

導流堤を有する浜名湖今切口周辺海岸の地形変化

栗山善昭¹・内山雄介²・中村聡志³・永江友和⁴

¹正会員 博士 (工学) 独立行政法人港湾空港技術研究所 海洋・水工部漂砂研究室長 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

²正会員 博士 (工学) 独立行政法人港湾空港技術研究所 海洋・水工部主任研究官 (同上)

³正会員 工修 独立行政法人港湾空港技術研究所 海洋・水工部底質環境室長 (同上)

⁴独立行政法人港湾空港技術研究所 海洋・水工部漂砂研究室 (同上)

導流堤を有する感潮湖湖口周辺海岸の地形変化を検討するために、静岡県浜名湖今切口において導流堤の建設中および建設後の30年間に取得された25枚の深浅データを経験的複素固有関数法などによって解析した。その結果、引き潮によって生じた深みが解析期間中深くなっていること、解析期間前半では湖口両側に形成された浅瀬は岸向きに移動していたけれども解析期間後半には漂砂上手側の浅瀬の移動方向が沖向きに変化したことを明らかにした。さらに、湖口の漂砂上手側における堆積量が時間とともに減少するにもかかわらず下手の海岸に供給される土砂量は増加していないこと、これは導流堤を通過した土砂が引き潮デルタに捕捉されたためであること、デルタに捕捉された土砂の量は1992年にほぼ平衡状態に達していたことなどを示した。

Key Words: jetty, inlet, ebb-tidal delta, longshore sediment transport rate

1. はじめに

浜名湖やサロマ湖、能取湖などの感潮湖の湖口周辺の地形は波浪のみならず潮流の影響を受け複雑に変化している。このような場に構造物を建設すると、当然のことながら波浪のみの影響を受ける連続した砂浜海岸に建設された構造物の場合と異なる地形変化が引き起こされると考えられる。

Tomlinson¹⁾は、オーストラリアの感潮河川 (tidal river) である Tweed 川河口における導流堤延長後の地形変化を調べた。その結果、導流堤延長後に新たに形成された引き潮デルタ (ebb-tidal delta) は当初は潮流の影響を強く受け左右対称であったけれども、デルタが発達してデルタ上の水深が小さくなると波の影響を受けるようになり、ひずんだ形へと変形したことを示した。アメリカ、フロリダ州における感潮入江 (tidal inlet) の一つである St. Marys Entrance 周辺の導流堤建設による地形変化は Byrnes and Hiland²⁾によって調べられている。彼らは導流堤建設以前に形成されていた引き潮デルタが導流堤建設後に水深の大きい沖に移動し、その結果、デルタを回って下手側海岸に供給される底質の量が減少したことを示した。Kana³⁾はアメリカ、ニューヨーク州

の Shinnecock Inlet 周辺の土砂収支を検討し、上手側における 220,000 m³/year の沿岸漂砂量が下手側では 104,000 m³/year に減少すること、すなわち、沿岸漂砂量の約半分の底質が inlet system に捕捉されることを示した。Liu and Hou⁴⁾は、感潮入江である台湾の Kaoshiung 港の防波堤周辺で取得した 200 地点以上の底質の特性を調べた。その結果、防波堤周辺では粒径に応じて4つの底質移動タイプがあり、そのうち、中粒径に分類される粒径 0.25 mm ~ 1 mm の底質の大部分は防波堤を回って下手側海岸に輸送されることを明らかにした。

日本においては、富谷ら⁵⁾が今回の解析対象地域である静岡県浜名湖今切口周辺の地形変化を解析し、卓越する沿岸漂砂の向きは西向きであること、導流堤の漂砂上手側 (東側) では 10×10⁴ m³/year の割合で土砂が堆積したこと、漂砂下手側では汀線近傍では侵食が生じたものの水深 5 m よりも沖では堆積が生じたことを示した。菊地ら⁶⁾は北海道能取湖において新たに掘削された湖口に建設され漁港周辺の地形変化を調べ、防波堤沖にはテラス状の地形が形成されたこと、防波堤が延長されることによって潮流の流心が安定したこと、防波堤の建設によってその両側の汀線が前進したことなどを明らかにした。

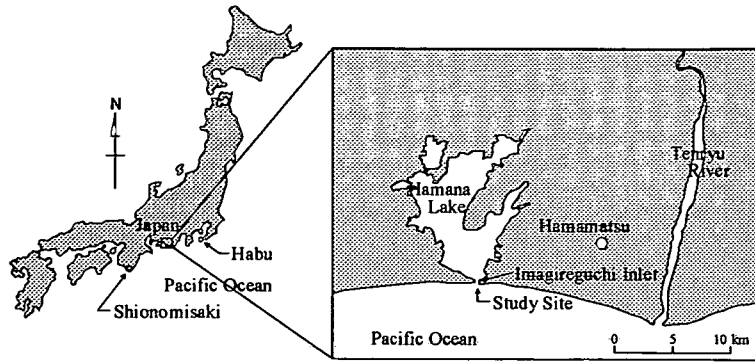


図-1 浜名湖今切口の位置図

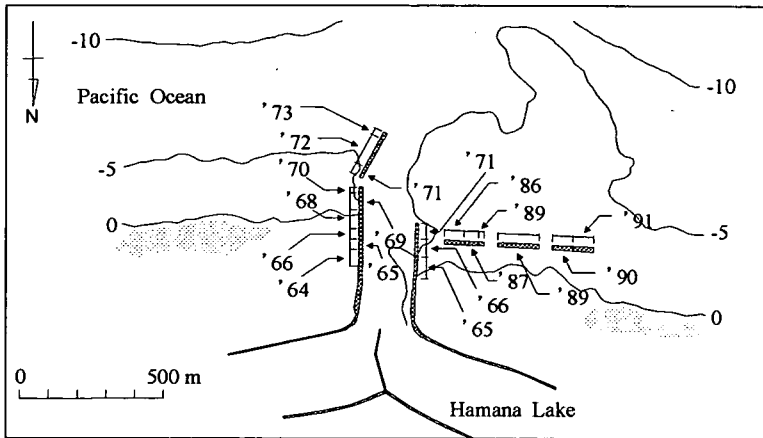


図-2 解析領域における地形(1992年測量)と導流堤建設の経緯(等深線の単位はm)

このように、導流堤を有する感潮湖湖口周辺海岸の地形変化の研究例はいくつかあるものの、このような地形変化の時間変動が詳細に検討された例は少ない。そこで、本研究では、浜名湖今切口周辺で約30年間にわたりほぼ毎年取得された深淺データを用い、導流堤建設に伴う感潮湖湖口周辺の中期的地形変化を検討した。

