

経験的固有関数による海浜地形変化の解析

AN ANALYSIS OF BEACH PROFILE CHANGES
BY EMPIRICAL EIGENFUNCTION

橋 本 宏*・宇 多 高 明**

By Hiroshi HASHIMOTO and Taka-aki UDA

1. はじめに

一般に漂砂を論ずるに際しては、漂砂を沿岸成分と岸沖成分に分けて取り扱うことが多いが、このうち沿岸漂砂については 1 次元モデルによってある程度まで定量化が可能となっている。しかし、岸沖漂砂については定量化されるまでには多くの問題が解決されねばならない。

ところで、この点について現在までに行われたおもな研究を列挙すると、まず Johnson¹⁾ は海浜地形が波形勾配によって、平常・暴風の 2 つのタイプの海岸に分類されることを明らかにした。また岩垣、野田²⁾はこの分類には波形勾配に加えて底質粒径も重要な因子となることを明らかにした。また堀川・砂村ら^{3)~5)}および尾崎ら^{6),7)}は実験的研究によって初期海底勾配の効果を考慮した汀線の前進後退の基準式を提案した。一方、Dean⁸⁾は同様な問題に対して、波形勾配と底質の沈降速度を用いた基準式を定義し、さらに服部ら⁹⁾はこの式に海底勾配の効果を取り入れた。

次に、岸沖漂砂による海浜断面形状の変化に関して、Swart¹⁰⁾ は実験値を用いて経験的に海浜断面変化を予測する方式、いわゆる D-profile を提案した。しかしこのモデルは欠潰型の海浜に対するものであり、堆積性の海浜には適用できない欠点がある。

以上に述べた研究は、おもに 2 次元実験によるものであり、現地海岸への適用は十分ではない。研究成果の現地海岸への適用が十分ではない理由としては、何よりもまず高精度の現地データが存在しないことが原因であろう。また、海浜地形は外力の変動とともに絶えず変動しており、したがって時間的変化が必然的に関係し、しかも時間スケールが相当長いこと、および現地海岸では岸沖漂砂と沿岸漂砂が別々の現象として生起するわけでは

なく、それらが重合した 3 次元的现象となっていることも問題点と考えられよう。

このため漂砂による地形変化を論ずるには、3 次元的な広がりをもった現象を時間的に追跡する必要がある。実際、Davis ら¹¹⁾はミシガン湖で、また、Greenwood ら¹²⁾はカナダの東海岸でこのような観測を行い、海浜地形の時空間的変化特性を明らかにした。しかしながら、これらの測定は湖や湾内の波浪が比較的静穏な箇所で行われたものであり、外洋に面した海岸の現象を説明するまでには至っていない。

このように複雑な海浜地形変化を解析するために、著者ら^{13)~15)}は茨城県那珂湊市の阿字ヶ浦にある漂砂観測用栈橋を利用して数年間観測を行い、これらのデータを Winant ら¹⁶⁾が提案した empirical eigenfunction を用いて解析したが、対象とする現象の時間スケールに対して測定期間長が十分ではなかった。その後、観測をさらに継続した結果、現在までに約 4 年間のデータが収録された。本論文では、これらのデータをもとに、empirical eigenfunction を用いて碎波帯内における沿岸方向および岸沖方向の海浜地形変化特性を明らかにする。

2. 観測方法

観測は茨城県那珂湊市の阿字ヶ浦において行った。阿字ヶ浦は、図一に示すように南北に約 10 km の長さを有する砂浜海岸の南端に位置している。この海岸には延長約 200 m の漂砂観測用栈橋が設置されている。この栈橋は、1972 年 7 月に 100 m 部分が建造され、その後 1976 年 1 月に約 100 m 延長され、総延長が約 200 m となった。

この栈橋を利用した観測は 1975 年 6 月 25 日より開始され、現在に至るまで毎週 1 回の漂砂観測が継続されている。観測内容は、① 栈橋上からの深淺測量、② 栈橋軸延長上の地形測量、③ 栈橋軸と直交する方向の地

* 正会員 建設省土木研究所 河川部海岸研究室長

** 正会員 工修 建設省土木研究所 河川部海岸研究室

形測量, ④ 沿岸流流速測定, ⑤ 波向測定, ⑥ 底質採取, ⑦ 水温・気温・風向・風速測定, ⑧ 波高・周期測定, ⑨ 写真撮影等である。

これらのうち, ① については 錘付きのワイヤーによって 図-2 に示すように, 3 m 間隔に並んだ 65 測点において地盤高を 1 cm の単位まで読み取った。また, ② はスタッフとレベルを用いて, 同じく 3 m 間隔で 15 点測定した。ただし, 図-2 に示すように 棧橋上からの測定と地上の地形測量が重なる P₀ 地点では, 毎回両者の値を比較検定し, 誤差が生じないようにした。③ の測

量は, 地形変化の 3 次元性を調べるために行ったものであり, 1977 年 5 月より測定を開始し, 棧橋の両側のおの 100 m の区間を 10 m 間隔で測量した。

さらに, ④ の沿岸流流速測定は棧橋上より 15 m のロープをつけたフロートを投入し, 移動距離と移動に要する時間を測定して流速を算定した。なお, 地形, 波浪, 潮位条件によって碎波帯の位置は変化するために, 観測時に碎波帯を 4 等分した内側 3 点で測定した。ただし, この測定は通常フロートが波に乗ることによる誤差があるために, 同一地点で 3 回測定を繰り返して行い, その平均値を平均流速と定めた。

⑤ の波向測定については 海岸背後の砂丘上に平板, アリダード, および磁石をもって登り, 棧橋先端より約 100 m 付近の波峰線の磁北からの向きをアリダードを使って読み取った。また, ⑥ の底質採取は棧橋沿いに 10 点と棧橋軸と直交する方向に 100 m 離れた地点で 2 点, 合計 12 点で行い, 粒度分析を行った。

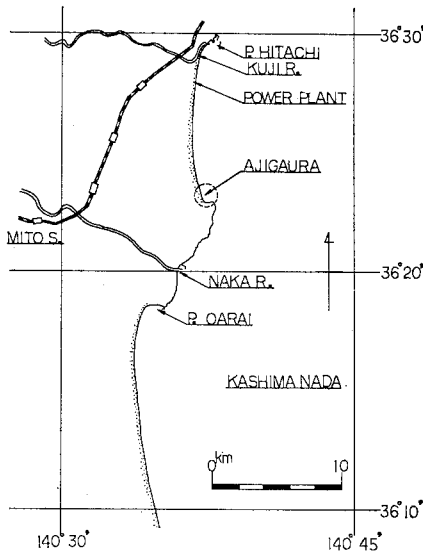


図-1 観測地域

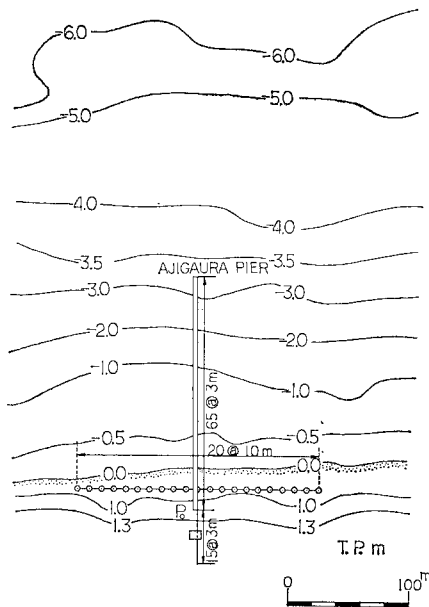


図-2 測定点の配置

3. 解析方法

地形データの解析は Winant ら¹⁶⁾による empirical eigenfunction を用いて行った。この方法は, 与えられた深浅測量データを直交関数法によって場所と時間の関数の積に分離するものである。ただし, ここでは分解能を向上させるために, まず最初に測定値 (h_{xt}) より, 平均地形 (\bar{h}_x) を求め, 次に変動量を式 (1) によって定義し, さらにこの値を用いて式 (2) のように展開を行った。

$$h_{xt}' = h_{xt} - \bar{h}_x \dots\dots\dots (1)$$

$$h_{xt}' = \sum_n c_{nt}(t) \cdot e_{nx}(x) \dots\dots\dots (2)$$

ここで, 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。また, n は地形を固有関数を用いて近似するときの固有関数の個数を表す。式 (2) では, 時間的変化が $c_{nt}(t)$ で表され, 空間的分布形は $e_{nx}(x)$ で与えられる。関数 e_{nx} は直交性を有しており, 相異なる関数の積は零となる。すなわち,

$$\sum_x e_{nx} e_{mx} = \delta_{n,m} \dots\dots\dots (3)$$

の関係が成立する。関数 e を求めるには測定値より対称マトリックス

$$a_{ij} = \frac{1}{n_x n_t} \sum_{t=1}^{n_t} h_{it}' h_{jt}' \dots\dots\dots (4)$$

