

阿字ヶ浦における海浜過程(第3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。著者らは、前報^{1),2)}において Winant ら³⁾が定義した empirical eigenfunction を用いて阿字ヶ浦における長期間の地形測量データを解析し、海浜地形の空間的及び時間的変化特性を明らかにした。しかしながら、対象とする現象は季節の変動や数年間という長期間の時間スケールを有するために、これらの時間スケールに比較すると測定期間は充分ではなく、このために解析結果の物理的解釈を充分に行うことができなかった。また地形測量が一測線のみであったために、三次元的な地形変化をとらえることができない欠点があった。

その後、観測を更に1年間継続すると共に、新たに三次元的現象をもとらえることを目的として棧橋軸と直交する方向、すなわち汀線方向の測量を開始した。

本論文では、新たに収集したデータの物理的特性を明らかにするために固有値解析を行い、各固有ベクトルの時間変化について、波向、沿岸流流速、漂砂及び有義波波高等の長期観測結果と比較した。この結果、これらの間には極めて顕著な相関が見出された。

この結果、漂砂に関して最も不明とされていた沿岸漂砂と汀線と直角方向の漂砂による地形変化の特性、及びその相対的重要度を明らかにすることが可能になった。

また本報で述べる波向や沿岸流の測定法は簡便な方法であるが、このような方法であっても漂砂の問題を扱わず上では貴重なデータとなりうることが判明した。

2. 観測方法

観測は前年に続いて阿字ヶ浦の漂砂観測用棧橋を利用して行った。測定は1977年3月より1978年3月に至る期間を通じ毎週1回行った。この観測の測定項目は、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沿岸流流速、⑥風向風速、⑦棧橋と直角方向の水準測量等である。これらの項目のうち、項目①、②については測線延長約250mを3m間隔で1cmの精度で測定した。また項目⑦は沿岸方向の地形変化の特長を調べるために開始したものであり、棧橋両側において100mずつ合計で200mの区間を10m間隔で1cmの精度で測定した。この測線は後に図示するように、①の測線と基準点より約90mの位置で直交しており、主に沿岸方向の地形変化特性を調べる目的で行った。

底質は棧橋沿いに10点と横方向の100m地点で2カ所採取し、粒度分析を行った。波向は、海岸背後の砂丘上において平板の上にアリゲード、磁石を置き、棧橋先端より約200m付近における波峰線方向を磁北よりの角度として読み取った。この方法は簡便な方法であり、誤差も入り易いが、非常に長期間のデータを集めると極めて重要な傾向をも測定可能であることが後に判明した。

更に、沿岸流については、砕波帯をほぼ三等分した3地点において棧橋上より長さ15mのロープを付けたフロートを投入し、その流れた方向と経過時間より沿岸流流速を求めた。この測定はフロートが波に乗った場合はバラツキがあるために、同一地点で3回測定を繰り返した。なお、3地点の平均値を砕波帯の平均沿岸流速と定めた。

一方、長期間の漂砂の移動方向を調べるために1976年1月21日に、棧橋上より6m間隔で約0.5tonの螢光砂を投入し、棧橋の両側1kmの区間において、棧橋より100mは20m間隔で、またそれより以遠では100mおきに2週間にわたってサンプリングを行い、螢光砂の拡がり調べた。なおサンプリングは各地点ごとに約500gの砂を採取し、100g当りの螢光砂の個数を計測した。

3. 観測結果と考察

観測データは前報と同様に empirical eigenfunction を使って解析した。この関数は高さ h を基準点からの水平距離 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、

* 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

$$h_{xt} = \sum_n c_{nt} e_{nx} \dots\dots\dots (1)$$

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 (測定点数) まで変わる。ただしベクトル e を求める方法については前報を参照されたい。

ところで、最近 Winant ら⁴⁾ は固有値・固有ベクトルの計算期間に関する安定性は相当良好であることを指摘しているが、この点について調べるために、1976 年より 1978 年まで 2 年間のデータを 3 種類に分けて計算を行うことにした。すなわち、1976 年、1977 年の 1 年ごとの解析と、1976 年～1977 年まで 2 年間の解析であり、各々タイプ I、II、III と呼ぶことにする。