2. 浜名湖今切口および今切口周辺海岸の概要

浜名湖は静岡県に位置する面積 74 km^2 、潮汐プリズム (tidal prism) $2 \times 10^7 \text{ m}^3$ (松田⁷⁾ の汽水湖で、今切口において太平洋とつながっている(図-1)。今切口周辺海岸における潮位差は 1.4 m で、浜名湖工事基準面 (T.P. -0.783 m) を基準とすると、干潮位、平均潮位、満潮位はそれぞれ 0.0 m 、 0.7 m 、 1.4 m である。潮岬や波浮における長期間波浪データ(永井ら⁸⁾；それぞれの位置は図-1)を基にすると、

今切口周辺海岸における年平均有義波高、有義波周期はそれぞれ 1.3 m 、 7.3 s となる。底質粒径は $0.2 \sim 0.3 \text{ mm}$ である。

解析に用いたデータは図-2に示す領域(沿岸方向約 2 km 、岸沖方向約 1.2 km)において1963年～1994年までに取得された25枚の深淺データである。今切口における導流堤の建設は1954年に始まり⁷⁾、1973年に完成している。1964年以降の導流堤の建設の経緯は図-2に示す通りである。

図-3は、1963年と1992年の深淺図を示したもので、図-4は1969年と1991年に撮影された航空写真を示したものである。富谷ら⁹⁾が示した湖口の漂砂上手側(東側；図面では左側)における堆積が両図からも確認できる。

3. 解析方法

本論文では、地形変化の時間変動を把握するため

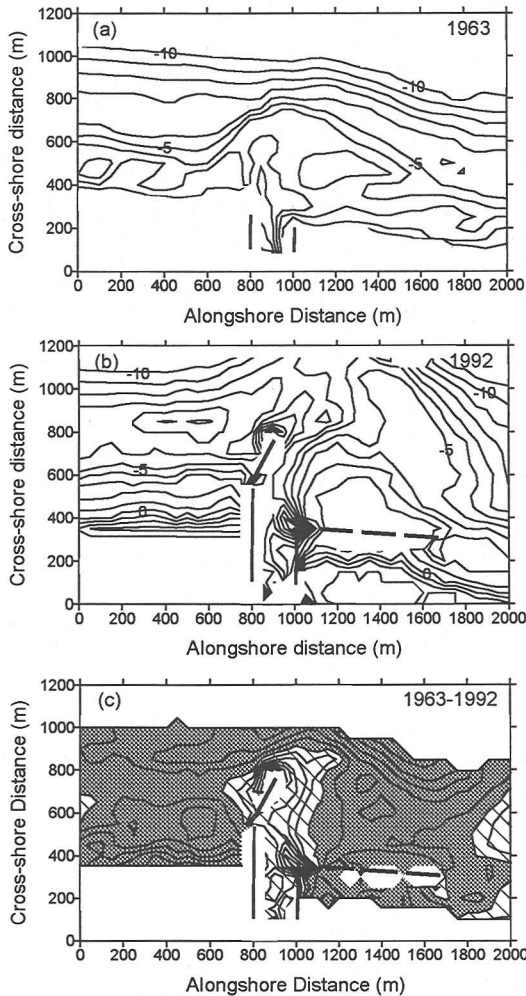


図-3 (a)1963年と(b)1992年の深淺図(工事基準面を基準として)。コンターの間隔は1m。(c)1963年~1992年の地形変化量。堆積領域と侵食領域はそれぞれグレーと斜線で表されている。コンターの間隔は1m。

に、経験的固有関数法(Empirical Orthogonal Function Analysis, EOF解析)と経験的複素固有関数法(Complex Empirical Orthogonal Function Analysis, CEOF解析)とを用いて深淺図の解析を行った。

EOF解析は、不規則な変動から独立したいくつかの変動パターンを見いだす手法で、複雑な変動を少数のいくつかの変動パターンで表現する際に有利な方法である(von Storch and Zwiers⁹⁾, Horel¹⁰⁾。そのため、地形データの解析にも数多く用いられている(例えば、Winant et al.¹¹⁾, Aubrey¹²⁾, 橋本・宇多¹³⁾, 加藤¹⁴⁾, 加藤・吉松¹⁵⁾, Birkemeir¹⁶⁾, Wijnberg and Terwindt¹⁷⁾。地形データの解析においては、

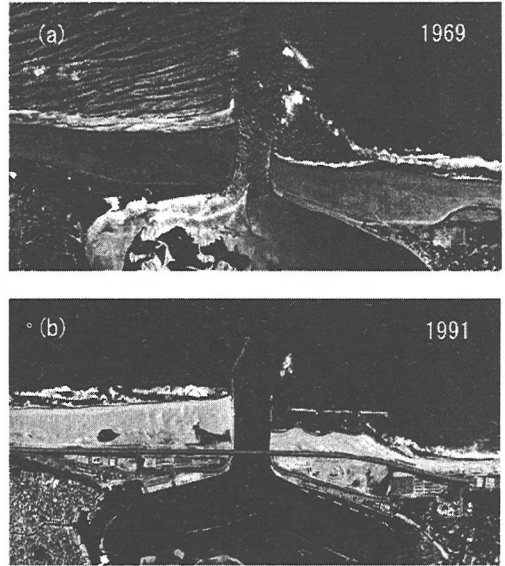


図-4 1969年と1991年に撮影された航空写真

地盤高さは次式のように時間の関数と空間の関数との積の和として表される。

$$z(x, y, t) = \sum_n C_n(t) e_n(x, y), \quad (1)$$

ここで、 $z(x, y, t)$ は地盤高さ、 x は沖方向距離、 y は沿岸方向距離、 t は時間、 $C_n(t)$ は n モードの時間係数、 $e_n(x, y)$ は n モードの固有関数である。鉛直上向きを正と定義しているため、時間係数と固有関数との積が増加することは、その地点でその期間において堆積が生じていることを示している。

CEOFは、EOFが拡張されたもので、EOFがそれぞれのモードでは重複波モードしか表現できないのに対して、CEOFはそれぞれのモードで進行波モードが表現できる。CEOFは、Liang and Seymour¹⁸⁾, 横木ら¹⁹⁾, 北野ら²⁰⁾, Ruessink et al.²¹⁾, Kuriyama and Lee²²⁾, 内山ら²³⁾などによって地形データの解析に用いられている。

CEOF解析では、Liang and Seymour¹⁸⁾と同様に、まず、地盤高さ $z(x, y, t)$ を次式で表される複素地盤高さ $Z(x, y, t)$ に変換する。

$$Z(x, y, t) = z(x, y, t) + i\hat{z}(x, y, t), \quad (2)$$

ここで $\hat{z}(x, y, t)$ は $z(x, y, t)$ のHilbert変換値である。続いて、この複素地盤高さを複素の時間係数と複素の固有関数との積に分解する。

$$Z(x, y, t) = \sum_n (C_{nr}(t) + iC_{ni}(t)) (e_{nr}(x, y) - ie_{ni}(x, y)), \quad (3)$$

