

阿字ヶ浦における海浜過程 (第2報)

橋 本 宏*・宇 多 高 明**

1. はじめに

砕波帯付近の海浜地形は波浪・潮位・海浜流などの変化と共に絶えず変動しており、したがって海浜地形の外力による変形を調べる場合必然的に時間が重要なパラメータになると考えられる。しかも海浜地形は複雑な三次元的現象として変化することも知られており、このため漂砂による地形変化を論ずるに際しては、三次元的な拡がりを持った現象を時間的に追跡する必要がある。実際 Davis ら¹⁾はミシガン湖で、また Greenwood ら²⁾はカナダの東海岸でこのような観測を行い、その変化特性を明らかにしている。しかしながらこれらの測定は湖や湾内の波浪が比較的弱い所で行われたものであり、外洋に面した海浜で広範囲にかつ時間的に密にこのような測定を行うことは非常に困難である。

一方、著者らは現地海岸において海浜流や漂砂などを測定したが、これらの測定は地形の時間変化のスケールに比較すれば瞬間的なデータであり、漂砂と地形変化を結び付けて長期的な変化を予測するのは相当困難である。この点からは海浜の二次元的な測定であっても、これらの測定と組合せて行えば非常に重要なデータとなり得るであろう。もちろんこれらのデータは二次元としての限界性を充分認識して解析されねばならない。

以上の理由から著者らは阿字ヶ浦の棧橋を利用して二次元地形の長期的変化を調べて来た³⁾が、昭和 51 年 3 月には棧橋長が 100m から 200m に延長され、得られるデータは質・量共に増加した。ここでは延長後の棧橋を利用した観測結果について述べる。

2. 観測方法

まず第一に長期的な観測については昭和 51 年 2 月より 52 年 3 月に至る期間において毎週 1 回の測定を行った。この観測の測量及び測定項目は、① 棧橋からの深淺測量、② 橋軸に沿う陸上部における水準測量、③ 底質採取、④ 波向、⑤ 沿岸流、⑥ 風向風速などである。このうち①と②については、測線延長約 250m を 3m

間隔で 1 cm の精度で測定した。底質は棧橋沿いに 10 点採取し、粒度分析を行った。

次に中期観測は昭和 51 年 8 月 23 日より 31 日までの 9 日間、棧橋からの深淺測量 (6 時間間隔) を主体に行行った。この間、沖合の測量や海浜流観測も実施した。ここでは種々の測定結果のうち主に地形変化について述べることにする。

3. 観測結果と考察

(1) 長期的地形変化

昭和 51 年より 52 年に至る約 1 年間の地形変化を全体的に把握するために測定したデータを距離 (汀線と直角方向) と時間座標によって整理したのが図-1 である。ただし図-1 ではピア部分の洗掘は滑らかな曲線で平滑化してある。横軸は 1 週間を単位とした時間を示す。また図中の数字は T.P. を基準としたレベルを示す。

図中においては数多くの屈曲が示されているが、これらの等深線の屈曲点の移動は sand wave の運動を表わしていると考えられる。例えば 12 月 2 日 (1202) に T.P. -1.5m 付近に存在した屈曲は、12 月 16 日に至って T.P. 0.0m 付近に及んでいる。この点を更に明らかにするために地形の変動を比較したのが図-2 である。ただし変動とは測定値より年間の平均値 ($\bar{h}$) を差し引いたものである。図-2 によれば、bore 状の砂の集合体が岸方向に進行しており、その速度は $h' = 0.4m$ の位置 (図中矢印で示す) の進行から計算すると約 12 cm/hour である。

このような等深線の屈曲点の移動は他の測定時においても数多く存在する。これらの主な例を示したのが図-3 から図-6 である。ただしこれらに対応する平均地形は図-2 に示されている。ただし図-6 は除く。図-3 は 2 月 12 日より 26 日の間の変化を示したもので、T.P. -1m 付近に存在する 4 個のピークを持つ砂漣状の砂の集合体が発達しつつ岸方向に移動し、また $x=70m$ 付近にあった bar 状の砂の集合体が岸方向に進行している。この進行速度は約 12.5 cm/hour である。図-4 は 3 月 18 日より 31 日までの変化であり、進行速度は約 22 cm/hour である。図-5 は 9 月 16 日より 10 月 7 日に至る変化であり、汀線付近の侵食に対応して $x=150m$

