

# 捨石および捨石マウンド表面の 形状特性に関する考察

口田 登

正会員 運輸省第四港湾建設局 環境技術管理官 (〒750 山口県下関市竹崎町4-6-1)

捨石および捨石マウンド表面の形状の基本的な特性を、統計幾何学的手法により考察した。①捨石のための新しい3種類の形状表示法を提案し、その結果をより汎用性の高い指標であるフラクタル次元で整理すれば実用的価値が高いこと、②捨石マウンド表面の凹凸(不陸)の統計的な性質を、スペクトル解析によって検討した結果、捨石の形状特性との間に密接な関連性があること、および均し施工の形態(均し無、機械あるいは荒均し、本均し)に応じたフラクタル次元が設定できることを示した。

**Key Words** : rubble, rubble mound, configuration property, fractal

## 1. ま え が き

港湾施設には数多くの種類と型式があるが、混成式防波堤や重力式係船岸で代表される重力式構造物は、わが国の港湾施設の中で最も普及しているものの一つである。その標準的な構造様式は、海底地盤上に石材で台形状の基礎マウンドを築造し、その上にケーソン等を据付け堤体としたものである。ここで、基礎マウンドに用いられる石は海上から捨て込んで施工されるので捨石と呼ばれており、また、基礎マウンド自体についても一般に捨石マウンドと呼ばれている。

捨石マウンドは構造上の重要な構成要素であるが、その諸特性に関しては必ずしも定量的な解明がなされているとはいえず、これ迄に蓄積された設計、施工実績に基づく経験則や、類似した現場データから得られた知見により、実務的な対応が図られてきている。

一方、近年の港湾・海洋開発においては、大水深や厳しい波浪条件の地点に大規模な重力式構造物を急速かつ安全に建設することを可能とするために、捨石マウンドの機械化施工の進展が強く要請されている。また、最近の技術水準の高度化の大きな流れの一つとして、港湾を含めた多くの工学分野において、構造物の設計体系への限界状態設計理論や信頼性理論等の導入が検討されている。港湾の重力式構造物の設計・施工体系に、こうした新しい施工法や理論を導入するに際しては、従来以上に精緻かつ合理的な技術的検討を行わなければならない。

港湾工事で使用される捨石は、天然材でかつ1個の質量が5~800kg(直径約10~150cm)と大きく、ロックヒル

ダムに用いられる石材と類似している。こうした捨石から構成されたマウンドの力学特性(せん断強度や破碎性状等)を把握することを目的として、近年ロックヒル材<sup>1)</sup>に準じた試験が実施されデータ蓄積が図られつつあるが、形状特性については実用的な測定方法が確立していないこともあって、未解明な部分が多く残されており、早急に解決すべき課題となっている。

本研究では、捨石および捨石マウンド表面の形状の基本的な特性を、統計幾何学的手法により考察している。

## 2. 捨石の仕様と形状特性

### (1) 捨石の仕様と使用実態

防波堤や係船岸の基礎捨石工事に使用される石材に関する仕様は、「港湾工事共通仕様書<sup>2)</sup>」の規定によっている。その内容は、偏平細長でなく、風化凍壊のおそれのないものでなければならないとされており、石の種類・比重・質量は、特記仕様に規定することとなっている。

運輸省の各港湾建設局の本工事に適用されている特記仕様における捨石の使用実態を調べると、石の種類は、比重が大きく、堅硬で耐久性に富むものが好ましいことから、花こう岩・安山岩が指定されることが多いが、各港の事情により他の種類も使用されている。比重は2.6または2.5以上としているものが多い。質量については、1個当りの範囲で規定されており、各港湾建設局により様々な仕様となっている。最も広い範囲の規定は5~200kg/個(質量比で40倍)、最も狭い範囲は30~60kg/個(2倍の範囲)である。また、範囲の規定での最小・最大の質量は、5kg/個と800kg/個である。

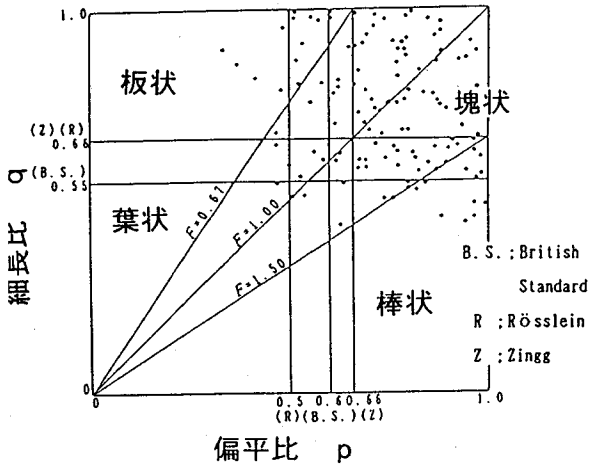


図-1 捨石の形状特性  
(偏平比 p, 細長比 q と形状係数 F の関係)

こうした使用実態からみて共通仕様や特記仕様の規定は、地域特性に応じた必要最小限度のものといえるが、反面どの程度の偏平細長まで許容し得るのかについては曖昧であり、今後の材料供給環境の動向からみて、より明確な形状に関する評価指標が必要となってきた。

## (2) 形状表示法と捨石の形状実態

### a) 形状表示法に関する既往の研究

捨石のような幾何学的に取扱い難い不規則な表面をもつ塊の形状を数値で表わそうとする努力は、これ迄に多くの研究者によってなされてきている。最上によれば、次のような研究成果が報告されている<sup>3)</sup>。

G. Lees は、粒状体を構成する粒子の形状を表わす指標として、次のような3種類の係数を考えた。

$$\text{偏平比 (p)} \quad p = c/b \quad (1)$$

$$\text{細長比 (q)} \quad q = b/a \quad (2)$$

$$\text{形状係数 (F)} \quad F = p/q = ac/b^2 \quad (3)$$

ここに、a:粒子の最大直径(長辺長と呼ぶ)、b:粒子の中間直径(中辺長)、c:粒子の最小直径(短辺長)

