

バーム形成に関する現地調査

柳嶋 慎一*・加藤 一正**・村上 裕幸*

1. はじめに

荒天時に侵食を受け、その後の堆積過程にバームの形成を伴って回復するというサイクリックな前浜の地形変化を捉える最も基本的な視点は、荒天時の侵食がいかなるレベルまで及ぶのかということと、堆積過程の堆積レベル（つまりバーム頂レベル）がどの程度であるかを調べることである。前者については、加藤ら（1989）によって荒天時の汀線での水位上昇と長周期波の波高で説明できることが現地データによって明らかにされている。

一方、後者については、武田・砂村（1983）によって主として実験室での検討から、バーム高さは底質粒径に関係なく、砕波波高と周期によって評価できるとされている。また、宇多ら（1989）は現地海浜における調査から、バームの形成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と述べている。しかしながら、両者ともバーム頂レベルと外力との関係については現地データをもとに、十分に検討されたものではない。

本研究は、バームの形成過程に注目した現地観測結果を基に、バーム形成の実態を明らかにし、バーム頂レベルを決定する外的要因を荒天時のバーム侵食との関連で検討し、併せて、侵食レベルと海浜の地下水位との関連について検討したものである。

2. 波崎海洋研究施設における現地調査

現地調査は、1987年8月～1990年1月の約2年半にわたり、鹿島港と銚子のほぼ中間の鹿島灘に面する砂浜海岸にある全長427mの波崎海洋研究施設（以下“HORF”と称する）で実施した（図-1）。

前浜断面地形は、休日を除く毎日、1回測定した。汀線付近の水位・波形は、平均海底レベル D.L.+38 cm（=M.W.L.-29 cm、図-2）上の栈橋に取り付けた空中発射式超音波波高計（U.S.W.）を用いて測定した。

地下水位は、前浜（平均レベル D.L.+2.46 m）およ

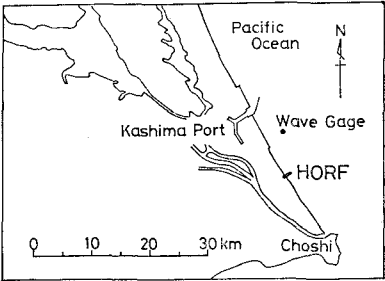


図-1 観測地点（波崎海洋研究施設）

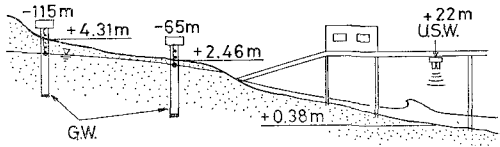


図-2 計測器の配置

び後浜（D.L.+4.31 m）の2地点に塩ビパイプを打ち込み、パイプ内に設置した水位計（G.W.）によって測定した。

汀線付近の水位変動および地下水位の測定は、毎正時をはさむ約20分間に0.3 sのサンプリング間隔で実施し（データ数4096）、平均値を求めた。また、汀線付近での入射波の波高 H_s と長周期波の波高 H_L はスペクトル解析を行い、その結果得られた周波数スペクトル $S(f)$ を用いて、それぞれ次式によって求めた。

$$H_s = a \cdot \left[\int_{f_c}^{\infty} S(f) df \right]^{1/2} \dots\dots\dots (1)$$

$$H_L = a \cdot \left[\int_0^{f_c} S(f) df \right]^{1/2} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 f は周波数、 f_c は 0.033 Hz（=30 s）であり、係数 a の値は、4.0 とした。

観測時の沖波は、海底面レベル D.L.-23.4 m に設置した超音波式波高計（図-1）によって、偶数正時をはさむ20分間測定されている。

なお、前浜付近表面の底質を、月に1回採取し、粒度分析をした。その結果によると、最も前浜が侵食された1987年10月に $d_{50}=0.36$ mm と大きくなった他は、常に

* 運輸省港湾技術研究所水工部漂砂研究室
** 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所水工部漂砂研究室長

$d_{50}=0.18\text{ mm}$ 前後である。

3. バーム形成の事例

断面測定の結果をともに前浜部のバーム地形が数日以上にわたり形成された事例を調べた結果、汀線付近の水位変動測定が欠測になっていた時を除き 219 ケースが抽出できた。そのうち長期間にわたりバーム形成が続いた例を示す。

