

# 沿岸砂州の長期変動特性と底質移動特性

栗山善昭<sup>1</sup>

<sup>1</sup>正会員 運輸省港湾技術研究所 海洋環境部漂砂研究室長 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

沿岸砂州(バー)の長期変動特性,ならびにその特性と底質移動特性との関係を検討するために,8年間の現地断面データを経験的固有関数法などを用いて解析した.現地断面データは鹿島灘に面する波崎海岸において後浜から外浜にかけてほぼ毎日観測されたものである.解析の結果,バーの頂部は約1年のサイクルで沖向きに移動すること,ただし各地点の岸沖漂砂は沖向き,岸向きに変動することが明らかとなった.さらに,このバーの移動に伴う岸沖漂砂の変動特性と外力である沖波のエネルギーフラックスとの関係を検討し,両者の関係を明らかにした.

*Key Words: longshore bar, cross-shore sediment transport, morphodynamics, empirical eigenfunction analysis*

## 1. はじめに

平成11年(1999年)に海岸法が改正され,土砂収支を考慮した広域の海岸管理が求められることとなった.土砂収支を考える範囲としては,沿岸方向には沿岸漂砂の連続する範囲,岸沖方向には砂丘の陸側端から水深20m程度までの範囲が考えられ(磯部<sup>1)</sup>),今後は,前浜の地形変化特性のみならずそれよりも沖の地形変化特性の把握も海岸管理上重要となってくる.

沖の地形変化は高波浪時の碎波位置から移動限界水深までの沖浜(通常,水深10m程度~20m程度まで)での地形変化とそれより岸側の外浜での地形変化とに大別できる.沖浜では主として吹送流による漂砂が生じるものの,地形変化量は外浜や汀線近傍に比べると小さい.一方,外浜では沿岸砂州(以下,バー)がしばしば形成され,地形変化量が汀線近傍や沖浜よりも大きく(Birkemeier<sup>2</sup>;加藤ら<sup>3)</sup>),活発な漂砂移動が生じている.

外浜の地形変化の海岸保全上の重要性は,山本・佐藤<sup>4)</sup>の実験によって示されている.彼らの実験によると,一樣勾配の海浜に暴浪波を作用させると汀線が後退しバーが形成され,続いて静穏波を作用させると汀線が前進した.しかし,暴浪波の作用直後にそれによって形成されたバーを削除すると静穏波を作用させても汀線が前進しなかった.以上の結果から,外浜の地形変化,なかでも外浜の地形変化を特徴づけるバーの変動特性を把握することは海岸保全

を考える上で重要であると言える.

バーの変動特性の把握は別な観点からも求められている.近年,アメリカやオーストラリアを中心として,より安価な養浜手法である沖合養浜が行われてきている.この工法は沖に養浜砂を投入するものであり,その砂が岸に移動するか,もしくは投入地点にとどまることを期待している.投入砂は浅瀬,すなわちバーを形成するため,養浜砂の移動を精度良く予測するためにはバーの移動特性を把握しておく必要がある.日本においても,今後,サンドバイパスやサンドリサイクルが頻繁に行われるようになってくると沖合養浜がコスト削減の方策として検討されるようになってくるとの思われ,バーの移動特性把握の重要性は高まるものと考えられる.

以上のように,近年,バーの海岸管理上の重要性に対する認識が高まりつつあるけれども,バーの研究そのものは古くから行われてきている(Komar<sup>5)</sup>).最近では,長期にわたって収集された深浅データ,ビデオ画像データを基にバーの長期変動特性が検討されてきており,アメリカやオランダ,ニュージーランドなどの海岸においてバーの長期的変動特性が明らかになってきている(Birkemeier<sup>2</sup>; Lippmann et al.<sup>6)</sup>; Ruessink and Kroon<sup>7</sup>; Wijnberg and Terwindt<sup>8)</sup>; Shand and Bailey<sup>9)</sup>).しかしながら,従来の研究はバー地形そのものの発達,移動,消滅に関するものが中心で,土砂収支を考える上で重要な底質の移動量とバーの移動との関係については不明な点が多い(Ruessink and Terwindt<sup>10)</sup>).

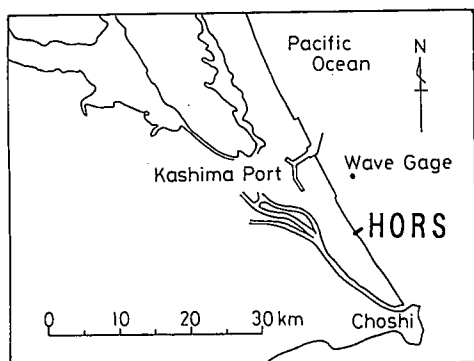


図-1 波崎海洋研究施設 (HORS) の位置

また、バーの移動特性あるいは底質の移動特性と外力との関係に関しては、短期的なバーの変動特性と外力との関係は多数調べられてきているものの (例えば, Sallenger et al.<sup>11)</sup>; Sallenger and Howd<sup>12)</sup>; Lippmann and Holman<sup>13)</sup>; Greenwood and Osborne<sup>14)</sup>; Larson and Kraus<sup>15)</sup>; Sunamura and Takeda<sup>16)</sup>; Larson and Kraus<sup>17)</sup>; 栗山<sup>18)</sup>; Thornton et al.<sup>19)</sup>; Plant and Holman<sup>20)</sup>; Gallagher et al.<sup>21)</sup>; Aagaard and Greenwood<sup>22)</sup>; Miller et al.<sup>23)</sup>), バーの長期変動と外力との関係に関してはバー頂部の移動と沖波波高との関係を検討したPlant et al.<sup>21)</sup>の研究と、断面形状と碎波率との関係を正準相関分析を用いて検討したLarson et al.<sup>23)</sup>の研究が見られる程度である。

そこで、本研究では、太平洋に面する波崎海岸で取得した砂丘海側法先から水深5m程度までの断面データを基にバーの移動特性を検討するとともに、それと底質移動や外力との関係を検討した。

## 2. 現地断面データの概要

解析では鹿島灘に面した波崎海岸に位置する波崎海洋研究施設 (Hazaki Oceanographical Research Station, 以下HORS) で取得した断面データを用いた。HORSは全長427mの現地観測用の栈橋で、その位置は図-1に示す通りである。HORSでは休日を除く1日1回、5m間隔で断面を測定している。陸上部はレベルとスタッフを用いて測量し、海域部は栈橋上から重さ約5kgのレッドを降ろして測量する。

図-2は、1987年1月5日～1994年12月28日までの平均断面と各地点における地盤高さの最大値と最小値 (上段)、および標準偏差 (下段) を示したものである。高さの基準は波崎港工事基準面 (T.P. -0.687m) であり、L.W.L., M.W.L., H.W.L. はそれぞれ-0.196m, 0.651m, 1.252mである。橋脚の位置と一致する測点では測量結果に橋脚周りの局所洗掘の影響が入るため (加藤ら<sup>3)</sup>), 地盤高さとして前後

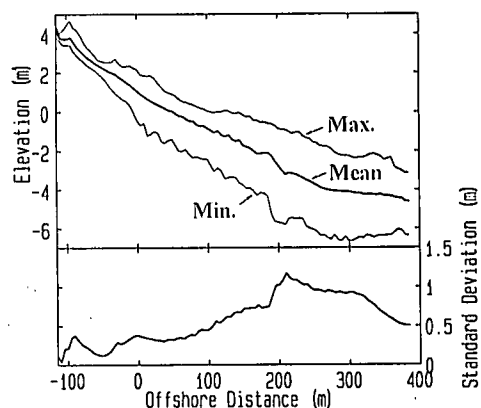


図-2 HORSにおける平均断面と地盤高さの標準偏差

の測点での値から内挿した値を用いた。

沖方向距離60m～200mの領域の平均海底勾配は約1/50であり、それより沖での海底勾配は約1/120である。標準偏差は沖方向距離20mの地点 (P20m, 以下、HORS沿いの地点はPに沖方向距離を付けて示す) から増大し、P210m付近でピークに達した後、次第に減少している。P180mより沖ではバーが移動を繰り返しており、波崎海岸はバー海岸に位置づけられる。

## 3. HORS周辺の地形の3次元性とHORSの橋脚の影響

HORSで得られた断面データを解析する前に、HORSにおける断面変動が周辺の地形変動をどの程度代表しているかをHORS周辺の地形の3次元性 (沿岸方向の非一様性) とHORSの橋脚の影響の観点から検討した。検討には、HORS建設工事の影響が小さくなったと思われる1986年11月から1998年8月までに行われた17回の深浅測量データを用いた。深浅測量は、年に1, 2回、HORSをはさむ沿岸方向600m, 岸沖方向には沖方向距離120m～600mの範囲で行われている。