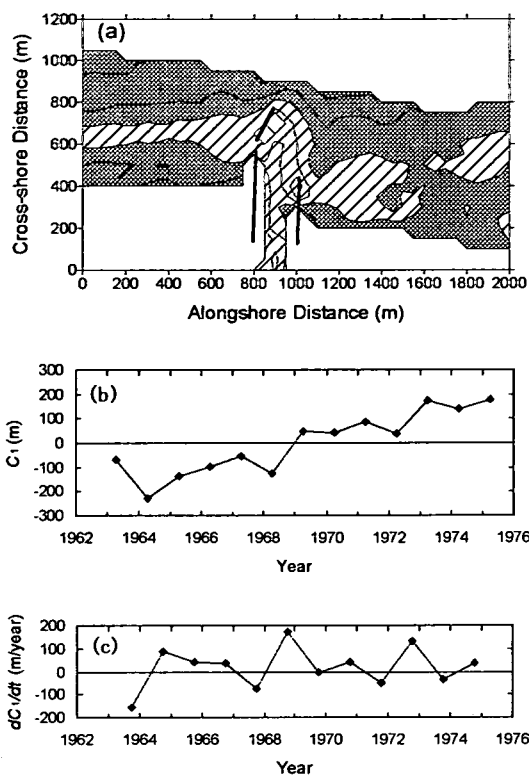


図-5 EOF 解析の解析期間前半におけるモード1の結果。(a)固有関数 e_1 , (b)時間係数 C_1 , (c)時間係数の時間微分 dC_1/dt . 図(a)において正の値の領域と負の値の領域はそれぞれグレーと斜線で表されており、データが存在しない領域は白で表されている。コンターの間隔は0.05.

ここで、 $C_{nr}(t)$ と $C_{ni}(t)$ はそれぞれnモードの複素時間係数の実数部と虚数部であり、 $e_{nr}(x,y)$ と $e_{ni}(x,y)$ はそれぞれnモードの複素固有関数の実数部と虚数部である。

CEOFFにおいてnモードで表される地盤高さの変動 $z_n(x,y,t)$ は固有関数の共役複素関数を用いて以下の式で再合成される。

$$z_n(x,t) = \text{Re}\left\{ \left(C_{nr}(t) + iC_{ni}(t) \right) \left(e_{nr}(x,y) - ie_{ni}(x,y) \right) \right\} \quad (4)$$

本論文では、EOF解析においてもCEOFF解析においても、予め平均値を取り除いた地盤高さに対してそれぞれの手法を適用した。

これらの二つの解析以外に、解析領域をいくつか領域に分割し、それぞれの土量変化を求め、その時間変化を調べた。

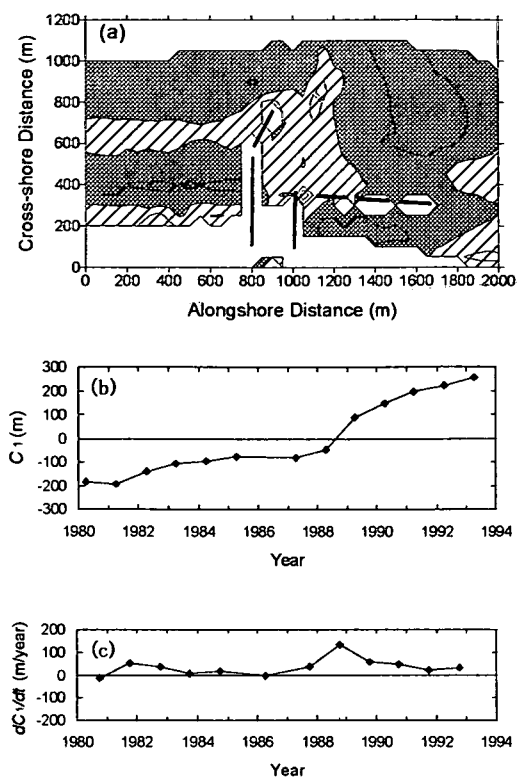


図-6 EOF 解析の解析期間後半におけるモード1の結果。詳細は図-5と同様。

4. 解析結果と考察

(1) 経験的固有関数法 (EOF 解析) の解析結果および考察

解析期間 (1963年~1993年) を二つの期間 (1963年~1975年, 1980年~1993年) に分け、それぞれに対して EOF を適用した。図-5は、そのうちの前半の期間のモード1の解析結果を示したもので、図-6は後半の期間のそれらを示したものである。前半、後半の期間におけるモード1の寄与率はそれぞれ32%、41%である。

解析期間の前半では、図-5(b)に示されているように時間係数 C_1 はほぼ単調に増加している。これは、この期間の地形変化がほぼ一定であったことを示している。すなわち、潮流によって生じた深み (tidal channel) では侵食が生じている一方で、その侵食領域の西側のやや沖側の領域では堆積が生じている。さらに、湖口の東側では汀線付近で堆積が生じている。

解析期間の後半においても、前半と同様の地形変

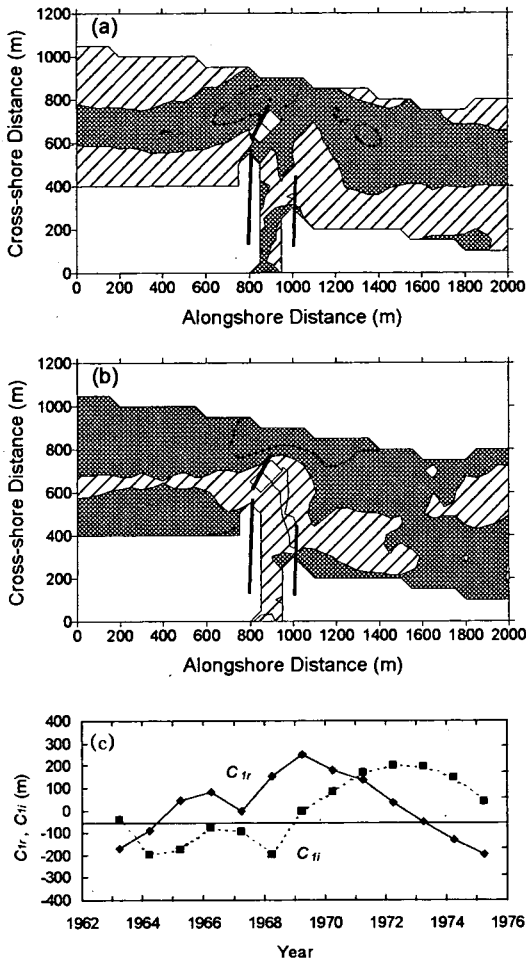


図-7 CEOF 解析の解析期間前半におけるモード1の結果。(a)複素固有関数の実数部 e_{1r} , (b)複素固有関数の虚数部 e_{1i} , (c)複素時間係数の実数部 C_{1r} と虚数部 C_{1i} . 図(a)と(b)において正の値の領域と負の値の領域はそれぞれグレーと斜線で表されており, データが存在しない領域は白で表されている. コントラの間隔は0.05.

