

前浜地形変化の支配要因とバームの形成過程

DOMINANT FACTORS DETERMINING FORESHORE CHANGES AND
PROCESSES OF BERM FORMATION

宇多高明*・小俣 篤**・竹淵 勉***

By Takaaki UDA, Atsushi OMATA and Tsutomu TAKEBUCHI

In order to investigate the mechanism of topographic changes of the foreshore due to wave action, field data obtained at Ajigaura Beach once a week since 1975 were analyzed. Dominant factors determining foreshore changes are found to be energy flux of the deep water waves, grain size on the foreshore and foreshore slope. Accretion or erosion of the foreshore can be classified using these three parameters. Beach lamination process of the foreshore was investigated through the field observations at Ajigaura Beach. It is found that berm can be formed by some sublayers composed of coarse and fine materials or only by one layer composed of fine material. These changes can be elucidated by the wave climate change.

Keywords: foreshore, topographic change, dominant factors, berm formation, beach lamination

1. ま え が き

前浜地形の変化を波や底質の条件と結び付けた研究は数多い。Rector¹⁾、Nayak²⁾は次元解析をもとに二次元実験結果を整理し、平衡状態における前浜勾配やバームの高さを波と底質の条件を用いて定式化した。また、Sunamura³⁾、武田ら⁴⁾は現地海岸のデータを用いて同様の定式化を行った。

一方、前浜地形変化は、汀線の前進・後退や、沿岸砂州の発生・消失とも関係付けられる。岩垣ら⁵⁾は、Johnson⁶⁾による暴風海浜と正常海浜の分類に底質粒径と波高の比を縮尺効果として取り入れ、沿岸砂州の発生限界を示した。分類に用いたパラメーターは、次元解析より得られたものであり、砕波帯内での漂砂現象を直接観察して得られたものではない。堀川ら⁷⁾は、Kemp⁸⁾による phase difference の考え方に従い、海底勾配を含んだパラメーターを導入して平衡海浜形状の分類を行った。この分類には砕波帯内での波浪変形の効果が取り込まれているので、岩垣らの分類より現象を物理的にとら

えている。以上のように、次元解析をもとに海浜変化を論ずる場合、各パラメーターと物理現象との関係が明瞭でなく、現地海岸にこれらを適用する場合に、一致・不一致の原因を明確にしにくい。この点からすると、砕波帯内での海浜変形は浮遊した底質の挙動に強く支配されるという考え方に立ち、海浜変形の分類を行った服部ら⁹⁾の方法は、砕波帯内での底質移動の機構にまで踏み込んで海浜変形をとらえる意味において、現象を物理的に扱っていると考えられる。

著者らは、阿字ヶ浦海岸のデータより汀線の前進・後退と前浜の堆積・侵食とが必ずしも対応しないこと¹⁰⁾、底質の粒径は時空間的に変化する¹¹⁾ので代表値を単純に決定できないことを明らかにしている。また、砕波帯内においては浮遊形態での底質移動が活発であり^{10), 12)}、したがって砕波帯内での海浜過程の解明を進めるうえで、底質の浮遊機構や浮遊底質の輸送機構を明らかにすることが重要と考えている。さらに、時間的に変化する波浪の条件と海浜地形との動的な応答関係を知ることも重要な課題である。加藤ら¹³⁾は波崎海岸における海浜断面測量の結果を用いて、来襲波のエネルギーフラックスをパラメーターとして岸沖漂砂による汀線変化のモデル化を行った。このモデルでは、エネルギーフラックスを用いる物理的な根拠に堀川らの分類法を引用してい

* 正会員 工博 建設省土木研究所海岸研究室長
(〒305 茨城県つくば市大字旭1)

** 正会員 建設省土木研究所海岸研究室 (同上)

*** 前・建設省土木研究所海岸研究室

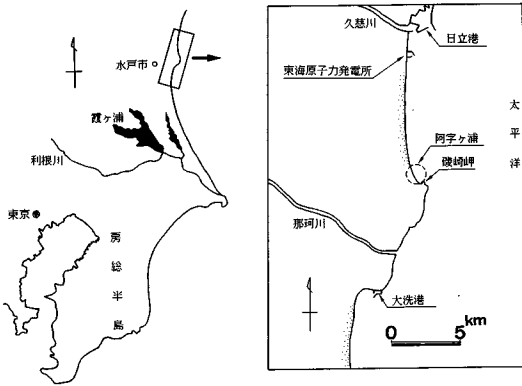


図-1 阿字ヶ浦海岸位置図

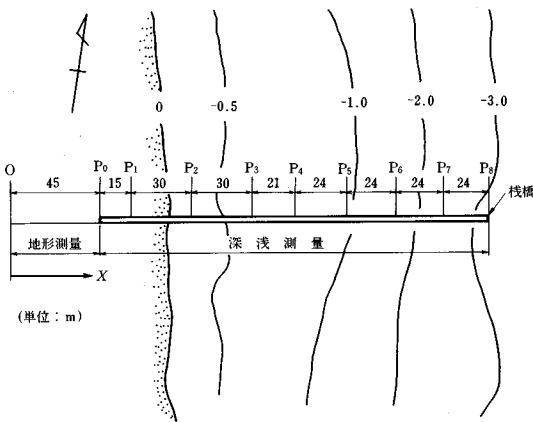


図-2 漂砂観測用栈橋

る。

前浜地形変化を考えるうえでの重要な要素の1つは、底質粒径の変化である。前浜の底質粒径が時空間的に変化することは良く知られており、たとえば Clifton¹⁴⁾ は前浜の断面内に層状構造が存在することを示している。また、底質粒径の空間的な分布は、橋本ほか¹¹⁾ による阿字ヶ浦海岸での掘削調査によっても調べられた。このような底質粒径の空間的な変化は、波浪条件の変化に伴う海浜地形変化の結果として生じると考えられる。したがって、岸沖漂砂による地形変化の機構を解明するうえにおいて、底質の時空間的な変化過程を明らかにすることは重要な課題となる。しかし、現地海岸における前浜地形、底質および波浪条件の相互関連を論じた研究は少ないのが現状である。

本研究では、前浜の堆積、侵食機構を明らかにすることを目的として、阿字ヶ浦海岸(図-1参照)で取得した定期観測データを解析した。定期観測は、同海岸にある漂砂観測用栈橋(図-2)を用いて、1975年より現在まで毎週1回の割合で継続的に行われている¹⁵⁾。この定期観測データをもとに、波による前浜地形変化の支配要