Fが1より大きければ細長状であり、逆に小さければ偏平球状であることを示している。またp、qを両軸にし図-1のようなゾーニングを行い、区分された4象限をそれぞれ塊状、板状、葉状、棒状に分類している。

これらの境界となるp、qの値は、英国の標準規格では  $p=0.6$ 、 $q=0.55$  とされ、Rössleinは  $p=0.5$ 、 $q=0.66$  を、Zinggは  $p=q=0.66$  を提案している。

この他にも Wadell、Fischerらによって、数々の形状を表わす指標が提案されている。具体的には、粒子のシルエットの各々の突起部での内接円に関する測定値等か

ら、あらかじめ定義された計算式に基づいて形状係数を求めようとする方法であるが、いずれもその取扱い上の煩雑さからみてあまり実用的とは思われない。

### b) 捨石の形状の実態

港湾工事で使用されている捨石の形状の実態が体系的に調査された成果はあまりないが、荘司が実施した全国調査は数少ない貴重なデータである<sup>4)</sup>。この調査は第一～第四港湾建設局管内の代表的な採石場をそれぞれ一箇所づつ選定し、捨石の質量や形状を測定したものであり、その岩種は、輝緑岩(1箇所)、花こう岩(2箇所)、硬質砂岩(1箇所)となっている。

この調査において荘司は、各港湾建設局の質量規格を考慮した産地毎の質量段階を設定し、その段階別に測定した質量分布を加積百分率で整理している。そして、この結果を質量加積曲線として描くことにより、いずれの産地でもほぼ直線に近い関係が確認されることを報告している。また、質量段階別に代表的な捨石を5個づつ選定し、個別に質量と形状(長辺長、中辺長および短辺長)を測定したデータもとりにまとめている。

この捨石の形状測定データ(全データ数は124個)を活用し、式(1)と(2)で求めた寸法比を図-1にプロットしてみた。この点の分布状況より、調査対象となった捨石の形状は概括的にみて、塊状のものが多いといえる。また、p、qの平均値を全データから求めればいずれも0.74であり、これは、図-1中に示されている形状係数  $F=1.0$  (原点を通る45°勾配線)の直線上に平均値があることを意味している。このように、塊状領域のほぼ中央部に平均点が位置し、かつ大多数のデータが同領域内に分布している捨石とは、共通仕様にある偏平細長でないとの条件に適合するものであったといえよう。

しかし、図-1の分類図および Zingg等の分類規格によって捨石形状を的確に把握しようとするのは、幾つかの問題を含んでいると考えられる。何故ならば、定義の曖昧な代表辺長の測定、特に中辺長(b)をどこで測るのかについては全く感覚的な判断とならざるを得ないからである。また、求められたp、qから形状を分類したとしても、板状や棒状に属する捨石が必ずしも不適格材とはいえない。これは、図-1で分かるように、形状係数Fの変化に応じて直線は、原点を中心として放射状に動く反面、2本の直交する直線で区分された4象限によって形状分類は行われているため、直交点の周辺に位置する形状の捨石は、板状や棒状に属していても偏平細長と評価するのは必ずしも適当ではないと考えられるからである。

### (3) 捨石の新しい形状表示法と形状特性

捨石のための新しい形状表示法の提案をするに際して、表示法はその目的に応じて適宜使い分けが可能であれば大変都合が良いので、以下では3種類の新しい方法を提示し、考察を行うこととする。

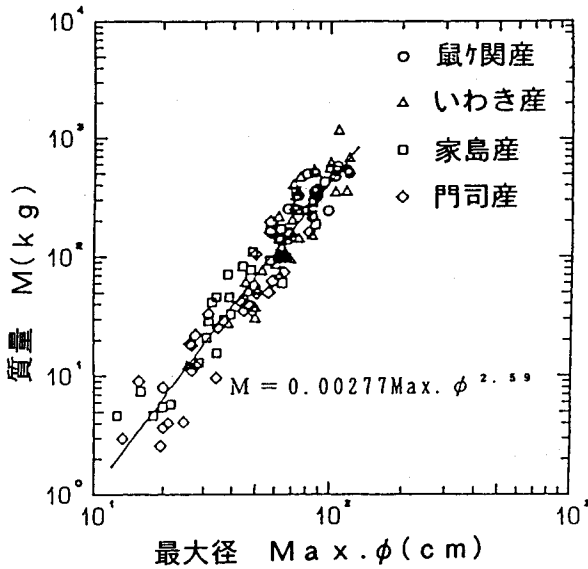


図-2 捨石の最大径Max. φと質量Mの関係

a) 捨石の質量と代表辺長の関係より求める方法

(以下では、マクロ表示法と呼ぶ)

①マクロ表示法(その1): 図-1にプロットされた124個のデータを対象に、長辺長(Max. φ, cm; Leesの表示法との混同を避けるため、以下では最大径と呼ぶ)と質量(M, kg)の関係を描くと図-2のようになる。各捨石の産地や岩種が異なるにもかかわらず、最大径と質量のそれぞれの対数がかかりよい相関を有することから、最小二乗法によって回帰式を求めると、質量が最大径の2.59乗に比例する傾向を示す次式が得られた。

$$M = 0.00277 \text{Max. } \phi^{2.59} \quad (4)$$

ここで、式(4)のベキの型で表わされた比例関係、特にそのベキの指数2.59がもつ意味を考察してみたい。

今、捨石を微小な質量をもつ粒状要素の集合体として捉え、捨石内のある点(重心がよい)を中心として適当な大きさの半径r(変数)の任意の球状空間を考える。この空間内で粒状要素が占める部分の質量をrの関数型で表せばM(r)となる(以下では、質量密度関数と呼ぶ)。

もしも、捨石の形状が棒状であれば、粒状要素から構成される質量の分布は直線的な傾向を反映して、概ね $M(r:r=\text{Max. } \phi/2) \propto r^1$ の関係を示すこととなる。また、もしも形状が板状で質量の分布が平面的であれば概ね $M(r:r=\text{Max. } \phi/2) \propto r^2$ の関数にあり、塊状で三次元空間を一様に質量が分布していれば概ね $M(r:r=\text{Max. } \phi/2) \propto r^3$ の関数となっていく。そこで、これを一般化し $M(r:r=\text{Max. } \phi/2) \propto r^D$ の関係を満すならば、我々が日頃用いている空間次元(正の整数)とはやや異なる、質量の分布の次元Dを定義することができる。そして、この新し