図-3は深浅測量結果の一例を示したものである。

図-4は、HORS沿いの測線とHORSから沿岸方向プラス側、マイナス側にそれぞれ200m～300m離れた6本の測線 (測線間隔50m) における平均断面 (上段) と地盤高さの標準偏差 (下段) とを示したものである。まず、HORSから離れた領域に注目してみると、平均断面、地盤高さの標準偏差ともに各測線の値は良く一致しており、HORS周辺では地形の2次元性の高いこと、すなわち地形が沿岸方向に一様であることがわかる。次に、HORS沿いの値とHORSから離れた領域の値とを比較すると、HORS沿いの平均断面はP200m～P400mでHORSから離れた領域での平均断面に比べて深くなっている。また、HORS沿いの地盤高さの標準偏差は、やはりP200m～P400mで他の領域のそれに比べて大きくなっている。

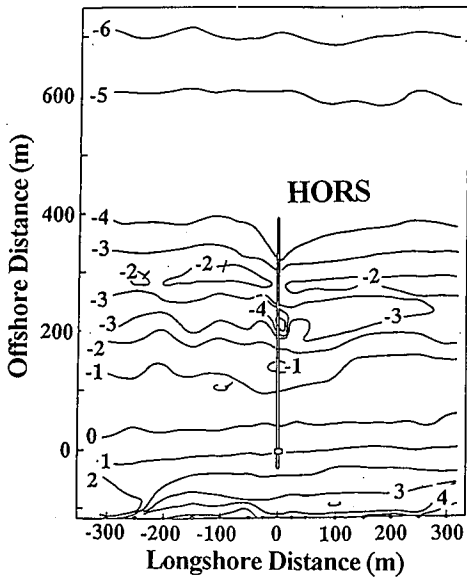


図-3 深浅測量結果の一例 (1989年3月31日)

これは、P200m~P400mでは水深が大きく荒天時に波高が大きくなるため、橋脚周辺で洗掘が起こったためであると推察される。

このように、HORS沿いの断面ではP200m~P400mにおいて橋脚の影響が現れており、平均断面が他の領域に比べて深く地形の変動量が大きい。しかしながら、地形の変動特性がHORS沿いとそれ以外の領域とで同じであれば、HORSで観測された断面データは、HORS周辺領域の地形変動の特性を調べるデータとして使えると考えられる。そこで、次に、バー海岸の地形の特徴を表すパラメーターとしてバー頂部とトラフ最深部の位置、地盤高さを取り上げ、HORS沿いとHORSから離れた領域の値を比較することにより、HORSの橋脚の影響をさらに検討した。

バー頂部およびトラフ最深部の位置は海底勾配を用いた以下の方法で求めた。まず、ある地点の勾配をその地点の前後30mの範囲のデータを用いて計算し、その勾配がゼロである地点をバー頂部あるいはトラフ最深部の位置の候補とする。続いて、バー頂部の地盤高さとしてそれより岸側のトラフ最深部の地盤高さの差(比高)を求め、その値がある値以上のものをバーおよびトラフと定義した。基準となる比高としては、HORS沿いの断面とHORSから離れた領域における地盤高さの標準偏差の違いを考慮してHORS沿いでは50cm、HORSから離れた領域では30cmとした。HORSより鹿鳴側(沿岸方向マイナス側)に200~300m離れた領域のバー頂部、トラフ最深部の位置は、その領域の3測線の平均断面に対して求め、HORSより銚子側(沿岸方向プラス側)の値も同様の方法で求めた。

図-5は、そのようにして求めたバー頂部の位置と地盤

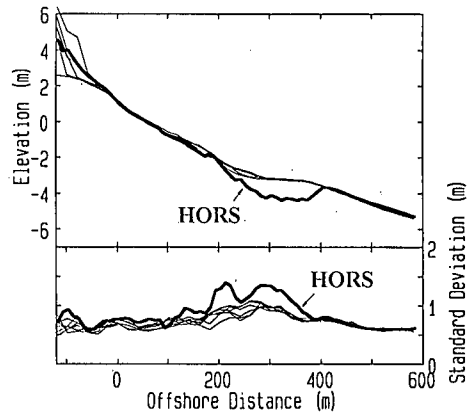


図-4 各測線における平均断面と地盤高さの標準偏差 (太い実線がHORS沿いの値を示している。)

高さ、トラフ最深部の位置と地盤高さのHORS沿いの値とHORSから離れた領域での値とを比較したものである。

まず、バー頂部(図-5(1))に注目すると、P200mよりも沖側では、位置(左図)、地盤高さ(右図)ともに3地域で一致する。なお、図面には示されていないけれども、P200mよりも岸側では、HORS沿いでのみバーが認められるケースが多く、これは、P160m付近で2本の橋脚が存在することにより小規模の洗掘が生じ、洗掘された土砂がP180m付近に堆積した結果であると考えられた。ただし、このような時は、HORS以外の領域でもバーまでは発達していないもののP180m付近は堆積領域となっており、HORS沿いの断面はHORSから離れた領域の断面と大きな差はなかった。これらのことから、バー頂部周辺では地形が沿岸方向に一樣で、橋脚の影響も小さいと言える。

次に、トラフ最深部(図-5(2))に注目してみると、地盤高さはHORS沿いの方が深くなっている(右図)。地盤高さの標準偏差がHORS沿いで大きくなる結果(図-4)は、この影響を受けたためであると考えられる。このように、地盤高さはHORS沿いで深くなるものの、位置はHORS沿いとHORSから離れた領域とでほぼ一致している(左図)。したがって、トラフ領域の地形は、HORS近傍でやや深くなるものの、位置は沿岸方向にほぼ一樣であると言える。

以上の検討より、(a)HORS周辺では地形は沿岸方向にほぼ一樣であること、(b)HORSの橋脚の断面形状に対する影響はバー領域ではそれほど顕著ではないこと、(c)トラフ領域では、橋脚の影響によって地盤高さがHORS沿いでより深くなるものの、トラフ最深部の位置は橋脚の影響は受けておらず沿岸方向にほぼ一樣であること、が明らかとなった。これらの結果より、HORSで観測された断面はバー、トラフの移動を中心としたHORS周辺海岸における断面変化の解析に使用できると判断した。

栈橋の橋脚群が地形変化に与える影響は、 Miller et

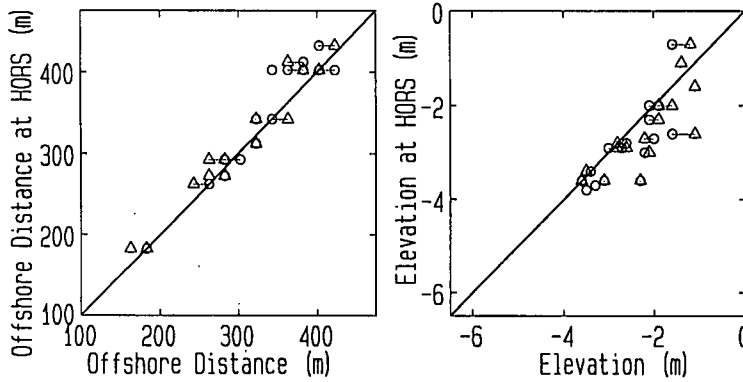


図-5(1) バー頂部の位置および地盤高さ。(○印が鹿嶋側の値、△印が銚子側の値を示しており、細い実線は同時期に観測された値を結んでいる。)

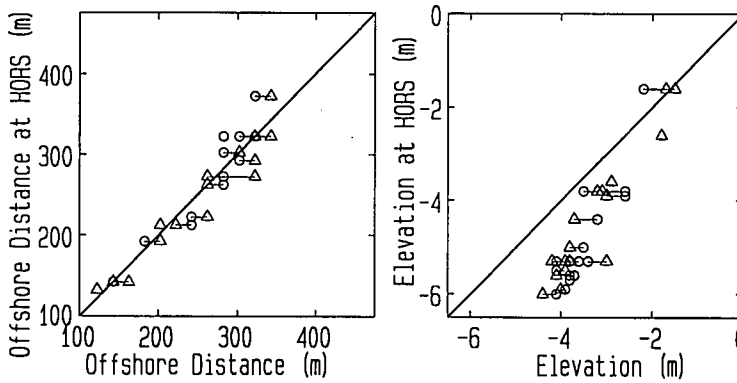


図-5(2) トラフ最深部の位置および地盤高さ(凡例は図-5(1)と同じ)

al.<sup>20)</sup>によっても検討されている。彼らは、アメリカ東海岸に建設されたHORSと同様な観測栈橋(Field Research Facility, FRF, 全長561m)で観測された断面変化と栈橋から450m離れた測線での断面変化に対して経験的固有関数法を適用した。その結果、バーの移動を表すモードの時間関数が栈橋沿いと栈橋から離れた領域とでほぼ同じ変化をすることからFRFで観測された断面は当該海岸のバーの移動を表していると結論づけた。FRFが2本平行に並んだ橋脚群で支えられているのと異なり、HORSは基本的には1本の橋脚群で支えられており、橋脚の洗掘を受けにくい構造となっている。FRFの橋脚群でもバー移動などの地形変化を乱していないことを考えると、HORSの断面が地形変化特性把握の解析に使えることは妥当であると言える。