因を検討した¹⁶⁾。また、特にバーム形成時における底質粒径の時空間的な変化を、定期観測以外に別途実施した現地観測により調べた¹⁷⁾。これにより、バームを構成する底質の粒径変化を明らかにする。また、定期観測データを加えて解析し、バーム形成時の底質粒径変化と波浪条件の関係について論ずる。

2. 前浜地形変化の支配要因

(1) 支配要因の抽出

二次元海浜変形と波浪、底質条件との関係を扱った研究は数多い。岩垣ら⁵⁾は波形勾配と波高粒径比をパラメーターとして暴風海浜と正常海浜の分類図を作成した。その後も多くの研究が行われており、たとえば砂村¹⁸⁾は汀線位置の変化モデルを提案している。これらの研究においては、二次元的な地形変化の代表パラメーターとして汀線位置が用いられている。しかし、現地海岸では汀線が後退しつつバームが発達する場合も多く¹⁷⁾、汀線位置の後退が前浜の侵食と必ずしも対応しない。このため、二次元海浜変形を考えるうえで、汀線位置の変化が前浜の堆積、侵食の判定基準になり得るかは疑問である。加藤ら¹³⁾は波崎海岸での現地観測データをもとに短期的な地形変化をモデル化する際に、海浜断面上のT.P.約0.7mの位置の水平方向変位量を用いている。その理由は、この地点の地形変化が岸沖漂砂による地形変化の特性を良く表わすためと考えられる。岸沖漂砂によって生ずる典型的な地形変化であるバームの形成・消失は、平均潮位以上の場所で生じる。そのため、汀線位置の変化より、前浜地形の変化の方が岸沖漂砂による地形変化を良く表わすと考えられる。結局、汀線付近における二次元的意味でのNetの岸沖漂砂の方向は、それによって決定される前浜部の地形変化より判断すべきと考える。このため本研究では、前浜地形の堆積・侵食の判定を次のようにして行った。最初に、毎週の地形測量結果を用い、連続した2回の測量結果を重ね合わせた。このとき、T.P.0mより陸上の前浜地形が堆積傾向の変化を示せば、その1週間内における汀線付近のNetの岸沖漂砂の方向は岸向と判断した。侵食の場合はこの逆である(図-3参照)。

前浜の測量は1週間ごとであることから、変化の最小時間スケールは1週間になる。バームの形成は1~4週間の期間を要するものがほとんどであり¹⁰⁾、その期間に大きく波浪条件が変わることは少ない。一方、バームの消失時には、一般に数日で大きな地形変化が生じるが、堆積に要する時間スケールからみて、バーム消失後の数日間に著しい堆積変化が生じることはない。したがって、前浜地形の侵食・堆積傾向を1週間の時間スケールで判断することに問題はないと考えられる。また、潮位変化

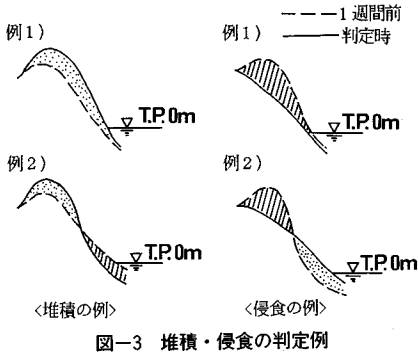


図-3 堆積・侵食の判定例

に伴う地形変化は、1 潮汐間でほぼ打ち消されることがわかっている¹⁰⁾。

砕波帯内においては、波のトラフレベル付近でも高濃度の浮遊砂が観測されており^{12), 20)}、この浮遊砂が Net の岸沖漂砂量に影響すると考えられる。しかし、既往の小規模実験ではこのような浮遊現象が再現されていないと判断され、このことが縮尺効果による実験と現地との地形変化の差異をもたらす大きな原因と考えられる。たとえば、阿字ヶ浦海岸での定期観測結果と岩垣らの分類図⁵⁾とを比較する(図-4 参照)。阿字ヶ浦での波高粒径比 (\bar{H}_0/d_{50} 、ここに \bar{H}_0 は 1 週間の平均有義波高) は図示するように $5 \times 10^2 \sim 10^4$ の範囲にあり、岩垣らの分類図によればほとんどのデータが暴風海浜の範囲にあることになる。しかし、実際には正常海浜の海浜断面形状もみられることから、この分類図は、現地海岸での地形変化に適用できないことになる。

武田ら⁴⁾は、阿字ヶ浦海岸の北に位置する那珂海岸での観測データを用い、 H_0/gT^2 と d/H_0 (H_0 : 砕波波高, g : 重力加速度, T : 周期, d : 底質の平均粒径) によりバームの形成領域を分類した。また、ここに用いられたパラメーターは、砕波帯内における漂砂の移動方向の判定にも用いられている¹⁹⁾。武田らのパラメーターを用いて、本研究で定義した前浜の侵食・堆積のデータを分

類したところ、明瞭な分類結果を得ることはできなかった。これは、武田らの分類がバームの形成領域を求めているのに対し、本研究のデータは前浜での漂砂の移動方向を示していること、武田らのパラメーターには前浜勾配等、局所的な前浜地形の影響が直接的に取り込まれていないことに起因すると考えられる。そこで、本研究では、前浜の堆積・侵食を支配する因子として、物理的な解釈が行いやすいことを条件とし、できるだけ単純なパラメーターを採用することにした。

現地海岸における底質の浮遊、およびその輸送・底質の掃流等は、砕波帯内の流体運動や波による流速を支配する来襲波のエネルギーフラックスに強く依存すると考えられる。そこで、外力の代表パラメーターとしてエネルギーフラックスを用いる。従来より、二次元地形変化をもたらす外力の代表パラメーターとしてしばしば沖波波形勾配が使われてきた。今回用いた波浪データより求めた週平均の換算沖波有義波高 \bar{H}'_0 とその波形勾配 \bar{H}'_0/L_0 の関係を図-5 に示す。沖波有義波高の変化が波形勾配と良く対応し、波形勾配の変化は波高の変化とほぼ同義になることがわかる。また、波高の変化はエネルギーフラックスの変化とよく対応する。図-5 にもみられるように、 \bar{H}'_0 の変化に比べ \bar{H}'_0/L_0 の変化は小さく、分類の精度の面からしても、エネルギーフラックスを採用する方がよい。また、砂の移動形態、および底質の浮遊限界を判断するうえで、底質の粒径は重要な影響もつ。これらのことから、前浜の堆積・侵食の分類をエネルギーフラックス F と粒径で整理した。ただし、地形測量は 1 週間ごとに行っているため、1 週間の積分された地形変化より、侵食・堆積を判定することになる。そこで、沖波観測データより日平均波高、周期を求め、毎日の F を計算し、さらにそれを 1 週間積分して平均値 \bar{F} を求め、これを代表値とした。なお、毎日の波向資料がないため、以下の解析では波向は考慮していない。また、底質データは \bar{F} を計算する初日のタイミングで

