

離岸堤建設過程の海浜変形

——河原子海岸 10 年間の変遷——

加藤 一正*・井上 浩司**・柳 嶋 慎一***

1. はじめに

海岸侵食対策の代表的工法である離岸堤は、1970年頃から多用されだし、急速に普及した。この間に、多くの実験や現地調査を通じて、離岸堤周辺の海浜地形の変化（離岸堤の捕砂機能）が明らかにされた。しかし、多くの事例は安定形状についてであり、離岸堤の施工過程の地形変化、季節変化、時化の通過時の短期地形変化等については未知の部分が多い。これらの海浜地形変化を把握しておくことは、砂浜海岸の減少しつつある日本において、今後侵食防止機能をさらに十分発揮させる離岸堤を計画・施工するうえで大きな意義がある。

本研究は、茨城県河原子海岸において約10年間にわたる離岸堤施工期間中に1～2ヶ月の間隔で海浜の地形を測量して得たデータを経験的固有関数で解析し、離岸堤施工過程の変化、季節変化、短期変化等の海浜過程を明らかにしたものである。

2. 河原子海岸の自然条件

茨城県河原子海岸は、日立港の北方に位置し中央部が凸型に突出した海岸である（図-1）。図-2 は離岸堤建設以前の海浜地形である。この海岸の沖合いには、頂部レベルの大部分が D.L.+0.5 m 程度の平坦な大島（浅瀬）があり、満潮時には海面下に、干潮時には海面上に現われる。そして、背後の海浜は海へ突出する舌状地形となっている。

図-3 は、河原子海岸の南約 17 km 地点の常陸那珂沖合の水深 30 m（図-1）において1981年～1989年の間に観測された有義波をもとに計算した各月毎の平均エネルギーフラックスである。エネルギーフラックスの方向分布は、12月～3月の期間には東より少し北に偏っており、7月～9月の期間では南に偏っている。すなわち、エネルギーフラックスの方向分布は季節により異なり、冬期には東から少し北寄りの波が多く、夏期には南寄りの波が多い。なお、朔望平均潮差は 1.36 m である。

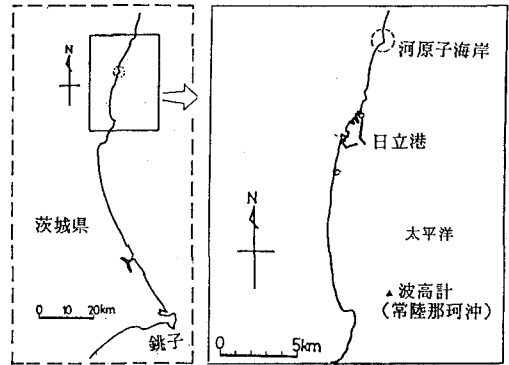


図-1 河原子海岸位置図

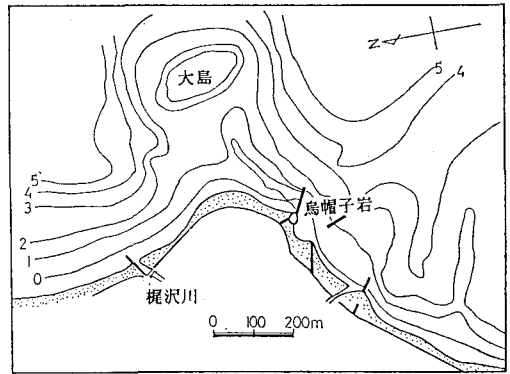


図-2 河原子海岸周辺地形（離岸堤施工前）

本海岸の烏帽子岩から梶沢川の範囲の海浜をレクリエーション海岸として整備するため、砂浜の安定化を目的とした離岸堤の最適配置が移動床模型実験によって検討された（木村・佐藤，1982）。その結果に基づき離岸堤の建設が1982年に始まった。図-4 は離岸堤の施工過程を示す。河原子港内への漂砂の侵入防止することと、整備海浜に北からの砂を堆積させるために、東防波堤すぐ横の南離岸堤（No. 1）から工事が進められ、これまでに4基の離岸堤が施工された。そして現在、レクリエーション海岸として利用されている。なお、河原子港について太い線で示した法線は1982年9月時点で施工が完了していたところである。