#### 4. 解析結果

##### (1) バーの長期移動特性

図-6は、1987年～1994年にかけてHORSで観測された地

盤高さの平均断面からの変動量の時空間分布を示したものである。堆積領域が白色で、侵食領域が灰色で表されている。図より、P150mより岸側では堆積域と侵食域が交互に現れるのに対して、沖側では約1年の周期で堆積域、侵食域が沖へ移動していることがうかがえる。

そこで、沖側と岸側に見られる断面変化の周期の違いを調べるために、沖側の地形変化を代表する地点としてP300m、岸側の地形変化を代表する地点としてP0mを選び、それぞれの地点における地盤高さの変動のスペクトル解析を行った。図-7はその解析結果を示したもので、岸側では300日～500日にかけての幅広いピークの他に190日の所に鋭いピークが現れているのに対して、沖側ではこの190日のピークに加えて約1年の所により大きなピークが現れている。

続いて、沖側領域における1年周期の地形変化の特徴をより明確に把握するためにバー頂部位置の経時変化を調べ、図-8に示した。バー頂部位置の定義は前節と同様である。P200mよりも沖側で特に1987年から1992年にかけて周期的なバーの移動が見られる。すなわち、P180m付近で発生し

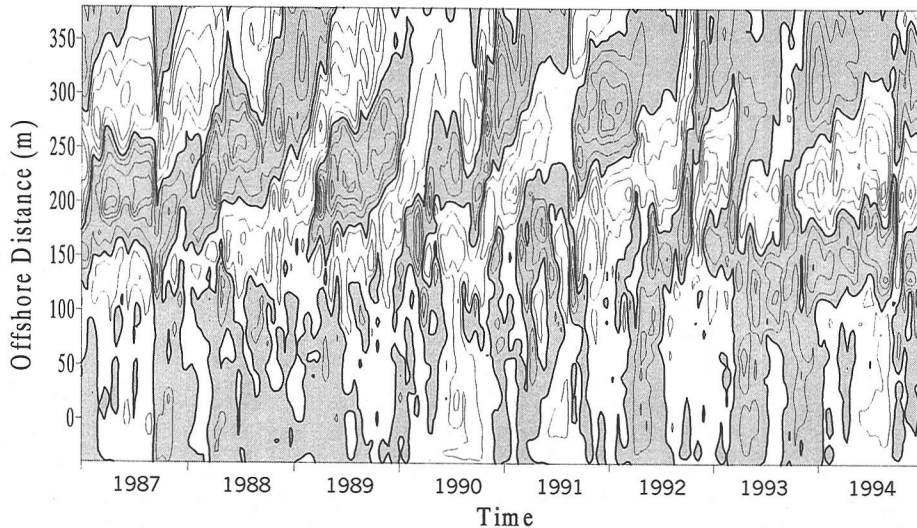


図-6 平均断面からの変動量の時空間分布 (堆積領域は白色で、侵食領域は灰色で表されている。コンター線の間隔は0.5mである。)

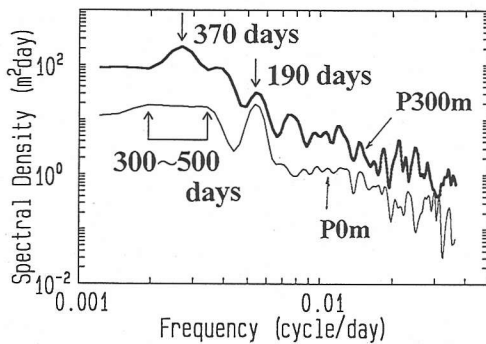


図-7 地盤高さの変動のスペクトル解析結果

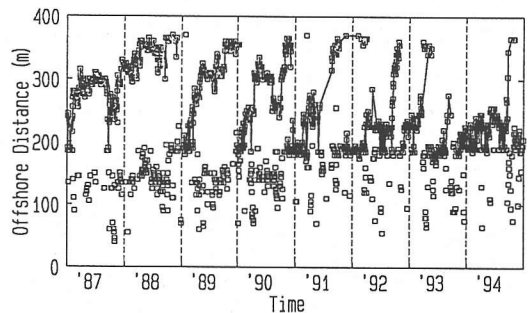


図-8 バー頂部位置の経時変化

たバーの頂部がしたいに沖へ移動し、約1年でHORS先端に達する。バーがHORS先端に達するのとほぼ同じ時期に、P180m付近に新たなバーが形成され、沖へ移動し始める。

このようなバーの周期的な沖向き移動は多段バーが形成されているオランダ、アメリカ、ニュージーランドの海岸でも観測されている (Birkemeier<sup>2)</sup>; Lippmann et al.<sup>6)</sup>; Ruessink and Kroon<sup>7)</sup>; Wijnberg and Terwindt<sup>8)</sup>; Shand and Bailey<sup>9)</sup>)。Shand et al.<sup>27)</sup>はこれらの海岸のバーの沖向き移動の周期を一つのバーが沖向きに移動している時間 (継続時間) と前のバーの沖向き移動と次のバーの沖向き移動との間隔 (再現期間) とに分けて整理した。すると、ほとんどの海岸において沖向き移動の継続時間は再現期間よりも大きかった。

波崎海岸では、バーがHORS先端に達すると同時にP180m付近に新たなバーが生じている。深淺図を整理した図-5

(1)からわかるように、P450mよりも沖にはバーが存在しないことから、HORS先端に達したバーは、その後短時間のうちにやや沖へ移動して消滅すると考えられる。よって、波崎海岸では、バーの沖向き移動の継続時間と再現期間とはほぼ一致すると言える。

波崎海岸で観測された1年の周期は、再現期間としてみると、Shand et al.<sup>27)</sup>に示されているオランダ海岸における4~15年の周期やアメリカ東海岸、Duckにおける3~6年の周期に比べると短く、ニュージーランド西海岸、Wanganuiにおける1年強の周期とはほぼ同程度である。また、バーの沖向き移動の継続時間としてみると、波崎海岸の1年の周期はオランダ海岸の6~20年、アメリカ東海岸の約4年、ニュージーランド西海岸の2~5年より短い。

Shand et al.<sup>27)</sup>はオランダ海岸、アメリカ東海岸、ニュージーランド西海岸のバーの沖向き移動の継続時間と前浜、

表-1 各海岸におけるバーの移動特性と地形、波浪特性

海岸名	バーの沖向き移動の継続時間 (年)	外浜勾配	前浜勾配	平均波高 (m)	平均周期 (s)	荒天時の波高 (m)
オランダ海岸	6~20	0.004~0.008	0.015~0.02	1.35	6.0	4.1~4.3
Duck, アメリカ東海岸	4	0.0097	0.052~0.060	1.10	6.4	3.05
Wanganui, ニュージーランド西海岸	2~5	0.0083~0.0092	0.029~0.031	1.20	7.8	3.20
波崎海岸	1	0.008	0.02	1.37	8.0	4.36

外浜の海底勾配や年平均の有義波高などとの関係を検討し、外浜の海底勾配が緩やかなほどバー沖向き移動の継続時間が長くなることを示した。その原因として、彼らは、海底勾配が緩やかなほど大きな波がその海岸に来襲しており、その結果大きなバーが形成され、大きなバーは移動に時間がかかるためであると考えた。

