

大潟海岸の堆積過程 —とくに底質の構成集団による検討—

白井 亨

SEDIMENTARY PROCESSES IN OGATA COAST, NIIGATA PREFECTURE, CENTRAL JAPAN WITH SPECIAL REFERENCE TO THE CONSTITUENT POPULATIONS OF SEDIMENTS

By *Toru SHIRAI*

Synopsis

Although analysis of size-frequency distributions of the sediments by the technique of partitioning size distributions has provided much information regarding the sedimentary process characteristics of depositional environments, few detailed studies have been done on the suaqueous beach. The aim of this study was characterize the sediments in a barred coast by conducting a detailed anlysis of the size-frequency curves using the graphical dissection technique to develop field-based models for coastal sedimentary processes.

Depositional patterns of the constituent populations of bottom sediments are summarized as follows. The mean size of the dominant population of each sediment decreased seaward in a stepwise manner at the beach face, the landward slope of the bar, and the offshore zone. The proportion of the dominant population increased seaward as alternate increases and decreases in the nearshore zone, and exhibited nearly unchanged large values in the offshore zone. The depositional patterns suggest that the seaward changes of the bottom sediment occur as repeating decreases of coarser population which are inversely proportional to increases of adjacent finer population. These characteristics are related to the generation mechanism of bar system.

1. 緒言

大潟海岸においては、近年海岸土砂収支の不均衡とそれを助長する要因による海岸侵食が問題になっているが、それは日本の他の海岸においても同様であると考えられる。したがって、大潟海岸の堆積過程のフィールドモデルを検討し、それに基づいてその沿岸過程を解明することは、一般に海岸侵食の課題の解明に資するものである。大潟海岸の侵食についてはこれまで多くの研究がなされており、それはまた一般的に海岸侵食の課題究明に寄与するものであるが、堆積過程についてはいまだに必ずしも十分な考察がなされているとはいえず、それを明らかにすることが今後の研究の発展に必要である。

海浜の堆積過程を明らかにするためには、底質の粒度組成を検討する必要がある。底質の堆積過程は、前号においていくつかの検討を行なったように¹⁾、粒径区分に基づく粒度組成から説明することができるが、底質を構成する集団の組成を解析することによってさらに明確となる点が多い。一般に流体の作用のもとで堆積した細粒な岩屑の多くは、粒径の対数値に対する重量頻度がしばしば正規分布かまたはそれに近い分布

をすることが経験的に知られているが²⁾、実際には多くの堆積物は粒径分布がいくつかの正規分布集団の合成からなっており^{3),4)}、それらの集団の組成を解析することによって堆積過程をさらに詳細に検討することができる。この研究では、底質の構成集団の組成の検討によって、とくに大潟海岸の岸沖方向の堆積過程を検討し、一般に弧状砂州が分布する砂浜海岸の堆積過程のフィールドモデルの進展に資することを目的とする。

一般に、海岸侵食の機構を解明するためには、自然海岸における海岸の特性を知ることが重要であり、侵食の加速に伴う変化をそれと比較検討することによって侵食の要因を解析することができる。日本の他の海岸と同様に、主として人の営力の結果として、漂砂源の変化や海岸構造物の築造に起因して漂砂の連続性が確保されなくなったことや、同じく反射型海岸としての性格が強まったために⁵⁾近年大潟海岸の海岸侵食が加速しており、現在少なくともその西半分についてみれば自然海岸とはいえない状態にある。この研究では上記の観点から、海岸侵食の機構解明に資することを目的として、この海岸が未だ自然海岸に近い状態であった1972年当時の試料について検討を行ない、自然海岸における堆積過程を検討した。

2. 大潟海岸の沿岸・海浜地形

2.1 沿岸地形

大潟海岸は、新潟県上越市郷津から柏崎市米山に至る全長約27 kmのほぼ直線状の砂浜海岸である(Fig. 1)。大潟海岸沖の大陸棚の幅は15~21 km、外縁水深は120~140 m、平均勾配は3/500~9/1000であり、たとえば新潟海岸沖に比べて大陸棚の幅が小で、勾配が大きく、外縁水深はほぼ等しい。等深線の方向は、水深60~100 mでは平均してN45°Eである。水深20 mでは、海岸中央部より東側はN45°E、西側では西方へ等深線のEW方向に対する角度がそれよりも漸減している。海岸線の方向は、海岸中央部の東側以東ではほぼN45°Eであり、それよりも西方へEW方向に対する角度が漸減している。

2.2 海浜地形

現在、この海岸はいわゆる一次の要因として漂砂源の変化、二次の要因として海岸構造物による沿岸漂砂の遮断や局所的な反射波の発生、などに起因して関川河口を中心として海岸侵食が進行し⁵⁾、とくに海岸中央部以西では自然海岸とはいえない状態になっており、それはとくに浜・ショアフエイスの勾配の増大や⁶⁾、砂州地形の破壊⁵⁾としてあらわれている。前記した観点から、以下にこの海岸の大部分が自然海岸に近かった1972年の資料について、海浜地形の概要をまとめる。

関川の東8~10 km区間の海底地形図をFig. 2に、縦断面をFig. 3に示す。大潟海岸は、波状海岸と弧状沿岸砂州を特徴とする周期的な海浜地形を示す。前浜・外浜は大カスプと弧状砂州からなるリズム的な3次元地形を示し、水深9 m付近の海底勾配変換部以深の沖浜は単調に増深して海岸線にはほぼ平行な等深線を示す。スペクトル解析によれば、大カスプは、海岸の西側では約700 m、250 mおよび170 mの波長に、東側では約800 m、500 m、250 mおよび200 mの波長にピークが存在する⁷⁾。大カスプの波長は西から東へ増大し、冬期に波高が増大している。

外浜領域には弧状の沿岸砂州が発達し、通常一段の砂州が分布する。弧状沿岸砂州の波長は300~1000 mであるが、多くの場合に400~800 mである。弧状砂州と大カスプの配置は互いに関連しており、弧状砂州の頂点(apex)が大カスプの湾入部に、接合部が大カスプの岬部に対応してひとつの地形単位を形成している。弧状砂州の頂点および接合部の距岸は、それぞれ平均して324 mおよび194 mである。弧状砂州の頂点を通る縦断面は砂州断面を示し、トラフおよび砂州頂部水深はそれぞれ平均して7.0 mおよび6.0 mである。砂州接合部を通る縦断面は、砂州接合部が離岸しているために多くの場合に弧状砂州の頂部を通る縦断面よりも小規模な砂州断面を示し、トラフ水深および砂州頂部水深はそれぞれ平均して5.5 mおよび4.5 mである。砂州頂点を通る断面および接合部を通る断面で、砂州の比高はそれぞれ平均して1.6 mおよ

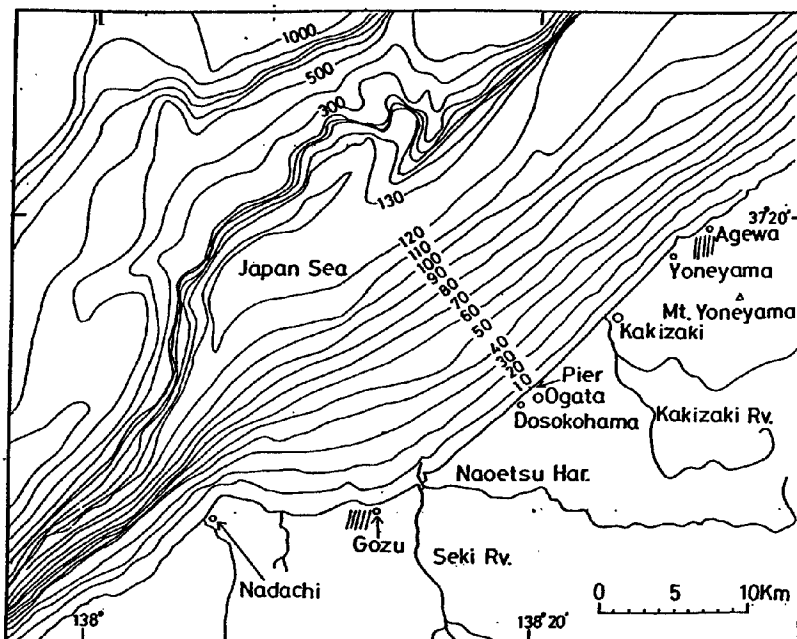


Fig. 1 Bottom topography of Ogata coast.