* 正会員 建設省土木研究所海岸研究室長
** 正会員 工修 建設省土木研究所海岸研究室

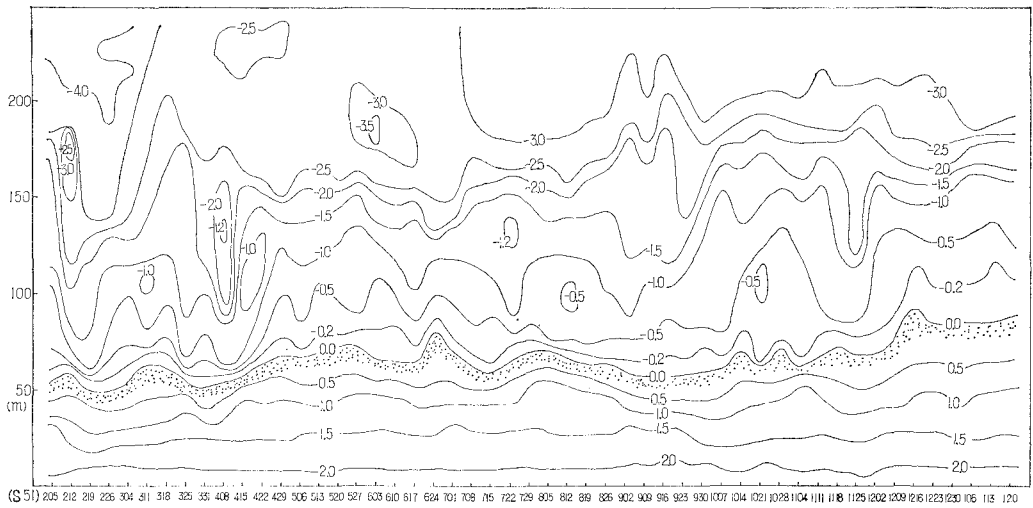


図-1 地形変化図

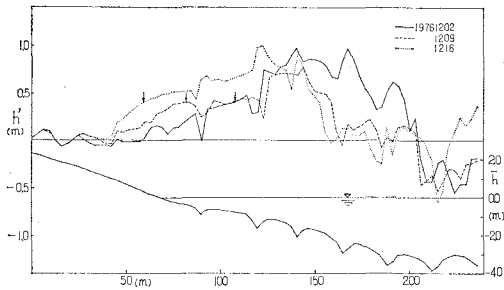


図-2 地形変動図 (1)

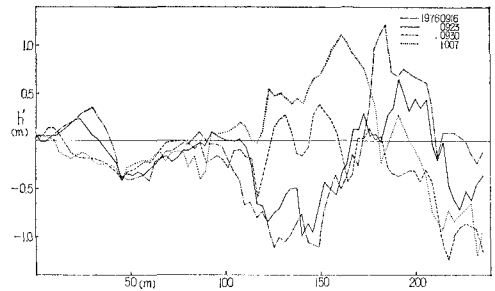


図-5 地形変動図 (4)

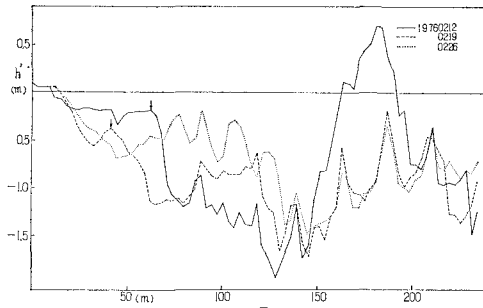


図-3 地形変動図 (2)

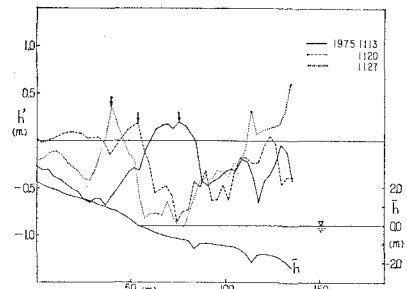


図-6 地形変動図 (5)