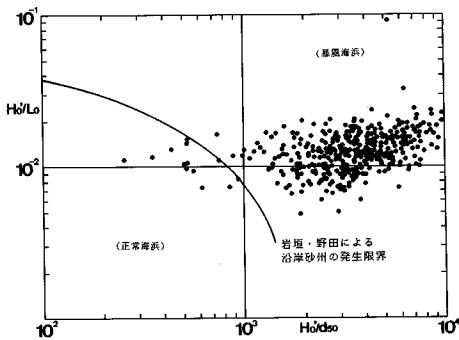


図-4 岩垣らによる正常海浜と暴風海浜の分類と現地データの比較

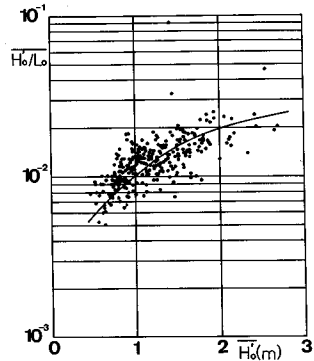


図-5 \bar{H}'_0 と \bar{H}'_0/L_0 の相関

のP₀地点(図-2参照)における底質の中央粒径 d_{50} を用いた。

前浜に底質が堆積することによってバームが形成され、前浜が急勾配になると堆積は生じなくなり、それ以上の地形変化は生じなくなる。同様に、侵食により前浜勾配がある程度緩くなると、それ以上の侵食は生じなくなる。このように、堆積・侵食には単に外力や底質の特性だけでなく、地形形状自体も影響する。ここでは前浜の侵食・堆積を判定する1パラメーターとして、地形を代表する特性値として前浜勾配 i_r を選んだ。ここで、 i_r はT.P.0m以上の前浜(バームがある場合にはバーム頂より沖)の平均的な勾配とした。

(2) \bar{F} , d_{50} , i_r による前浜の堆積・侵食の分類

1975年6月から1986年12月までの11年6か月間の地形測量データを用いて、前浜の堆積・侵食の分類を行った。横軸に \bar{F} 、縦軸に d_{50} をとり、 i_r を3つの範囲に分けて整理した(図-6, 7, 8)。図-6が $i_r \leq 0.04$ 、図-7が $0.04 < i_r \leq 0.06$ 、図-8が $i_r > 0.06$ の範囲にあるデータを示す。なお、データ取得期間の平均前浜勾配は0.052である。このとき用いた i_r の値は d_{50} と同様、 \bar{F} を計算する際の初日における値である。各図をみるとデータにばらつきはあるものの、 \bar{F} が大きいと侵食、小さいと堆積となる傾向が明らかである。さらに \bar{F} がある程度大きくても、 d_{50} が大きくと堆積または安定傾向となる。そこで、この傾向を調べるために、堆積・侵食を示すデータの分類境界を全体的なデータの分布より判定して図中の実線と破線で示した。境界が明瞭でないため、侵食を示すデータのみより判断した境界を実線、堆積を示すデータのみより判断した境界を破線とした。同じ粒径において破線で示す境界より \bar{F} が大きくなるとほとんどのデータは侵食を示す。また、実線で示す境界より \bar{F} が小さい場合には、ほとんどが堆積または安定となる。各図の実線より右側の侵食領域においても、 d_{50} が0.5mm以上では必ずしも侵食となっていない。図中に示した実線および破線は次式で表わされる。

$$d_{50} = C\bar{F}^{0.8} \dots\dots\dots(1)$$

ここに d_{50} はmm、 \bar{F} は $t \cdot m / (m \cdot s)$ の単位をもつ。また、 C は定数である(表-1参照)。表より i_r が大きくなると C の値は大きくなるのがわかる。つまり、 i_r が大きいほど侵食されやすいという結果を得る。各図より、 $\bar{F} > 2 t \cdot m / (m \cdot s)$ ではほとんどが侵食傾向を示し、 $\bar{F} < 4 t \cdot m / (m \cdot s)$ および $d_{50} > 0.5 \text{ mm}$ ではほとんどが堆積傾向を示す。また、前浜勾配が大きいと侵食されやすい傾向を示す。データのばらつきの原因としては、一部のデータに関して1週間という時間スケールが適切ではないこと、沿岸漂砂による地形変化が考慮されていないこと、 \bar{F} が沖波から求められているため浅海のお底地形

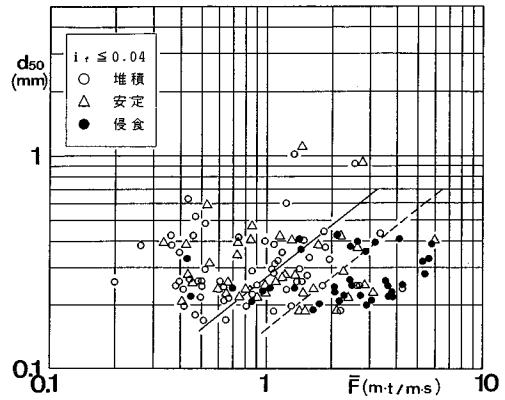


図-6 前浜の堆積・侵食の分類図 ($i_r \leq 0.04$)

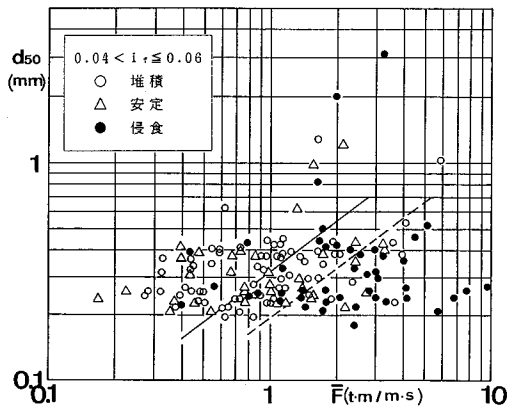


図-7 前浜の堆積・侵食の分類図 ($0.04 < i_r \leq 0.06$)