化が生じている。ただし、図-5(c)と図-6(c)との比較から分かるように時間係数の変化率は前半に比べて後半の方が一定であり、後半では前半に比べて地形変化速度が一定であったことがわかる。解析期間の後半では、tidal channel における侵食領域が前半と比べると西側および沖側に移動し、その西側には広範な堆積領域が形成されている。さらに、湖口東側の汀線付近では侵食が生じていたのに対して、湖口西側の離岸堤背後では堆積が生じている。

モード1の寄与率はやや小さいものの、図-5、

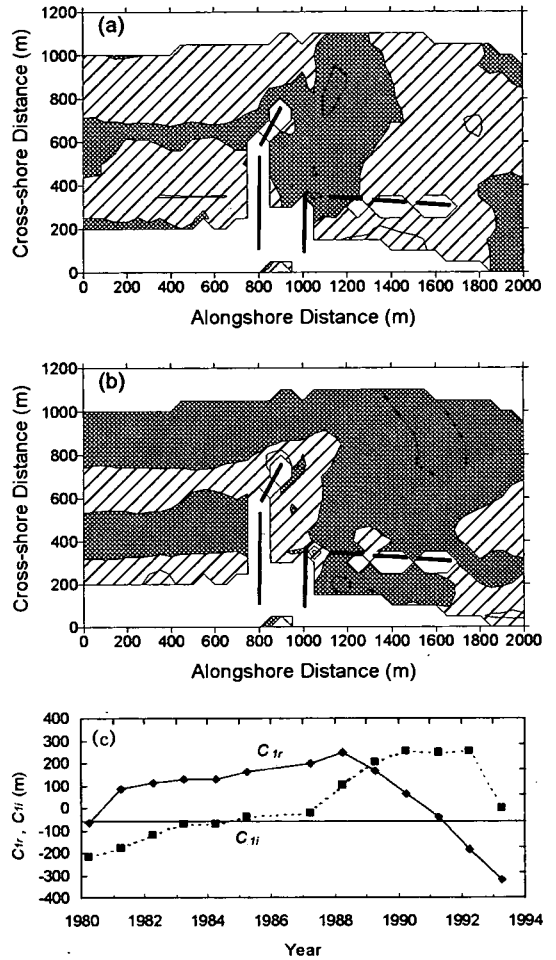


図-8 CEOF 解析の解析期間後半におけるモード1の結果。詳細は図-7と同様。

6に示されている固有関数の分布は図-3(c)の1963年から1992年までの地形変化量の分布と良好な対応を示しており、モード1はここでの地形変化を代表していると考えられる。

(2) 経験的複素固有関数法 (CEOF 解析) の解析結果および考察

続いて、進行波モードの解析に有利な CEOF を浅浅データに適用し、浅瀬の移動等を検討した。図-7、8は、それぞれ解析期間前半、後半におけるモード1の解析結果を示したものである。それぞれの期間におけるモード1の寄与率は、43%、50%である。CEOFのモード1で表される地形変化は、EOFのモード1とモード2で表される地形変化の合成に似ている。それぞれの期間における CEOF のモード

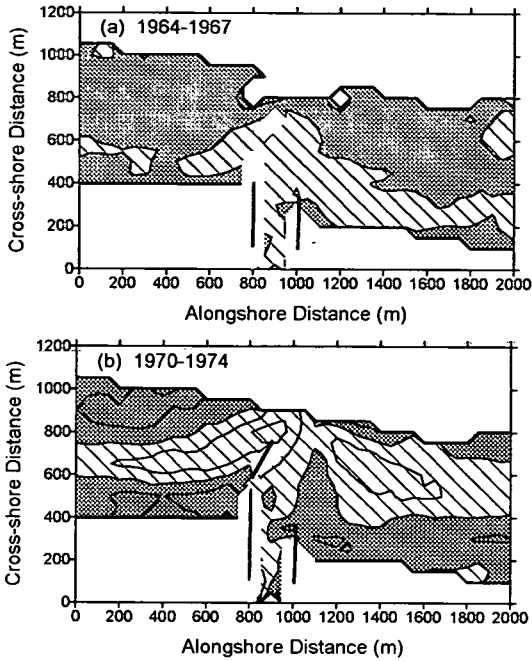


図-9 CEOF 解析の解析期間前半におけるモード1の結果を基にした(a)1964年～1967年、(b)1970年～1974年の地形変化。堆積領域と侵食領域はそれぞれグレーと斜線で表されている。コンターの間隔は1m。

1の固有関数と時間係数の虚数部は、EOFのモード1の固有関数、時間係数(図-5, 6)と似ており、CEOFのモード1の固有関数と時間係数の実数部は、本論文では示してはいないけれどもEOFのモード2の固有関数、時間係数と似ている。このように、CEOFのモード1の固有関数と時間係数が、EOFのモード1と2のそれらと似ていることはKuriyama and Lee²²⁾によっても示されている。

CEOFのモード1はEOFのモード1だけでは表せなかった侵食領域や堆積領域の移動を示している。図-9は、それぞれ、CEOFのモード1で表された解析期間前半の1964年～1967年、1970年～1974年の地形変化を示したもので、図-10は、解析期間後半の1981年～1985年、1989年～1992年の地形変化を示したものである。前半では、湖口の両側の汀線近傍で生じていた侵食領域が沖側へ移動している。一方、後半では、湖口前面および西側において侵食領域が西および沖に拡大するとともに、堆積領域が西および岸側に移動している。

図-11は解析期間前半におけるモード2の解析結果を示したものであり、図-12は解析期間後半の

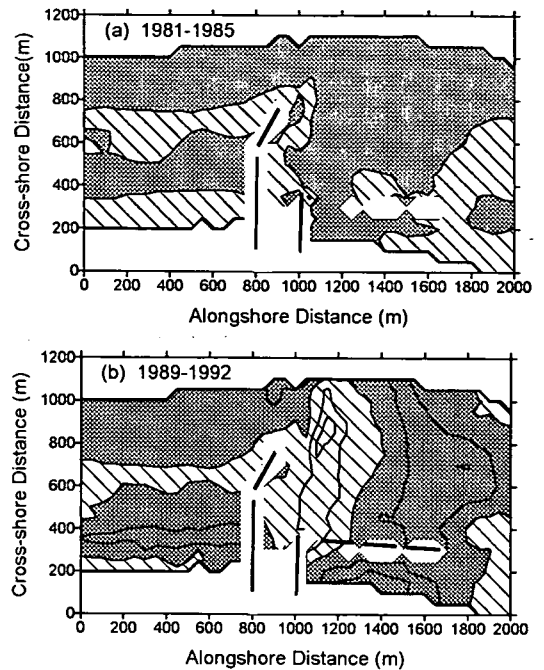


図-10 CEOF 解析の解析期間後半におけるモード1の結果を基にした(a)1981年～1985年、(b)1989年～1992年の地形変化。詳細は図-9と同様。

それらを示したものである。それぞれの寄与率は、21%と18%である。図-13には、モード2で表された解析期間前半の1967年、1970年、1972年の地形を、図-14には、解析期間後半の1987年、1989年、1991年の地形を示した。解析期間前半では、地盤高さがプラスで示される、すなわち地盤が平均地形より上方の浅瀬が湖口の両側で形成され、これが岸向きに移動している。しかしながら、解析期間後半では、湖口西側の領域では依然として浅瀬は岸向きに移動しているものの、湖口東側の浅瀬は沖向きに移動している。