を作り, この行列 A の固有値を求めればよい。すなわち,

$$A e_n = \lambda_n e_n \dots\dots\dots (5)$$

が成立する。また c_{nt} は e_{nx} の直交性を利用すれば,

$$c_{nt} = \sum_x h_{xt}' e_{nx} \dots\dots\dots (6)$$

より求めることができる。なお, すべての固有値の和は

行列 A のトレースに等しく、

$$\sum_n \lambda_n = \text{Trace } A = \frac{1}{n_x n_t} \sum_x \sum_t (h_{xt}')^2 \dots \dots \dots (7)$$

が成り立つために、Trace A に対する比の形で固有値の相対的重要度を算定することができる。

ところで、 c_{nt} は正規化されていないが、 c_{nt} を直交関数系にするには、

$$c_{nt}' = c_{nt} / (\lambda_n n_x n_t)^{1/2} \dots \dots \dots (8)$$

とおけばよい。このとき c_{nt}' に対しては次式が成立する。

$$\sum_{t=1}^{n_t} c_{nt}' \cdot c_{mt}' = \delta_{n,m} \dots \dots \dots (9)$$

4. 岸沖方向地形データの解析

固有関数展開法による解析は、1976年2月5日より1979年3月22日まで毎週1回、延べ164週のデータを用いて行った。したがって、 $n_t=164$ であり、一方測定点数は栈橋上からの測量が65点、栈橋軸延長上のデータが15点であり、合計では $n_x=80$ となる。

さて、計算では固有値の大きい順に5番目までに対応

する固有関数を求め、これらの物理的意味を考察することにした。まず、最初に 図-3 は平均地形 (\bar{h}) と固有関数 e_1, e_2, e_3 の分布形を示している。平均地形 \bar{h} は平均海浜形状を示しており、ほぼ1/40の海浜勾配となっている。ただし、7か所のくさび状の地形は栈橋の橋脚の洗掘を表している。 e_1 は、ほぼ全域で正値を有し、また、 $\bar{h}=0$ m となる平均汀線付近と $x=160$ m の $\bar{h}=-2.0$ m となる位置で極大値を有しているのが特徴的である。また e_2 は汀線から $x=150$ m 付近までと平均水深約3m付近で正の値を有し、また $150 \leq x \leq 190$ m の範囲で負の値を有している。さらに e_3 は e_2 と同じく岸側で正値に対して沖合で負となり、 $\bar{h}=-3$ m 付近では再びほぼ零となっている。ただし、Winant^らの行った解析では変動を表す関数として bar-berm function と terrace function が存在することが明らかにされているが、ここで求めた e_2, e_3 はその分布形においてこれらの関数とは相当異なったものとなっている。

図-4 は固有関数 e_4, e_5 の分布形を示している。 e_4, e_5 などと比較するとその分布形はさらに複雑で、より大きな波数を有している。

一方、時間関数 c_n については、まず 図-5 が時間関数 c_1 を示している。 c_1 は1976年2月より1977年2月に至る約1年間しだいに増加しており、先に示した e_1 が海浜のほぼ全域で正であったことを考慮すると、約1年間海浜のほとんど全域で土砂が堆積したことを示している。しかし、その後は1978年2月まで減少し、また1978年7月頃まで増加したあと再び減少に転じている。これらの変化はいわゆる季節的変化よりはるかに長い時間スケールを有している。なお、図中の破線は5週間の移動平均を示すもので、以後に述べる経時変化図の中の破線はすべてこの定義に従っている。

次に 図-6 に示す c_2 は数か月程度の周期的変化をしており、夏期にはほぼ正値を有し、また、春と秋にはほぼ負の値となっている。一方、対応する e_2 は汀線付近で正、また平均水深約2m程度で負、さらに沖合で正というように符号が逆転することを考慮すると、(e_2, c_2) はおもに岸沖漂砂に起因する地形変化ではないかと考えられた。

図-7 は c_3 の変化を示している。 c_3 は全体的傾向としては1977年8月を境に符号が正より負へ変化しており、比較的長

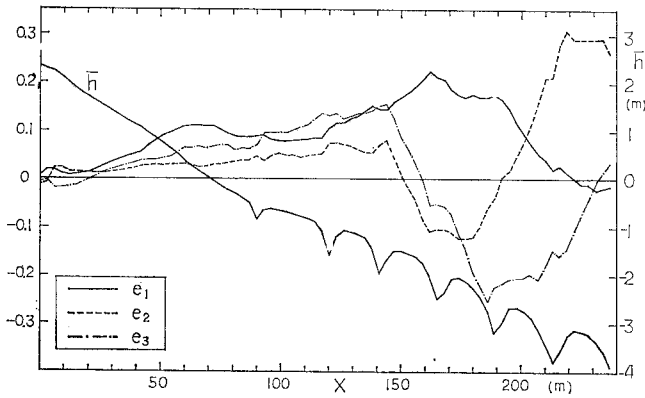


図-3 平均地形 (\bar{h}) と固有関数 e_1, e_2, e_3 の分布形

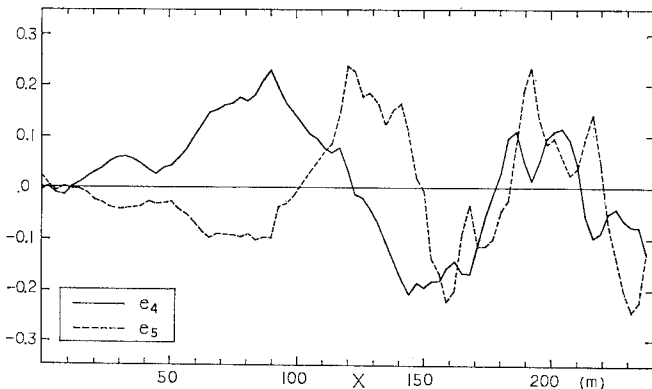
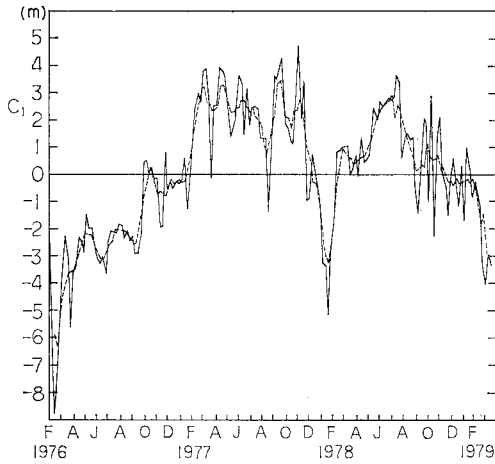
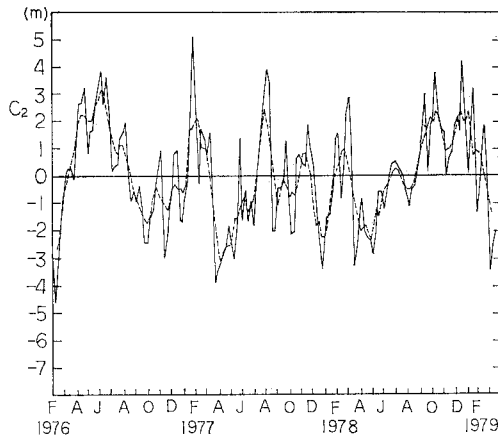
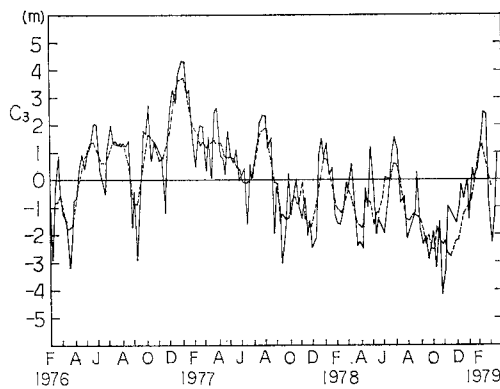


図-4 固有関数 e_4, e_5 の分布形

図-5 時間関数 c_1 の経時変化図-6 時間関数 c_2 の経時変化図-7 時間関数 c_3 の経時変化

周期的な変化が目立っている。対応する固有関数 e_3 は岸側で正、沖側で負という分布形を有すために、この固有関数も岸沖漂砂に対応するのではなからうかと考えられた。