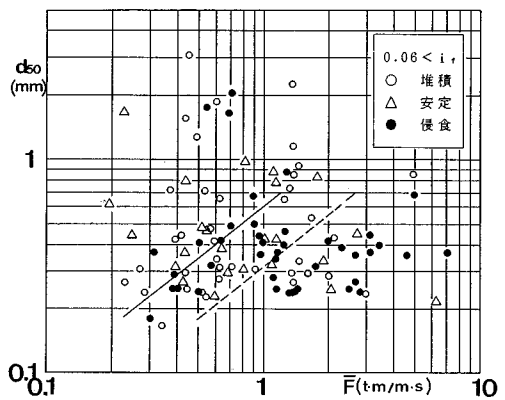


図-8 前浜の堆積・侵食の分類図 ($i_r > 0.06$)

変化の影響が考慮されていないことなどを挙げることができる。それにもかかわらず、ここで用いた \bar{F} 、 d_{50} 、 i_r により前浜の侵食、堆積の傾向はよく分類できると考えられる。以上のことから、前浜の地形変化は入射波のエネルギーフラックス、前浜の底質中央粒径、前

表-1 定数 C の一覧

i_r の範囲	境界線	C
$i_r \leq 0.04$	実線	0.27
	破線	0.15
$0.04 < i_r \leq 0.06$	実線	0.31
	破線	0.19
$0.06 < i_r$	実線	0.60
	破線	0.31

浜勾配に強く影響されると考えられ、これらに波向、海底地形等を加えたパラメーターにより支配されると考えられる。

3. バームの形成過程に関する現地観測

(1) 観測方法

現地観測は、阿字ヶ浦海岸に設置されている漂砂観測用栈橋を利用し、栈橋中心軸の陸側延長上に測線を設けて行った。バームの掘削調査は、1987年5月21日と1988年2月9日～2月22日に実施した。1987年5月21日には、バーム内部の底質構成を明らかにするために、バーム頂点位置から沖側に約10mの範囲を掘削し、掘削溝側面を写真撮影した。1988年2月9日～2月22日の調査では、バームの形成過程を明らかにするために、前浜部の48mの範囲において水準測量、底質採取および写真撮影を毎日行った。この範囲は、定期観測のデータによればバームが形成されやすい範囲にあたる。底質は測量範囲内の10点で約500gずつ採取した。また、観測最終日の2月22日には測線上に溝(延長約20m、幅約3m、深さ約1m)を掘り、底質の堆積状況を調べた。

(2) 観測結果とその考察

a) 1987年5月21日の観測結果

2月19日から5月21日までの間におけるバームの発達に伴う海浜断面形の変化を図-9に示す。なお本報では、栈橋中心軸上のP₀地点より陸側45mの位置に基準点Oを設け、それより沖方向にX軸をとった(図-2参照)。また、T.P.0mを基準として鉛直上方にZ軸を定めた。

図-9より、バームの形成状況を調べると、2月19日から3月5日の間に35m ≤ X ≤ 55mの範囲でバームの発達がみられたが、その後はそれより陸側の20m ≤ X ≤ 40mの範囲で土砂が堆積し、5月21日には前浜勾配 $i_r = 0.068$ 、バーム頂点高 $Z_B = 1.6$ mのバームが形成された。このバームは4月9日までにはほぼ安定し、その後5月21日まで前浜の断面形はほとんど変化しなかった。バーム形成時(2月19日～4月9日)前後の期

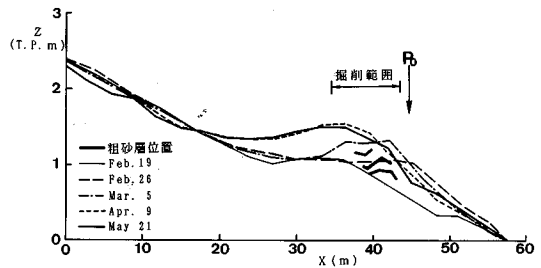


図-9 前浜断面変化(1987年2月19日～5月21日)

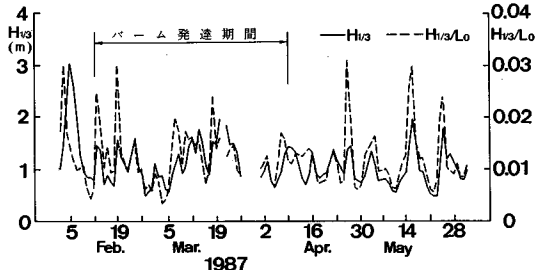


図-10 バーム形成時前後の期間の波浪条件(1987年2月～5月)

間の波浪条件を図-10に示す。日平均有義波高 $H_{1/3}$ はバームの発達期間を通じて0.5～2.0mの間で変動していた。特に、 Z_B が大きく増加した3月5日～4月9日の間では $H_{1/3} = 1.5$ mの波が数日おきに来襲したことが特筆される。

図-9の35m ≤ X ≤ 43mの範囲における掘削断面の一部を写真-1に示す。バームは粗砂層と細砂層から成り、各層は2～10cmの厚さを有している。細砂層の砂は当海岸によくみられる $d_{50} = 0.3$ mmの砂である。一方、粗砂層には、一部粒径数mm～1cm程度の礫も混じっており、平均的に1mm程度の粗砂から成っている。このようなバーム内での層状の堆積はClifton¹⁴⁾の調査報告と一致している。次に、粗砂層に注目して、その岸沖方向分布を調べた。5月21日の海浜断面形状と、当日撮影した一連の写真より求めた粗砂層の位置を図-9に示した。粗砂層の位置は当日の測量結果をもとに写真より読み取ったため、その精度は±10cm程度と考えられる。粗砂層は2月26日と3月5日に測定されたバーム頂付近の前浜形状とほぼ平行に分布していることから、各層は2月19日から3月5日の間に形成され、バームは粗砂、細砂が繰り返し堆積することにより発達し、その結果バーム内部に層状模様が形成されたと推定される。そこで、2月19日から3月5日までの前浜部の状況を写真-2, 3, 4に示した。2月19日にはほぼ前浜全域が細砂で覆われていた(写真-2)。しかし、2月26日には海浜の広い範囲が礫で覆われているのが明らかで