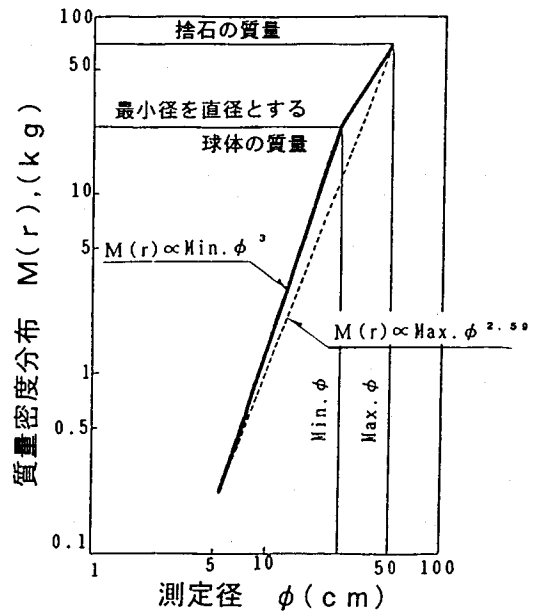


図-3 捨石の最大径Max. φ、最小径Min. φと質量密度分布M(r)の関係の概念

い次元Dを活用して捨石の形状を巨視的に評価することを試みると、もしD=1.0, 2.0, 3.0にある程度近い関係を有していれば、それぞれLeesの分類の棒状、板状、塊状に対応するような形状をしていると推察できよう。

式(4)のベキの型の比例関係は、複数個の捨石の質量と最大径の統計的な性質として求めたものであるが、そのベキの指数2.59をDと捉え考察すれば、対象となった捨石の形状は平均的にみて球体状にかなり近い塊状と評価できるものであったといえる。

このように、(質量～最大径)の関係の活用はマクロ表示法の1つとして有力な方法であり、複数の捨石の形状特性を統計的に把握しようとする場合に利用価値が高いと考えられる。従って、産地や現場での捨石の包括的な材料管理等の目的に利用することが、その取扱いの簡便さからみて有用であろう。

②マクロ表示法(その2): ①の表示法は、測定の比較的容易な捨石の質量を基礎に最大径との関係を利用したものであるが、この他にもマクロ表示法として有力な方法を考えることができる。図-3は、一個の捨石の質量密度関数～最大径、最小径(短辺長のこと)の関係を概念的に示したものである。

図中の破線で示した直線は、図-2で求めた質量(M)が最大径(Max. φ)の2.59乗に比例する関係を念頭において、ある一個の捨石内でrを0→Max. φ/2まで変化させた場合にも $M(r) \propto \text{Max. } \phi^{2.59}$ の関係がいずれのrに対しても成立していると想定して描いたものである。

しかし、一部の火山礫にみられるような空隙を内包する材質と異なり、捨石は極めて緻密な内部構造をしていることから、一個の捨石に注目した質量密度の分布パターンは、寧ろ図中の実線で示すような関係にあると想定される。そこで、最小径(Min.  $\phi$ )も含めて考えると、この最小径が捨石の重心ないしはその近傍を通るように測定されていれば、最小径を直径とする球体は捨石に内接する最大の球体であることが期待できる。従って、この球体内での捨石を構成している粒状要素の質量密度の分布は、2.59乗則に近似的に従うことはなく、3乗則に従っているはずである。図-3では、横軸の最小径以下の範囲における質量密度関数の関係である $M(r) \propto r^3$  (ただし、 $r \leq \text{Min. } \phi / 2$ )の直線を実線で描いている。

次に、 $\text{Min. } \phi / 2 \leq r \leq \text{Max. } \phi / 2$ の範囲にある粒状要素の質量密度関数の関係を概念的に想定してみる。もしも個々の捨石について、重心を中心とした三次元空間座標上での精密な測定 (Min.  $\phi / 2$ からMax.  $\phi / 2$ まで $r$ を少しずつ大きくして行きながら、 $r$ 空間内の質量密度の分布を測定すること) がなされれば、ごつごつした不規則な形状を反映して、図-3の横軸上のMin.  $\phi$ とMax.  $\phi$ の間に波形のような曲線を描くデータが得られよう。しかし、図-3ではこの間も直線で補完している。これは、個々の捨石の形状がもつ固有的な性質を、直線近似することによって求められる勾配で代表させ、形状表示のためのマクロ指標とすることを考えたからである。

そこで、最小径～最大径の間の質量密度の分布の特性を、次式で求められるべき指数( $\alpha$ )により検討した。使用したデータは、図-1にプロットされた124個の現場データである。

$$M(\text{Max. } \phi / 2) / M(\text{Min. } \phi / 2) = (\text{Max. } \phi / \text{Min. } \phi)^\alpha \quad (5)$$

全ての捨石について、式(5)の関係から新しい形状係数 $\alpha$ を求め頻度分布で整理するとききれいな正規分布が得られ、 $\alpha$ の値は殆ど0.8～2.4の範囲にあり、その平均値は $\bar{\alpha} = 1.63$ であった。

同じデータを用いてLeesの形状係数 $F$ も求め頻度分布で整理したところ、0.5～1.6の範囲にある正規分布が得られた。また、形状係数 $\alpha$ 、 $F$ のいずれの場合にも、塊状や葉状のデータが、その分布範囲の中央域を占め、板状のデータは $\alpha$ が大きく $F$ が小さい領域に、棒状のデータは $\alpha$ が小さく $F$ が大きい領域に分布していた。従って、両係数は類似した性質を保持しているが、 $\alpha$ の方が $F$ より感度が良いという特徴が窺える。しかし、両係数には基本的な相違点があり、 $F$ を計算する際には、中辺長という捨石のような不規則な形状体で定義が曖昧とならざるを得ない測定長を使用することとなるが、 $\alpha$ の計算では代わりに質量を用いているので、現場での測定誤差に基づく影響を小さくすることができる。