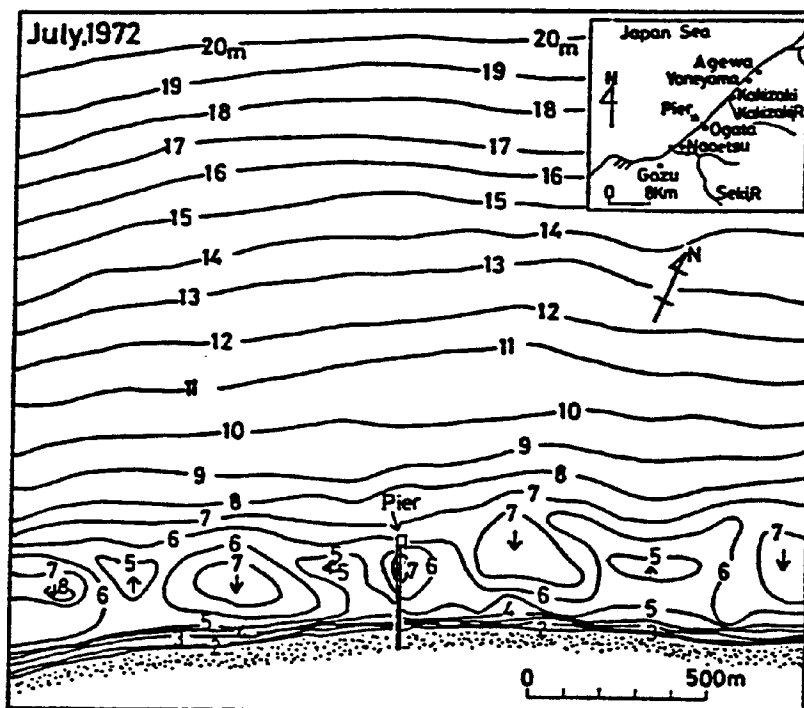


Fig. 2 Bottom topography of Ogata beach.

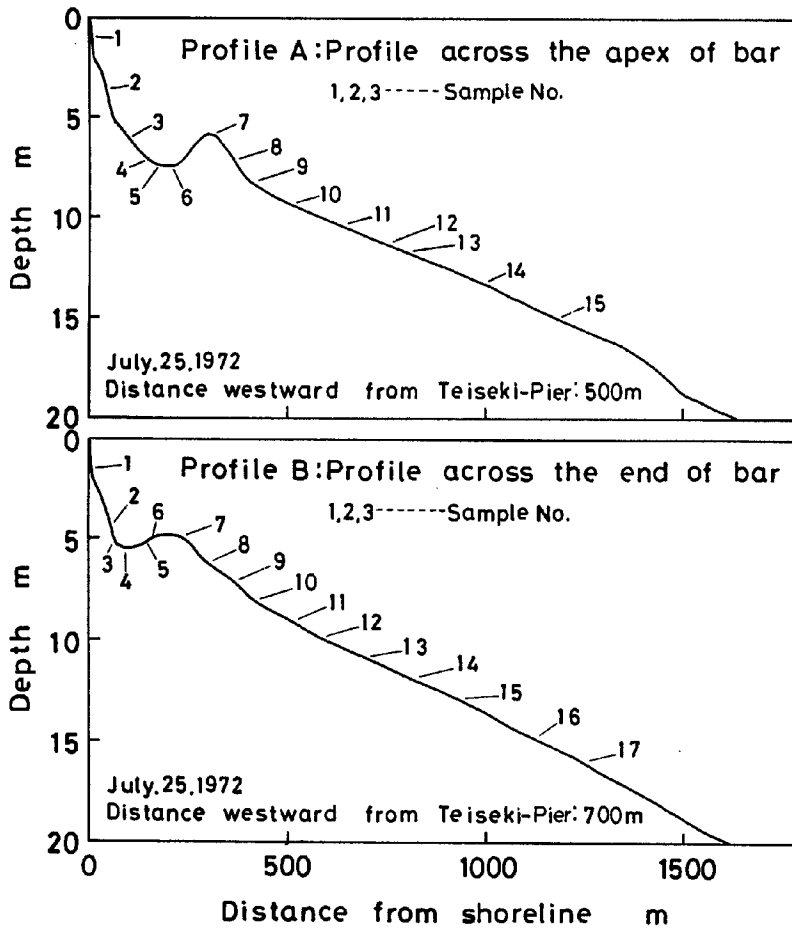


Fig. 3 Profiles across the longshore crescentic bar.

び1mであり、砂州の水深比はそれぞれ平均して1.26および1.22である。砂州沖側斜面の距岸380~590m、水深8~10mに勾配の変換部があり、それよりも沖側が沖浜領域で、等深線が海岸線にはほぼ平行になるのは水深12~13m以深である。

高波浪が冬期季節風時にほとんど限定される北陸・東北日本の日本海沿岸の海象条件を反映して、浜・外浜における海浜断面の変形は例外を除いて冬期季節風時にかぎられ、冬期に形成された砂州地形が小さな変形を除いて夏期に保存され、海浜断面の季節変化は汀線付近に限られる^{6),8)}。

関川河口の東8~10kmの区間の1967年⁹⁾および1972年のいずれも7月における海底断面図を比較すれば、1972年に弧状砂州頂部の距岸は約90m増大、トラフおよび弧状砂州頂点の水深はそれぞれ約0.7mおよび0.5m増大し、弧状砂州沖側勾配変換部の距岸および水深は側線によってそれぞれ200m程度および2m程度増大する場合がある。このように、この間に砂州が沖方向に移動している傾向がみられるが、砂州の規模を示す指標とされる砂州の比高および水深比にはほとんど変化がみられない。即ち、経年的にこの程度の砂州の沖方向の移動があるが、砂州の規模には大きな変化がないことを示している。

旧帝国石油栈橋に沿う海浜断面の長期変化の解析結果によれば、汀線近くを除いて断面変形の季節変化はみられず、さらに断面変形の長期変化は底質の一方向的な沖方向への流出を示しているようにみえる⁶⁾。また、1967~1979年のいずれも7月における大潟海岸中央部の深淺測量図⁵⁾によれば、トラフ面の規模は変

化しているが、その配置には大きな変化はみられず、弧状砂州の配置がほぼ安定しているものと考えられ、沿岸漂砂が動的に比較的小さいことを示している。弧状砂州海岸においては、沿岸漂砂は砂州システムの沿岸方向の移動として表現され、岸沖漂砂は砂州地形の3次元構造の変形として示される。大潟海岸においては、沿岸漂砂が動的に比較的小さいことが砂州の配置が経年的に安定していることに示され、また沖向漂砂による砂州の形成・沖方向への移動が経年的な断面変形に示されている。この場合、砂州地形の変形は冬期季節風時に限られ、汀線近くを除いて海浜断面の季節変化がみられないことが注目される。このような砂州地形の解析から判断される漂砂現象は、底質の特性と整合的でなければならない。この点において、以下の検討は重要な課題である。