図-3 は、1987年 8 月 5 日～15 日までのバーム形成状況である。この期間の沖波有義波高は、8 月 6～7 日にかけて最大で 1.8 m になった以外は 1 m 前後であり、周期は 5.6 s～8.7 s であった。潮汐は、8～10 日の間が、大潮であった。

バーム形成時の特徴は、以下のとおりである。

①バームは、1 日毎に少しずつ形成されている。②バーム頂レベルはこの期間の最後にやや低くなるものの、ほぼ一定である。③前浜の勾配は、バームの形成にともなう少しずつ急になる。④形成されるバームの下部に僅かな侵食（このレベルを侵食レベルと呼ぶことにする）をともなっていることが多い。上記①～③の特徴は、他のほとんどのケースにおいても見られる。④は半数のケースで見られた。

図-4 は全ケースのバーム頂レベル (A_L) および侵食レベル (E_L) の頻度分布である。バーム頂レベルは D.L. +1.6 m～+2.0 m の範囲に形成されることが多く、平

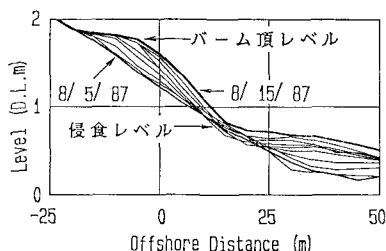


図-3 バーム形成の事例

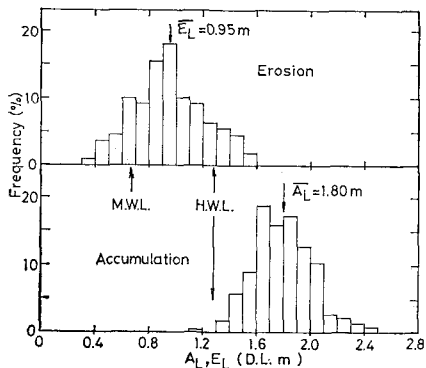


図-4 バーム頂レベル、侵食レベルの頻度分布

均バーム頂レベルは、D.L. +1.8 m である。このレベルは、H.W.L. (D.L. +1.28 m) から約 50 cm も高く、潮位のみでバーム頂レベルを説明する事はできない。また、D.L. +2.5 m までバームが形成される場合がある。この事例は、時化直後に見られ、図-3 に示したようなバーム形成とは異なり、一様勾配で高いレベルから低いレベルまで広い範囲にわたって堆積が生じた。

バーム下部の侵食は常に生じるわけではなく、バーム形成が生じた 219 ケースのうち 109 ケースにおいて認められた。ただし、ここでいう侵食は前日の海底面レベルに対して侵食している場合だけを数えており、侵食しないまでもバーム下部の形状が前日とほぼ同じケースはかなり多い。平均侵食レベルは D.L. +0.95 m であり、M.W.L. (=D.L. +0.67 m) と H.W.L. の間にある。バーム頂レベルと侵食レベルとの間には弱い正の相関があり、バーム頂レベル-侵食レベル=約 90 cm の関係があった。

4. バーム頂レベルと外力の関係

武田・砂村 (1983) はバーム高さ (B_h) を次式で評価している。

$$B_h = 0.125 \cdot \bar{H}_b^{5/8} (g\bar{T}^2)^{3/8} \quad \text{.....(3)}$$

ここで、 B_h は平均水面からバーム頂までの高さ、 $\bar{H}_b$ はバーム形成対象期間の平均碎波波高、 g は重力加速度、 $\bar{T}$ は平均周期である。

今回観測した 219 ケースについて式 (3) を用いて計算した結果を図-5 に示す。なお式 (3) は平均水位で定義されているので、ここでの計算では、平均水面として HORF の平均潮位 0.67 m を使い、結果は、D.L. 基準で表示してある。観測値 (A_L) と計算値 (B_h) とは 1 対 1 対応を示す直線の周りにプロットされるものの、全体的に計算値の方が小さめで、バラついている。

