。そこで、Vallejoらの結果と比較するために、繰返し回数 $N_i=5\sim50$ の区間でのフラクタル次元を求め、フラクタル次元FDと円磨度RNとの関係を図-5に示

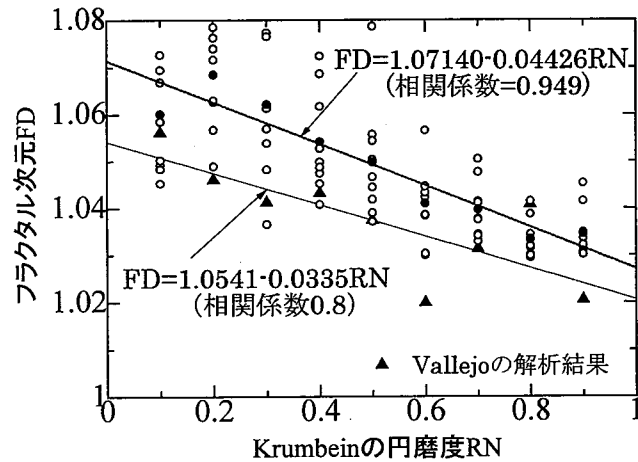


図-5 フラクタル次元と円磨度との関係($N_i=5\sim50$ 回)

した。Vallejoらは、フラクタル次元の平均値のみを示し、両者の関係式として、一次式を提案しているので、著者らの結果も同様に表現してある。

各円磨度でのフラクタル次元の値やそのばらつきは、図-4に較べると大きくなっている。また、各円磨度毎のフラクタル次元の平均値については、円磨度0.8の場合を除けば、著者らが計算したフラクタル次元の方が、Vallejoらの値よりも高い値を示している。平均値のみに基づく回帰分析結果も次式のように異なっており、著者らの結果の方が相関性も高い。

$$\text{(Vallejoらの結果)} \quad FD=1.0541-0.0335\cdot RN \quad (\text{相関係数}0.8) \quad \dots(2)$$

$$\text{(著者らの結果)} \quad FD=1.0714-0.0443\cdot RN \quad (\text{相関係数}0.949) \quad \dots(3)$$

こうした差異が現われた原因はわからないが、元の図形の離散データの作成方法やフラクタル解析の条件の相違などが考えられる。

4. 粗粒土質材料のフラクタル解析

4.1 データ作成方法と解析方法

粒子の形状解析に用いた実際の粗粒土質材料は、海砂、川砂、まさ土である。海砂は三重県熊野市の海岸(熊野灘、鬼が城付近)、川砂は岐阜県笠松町地内の木曾川の川原(河口より42km上流)、まさ土は愛知県藤岡町地内のまさ土斜面から、それぞれ採取した。採取した試料をふるい上で水洗いし、JIS規格ふるいでふるい分け、粒径4.00～4.75mm、粒径2.00～2.36mmの間の粒子を集めた。なお、これらはJIS規格ふるい一つ分の範囲である。各粒子を最も安定する状態で顕微鏡下に置き、約9倍に拡大し、スケールとともに写真撮影を行ない、その写真をスキャナーでパソコンに取り込んだ。最終的な拡大率は、粒径4.00～4.75mmの粒子の場合1cm当たり約1100ビット、粒径2.00～2.36mmの場合1cm当たり約2300ビットとなった。なお、粒子の大きさに関わらず、一粒子を300～400点で表現している。これは、前述のKrumbeinの円磨度の視覚印象図の場合とほぼ同じになるように考えたためである。

海砂・川砂・まさ土の代表的な粒子形状データを図-6に示してある。一見しただけで、粒子形状や粒子表面の凹凸状態の相違が明らかである。海砂は丸みを帯びており、粒子表面も滑らかである。一方、まさ土は円形から最も外れ、粒子