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 漂砂研究室長
 ** 正会員 研修生（復建調査設計株式会社）
 *** 正会員 運輸省港湾技術研究所 漂砂研究室

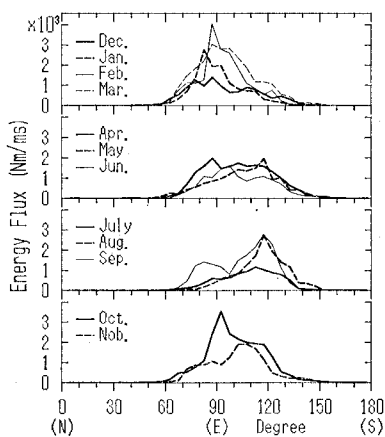


図-3 エネルギーフラックスの方向分布

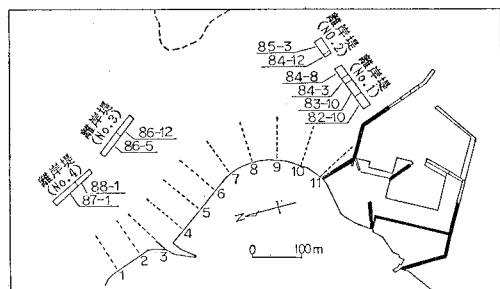


図-4 離岸堤の建設過程

3. 経験的固有関数による海浜変形の解析

河原子海岸では、離岸堤建設以前の1981年4月より現在に至るまで、図-4に示す沿岸方向50m間隔に設定した測線 No. 1~No. 11に沿って陸上部の海浜断面測量が90回実施されている。測量間隔は1988年3月までは、ほぼ1ヶ月に一度、1988年3月以降は2ヶ月に一度である。断面のデータをもとに各測線上の汀線位置をD.L.+1.5m(潮望平均満潮位:D.L.+1.44m)で定義し、既設護岸からの距離を読み取った。読み取ったデータをもとに各解析期間内の各測線上の平均汀線位置を計算し、その点を基準に沖向きを正として汀線位置 $\Delta y(x, t)$ を求めた。このデータを基に、経験的固有関数解析(Winant et al.; 1975, 加藤・吉松; 1984)により、離岸堤建設過程の海浜変形を調べた。

経験的固有関数解析は、汀線位置を固有関数 $e_n(x)$ と時間係数 $C_n(t)$ の積の形、つまり、

$$\Delta y(x, t) = \sum e_n(x) \cdot C_n(t) \quad \dots\dots\dots (1)$$

で表現するものである。ここで、 x は場所、 t は時間である。汀線の状態と変化は、以下のようにとらえられる。固有関数が正の領域では、時間係数が正(負)のとき前進(後退)した状態となり、固有関数が負の領域はその逆である。汀線の変化は、固有関数が正(負)の領

域では時間係数が増加するとき汀線前進(後退)となる。

4. 離岸堤建設過程の海浜過程

(1) 全期間を通しての解析結果

図-5は、全期間(1981年4月から1990年1月)の解析で得られたモード1(寄与率71.6%)の固有関数と時間係数である。固有関数はNo. 2とNo. 10にピークを有し全域で正であるので、全域にわたる汀線の前進・後退を表現する。時間係数は1983年頃より増加しており、1986年からはその傾向が強まる。1983年は南側離岸堤着工直後であり、そして1986年は北側離岸堤の建設が始まったときであるので、離岸堤の建設に伴い背後の汀線が舌状に前進したことが分かる。

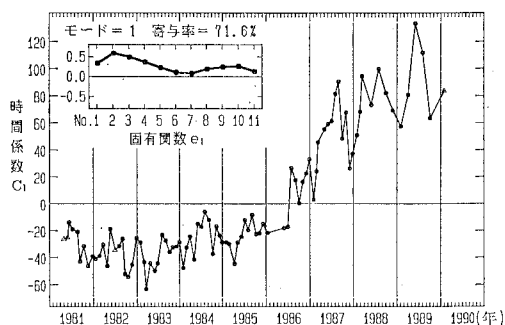


図-5 モード1(全期間)