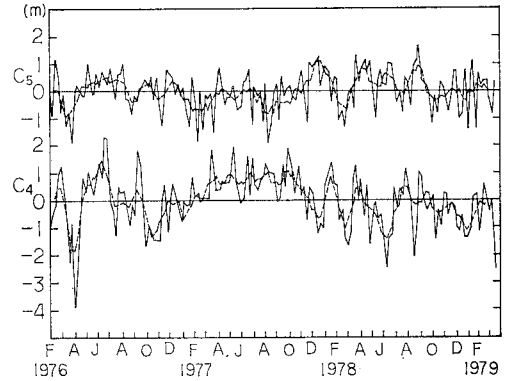
図-8 時間関数 c_4, c_5 の経時変化

表-1 固有値

番号	固有値 (λ_n)	$\lambda_n/T_r(A)$	累加値
1	0.0777	0.367	36.7%
2	0.0464	0.219	58.6%
3	0.0356	0.168	75.4%
4	0.0131	0.062	81.6%
5	0.0069	0.032	84.8%

次に、図-8 は c_4, c_5 の経時変化を示しているが、 c_4 に関しては比較的長いトレンドを有している。また、 c_5 はほぼランダムな変動となっており、これらの解釈は相当困難と考えられた。なおこれらの固有関数の固有値と Trace A に対する比は表-1 のようにまとめられる。表-1 によれば、2 番目までの関数によって変動量の約 60% が、また、4 番目までの関数によって変動量の約 80% が表現し得ることがわかる。

以上のように計算結果は興味ある内容を示唆しているが、これらが外力条件とどのように対応しているかを調べるために、次節では波浪や流れなどの外力条件について明らかにする。

5. 波浪と流れの特性

(1) 波高特性

波浪特性については、棧橋の波高計で得られた波高記録は波高計が碎波帯にあり、また欠測があることなどから、波浪データとしては鹿島港で運輸省が取得したものをを用いることにした。なお、阿字ヶ浦と鹿島港では約 40 km 離れている。したがって、鹿島港のデータが利用できるかどうかについては 2 地点間の波浪条件の比較が必要である。この点については、富永・山口・須賀ら¹⁷⁾が阿字ヶ浦よりさらに 10 km 北の久慈川河口地点と鹿島港での波浪条件の比較を行い、波高についてはやや鹿島港の方が大きめの値を有するが、ほぼ同じ値を示すこ

と、および周期についても波高と同様に相関が比較的良好的なことを明らかにした。このためここでは鹿島港の波浪データを利用することにした。

ただし鹿島港の波高記録は毎時のデータとして整理されているが、地形の測定は1週間おきに行われているために波高データも1週間単位で整理する必要がある。しかも地形の時間的変化を表す時間関数 c_n との相関を調べる際、代表波として最大波および平均波のいずれを用いるべきか等の問題があるために、本節では波浪条件について詳しく調べることにした。

まず図-9は日最大有義波高の週最大値の経時変化を示している。波高の変動は相当大きいので、平均的傾向を調べるために5週間の移動平均を求めた。この結果が破線で示されている。これによると、例年夏期の7,8月頃は波浪が静穏であり、一方、春・秋には波高が高くなっている。

次に、各種定義による波高相互の関係を調べるために日最大有義波高の週最大値 ($H_{max,max}$) を基準としてこれに対する週平均値 ($H_{max,mean}$)、週最小値 ($H_{max,min}$) と日平均有義波高の週最大値 ($H_{mean,max}$)、週平均値 ($H_{mean,mean}$)、週最小値 ($H_{mean,min}$) の関係を調べた。その代表例が図-10であり、回帰式によって

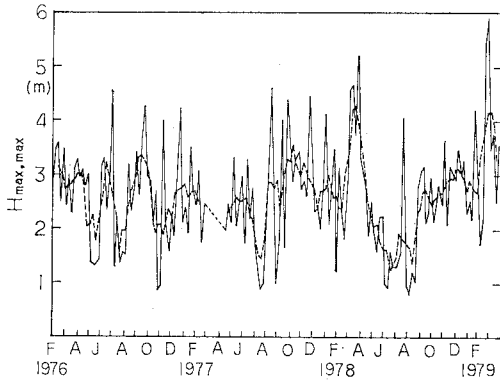


図-9 日最大有義波高の週最大値の経時変化

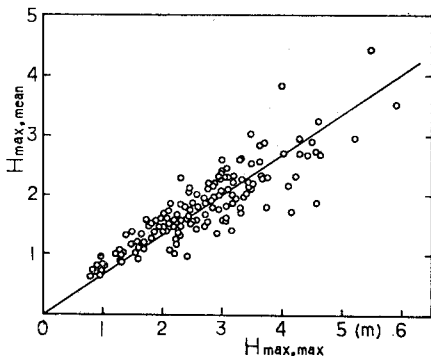


図-10 日最大有義波高の週最大値と週平均値の関係

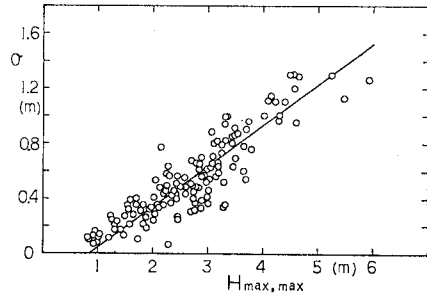


図-11 日最大有義波高の週最大値とその標準偏差の関係

表-2 比例定数と標準偏差

名 称	$H_{max,max}$ に対する比	標準偏差 (m)
$H_{max,mean}$	0.67	0.39
$H_{max,min}$	0.41	1.46
$H_{mean,max}$	0.77	0.30
$H_{mean,mean}$	0.51	0.28
$H_{mean,min}$	0.31	0.45

波高間の比と標準偏差を求めて整理したのが表-2である。表-2によれば、 $H_{max,max}$ の約70%が $H_{max,mean}$ となり、また約80%が $H_{mean,max}$ となること、さらに $H_{max,min}$ は $H_{max,max}$ の約40%程度であることがわかる。

ただし、波高データは毎週の平均値に対して相当の変動を有するために、代表的に日最大有義波高の週最大値について標準偏差 (σ) と波高の関係を調べ、この結果を図-11に図示した。図中の実線は回帰分析によって求めたもので、式(10)の関係が成立する。

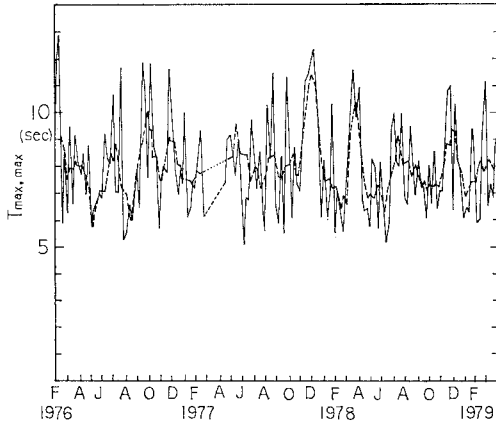
$$\sigma = 0.30 H_{max,max} - 0.26 \dots \dots \dots (10)$$

このような波高データの変動は、地形変化の時間関数 c_n と波高値との相関を求める際のデータのばらつきの一因となっている。

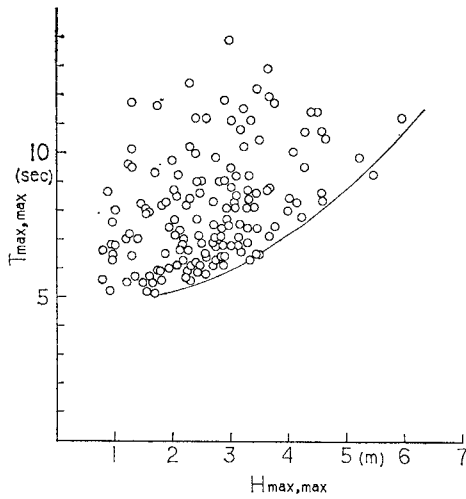
(2) 周期特性

図-12は日最大有義波高の週最大値に対応する周期 ($T_{max,max}$) の経時変化を示している。最も短い周期は約5秒であり、最も長い周期は約13秒となっており、平均周期は8.1秒である。 $T_{max,max}$ は図-9に示した $H_{max,max}$ と比較すると、微弱ながら波高が大きいときには周期も長いという関係があるために、図-13のように相関図として整理した。これによれば図中実線で示されるように波高に対応して周期の下限値が存在しており、各波高に対応して限界波形勾配が存在することを意味している。

次に、有義波周期相互の関係を日最大有義波高の週最大値に対応する周期 ($T_{max,max}$) を基準として調べた。この一例として $T_{max,max}$ と $T_{max,mean}$ の関係を示したのが図-14である。ただし、図中の実線は比