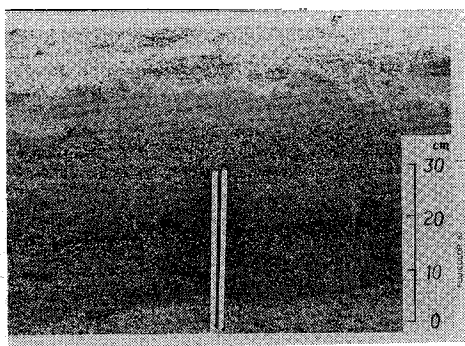


写真-1 バーム内の層状構造

あり(写真-3), 3月5日には再び砂により覆われた(写真-4)。2月26日における礫に覆われた海浜表面の状況は、図-9に示した粗砂層中心軸のうち上から2番目の粗砂層の形成時の状況を示すと考えられる。また、2月19日~26日の波浪条件(図-10)をみると、2月23日には $H_{1/3} \approx 1.7$ mの波浪が来襲している。2月26日~3月5日の間でも $H_{1/3} \approx 1.2$ mの波浪が来襲していることから、粗砂はある程度波高が高いときに打ち上げられたと考えられる。なお、3月5日~4月9日までの堆積時に形成された断面については、掘削位置が最終的なバーム頂より沖に限定されているので、その構造は明らかでない。

b) 1988年2月9日~2月22日の調査結果

観測期間中の代表時期における海浜断面の全体形を図-11に示す。ここに、沖合部のくさび状の地形は橋脚の洗掘を表わす。2月11日と18日の断面形はともにステップ状の地形を有し、 $X \approx 130$ mで海底勾配が急変して深くなっていた。さらに、図-11に示した測量範囲における毎日の地形変化を、2月9日を基準とした地盤高変化量 ΔZ として図-12に示す。地盤高は2月15日まで $X \geq 50$ mで変化していたが、その後堆積範囲が陸側へと広がり、19日以後その変化は $X \geq 35$ mで生じた。また、地形変化は連続的でなく断続的に生じており、12~13日、18~19日、19~20日、20~21日に大きかったことがわかる。このように、1連のバーム形成過程の中でバームが形成される範囲やその形成速度は一定ではない。観測期間中の波浪条件(図-13)によると、日平均有義波高 $H_{1/3}$ はほとんど1 m以下であり、静穏であった。また、波形勾配 $H_{1/3}/L_0$ は2月10日に0.025と比較的大きな値を示すものの、それ以後は0.007より0.015の範囲に分布している。また、図中には比較的著しい地形変化のみられた期間の初日を矢印で示した。地形変化の大きいときは、波浪条件が変化したときと対応し、バームの形成過程が波浪条件の変化とよく対応することを示す。



写真-2 前浜の状況 (1987年2月19日)

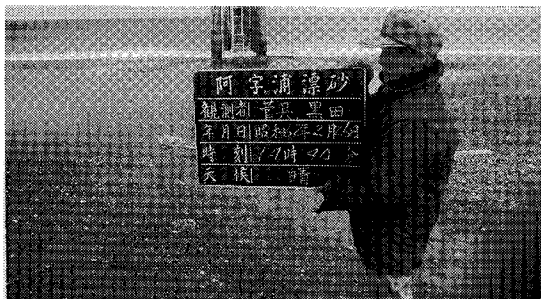


写真-3 前浜の状況 (1987年2月26日)

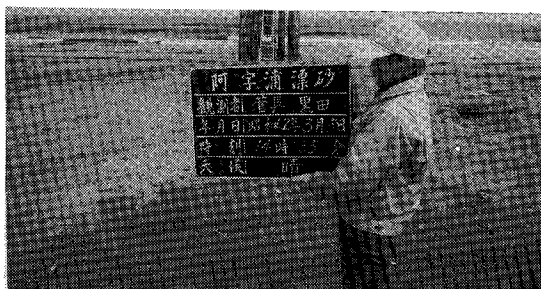


写真-4 前浜の状況 (1987年3月5日)

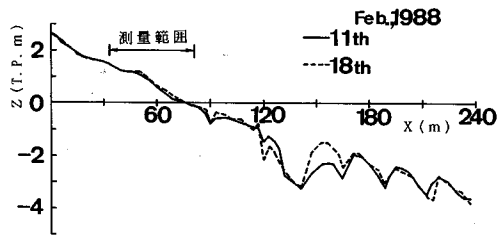


図-11 栈橋に沿う海浜断面形 (1988年2月11日と2月18日)

次に、代表地点の地盤高 Z と底質の中央粒径 d_{50} の経時変化を図-14に示す。代表地点としてバームの最終的な頂点位置付近の $X=51$ m、汀線付近の $X=81$ m、およびそれらの間の $X=60$ m 地点を選んだ。 $X=51$ m 地点の地盤高 Z は2月15日以前にはほとんど変化せず、その後堆積の傾向を示した。 $X=60$ m 地点の地盤

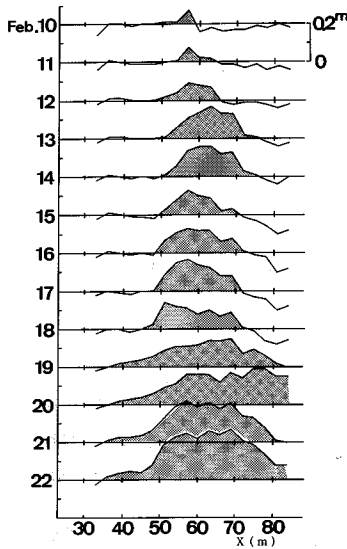


図-12 前浜地盤高変化量 ΔZ の岸沖分布

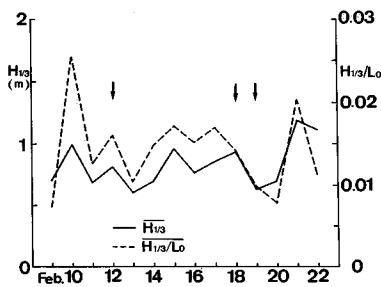


図-13 バーム形成時の波浪条件 (1988年2月)