Fitzgerald²⁴⁾はアメリカの構造物のないいくつかのinletにおいて浅瀬が岸向きに移動することを報告しており、この岸向き移動は岸向きの流れを生じられる上げ潮(flood tide)と波によって生じていると推測した。今切口においては、導流堤建設後、より長い東導流堤の東側において潮流が弱くなり、よって、相対的に沖向きの戻り流れと導流堤近傍で沖向きに流れの方向を変える西向きの沿岸流とが強くなったと推測される。これが、浅瀬の沖向き移動を引き起こしていると考えられる。

図-11, 12から判断すると、この浅瀬の移動の周期は8～10年であると考えられ、Fitzgerald²⁴⁾が報

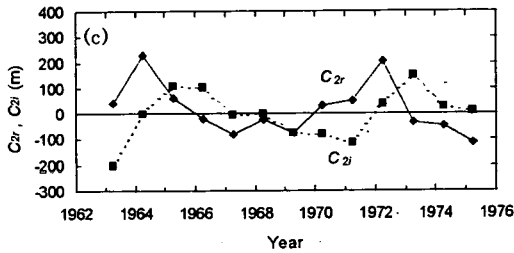
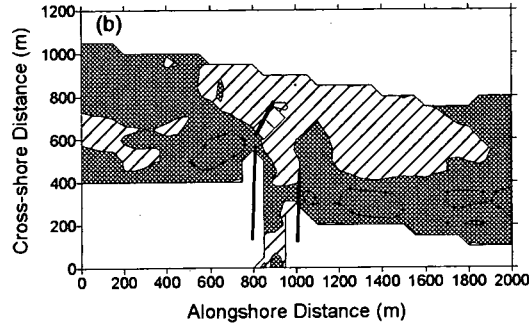
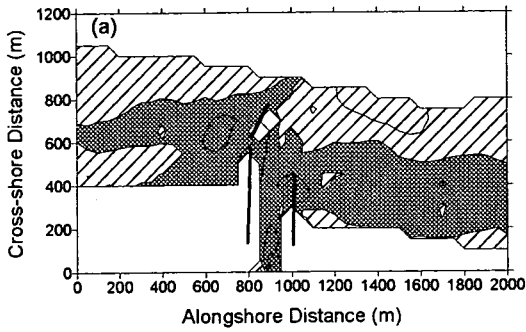


図-11 CEOF解析の解析期間前半におけるモード2の結果。(a)複素固有関数の実数部 e_{2r} , (b)複素固有関数の虚数部 e_{2i} , (c)複素時間係数の実数部 C_{2r} と虚数部 C_{2i} 。図(a)と(b)において正の値の領域と負の値の領域はそれぞれグレーと斜線で表されており、データが存在しない領域は白で表されている。コンターの間隔は0.05。

告したアメリカのメイン州、Popham 海岸、Kennebec 川河口における浅瀬の移動周期5~7年に比べるとやや長い結果となっている。

(3) 領域別の土量変化

最後に、今切口周辺の地形変化を定量的に検討する。前述の EOF 解析によって求めたモード1の固有関数の面的分布(図-5(a), 6(a))を基に、解析領域を図-15に示す9つの領域に分け、それぞれの領域における土量変化を調べた。領域A~Cは湖口

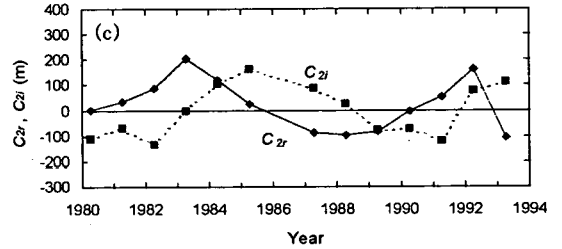
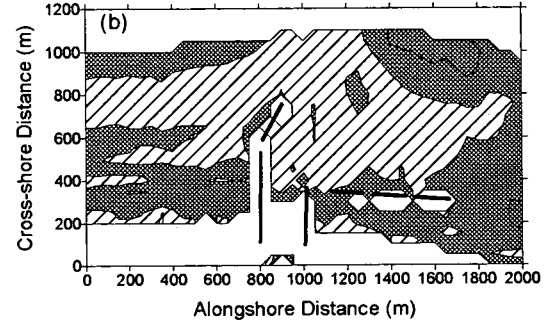
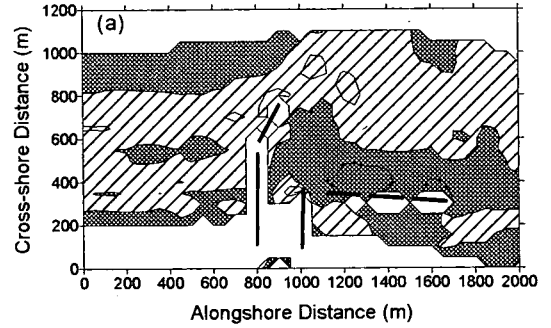
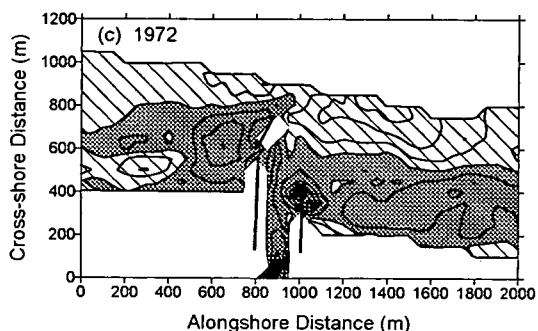
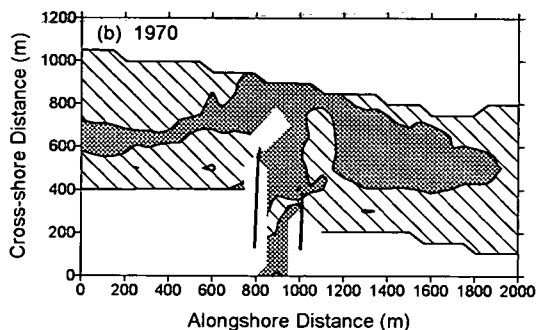
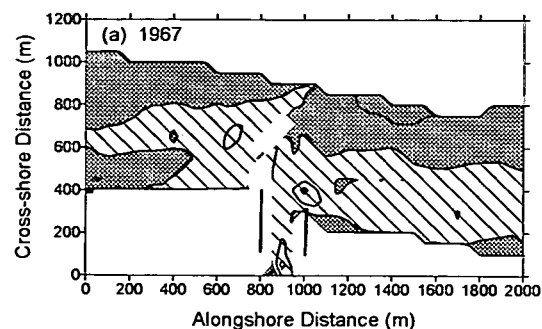