3. 大潟海岸の堆積物の起源と漂砂源

大潟海岸に分布する海岸砂丘および海浜底質を構成する主要成分は、妙高火山群に起源する非変質火山岩、および関川河口の西側地域の海岸線付近あるいは関川流域に分布する更新統の地層を構成する砕屑物であり、それはこの海岸の形成にさかのぼって、海岸砂丘および海浜底質を構成する砕屑物の主な起源を示している^{1), 10)}。

現在この海岸は侵食海岸となっており、直江津港の防波堤によって漂砂系が東西に分断されている。そのため、海岸の主要部分である関川河口以東では、おもな漂砂源は海岸線に分布する海岸砂丘の上部を構成する新砂丘である。関川および柿崎川に起源する漂砂がこれに加わるが、防波堤による漂砂系の分断によって前者の寄与は関川よりも西側に限られ、また後者の寄与は柿崎川付近に限られている。

おもな漂砂源である新砂丘砂の粒度分布のヒストグラムの例を Fig. 4 に示す。新砂丘砂は単峰分布砂、二峰分布砂および三峰分布砂からなりモードおよび第一モードの示す頻度によって、例に示すように6つのタイプに分けられる (Fig. 4)。採取した多くの試料から判断すれば、新砂丘を形成する砂丘砂の多くがタイプ1~3である。さらに、海岸線に分布して漂砂源になっているのは、大部分がタイプ1~3の二峰分布砂である。

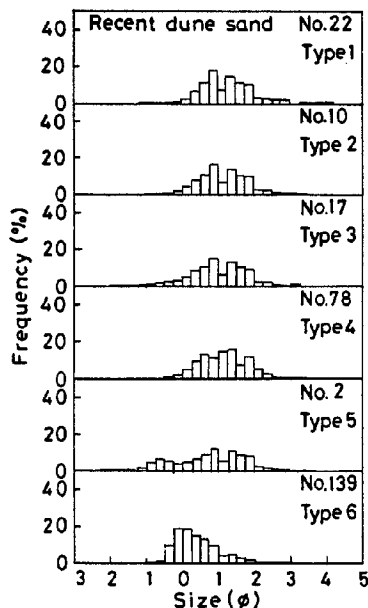


Fig. 4 Grain size distribution of Recent dune sand.

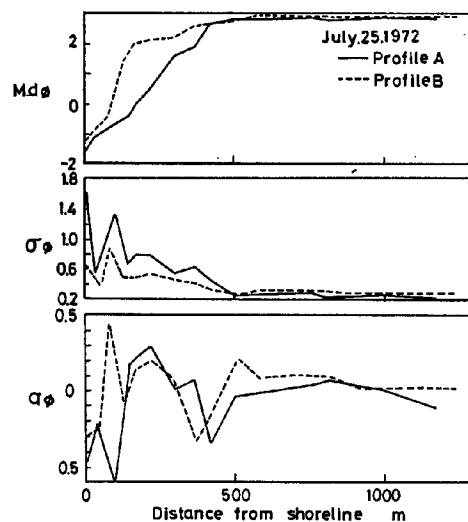


Fig. 5 Seaward distributions of grain size characteristics of beach sediment.

4. 底質の粒度分布特性

ここでは外浜・沖浜領域について岸沖方向の粒度分布特性を検討する。弧状砂州の頂部および接合部を通る断面について、近似計算による底質の平均粒径・標準偏差・歪度・尖度の岸沖方向の変化の例を Fig. 5 に示す。中央粒径 Md_ϕ は、弧状砂州頂部を通る断面では、ショアフェイスから砂州沖側の勾配変換部に至る外浜で沖に向かって漸増し、それ以深の沖浜ではほぼ一定の値を示す。弧状砂州の接合部を通る断面においては、沖方向に砂州の接合部まで大きく増大したのち砂州沖側勾配変換部まで漸増し、沖浜ではほぼ一定の値を示す。このように、底質の平均粒径は、外浜領域では沖方向に漸減 (ϕ 値は漸増) し、沖浜領域ではほぼ一定の値を示す。

標準偏差 σ_ϕ は、弧状砂州頂部を通る断面では、沖方向にトラフから砂州頂部にかけて増減しながら減少、砂州沖側斜面で漸減し、沖浜ではほぼ一定の小さい値を示す。砂州接合部を通る断面においても同様であるが、砂州頂部を通る断面に比べて外浜領域で σ_ϕ が小さい。歪度 α_ϕ は、弧状砂州頂部を通る断面では、ショアフェイス～トラフ岸側斜面で負、トラフ～砂州沖側斜面で0付近～正、砂州沖側勾配変換部で負、沖浜で0付近である。砂州接合部を通る断面においても同様であるが、ショアフェイス～トラフで正の値を示すものがある。以上のように、指標値の沖方向の変化は、海浜地形と関連した底質の分布を示している。

5. 堆積過程

大潟海岸の沿岸過程は、冬期季節風時の波浪による侵食砂が沿岸方向および岸沖方向に輸送され、その粒度組成におけるそれぞれの成分が粒径に応じて海浜の各領域に堆積する過程によって理解される。沿岸漂砂は砂州システムの沿岸方向の移動として表現され、岸沖漂砂は砂州地形の3次元構造の変形として表現される。このような大潟海岸の堆積過程については、前報¹⁾において底質の粒度組成から検討したが、それらに基づいてさらに検討を加えればつぎのようである。

5.1 沿岸方向の堆積過程

一般に、浜・外浜領域において、低気圧の通過に伴って波向が海岸線に直角方向に対して逆転する場合に沿岸漂砂の向きが反転する。ひとつのストームごとにその過程が繰り返され、それが積算されて長期的な沿岸漂砂の卓越方向が示される。この場合に、沿岸漂砂の長期的な卓越方向は来襲波浪の方向分布に従う。ひとつのストームにおける右あるいは左向きの沿岸漂砂のそれぞれにおいて、底質を組成する細粒成分の量比が漂砂の下流側へ指数関数的に増大するものと考えれば、右および左向きの沿岸漂砂を合算すれば、海岸のある地点から左右に遠方へ底質の細粒成分の量比が指数関数的に増大し、その結果その地点から左右に向って底質の平均粒径 (mm) が漸減する平均粒径の沿岸方向変化が示される。

低気圧の通過に伴って卓越波向きが海岸線に直角方向に対して逆転するような海岸においては、長期的にこのような過程が積算されて、海岸のある地点に平均粒径 (mm) の最大値が示され、そこから左右に向って平均粒径が漸減する平均粒径の沿岸方向変異系列が示される。その場合、エネルギー成分を考慮して海岸線に直角方向に対して左右からの波浪が伯仲する場合には、海岸中央部付近から左右に向って底質の細粒成分の量比が指数関数的に増大し、その結果中央部付近に平均粒径 (mm) の最大値が示され左右に向って漸減する。同じく左からの波浪が卓越する場合には海岸中央部よりも左側地点から、また右からの波浪が卓越する場合には中央部よりも右側地点からそれぞれ左右に向って細粒成分の量比が指数関数的に増大し、その結果それぞれ中央部よりも左あるいは右側に平均粒径 (mm) の最大値が示され左右に向って漸減する。

大潟海岸の場合には、海岸線に直角方向に対して左右からの波浪がほぼ伯仲するが、エネルギー成分を考慮すれば左からの波浪が少し卓越するものとみられた^{たとえば、5).11)}、長期的に右向きの沿岸漂砂が卓越するものと考えられる。ひとつのストームにおいて、低気圧の東進に伴う波向きの W～WNW から NNW～NNE