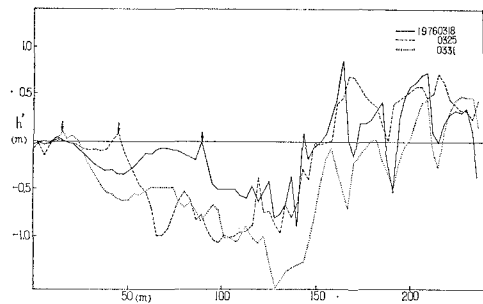


図-4 地形変動図 (3)

付近に bar が成長する過程を示している。最後に図-6 は昭和 50 年の 11 月 13 日より 27 日の間の変化を示すものであり、T.P. -1m 付近の砂が berm を形成しつつ進行する状況に対応しており、その進行速度は約 8.3 cm/hour である。

以上の例に共通して言えることは、これらの sand wave の進行は、T.P. -1m 付近より発生し、岸方向に進行した後、平均的には T.P. +1.5m 付近において停止することである。この間の平均距離は図-2 によれば約 80m である。また sand wave の進行速度の平均値は $V = 13.7$ cm/hour であり、したがって sand wave が進行

を開始してから停止するまでの代表的な時間は約580時間となる。sand wave が岸方向に進行を始めるのは波浪が弱くなった時に対応するため、海浜が侵食型から堆積型へ変形する代表時間は約580時間程度ということになる。

また岸方向に進行する sand wave には二つのタイプが存在する。すなわち変形せずに進行するボアタイプと変形しつつ進行する孤立波タイプ⁴⁾である。

ただし測定されたデータが三次元的特性を有する sand wave の沿岸方向の移動を示すという可能性もあるが、深浅測量と同時にやっている写真撮影によれば、汀線付近の地形は二次元性を示しており、このため少なくとも T.P. 0m 以上に現れた sand wave は二次元的であるということになる。このことから変化の連続性を考えると全体として二次元的性質が強いと考えられる。

一方、図-1 における他の特長な点は汀線付近の侵食状況である。例えば9月9日に典型的に示されているように、T.P. -1.5m 以浅での侵食は、T.P. -2m 以深での堆積をもたらしており、これらの変化の時間スケールは非常に短い。

更に、昭和51年2月12日に現れている著しい侵食は、棧橋建設に伴う仮棧橋の設置による局所洗掘の影響ではないかと考えられる。この侵食は2月初めに先端付近で発生した後、約2カ月間で汀線に到達している。この点を更に明らかにするためにピア地点の地盤高の年間の変化を示したのが図-7である。図によれば、 P_1 の地盤高の低下が2月初めに起きているが、この変化は岸方向に進行し、4月初めに P_2 に到達している。

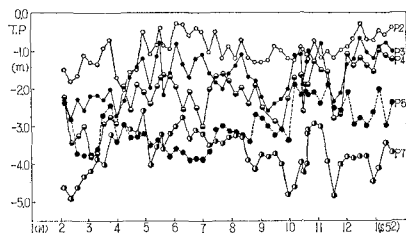


図-7 ピア地点の地盤高の変化

また図-7によれば、8月初めに P_2 付近で発生した地盤高の低下(侵食)が1カ月を経過して P_1 に現れている。以上のように海浜地形の変化には20日程度よりも更に長い時間スケールを持った現象も存在する。

一方、図-2と7から明かなように、10月初めより著しい堆積が起きているが、図-8に示す鹿島港における日最高有義波高の経時変化との対応ではその理由は特に明かではなく、この点については汀線と直角方向の動きというよりも沿岸方向の変化ではないかと考えられる。