図一12 日最大有義波高の週最大値に対する周期 ($T_{max,max}$) の経時変化



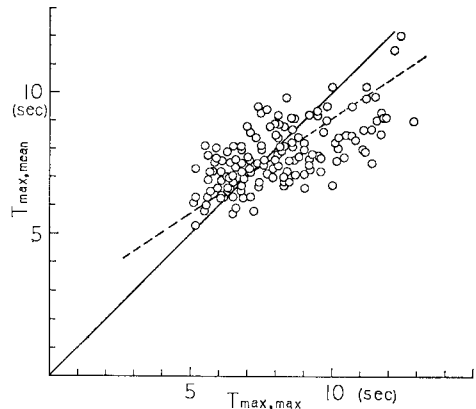
図一13 波高と周期の関係

較のために1対1の勾配を有する直線を示したものである。平均的な $T_{max,mean}/T_{max,max}$ の値は、この実線と異なっており、むしろ図中破線で示されるように、 $H_{max,max}$ と $H_{max,mean}$ の間で表-2のように得られた比の値をそのまま周期に適用して得られた直線によって、ほぼ近似されることがわかる。また、このような関係は、 $T_{mean,max}$ 、 $T_{max,mean}$ と $T_{max,max}$ の間にも成立する。したがってこれらの特性はランダムなデータを平均化するとき生じたものであろうと考えられる。

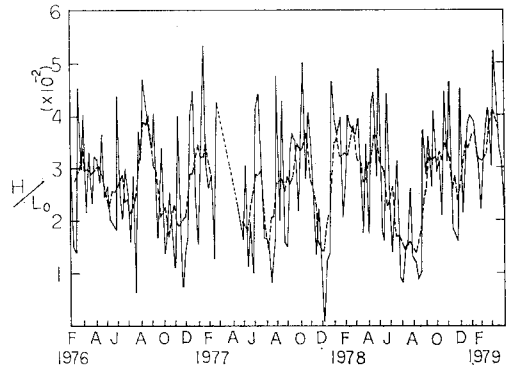
最後に 図-15 は 図-9 の日最大有義波高の週最大値に対応する波形勾配の経時変化を示したものである。変動幅は相当大きく、また 図-13 に示したように波高と周期の間に弱いながらも正の相関があるために、波高の変化と比較すると極値の起こる時期が変化している。

(3) 波向と沿岸流流速の特性

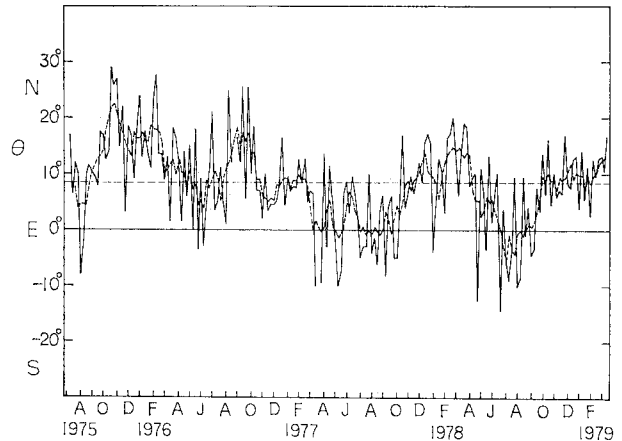
図-16 は波向の経時変化を示している。この図は1975年7月より1977年3月までの変化を示しており、E方向より反時計回り(N方向)を正として図示されている。ただし栈橋地点における汀線に対する垂線は 図-



図一14 周期の相関



図一15 日最大有義波高の週最大値による波形勾配の経時変化



図一16 波向の経時変化

16 に破線で示されるように時計回りの方向に平均して $\alpha=8^{\circ}54'$ 傾斜しており、したがって入射角 β は式 (11) によって定義される。

$$\beta = \theta - \alpha \dots\dots\dots (11)$$

また、図-16 の破線は 5 週間の移動平均を示している。波向は約 1 年間の周期性を有し、ほぼ毎年 6~8 月には南よりの入射、また、春・秋には北側からの入射が著しい。この波向の変化は 図-9 に示した $H_{\max, \max}$ の変化とよい相関を有している。このため波向の移動平均値 $\bar{\theta}$ と $H_{\max, \max}$ の移動平均値 $\bar{H}_{\max, \max}$ の関係を調べた。これが 図-17 であり、回帰分析によれば、 $\bar{\theta}$ と \bar{H} の間には式 (12) の関係が成立している。

$$\bar{\theta} = 8.7 \bar{H}_{\max, \max} - 15.5 \dots\dots\dots (12)$$

式 (12) および 図-17 によれば、南寄りの入射波は波高が小さく、北側より入射するときは波高が相対的に大きくなることを示している。

次に、図-18 は沿岸流流速の経時変化を示しており、図中の正值は北流を、負値は南流を示している。データは変動幅が大きく、全般的に南流が卓越しているが、1977 年の 5~7 月、12 月、および 1978 年 6~7 月には北流となっている。この時期、波向は 図-16 に示した

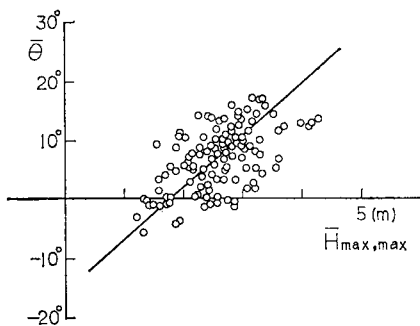


図-17 波向と日最大有義波高の週最大値との相関

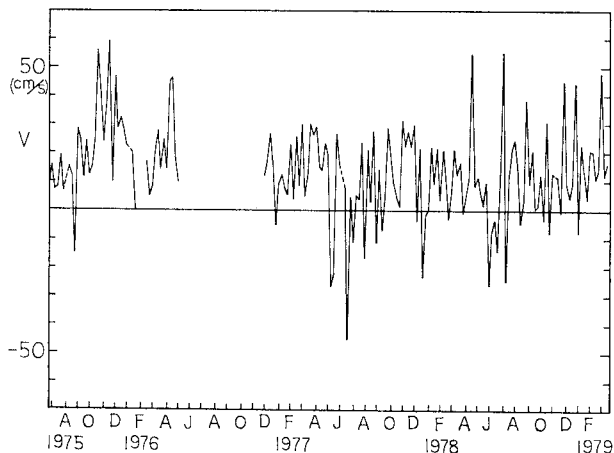


図-18 沿岸流流速の経時変化

ように南寄りより入射しており、波向と沿岸流の変化は相当よい対応を示している。以上の点より、阿字ヶ浦においては夏期にはほぼ南側より波が入射し、同時にこのときは北向き沿岸流が発達し、一方、春・秋の季節には地理的特性によって北北東の風の発達¹³⁾とともに北寄りの波が入射し、このため沿岸流として南流が卓越することを示している。

6. 相関分析による地形変化の解析

前節までにおいて地形変動を表す関数系 (c_n, e_n) と外力である波浪、波向、沿岸流流速について明らかにされたので、本節では外力と地形変動の関係について考察することにする。

まず、最初に (c_1, e_1) に関しては 図-5 に示した時間関数 \bar{c}_1 と 図-16 に示した波向 ($\bar{\theta}$) を比較すると、位相差を零としたとき $\bar{\theta}$ と \bar{c}_1 は比較的良好な対応関係を示している。しかしながら $\bar{\theta}$ と \bar{c}_1 の相関を直接調べることは物理的意味が不明確である。なぜならば、 \bar{c}_1 と e_1 を乗じたものは海浜形態そのものであり、これが波向に対応すると考えるよりも、海浜形状の時間的変化割合が外力特性の 1 つである波向に対応すると考える方が合理的である。

このため時間関数 \bar{c}_1 の時間的変化率と波向 ($\bar{\theta}$) の関係を位相差を含めて詳しく調べることにした。まず 図-5 に示されるように、関数 \bar{c}_1 は 1976 年 2 月より 1977 年 2 月に至る約 1 年間ほぼ連続的に増加しているが、この間の増加の原因を 図-16 で調べることにすると、図-16 の $\bar{\theta}$ の変化においては、約 3 か月前の 1975 年 11 月より 1976 年 11 月までの北側からの入射波に対応している。次に 1977 年 2 月より 1978 年 2 月までの関数 \bar{c}_1 の減少は、1976 年 11 月より 1977 年 11 月までの南側からの入射波に対応し、また 1978 年 2 月より 1978 年 7 月までの関数 \bar{c}_1 の増加は、1977 年 11 月より 1978 年 4 月までの北側からの入射波と対応関係を有しており、いずれの場合も位相遅れは約 3 か月程度であることがわかる。

次にその位相関係を明確にするために、関数 \bar{c}_1 の時間変化率を算定し、これと波向 $\bar{\theta}$ との関係を調べることにした。まず 図-19 は $d\bar{c}_1/dt$ の経時変化を示している。