まず最初に、汀線と直角方向の測量データの解析に関しては、 $n_x=80$ において計算を行った。この結果のうち、最大の固有値を有するベクトル e_1 が図-1 に、またその時間関数 c_1 が図-2 に示されている。ただし図-1 には e_2 も示されているが、ほぼ一定勾配を有するのが e_1 である。 e_1 は海浜の平均的形状を示しており、タイプ I (1976) とタイプ II (1977) を比較すると、わずかに正側への移動があるが、ほぼ同様な形状を有している。また対応する時間関数 c_1 は 2 年間を通じてほぼ一定値を有する。更に、計算期間による差、すなわちタイプ I と III あるいは II と III の差はほとんど存在しない。しかし、 c_1 は 1976 年の方が 1977 年よりも平均値としては大きい値を有しており、したがって c_1 と e_1 の積として考えたとき、1976 年の方が海浜勾配が急であったことになる。

次に二番目に大きい固有値を有するベクトル e_2 が同じく図-1 に、時間関数 c_2 が図-3 に示されている。

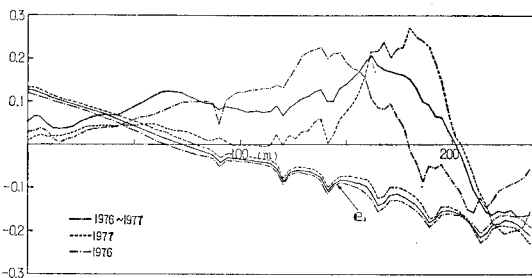


図-1 固有ベクトル e_1 , e_2 の分布形

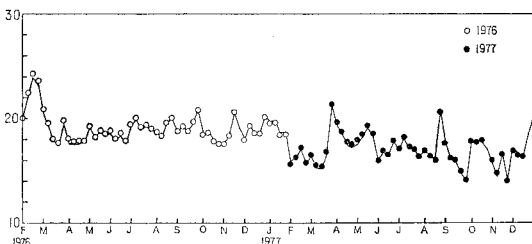


図-2 時間関数 c_1 の変化図

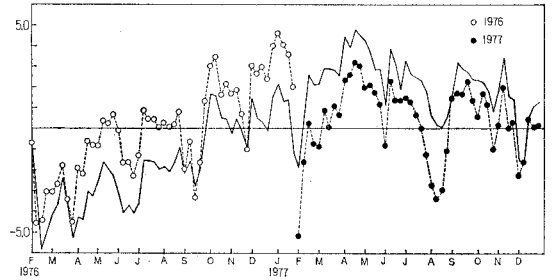


図-3 時間関数 c_2 の変化図

図-1 によると e_2 は計算期間によって関数形にかなりの違いが生じている。その特長としては、タイプ I (1976) においては $x=140$ m 付近にピークを持っていたが、タイプ II (1977) ではその位置が 30 m ほど沖方向へ移動している。この理由は後に考察するとして、時間関数について調べてみると、 c_2 はタイプ III (1976～1977) の結果をみると、1977 年の 4 月に至るまでほぼ右上りの傾向を有しており、その後はわずかに減少する傾向が特長的である。このような変化の生じた理由としては、沿岸方向または汀線と直角方向の漂砂のいずれか一方が主要因と考えられるが、 c_2 曲線は季節に関して周期的変化が弱いために、主に沿岸漂砂が主因と考えられた。このため波向との相関を調べることにして、波向の変化を図示したのが図-4 である。ただし図-4 は波峰線方向と磁北とのなす角を反時計回りを正として図示したものであり、○印は観測値、破線は 10 個のデータの移動平均を取ったものである。これによれば、波向は $N+15^\circ$ より減少し、ほぼ 1977 年の 4 月に $N+0^\circ$ となり、その後はまた増加する傾向がある。この波向のトレンドは図-3 の c_2 曲線とかなり良い相関を示している。ところで、阿字ヶ浦海岸では汀線はほぼ南北方向を向いているためにプラス側より入射する波は南向きの沿岸流を発生させ、一方マイナス側より入射する波は北向きの流れを起こすと考えられる。この点を確認するために、砕波帯の平均沿岸流流速の経時変化を示したのが図-5 である。1976 年の 3 月より 10 月まで欠測はあるものの図-4 の波向図と比較すると、相関は良いと言えよう。