図-12 CEOF解析の解析期間後半におけるモード2の結果。詳細は図-11と同様。

の東側、すなわち漂砂上手側に位置しており、領域AとCはモード1における堆積領域、領域Bは侵食領域に対応している。領域Dはtidal channelを含んでおり、モード1の侵食領域に対応している。領域Eは湖口西側の離岸堤岸側に位置しており、領域F~Hは離岸堤沖側に位置している。領域Iは離岸堤西側の領域である。

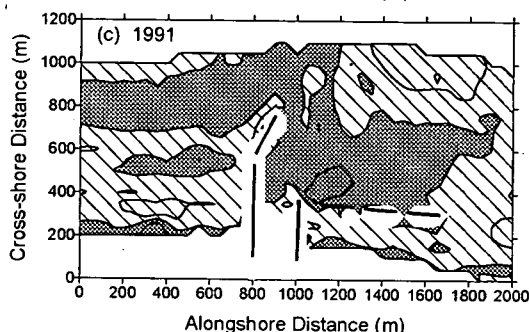
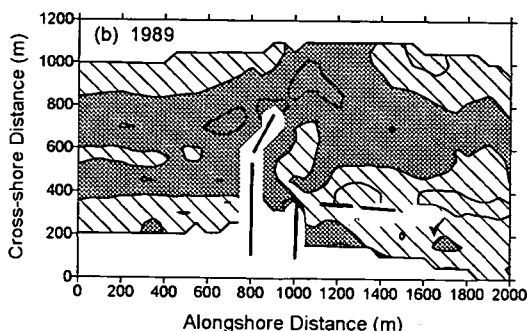
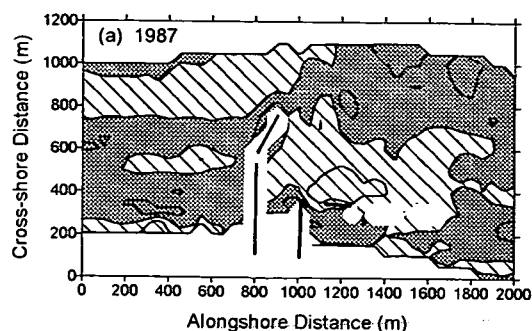
図-16は1963年の土量を基にしたときの各領域の土量変化を示したものである。ただし、領域Hについては1973年を基準としている。表-1は、解析期間の前、後半における、最小二乗法より求めた各領域の年間の平均変化土量を示している。この表よりtidal channelの位置している領域Dでは侵食が生じ、しかもその量が増加していることが分かる。これは、tidal channelの水深が増大し、その増大量



図一13 CEOF 解析の解析期間前半におけるモード2の結果を基にした(a)1967年, (b)1970年, (c)1972年の地形. 平均地形よりも堆積側および侵食側の領域はそれぞれグレーと斜線で表されており, データが存在しない領域は白で表されている. コンタナーの間隔は0.5m.

が増加していることを示している. Tidal channel の水深の増大は, 松田⁷⁾によって報告された1960年~1980年にかけての湖口内での水深の増大と傾向が一致するものであり, また, van Rijn²⁵⁾によって示された導流堤建設に伴う地形変化とも一致する.

Tidal channel における水深増大および水深増大量の増加は, 潮流の位置が固定されることによって生じたと考えられる. 導流堤が無い場合は潮流の位置は不安定で, よって, 湖口周辺海岸において潮流が集中しているところでは侵食が生ずるものの, そ



図一14 CEOF 解析の解析期間後半におけるモード2の結果を基にした(a)1987年, (b)1989年, (c)1991年の地形. 詳細は図一13と同様.

の流れが他の場所へ移動してしまうとそこでは堆積が生ずることになり, ある領域で侵食が継続して生ずることは少ないと考えられる. それに対して, 導流堤が建設され潮流の位置が固定されると, その領域は常に潮流にさらされることになり, ある平衡状態に達するまで侵食が発生する. さらに, 潮流の位置がより固定されると tidal channel における水深増大量が増加すると考えられる. 解析期間の前半と後半とを比較してみると, 前半においては導流堤は建設途中であったものの, 後半はじめには導流堤の建設は終了しており, 潮流の位置は, 後半の方がより固定されていたと考えられる. EOF の解析結果である図一5と図一6とを比較すると, 時間係数の変化

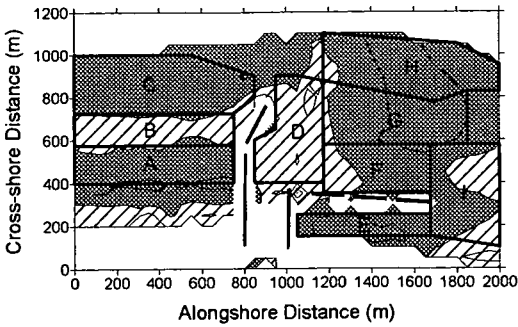


図-15 9つの領域の範囲と EOF 解析の解析期間後半における固有関数

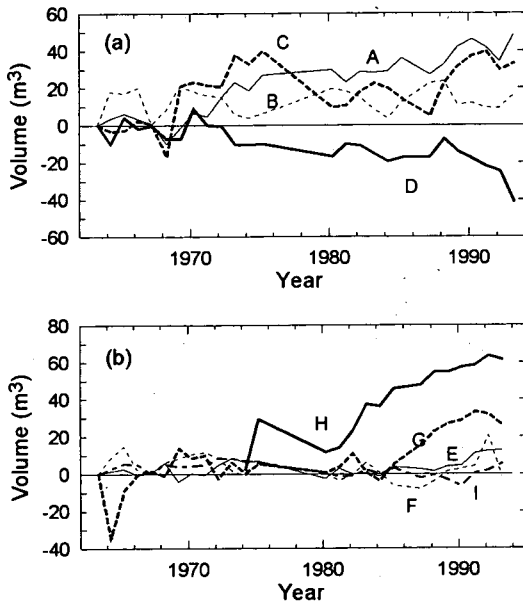


図-16 各領域における土量変化

率 dC_i/dt は前半に比べて後半の方が小さい、すなわち、後半の方がより一定な地形変化が生じており、これは潮流の位置が後半の方がより固定されていたことを示唆していると言える。