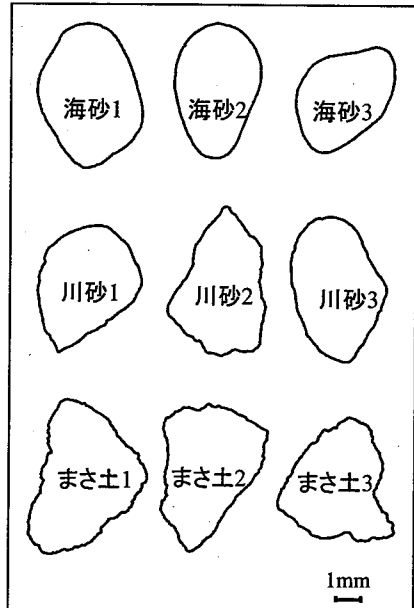


図-6 海砂・川砂・まさ土の形状表面にも顕著な凹凸が認められる。また、川砂は両者の中間的な形態を示している。

材料別(海砂・川砂・まさ土)、粒径別にそれぞれ20粒子、合計120粒子のフラクタル解析を行なったが、その解析の条件は、円磨度の視覚印象図の場合とほぼ同様である。

4.2 解析結果

粗粒土質材料のフラクタル解析結果の例として、海砂・川砂・まさ土の代表例を図-7に示してある。視覚印象図の解析結果と同様、セグメント長さ r_f (cm)の増加に伴い、繰返し回数 N_f (回)は、図上でほぼ直線的に減少している。また、実際の粗粒土質材料の粒子形状に対しても、完全な自己相似性が成立していないため、与える繰返し回数の範囲によって、得られるフラクタル次元の値は異なっている。どの粒子においても、繰返し回数の範囲を幅広くするほどフラクタル次元の値は小さくなっている。

さらに、同一の繰返し回数の範囲に注目し、対応するフラクタル次元を海砂・川砂・まさ土で比較すると、図-6で見た視覚的印象に合致して、海砂の値が最も小さく、まさ土の値が最も大きくなっており、実際の粗粒土質材料に対しても、その粒子形状や表面凹凸がフラクタル次元によって表現できることを示唆している。

表-2には、それぞれの20粒子のフラクタル次元の平均値、標準偏差、変動係数、最小値、最大値が示してある。この表から、材料が同じであれば、粒径が異なっても、フラクタル次元の平均値は大差のないこと

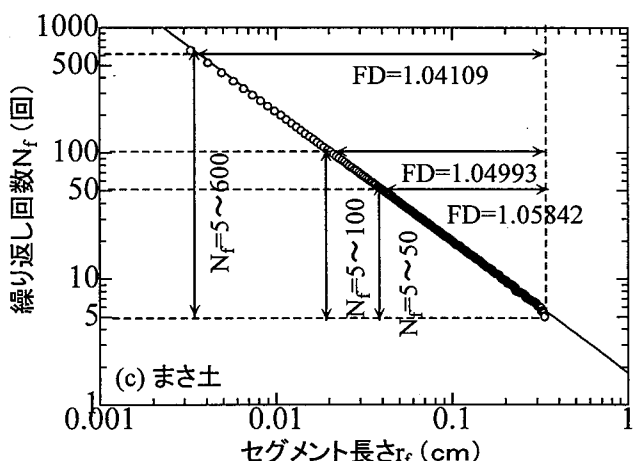
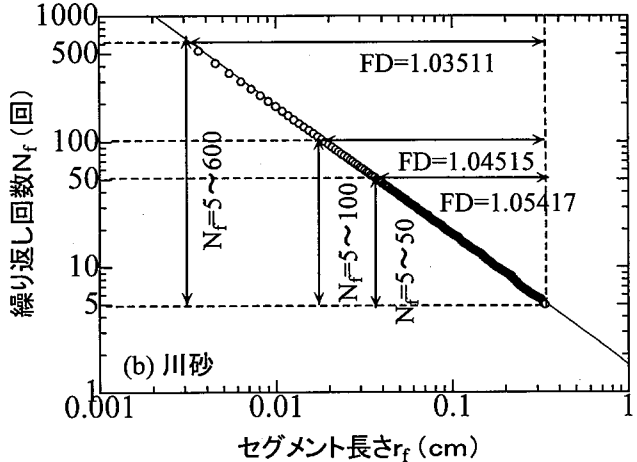
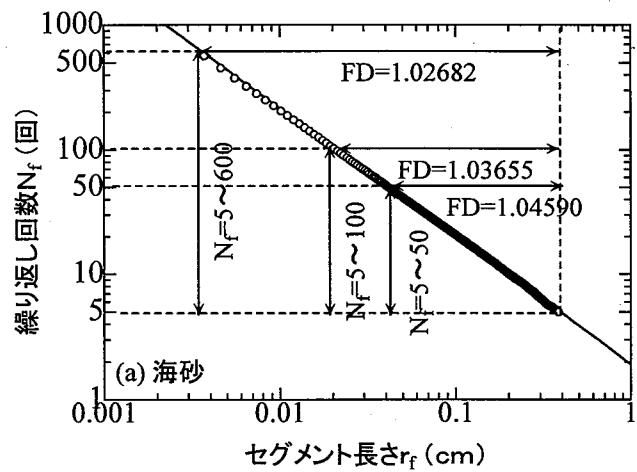


図-7 繰返し回数とセグメント長さの関係 (海砂・川砂・まさ土の場合)

表-2 フラクタル次元の一覧表 (海砂・川砂・まさ土)