バーム侵食時の堆積限界レベルは加藤ら (1989) によ

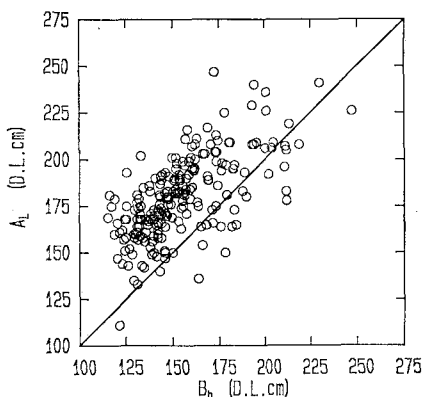


図-5 バーム頂レベルと武田・砂村(1983)によるバーム高さの関係

って波の遡上レベル (R_L , 汀線での水位上昇量と長周期波の波高からなる) で示されることが分かっている。

すなわち、

堆積限界レベル $= R_L$

$$R_L = \eta_0 + 0.96 \cdot (H_L)_0 + 0.31(m) \cdots \cdots (4)$$

ここで、 η_0 は汀線における水位、 $(H_L)_0$ は汀線における長周期波の波高である。

バーム形成時におけるバーム頂レベルも、バーム侵食時と同様に波の遡上レベルと関係していることが推察される。そこで、バーム形成時のバーム頂レベルとその時の波の遡上レベルとの関係について式 (4) を用いて調べた。なお、波のデータは 2 回の断面測定間の観測値のうち汀線付近の水位と長周期波の波高の和が最大になる時の値を用いた。

図-6 はバーム頂レベルと波の遡上レベルとの関係を Δ 印で示したものである。なお、図中にはバーム侵食時の堆積限界レベルに関するデータ (加藤ら (1989) にその後のデータを追加した) も併せて $\circ$ 印で示した。バーム形成時のデータはバーム頂レベルと波の遡上レベルの 1 対 1 の対応関係を示す直線に良く一致する。すなわち、バーム侵食時の堆積限界レベルを表わす式 (4) によってバーム形成時のバーム頂レベルも統一的に評価する事が可能である。

式 (4) でバーム頂レベルを評価できることは分かった。そうすると、バーム形成とバーム侵食がいかなる条件によって分かれるか問題になる。

バーム侵食とバーム形成という相反する現象において同一の評価式によって堆積限界レベルおよびバーム頂レベルを評価出来るということは、バーム侵食時とバーム形成時で式 (4) の右辺にある 3 つの要因の波の遡上レベルに及ぼす寄与が異なるためと考えられる。

そこで、式 (4) 中の各項の寄与についてバーム形成時および侵食時についてそれぞれ調べた。

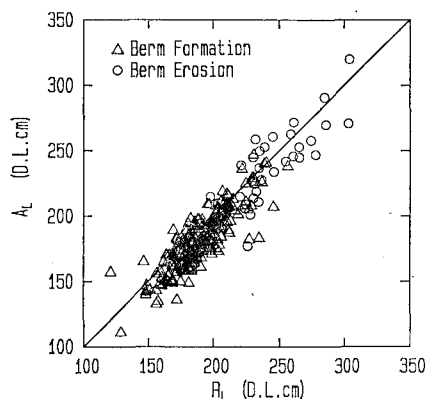


図-6 バーム頂レベルと遡上レベルの関係

図-7 は波による set-up を含む遡上高さ (遡上レベル - その時の天文潮位) の頻度分布である。図中の斜線は、バーム形成時を、黒塗は、バーム侵食時の頻度を示している。バーム侵食時の遡上高さは 100~120 cm および 160~180 cm にピークがあり広い範囲に分布している。バーム形成時は侵食時よりも低い 60~80 cm にピークがある。

遡上レベルが 60 cm よりも小さい時にはバームが形成され、160 cm よりも大きいときには侵食される。遡上レベル 60 cm~160 cm の間は両者とも生じ得ること分かる。