以上に述べた地形変化をより詳細に調べるために前

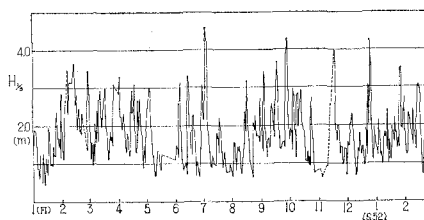


図-8 日最高有義波高の経時変化

報³⁾と同様に empirical eigenfunction を使って解析した。この関数は高さ h を基準点から沖方向に取った水平距離 x と時間 t の関数の積に分離するものである。与えられたデータ h_{xt} に関して、

$$h_{xt} = \sum_n C_n t e_{nx} \dots\dots\dots (1)$$

と展開する。ここに添字 x は1より n_x (測定点数) まで、 t は1より n_t (測定回数) まで変わる。ベクトル e を求めるには直交性を利用して測定データから対称マトリックス

$$a_{ij} = \frac{1}{n_t n_x} \sum_{t=1}^{n_t} \sum_{x=1}^{n_x} h_{it} h_{jt} \dots\dots\dots (2)$$

を作り、この行列 A の固有値を求めれば良い。すなわち、

$$A e_n = \lambda_n e_n \dots\dots\dots (3)$$

である。また C_t は、(4) 式より求められる。

$$C_t = \sum h_{xt} e_{nx} \dots\dots\dots (4)$$

さて、図-9、10 は $n_t=57$, $n_x=80$ において固有関数を求めたものであり、図-9は固有ベクトル、図-10は時間関数を示している。これらの図と図-1とを合せて見れば、固有ベクトルの物理的側面が明らかになる。すなわち、図-1と対応させた場合、図-9の横軸は図-1

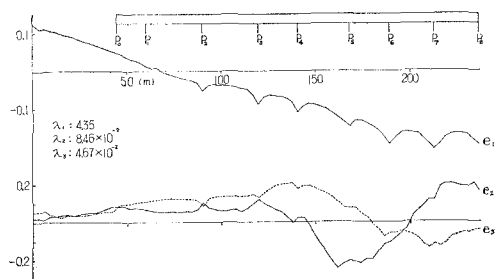


図-9 固有ベクトル

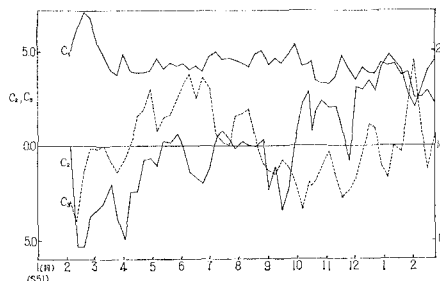


図-10 時間関数

の縦軸に、また 図-10 の横軸が 図-1 の横軸に対応しており、固有ベクトル e_2 と時間関数 C_2 に関しては、 C_2 曲線が全体として右上がりの傾向を持つことから判断すれば、これは 図-1 における汀線の前進に見られるように年間を通じての土砂の堆積を示すものと考えられる。一方、 e_3 及び C_3 に関しては 6~7 月に C_3 が極大値を持ち、10 月ごろに極小値を持つことと、図-8 の有義波波高の平均的なトレンドを比較すると、主に季節的変動を表わしているものと考えられる。しかしながら、前報³⁾で述べたような C_2 、または C_3 の有義波波高との相関は必ずしも明確ではない。

(2) 中期的地形変化

夏期のステップ型海浜からバー型海浜への遷移状態と潮汐による地形変化を調べる目的で行った観測の結果を 図-1 と同様に整理したのが 図-11 である。ただし同図では 図-1 と異なりピアの洗掘もそのまま示しており、また図中の数字は T.P. (負) の値である。図中、黒い帯で示された部分がステップ (8 月 24 日 12 時まで) 及びバーを示しており、8 月 24 日 12 時以前では幅が約 50 m のステップが形成されていたが、12 時頃波浪条件が急激に変化し、波高が有義波で約 0.6 m より約 2 m に変わったため地形も急速に応答した。このためステップは消滅し、バーが形成され、しかもそれが発達しながら沖方向へ移動した。この変化を断面で比較したのが 図-12 である。図中矢印でその位置の変化が示されている。また同図には地盤の鉛直方向の変化速度の分布も