離岸堤の建設による汀線変化をさらに詳しく把握するために、離岸堤の施工過程を考慮して、以下の3期間に分けて経験的固有関数解析を行った。

建設初期(1981年4月から1983年8月); 離岸堤施工前および、南側離岸堤がわずかに施工された期間である。

建設中期(1983年10月から1985年12月); 南側離岸堤が本格的に施工され、北側離岸堤の建設が始まるまでの期間である。

建設後期(1986年1月から1990年1月); 北側離岸堤の施工が始まる1986年から、現在に至る期間である。

(2) 建設初期の海浜過程(1981年4月~1983年8月)

図-6は、モード1(寄与率41.6%)の固有関数および時間係数である。固有関数はNo. 1からNo. 8の区域で負、No. 9からNo. 11の区域で正である。一方、時間係数には、2月から9月にかけて減少し、10月から1月にかけて増加する周期的(季節的)な変動がある。これらをあわせて考えると、汀線は春期~夏期に北側(測線No. 1からNo. 7)で前進、南側(測線No. 9からNo. 11)で後退し、秋期~冬期はその逆の変化をしたといえる。つまり、まだ十分に離岸堤の効果が現

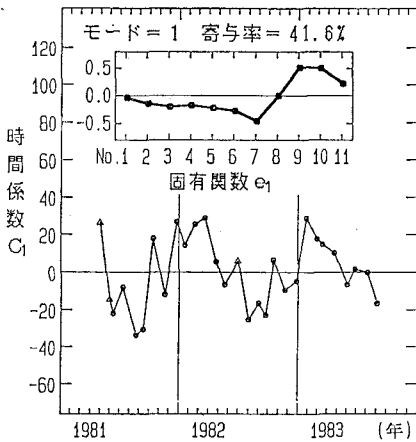


図-6 モード 1 (建設初期)

われておらず、波向の季節変化と対応して南北方向に砂が移動するために汀線はシーソー運動的な季節変動をしていた。波向きの変化が汀線変化に明確に現われるのは、前面にある大島によって正面からの波の成分が減殺されるためと考えられる。

図-7 はモード 2 (寄与率 30.3%) の固有関数と時間係数である。固有関数は、全域で正となっており、全域で汀線が前進・後退するモードである。固有関数の値が No. 8 で最大になっていることから、時間係数の値を調べることによって、大島背後の舌状地形の発達の状態が分かる。図-8 は、各期間の波向きを無視して計算した 1 日平均エネルギーフラックスの最大値と時間係数 C_2 の関係をプロットしたものである。データに若干のバラツキはあるものの、エネルギーフラックスが $52 \times 10^3 \text{ Nm/ms}$ より小さいときは概ね時間係数が正 (汀線が舌状に前進した状態) であり、大きいときには負 (後退した状態) となっている。この境界エネルギーフラッ

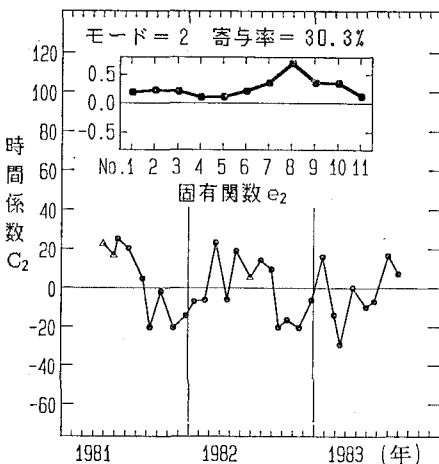
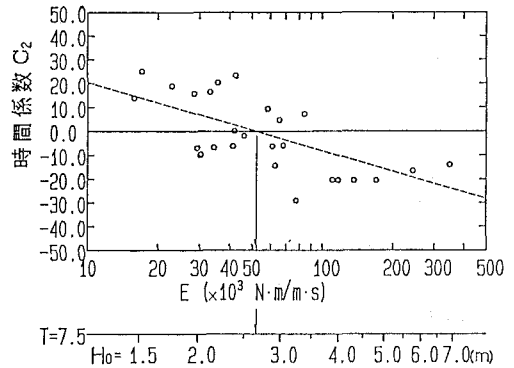


