

深浅図の統計解析による海底地形の追跡

田中 則男*・入江 功**・加藤 一正***・栗山 善昭****

1. ま え が き

砂浜海岸に、防波堤や離岸堤などの構造物を設置したときの海底地形変化を予測することは、海岸、港湾に関係する技術者にとって永年の願いである。そこで、著者らは、海岸構造物が建設される段階で数多く実施されている深浅測量図を全国的に収集し、いくつかの統計的解析方法によって解析を行い、将来予測に役立てるために構造物周辺における海底地形の一般的特性を調べた。

従来は、深浅図の統計的解析法として重ね合わせ法が用いられてきた。しかしながら、この方法では深浅図データが多い場合複雑となり、海底地形変化を正確に把握することが困難であった。そこで今回は、海底地形変化を容易に、しかも正確に把握できる統計的解析法を用いて、深浅図を解析した。

本報告は、主として日本海側の港湾周辺の海底地形変化について、これまで明らかにされた成果のいくつかを発表するものである。

2. 深浅図の統計的解析法

今回の深浅図の解析は、二つの方法によった。一つは、海底地形の長期的な変化を知るための、水深変化のトレンド計算であり、もう一つは、海底地形変化を空間と時間に分離し、それらの関数の積和によって表現する経験的固有関数解析である。なお、計算は電子計算機を使用するため、デジタル化してあるデータを用いた。

(1)トレンド計算

トレンド計算は、ある測点の水深変化を最小自乗法で直線近似し、長期的な海底地形変化を求めるものである。すなわち、ある時間 t における水深を

$$\hat{h}(x,y,t)=a(x,y)\cdot t+b(x,y) \cdots \cdots (1)$$

で近似する。ここに、 $\hat{h}(x,y,t)$ は格子点 (x,y) の直線近似による水深を表わし、 $a(x,y)$ は直

線の傾きを、 $b(x,y)$ は $t=0$ のときの水深を表わす。水深は下方を正にとってあるので、求まった $a(x,y)$ が正ならば、その地点は解析期間中、長期的には侵食傾向であり、 $a(x,y)$ が負ならば、堆積傾向にあることを意味する。

(2) 経験的固有関数法による解析

この解析は、水深を時間の関数と場所の関数の積として表わし、海底地形変化をいくつかの地形変化の重ね合わせとして捕えるものである。すなわち、水深を

$$h(x,y,t)=\sum_n C_n(t)\times e_n(x,y) \cdots \cdots (2)$$

で表現する。このうち、 $e_1(x,y)$ はモード 1 と呼ばれる成分で、海底地形変化を構成する地形変化のうち、実際の海底地形変化に対する $C_1(t)\times e_1(x,y)$ で表わされる地形変化の割合が、一番大きい成分である。今後、この割合を寄与率と呼ぶと、寄与率の大きい順に、モード 2、モード 3、・・・と続く。

従来までの計算方法だと、測点の違う水深データ間の相関から固有関数を求めていたので $(n_x \times n_x)$ の行列計算 (n_x : 測点数) を行う必要があった。しかし、この方法では計算機容量、時間が多大になりすぎ、実際に解析することがほとんど不可能であった。そこ

表-1
金沢港の
データ

測量年月
1964. 10
1965. 10
1966. 10
1968. 10
1969. 10
1970. 10
1976. 8
1976. 10
1977. 8
1977. 10
1978. 7
1978. 10
1979. 9
1980. 8
1980. 10
1981. 7
1981. 11

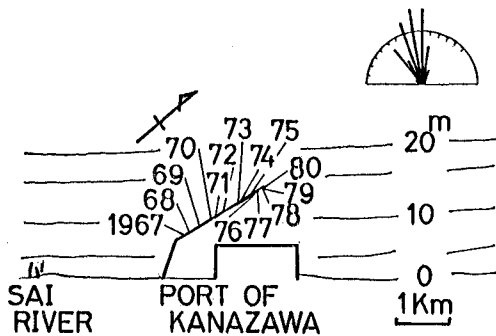
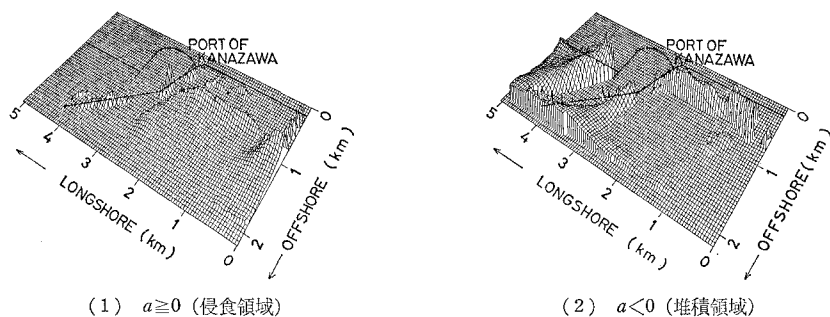