領域 D における侵食の原因としては、導流堤建設に伴う土砂供給量の減少も考えられる。しかしながら、供給土砂量の減少が主要因であれば下手へ拡大すると考えられる侵食域は図-16 に示されるように領域 E, F, G へは拡大せず領域 D にとどまっている。よって、領域 D の侵食の主要因は潮流であると考えられる。

今切口の漂砂上手側である湖口東側、すなわち領域 A, B および C における堆積量は減少している。

表-1 解析期間の前後半における各領域の年間平均堆積量 ($\times 10^4 \text{ m}^3/\text{year}$)

領域	1963年-1975年	1980年-1993年
A	2.01	1.46
B	-0.30	-0.21
C	3.99	1.94
D	-0.57	-1.19
E	0.54	0.98
F	-0.08	0.58
G	1.62	2.74
H	—	3.89
I	0.49	0.06
A+B+C	5.70	3.19
F+G	1.54	3.32
計(領域 H を除く)	7.70	6.36

一方、漂砂下手側の領域 E, F, G における堆積量は増加している。さらに、堆積はこれらの領域において時間差を持って生じており、図-16 から分かるように、領域 H, G, F, I の順番で堆積が生じている。これは、底質が tidal channel 西側の引き潮デルタの西および沖の縁にまず堆積し、それが次第に西および岸側へ拡大していったものと考えられる。湖口での水深は7~8m であるのに対して、地形変化は水深13m 付近まで生じているので⁵⁾、導流堤先端を回って西へ移動した底質が港口および tidal channel の沖を回ってその西の引き潮デルタにまで移動することは十分に起こりうる。なお、堆積域の西および岸への拡大は、図-10 から見てとれる。

領域 H においても、領域 G と同様に後半の方が前半に比べて堆積量が増加したと仮定すると、9つの解析領域に1年間に堆積する土量は解析期間中ほぼ一定で、約 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{year}$ であったと推定される。富谷ら⁵⁾の解析結果と比較すると、本論文における湖口東側の解析領域が富谷ら⁵⁾の領域よりも狭いために湖口東側の堆積土量に関しては富谷ら⁵⁾の値 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{year}$ よりも本論文の値 $5.7 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{year}$ (1963年-1975年、表-1)の方が小さくなっている。したがって、inlet system に捕捉された底質の量は、実際には $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{year}$ よりも数万 m^3/year 多かったと推察される。

漂砂上手側における堆積量の減少は、Tomlinson¹⁾によっても報告されており、これは湖口東側の地形が平衡状態に近づいたことを示していると言える。湖口東側の堆積量が減少すると、湖口の導流堤先端を回って湖口西側へ供給される土砂量が増大する。

その結果、表-1に示されているように湖口西側の領域における堆積量が増大し、前述したように本論文の解析領域全体での堆積量は解析期間中はほぼ一定となる。このことは、湖口東側の地形が平衡状態に達した後でも、解析領域より漂砂下手側の西側海岸への土砂供給量が増えていないことを示している。連続する砂浜海岸において突堤が建設され、突堤の漂砂上手側の地形が平衡状態に達すると、突堤先端を回って下手側海岸に供給される土砂量は増加する。しかしながら、感潮湖湖口に建設された導流堤周辺では、漂砂上手側の地形が平衡状態に達して湖口の導流堤先端を回る土砂量が増大しても、その土砂は引き潮デルタが平衡状態に達するまでデルタに捕捉され、結果として、デルタよりも下手側の海岸に供給される土砂量はすぐには増えないと言える。

続いて、今切口沖側のデルタがどこまで発達しているかを Walton and Adams²⁶⁾の成果を基に検討した。Walton and Adams²⁶⁾は、アメリカの inlet における引き潮デルタに堆積した底質の量 $V(m^3)$ と潮汐プリズム $P(m^3)$ との関係を調べ、高波浪の来襲する海岸 (exposed beach) における平衡状態での両者の関係が次式で表されることを示した。

$$V = 0.0053P^{1.23} \quad (5)$$

ここでは、高波浪の定義は波高を H 、周期を T としたとき $H^2T^2 > 30 \text{ m}^2\text{s}^2$ である。前述したように今切口周辺海岸では平均有義波高が 1.3 m、有義波周期が 7.3 s なので、 H^2T^2 は約 $90 \text{ m}^2\text{s}^2$ となり、今切口周辺海岸は高波浪の来襲する海岸に分類される。

引き潮デルタに堆積している土砂の量は Walton and Adams²⁶⁾と同様に inlet の影響のない地形を基準として求めた。具体的には、1963年における測量範囲の沿岸方向境界の断面、すなわち、沿岸方向距離 0 m および 2000 m の断面を inlet の影響のない地形と仮定し、両測線における汀線位置を基に両者に挟まれた間の汀線位置を内挿した。断面は、両境界における断面地形の平均とするとともに、平均断面が求まった範囲よりも岸側、沖側の地形は、平均断面の岸側端、沖側端の海底勾配より外挿して求めた。

このようにして求まった inlet の影響のない仮想の地形を 1992 年の測量結果とともに図-17に示す。解析範囲内における 1992 年の堆積土量は約 $430 \times 10^4 \text{ m}^3$ である。一方、式(5)より求まる平衡状態におけるデルタ上の土砂の堆積量は約 $500 \times 10^4 \text{ m}^3$ である。解析領域がデルタ全てを包含しているわけではないことを考慮すると、デルタ上に堆積する土砂の量はほぼ平衡状態に達したものと考えられる。

この結果は、tidal channel 横の堆積領域が次第に

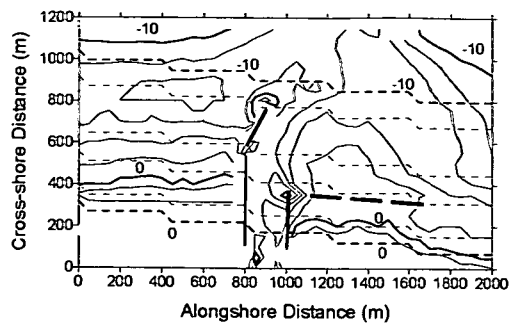


図-17 Inlet の影響のない仮想地形 (破線) と 1992 年の実測地形 (実線)。コンターの間隔は 2m。

西および岸向きに移動し、図-10(b)に見られるように、この堆積領域がほぼ汀線に到達したことに対応していると考えられる。

5. おわりに

感潮湖湖口の導流堤の建設中および建設後の30年間に取得された深淺データを解析したところ以下のことが明らかとなった。導流堤建設後、引き潮によって生じた深み (ebb tidal channel) が、解析期間中深くなり、しかも、この領域における侵食量は増加している。この侵食量の増加、すなわち、tidal channel の水深増加量の増加は潮流の位置が安定し、その領域が常に潮流にさらされたことによると考えられる。