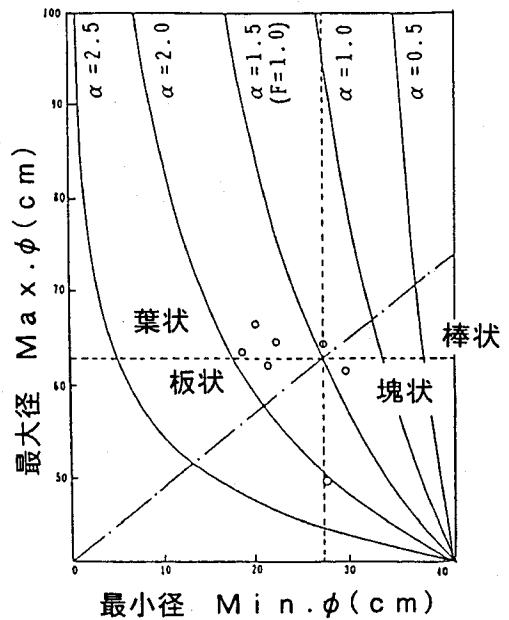


図-4 形状係数 $\alpha$ と最大径、最小径の関係

また、図-4には形状係数 $\alpha$ と最大径、最小径の関係を例示しているが、式(5)に $M(\text{Min. } \phi / 2) = (4/3)\pi(\text{Min. } \phi / 2)^3 \rho$  ( $\rho$ は捨石の粒状要素の質量密度)を代入した次式から求めたものである。

$$\text{Max. } \phi^\alpha \times \text{Min. } \phi^{3-\alpha} = (1.91 / \rho) M(\text{Max. } \phi / 2) \quad (6)$$

ただし、捨石質量 $M(\text{Max. } \phi / 2)$ を100kg程度と想定して、右辺の値を70,000 $\text{cm}^3$ と仮定している。

図中の $\alpha = 0.5 \sim 2.5$ の曲線が全て収束している右下隅の座標(41.2, 41.2)点は、 $\text{Max. } \phi = \text{Min. } \phi$ の形状(即ち球体状)を表わしており、また、 $\alpha = 1.5$ の曲線は、Leesの形状係数 $F = 1.0$ で表わされる特性と一致している。

ここで、形状係数 $\alpha$ の定義には、 $F$ を求めるために必要な中辺長 $b$ という変数は含まれていないが、概念的な理解を助けるために、図-4にZinggの分類規格を模擬的にあてはめてみた。便宜上、 $b = 41.2 \text{ cm}$  ( $\text{Max. } \phi \geq 41.2 \geq \text{Min. } \phi$ を考慮)とにおいて、縦軸上に $41.2 / 0.66 = 62.4$ を、横軸上に $41.2 \times 0.66 = 27.2$ をとって図中の破線を描き、あわせて2本の破線によって区分された4象限に形状パターンも記入すると、右下の第4象限が塊状の領域を概念的に示すこととなる。

この第4象限およびその周辺では $\alpha$ 値が相対的に小刻みに変化しているが、最大径と最小径の比を目算して分かるように、いずれも特異な形状はしていない。換言すれば、図中の破線の交点は常に $\alpha = 1.5$ の曲線上にあることから、この交点と左下隅の点(0, 41.2)を通る直線(図中の一点鎖線)の右下領域であれば、その捨石が概ね適

当な形状をしていると判定して差し支えないと考えられる。しかし、一点鎖線の左上領域では $\alpha$ 値は大刻みに変化するようになるから、 $\alpha$ が1.0~2.0程度を外れると形状が相当扁平細長になってくることに注意が必要である。

また図-4には、測定データ124個中から質量100kg程度の7個のデータを抽出しプロットしているが、いずれも上記の概ね適当な形状であるといえるエリア（右下ないしは左上の $1.0 < \alpha < 2.0$ の領域）内に入っている。なお、式(6)の右辺には捨石の質量Mが含まれていることから、図-4は質量毎に描けるが、各曲線の変化パターン（下に凸の遞減曲線）は基本的に同じである。

このように、（質量～最大径、最小径）の関係の活用もマクロ表示法の1つとして有力な方法であり、個々の捨石の巨視的な形状特性を把握しようとする場合に利用価値が高いと考えられ、現場での抜取りによる材料管理等のような目的に利用することができよう。

そして、本項で提案した2種類の新しい形状表示法は、それぞれの特徴を考慮し目的に応じた使い分けや組み合わせを行うことにより、現場での捨石の施工管理（品質管理）の改善向上に役立つものと考えられる。

#### b) 捨石表面の凹凸や起伏による空間的

##### 変動スペクトルより求める方法

（以下では、マイクロ表示法と呼ぶ）

本項では、捨石の表面にある不規則な凹凸や起伏を、より詳細に観察・解析することにより、形状がもつ基本的かつ汎用的な性質を考察してみた。

捨石の表面の凹凸や起伏による空間的変動を観察・解析する方法として今回用いたのは、次のような方法である。大きさの異なる3種類の捨石を対象として、その代表的と思われる面をできるだけ鮮明に写真撮影し、解析作業が容易な程度に拡大あるいは縮小プリントした上で、石の輪郭を可能な限り詳細にトレースした原因図を作成した。このトレースされた石のシルエットから重心を計算で求め、重心回りの放射状に角度 $1^\circ$ 毎の動径を360本描き、輪郭までの動径の長さを測定したデータに基づく波形を描き解析に供した。なお観察の対象には、運輸省港湾技術研究所で保管されていた捨石の中から無作為に、大きいもの(I)、中位のもの(II)、小さいもの(III)の3種類を選定した。それぞれの石の岩種および最大径、最小径は、表-1に示す通りである。

こうして得られた3種類の捨石表面の変動を描いた波形の性質を統計的に表現するために、最も普通に用いられるパワー・スペクトル密度(以下では、スペクトルあるいは $S(f)$ と呼ぶ)による解析を行った。即ち、空間座標における表面(曲面)変動の統計的な性質を、空間周波数(以下では、周波数あるいは $f$ と呼ぶ)に対するスペクトルによって検討し、捨石の基本的な形状特性を考察した。