以上の測定データによって波向と沿岸流および c_2 は

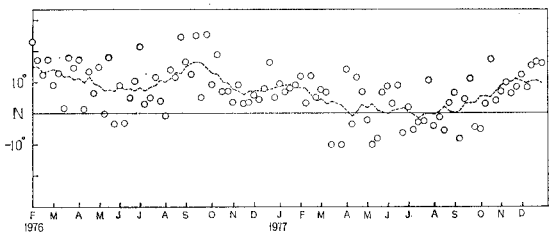


図-4 波向の経時変化

相関があることがわかったが、 c_2 が沿岸漂砂によるものであることを更に確認するために螢光砂を投入してその移動状況を調べた。この調査は 1976 年 1 月 21 日 13 時に開始した。すなわち、図-5 によれば南向きの約 20 cm/sec の沿岸流が卓越していた時期であった。この結果が図-6 である。図中縦軸は 100 g 当りの螢光砂数を、横軸は棧橋を基準とした汀線方向の距離である。中央が棧橋の位置であり、この棧橋上に等間隔で 0.5 ton の螢光砂を投入し、汀線沿いにサンプリングしたものである。これによれば、漂砂はほぼ完全に南向きに流れ、図中○印から□印に到る 8 日間で個数のピークは約 150 m 南へ移動している。しかし更に 1 週間後(△印)ではピークの対応が必ずしも明確ではない。いずれにしても北側にはほとんど螢光砂は存在せず、漂砂は確かに南向きであった。以上のように c_2 の変化は沿岸漂砂によるもの

であり、南向きの漂砂では c_2 の勾配が正であり、かつ e_2 は海浜の広い領域で正の値を有することを考慮すると、阿字ヶ浦地区では南向きの漂砂によって砂の堆積が生ずると言えよう。これは阿字ヶ浦は南端を磯崎岬に囲まれており、この岬より南側は岩礁であって砂の補給源が存在しないことから推測される事実と一致する。ところで e_2 のピークが沖へずれているのは沿岸漂砂によって汀線が前進したために、主に堆積が起こる位置も沖へ移動したためであろう。

次に三番目の固有値を有するベクトル e_3 が図-7 に、時間関数 c_3 が図-8 に示されている。 e_3 に関しては、タイプ I (1976) とタイプ II (1977) で関数型はかなり類似しており、一方、時間関数 c_3 は半年おきの周期的変化に特長を有している。このような変化は波浪条件に対応した岸沖方向の漂砂に起因すると考えられたために、阿字ヶ浦と約 50 km ほど南に位置する鹿島港における日最高有義波高の変化を図示し、比較した。この結果が図-9 である。図中の実線は 7 日間の移動平均を取っ