への変化によって沿岸漂砂の向きが東向きから西向きに反転し、それによって前浜底質が東へついで西へ輸送されるが、その場合大湯海岸の主要部分である関川以東の前浜底質の粒度組成の沿岸方向変化をみると、漂砂の下流方向に粒度組成の組合せが小礫・極粗砂、極粗砂・粗砂（ウェントワースの粒径区分）の順に変化し、その組合せにおいて細粒成分の量比が漂砂の下流側へ指数関数的に増大し、それと逆に関係して粗粒成分の量比が減少する変化を遠方へ順次繰り返している。この場合、細粒成分の量比が漂砂の下流側へ指数関数的に増大するのは、粒の沈降速度が関係しているからであると考えられる。その結果、底質の平均粒径が漂砂の下流側へ漸減するが、波向の変化に伴って沿岸漂砂の向きが反転するので、それぞれの向きの沿岸漂砂を合算して、海岸中央部付近に底質の平均粒径の極大値が示され、そこから左右に平均粒径が漸減する変化を示す。

このように沿岸方向の堆積過程は、底質の粒度組成における細粒成分が水篩されて順次漂砂の下流側に輸送され、その場合細粒成分の量比が下流側へ指数関数的に増大する過程によって説明される。

ひとつのストームにおけるこのような堆積過程が長期的に積算されるが、その場合前記したように左からの波浪が少し卓越するので、長期的には海岸中央部のすこし左側の地点に平均粒径（mm）の極大値が存在し、そこから左右に平均粒径（mm）が漸減する変異系列を示す。このような堆積過程の検討は、ウェントワースの粒径区分による粒度組成に基づくものであり、その場合各粒径区分をそれぞれ構成正規分布集団に近似的に対応することができるが¹⁾、底質の集団組成の検討によってこのような堆積過程をさらに明確にすることができるので、それについてこの研究の課題とする。

5.2 岸沖方向の堆積過程

上記したような沿岸漂砂の過程において、底質の細粒成分が沖方向に流出するものと考えられる。海へ流出した侵食砂丘砂を組成する粒径区分した各成分は、粒径に従ってそれぞれの分布領域に堆積する。各成分の分布領域はオーバーラップするが、砂州地形に対応して礫はショアフェイス～トラフ、極粗砂はショアフェイス～弧状砂州岸側斜面、粗砂はショアフェイス～弧状砂州沖側斜面、中砂はトラフ～弧状砂州沖側基部にそれぞれ分布する。細砂あるいは微砂の分布領域は、いずれもトラフおよび弧状砂州岸側斜面よりも沖側であり、沖浜の底質は細砂・微砂からなる。ここで、礫・極粗砂・粗砂などの粒径区分はウェントワースの粒径区分に従うが、そこで大礫、中礫、小礫、極粗砂、粗砂、中砂、細砂、微砂の粒径区分はそれぞれ、 $7 \sim 4\phi$ (256~16 mm)、 $4 \sim 2\phi$ (16~4 mm)、 $2 \sim 1\phi$ (4~2 mm)、 $1 \sim 0\phi$ (2~1 mm)、 $0 \sim 1\phi$ (1~1/2 mm)、 $1 \sim 2\phi$ (1/2~1/4 mm)、 $2 \sim 3\phi$ (1/4~1/8 mm)、 $3 \sim 4\phi$ (1/8~1/16 mm) であり、この論文においてはこの粒径区分による。

外浜における底質の粒度組成の沖方向変化をみると、外浜底質は中礫～細砂のうちの3~5成分によって組成され、その組合せが沖方向に順次細粒となる。底質を組成する2つの卓越粒径区分のうちの細粒成分の量比が沖方向に指数関数的に増大し、それと逆に粗粒成分の量比が減少する変化を沖方向に順次繰り返しており、その結果底質の平均粒径が沖方向に漸減する沖方向変異系列を示す。一方、それぞれの粒径区分の成分量比の沖方向変化は、ほぼ左右対称の釣り鐘型をしている。

沖浜においては、粒径区分による粒度組成に大きな変化はみられない。底質は細砂および微砂からなり、大部分が細砂で組成されている。細砂および微砂の量比の沖方向変化をみると、それぞれ外浜において量比が指数関数的に増大し、沖浜では量比がほぼ一定となるが、微砂は沖浜の岸側でいったん最も大きい量比を示したのち沖へ漸減する。このように岸沖方向の堆積過程は、底質の粒度組成における細粒成分が水篩されて沖方向へ順次輸送され、その場合細粒成分の量比が沖方向に指数関数的に増大する過程によって説明されるが、底質の正規分布集団組成を検討することによってさらに明確となると思われるので、以下にその検討をおこなう。

6. 底質の構成正規分布集団による堆積過程の検討

粒径分布を表す式として古くから種々の式がしられているが、そのおもなものとして、対数正規分布の式、Gaudinの式(1926)、Rosin-Rammlerの式(1933)、Weinigの式(1933)、Sladの式(1936)、Rollerの式(1937)、Martinの式(1939)、Heywoodの式、Fagerholtの式(1945)、Iwai-Matsuoの有限対数正規分布の式(1949, 1951)などあり(溝口・小木¹²⁾による)、たとえば溝口・小木はRollerの分布式の検討を行い、各地の海岸の砂に適用した結果を報告している。これらの分布式は、どれもあらゆる粒径分布に対して当てはまるというものではないという指摘もなされているが、^{たとえば、¹²⁾}ここでは粒径分布が対数正規分布かまたはそれに近い分布をするものとして検討をすすめる。

一般に、流体の作用をうけて堆積した岩屑とくに細粒な岩屑は多くの場合に、粒径の対数値に対する重量頻度が正規分布かまたはそれに近い分布をするということが経験的にいわれてきた。しかし、実際には多くの堆積物は正規確率紙に累積頻度曲線を描いた場合に屈曲の変換点を示した^{たとえば、³⁾,¹³⁾}、オーバーラップしたいくつかの正規分布集団によって構成されている。即ち、一般に海岸砂丘砂を含めて海浜堆積物は非対称の粒径分布を示すが、粒径分布が複数の正規分布集団の合成からなるとすれば、このような非対称の粒径分布をよく表現することができる。

大潟海岸の海浜底質と、その漂砂源である新砂丘砂の正規確率紙に描いた累積頻度曲線の例をそれぞれFig. 6およびFig. 7に示す。これらの例のように、この海岸の堆積物はオーバーラップした複数の正規分布集団によって構成されている。海岸砂丘砂を含む多くの海浜堆積物について構成集団の分離を行なった結果によれば、粒度分析を高精度でおこなえば、正規確率紙の図上で分離した正規分布集団の合成曲線はもと