図-5に、捨石Iの表面変動の波形から計算したスペク

表-1 捨石I, II, IIIの岩種とサイズ

	岩 種	サイズ
捨石 I	沖縄産古生層石灰岩	Max. $\phi = 65\text{cm}$ Min. $\phi = 25\text{cm}$
捨石 II	広島産花崗岩	Max. $\phi = 33\text{cm}$ Min. $\phi = 21\text{cm}$
捨石 III		Max. $\phi = 13\text{cm}$ Min. $\phi = 5\text{cm}$

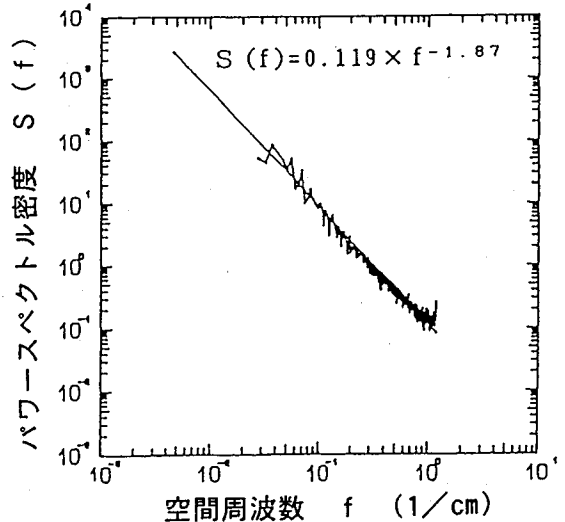


図-5 捨石Iの表面の凹凸、起伏のパワースペクトル

トルを例示した。また図-6には、捨石I, II, IIIのそれぞれのスペクトルを一括して示した(図中の捨石マウンドのスペクトルについては、次章で取り扱う)。両図とも周波数を横軸に、スペクトルを縦軸にとり両対数で描いているが、いずれも直線的な右下がり傾向を示している。調査対象となった捨石は、産地、岩種、大きさが異なり、全く無作為に選定されているにもかかわらず、周波数とスペクトルのそれぞれの対数がよい相関を有している。そこで最小二乗法により回帰式を求めると、捨石I, II, III別に $S(f) = 0.119 \times f^{-1.87}$ ,  $0.0693 \times f^{-1.86}$ ,  $0.0252 \times f^{-1.85}$ の結果を得た。

各捨石はそれぞれ大きさが異なるため、スペクトルの大きさのレベルはI, II, IIIの順となっているとともに、周波数の範囲も少しずつずれているが、求められた両対数回帰直線の勾配(回帰式中のベキの指数)は、I, II, IIIともほぼ等しい値となっている。

もしも、捨石の表面変動が全くランダムな形状をしているならば、周波数に対して無相関のはずだから、その時のスペクトルは白色(勾配がゼロの横軸に平行な状態)で、いずれの周波数成分に対しても同レベルのスペクト

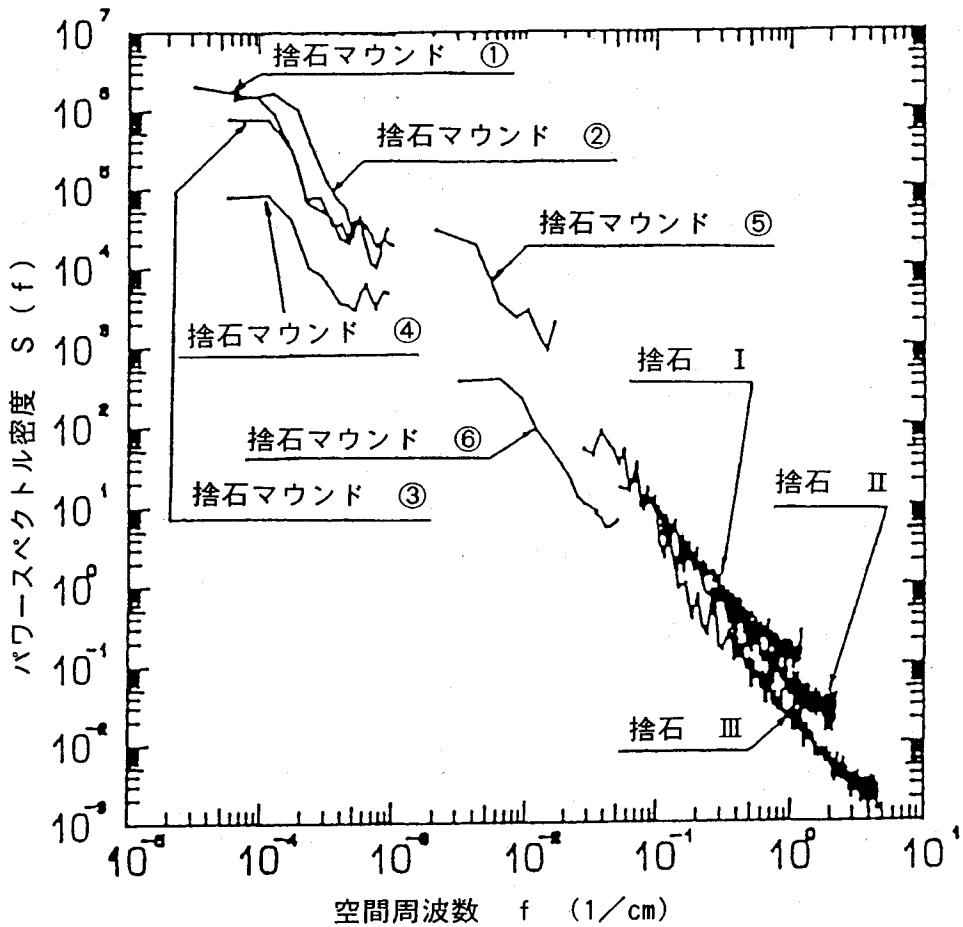


図-6 捨石および捨石マウンドの表面の凹凸、起伏のパワースペクトル

ルをもつ)でなければならない。しかし、今回の解析結果でみる限り、捨石の表面形状は完全にランダムな変化をしているのではなく、ある程度の規則性あるいは自己相関性をもつ形状をしているといえる。そして、この規則性の度合を表わす指標となるスペクトル勾配が、岩種や大きさによって殆んど変化していないことから、形状のもつ基本的な性質を示していると考えられる。