解析期間の前半においては、湖口両側の浅瀬は岸向きに移動していたけれども、解析期間後半では、湖口の漂砂上手側では浅瀬が沖向きに移動した。これは、導流堤建設後、より長い東導流堤の東側における潮流の影響が弱くなり、よって、沖向きの戻り流れと導流堤近傍で沖向きに流れの方向を変える西向きの沿岸流とが相対的に強くなったためであると考えられる。

湖口の漂砂上手側では堆積が生じているものの、堆積量は時間とともに減少している。しかしながら、下手の海岸に供給される土砂量は増加していない。これは、導流堤を通過した土砂が引き潮デルタに捕捉されたためである。

デルタの堆積量は次第に西および岸側に拡大している。ただし、このデルタに捕捉された土砂量を求め Walton and Adams²⁶⁾によって得られた平衡状態における引き潮デルタに捕捉された土砂量と比較したところ、1992年の時点で、デルタに捕捉された土砂の量はほぼ平衡状態に達していると考えられる。

謝辞：最後に、深淺データを提供して下さった静岡県の方皆さん、本論文の作成に当たってご助言いただいた当研究

所の加藤監事，ならびにデータ解析を手伝って下さった藤井まなみさん（元松江工業高等専門学校，漂砂研究室実習生）に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Tomlinson, R. B. : Processes of sediment transport and ebb tidal delta development at a jettied inlet, *Proc. Coastal Sediments 91*, ASCE, pp.1404-1418, 1991.
- 2) Byrnes, M. P., and Hiland, M. W. : Large-scale sediment transport patterns on the continental shelf and influence on shoreline response: St. Andrew Sound, Georgia to Nassau Sound, Florida, USA, *Marine Geology*, Vol. 126, pp.19-43, 1995.
- 3) Kana, T. W. : A mesoscale sediment budget for Long Island, New York, *Marine Geology*, Vol. 126, pp.87-110, 1995.
- 4) Liu, J. T., and Hou, L. H. : Sediment trapping and bypassing characteristics of a stable tidal inlet at Kaohsiung Harbor, Taiwan, *Marine Geology*, Vol. 140, pp.367-390, 1997.
- 5) 富谷 雄，宇多高明，酒井佳治，山本武司：浜名湖今切口導流堤周りの海浜変形，第34回海岸工学講演会論文集，pp.367-371，1987.
- 6) 菊地健三，宇多高明，川森 晃：能取湖湖口における漁港建設に伴う海浜地形変化，海岸工学論文集，第37巻，pp.469-473，1990.
- 7) 松田義弘：浜名湖の海洋環境 一湖口地形変化による湖内潮汐の経年変化一，沿岸海洋研究ノート，第20巻，第2号，pp.178-188，1983.
- 8) 永井紀彦，菅原一晃，橋本典明，浅井 正：全国港湾海洋波浪観測20か年統計，港湾技研資料，No.744，247p.，1993.
- 9) von Storch, H., and Zwiers, F. : *Statistical analysis in climate research*, Cambridge University Press, Cambridge, 484 p., 1999.
- 10) Horel, J. D. : Complex principal component analysis: theory and examples, *J. Climate and Applied Meteorology*, Vol. 23, pp.1600-1673, 1984.
- 11) 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.
- 12) Aubrey, D.G. : Seasonal patterns of onshore/offshore sediment movement, *J. Geophys. Res.*, Vol.84, No.C10, pp.6347-6354, 1979.
- 13) 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.
- 14) 加藤一正，田中則男，瀧田琢夫：前浜の二次元的地形変化と潮位・波について，第28回海岸工学講演会論文集，pp.207-211，1981.
- 15) 加藤一正，吉松 晃：三次元の経験的固有関数法による深淺図解析法，港湾技術研究所報告，第23巻，第2号，pp.27-47，1984.
- 16) Birkemeier, W.A. : Time scales of nearshore profile changes, *Proc. 19th Coastal Eng. Conf.*, ASCE, pp.1507-1521, 1984.
- 17) Wijnberg, K.M. and Terwindt, J.H.J. : Extracting decadal morphological behaviour from high-resolution, long-term bathymetric surveys along the Holland coast using eigenfunction analysis, *Marine Geology*, Vol. 126, pp.301-330, 1995.
- 18) Liang, G., and Seymour, R. : Complex principal component analysis of wave-like sand motions, *Proc. Coastal Sediments 91*, ASCE, pp.2175-2186, 1991.
- 19) 横木裕宗，三村信男，佐藤圭輔：主成分分析を用いた大洗港周辺の海浜地形解析，海岸工学論文集，第45巻，pp.571-575，1998.
- 20) 北野利一，中野 晋，岡 彰紀，間瀬 肇：主成分解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.
- 21) Ruessink, B. G., Van Enckevort, I. M. J., Kingston, K. S., and Davidson, M. A. : Analysis of observed two- and three-dimensional nearshore bar behaviour, *Marine Geology*, Vol. 169, pp.161-183, 2000.
- 22) Kuriyama, Y., and Lee, J. H. : Medium-term beach profile change on a bar-trough region at Hasaki, Japan, investigated with complex principal component analysis, *Proc. Coastal Sediments 01*, ASCE, pp.959-968, 2001.
- 23) 内山雄介，栗山善昭，波田野敦史：蒲生干潟前面海浜地形の中期変動特性，海岸工学論文集，第48巻，pp.601-605，2001.
- 24) Fitzgerald, D. M. : Sediment bypassing at mixed tidal inlets, *Proc. 18th Coastal Eng. Conf.*, ASCE, pp.1094-1118, 1982.
- 25) van Rijn, L. C. : Sand Coast, *Principles of coastal morphology*, van Rijn, Aqua Publications, Amsterdam, pp.4.1-4.540, 1998.
- 26) Walton, Jr. T. L., and Adams, W. D. : Capacity of inlet outer bars to store sand, *Proc. 15th Coastal Eng. Conf.*, ASCE, pp.1919-1937, 1976.

(2002. 6. 14 受付)

MORPHOLOGICAL CHANGE AROUND JETTIES AT IMAGIREGUCHI INLET IN HAMANA LAKE

Yoshiaki KURIYAMA, Yusuke UCHIYAMA, Satoshi NAKAMURA and
Tomokazu NAGAE

A 30-year bathymetric data set obtained during and after construction of jetties at the entrance of Imagireguchi Inlet, Japan, was analyzed. After construction of the jetties, the tidal channel deepened. In the first analysis period from 1983 to 1975, shoals formed on both sides of the jetties and moved shoreward. In the second period from 1980 to 1993, however, the shoal on the up-drift side moved seaward. Although the accumulation rate on the up-drift side of the jetties decreased with time, the amount of sediment supplied to the down-drift beach did not increase. The volume of sediment stored in the ebb-tidal delta was estimated, and compared with the equilibrium volume.