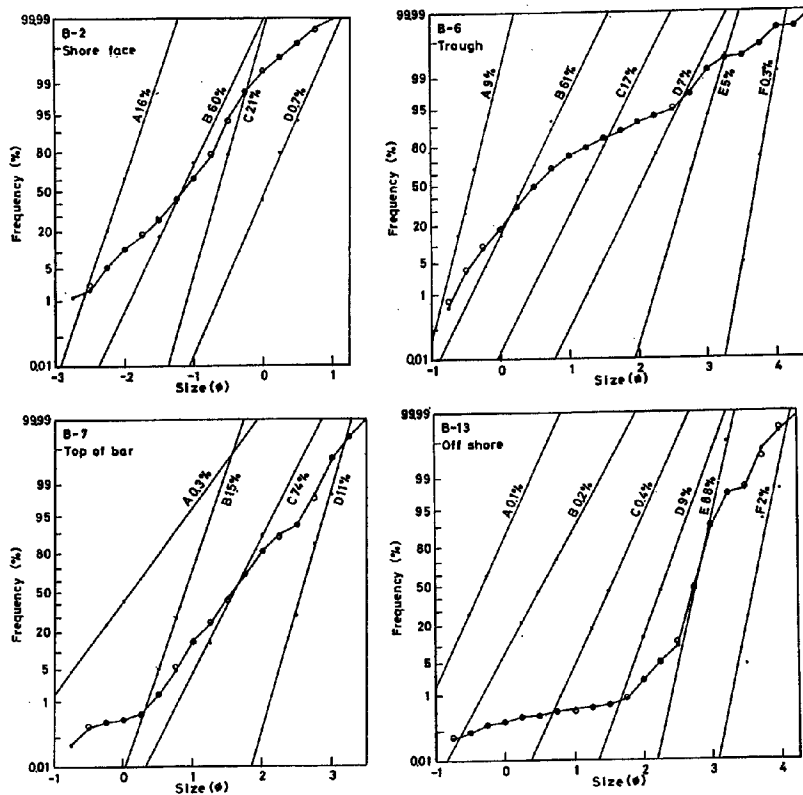


Fig. 6 Cumulative probability curve and constituent subpopulations derived by partitioning from the curve. Circles are the cumulative plots constructed from the partitioned constituent subpopulations (Beach sediments).

の累積頻度曲線とよく一致し、それは礫質堆積物の場合においても大量の試料を用いれば同様である⁴⁾。

従って、構成正規分布集団組成の検討は堆積過程の検討に有効な手段であると考え、それによってここでは沖方向の堆積過程を検討した。このような、正規確率紙に描いた場合に屈曲の変換点を示す頻度累積曲線の解析は、対数正規分布集団の混合によって説明するものと、トランケートした対数正規分布集団の混合として説明するものの2つの立場からなされているが、この研究では前者の立場から検討を行なう。

6.1 試料採取および粒度分析

底質試料の採取は1972年7月24～25日に行なった。底質試料は、弧状砂州の頂点および接合部を通る側線（それぞれ旧帝国石油KK 棧橋の500 m および700 m 西側）に沿って約1 mの深度間隔で、水深約16 mまで、直径約15 cmの小型筒型採泥器を用いて短距離をドレッジして採取した。試料の採取地点はFig. 3に示してある。採取した試料は、風乾後、四分法によって分取し、1/4φ間隔の標準篩によってロータップ振とう機を用いて粒度分析を行なった。粒度分析はひとつの試料について何回も行い、よい結果を得る条件を検討した。

6.2 粒径分布曲線と構成正規分布集団の分離

粒度分析の結果を、正規確率紙の横軸に粒径のφ値をとり、縦軸に重量頻度の累積値をとって描点し累積頻度曲線を描いた。この研究では、構成正規分布集団の分離をグラフィカルメソッド^{2), 3), 14), 15)}によって行なった。この場合、屈曲の変換点の位置を的確に見出すために、重量頻度分布曲線によって、2つの集団がオーバーラップする粒径を吟味した。

分離した正規分布集団を図上で再び合成して、もとの累積頻度曲線と比較して正確に分離が行なわれたかどうかを検定した。粒度分析の精度は、検体の性質や量によって篩の大きさ、振とう時間などを吟味する必要がある、同じ条件なら常により精度が得られるとは限らない。そこで、四分法によって分取した多数の検体の粒度分析結果について正規分布集団の分離を行い、精度のよいデータを採用した。

構成正規分布集団の分離の例をFig. 6および7に示した。この図で、黒丸はもとの累積頻度曲線を示す点であり、白丸は分離した構成正規分布集団の示す直線を図上で再び合成した描点である。例に示したように、白丸はもとの累積頻度曲線の上によくのっており、正規分布集団の分離がよい精度で行なわれたことを示している。

6.3 新砂丘砂および海浜底質の構成正規分布集団

(1) 新砂丘砂

正規確率紙に描いた重量頻度累積曲線から構成正規分布集団を分離した例をFig. 7に示した。また、構成正規分布集団の組成の例をTable 1に示す。例に示したように、新砂丘砂はオーバーラップした複数の正規分布集団によって構成されている。つぎに、新砂丘砂を構成する正規分布集団の組合せをFig. 8に示す。これは、93試料から無作為に選んだ30試料について構成正規分布集団の分離を行なった結果によるも

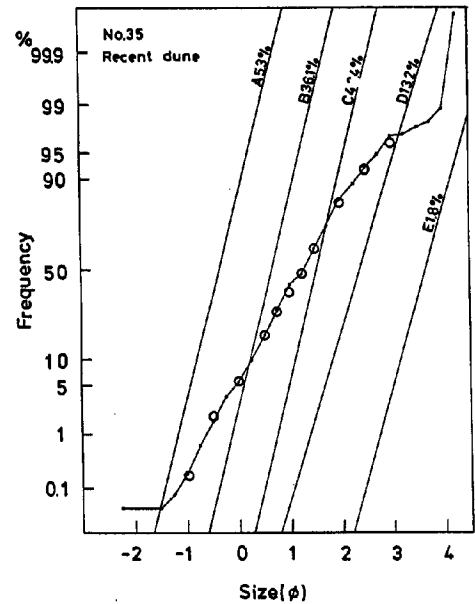


Fig. 7 Cumulative probability curve and constituent subpopulations derived by partitioning from the curve. Circles are the cumulative plots constructed from the partitioned constituent subpopulations (Recent dune sand).

Table 1 Mean diameter, standard deviation and proportion of the constituent population in each partitioned curve (Examples in each type of dune sand)

Type of sand	Sample No.	Population _{D-D}			Population _{D-F}			Population _{D-H}			Population _{D-I}			Population _{D-K}		
		f(%)	Md _φ	σ _φ	f(%)	Md _φ	σ _φ	f(%)	Md _φ	σ _φ	f(%)	Md _φ	σ _φ	f(%)	Md _φ	σ _φ
1	36	0.8	-0.20	0.26	34	0.78	0.32	53	1.52	0.29	11	2.32	0.35	0.5	3.45	0.36
2	89	4	-0.40	0.22	49	0.61	0.37	39	1.44	0.35	6	2.30	0.28	2	3.12	0.62
3	38	12	-0.42	0.26	48	0.45	0.44	30	1.48	0.34	7	2.33	0.46	1	3.65	0.29
4	56	2	-0.40	0.30	47	0.44	0.29	38	1.16	0.30	13	2.00	0.56	1	3.76	0.26
5	93	30	-0.46	0.26	43	0.30	0.51	22	1.48	0.32	4	2.31	0.36	0.4	3.74	0.51
6	44	41	-0.16	0.16	57	0.30	0.36	2	1.34	0.26						

f(%) : Proportion.