一方、スペクトルが  $f^{-1.85} \sim f^{-1.87}$  に比例するという事は、波長の長い凹凸成分ほど変化量が大いことを示している。また、舗装道等の路面の凹凸のスペクトルを推定した事例<sup>9)</sup>に  $f^{-2.5}$  程度であったとの報告があるが、これと比較して捨石の  $f^{-\beta}$  の  $\beta$  値の方が小さいことを直感的に捉えれば、捨石表面のごつごつした不規則性からみて、 $\beta$  が小さい程複雑な形状をしているといえそうである。そこで、マイクロ表示法の指標としてこの  $\beta$  の活用を試みるが、前項のマクロ表示法との相互比較をも可能とするために、より理論的で汎用性の高い指標を定義し得る、マンデルブロが18年前に創りだしたフラクタル<sup>6), 7), 8)</sup>の概念を導入することとした。

ル<sup>6), 7), 8)</sup>の概念を導入することとした。

フラクタルとは、積乱雲や海岸線の形状、山の稜線の起伏や川の河道網のような、外見上は何ら規則性や代表的な(卓越した)単位長をもたない自然界の物に共通した幾何学的性質である、容易に接線の引きようがなく、微分が定義できないような複雑な形状を、数学的に取り扱うために生み出された新しい理論である。この理論を適用して、対象とする複雑な形状を数値化して表現するために用いられるパラメータをフラクタル次元と呼んでいるが、どのような解析手順を踏んでこのフラクタル次元を求めるかについては、多くの研究者によって各種の提案がなされている。その中の最も実用的な方法の一つに、スペクトルからフラクタル次元を求める方法<sup>9)</sup>があることから、前述したスペクトル解析結果からフラクタル次元を計算し、マイクロ表示法の指標とすることとした。

スペクトルが  $S(f) \propto f^{-\beta}$  のようなベキの型であるとき、ベキの指数  $\beta$  とフラクタル次元  $D$  の間に、 $2 < D < 3$  の範囲で次の関係が成立することが証明されている<sup>9)</sup>。

$$D = (7 - \beta) / 2 \quad (7)$$

式(7)に捨石Ⅰ, Ⅱ, Ⅲから得られた $\beta$ の値である1.87, 1.86, 1.85を代入してフラクタル次元Dを求めれば, それぞれ2.57, 2.57, 2.58となる. 従って, 捨石表面の形状の複雑さ度合は,  $D=2.57\sim 2.58$ 程度と表示できる.

マンデルブロによれば<sup>10)</sup>, 自然界にある山脈やハワイのような火山群島の地表面のリリーフの複雑さ度合は $D=2.2$ 程度であるとの報告があり, 武者<sup>11)</sup>によれば, 海岸線の折れ曲がりの複雑さ度合は, 三陸リアス式海岸や瀬戸内海でそれぞれ $D=2.28$ および $2.2\sim 2.5$ , 最上川の河道の湾曲度合で $D=2.11$ と計算されている. 前述した路面の凹凸で $D=2.25$ ( $\beta=2.5$ )であるから, これらの事例でみられるDの値(2.1~2.5)に比較して, 捨石の表面変化で得られた $D=2.57\sim 2.58$ はやや大きめであり, 捨石形状が相対的にかなり複雑なものであることが窺える.

### c) マクロ表示法とミクロ表示法の相互比較

前項までで扱ったマクロ表示法とミクロ表示法は, それぞれ異なる測定方法によって捨石の形状を表示したものであるが, 双方の結果に整合性があるかを考察した.

マクロ表示法(その1)については,  $M \propto \text{Max. } \phi^{2.59}$ の関係を考察した際に, 質量の分布の次元Dを導入したが, この定義の考え方は, フラクタル次元を求める方法として提案され実用化されているものの1つを応用したものである<sup>12)</sup>. 即ち, 質量の分布を表す次元を, (a)の①で記述した質量密度関数  $M(r)$ と同様の解析手順から求めることにより, 3次元空間や2次元平面を埋め尽くすような状態の中間にあることを表わす指標としてのフラクタル次元が定義できる. ここで注目されるのは, この $D=2.59$ とミクロ表示法で求めた $D=2.57\sim 2.58$ が, 対象とした捨石は全く異なり, かつその測定方法も相違しているにもかかわらず, 極めてよく一致している点である.

更に, マクロ表示法(その2)では質量と最大径, 最小径の関係から, ベキの指数 $\alpha$ の平均値( $\bar{\alpha}$ )として1.63を得た. ここでも, フラクタル次元を求める方法として提案され実用化されているものの1つを応用して考察することができる<sup>13)</sup>. (a)の②では,  $\text{Min. } \phi \leq \phi \leq \text{Max. } \phi$ の球殻状の空間領域内における質量密度の分布の特性に注目していることから, これをフラクタル理論に基づいて表現すれば次のようになる. 直径 $\phi$ の球体状空間における質量の分布特性が, フラクタル次元Dに対して $\phi^D$ に比例しているならば, ( $\phi - \Delta\phi, \phi$ )間の球殻状空間内における質量の分布特性は,  $\phi^{D-1} \Delta\phi$ に比例していると考えられる. 従って, ベキの指数 $\alpha$ の平均値( $\bar{\alpha}$ )のフラクタル次元への換算のために,  $\bar{\alpha} = D - 1$ とにおいてDを求めれば $D=2.63$ となり, これも(a)の①や(b)で求めた $D=2.57\sim 2.59$ の値とほぼ一致した結果となっている.

以上の考察から, 捨石のもつ形状特性はいろいろな測定方法によって表現できるが, いずれの方法を用いても

概ね整合性のある結果を得ることができることが確認できたといえよう. また, 捨石の形状特性の測定結果をフラクタル次元という汎用性の高い指標で表示すれば, 他の測定結果との比較も容易であるといえる.