図-8 はバーム形成時および侵食時の波の遡上高さの総和に対する式 (4) 中の各項の割合を示したものである。set-up 量はバーム形成時、侵食時ともほぼ変わらず 25% 程度である。長周期波の波高はバーム侵食時に大きく約 50% におよぶ。しかし、バーム形成時には小さい。入射波による成分と考えられる定数項 (Guza and Thornton, 1982) はバーム侵食時には小さく、バーム形成時には他の要因よりも大きく約 40% になっている。つまり、バーム侵食時の遡上高さは長周期波の波高が相対的に効いており、バーム形成時の遡上高さには入射波の波高が相対的に効いている。したがって、相対的に長周期波の波高が大きい場合 (ほとんどの場合入射波の波高も大きい) にバームは侵食し、長周期波の波高が小さく入射波の波高が大きい場合にはバームが形成される。

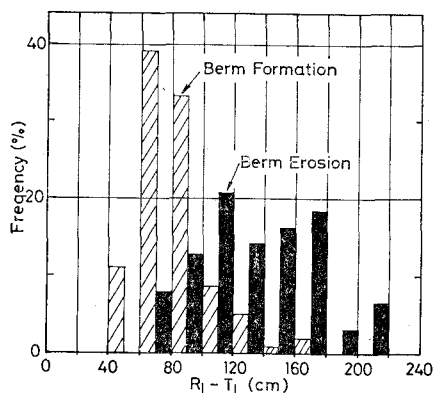


図-7 遡上高さの頻度分布

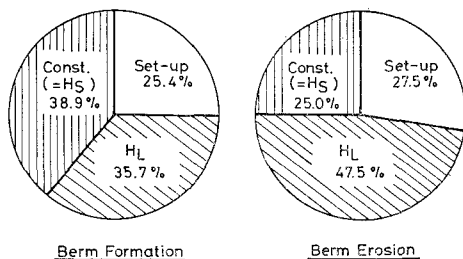


図-8 遡上高さへの寄与率

5. バーム侵食時の侵食限界レベルと地下水位の関係

加藤ら (1989) によってバーム侵食時の侵食限界レベルは、遡上レベルより 39 cm 低いところにあることが明らかにされている。そこでバーム形成時の侵食レベルと波の遡上レベルの関係について調べ、その結果を図-9 に示す。図中印△はバーム形成時のデータであり、○印はバーム侵食時のデータである。バーム侵食時の侵食レベルは、遡上レベル $R_L - 39$ cm にあるのに対し、バーム形成時の侵食レベルはバラつきは多いもののさらに低い $R_L - 90$ cm にある。つまり、バーム侵食時には高いレベルで侵食が生じる。その物理的な意味を調べるために、Duncan (1964) が述べている前浜における地下水の浸出レベルと侵食限界レベルの関係について検討する。

今回の観測では、地下水の浸出レベルは直接測定していないので、汀線付近の水位、前浜および後浜における地下水位 (図-2) のデータを基に、浸透流解析法を用い砂浜中の自由地下水面を計算し、地下水の浸出レベルを求めた。

解析には、Bathe and Khoshgoftaar (1979) のダルシーの式を有限要素法によって定常解を求める方法を用いた。

岸沖方向の計算範囲は後浜の地下水位計の位置から海側を、鉛直的には、D.L.+3.0 m から D.L.-20 m までとした。前浜断面は直線で近似している。要素の分割は鉛直方向には、D.L. $\pm$ 0.0 m から D.L.+3.0 m までは 0.5 m 間隔とし、D.L. $\pm$ 0.0 m よりも低い範囲は段階的に層厚を大きくしている。水平方向は、D.L.+1.0 m 付近で 5 m 程度になるように 20 分割した。

境界条件として、潮位変化や波の浜への遡上によって地下水位が変化しないことか確認されている後浜の実測地下水位および汀線における水位 (η_0) を用いた。透水係数は善ら (1989) の HORF における底質試料の透水試験結果を参考に、前浜における砂の乾燥密度を考慮して 1.14×10^{-2} cm/s とした。

まず、モデルの妥当性を検証するために、波による遡上の小さい沖波波高が 1 m 以下で、周期が 8 s 以下のデータ 74 ケースについて自由地下水面を計算し、計算結果と前浜部での実測地下水位とを比較した。なお、前浜の実測地下水位が最大になる時刻は汀線付近での水位と長周期波の波高の和が最大になる時刻と一致する場合もあるが、1~2 時間遅れることが多い。その場合には地下水位の最大値を用いて計算値と比較した。