ただし、単位時間は 1 週間とした。 \bar{c}_1 そのものが相当変動しているために変化率の変動も激しいものとなっている。このため c_1 などと同様にして $d\bar{c}_1/dt$ についても 5 週間の移動平均 ($d\bar{c}_1/dt$) を求め、破線で図示した。さて、図-19 の $d\bar{c}_1/dt$ と $\bar{\theta}$ の相関を調べることになるが、直接比較し

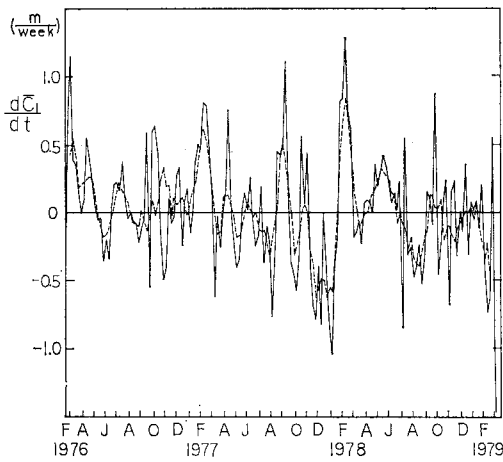


図-19 $d\bar{c}_1/dt$ の経時変化

ても変動が大きく、かつ位相差があるために特性を明らかにするのは困難であろう。このため、相互共分散関数を式 (13) のように定義して計算することにした。

$$Q_{yx}(\tau) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{s=1}^N \{y(s+\tau) - m_y\} \cdot \{x(s) - m_x\} \dots\dots\dots (13)$$

ただし、

$$m_x = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{s=1}^N x(s), \quad m_y = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{s=1}^N y(s) \dots\dots\dots (14)$$

である。さらに、相関関数 $R(\tau)$ を式 (15) で定義した。

$$R(\tau) = Q_{yx}(\tau) / \sigma_x \sigma_y \dots\dots\dots (15)$$

ここに、 σ_x, σ_y は標準偏差である。

さて、計算では $x = \bar{\theta}, y = d\bar{c}_1/dt$ とおき、データ総数は $N=193$ 、ラグ数の最大値を $\tau_{max}=20$ として計算した。この結果が 図-20 に実線で示されている。相関関数の値はデータのばらつきが大きいため小さいものと

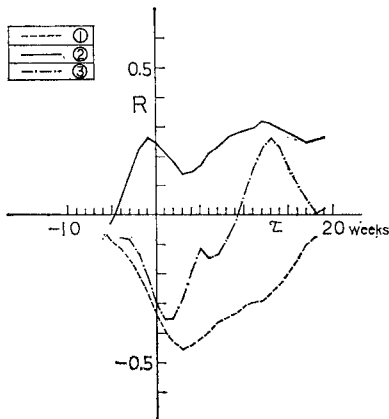


図-20 相互相関関数 (①: $\langle \bar{\theta}, \bar{c}_1 \rangle$, ②: $\langle \bar{\theta}, d\bar{c}_1/dt \rangle$, ③: $\langle \bar{c}_3, \bar{H}_{mean,max} \rangle$)

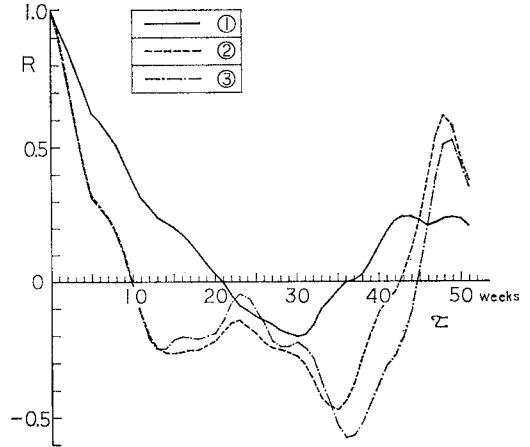


図-21 自己相関関数 (①: $\bar{\theta}$, ②: $\bar{H}_{mean,max}$, ③: $\bar{H}_{max,max}$)

なっているが、 $\tau \geq 0$ の範囲では $R(\tau)$ は正の値を有している。その極大値は $\tau=0$ 週と $\tau=12$ 週において現れており、最大値は $\tau=12$ 週で $R=0.32$ である。波向 ($\bar{\theta}$) は 図-21 に自己相関関数が示されるように、ほぼ1年周期の変化が卓越しており、 $\tau=12$ 週等の変動成分は微弱である。このため 図-20 における $\tau=12$ 週の極値は物理的に有意なものと考えられた。したがって、波向の時間的変化に対して12週間遅れて地形変化が生ずることになる。なお、 $R(\tau)$ は $\tau \sim 0$ 付近に2次のピークを有するが、これが有意なものかどうかについては十分検討することはできなかった。

図-22 は、実際に12週間の遅れをもたせて $\bar{\theta}$ と $d\bar{c}_1/dt$ の相関関を描いたものである。相関係数が0.32と小さいためばらつきが大きい、回帰分析によれば平均的には 図-22 に実線で図示したように式 (16) の関係が成立する。

$$d\bar{c}_1/dt(t) = -0.42 + 0.067 \bar{\theta}(t-12) \dots\dots\dots (16)$$

ただし、図-22 では $d\bar{c}_1/dt$ の絶対値が0.2より小さ

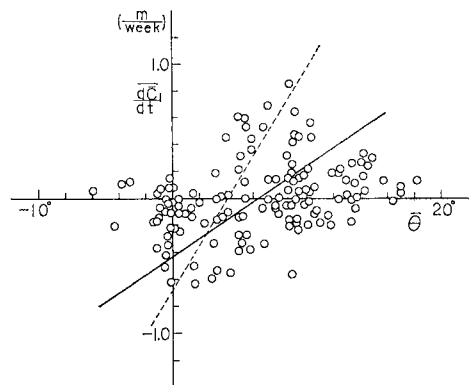


図-22 波向 ($\bar{\theta}$) と $d\bar{c}_1/dt$ の相関

い範囲では $\overline{dc_1}/dt$ は $\bar{\theta}$ にそれほど依存しない傾向を示している。この原因が $\overline{dc_1}/dt$ 算定の際の移動平均操作によるものかどうかは明らかではなく、この点についてはさらに検討を必要としよう。しかし、仮にこの部分を除くことができるとすれば図中破線で示したようにほぼ式 (17) の関係が成立するであろう。

$$\overline{dc_1}/dt(t) = -0.67 + 0.16\bar{\theta}(t-12) \dots \dots \dots (17)$$

ところで、 c_1 に対応する e_1 は 図-4 に示したように、断面内のほぼ全域で正值であるために、 $\overline{dc_1}/dt$ が正のときは全断面で土量が増加し、逆に $\overline{dc_1}/dt$ が負のときは土量が減少することになる。式 (19) によれば、 $\bar{\theta}$ の大きい北寄りの入射波に対しては、約 3 か月遅れで $\overline{dc_1}/dt > 0$ 、すなわち土量が増加し、逆に南寄りの波に対しては土量が減少することになる。また波向と沿岸流の流向はほぼ対応しており、さらに南向きの沿岸流によって実際に南下する漂砂が発生することは蛍光砂による観測¹⁵⁾によって確かめられている。以上の点より、波向 $\bar{\theta}$ と関数 c_1 の対応関係は、南端を磯崎岬によって囲まれた阿字ヶ浦では北寄りの入射波に対しては南下する漂砂によって阿字ヶ浦地区の土量が増加することを示し、逆に南寄りの入射波では北上する漂砂によって土量が減少することを示すと考えられる。ただし、波向と地形変化の間の 12 週間の位相差が発生した原因については今後さらに理論的検討を必要としよう。

次に第 2 位の固有値に対応する時間関数についても c_1 と同様に時間変化率を算出し、図-23 に図示した。これについては、数か月程度の変動が主成分となっているため、おもに波高または波形勾配との相関が考えられた。このためこれら両者と $\overline{dc_2}/dt$ の相関を調べることにし、式 (13) において変数 x として波高および波形勾配の移動平均値をとり、変数 y を $\overline{dc_2}/dt$ とおいて計算した。ただし波高データは 図-10 に示すように、1977 年 2 月より 5 月の間に欠測があるために、1977 年 5 月より 1979 年 3 月までのデータを用いることにした。したがってデータ総数は $N=100$ である。