表-1は、Shand and Bailey<sup>9)</sup>、Shand et al.<sup>27)</sup>を参考に作成した各海岸におけるバーの沖向き移動の継続時間と前浜、外浜の海底勾配、日平均の有義波高を基に計算した年平均の有義波高・周期と超過確率1%の有義波高として定義した荒天時の波高を示したものである。外浜勾配はオランダ海岸の方が波崎海岸よりも緩やかで、バーの沖向き移動の継続時間はオランダ海岸の方が波崎海岸よりも長い。この結果は、外浜の海底勾配が緩やかなほどバー沖向き移動の継続時間が長くなるShand et al.<sup>27)</sup>らの結果と一致している。海底勾配が緩やかなほどバーの沖向き移動の継続時間が長くなる原因としては、前述のShand et al.<sup>27)</sup>の仮説の他に、海底勾配が緩やかなほどバーの移動する距離が長くなり、よってバーの形成地点から消滅地点までの移動に時間がかかることも考えられる。さらに、オランダ海岸では多段のバーが形成されているので岸側のバーに作用する波は沖のバーによって減衰し小さくなっている。これによってバーの移動速度が小さくなったこともバー移動の継続時間が長くなった原因の一つと考えられる。

このように、オランダ海岸と波崎海岸におけるバーの沖向き移動の継続時間の違いは海底勾配の違いで説明できるけれども、波崎海岸とアメリカ東海岸、ニュージーランド西海岸との違いは海底勾配では説明できない。海底勾配を考えると波崎海岸のバーの沖向き移動の継続時間の方がアメリカ東海岸やニュージーランド西海岸のそれより長くなりそうである。これについては、より詳細な検討が必要であり、今後の検討課題としたい。

## (2) 経験的固有関数法による断面変化特性の検討

次に、この断面変化に対して経験的固有関数法を適用し、バーの移動に伴う地形変動を抽出することを試みた。経験的固有関数法は、断面変化をいくつかの地形変化に分離す

ることを目的として、Winant et al.<sup>28)</sup>、Aubey<sup>29)</sup>、橋本・宇多<sup>30)</sup>、加藤ら<sup>31)</sup>、加藤・吉松<sup>32)</sup>、Birkemeir<sup>22)</sup>、Wijnberg and Terwindt<sup>33)</sup>などによって地形変化解析に用いられている。図-9(1)~(3)はそれぞれモード1~3の固有関数と時間関数を示したものである。寄与率はモード1から順に、42%、28%、8%である。モード1、2の固有関数 $e_1$ 、 $e_2$ はP150m付近より沖側で大きくなっているのに対して、モード3の固有関数 $e_3$ はP0m付近の前浜でも大きい。よって、モード1、2で表される断面変化は主として沖側の地形変化を表しており、モード3は岸側の地形変化を表していると考えられる。図-10は各地点の地盤高さ変動に対するモード1~3の寄与率(各モードで表される各地点の地盤高さ変動の2乗平均値を、実測された各地点の地盤高さの変動の2乗平均値で割った値)を示したもので、この図からもモード1、2が沖の地形変化を表しているのに対して、モード3が岸の地形変化を表していることがわかる。前浜におけるモード3の各地点毎の寄与率は50%以下であるけれども、モード3の時間関数 $C_3$ とH.W.L.における汀線位置の平均(沖方向距離8.2m)からの変動量との相関を示した図-11からわかるようにモード3は前浜の地形変化を代表していると言える。

続いて、モード1とモード2の固有関数と時間関数とを比較した。固有関数に関しては $e_1$ と $e_2$ と1/4波長ずれていることが図-9(1)、(2)より見てとれる。一方、時間関数に関しては、モード1、2の時間関数 $C_1$ 、 $C_2$ のクロススペクトル結果を示した図-12より、両者が $\pi/2$ ずれていることがわかる。このように経験的固有関数法において固有関数および時間関数がそれぞれ1/4波長ずつずれている2つのモードの重ね合わせが進行波モードの変動を表現することはWijnberg and Wolf<sup>34)</sup>や北野ら<sup>35)</sup>に示されている。HORSにおいても、モード1とモード2とを再合成して得られた断面変化(図-13)から明らかのように、モード1とモード2とを重ね合わせた断面変化はP180mより沖側のバーの沖向き移動による進行波モードの断面変化を示している。

前述したように、経験的固有関数法は断面変化の解析に多く用いられてきたけれども、今回のようにバーの移動に代表される外浜の地形変化と前浜の地形変化とが分離され

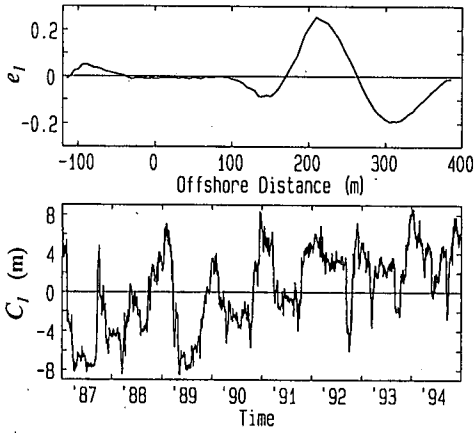


図-9 (1) モード1の固有関数 $e_1$ と時間関数 $C_1$

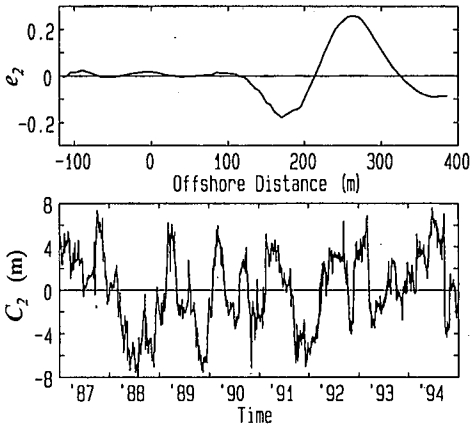


図-9 (2) モード2の固有関数 $e_2$ と時間関数 $C_2$

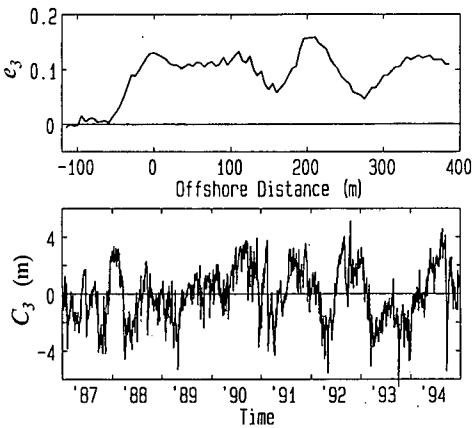


図-9 (3) モード3の固有関数 $e_3$ と時間関数 $C_3$

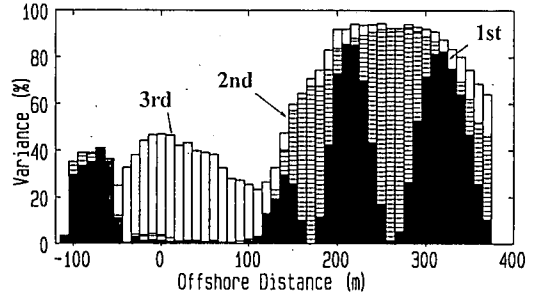


図-10 各地点毎のモード1~3の寄与率

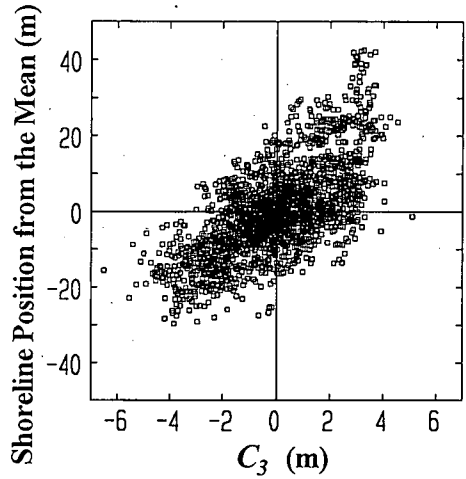


図-11  $C_3$ と汀線位置の平均からの変動量との比較

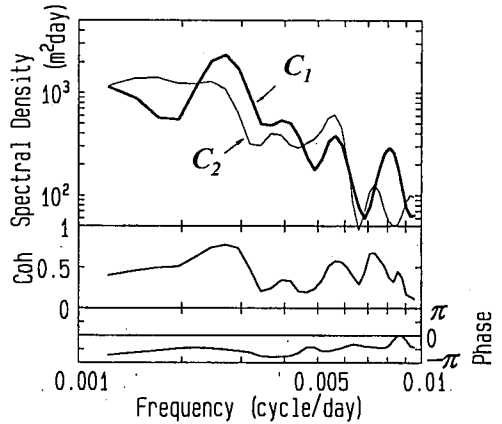


図-12  $C_1$ と $C_2$ とのクロススペクトル解析結果

た例は今までにはほとんどない。Birkemeir<sup>29</sup>が示したアメリカ東海岸、Duckでの断面変化に対する経験的固有関数法の結果は、今回の結果同様にモード3が主として前浜の地形