示されている。実線は変化の最も大きい場合であり、点線は絶対値平均である。平均値の最大は 5 cm/hour 程度である。

これらの変化を解析的に扱うため、empirical eigenfunction を用いて解析した結果が 図-13, 14 である。

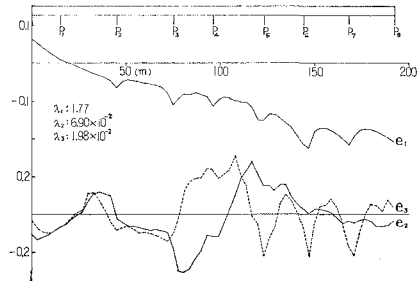


図-13 固有ベクトル

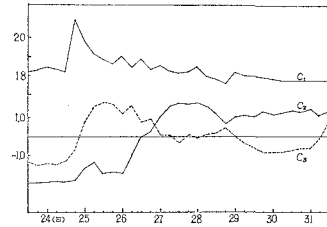


図-14 時間関数

主な固有ベクトル e_1 は平均地形を表わすものであるが、 e_2 と C_2 及び e_3 と C_3 はバーの形成に関与していることは 図-12 と併せて調べれば明らかである。しかも C_2 と C_3 は同位相で変化せず、 C_2 の方が位相が遅れている。したがってステップからバー型海浜への遷移は段階的に起こる傾向がある。

この測定では二次元性が強く、また測定時間間隔が短かったため、漂砂量式について簡単な検討が可能である。すなわち、 x 方向の流砂量を q 、空隙率を λ とすれば

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{(1-\lambda)} \frac{\partial q}{\partial x} \quad \dots\dots\dots (5)$$

が成り立つ。ここで h に式 (1) を代入すれば、

$$\frac{1}{(1-\lambda)} \frac{\partial q}{\partial x} = \sum \frac{dC_n(t)}{dt} \cdot \int_0^x e_n(x) dx \quad \dots\dots\dots (6)$$

となり、 $q = \sum_n q_n(x, t)$ とおけば、

$$\frac{q_n(x, t)}{(1-\lambda)} = \frac{dC_n(t)}{dt} \cdot \int_0^x e_n(x) dx = F_n(t) \cdot G_n(x) \quad \dots\dots\dots (7)$$

という関係が得られる。この結果を図示したのが 図-15, 16 である。 q_1 は大きな流砂量を持ち、波浪条件に対応してデルタ関数的に変化しており、また、 G_2, G_3 はバーの形成に関与するため極値を持っている。図-16 には潮位も示されているが、 F_1 は干潮時に正、 F_3 は負という関係が成り立つことがわかる。すなわち、干潮時には

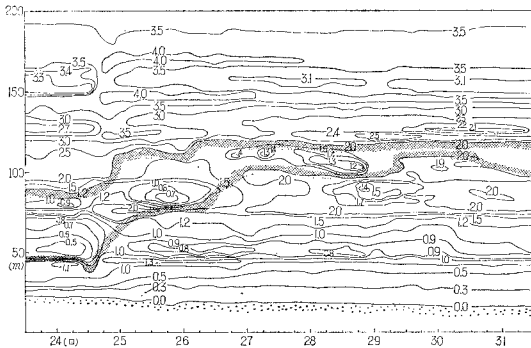
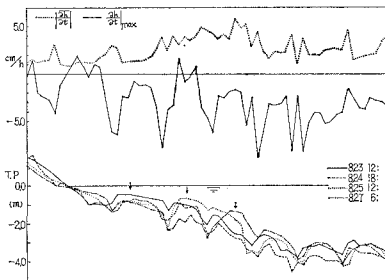
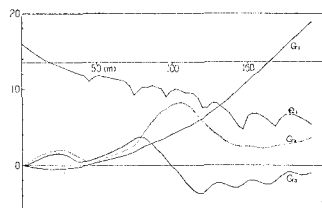
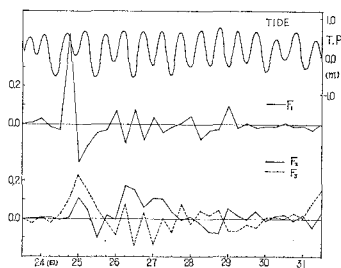