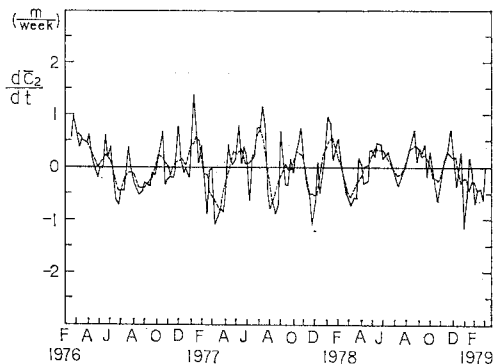


図-23 $\overline{dc_2}/dt$ の経時変化

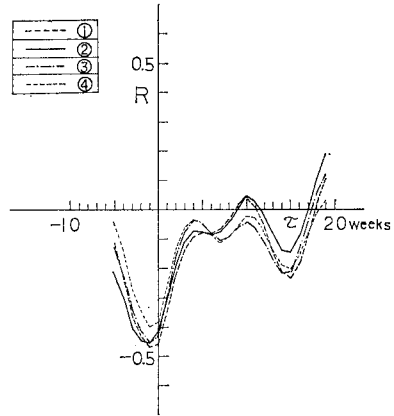


図-24 $\overline{dc_2}/dt$ と有義波高の相互相関関数 (①: $\overline{H}_{\text{mean,max}}$, ②: $\overline{H}_{\text{max,max}}$, ③: $\overline{H}_{\text{max,mean}}$, ④: $\overline{H}_{\text{mean,mean}}$)

図-24 は $\overline{dc_2}/dt$ と有義波高の相互相関関数を示している。絶対値が最大の相関は太い破線で示されるように $\overline{H}_{\text{mean,max}}$ (日平均有義波高の週最大値) との間で発生しており、 $\tau = -1$ 週で $R = -0.47$ となっている。 τ が負ということは物理的に不合理であるが、 $\tau = 0$ における R の値と $\tau = -1$ の場合の差はわずかであることを考えると、この差は有意なものではなく、移動平均を 2 回行う際に生じたものであろうと考えられる。したがってこの場合の時間遅れはほぼ零と見なしてもよいであろう。

なお 図-24 では、 $\tau \sim 15$ 週付近に 2 次の極値が存在する。 $\overline{H}_{\text{mean,max}}$ の自己相関関数は 図-21 に破線で示されているが、 $\overline{H}_{\text{mean,max}}$ は約 1 年の強い周期性と、約 21 週の弱い変動性を有している。図-24 の $\tau \sim 15$ 週の 2 次の極値は位相関係はわずかにずれるが、 $\overline{H}_{\text{mean,max}}$ の約 21 週の変動性のために、 $\tau \sim 0$ の極値に対応して現れたものではなかろうかと考えられる。

次に 図-25 は、この場合の相関図を描いたものであ

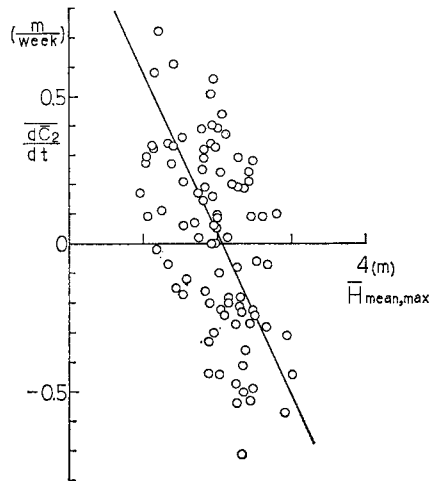


図-25 $\overline{dc_2}/dt$ と $\overline{H}_{\text{mean,max}}$ の相関図

る。データは相当のばらつきを有しているが、回帰分析によれば式 (18) が成り立つ。

$$\overline{d\bar{c}_2}/dt = 1.13 - 0.55 \bar{H}_{\text{mean,max}} \dots \dots \dots (18)$$

したがって $\overline{d\bar{c}_2}/dt = 0$ となる c_2 成分による冲向岸向漂砂の発生限界は、 $\bar{H}_{\text{mean,max}} = 2.05 \text{ m}$ となる。なお、時間関数 c_2 に対応する関数 e_2 は 図-3 に示したように汀線付近で正、その沖合で負、またさらに沖合では正という形状を有しており、この係数 c_2 が波高の大小とともに変化することから、この関数は波浪の強弱による岸沖漂砂を表していると考えられる。また式 (18) および 図-3 の e_2 の分布形より、 $\bar{H}_{\text{mean,max}}$ を与えて地形変化の予測を行うことも不可能ではないであろう。

しかしながらこの点に関しては多くの問題点があることも明らかである。まず第1に 図-3 に示した e_2 は正の部分が負の部分より多く、岸沖方向の土量変化の均衡が保たれていないこと。第2には測定区間長が短いため $x = 240 \text{ m}$ 以遠の形態が未知な点であり、第3には 図-25 の相関図は相当のばらつきがあり、式 (18) の信頼度が必ずしも高くないことなどがあげられよう。第1の点は、モデルを一般化するには問題となるために、さらに詳しく検討する必要があり、他の海岸における調査や実験的研究も必要となる。また第2点については音響測深機による栈橋沖合の深浅測量が行われているので、それらのデータを解析して明らかにされなければならない。さらに、第3点についてその主因と考えられるのは地形変化の単位時間が1週間と比較的長いために波高が変動してしまうことが考えられる。しかしながら、長期間の予測を行う際には測定時間間隔を非常に短くすることは困難と考えられるため、むしろ代表波の選定法について改善がなされるべきであろう。

さて、 図-25 によれば波高値より岸沖方向漂砂の方向を予測することができるが、 図-25 の横軸は波高値であり、無次元化されていないため一般性に欠ける欠点がある。このため波形勾配の移動平均値を用いて再定義を行うことにした。このため波高データと同様にして式 (13) によって波形勾配と $\overline{d\bar{c}_2}/dt$ との相互相関関数を求めた。この結果が 図-26 である。この場合、最良の相関関係は日平均有義波高の週最大値を用いたときに得られるが、その分布形は 図-24 と比較すると大きく変化し、絶対値最大の相関は $\tau = 7$ 週において出現

している。このことは波形勾配の変化に対して7週遅れで岸沖漂砂による地形変化が生ずることを意味するが、これが妥当なものかどうかについてはさらに検討が必要

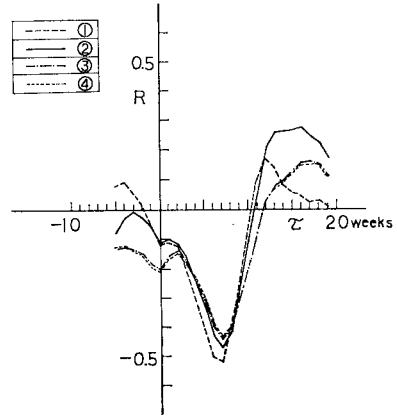


図-26 $\overline{d\bar{c}_2}/dt$ と波形勾配の相互相関関数
 ①: $\bar{H}_{\text{mean,max}}/L_0$, ②: $\bar{H}_{\text{max,max}}/L_0$,
 ③: $\bar{H}_{\text{max,mean}}/L_0$, ④: $\bar{H}_{\text{mean,mean}}/L_0$

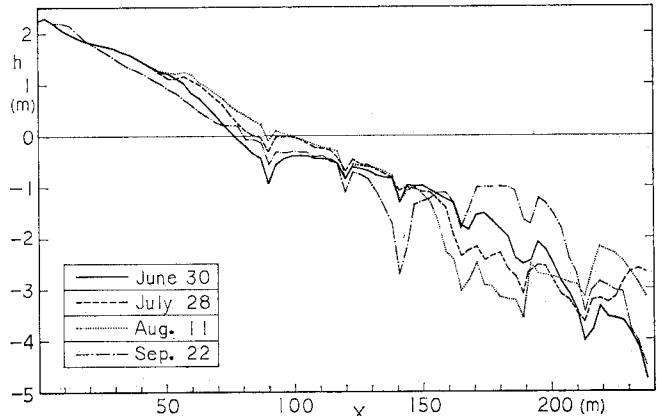


図-27 海浜断面形状の比較 (1)

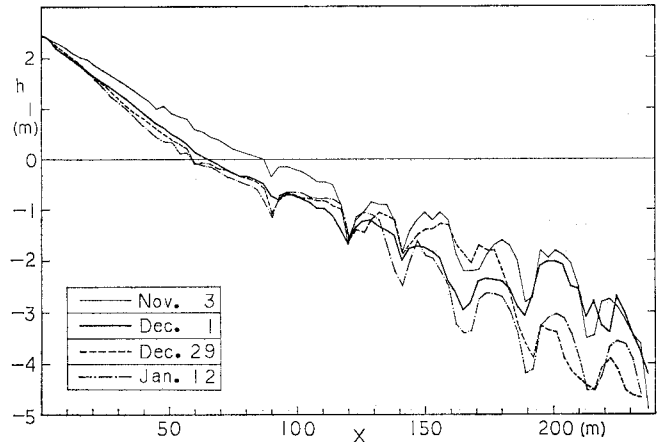


図-28 海浜断面形状の比較 (2)