図-7 モード 2 (建設初期)

図-8 日平均エネルギーフラックスの最大値と時間係数 C_2 の関係 (建設初期)

クスを、周期 7.5 s の波高に換算すると $H_0=2.6 \text{ m}$ となる。すなわち、浅瀬背後の舌状地形はこれ以下の波の入射があると発達した状態になる。加藤ら (1989) が前浜地形データをもとに D.L.+1.4 m で定義した汀線の前進速度を与える式によると、汀線の前進・後退の境界値は $40.1 \times 10^3 \text{ Nm/ms}$ である。これを、周期 7.5 s の波高に換算すると 2.3 m となり、今回得られた結果よりやや小さめの値となるもののよく一致する。今回の境界波高がやや大きめになっているのは、約 1 ヶ月の期間最大日平均エネルギーフラックスで整理していることと、前面に浅瀬があるため浜に入射する波のエネルギーが減殺されることが関係していると考えられる。

(3) 建設中期の海浜過程(1983年10月～1985年12月)

図-9 にモード 1 (寄与率 37.3%)、図-10 にモード 2 (寄与率 21.0%) の固有関数と時間係数を示す。固有関数 e_1 は No. 1～No. 8 の範囲で正、No. 9～No. 11 の範囲ではほぼ 0 である。一方、 e_2 は No. 1～No. 8 の範囲ではほとんど 0 であり、No. 9～No. 11 の範囲で正になっている。また、時間係数 C_1 は 1983 年～84 年に変動がある。特に図中の期間 A に急激に増加した。これに対し、 C_2 は 1984 年後半より徐々に増加した。つまり、建設初期に見られたシーソー運動的な季節変化はなくなり、1984 年には北側の汀線が短期的に前進し、1985 年には南側の汀線が徐々に前進した。

図-11 は期間 A の地形変化である。測線 No. 7, 8 付近で汀線が前進しており、同時に測線 No. 9, 10 にわずかな汀線後退を伴っている。また解析にはとらえられていない No. 10 と No. 11 の間の汀線前進が見られる。この間に、E 30° S の方向から比較的大きな波浪が来襲したことが確認されている。したがって、離岸堤がまだ 1 基 (No. 1) しか施工されていなかったため、背後の砂補足効果は十分ではなく、南から入射する波によって砂が北方向へ運ばれる状況が残されていた。ところが、1985 年 3 月には、2 基の離岸堤が完成しており、南

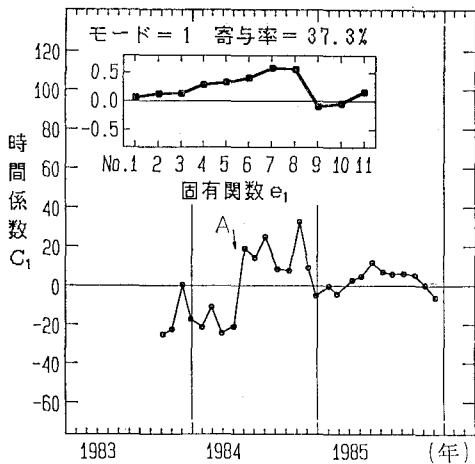


図-9 モード 1 (建設中期)

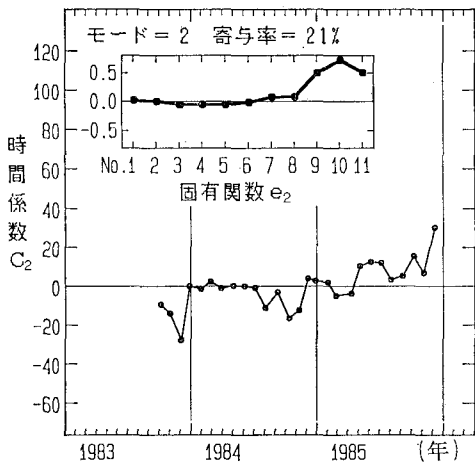


図-10 モード 2 (建設中期)