計算の結果、実測値は計算値よりも全体的に 10 cm ほど大きくなった。この原因は、海側の境界条件として汀

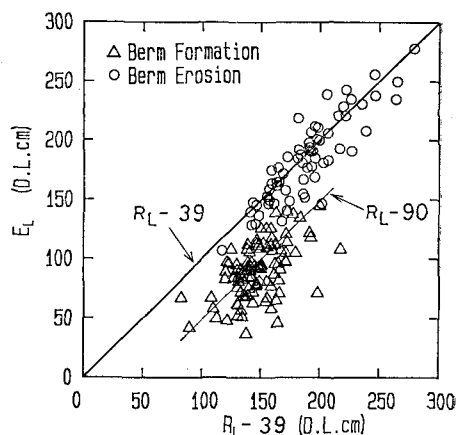


図-9 侵食レベルと遡上レベルの関係

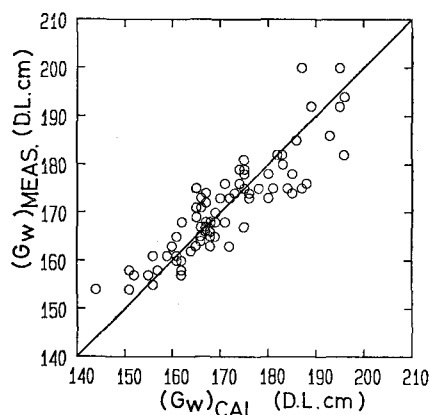
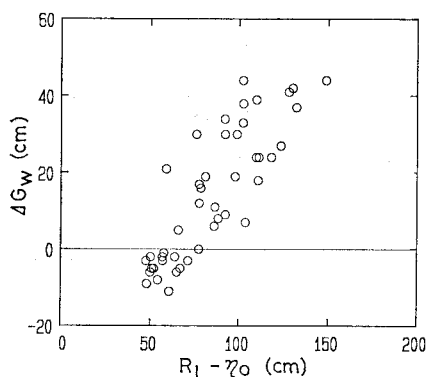


図-10 実測地下水位と計算地下水位の比較

線での水位のみを与えているためと考えられる。Guza and Thornton (1982) によると沖波波高の変化に関係なく遡上波の入射波成分は一定で変わらない。そこで、汀線での境界条件として η_0 に遡上レベル算定式 (4) の定数項 31 cm (入射波の成分に相当) を加えた水位を境界条件として計算した結果を図-10 に示す。実測値 $(G_W)_{MEAS}$ と計算値 $(G_W)_{CAL}$ はほぼ一致する。このことから今回用いたモデルは妥当であると判断した。

次に、波の遡上による地下水位への影響を調べるために、バーム侵食時の後浜地下水位データおよび汀線における水位 +31 cm を境界条件として計算し、前浜の実測地下水位と計算地下水位の差を求めた。この差が波の遡上による地下水位の変化とみることができ。そこで図-11 の横軸に波の遡上高さ $R_L - \eta_0$ をとり、縦軸に地下水位の偏差 ΔG_W をとって両者の関係をプロットした。地下水位は遡上高さ 50 cm 付近では変化せずそれよりも遡上高さが高くなるとともに、地下水位も上昇していることが分かる。つまり、長周期波が浜へ遡上することによって海水が砂中に浸透し、地下水位が上昇すると考


 図-11 地下水位の偏差と $R_L - \eta_0$ の関係

えられる。特に、遡上レベルが高いバーム侵食時にはバーム上面の水平部に海水が滞留する時間が長くなり、砂中に浸透する流量が多くなる。その結果地下水位が上昇し、高いレベルまで侵食がおよぶ。一方バーム形成時には、遡上レベルが低いことと、前浜の勾配が急なため、遡上した海水はすぐに流下し、地下水位の上昇が少なくなるものと推察される。