である。このため代表的な時期を選んで実際に海浜形状の変化を比較することにした。

図-27 は 1977 年 6 月 30 日より 9 月 22 日までの地形変化を示している。1977 年 7 月は 図-9 によれば波高が他の時期に比較して小さいため、図-27 に示されるように、おもに岸沖漂砂によって汀線付近と $x \geq 190$ m の範囲で土砂が堆積し、また $150 \text{ m} \leq x \leq 190 \text{ m}$ の範囲では侵食されている。さらに 図-27 には 9 月 22 日の形状も示されているが、この時期は 図-9 によれば、波高が高いために逆に汀線付近は侵食され、 $150 \text{ m} \leq x \leq 210 \text{ m}$ の範囲で堆積が生じている。一方、図-15 の波形勾配については、同じく 7 月に極小値が存在するが、これによれば 7 週後の 8 月中旬より 9 月中旬まで汀線付近に土砂が堆積するはずであるが、この期間は逆に侵食されている。

同様に 図-28 は 1977 年 11 月 3 日より 1978 年 1 月 12 日までの変化を示している。この期間、波高は 図-9 によると連続的に大きな値を有するが、図-15 に示された波形勾配は 11 月中旬より 12 月中旬までの間で再び極小値を有している。図-28 に示された地形変化は、夏の地形(図-27)と比較すると全体に地盤高が低くなっている。この主要の原因は、図-16 に示されるように約 3 か月前に波向が南寄りであったため、沿岸漂砂によってほぼ全域の土砂が減少したためと考えられる。しかしながら 11 月 3 日より 1 月 12 日まで、汀線付近は連続的に侵食され、まったく堆積傾向は示していない。この期間、波高は 図-9 に示されるように大きい値を有するが、これは上記の点とよい対応関係にある。しかし波形勾配については、12 月初旬における極値に対して 7 週遅れの 1 月中旬に汀線付近に堆積が生ずるはずであるが、それらの変化は生じていない。

以上の点より波形勾配は岸沖方向の地形変化とよい対応は示さないことがわかる。

次に第 3 位の固有関数について検討する。まず、固有関数 e_3 の岸沖分布は 図-3 に示されるように、その符号は汀線付近で正、沖合で負と変化する。したがって、この関数も岸沖漂砂による地形変化を表すものではないかと考えられた。

一方、第 2 位の固有関数はすでに明らかにしたとおり、波浪の強弱による岸沖漂砂を表している。しかしながら、固有関数 (e_2, c_2) のみでは拡散型の地形変化は表示できるが、波動性の変化は表すことはできない。すなわち、実際の地形変化では、sand wave が岸向き・沖向きに移動する波動性の地形変化⁽⁴⁾が存在するが、このような変化を固有関数表示するには少なくとも 2 組の関数系が必要であり、しかもそれらの関数の時間的変化には位相差が存在しなければならない。以上の点より第 3 位

の固有関数は、第 2 位の関数とともに岸沖漂砂による地形変化を表すものではないかと考えられた。

このため c_3 についても c_1, c_2 と同様に時間変化率を求め、外力との関係について調べたが、有意な関係は得られなかった。したがって、次に c_3 と波高との関係を調べることにした。図-20 の鎖線は \bar{c}_3 と日平均有義波高の週最大値の移動平均値 ($\bar{H}_{\text{mean,max}}$) との間の相互相関を示している。主要な極値は $\tau=1$ 週で $R \approx -0.35$, $R=13$ 週で $R \approx 0.26$ となっている。この場合、主要な極値は正、負で現れており、いずれが有意なものかは現段階では明らかにすることはできなかった。ただし、 $\tau=1$ 週における極値は、 \bar{c}_3 と $\bar{H}_{\text{mean,max}}$ の間で生ずる $\tau \sim 0$ における極値と位相差がわずかに 1 週間であり、数週間の波動性の地形変化⁽⁴⁾を示すには位相差が短いと考えられる。ただし、これらの点を明らかにするためにはさらに長期間のデータが得られたうえで検討が行われなければならないのであろう。

第 4 位の固有値に対応する固有関数については、 \bar{c}_4 の時間変化率を算出し、外力との相関を調べたが、有意な相関は得られず、むしろ \bar{c}_4 と波向 $\bar{\theta}$ の間で相当よい相関があることがわかった。このため式 (13) において $x = \bar{\theta}$, $y = \bar{c}_4$ とおいて相互相関関数を計算し、図-20 に破線で示した。絶対値最大の相関は波向変化に対して 3 週間遅れで生じており $R=0.46$ となっている。この場合の相関図は 図-29 であり、回帰分析によれば、式 (19) の関係が成立する。

$$\bar{c}_4(t) = 0.82 - 0.12 \bar{\theta}(t-3) \dots\dots\dots (19)$$

また式 (19) の両辺を t で微分すると、

$$d\bar{c}_4/dt = -0.2 d\bar{\theta}/dt(t-3) \dots\dots\dots (20)$$

なる関係が得られる。 c_4 に対応する e_4 の形状は 図-4 の実線で示されているが、この形状は $x \leq 180 \text{ m}$ の範囲内で正から負へと変化している。このため式 (19) によれば、波が北側より入射すればこれより 3 週間遅れで

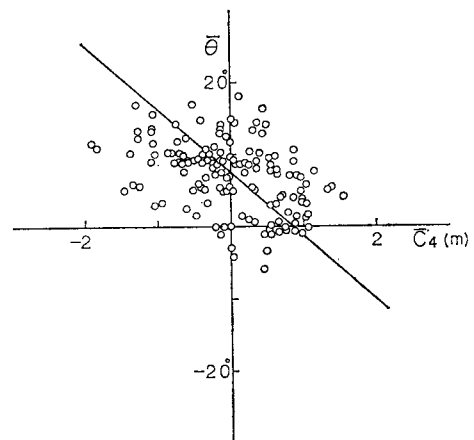


図-29 \bar{c}_4 と波向 $\bar{\theta}$ 関係

$\bar{c}_4 < 0$, すなわち汀線付近は侵食された形態となり, 南より入射すれば $\bar{c}_4 > 0$ すなわち汀線付近は堆積形状となることを意味している. また式 (20) によれば, $d\bar{\theta}/dt$ が負, すなわち波向が北側から南側へ変化するときには $d\bar{c}_4/dt$ が正となり, 汀線付近の土量は増加し, 逆に波向が南側から北側へ変化する際には $d\bar{\theta}/dt$ が正であるから, $d\bar{c}_4/dt$ が負となって汀線付近の土量は減少することになる. しかしながら, このような地形変化がいかなる機構によって生ずるのかについては問題点として残されている.

さて, 以上の議論を要約すれば, 第 1 位の固有関数は沿岸漂砂による地形変化を, 第 2 位の固有関数は波浪変化に伴う岸沖漂砂による地形変化を表すことになる. また, 第 3 位の固有関数は, 第 2 位の固有関数とともに岸沖漂砂を表すものと考えられたが, その検証は十分行うことはできなかった. また, 第 4 位の固有関数は波向の時間的変化に対応して生起する岸沖漂砂による地形変化と考えられよう. ただし, 第 5 位以下の固有関数については他のパラメーターとの相関が見い出せなかったため, 誤差と見なして省略することにした. なお, 第 4 位の固有関数までによる変動量の表示は, 先に表-1 に示したように全変動量の 80% 以上を占めている.