のである。新砂丘砂は、互いに平均粒径が類似する複数の正規分布集団によって構成されている。そこで、各試料を通して比較した場合に平均粒径が類似する構成正規分布集団をひとつの集団としてまとめ、そのそれぞれに便宜的に P_{D-A}, P_{D-B}, P_{D-C}, …などと命名した。Fig. 8において、砂番号は中央粒径 Md_φ の順に並べてある。なお、この研究とは直接関係がないことであるが、卓越集団の平均粒径の大きさは他の集団のそれと関係しない。

このようにして命名されたそれぞれの集団に属する、それぞれの正規分布集団の平均粒径は試料によってある値の範囲内ではばらつきがあるが、他の命名された集団との間で平均粒径が連続しない。海岸砂丘砂がこのような集団構成をしめすメカニズムはよくわからないが、各正規分布集団が堆積する過程にそれぞれ対応した流体の作用が考えられ、その場合それぞれの作用にある範囲の変動があるものと考えられる。このようにして区別して命名したそれぞれの集団に属するそれぞれの正規分布集団の平均粒径を平均して、集団 P_{D-A}, P_{D-B}, P_{D-C}, …の平均粒径として Table 2 に示す。

Table 2 には、新砂丘砂において卓越する Type 1~3 について、砂を構成するそれぞれの命名した集団の量比の平均値を示してある。このように、Type 1~3 においては、平均粒径がそれぞれ 0.65_φ および 1.57_φ である 2 つの集団 (P_{D-F} および P_{D-H}) の量比が、それぞれ平均して 27~45 % および 39~57 % を占める。

(2) 海浜底質

重量頻度累積曲線からグラフィカルに分離した海浜底質を構成する正規分布集団の組成の例を Table 3 に示す。また、底質を構成する正規分布集団の組合せの沖方向変化を Fig. 9 に示す。海浜底質は、互いに平均粒径が類似する複数の正規分布集団によって構成されている。この場合、平均粒径が類似する集団をひとつの群としてまとめると、その群に属する集団の平均粒径はある範囲内の値を示し、同様な他の群と平均粒径が連続しない。そこで、平均粒径が類似する構成正規分布集団をまとめてひとつの集団とみなして、それに便宜的に P_A, P_B, P_C, …などと命名した。このように

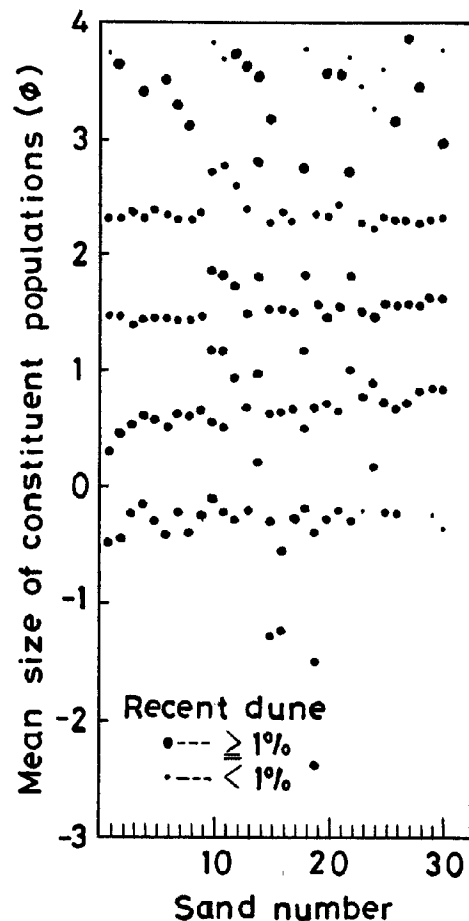


Fig. 8 Combination of the constituent populations of Recent dune sand.

Table 2 Summary of Subpopulation (Recent dune Sand)

Subpopulations	Avg. Md_{ϕ}	Avg. σ_{ϕ}	Avg. Proportion (%)		
			Type 1	Type 2	Type 3
P _{D-A}	-2.38	0.22			2.7
P _{D-B}	-1.33	0.25			1.6
P _{D-C}	-0.55	0.26			6.8
P _{D-D}	-0.28	0.29	1.4	4.7	8.3
P _{D-E}	0.14	0.40	1.1		
P _{D-F}	0.65	0.33	27.1	45.2	39.7
P _{D-G}	1.07	0.36			
P _{D-H}	1.57	0.33	57.0	40.3	38.5
P _{D-I}	2.33	0.32	12.9	7.7	9.4
P _{D-J}	2.95	0.35	1.9	2.2	1.3
P _{D-K}	3.65	0.37	0.8	1.4	1.3

Avg. : Average.

Table 3 Median diameter, standard deviation and proportions of the subpopulations in each partitioned curve (Examples in each environment of beach).

Environment	Sample No. Profile A	Population			Population			Population			Population			Population		
		f(%)	Md_{ϕ}	σ_{ϕ}	f(%)	Md_{ϕ}	σ_{ϕ}	f(%)	Md_{ϕ}	σ_{ϕ}	f(%)	Md_{ϕ}	σ_{ϕ}	f(%)	Md_{ϕ}	σ_{ϕ}
Shore face	2	16	-2.07	0.24	60	-1.18	0.32	21	-0.66	0.19	0.7	0.03	0.29			
Trough	5	31	-0.63	0.26	49	0.11	0.39	12	1.11	0.41	5	1.98	0.31	2	2.62	0.21
Top of bar	7	0.3	0.08	0.49	15	0.88	0.23	74	1.59	0.34	11	2.57	0.20			
Slope of bar	8	0.6	0.32	0.44	13	0.96	0.24	63	1.82	0.33	23	2.65	0.21	0.4	3.67	0.26
Foot of bar	9	0.3	-0.33	0.47	1	0.84	0.27	5	1.57	0.20	34	2.16	0.29	59	2.74	0.19
Off-shore	15	0.2	0.37	0.33	0.4	1.52	0.51	8	2.31	0.28	89	2.80	0.18	3	3.59	0.10

f(%) : Proportion.

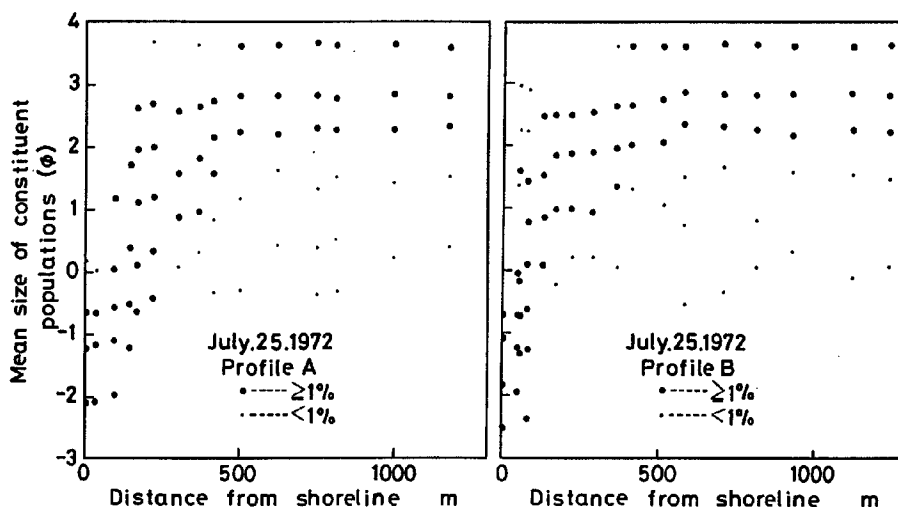


Fig. 9 Combination of the constituent populations of beach sediment.

Table 4 Summary of Subpopulation's Distributions Statistics (Beach Sediment)

Subpopulations	Avg. $Md\phi$	Avg. $\sigma\phi$
P_A	-2.70	0.31
P_B	-1.95	0.28
P_C	-1.19	0.28
P_D	-0.62	0.24
P_E	0.12	0.41
P_F	1.03	0.35
P_G	1.81	0.27
P_H	2.26	0.27
P_I	2.73	0.19
P_J	3.63	0.13

Avg. : Average.