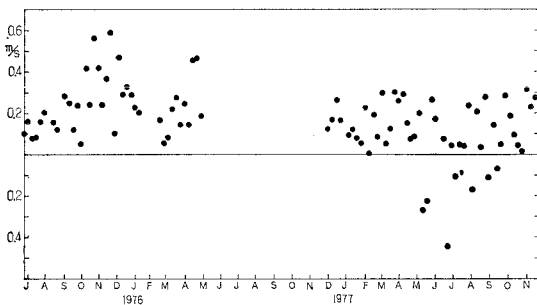


図-5 沿岸流流速の経時変化

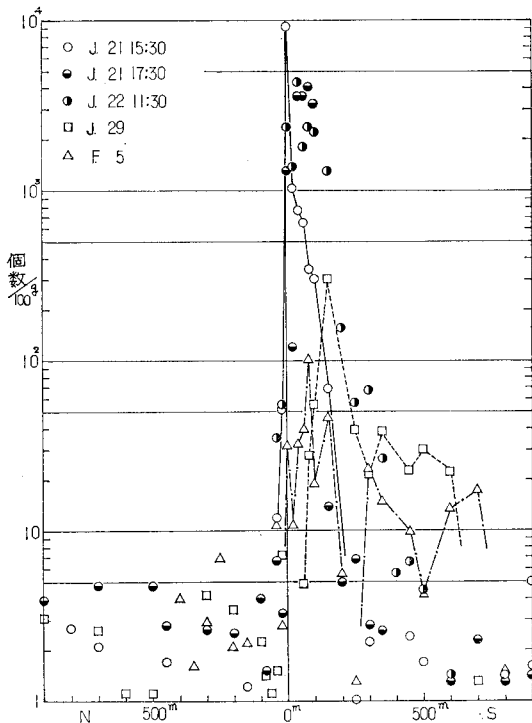


図-6 長期間の螢光砂移動

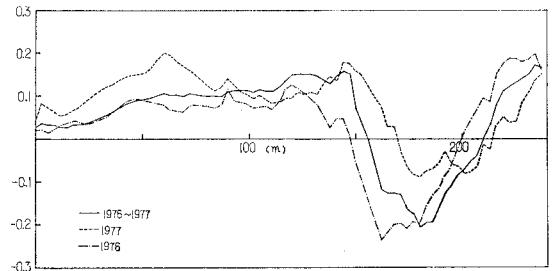
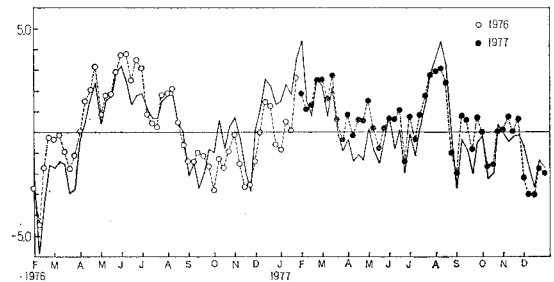
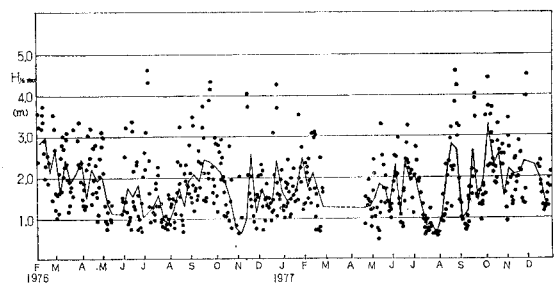
図-7 固有ベクトル e_3 の分布形図-8 時間関数 c_3 の変化図

図-9 日最高有義波高の経時変化†

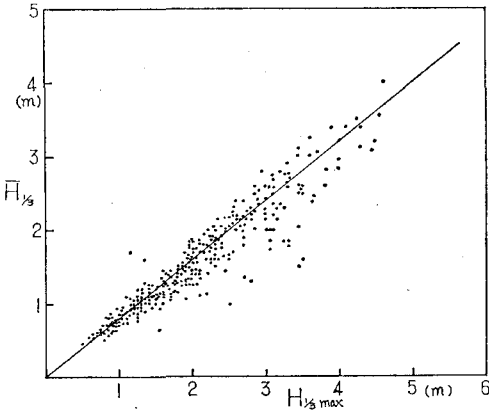


図-10 日最高有義波高と平均波高の関係†

たものである。この図より、日最高有義波高で約2mを境としてこれより値が大きければ c_3 は負となって汀線付近は侵食され、小さければ c_3 は正となって堆積されるという特長があることがわかる。一方、図-10は同じく鹿島港のデータについて日最高有義波高($H_{1/3max}$)と平均波高($\bar{H}_{1/3}$)の関係を調べたものであるが、これによれば $\bar{H}_{1/3} \approx 0.8 H_{1/3max}$ の関係が成立している。したがって先に述べた侵食と堆積の限界値は日平均有義波高では約1.6mとすることができよう。以上のように c_3 と c_3 は波浪の強弱による岸沖方向漂砂に起因する地形変化であることが結論される。

さて、主な変化を表すベクトル e_2, e_3 の意味を明らかにしたが、 c_2, c_3 が最も特長を有する時期における海岸形状を示したのが図-11である。図中、1976年2月12日は c_2, c_3 とも最小値のときの形状であり、 $x=180$ m付近にbarが存在している。次に1977年2月3日、および8月4日は $c_2 \sim 0$ および c_3 が極大値の時であり、岸沖方向の動きで汀線付近への堆積に特長がある。一方4月14日は沿岸変化がピークになった時である。以上の変化は最大で2.5mにも達している。