最後に、地下水位が前浜から浸出するレベルを調べた。このときの境界条件として後浜の地下水位および汀線での水位 $\eta_0 + 31$ cm に加えて、汀線の水位レベルから遡上レベル (R_L) までの間に波の遡上により浸透する流量を入れた。ただし、流量の分布形状、流量は明らかでないで遡上レベルで 0 となる三角形分布を仮定し、流量は前浜での実測地下水位に合うように試行錯誤を繰り返し計算を行った。結果的に、各ケースの合計浸透流量は単位幅当り $0.2 \sim 0.5 \text{ m}^3/\text{時間}$ であった。

なお、図-11 で地下水位の偏差が負になったデータは、計算の対象から外した。

得られた自由地下水面の計算結果から各ケース毎に浸出レベル ($G_w)_0$ を求め、侵食限界レベルと比較した結果を図-12 に示す。両者は多少のバラつきはあるものの 1 対 1 対応を示す直線の周りにプロットされている。つまりバーム侵食限界レベルは地下水が前浜から浸出するレベルと一致する。このことは、地下水のレベルを人為的に下げることによって、侵食レベルを下げる事が出来る可能性を示している。

6. おわりに

本研究の主要な結論は以下のとおりである。

- ① バーム頂レベルは汀線での長周期波の波高を考慮した波の遡上レベルに一致し、荒天時の堆積限界レベルと同一式で説明できる。
- ② バーム形成時の波の遡上高さには、入射波の遡上の

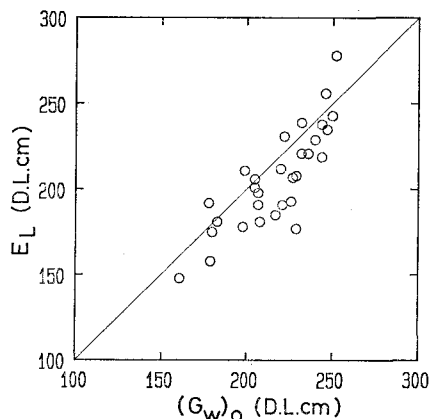


図-12 侵食限界レベルと地下水浸出レベルの関係

影響がより強く寄与する。

- ③ バーム形成時に生じる低部の侵食レベルは、バーム侵食限界レベル推定式で評価されるレベルよりも低いレベルにある。
- ④ バーム侵食時の侵食限界レベルは地下水が前浜から浸出するレベルに一致し、長周期波の遡上高さが高くなる荒天時には、長周期波の波高が大きいほど前浜の地下水位が上昇し侵食限界レベルは上昇する。

なお、鹿島港の波浪データの使用に当たっては、第二港湾建設局鹿島工事事務所および、当所海洋水理部海象調査研究室のご協力をいただいた。有限要素法による浸透流解析は、当所土質部土性研究室所有のプログラムを使用し、計算の実施に当たっては、小林正樹室長から有益な助言を頂いた。ここに記し、謝意を表する。

参考文献

- 宇多高明・小俣 篤・竹淵 勉 (1989): 前浜における底質粒径の時空間変化とバームの形成機構, 海岸論文集, 第 36 巻, pp. 359~363.
- 加藤一正・柳嶋慎一・栗山善昭・磯上知良 (1989): 荒天時のバーム地形の侵食, 長周期波に注目した現地観測, 海岸論文集, 第 36 巻, pp. 354~358.
- 武田一郎・砂村継夫 (1983): 砂浜海岸の堆積過程における地形変化, 第 30 回海岸工学講演会論文集, pp. 254~258.
- 善 功企・山崎浩之・佐藤 泰 (1989): 海底地盤の波浪による液状化, 現地観測および解析, 港研報告, 第 28 巻, 第 3 号, pp. 23~57.
- Bathe, K. J. and M. R. Khoshgoftaar (1979): Finite element free surface seepage analysis without mesh iteration, Int. Jour. for Num. and Anal. Methods in Geomechanics, Vol. 3, 13~22.
- Duncan, J. R. (1964): The effects of water table and tidal cycle on swash-backwash sediment distribution and beach profile development, Mar. Geol., 2: 186~97.
- Guza, R. T. and E. B. Thornton (1982): Swash oscillation on a natural beach, Jour. Geol. Res., Vol. 87, pp. 483~491.