材料	粒径(mm)	平均値	標準偏差	変動係数	最小値	最大値
海砂	4.00~4.75	1.02311	0.00395	0.00386	1.01713	1.02884
	2.00~2.36	1.02469	0.00459	0.00448	1.01910	1.03426
川砂	4.00~4.75	1.03295	0.00683	0.00661	1.01916	1.04491
	2.00~2.36	1.03477	0.01275	0.01232	1.02139	1.08012
まさ土	4.00~4.75	1.04217	0.00865	0.00830	1.02633	1.06058
	2.00~2.36	1.04316	0.01064	0.01020	1.02744	1.05828

がわかる。ただし、標準偏差や変動係数は、どの材料においても、粒径の小さい方が大きくなっており、小さな粒子の方が粒子形状や表面凹凸の変動幅の広いことが現われている。

フラクタル次元の値が粒径に依存しないと仮定すると、それぞれの材料の40粒子のフラクタル次元の平均値は、海砂：FD=1.02390、川砂：FD=1.03386、まさ土：FD=1.04267 となり、粒子形状や表面凹凸がこれらの値の相違となって表現されていることがわかる。

5. あとがき 本研究では、はじめに従来の粒子形状の表現方法をまとめ、各方法の特徴を示している。粒子形状に関する研究の第一段階として、フラクタル次元を用いて粒子形状を評価することを目的としている。そこで最初に、Krumbeinの示した円磨度の視覚印象図のフラクタル解析を行なったが、フラクタル次元と円磨度との関係が明らかになり、粒子形状をフラクタル次元によって表現できる可能性を示した。ただし、Krumbeinの示した結果と異なることについては、今後の検討が必要となった。また、Powersの示した粒子形状のフラクタル解析の結果から、フラクタル次元は円磨度のみではなく、球形度にも関係することが明らかになった。すなわち、粒子のフラクタル次元は、全体的な粒子形状と粒子表面の微細な凹凸の両者に影響される値であることが予想された。

さらに、実際の粗粒土質材料のフラクタル解析の結果より、視覚的印象に対応したフラクタル次元が得られ、実際の粗粒土質材料に対しても、その粒子形状をフラクタル次元で表現できる可能性が明らかになった。ただし、繰返し回数範囲の取り方やその他の粒子形状評価方法との比較など、種々の検討項目が残されているので、今後検討したい。最後に、本研究のデータ作成には、本学4年の大石康雄、土屋典子、井上直人、魚住勇治、平野浩二、前野浩孝、塚本将康の協力を得た。記して、謝意を表す。

参考文献)

- 1) Wadell, H. : Volume, Shape, and Roundness of Rock Particles, Jour. Geol., Vol. 40, pp. 443-451, 1932.
- 2) Krumbein, W. C. : Measurement and Geological Significance of Shape and Roundness of Sedimentary Particles, Jour. Sedimentary Petrology, Vol. 11, No. 2, pp. 64-72, 1941.
- 3) Powers, M. C. : A New Roundness Scale for Sedimentary Particles, Jour. Sedimentary Petrology, Vol. 23, No. 2, pp. 117-119, 1953.
- 4) Pettijohn, F. J. : Sedimentary Rocks (3rd Edition), p. 57, 1975.
- 5) 吉村優治・小川正三 : 砂のような粒状体の粒子形状の簡易な定量化、土木学会論文集、No. 463/III-22, pp. 95-103, 1993.
- 6) Schwarcr, H. P. and K. C. Shane : Measurement of Particle Shape by Fourier Analysis, Sedimentology, Vol. 13, pp. 213-231, 1969.
- 7) Meloy, T. P. : Fast Fourier Transforms Applied to Shape Analysis of Particle Silhouettes to obtain Morphological Data, Powder Technology, Vol. 17, pp. 27-35, 1977.
- 8) 山口賢治・遠藤茂寿・古閑二郎・岡本幸道 : 粒子形状の特徴(1)～フーリエ解析による粒子形状の測定～、理化学研究所報告、第55巻第1号、pp. 1-10、1979.
- 9) Mandelbrot, B. B. 著(広中平祐監訳) : フラクタル幾何学、日経サイエンス社、1985.
- 10) Kaya, B. H. : Specification of the Ruggedness and/or Texture of a Fine Particle Profile by its Fractal Dimension, Powder Technology, Vol. 21, pp. 1-16, 1978.
- 11) Orford, J. D. and W. B. Whalley : The use of the Fractal Dimension to Quantify the Morphology of Irregular-shaped Particles, Sedimentology, Vol. 30, pp. 655-668, 1983.
- 12) Vallejo, L. E. and Y. Zhou : The Relationship between the Fractal Dimension and Krumbein's Roundness Number, Soils and Foundations, Vol. 35, No. 1, pp. 163-167, 1995.
- 13) 今村文彦・西山英彰 : 拡張フラクタル次元を用いた海岸線形状の解析、海岸工学論文集、第37巻、pp. 299-303, 1990.