図-1 金沢港の海底地形

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 海洋水理部長
** 正会員 運輸省港湾技術研究所 水工部 漂砂研究室長
*** 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所 水工部 高潮津波研究室長
**** 正会員 運輸省港湾技術研究所 水工部 漂砂研究室

図-2 トレンド計算による $a(x, y)$ の分布図 (金沢港)

で、従来と逆に、測量年月の違う水深データ間の相関から固有関数を求める⁷⁾。すると、 $(n_t \times n_x)$ の行列計算(n_t : 測量回数)を行えば良いことになる。一般に $n_t \ll n_x$ であるので、今回の方法が圧倒的に有利である。例えば、以下に示す福井港のケースでは、 $n_x = 3,927$, $n_t = 12$ であるので、行列に必要な計算機容量だけで従来の方法では約 15,400 Kwords になるのに対し、新しい方法では 1 Kwords 以下ですむことになる。

3. 水深変化のトレンド計算による構造物周辺の海底地形の長期的変化

(1) 金 沢 港

図-1に、金沢港周辺の海底地形、防波堤の建設状況⁴⁾及び波のデータ⁸⁾を示す。図中の防波堤近傍の数字と細い実線は、各年度末における防波堤の先端位置を示したものである。図の右上は福井港で観測された波浪データを基に計算した方向別の波のエネルギーの分布を表わしたものである。金沢港と福井港は 70 km しか離れておらず、海岸線の向きもほぼ等しいことから、金沢港の波のデータとして福井港の波のデータを用いた。そのデータを用いて金沢港におけるエネルギー平均波向を求めると、波は海岸線に対してやや南よりから入射することになる。恒流は南から北へ向かっている。港の西側には犀川が存在してい

るが、流量が少ないので港に与える影響は少ないと考えられる⁹⁾。

トレンド計算の解析に用いた深浅図データの一覧を表-1に示す。トレンド計算による式(1)の $a(x, y)$ の値を $a \geq 0$ の領域と $a < 0$ の領域に分け、その絶対値を図-2に示す。図-2(1)は $a \geq 0$ の領域(侵食領域)、図-2(2)は $a < 0$ の領域(堆積領域)を示している。図-2(1)では、防波堤直前面で帯状に侵食領域が存在している。防波堤南側の沖合の海底も広域にわたって侵食領域となっている。図-2(2)では、防波堤直前面の侵食領域の南側に堆積領域が存在している。港口、北側護岸前面及び南側海岸の汀線付近でも堆積領域が存在している。

防波堤直前面における侵食領域は、防波

表-2

酒田港の
データ

測量年月

1962.	11
1963.	11
1976.	7
1976.	10
1977.	10
1978.	7
1978.	11
1979.	7
1980.	8
1980.	10
1981.	7
1981.	11

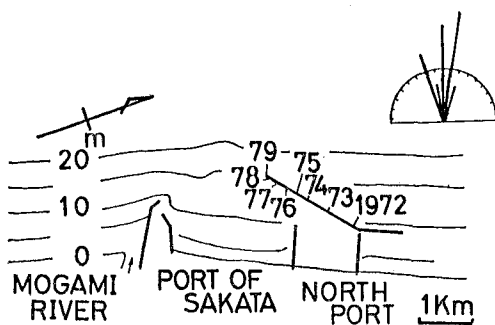
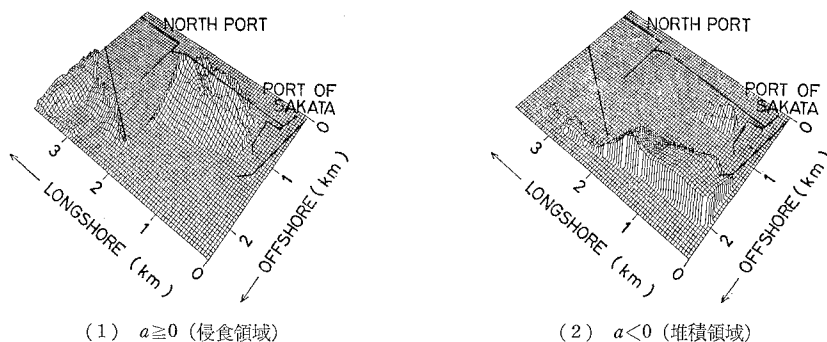