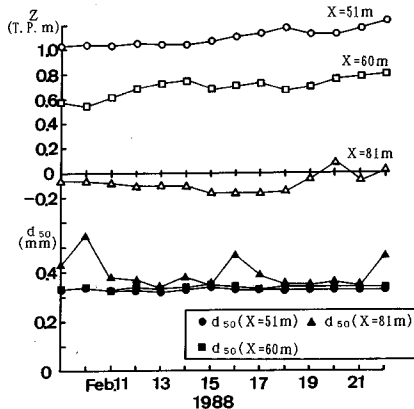


図-14 代表地点の地盤高 Z と底質粒径 d_{50} の経時変化

高も、2月10日～14日の間に大きく上昇したが、その後はあまり変化していない。以上のように地形変化は生じているものの、 d_{50} は両地点とも始終約0.3mmであって変化は小さい。汀線よりやや沖側の $X=81$ m 地点で

は2月18日以前に Z は平均的に減少傾向にあり、その一方で d_{50} は2月10日、16日に0.4mmを越える粗粒が現われた。さらに Z が増加した18日以降にも粗粒となった。以上の観測結果より、汀線付近では粒径変化があったものの、前浜では粒径が変化しなかったことがわかる。2月22日に小型バックホーにより、 $30\text{ m} \leq X \leq 50\text{ m}$ の範囲で深さ1mの掘削を行ったが、層状の模様は形成されていなかった。このことは、前回の観測結果と大いに異なる。

以上より、バームが発達する際に生じる前浜底質の時間空間的な変化過程は一定したものでなく、粗砂と細砂が交互に堆積する場合と、細砂のみが堆積する場合とがあることがわかった。そして、それらの相違点としては次の点が挙げられる。

① バームの形成が始まってから安定するまでのバーム頂点高さ Z_b の変化量は、粗砂と細砂が交互に堆積する場合約1mであったのに対して、細砂のみ堆積する場合は0.2mと小さかった。

② バーム形成時の $H_{1/3}$ は、平均的にみて両者ともに1m程度であったが、前者では $H_{1/3} \approx 1.5\text{ m}$ の波が数回来襲した。

以上のことから次のような解釈が可能となる。波高がある程度大きい場合は、汀線付近に存在していた粗い砂を前浜上に輸送するだけの掃流力が生じるので粗砂と細砂による層状の断面が形成される。また波の打ち上げ高も大きいためバームは大きく発達する。逆に波高が小さいと、掃流力が小さいため細砂が堆積するのみである。また、打ち上げ高も小さいためバーム高は低くなる。次節ではこれらの点について定量的に検討する。

4. 波浪、底質条件とバームの形成との関係

バーム内の層状構造の有無や、バームの高さの相違は、波浪条件や底質粒径に強く依存する。そこで、波浪条件と底質粒径の変化が、バームの形成過程に及ぼす影響を定期観測のデータを用いて詳細に検討した。

定期観測によれば、1975年6月より1986年12月の間にバームは合計63回形成された。このうち、波浪および底質のデータが整っている41組のデータを用いて、バームの高さと底質粒径、波浪条件の関係を調べた。バームの高さの代表値としてバームが最も成長したときの高さ Z_{bmax} をパラメーターとして、週平均した入射波のエネルギーフラックス \bar{F} と底質の中央粒径 d_{50} により、式(1)に基づく前浜の侵食・堆積の分類図上に図示した(図-15)。ここに \bar{F} はバーム高さが最大となる日時に先立つ1週間のデータを平均して求めた。また d_{50} は P_0 地点の1週間前の底質粒径である。前浜の侵食・堆積の判定図においては、前浜勾配が重要なパラメーター

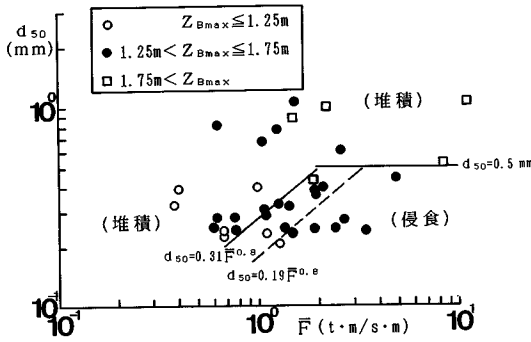


図-15 侵食・堆積の区分図上での Z_{Bmax} の分布

となる。本研究の場合、バーム高が最大となる1週間前の前浜勾配 i_f は平均して0.051であった。そこで、図中には $0.04 \leq i_f \leq 0.06$ の場合に求められた堆積・侵食の区分線を示した(表-1参照)。実線は侵食データのみより判断した区分線、破線は堆積データのみより判断した区分線である。データの多くは前浜が堆積傾向を示す領域にある。また、 \bar{F} および d_{50} が小さいと Z_{Bmax} も小さく、 \bar{F} と d_{50} が大きいときには Z_{Bmax} も大きくなる傾向がある。結局、 d_{50} が小さい場合、 \bar{F} がある程度大きくなると前浜は堆積傾向ではなくなり、バームの成長が止まるため、バーム高さは低くなる。一方、 d_{50} が比較的大きい場合には、ある程度 \bar{F} が大きくてもバームの堆積傾向が維持される。そのため、バーム高も高くなる。以上の点より、バームの形成は波浪条件だけでなく、底質粒径によっても強く支配されることがわかった。

次にバームの形成過程に着目し、バームが2週間以上成長し続け、かつ波浪、底質のデータが整っている12例(表-2参照)のデータより分析を進めた。バームの成長を代表するパラメーターとして、1週間のバーム高の変化量 ΔZ_B を用い、その1週間の平均エネルギーフラックス \bar{F} と ΔZ_B との関係を調べた(図-16)。この場合、バーム高の変化の生ずる1週間前の値の代表値として P_0 地点の d_{50} をパラメーターとした。 \bar{F} が増加すると ΔZ も増加する傾向が明らかである。また、侵食データのみより判断した区分線(図-15、破線)の係数に $d_{50} = 0.5 \text{ mm}$ および 0.3 mm を代入して得られた \bar{F} の値を図中破線で示した。この破線は $d_{50} = 0.5 \text{ mm}$ の場合は $\bar{F} \geq 2.1$ で、 $d_{50} = 0.3 \text{ mm}$ の場合は $\bar{F} \geq 1.1$ でそれぞれ侵食傾向となることを示す。各データは、 $d_{50} \leq 0.3 \text{ mm}$ の場合に $\bar{F} = 1.1$ を上限として、また $0.3 \text{ mm} \leq d_{50} < 0.5 \text{ mm}$ の場合に $\bar{F} = 2.1$ を上限として分布している。このように、バーム発達時の \bar{F} は d_{50} ごとに定まる沖向き漂砂の発生限界の \bar{F} より小さくなる。結局、波浪作用時の前浜の底質粒径がバームの発達および大きさに影響を与えることが明らかである。さらに、