変化を表しているように見えるけれども、前浜とバーが形成される外浜との間隔が狭いために、両者の区別が明瞭ではなかった。

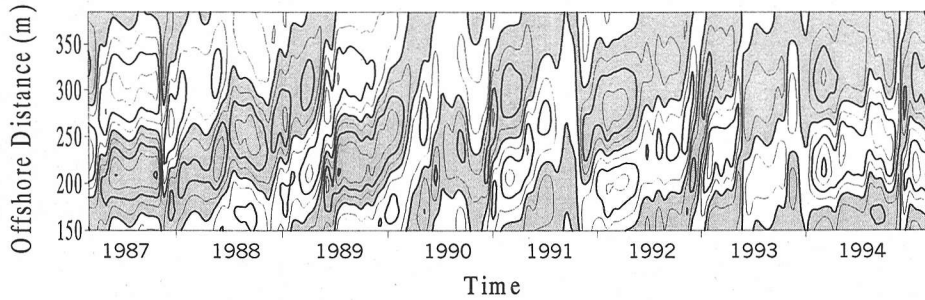


図-13 モード1とモード2を再合成して得られた地形変化(堆積領域は白色で、侵食領域は灰色で表されている。コンター線の間隔は0.5mであり、太いコンター線の間隔は1mである。)

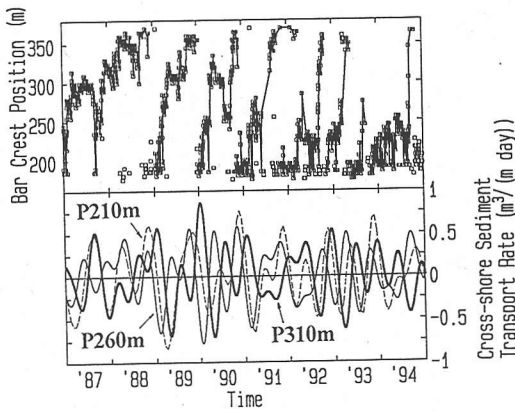


図-14 バーの頂部位置と岸沖漂砂量の長周期成分の経時変化

外浜におけるバーの移動と前浜の地形変化とが違うモードに現れたということは、両者が互いに独立している、すなわち前浜の変動とバーの移動との相関が小さいことを示唆していると言える。しかしながら、バーが汀線変化に影響を与えている結果が、Takeda and Sunamura<sup>35)</sup>、武田<sup>36)</sup>、Stive et al.<sup>37)</sup>、山本・佐藤<sup>3)</sup>によって示されており、波崎海岸におけるバーの移動と前浜の地形変化との関係を明らかにするためには、さらに詳細な検討が必要であると考える。

### (3) バーの移動特性と底質の移動特性との関係

次に、バーの長期的移動特性と底質のそれとの関係を調べるために、バー頂部の位置の経時変化と代表地点における岸沖漂砂量とを比較した。図-14はその結果を示したもので、上段はバー頂部位置の経時変化を示しており、下段はP210m、P260m、P310mにおける岸向きを正としたときの漂砂量の長周期成分(0.006 cycle/day以下、160日以上)を示している。岸沖漂砂量は、(a)断面変化に及ぼす沿岸

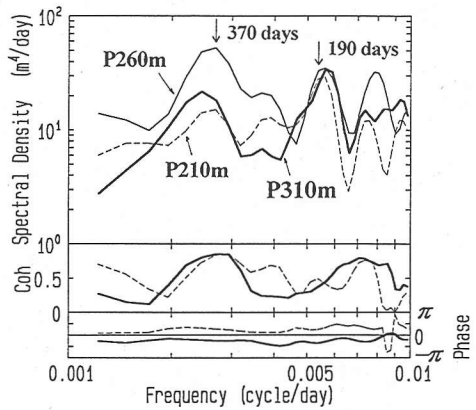


図-15 P260mとP210mの岸沖漂砂量のクロススペクトル結果とP260mとP310mの岸沖漂砂量のクロススペクトル結果(コヒーレンスとフェイズにおける細い破線がP260mとP210mとの結果、太い実線がP260mとP310mとの結果)

漂砂の影響が無視でき、(b) 測量範囲の陸上端P-115mが砂丘海側法先に位置していることからP-117.5mにおいて岸沖漂砂量が0である、と仮定し、バー移動に関わる地形変動成分である経験的固有関数のモード1成分とモード2成分とを再合成して得られる断面変化より求めた。なお、空隙率は0.4とした。

バー頂部は基本的には沖方向へ移動するのに対して、岸沖漂砂量(以下、単に漂砂量とする)は岸向き、沖向きに変動しており、また、位相は各地点でずれている。P260mの漂砂量とP210mのそれとのクロススペクトル結果、ならびにP260mの漂砂量とP310mのそれとのクロススペクトル結果を示した図-15より、漂砂量変動では1年と6ヶ月の周期の変動成分が大きく、また、P260mでの漂砂量変動を基準とするとP210mでの漂砂量変動は $\pi/4 \sim \pi/2$ 早く、P310mでの変動は $\pi/4 \sim \pi/2$ 遅くなっていることがわかる。



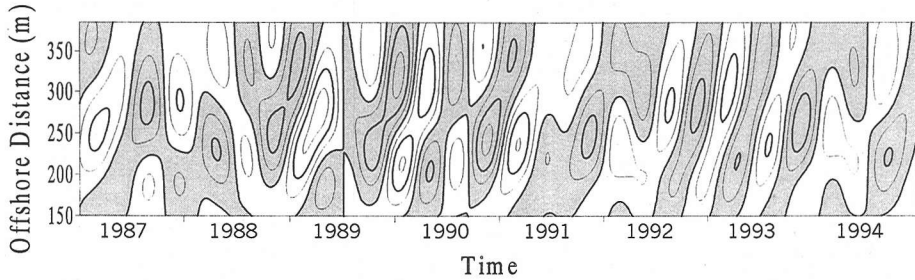


図-16 岸沖漂砂量の長周期成分の時空間分布 (沖向き漂砂は白色で、岸向き漂砂は灰色で表されている。コンター線の間隔は $0.25\text{m}^3/(\text{m day})$ であり、太いコンター線の間隔は $0.5\text{m}^3/(\text{m day})$ である。)

図-16は前述の方法で求めたP150mよりも沖の漂砂量の長周期変動成分の時空間分布を示したものである(岸向き漂砂が灰色で表されている)。この図から漂砂量は図-13に示されている断面変動と同様な変動特性を持っていることがわかる。すなわち、バー領域(図-13の白い領域)が沖に移動するにつれて、沖向き漂砂の領域(図-16の白い領域)が沖に移動し、トラフ領域が沖に移動するにつれて岸向き漂砂の領域が沖に移動している。

そこで、漂砂量変動と断面変化との関係を詳細に検討するために、1989年を例にとりて漂砂量の長周期成分と断面とを比較した。図-17(a)はバー頂部の沖向き移動の前半における断面変化(下段)と上記の方法で求めた漂砂量の長周期成分の断面測定日における岸沖分布(上段)を示しており、(b)はバー頂部の沖向き移動の後半におけるそれらを示している。バー頂部で一時的に岸向き漂砂が生じている場合がある(8月、(b))けれども、基本的にはバー領域では沖向き漂砂が、トラフ領域では岸向き漂砂が生じている。バー頂部の沖向き漂砂はバーの沖向き移動を引き起こしており、トラフ領域における岸向き漂砂は次のバー形成に寄与していると考えられる。また、図-14, 15で見られた各地点での漂砂量変動の位相のずれは地盤高さの変動の位相のずれによって生じたものと解釈することができる。

従来の研究ではバー頂部の移動、すなわち形状の変化に注目が集まっており、底質移動に関しては新たに形成されるバーを構成する底質の供給源など不明な点が多かった(Ruessink and Terwindt<sup>(4)</sup>)。しかし、本検討によって、バーの長期変動に伴う底質移動の特性が明らかになるとともに、バー頂部の移動と底質移動との関係が明らかとなった。

図-17より見てとれるバー頂部の沖向き移動時の断面変化の特徴の一つとして、バーの沖向き移動の前半ではバーが発達するのに対して、後半ではバーが小さくなることを挙げることができる。図-18はバーの発達具合を示したもので、バーの位置毎のバーの比高の平均値を示している。