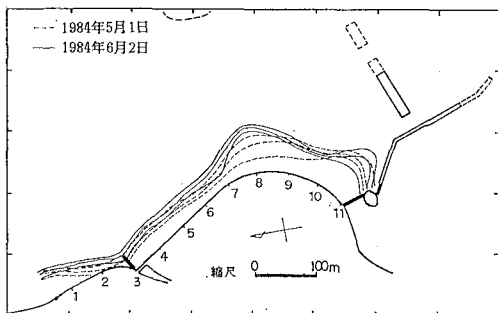


図-11 現地地形変化 (1984年5月1日~6月2日)

寄りの波が入射しても離岸堤背後から北方向へ砂が運ばれにくくなった。このために1985年になって北側の汀線変化が少なくなったものと考えられる。そして、南側の離岸堤2基完成後はその背後に徐々に砂が堆積した。

(4) 建設後期の海浜過程(1986年1月~1990年1月)

測線 No. 11 付近では、汀線が前進して河原子東防波堤に到達したので、解析では測線 No. 11 を外した。

図-12 は、モード 1 (寄与率 63.9%) の固有関数と時間係数である。全域で正となっている固有関数は、測線 No. 2 で最大であり、南側に行くにつれて徐々に小さくなる (No. 8 にも小さいながらピークがある)。時間係数は全体的に増加しながら、大きな変動を繰り返している。時間係数の全体的な増加傾向は、測線 No. 2 を中心に汀線が前進したことを示し、北側離岸堤 (1988 年着工) の施工延長と対応する。一方、時間係数が短期的に変動するのは入射波のエネルギーフラックスの変動と関係していた。すなわち、比較的穏やかな波が入射していた期間には時間係数が増加 (全域で汀線前進) し、大きな波浪が来襲した期間には減少 (全域で汀線後退) した。図-13 は、後者の例として、期間 B の地形変化を示したものである。全域でかなり侵食を受けており、特に測線 No. 5 から No. 8 にかけての侵食が激しい。この期間中の1989年8月6日に、有義波高 $H_0=6.99\text{m}$ 、周期 11.3s、波向 118° の高波浪が来襲している。これは、1980年~1989年の間の最大波高である。

図-14 はモード 2 (寄与率 13.6%) の固有関数と時間係数である。固有関数は中央部で負、両端で正の値と

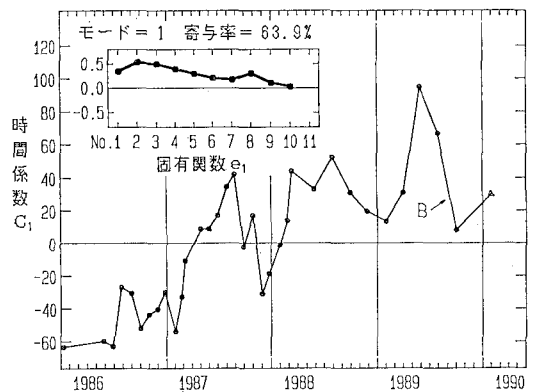


図-12 モード 1 (建設後期)

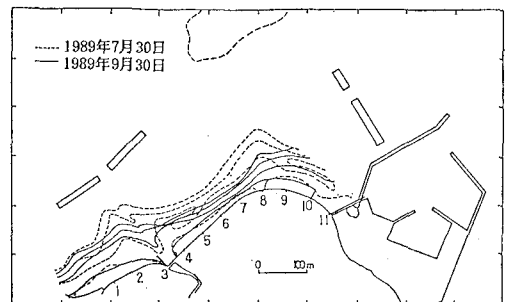


図-13 台風による地形変化 (1989年7月30日~9月30日)