表-2 検討に用いた資料一覧

バーム存在期間	粗粒化の有無
July 22, 1976 ~ Aug. 11	×
May 31, 1979 ~ July 12	×
June 12, 1980 ~ July 3	×
Mar. 3, 1983 ~ Apr. 21	○
Apr. 4, 1985 ~ Apr. 25	○
May 8, 1986 ~ June 12	○
July 21, 1977 ~ Aug. 4	×
Nov. 8, 1979 ~ Nov. 30	○
Aug. 5, 1982 ~ Aug. 19	×
Nov. 10, 1983 ~ Dec. 1	○
Apr. 3, 1986 ~ Apr. 17	×
Sep. 11, 1986 ~ Sep. 25	×

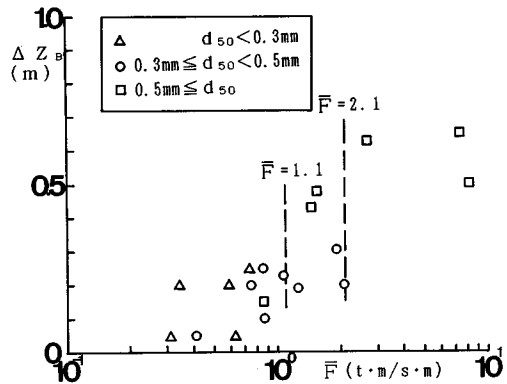


図-16 ΔZ_B と \bar{F} の関係
(d_{50} はバーム成長開始1週間前の値)

ΔZ_B は1週間の間のバームの成長高を表わすことから、バームの成長速度は岸向き漂砂が生じる条件の範囲内において、 \bar{F} が大きいほど速いことになる。

以上の議論において、 d_{50} は地形変化の生ずる前のデータを用いているため、必ずしも波の作用により移動した底質の特性値を示さない場合がある。そこで、波浪が作用した後の底質粒径を用いて、 ΔZ_B および波浪条件の関係を同様に調べた(図-17)。この場合も図-16とほぼ同じ関係が成立する。このことからバーム形成時、前浜沖に細砂、粗砂が十分あるとすれば、 \bar{F} が大きいときにはそれに応じて粒径の大きな底質が前浜に堆積することが明らかである。

前節ではバームが大きく成長するときに層状構造が形成されると述べたが、ここではこの点をさらに詳しく検討する。まず表-2に示す12例について、バーム形成

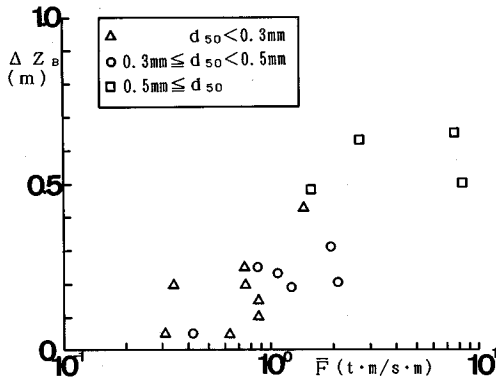


図-17 ΔZ_B と \bar{F} の関係 (d_{50} はバーム成長後)

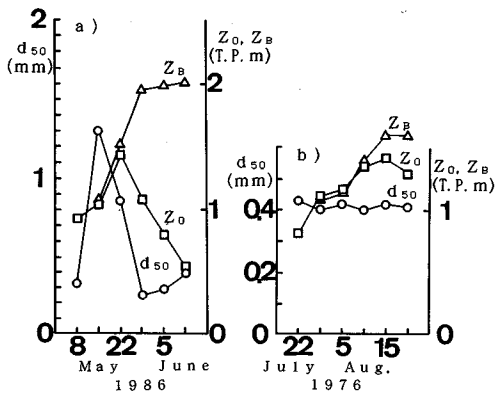


図-18 バームの発達例

- a) 1986年5月8日～6月12日,
- b) 1976年7月22日～8月26日

時の P_0 地点の底質中央粒径 d_{50} の経時変化を調べた。その結果、バームの成長状況と底質粒径の変化は2種類のタイプに分けられることがわかった。代表例を図-18に示す。図には d_{50} が変化する際の前浜地形変化を調べるために、 Z_B および P_0 地点の地盤高 Z_0 の経時変化も併記した。図-18 a) では5月15日に $d_{50}=1.3$ mmと粗粒となったが、5月29日には $d=0.25$ mmと再び細粒となった。この間、 Z_0 は5月22日まで増加し、その後減少した。また、 Z_B は5月29日まで増加しその後安定した。このように、a) はバーム形成時に一時的に粗粒の底質がみられる場合である。b) では、 Z_B および Z_0 が増加し、バームが成長しているにもかかわらず、 d_{50} はほぼ一定値を示す。これは均一砂のみが前浜に堆積したことを表わしている。以上のようにバームの形成過程には、一時的に底質が粗粒となる場合と、均一な細砂が堆積する場合とがある。前出の表-2には、これらの分類を行った結果も併せて示した。12ケースのうち5ケースで粗粒化がみられ、他の7ケースでは均一砂の堆積がみられた。さらに、粗粒化の有無ごとにバームが

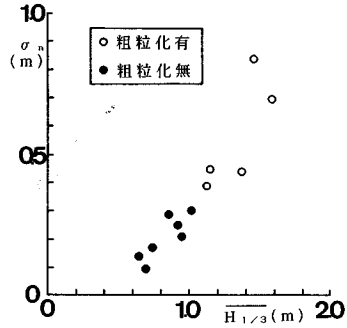


図-19 $\bar{H}_{1/3}$ と σ_n による粗粒化の有無の分類

出現し始めたときの Z_B とバームが最も高くなったときの Z_{Bmax} の差を求めて比較したところ、粗粒化が生じる場合、この差は0.6～1.25mであったのに対して、生じない場合には0.05～0.45mであった。すなわち、バームが大きく成長する場合に粗粒化が生じ、あまり成長しない場合は細砂が堆積していたことがわかった。