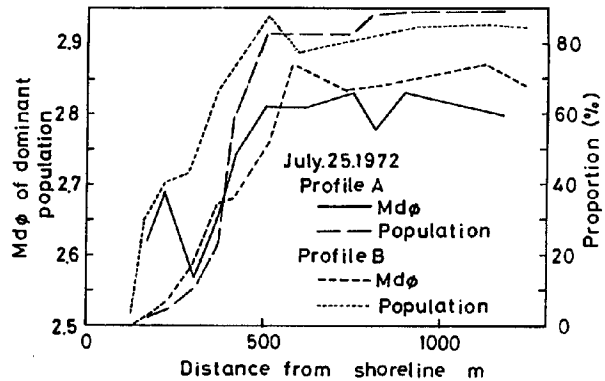


Fig. 10 Seaward changes of $Md\phi$ and proportion of the dominant constituent populations of the beach sediments.

して命名した、それぞれの集団の平均粒径を平均して、その集団の平均粒径として示したのがTable 4である。Fig. 9に示したように、弧状砂州の頂点を通る断面についてみれば、微量なものを除けば、シヨアフフェイスの底質は $P_A \sim P_D$ の3~4集団、トラフの底質は $P_C \sim P_G$ および P_I の4~5集団、砂州の底質は P_F 、 P_G および P_I の3集団、沖浜の底質は $P_H \sim P_J$ の3集団で組成されており、沖方向へ集団の組合せが細粒となる。弧状砂州の接合部を通る断面についてみれば、同じく、この順に、 $P_A \sim P_E$ の4集団、 $P_C \sim P_G$ の3~5集団、 P_F 、 P_G および P_I の3集団、 $P_H \sim P_J$ の3集団で構成されている。

6.4 構成正規分布集団組成による岸沖方向堆積過程の検討

この場合、前浜~シヨアフフェイスに分布する中礫~大礫は直江津港防波堤によって漂砂系が分断される以前に関川あるいはその西側海岸からもたらされたものと考えられるので、ここではそれらを除外して底質の主成分である小礫~微砂について検討する。

それぞれの底質における、最も卓越する集団の平均粒径およびその量比の沖方向変化をFig. 10に示す。外浜においては、弧状砂州の頂部を通る断面では、卓越集団の平均粒径の ϕ 値はトラフから砂州沖側基部に向って減少して砂州において小さい値を示し、そこから砂州基部へ向って増大して、沖浜ではほぼ一定の値を示す。砂州接合部を通る断面においても同様であるが、シヨアフフェイス~砂州基部で平均粒径の ϕ 値が漸増している。

卓越集団の量比は外浜では沖へ増大するが、弧状砂州の頂部を通る断面では、砂州頂部~基部にかけて大きく増大している。沖浜ではほぼ一定の値を示す。このように、外浜では卓越集団の平均粒径の ϕ 値が増大しつつその量比が増大しており、沖浜では大きく卓越する集団によって底質が構成されている。このような卓越集団の平均粒径およびその量比の沖方向変化は、底質が水篩される過程で沖へ順次細粒な集団が輸送されて堆積していることを示している。

それぞれの底質における構成集団の量比の沖方向変化をFig. 11に示す。ここで、量比が1%以下のものは除外してある。弧状砂州の頂部を通る断面では、 P_A および P_B はシヨアフフェイスに残留し、 P_C よりも細粒な集団は沖へ流出していることがわかる。 P_C はシヨアフフェイス~トラフ岸側斜面、 P_D および P_E はシヨアフフェイス~トラフ、 P_F および P_G はトラフ~砂州、 P_H および P_I は沖浜領域、 P_J はトラフよりも沖側にそれぞれ分布している。弧状砂州の接合部を通る断面では、 $P_A \sim P_E$ はシヨアフフェイス~トラフに分布する。 P_F および P_G はトラフ~砂州に分布するが、弧状砂州頂部を通る断面に比べて量比のピークが岸側にある。 $P_H \sim P_J$ は砂州頂部を通る断面と同様であるが、それに比べて P_I の量比が砂州で増大している。粒径が隣接する2集団の量比を比較すると、沖方向に粗粒な集団の減少とともに細粒な集団が増大している。

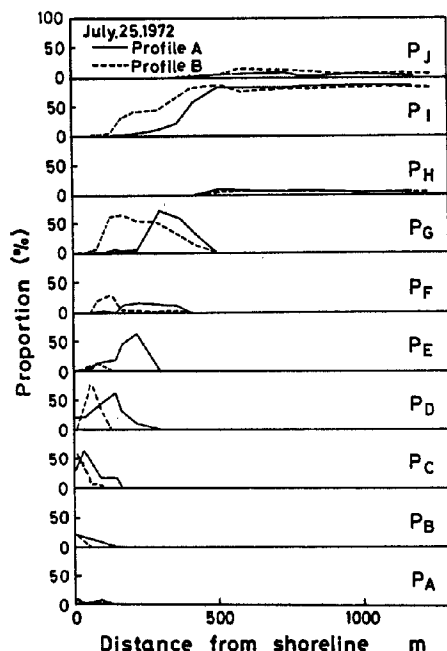


Fig. 11 Seaward changes of proportions of the dominant constituent populations of the sediments.

主な漂砂源である新砂丘砂と比べると、海浜底質の構成集団の平均粒径は中砂 (P_G および P_{D-G}) よりも細粒なものについてみれば類似しているが、粗粒なものは類似していない。ここで、上記したように P_G は砂州を形成している集団である。一般に外洋に面した外浜においては、海へ流出した碎屑物はストーム時に浮遊状態で沿岸・岸沖方向に輸送されるものと考えられる。外浜は碎波の作用が卓越する領域であり、漂砂源から海へ流出した漂砂は浮遊・堆積をくりかえしながら沖へ流出するものと考えられ、海へ流出した新砂丘砂の構成集団を構成する碎屑物が、この領域の流体の作用によって $P_B \sim P_G$ 集団に再構成されたものと考えられる。主な漂砂源である新砂丘砂の大部分を構成する二峰分布砂および三峰分布砂の2つの卓越構成集団 P_{D-F} および P_{D-H} が海へ流出して砂州地形を形成して、前浜に残留しないことが、この海岸の侵食を加速しているひとつの要因であると考えられる。

上記したように、底質を構成する各集団は、それぞれ沖方向の限られた範囲に分布し、その分布範囲は平均粒径が小さいものほど沖方向に拡大している。さらに集団の分布範囲の離岸距離が平均粒径が小さい順に大きい傾向がある。また、各集団の量比のピークは平均粒径の小さいものほど沖側にある。このような、外浜領域における各構成正規分布集団の量比の沖方向変化は、漂砂源から海へ流出した碎屑物が、外浜で碎波の作用のもとで浮遊・沈降を繰り返しながら反復して水篩されて、水理条件に従って沖へ輸送され、粒の沈降速度に応じて細粒なものほど沖側へ流出すると考えることによって説明できる。この場合、一般に流体の作用のもとで堆積した碎屑物は、粒径の対数値に対する重量頻度が正規分布かそれに近い分布をすることから、外浜のそれぞれの部分に流出した碎屑物は粒径分布が正規分布を示す底質として堆積したものと考えられる。

つぎに、Fig. 9 に示したように、命名されたそれぞれの構成正規分布集団に属するそれぞれの集団の平均粒径には、ばらつきあるいは変化がみられる。命名された各構成正規分布集団に属するそれぞれの集団の平均粒径の ϕ 値は、外浜においては沖方向に増大する傾向を示し、沖浜においてはほぼ一定の値を示す。平均粒径のばらつきは、外浜の弧状砂州頂点を通る断面におけるトラフ-砂州の底質の主成分を構成する P_E