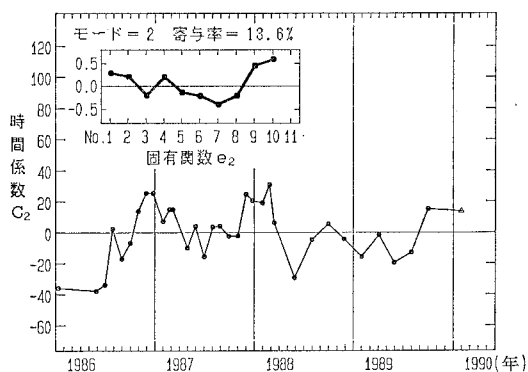


図-14 モード 2 (建設後期)

なっている。このことから、局所的な沿岸漂砂が生じるようになったことが分かる。したがって、時間係数 C_2 が1986年後半に増加したことは、中央部で侵食が生じ、北側および南側で堆積が生じたことを示す。これは、北側離岸堤 No. 3 が1986年12月までに完成したことを伴って、従来のまま残された中央部から南北両離岸堤背後へ砂が移動したためである。また、1987年以降の時間係数の不規則な変動は、おおむねエネルギーフラックスの変化と対応していた（小さいときに、南北離岸堤背後の汀線が前進する）。

5. おわりに

経験的固有関数により離岸堤建設過程の汀線変化を解析した結果をまとめると次のようになる。

建設初期（1981年4月～1983年8月）の汀線変化は、ほとんど離岸堤の影響を受けておらず、波向の変化に対応して、南北沿岸方向に砂が移動するために生じるシーソー運動的な季節変化が最も卓越していた。また、浅瀬背後の舌状地形は、エネルギーフラックスがおおむね $52 \times 10^3 \text{ Nm/ms}$ 以下のときに発達した状態になっていた。

建設中期（1983年10月～1985年12月）には、南側離岸堤が整備され、南北方向の砂の移動は相対的に小さくなった。さらに、南側離岸堤背後の海浜では汀線が徐々に前進し、同時に北側海浜（測線 No. 1～No. 8）の汀線

変化量も少なくなった。北側海浜の汀線変化量が少なくなったのは、南側離岸堤の建設後に南寄りの波が入射しても北方向へ砂が運ばれにくくなったためと考えられる。

建設後期（1986年1月～1990年1月）には、北側離岸堤が施工され、南北両離岸堤が機能して全域にわたって汀線が前進した。汀線前進量は、両離岸堤背後で多く、従来と同じ状態で残された中央部（測線 No. 6～8）は少ない。全域にわたる汀線前進は、比較的穏やかな波が入射した期間に生じたが、大きな波が来襲すると全域にわたる一時的な汀線後退が生じた。また、南北離岸堤背後に砂が堆積し中央部が侵食を受ける可逆的な変化も認められた。

今後は、継続的に実施される地形測量成果をリアルタイムに近い状態で解析し、構造物建設の影響を監視しつつ施工するシステムの開発を行う予定である。なお、事前に実施された移動床模型実験による予測結果と離岸堤配置後の現地海浜変形の比較については別報（加藤ら、1991）を参照されたい。

最後にあたり、河原子海岸の貴重な現地追跡調査資料は茨城県日立港湾事務所から提供頂いたものである。取りまとめに際しては、佐藤昭二博士より有益な助言を頂いた。常陸那珂の波浪データの使用にあたっては、第二港湾建設局鹿島港工事事務所、当所海象調査研究室の協力を頂いた。ここに記し謝意を表したい。

参 考 文 献

- 加藤一正・吉松 晃 (1984): 三次元の経験的固有関数による深淺図解析法, 港研報告, 第23巻, 第2号, pp. 27-47.
- 加藤一正・村上裕幸・栗山善昭・藤田 誠 (1989): 面的防護方式における汀線変動特性の検討, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 429-433.
- 加藤一正・井上浩司・柳嶋慎一 (1991): 現地データによる移動床模型実験の検証, ——河原子海岸におけるケーススタディ——, 港研報告, 第30巻, 第1号.
- 木村久雄・佐藤昭二 (1982): 河原子レクリエーション海浜造成に関する模型実験, 港研資料, No. 419.
- Winant, D. C., D. L. Inman and C. E. Nordstrom (1975): Discription of scasonal beach changes using empirical eigenfunction, J.G.R., Vol. 80, No. 15, 1975, pp. 1979-1986.