図-11 地形変化図



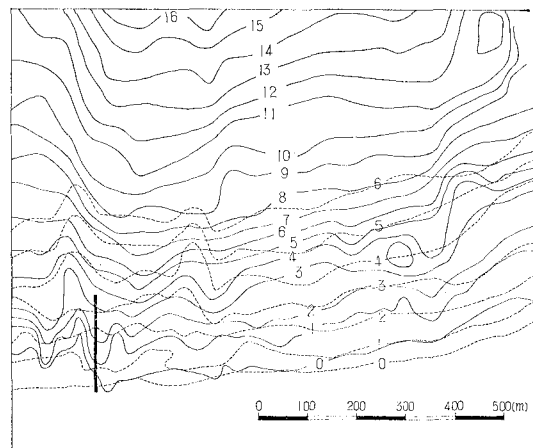
図—15 関数 G_t の形状図—16 関数 F_t の形状

全体的には沖方向へ砂が移動するものの、局所的には G_s に示されるように汀線近くで堆積が起こり、バーの形成が促される。

更に、潮汐の作用は堆積型から侵食型への変化が起きた直後において著しく、これは前報³⁾における侵食型から堆積型への遷移過程の効果と合わせれば、波浪による急激な変化が起きた直後には潮汐の作用は著しいが、その効果も数日程度で弱くなることがわかる。

(3) 離岸流と地形変化

前節までに述べた現象はすべて二次元的なものであり、三次元的な点については不明であった。したがって棧橋に沿う極めて限られた現象をとらえる可能性もある



図—17 阿字ヶ浦地区の深浅図

ので、相当広い領域について平面的深浅測量を夏と冬に実施した。この結果が図—17である。図中点線は51年8月27日の地形を示し、実線は52年2月28日の地形である。図中、特に注目し値するのは、水深3~6m付近に存在する沖方向に凸な地形である。これは夏・冬共に存在し、また夏期の地形では同時に行った海浜流観測によると離岸流の発生地点とほぼ一致しており、離岸流によって沖へ流された底質が流速の減少とともに沈降して形成されたものと考えられる。しかもこのような地形が二つの測定日に偶然見出されたのかどうかは明らかではないが、もし常にこのような地形が見出されるとすれば、Komarの指摘したメカニズム⁵⁾によって形成された地形、すなわち入射角と波高の沿岸方向の変化によって生じた安定な海底地形である可能性も存在する。

4. おわりに

中・長期的な観測によって碎波帯付近における海浜地形の変化を明らかにした。すなわち、長期観測では海浜の1年間にわたる全体的な変化を、また中期観測ではステップ型よりバー型海浜への遷移過程を明らかにした。更にこれらの測定値に対して empirical eigenfunction を用いてその変化特性を解析した。残された問題は数多くあるが、特に三次元変化との関係を調べる事が重要であろう。この点については、測定法を改良して現在観測を継続している。

謝辞：この研究を行うにあたって、貴重な波浪データを提供して下さった運輸省第二港湾建設局鹿島港工事々務所の大川氏、また潮位データを提供して下さった、茨城県三浜港事務所の鶴川氏に感謝致します。

参考文献

- 1) Davis, R. A. and W. T. Fox: Coastal Processes and Nearshore Sand Bars, J. Sed. Pet., Vol. 42, pp. 401~412, 1972.
- 2) Greenwood, B. and R. G. D. Davidson-Arnott: Marine Bars and Nearshore Sedimentary Processes, Kouchibouguac Bay, New Brunswick, Canada, J. Hails and A. Carr, ed., Nearshore Sediment Dynamics and Sedimentation, John Wiley & Sons, London, pp. 123~150, 1975.
- 3) 橋本 宏・宇多高明: 阿字ヶ浦における海浜過程(第1報), 第23回海講論文集, pp. 245~249, 1976.
- 4) Sonu, C. J.: Collective Movement of Sediment in Littoral Environment, Proc. 11th Conf. Coastal Eng., pp. 373~400, 1968.
- 5) Komar, P. D.: Nearshore Currents: Generation by Obliquely Incident Waves and Longshore Variation in Breaker Height, J. Hails and A. Carr, ed., Nearshore Sediment Dynamics and Sedimentation, John Wiley & Sons, London, pp. 17~45, 1975.