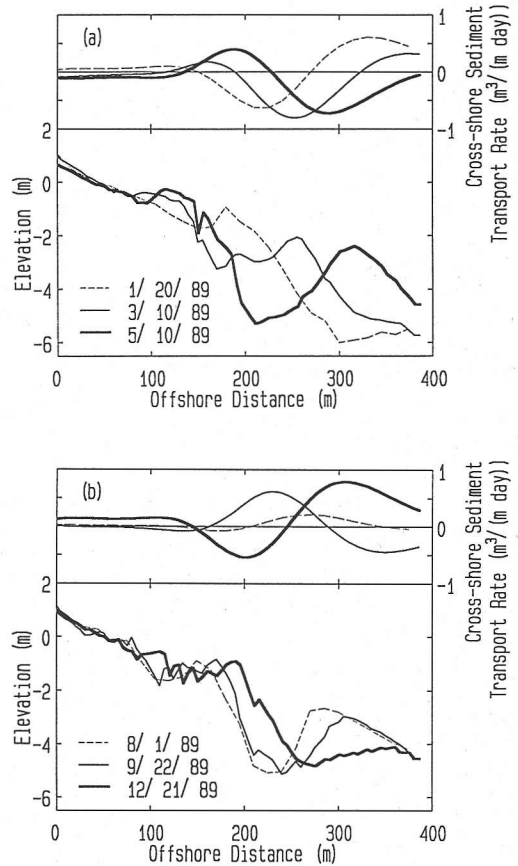


図-17 断面変化と岸沖漂砂量の長周期成分

なお、ここでは、バー頂部の地盤高さとトラフ最深部の地盤高さとの差で定義される比高を扱うため、バー頂部とトラフ最深部の中間地点をバーの位置と定義した。バーはP200m付近から徐々に発達し、P250m付近でピークを迎えた後減衰している。この原因としては、P250mよりも沖と岸における漂砂量の大きさの違いが考えられる。そこで、あ

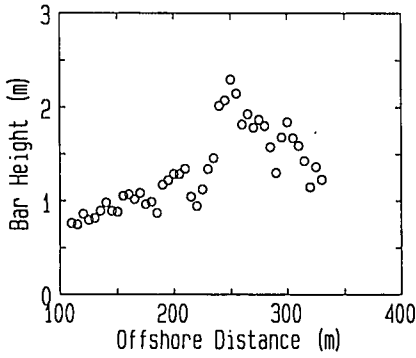


図-18 バーの比高の岸沖分布

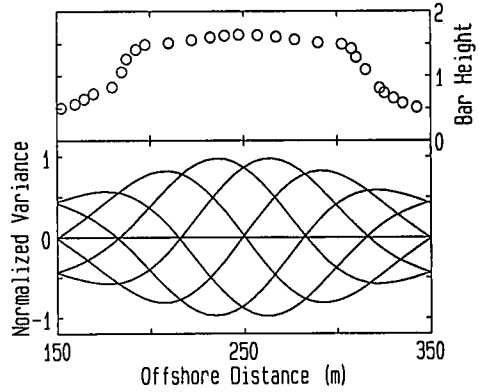


図-20 バーの発達・減衰の計算結果

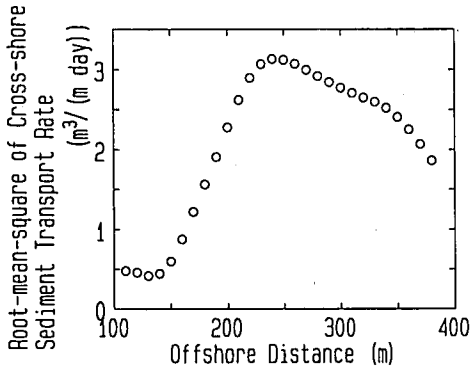


図-19 岸沖漂砂量の二乗平均値 $Q$ の岸沖分布

る地点における岸沖漂砂量の大きさを示す指標として漂砂量の二乗平均値 $Q$ をとりあげ、その岸沖分布を図-19に示した。なお、漂砂量は先ほどと同様にモード1とモード2とを再合成して得られた断面変化を基に求めた。 $Q_i$ はP150mからP250mにかけて急激に増大し、その後、P350m付近までは徐々に、それより沖はやや大きく減少している。この岸沖分布特性はバーの大きさの岸沖分布特性とよく一致している。このことから、P250mまでは漂砂量が沖へ向かうほど大きくなるためバーが発達し、一方、P250mより沖では漂砂量が沖へ向かうほど小さくなるためバーは徐々に小さくなったと考えられる。

そこで、この漂砂量の岸沖分布形とバーの発達との関係を簡単なモデルで検討してみる。岸沖漂砂量の変動量はP150m付近で小さく、P250m付近で最大となり、それより沖では減衰することから(図-19)、岸沖漂砂量変動の振幅はP150mとP350mとで0、P250mで最大となる三角関数で近似できると仮定する。さらに、(a)岸沖漂砂量変動の周期は1年(365日)であり、(b)この変動は沖方向に一定の波速で伝わり、(c)図-17より波長は200mである、と仮定すると、岸沖漂砂量変動は式(1)で表わされる。

$$Q(x,t) = A \sin(k_2 x') \sin(k_1 x' - \sigma t) \quad (1)$$

ただし、 $Q(x,t)$ は岸向き漂砂量、 $x$ は沖方向距離(m)、 $t$ は時間(日)、 $A$ は定数、 $k_2 (=2\pi/L_2)$ 、 $L_2$ は岸沖漂砂量変動の振幅の波長(=400m)、 $x' = x - 150$ 、 $k_1 (=2\pi/L_1)$ 、 $L_1$ は岸沖漂砂量変動の波長(=200m)、 $\sigma$ は角周波数(=2 $\pi$ /T)、Tは岸沖漂砂量変動の周期(=365日)である。

地盤高さを $z(x,t)$ とすると、 $\partial z / \partial t = \partial Q / \partial x$ なので、 $z = \int \partial Q / \partial x dt$ となり、 $z$ は次式で表されることになる。

$$z(x,t) = \frac{A}{\sigma} \sqrt{A_1^2 + A_2^2} \sin(k_1 x' - \sigma t + \alpha),$$

$$A_1 = k_2 \cos k_2 x', \quad A_2 = -k_1 \sin k_2 x', \quad (2)$$

$$\alpha = \tan^{-1}(A_1 / A_2)$$

図-20の下段は式(2)より求められた断面変動(平均値からの変動)を示したもので、図中の変動はP250mでの最大値で無次元化してある。図-20の上段はバー頂部とトラフ最深部の中間地点をバーの位置と定義したときのバーの比高を表している。ただし、トラフ最深部と計算範囲の沖側端であるP350mとの間にバー頂部が存在しない場合にはバー頂部の位置がP350m地点でバー頂部の地盤高さは0とした。また、逆に、バー頂部と計算範囲の岸側端であるP150mとの間にトラフ最深部が存在しない場合には、トラフ最深部の位置がP150m地点でトラフ最深部の地盤高さは0とした。図より、バーはP150mからP250mにかけて発達し、やがて減衰していることが見てとれる。これによって、P250mを境とするバーの発達・減衰がP250mにピークを持つ岸沖漂砂量によって生じていることが裏付けられた。

#### (4) 底質移動の季節変動と外力の季節変動との関係

続いて、底質移動と外力との関係を検討した。まず、底質の移動方向を考慮せずに漂砂量の大きさそのもの(スカラー量)と外力との関係を検討した。P150mより沖側の漂

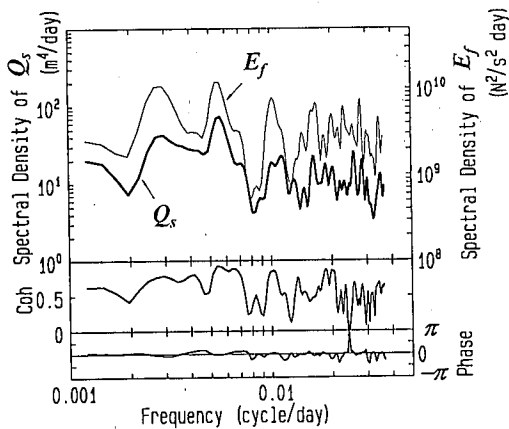


図-21  $Q_s$ と $E_f$ とのクロススペクトル解析結果

砂量の大きさを示す指標として、各地点の漂砂量の二乗値のP150m~P380mの空間平均値 $Q$ を選び、外力として式(3)で表される沖波のエネルギーフラックス $E_f$ を選んだ。漂砂量は今までと同様モード1とモード2とを再合成して得られた地形変化を基に求めたものであり、沖波の諸元は鹿島港沖の水深約23mの地点(図-1)において2時間間隔で20分間得られた波浪データを基に求めたものである。

$$E_f = \frac{1}{8} \rho g H^2 C_g \quad (3)$$

ただし、 $\rho$ は海水の密度、 $g$ は重力加速度、 $H$ は沖波有義波高、 $C_g$ は群速度である。

図-21は両者のスペクトル解析の結果を示したものであり、この図から両者の相関は高く、しかも位相差が0に近いことがわかる。この結果は、沖波が大きいほど漂砂量が大きかったことを示している。