以上において沿岸方向と直角方向の漂砂による地形変化の特性を明らかにしたが、固有値自体は表-1のようにまとめられる。ただし*印の付いたものは後に述べる汀線方向の地形解析の結果であるから除外すると、平均

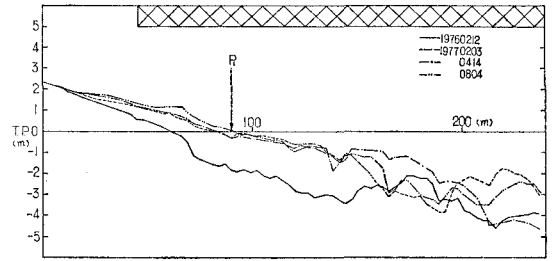


図-11 代表的海岸形状図

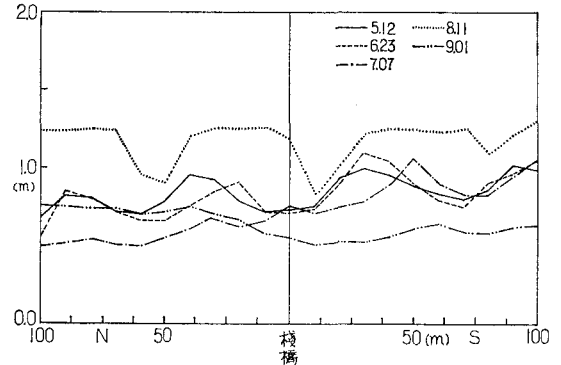


図-12 棧橋と直角方向の代表地形

的には $\lambda_2/\lambda_1=1.61 \times 10^{-2}$ 、 $\lambda_3/\lambda_1=1.04 \times 10^{-2}$ であり、 λ_2 は沿岸漂砂に、 λ_3 は直角方向漂砂に関係することと考え併せると、おのおのの相対的割合はほぼ3:2程度であることがわかる。

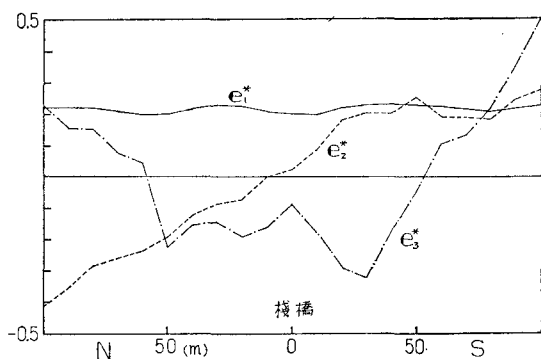
最後に汀線方向すなわち棧橋と直角方向の地形測量結果について述べることにする。この測線は、図-11の P_1 の位置で橋軸と直交している。まず図-12は典型的な地形を示している。波長約60mのカスポが夏の8月に特長的に表われており、またカスポの発生位置はほぼ一定しているようである。

次に図-13はベクトル e_1^* 、 e_2^* 、 e_3^* を示したものである。 e_1^* はほぼ一定値を有するが、わずかに周期性を有し、カスポの形状を表わしている。また e_2^* は負から正へと符号が逆転しており、沿岸方向の変化を示している。更に e_3^* は棧橋近くで負、また離れた地点では正の値を有しており、棧橋による洗掘を示していると思われる。

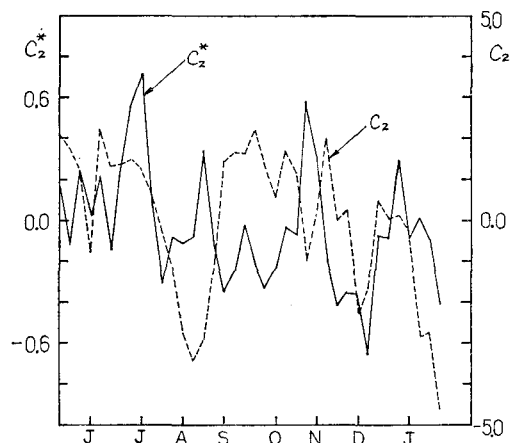
表-1 固有値

解析期間	λ_1	λ_2	λ_3	λ_2/λ_1	λ_3/λ_1
1976	4.58	6.69×10^{-2}	4.57×10^{-2}	1.46×10^{-2}	1.00×10^{-2}
1977	3.83	5.04×10^{-2}	3.70×10^{-2}	1.32×10^{-2}	1.04×10^{-2}
1976~1977	4.11	8.46×10^{-2}	4.43×10^{-2}	2.05×10^{-2}	1.08×10^{-2}
平均	4.17	6.73×10^{-2}	4.23×10^{-2}	1.61×10^{-2}	1.04×10^{-2}
1977*	5.33×10^{-1}	4.20×10^{-3}	2.29×10^{-3}	7.9×10^{-3}	4.3×10^{-3}