## 3. 捨石マウンドの基本的な特性

港湾における捨石マウンド築造工事は, 捨石を石運船, ガット船あるいは底開式投入船などで岸壁から積み出し, 海上で投石したのち, 潜水夫が人力でマウンド表面の捨石を1個づつ移動して平坦に均すという方法が一般にとられている. このうち, 捨石の運搬・投入に関する施工面での効率化および合理化については, 大型の底開式投入船によって大量の捨石を短時間に直投入する工法が採用されつつある. また, 捨石均し工法については, 作業の効率化, 安全性の向上, 潜水夫の不足への対処といった見地から, 機械化施工の導入が進展しつつある.

こうした施工面からのアプローチは鋭意進められているが, 築造工事の出来形としての捨石マウンドの諸特性については, あまり定量的な把握がなされていない状況にある. その背景には, 寸法の大きな捨石の集合体であるマウンドの諸特性を直接または間接的に把握するのは容易でなく, 経験則等によりある程度の見当をつけ, 工学的な対応をせざるを得ないとの判断があると思われる.

本章では, 捨石マウンドの基本的な特性を少しでも定量的に把握するために, 前章での捨石形状に関する知見を基礎に, 捨石マウンド表面の凹凸や起伏の形状特性について考察を行う.

### (1) 捨石マウンドの表面の形状特性

各港湾建設局等による本工事は, 捨石マウンド表面の凹凸や起伏の許容高さが, ①堤体を設置するための本均し面の高さ:  $\pm 5\text{cm}$ , ②堤体まわりの荒均しおよび被覆均し面の高さ:  $\pm 30\text{cm}$ と決められている<sup>2), 14)</sup>. しかし, 空間的な変動パターンについての規定は特になく, ランダムな変動をしていると直感的に受けとめられている.

一方, 今後は本均しを含む各均し工法に機械化施工が本格的に導入されようが, その場合の許容高さは, 潜水夫に大半を頼る従来形の工法に比べればある程度緩和されたもの, 例えば $\pm 30\text{cm}$ 程度となろう. 機械均し工法のもつスケール・メリットがより発揮されるのは, 厳しい施工条件(大水深, 高波浪等)をもつ大規模な工事であるが, 必然的に構造物は大型化し設計外力も増大することから, 設計にあたっては, これ迄以上に合理性や経済性を追求した精緻な検討が必要とされる. 特に, 凹凸や不陸の許容範囲が,  $\pm 5\text{cm} \rightarrow \pm 30\text{cm}$ と緩和された面上に堤体を設置した場合, 基礎であるマウンドから作用する地盤反力によって, 堤体内に発生する断面力は従来よりも大

きくなり設計上のクリティカル要素の1つとなることから、多くの施工実績に基づく経験則に加えて、マウンド表面の空間的な変動パターンを考慮した検討を行うことが重要視されてきている。

そこで、捨石マウンド表面の形状特性を検討するために、前章と同様に周波数に対するスペクトルを計算し、表面の変動の統計的な性質を考察してみた。スペクトルの計算に供する解析データの選定にあたっては、通常の施工手順で築造された現場の施工管理データに限定せず、様々な施工条件および捨石寸法をもつマウンドから測定された6種類のデータを採用した。

- ① 捨石投入船からの投石で造られたままのマウンド表面データ  
(水深-60m, 捨石直径10~120cm, 測定間隔 5m)
- ② ①の上に、被覆石を投入して造られたままのマウンド表面データ
- ③ 投石後、機械均しされたマウンド表面データ  
(水深-14m, 捨石直径20~100cm, 測定間隔5.5m)
- ④ ③の後、潜水夫が本均ししたマウンド表面データ
- ⑤ 港湾工事に従事している潜水夫の人力により荒均しされた実験用マウンド表面データ  
(陸上, 捨石直径10~90cm, 測定間隔30cm)
- ⑥ 実験水槽に丁寧に投石して造ったマウンド表面データ  
(陸上, 捨石直径平均約30cm, 測定間隔10cm)

図-7に、①および②のマウンド表面の空間的な変動から計算したスペクトルを例示し、また、図-6には①~⑥のスペクトルを、捨石Ⅰ、Ⅱ、Ⅲとともに示している。

6種類のデータには、現場のものから実験施設内のものまで含まれているので、周波数の範囲はかなりずれているが、いずれも右下がりの傾向を示している。また、スペクトルのレベルについては、⑥が最も小さく、次に小さいのが④および⑤でほぼ似通ったレベルにあり、①~③は相対的に大きなレベルとなっている。これは、⑥の捨石径が小さめであること、④および⑤の捨石径は類似しておりかついずれも手均しを行ったマウンドであることを考慮すれば理解できる結果である。

一方、均し施工がなされていない①と②を比較すれば、図-7にみられるように、被覆石の投入によって同レベルのスペクトルをもつ周波数帯が多少右へ移行する傾向を示している。また、均し工法の異なる③機械均しと④本均しを比較すれば、スペクトルの周波数帯は殆ど移動しないが、そのレベルは④の方がかなり小さくなっている。このスペクトルのレベル差は、前述した工法による許容高さの相違に起因するものであり、③と④のそれぞれの生データから実際の捨石マウンド表面の変動量の頻度分布を調べると、いずれも天端の目標高さをほぼ中央値とする正規分布で近似できるが、分布の標準偏差は、④の本均しに比べて③の機械均しではやや大きく(約2倍程