次に、移動方向も考慮して底質移動と外力との関係を検討した。図-22の中段は、P210m、P260m、P310mにおける漂砂量の周波数0.006 cycle/day以下(周期160日以上)の変動(図-14)を基に求めた3地点における漂砂量の長周期成分の季節変動を示したものである(岸向きが正)。季節変動は8年間の変動を平均して求めた。下段には同様の方法で求めた $E_f$ の長周期成分の季節変動を、上段には3地点の地盤高さの長周期成分の季節変動を示した。

沖波のエネルギーフラックス $E_f$ は冬から春にかけての低気圧が頻繁に襲来するシーズンと秋の台風シーズンに増大し、夏に非常に小さくなっている。3地点の岸沖漂砂は、冬から春にかけては主として沖向きとなっており、この沖向き漂砂のピークは次第に沖へと移動している。夏になると漂砂量が一旦小さくなり、やがて秋になると3地点の岸沖漂砂は今度は主として岸向き漂砂となり、岸向き漂砂のピークは沖向き漂砂のピークと同様次第に沖へと移動して

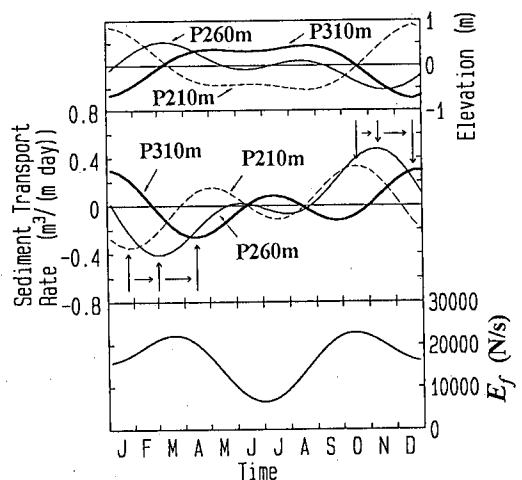


図-22 P210m、P260m、P310mの岸沖漂砂量の季節変動と $E_f$ および3地点の地盤高さの季節変動

いる。

このような漂砂の変動特性の生じた原因としては、冬から春にかけてはバー頂部がこれらの地点を沖向きに通過し、秋にはトラフ領域が通過したことが考えられる。図-22に示されているように、沖向き漂砂のピークの沖向き移動ならびに岸向き漂砂のピークの沖向き移動(中段)は、バー頂部、トラフ領域の移動(上段)とはほぼ連動している。

地形変動と漂砂量変動との以上の関係は図-13と図-16との比較からも見てとれる。冬から春にかけてはバー領域(図-13の白い領域)が沖に移動するにつれて、沖向き漂砂の領域(図-16の白い領域)が沖に移動し、秋にはトラフ領域が沖に移動するにつれて岸向き漂砂の領域が沖に移動している。さらに、両図ではP250mを中心とする領域でコンターの山、谷が多く存在しており、この領域で漂砂量が大きくなるとともにバーが発達している様子がこれらの図からもうかがえる。

### (5) 波崎海岸におけるバーおよび底質の移動特性のまとめ

これまでの検討結果を基に、波崎海岸におけるバーの移動特性と岸沖漂砂の変動特性をまとめると以下のようになる。

- ① バー頂部は、約1年のサイクルでP180mから沖向きに移動する。
- ② バーは沖向き移動の前半において、すなわちP250m付近までは発達し、沖向き移動の後半となるP250m付近より沖で減衰する。
- ③ バー頂部周辺では沖向き漂砂が生じ、トラフ領域では岸向き漂砂が生ずる。
- ④ 各地点における岸沖漂砂の変動量は、P150m付近から

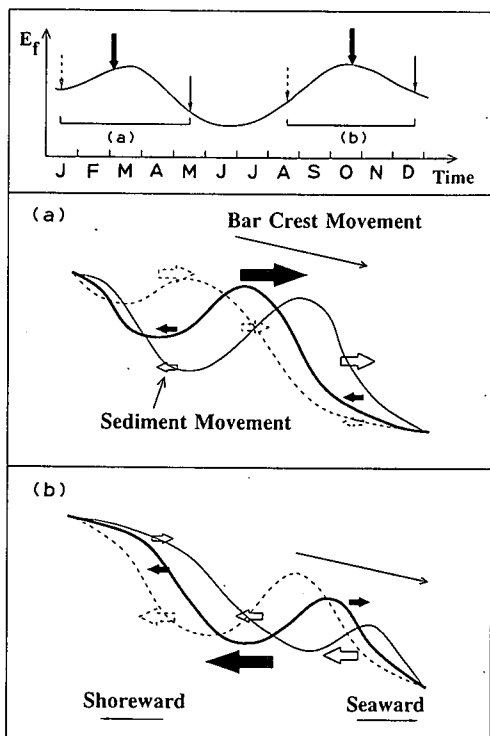


図-23 バー頂部の移動と底質移動との関係を示す模式図  
(中段はバー頂部の沖向き移動の前半, 下段は後半)

沖に向けて急激に増大し、P250m付近で最大となり、そこから沖へは次第に減少する。

⑤ 各時刻におけるP150mよりも沖の岸沖漂砂量の大きさ(絶対値)の平均は、沖波のエネルギーフラックスと相関が強く、両者の位相差は0である。すなわち、沖波が大きくなると岸沖漂砂量も大きくなる。

⑥ 沖波は冬から春にかけてと秋に大きく、夏に非常に小さい。漂砂量が大きくバーが発達するP250mを中心とする領域では、冬から春にかけては沖向き漂砂が大きくなるとともにバーが発達しながら沖へ移動する。夏には漂砂量、地形変動量ともに小さくなるものの、秋には岸向き漂砂量が大きくなりトラフ領域が通過する。

図-23はこれらのバーの移動特性と底質の移動特性を模式的に示したものである。図の中段がバー頂部の沖向き移動の前半(冬から春にかけて)の特性を示しており、下段が沖向き移動の後半(秋から冬にかけて)の特性を示している。上段は、沖波のエネルギーフラックスを示しており、矢印はそれぞれ下の断面が形成された時期を示している。断面の線種と底質移動を示す矢印、および $E_f$ の図面の矢印の線種はそれぞれ対応しており、例えば、破線の矢印は破線の断面に対応している。

## 5. おわりに

本論文では、波崎海洋研究施設(HORS)において休日を除く1日1回観測された後浜から外浜にかけての1987年～1994年の断面データを基に、バーの移動特性、ならびにその特性と底質移動、外力との関係を検討した。検討にあたっては、まず、波崎海洋研究施設の橋脚が地形に与える影響を調べた。その結果、HORSで観測された断面はトラフ領域で橋脚の影響を受けるものの、バー、トラフの移動に代表される外浜の地形変化はHORSの橋脚で乱されていないことが明らかとなった。そこで、HORSの断面データを用いて上記項目の検討を行った。その結果、明らかになった結論は以下の通りである。

(1) 波崎海岸の外浜におけるバーの頂部は、約1年のサイクルで沖方向距離180mの地点(P180m、平均脚面の平均潮位時の汀線位置から約170m沖の地点)付近から沖向きに移動する。バー頂部の沖向き移動の前半ではバーは発達し、後半では減衰する。

波崎海岸におけるバー頂部の沖向き移動の1年の周期は、再現期間としてみると他の海岸での値とほぼ同じかもしくは小さく、継続時間としてみると他の海岸での値よりも小さい。

(2) バー頂部は一方(沖方向)へ移動するのに対して、各地点の岸沖漂砂は沖向き、岸向きに変動している。沖向き漂砂はバー頂部付近で生じ、岸向き漂砂はトラフ領域で生じている。バー頂部の沖向き漂砂はバー頂部の沖向き移動を引き起こし、トラフ領域における岸向き漂砂は次のバー形成に寄与していると考えられる。

(3) 各地点における岸沖漂砂の変動量は、P150m付近から沖に向けて急激に増大し、P250m付近で最大となり、そこから沖へは次第に減少している。岸沖漂砂量のこの岸沖分布がバーの発達・減衰を引き起こしている。