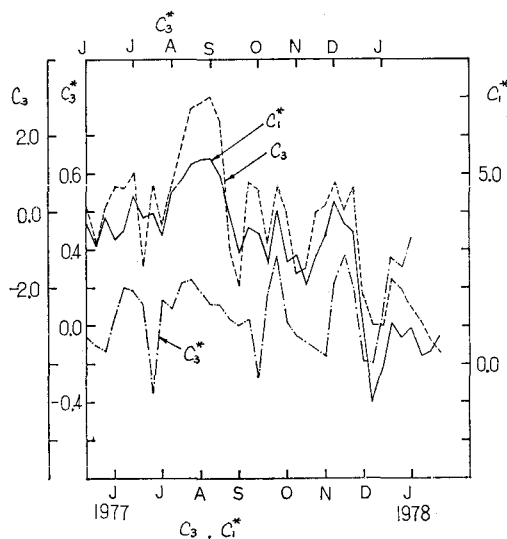
注† これらは、運輸省の鹿島港港務事務所が測定したデータを整理したものである。



図—13 棧橋と直角方向の固有ベクトル e_1^* , e_2^* , e_3^* の分布図



図—15 時間関数 c_2^* と c_2 の比較



図—14 時間関数 c_3^* , c_3 と c_3 の比較

さて、これらのベクトルの時間グラフを示すのが図—14, 15である。図—14は c_3^* と c_3 の変化を示したものである。 c_3^* は先に述べた岸沖方向の運動に起因する c_3 とその変化形状はほぼ一致し、したがって e_3^* は岸沖方向の漂砂による汀線付近の地形変化を表わしている。また c_3^* は図の上方に座標軸がとってある通り、 c_3^* とは約2週間の時間遅れを持って c_3 とほぼ同形の変化をしている。したがって棧橋付近の平均的な洗掘は汀線付近の侵食・堆積と同時に起こらず、約2週間の時間遅れがあることがわかる。次に c_2^* は、図—15に同時に示されている c_2 と同様に変動はあるものの、時間と共に減少する曲線となっており、平均的には正より負へ変化している。これは波向の変化に対応しており、波が北側より入射すると北側が高くなり、一方南側より入射すると南側が高くなる傾向である。このような変化は、波向に合

せて汀線が変形するとすれば、逆の結果となるはずであり、むしろ、沿岸流によって大規模なカスプが移動し、南流の時は北側のカスプ頂に接近し、北流の時は南側のカスプ頂に接近するためであろうと推論される。しかしこの点については更に検討の必要がある。

4. おわりに

本報では前報に続いて阿字ヶ浦における長期観測データを empirical eigenfunction によって解析し、また波向、沿岸流流速、漂砂、有義波高等の観測値と比較した。この結果、沿岸漂砂と汀線と直角方向の漂砂による地形変化を区別し、その特性を明らかにした。またこれらの相対的割合が約3:2であることも判明した。しかし漂砂現象の持つ時間スケールと比較すると観測期間はまだ充分とは言えない。このため1978年以降も観測を続行し、データを収集・解析する予定である。

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事務所の調査課の方々に感謝致します。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 橋本 宏・宇多高明：阿字ヶ浦における海浜過程 (第2報), 第24回海講論文集, pp. 216~220, 1977.
- 3) Winant, C.D., D.L. Inman and C.E. Nordstrom: Description of seasonal beach change using empirical eigenfunctions, J.G.R., Vol. 80, (15), pp. 1979~1986, 1975.
- 4) Winant, C. D. and D. G. Aubrey: Stability and impulse response of empirical eigenfunctions, Proc. 15th Conf. on Coastal Eng., ASCE, pp. 1312~1325, 1976.