7. 沿岸方向地形データの解析

ここでは, 沿岸方向の地形変化について考察する. ま

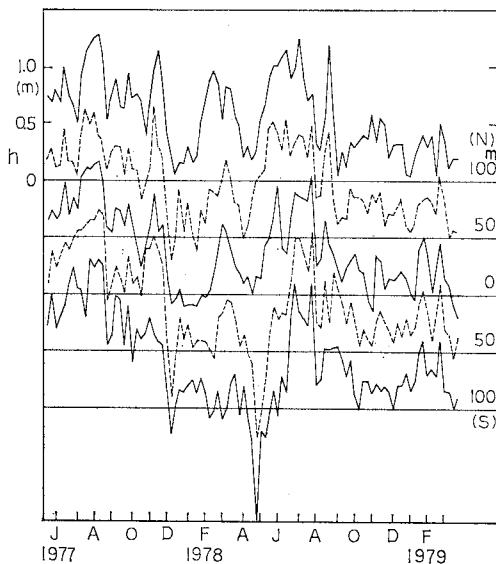


図-30 沿岸方向の代表点の地盤高の経時変化

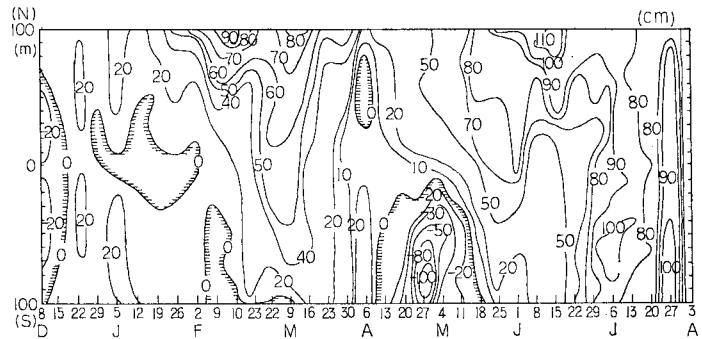


図-31 沿岸方向地形変化の時空間曲線

ず, 最初に沿岸方向の測量データのうち, 代表点の地盤高の経時変化を調べた. この結果が 図-30 である. 図は栈橋の北側 100, 50, 0 m, および南側 50, 100 m における地盤高の経時変化を示している. 5 地点とも相似な変化をしているが, 1977 年 12 月より 1978 年 8 月までの変化をみると, 地形変化の形態がわずかに変形するとともに位相遅れが存在する. 図-31 は 1978 年 12 月 8 日より 1978 年 8 月 3 日に至る期間における地盤高の変化を時空間分布として描いたものである. ただし, 図の縦軸は南北方向の場所を, 横軸は時刻を表している. 図-31 においては 7 月 20 日および 27 日に典型的に現れているように, 等高線が縦に立っているものは地形変化が 2 次的であったことを示し, 一方, 1 月より 3 月に至る時間に北側よりしだいに等高線が広がりを示す部分は沿岸方向に地形変化が伝播していることを示している. そして, このような沿岸方向の現象は詳細にみるといくつか存在していることがわかる.

まず最初に, 1 月 19 日に北 100 m より始まった地盤高の上昇はその後南下し, 3 月 9 日頃南 100 m 地点に到達した. 次に 4 月 6 日より 5 月 25 日までに同様に南下する方向に形態の伝播がみられる.

一方, 4 月 20 日頃より北上する方向に侵食領域が広がっており, さらに 6 月 1 日より 29 日に至る期間でも同様な特長がみられる.

以上に述べた地形変化の原因としては, 沿岸漂砂が主要因と考えられたために, 図-16 に示した波向の経時変化と比較することにした. まず, 図-31 では南下する sand wave と北上する sand wave が 2 つずつ存在していたが, これらの点はすでに明らかなように, 沿岸漂砂による地形変化が波向の変化に対して 12 週間の時間遅れをもっていることを考慮すれば合理的に説明できる. すなわち, 1977 年 10 月下旬には波向は平均値の $85^{\circ}54'$ を超えて北側より入射し, 続いて 1978 年 1 月初旬に南側からの入射となった. これらの変化に対応して 図-31 の地形変化は約 3 か月遅れで南下する sand wave,

およびそれに続く4月中旬にみられるように侵食を表す sand wave の北上がみられた。また波向は1978年2月より再び北寄りとなった。ただし、移動平均値では明らかではないが、3月初めにパルス状に南寄りとなる時期が存在した。これらの外力変化に対応して、図-31ではまず5月初めより南下する sand wave があり、また6月初めより北上する sand wave が現われた。そしていずれの場合も北上する sand wave は侵食性、南下する sand wave は堆積性という特長を有することがわかる。

以上のように図-31の $x-t$ 図は波向とよい対応をすることが明らかとなる。またこのことよって \bar{c}_1 と $\bar{\theta}$ の間に12週間の位相遅れがあることを再確認することができよう。

8. 結 論

本論文では、茨城県の阿字ヶ浦において約4年間にわたって毎週1回行われた漂砂観測のデータを、empirical eigenfunction を用いて解析し、さらに外力と地形応答関数の位相関係を明らかにするために相互共分散関数を用いた解析を行った。

この結果、固有値の大きい順に4番目までの固有関数および時間関数について物理条件との対応が可能になった。すなわち、第1位の固有関数は、その時間関数の時間変化率が波向と対応しており、また固有関数の分布形が岸沖方向で符号が変化しないことから、沿岸漂砂による地形変化を表すと考えられた。次に第2位の固有関数は、その時間関数の時間変化率が波高の関数となり、また固有関数の分布形が岸沖方向で符号変化することなどから、この関数は波浪の強弱による岸沖漂砂を表すこと、およびこのときの限界波高は日平均有義波高の週最大値で約2.05mとなることがわかった。さらに第3位の固有関数は、第2位の関数とともに岸沖漂砂を表すものと考えられたが、その検証は十分行うことはできなかった。最後に第4位の固有関数は、その時間関数の変化率が波向の変化率と対応しており、また固有関数は岸沖方向で符号が変化するために、波向変化に対応して生ずる岸沖漂砂であろうと考えられた。

次に、沿岸方向の地形測量データを解析したところ、波向変化に対して12週間遅れで生ずる c_1 に対応する地形変化が確かに存在することが確認された。

しかしながら自然海岸における外力の不規則性と、地形変動の不規則性によってデータは少なからずばらつきがみられるために、ここで述べた現象を一般的に記述するにはさらにデータを蓄積し、また解析する必要があることはいうまでもないであろう。

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事務所の調査課の方々に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) Johnson, J.W.: Scale effects in hydraulic model involving wave motion, Trans. A.G.U., Vol. 30, pp. 517~525, 1949.
- 2) Iwagaki, Y. and H. Noda: Laboratory study of scale effects in two-dimensional beach processes, Proc. 8th Conf. on Coastal Eng., pp. 194~210, 1962.
- 3) 堀川清司・砂村継夫・鬼頭平三：波による海浜変形に関する一考察，第20回海岸工学講演会論文集，pp. 357~363, 1973.
- 4) 堀川清司・砂村継夫・近藤浩右：波による二次元海浜変形に関する実験的研究，第21回海岸工学講演会論文集，pp. 193~199, 1974.
- 5) 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実験的研究，第22回海岸工学講演会論文集，pp. 329~334, 1975.
- 6) 尾崎 晃・渡辺 揺：波による二次元汀線変化の相似に関する実験的研究，第23回海岸工学講演会論文集，pp. 200~205, 1976.
- 7) 尾崎 晃・曳田信一：波による二次元汀線変化の相似に関する実験的研究(続)，第24回海岸工学講演会論文集，pp. 167~169, 1977.
- 8) Dean, R.G.: Heuristic models of sand transport in the surf zone, Proc. Conf. on Coastal Dynamics in the Surf Zone, Sydney, pp. 208~214, 1973.
- 9) 服部昌太郎・川又良一：砕波帯内の海浜地形変化，中央大学理工学部紀要，第20巻，pp. 95~117, 1977.
- 10) Swart, D.H.: Predictive equations regarding coastal transport, Proc. 15th Conf. on Coastal Eng., pp. 884~900, 1976.
- 11) Davis, R.A. and W.T. Fox: Coastal processes and nearshore sand bars, J. Sed. Pet., Vol. 42, pp. 401~412, 1972.
- 12) Greenwood, B. and R.G.D. Davidson-Arnott: Marine bars and nearshore sedimentary processes, Kouchibouguac Bay, New Brunswick, Canada, in "Nearshore Sediment Dynamics and Sedimentation" edited by J. Hails and A. Carr, John Wiles & Sons, London, pp. 123~150, 1975.
- 13) 橋本 宏・宇多高明：阿字ヶ浦における海浜過程(第1報)，第23回海岸工学講演会論文集，pp. 245~249, 1976.
- 14) 橋本 宏・宇多高明：阿字ヶ浦における海浜過程(第2報)，第24回海岸工学講演会論文集，pp. 216~220, 1977.
- 15) 橋本 宏・宇多高明：阿字ヶ浦における海浜過程(第3報)，第25回海岸工学講演会論文集，pp. 269~273, 1978.
- 16) Winant, C.D., D.L. Inman and C.E. Nordstrom: Description of seasonal beach changes using empirical eigenfunctions, J. Geophys. Res., Vol. 80, No. 15, pp. 1979~1986, 1975.
- 17) 富永正照・山口高志・須賀堯三・鶴木和夫・高橋 隆：久慈川河口水理模型実験報告書Ⅱ，土木研究所資料，第631号，1971.
- 18) 橋本 宏・宇多高明：経験的海浜変形モデルの小川原湖海岸への適用，第26回海岸工学講演会論文集，pp. 215~219, 1979.

(1979.9.21・受付)