季節変動を見てみると、P250mを中心とする領域では、冬から春にかけては沖向き漂砂が大きくなるとともにバーが発達しながら沖へ移動する。夏には漂砂量、地形変動量ともに小さくなるものの、秋には岸向き漂砂量が大きくなりトラフ領域が通過する。

謝辞: 最後に、本論文の作成に当たってご助言いただいた東京工業大学の瀬岡教授、当所の加藤水工部長、細川海洋環境部長、高橋特別研究官、橋本水理研究室長、ならびに鹿島港の沖波データを提供して下さった通商省第二港湾建設局鹿島港湾工事事務所、当所海象調査研究室に謝意を表します。なお、本論文の基となったHORSの断面データは当

所の漂砂研究室のメンバーと(株)エコーの観測補助員の方々によって取得されたものである。冬のみぞれのなか、あるいは台風の前なぐりの雨のなか断面データを取得し続けたスタッフに感謝の意を表します。

## 参考文献

- 磯部雅彦：改正海岸法の理念の実現に向けて，海岸，Vol. 39，No. 1，pp. 14-18，1999.
- Birkemeier, W.A. : Time scales of nearshore profile changes, *Proc. 19th Coastal Eng. Conf.*, ASCE, pp.1507-1521, 1984.
- 加藤一正, 柳嶋慎一, 村上裕幸, 末次広司 : 汀線位置の短期変動特性とそのモデル化の試み, 港湾技術研究所報告, 第26巻, 第2号, pp. 63-96, 1987.
- 山本幸次, 佐藤真司 : 大型2次元不規則波実験によるバーとバームの形成過程に関する研究, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 526-530, 1998.
- Komar, P. A. : Beach Processes and Sedimentation, Second Edition, Prentice-Hall Inc., 544p, 1998.
- Lippmann, T.C., Holman, R.A. and Hathaway, K.K. : Episodic, nonstationary behavior of a double bar system at Duck, North Carolina, U.S.A., 1986-1991, *J. Coastal Res.*, Special Issue 15, pp.49-75, 1993.
- Ruessink, B.G. and Kroon, A. : The behaviour of a multiple bar system in the nearshore zone of Terschelling, the Netherlands: 1965-1993, *Marine Geology*, 121, pp.187-197, 1994.
- Wijnberg, K.M. and Terwindt, J.H.J. : Extracting decadal morphological behaviour from high-resolution, long-term bathymetric surveys along the Holland coast using eigen function analysis, *Marine Geology*, 126, pp.301-330, 1995.
- Shand, R.D. and Bailey, D.G. : A review of net offshore bar migration with photographic illustrations from Wanganui, New Zealand, *J. Coastal Res.*, Vol.15, No.2, pp.365-378, 1999.
- Ruessink, B.G. and Terwindt, J.H.J. : The behaviour of nearshore bars on the time scale of years: a conceptual model, *Marine Geology*, 163, pp.289-302, 2000.
- Sallenger, Jr., A.H., Holman, R.A. and Birkemeier, W.A. : Storm-induced response of a nearshore-bar system, *Marine Geology*, 64, pp.237-257, 1985.
- Sallenger, Jr., A.H. and Howd, P.A. : Nearshore bars and the break-point hypothesis, *Coastal Eng.*, 12, pp.301-313, 1989.
- Lippmann, T.C. and Holman, R.A. : The spatial and temporal variability of sand bar morphology, *J. Geophys. Res.*, Vol.95, No.C7, pp.11575-11590, 1990.
- Greenwood, B. and Osborne, P.D. : Equilibrium slopes and cross-shore velocity asymmetries in a storm-dominated, barred nearshore system, *Marine Geology*, 96, pp.211-235, 1991.
- Larson, M. and Kraus, N.C. : Dynamics of longshore bars, *Proc. 23rd Coastal Eng. Conf.*, ASCE, pp.2219-2232, 1992.
- Sunamura, T. and Takeda, I. : Bar movement and shoreline change: Predictive relations, *J. Coastal Res.*, Special Issue 15, pp.125-140, 1993.
- Larson, M. and Kraus, N.C. : Temporal and spatial scales of beach profile change, Duck, North Carolina, *Marine Geology*, 117, pp.75-94, 1994.
- 栗山善昭 : 沿岸砂州の短期変動特性, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 576-580, 1996.
- Thornton, E.B., Humiston, R.T. and Birkemeier, W. : Bar/trough generation on a natural beach, *J. Geophys. Res.*, Vol.101, No.C5, pp.12097-12110, 1996.
- Plant, N.G. and Holman, R. : Strange kinematics of sandbars, *Coastal Dynamics 97*, ASCE, pp.355-364, 1997.
- Gallagher, E.L., Elgar, S. and Guza, R.T. : Observations of sand bar evolution on a natural beach, *J. Geophys. Res.*, Vol.104, No.C7, pp.3203-3215, 1998.
- Aagaard, T. and Greenwood, B. : Directionality cross-shore sediment transport in the surf zone under high-energy conditions, *Coastal Sediments 99*, ASCE, pp.1003-1018, 1999.
- Miller, H.M., Smith, S.J., Hamilton, D.G. and Resio, D.T. : Cross-shore transport processes during onshore bar migration, *Coastal Sediments 99*, ASCE, pp.1065-1080, 1999.
- Plant, N.G., Holman, R.A. and Freilich, M.H. : A simple model for interannual sandbar behavior, *J. Geophys. Res.*, Vol.104, No.C7, pp.15755-15776, 1999.
- Larson, M., Capobianco, M., and Hanson, H. : Relationship between beach profiles and waves at Duck, North Carolina, determined by canonical correlation analysis, *Marine Geology*, 163, pp.275-288, 2000.
- Miller, H.C., Birkemeier, W.A. and DeWall, A.E. : Effects of CERC research pier on nearshore processes, *Coastal Structure 93*, pp.769-784, 1983.
- Shand, R.D., Bailey, D.G. and Shepherd : An inter-site comparison of net offshore bar migration characteristics and environmental conditions, *J. Coastal Res.*, Vol.15, No.3, pp.750-765, 1999.
- Winant, D.C., Inman, D.L. and Nordstrom, C.E. : Description of seasonal beach changes using empirical eigenfunction, *J. Geophys. Res.*, Vol.80, No.15, pp.1979-1986, 1975.
- Aubrey, D.G. : Seasonal patterns of onshore/offshore sediment movement, *J. Geophys. Res.*, Vol.84, No.C10,

- pp.6347-6354, 1979.
- 30) 橋本 宏, 宇多高明: 経験的固有関数法による海浜地形変化の解析, 土木学会論文報告集, 第305号, pp. 59-71, 1981.
  - 31) 加藤一正, 田中則男, 瀧岡和夫: 前浜の二次元的地形変化と潮立・波について, 第28回海岸工学講演会論文集, pp. 207-211, 1981.
  - 32) 加藤一正, 吉松 晃: 三次元の経験的固有関数法による深浅図解析法, 港湾技術研究所報告, 第23巻, 第2号, pp. 27-47, 1984.
  - 33) Wijnberg, K.M. and Wolf, F.C.J.: Three-dimensional behaviour of a multiple bar system, *Coastal Dynamics 94*, pp.59-73, 1994.
  - 34) 北野利一, 中野 晋, 岡 彰紀, 間瀬 肇: 主成分分析による新たな地形変動分析法に関する理論的検討, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 626-630, 1999.
  - 35) Takeda, I. and Sunamura, T.: Conditions for beach erosion on a barred beach, *Zeit. Geomorph. N.F.*, 36, 4, pp.453-464, 1992.
  - 36) 武田一郎: 一段バー海岸と二段バー海岸の侵食条件の比較, 地形, 第17巻, 第1号, pp. 17-28, 1996.
  - 37) Stive, M.J.F., Guillen, J. and Capobianco, M.: Bar migration and duneface oscillation on decadal scales, *Proc. 25th Coastal Eng. Conf.*, ASCE, pp.2884-2896, 1996.

(2000. 10. 19 受付)

## LONG-TERM CROSS-SHORE MOVEMENT OF LONGSHORE BAR AND ASSOCIATED SEDIMENT TRANSPORT

Yoshiaki KURIYAMA

The long-term bar behavior was investigated with beach profile data obtained nearly daily for eight years at the Hasaki Coast, Japan. The position of the bar crest repeatedly moved seaward with a return period of a year. The cross-shore sediment transport, on the other hand, periodically fluctuated seaward and shoreward during the seaward migration of the bar crest. The relationship between the cross-shore sediment movement due to the bar crest migration and the wave energy flux in deep water was also investigated.