～P_G 集団において著しい。

このような命名された構成正規分布集団における平均粒径のばらつきは、正規確率紙上に直線で示された構成正規分布集団の粒径域の変化を示すものであり、外浜の各部分における流体の作用が2次的にまた時間的にある範囲で変化することを示しているものと考えられる。即ち、トラフ～砂州の底質を構成する集団における平均粒径のばらつきは、この集団が分布するトラフ～砂州における流体の作用の変化が著しいことを示しているといえる。さらにこのような平均粒径のばらつきは、ひとつのストームの立ち上がりからなぎにいたる営力の変化を示すものかもしれないし、いくつかのストームの営力の差異を示しているものかもしれない。この場合のようなドレッジ試料でなく、点地点試料とか柱状試料を用いれば、これらの点についてさらに吟味することができるであろう。

前浜～ショアフェイスの底質における、命名されたそれぞれの正規分布集団を構成する各集団の平均粒径のばらつきが比較的小さいのは、この領域において存在する粒径がストーム時の最も大きい営力に制約されるからであろう。また、沖浜において同じく平均粒径のばらつきが小さいのは、この領域が離岸流によって外浜から輸送された浮遊底質が拡散し堆積する領域であり、堆積場における流体の作用の変化が小さいために、漂砂源である新砂丘砂の集団構成がほぼそのまま維持されているのであろうと考えられる。以上のような仮説を支持するためには、外浜における浮遊漂砂の輸送機構、さらにそれを説明する戻り流れなどの水理機構を検討しなければならない。逆にそれらは上記した堆積過程を説明するものでなければならないであろう。

これまで検討してきたように、侵食された砂丘砂は沿岸漂砂として輸送される過程においてその細粒成分が沖方向に流出するが、外浜における集団組成の沖方向変化は、流出した成分が外浜における碎波の作用のもとで浮遊・沈降を繰り返しながら水篩される過程で、細粒な成分ほど沖側に順次輸送されて積成し、その結果外浜の外縁には平均粒径が0.5～2_φの集団が堆積して沿岸砂州を形成していることを示している。このような堆積過程は、底質の輸送が一方向的に沖向きであることを示しており、砂州地形の変形をもたらすようなストームが、冬期季節風時に限定される新潟～東北日本沿岸の波浪条件を反映している。

7. 結 語

以上、底質の構成正規分布集団の組成から沖方向漂砂の堆積過程を検討した。主な結論をまとめると次のようである。

(1) 大潟海岸の堆積過程は、冬期季節風時の波浪によって海へ流出した侵食砂の粒度組成におけるそれぞれの成分が粒径に応じて海浜の各領域に堆積する過程によって説明される。沿岸方向の堆積過程は、低気圧の東進に伴う波向の変化に従って底質の移動方向が東向きから西向きに反転し、その場合底質の粒度組成における細粒成分が水篩されて漂砂の下流側へ輸送され、細粒成分の堆積が遠方へ指数関数的に増大することによって説明される。このような沿岸漂砂の過程で、底質の細粒成分が沖へ流出するが、岸沖方向の堆積過程は、底質の粒度組成における細粒成分が水篩されて沖方向へ順次輸送され、侵食砂の粒度組成におけるそれぞれの成分が粒径に応じて沖方向に分配される過程によって説明される。このようにして、外浜領域では沿岸漂砂は砂州システムの沿岸方向の移動として表現され、岸沖漂砂は砂州地形の3次元構造の変形として示される。

(2) これまで堆積過程について粒度組成によって検討してきたが、この研究では岸沖方向に分布する底質について構成正規分布集団の組成を検討し、岸沖方向の堆積過程についてさらに明らかにすることができた。その主な点についてまとめれば以下のようである。

外浜底質は3～5つの集団で構成されるが、2～3集団が卓越し、沖方向にその組合せが細粒となる。粒径が隣接する2集団の量比を比較すると、沖方向に粗粒な集団の減少とともに細粒な集団が増大する。底質の構成正規分布集団は、それぞれ沖方向の分布範囲を示し、平均粒径が小さい集団ほど分布範囲が沖に拡大

し、その量比のピークが沖側にある。沖方向に卓越集団の平均粒径が漸減し、その量比が増大する。沖浜底質は平均粒径が2.7 ϕ 付近の集団が大きく卓越し、ほぼ一定の組成を示す。このような構成集団組成の沖方向変化は、漂砂源から海へ流出した碎屑物が碎波の作用のもとで浮遊・沈降を繰り返しながら反復して水篩され、粒の沈降速度に応じて細粒なものほど沖へ流出し堆積したものとして理解される。

(3)外浜においては、平均粒径が0.5~2 ϕ 付近の集団が堆積して砂州地形を形成し、その最も沖側には同じく2 ϕ 付近の集団が堆積して外浜外縁を形成している。外浜から沖にいたる集団組成の沖方向変化は、底質の輸送が一方的に沖向きであることを示しており、このことは砂州地形の変形をもたらすようなストームが、冬期季節風時に限定される新潟~東北日本沿岸の波浪条件を反映しているものと考えられる。

(4)主な漂砂源である海岸砂丘砂を構成する卓越集団は、海へ流出した後上記した堆積過程で一方的に沖へ輸送されて砂州地形を形成し、粒度分布の粗粒側端部を構成する粗粒な集団だけが前浜に残留する。このような堆積過程がこの海岸の海岸侵食を加速するひとつの大きな要因であると考えられる。

最後に、この研究にあたって多大なご協力をいただいた京都大学防災研究所の内山 清技官に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 白井 亨：大潟海岸の堆積過程，京大防災研年報，第38号B-2，1995，pp. 619-643.
- 2) 井口正雄：漂砂と流砂の水理学，古今書店，1975，pp. 79-122.
- 3) Ashley, G. M. : Interpretation of polymodal sediments, Jour. Geology, Vol. 86, 1978, pp. 411-421.
- 4) 白井 亨・山下隆男：新潟県西部海岸の砂礫の粒度・鉱物組成とそれをトレーサーとした漂砂源および沿岸漂砂量の推定，京大防災研年報，第37号B-2，1994，pp. 637-656.
- 5) 土屋義人・河田恵昭・吉岡 洋・山下隆男・白井 亨：大潟海岸の侵食制御に関する調査研究，防災研究協会，1987，pp. 1-99.
- 6) 土屋義人・白井 亨・山下隆男：大潟海岸における海浜断面形状の長期変化について，第31回海岸工学講演会論文集，1984，pp. 365-369.
- 7) 白井 亨・土屋義人・芝野照夫：大潟海岸における海岸変形の特徴について(3)，京大防災研年報，第17号B-2，1974，pp. 597-606.
- 8) Tsuchiya, Y., T. Shirai and T. Yamashita : Long-term changes in beach profiles at Ogata coast, Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., Vol. 32, Part 3, No. 292, 1982, pp. 171-187.
- 9) 野田英明・芝野照夫：大潟海岸における漂砂の観測，京大防災研年報，第11号，1968，pp. 429-445.
- 10) 白井 亨・土屋義人：大潟海岸の漂砂源について，第28回海岸工学講演会論文集，1981，pp. 251-255.
- 11) Shirai T. and Y. Tsuchiya : Characteristics of beach configuration of Ogata coast, Coastal Engg. in Japan, Vol. 17, pp.
- 12) 溝口 裕・小木正道：海岸における砂の粒径分布について，第8回海岸工学講演会講演集，1961，pp. 151-155.
- 13) Tanner, W. F. : The zig-zag nature at Type IV curves, Jour. Sed. Petrology, Vol. 28, 1958, p. 372-275.
- 14) Harding, J.P. : The use of probability paper for the graphical analysis of polymodal frequency distributions, Jour. Marine Biol. Assoc. U. K., Vol. 28., pp. 141-153.
- 15) Sinclair, A. J. : Selection of threshold values in geochemical data using probability graphs, Jour. Geochemical Explor. Vol. 3, 1974, pp. 129-149.