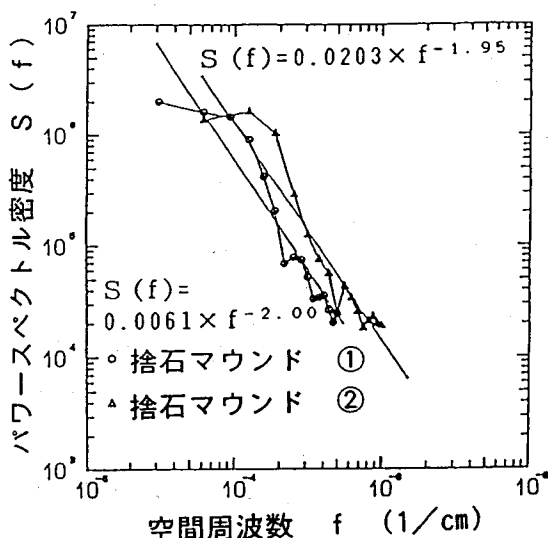


図-7 捨石マウンド①、②の表面の凹凸、起伏のパワースペクトル

度) になっているためである。

こうした個々のスペクトルがもつ特徴や相互関係とは別に、図-6を再度全体的に観察すると、各捨石およびマウンドのスペクトルには何らかの規則性の存在が窺える。即ち、捨石のスペクトルの延長線上(図の左上方向)に各マウンドのスペクトルが存在し、また、それぞれのスペクトル勾配もある程度似通っているからである。

そこで、①~⑥の捨石マウンドの周波数とスペクトルのそれぞれの対数から、多少のバラツキはみられるけれども最小二乗法によって回帰式を求めてみた。その結果は、投石のみで造られている①および②では、それぞれ-2.00、-1.95と相対的に大きめの負の勾配となっており、また、捨石径は小さめであるが実験水槽内に丁寧に投石して造られた⑥では、-1.88の勾配となっている。一方、③、④および⑤はいずれも均し施工がなされており、それぞれ-1.58、-1.24、-1.63と小さめの負の勾配となっている。いずれのスペクトルも白色(勾配がゼロ)でないことから、捨石マウンドの表面形状は完全にランダムな変動をしているのではなく、ある程度の規則性あるいは自己相関性をもつ形状をしているといえよう。

ここで、式(7)の関係  $D = (7 - \beta) / 2$  を用いて、①~⑥のフラクタル次元Dを求めれば、それぞれ①2.50、②2.53、③2.71、④2.88、⑤2.69、⑥2.56となる。このうち、①、②および⑥の値である2.50、2.53および2.56は、3種類の捨石のフラクタル次元である2.57、2.57、2.58とかなり近い値となっている。これは、捨石マウンドが投石のみによって造られているため、天然材である捨石のもつ形状特性と密接な関連性を有する自然な表面



形状のマウンドができたものと考えられる。

一方、マウンド③～⑤では均し施工という人為的な行為を加えているため、Dの値がある程度大きくなる傾向を示していると推察される。なお、マウンド④は本均し施工であり、特に大きな値となっているのに対して、③および⑤は機械均しおよび荒均し施工であることから、①、②、⑥と④の中間的な値となっている。

このような施工分類（均し無、機械または荒均し、本均し）とフラクタル次元で表わされた特性値の関係は、今後より多くの現場データの解析によって補強される必要があるが、港湾工事が大水深化や大規模化し、均し施工の省力化や長大ケーソンの採用がなされる場合の、より精緻かつ合理的な検討に活用できるものと考えられる。

#### 4. 結論

本研究は、捨石および捨石マウンド表面の形状に関する基本的な特性の未解明な部分を、統計幾何学的手法により考察したものであり、その結論は次の通りである。

(1) 捨石の新しい3種類の形状表示法を提案した。

①質量(M)～最大径(Max.  $\phi$ )のベキの型の比例関係を用いる方法

②質量(M)～最大径(Max.  $\phi$ )、最小径(Min.  $\phi$ )の関係を用いる方法

③捨石表面の凹凸、起伏による空間的変動のスペクトルを用いる方法

(2) 測定方法の異なる上記①～③の表示法から得られた形状係数を、より汎用性の高い指標であるフラクタル次元に換算した結果、①では2.59、②では2.63、③では2.57～2.58と、いずれの方法を用いても概ね整合性のある結果を得ることができることが確認された。

(3) 捨石マウンド表面の不陸の統計的な性質を、空間的変動スペクトルを用いて解析した結果、完全にランダ

ムな変動ではなく、ある程度の規則性あるいは自己相関性をもつ変動であることが確認された。更に、これらの結果もまたフラクタル次元に換算したところ、均し無では2.50～2.56と捨石の値とかなり近いが、機械あるいは荒均しでは2.69～2.71、本均しでは2.88と、施工分類に応じてその形状特性が変化することが分かった。

#### 参考文献

- 1) 土質工学会編：ロックフィル材料の試験と設計強度，土質工学会，215p.，1982.
- 2) 運輸省港湾局編集：港湾工事共通仕様書，日本港湾協会，pp.44-45，1983.
- 3) 最上武雄：土質力学，技報堂，pp.896-904，1969.
- 4) 荘司喜博：大型三軸圧縮試験による捨石材のせん断特性に関する考察，港湾技術研究所報告，Vol.22，No.4，pp.63-74，1983.
- 5) 武者利光：ゆらぎの世界，講談社，pp.182-183，1980.
- 6) B. B. Mandelbrot：The Fractal Geometry of Nature，Freeman and Company，New York，1983.；広中平祐監訳：フラクタル幾何学，日経サイエンス，467p.，1985.
- 7) 高安秀樹：フラクタル，朝倉書店，186p.，1986.
- 8) 高安秀樹ほか：フラクタル科学，朝倉書店，258p.，1987.
- 9) 文献7)参照，pp.23-25
- 10) 文献6)参照，pp.C10-14
- 11) 文献5)参照，pp.97-105
- 12) 文献7)参照，pp.19-20
- 13) 文献7)参照，pp.21-22
- 14) 運輸省港湾局編集：港湾工事情質・出来形管理基準，日本港湾協会，pp.80-83，1985.

(1994.10.31受付)

## STUDY ON SHAPE OF RUBBLES AND SURFACE CONFIGURATION OF RUBBLE MOUNDS

Noboru KUCHIDA

The purpose of this study is to consider the fundamental properties for shape of rubbles and surface configuration of rubble mounds by the use of the analytical methods based on statistical geometry called "Fractal". (1) The new three types of shape factor for rubbles were suggested through the different of measuring methods. (2) The statistical characteristics of the surface relief of rubble mounds were studied by power spectrum analysis. (3) The fractal dimension were obtained from the results of the above (1) and (2), so that it was shown that the statistical characteristics of both rubbles and rubble mounds would have some noticeable similarities.