前浜の底質粒径に変化が生じる場合、バームの成長は大きく、またそのときの \bar{F} は大きな値であった(図-15参照)。阿字ヶ浦海岸では、高波浪の継続期間は数日程度である。したがって、バームが形成される数週間の間には波浪条件は変動したはずである。バーム形成時には、入射波のエネルギーフラックスと底質粒径との間にある関係が成立し、エネルギーフラックスが大きいほど底質粒径は大きかった。そこで各バームが形成された期間の日平均沖波有義波高の平均値 $\bar{H}_{1/3}$ と、その標準偏差 σ_n を P_0 地点の底質粒径変化の有無ごとに分類し図-19に示す。図によれば $\bar{H}_{1/3}$ および σ_n とも小さな値のときには粗粒化はなく、 $\bar{H}_{1/3}$ 、 σ_n とも大きいときに粗粒化が生じた。すなわち、波高が平均的に高く、さらに時間的変動が大きいとき、前浜の底質粒径が変化することが明らかである。粗砂が堆積するためにはある程度波高が高い必要がある。また、バームが大きく成長するためにもある程度の高波浪が必要となる。したがって高波浪と静穏な波浪が交互に来襲する場合に波浪条件に応じた底質が前浜に堆積して層状構造のバームが形成され、かつ、バームも大きく成長することになる。

5. 結 論

(1) 汀線付近における Net の岸沖漂砂の移動方向を沖波エネルギーフラックス、 P_0 地点での底質の中央粒径および前浜勾配で整理した結果、前浜の侵食と堆積を分類することができた。中央粒径が0.5 mm 以上ではほとんどの場合堆積となり、それ以下では式(1)に示す関係で分類された。この関係式の定数は前浜勾配によって変化し、前浜勾配が大きいほど侵食されやすい傾

向となる。

(2) バームは粗砂と細砂が交互に堆積してできる場合と均一砂が堆積してできる場合とがある。バームが層状構造を示す場合、バーム高さの増加量は0.6~1.25mであったのに対し、層状構造のない場合では0.05~0.45mであり、層状構造を有するバームの方が成長が著しかった。

(3) 入射波のエネルギーフラックスが大ききとき、バームの成長は速やかであり、かつ粗砂が堆積する。一方、入射波のエネルギーフラックスが小さいときには、バームの成長は遅く細砂が堆積する。バームの成長は入射波のエネルギーフラックスと底質粒径に強く依存する。

(4) バームが層状に堆積したときには来襲波の標準偏差が大きかった。バームの層状構造の形成原因は、入射波のエネルギーフラックスの変化に伴って前浜に堆積する底質の粒径が変化することによる。

謝 辞：沖波波浪データは運輸省鹿島港工事事務所の方々に便宜を図って頂いた。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Rector, R. L. : Laboratory study of equilibrium profiles of beaches, BEB Tech. Memo. No. 41, 1954.
- 2) Nayak, I. V. : Equilibrium profiles of model beaches, Proc. 12th Conf. Coastal Eng., pp. 1321~1329, 1970.
- 3) Sunamura, T. : Quantitative predictions of beach-face slopes, Geol. Soc. Am. Bull., Vol. 95, pp. 242~245, 1984.
- 4) 武田一郎・砂村継夫：バームの形成条件と高さ，地形，Vol. 3, pp. 145~157, 1982.
- 5) 岩垣雄一・野田英明：海浜変形の実験における縮尺効果の研究，第8回海岸工学講演会講演集，pp. 138~143, 1961.
- 6) Johnson, J. W. : Scale effects in hydraulic models involving wave motion, Trans. Am. Geophy. Union, Vol. 30, pp. 517~525, 1949.

- 7) 堀川清司・砂村継夫・近藤浩右・岡田 滋：波による二次元汀線変化に関する一考察，第22回海岸工学講演会論文集，pp. 329~334, 1975.
- 8) Kemp, P. H. : The relationship between wave action and beach profile characteristics, Proc. 7th Conf. Coastal Eng., pp. 262~277, 1968.
- 9) 服部昌太郎・川又良一：砕波帯内の海浜変形過程，第25回海岸工学講演会論文集，pp. 218~222, 1978.
- 10) 宇多高明・小俣 篤・竹淵 勉・斉藤友伸：前浜地形変化と砕波帯内における浮遊砂の発生・輸送機構に関する現地観測報告書，土木研究所資料，第2672号，62p.，1988.
- 11) 橋本 宏・宇多高明：前浜勾配，粒径および波高の動的關係について，第27回海岸工学講演会論文集，pp. 221~225, 1980.
- 12) 宇多高明・小俣 篤・竹淵 勉・斉藤友伸：浮遊砂の砕波帯内における輸送機構に関する現地観測，第43回年次学術講演会講演概要集，pp. 732~733, 1988.
- 13) 加藤一正・柳嶋慎一・村上裕幸・末次広児：短期汀線変動のモデル化の試み，第34回海岸工学講演会論文集，pp. 297~301, 1987.
- 14) Clifton, H. E. : Beach lamination; Nature and origin, Marine Geol., Vol. 7, pp. 553~559, 1969.
- 15) Uda, T. and Sakai, Y. : Summarized data of beach profiles and wave observations at Ajigaura Beach, Tech. Memo. PWRI, No. 2294, 286 p., 1985.
- 16) 宇多高明・小俣 篤・竹淵 勉：波による前浜地形変化の支配要因，第35回海岸工学講演会論文集，pp. 337~341, 1988.
- 17) 宇多高明・小俣 篤・竹淵 勉：阿字ヶ浦海岸における波による前浜地形の変化，土木技術資料，Vol. 30, No. 4, pp. 15~20, 1988.
- 18) 砂村継夫：自然海浜における汀線位置の時間的変化に関する予測モデル，第27回海岸工学講演会論文集，pp. 255~259, 1980.
- 19) 砂村継夫：Swash zoneを含む砕波帯の岸沖漂砂量に関する研究，第31回海岸工学講演会論文集，pp. 316~320, 1984.
- 20) 田中則男・加藤一正・灘岡和夫：砕波帯内における浮遊砂濃度分布，第26回海岸工学講演会論文集，pp. 182~186, 1979.

(1989. 4. 18・受付)