図-3 酒田港の海底地形

図-4 トレンド計算による $a(x, y)$ の分布図 (酒田港)

堤に沿う流れによる洗掘と考えられる。その南側の堆積領域は、北向きに卓越した恒流によって運ばれた底質が防波堤の上手に堆積したものと考えられる。港口における堆積領域は、ラディエーションストレスによって引き起こされた港内へ向かう流れによって運ばれた底質が堆積したものと考えられる。

(2) 酒田港

酒田港の海底地形、防波堤の建設状況⁴⁾及び波のデータ³⁾を図-3に示す。酒田港は、本港と北港より成り、本港のすぐ南に最上川が存在する。最上川の流量は、年平均約 340 m³/sec と多く⁶⁾、海底地形変化に対する最上川からの流下土砂の影響は無視できない。エネルギー平均波向を計算したところ、波は海岸線に対してやや南寄りから入射し、沿岸漂砂は南から北へ向かう傾向が強いと考えられる。

解析に用いたデータの一覧を表-2に示す。トレンド計算による α の値を、図-4に示す。図-4(1)では、北港の防波堤の前面に広域にわたって侵食領域が存在している。北港と本港の間の海岸においても、岸から沖にかけて激しい侵食領域が存在している。図-4(2)では、防波堤先端からその南側にかけて広く堆積領域が存在している。

防波堤前面に見られる侵食領域は、南から北へ向かう沿岸方向の漂砂が防波堤によって阻止され、砂の供給が断たれたことによる影響と、防波堤に沿う流れによる洗掘の両方の原因が考えられる。防波堤先端からその南側にかけての広域の堆積は、沿岸方向の漂砂が防波堤によって阻止され堆積する影響と、最上川の流下土砂の影響によると考えられる。

(3) 福井港

図-5に、福井港における海底地形、防波堤の建設状況⁴⁾及び波のデータ³⁾を示す。福井港は、北側の九頭竜川河口の三国港と、その南に伸びる三里浜海岸の福井港より成っている。九頭竜川は、年平均流量約 170 m³/sec で⁶⁾、その流下土砂の影響は無視できないと考えられる。エネルギー平均方向を計算したところ、波は海

岸線に対してほぼ直角に入射してくる。恒流は南から北へ向かう流れが卓越している。

解析に用いたデータの一覧を表-3に示し、トレンド計算による α の値を図-6に示す。図-6(1)では、防波堤直前面に帯状に侵食領域が存在している。河口前面にも、半球状に侵食領域が存在している。図-6(2)では、防波堤直前面の侵食領域より沖合の領域及び港口に堆積領域が存在している。河口付近では、侵食領域をとり囲むように堆積領域が存在している。

防波堤周辺の海底地形変化の原因は金沢港の場合と同じことが言える。すなわち、防波堤直前面における侵食は、防波堤に沿う流れによる洗掘、その沖合における堆積は、恒流による底質移動が防波堤により阻止される影響、港口における堆積は、ラディエーションストレスによって引き起こされる流れが原因であると考えられる。

(4) 構造物周辺の海底地形における長期的変化の一般的特性

以上の解析結果から、特に防波堤前面に注目してその地形変化の一般的特性をまとめると、

- a) 防波堤直前面では、細い帯状の侵食領域が存在している。これは、防波堤に沿う流れによる洗掘と考えられる。
- b) 防波堤沖合では、金沢、福井を始め、他の数例において堆積傾向が見られる。しかし、酒田では逆に侵食傾向が見られる。これらの傾向は、沿岸方向の漂砂が防波堤によって阻止されること

表-3
福井港の
データ

測量年月	
1966.	9
1967.	10
1969.	9
1970.	9
1972.	10
1976.	5
1976.	9
1979.	6
1979.	18
1980.	6
1980.	10
1981.	7

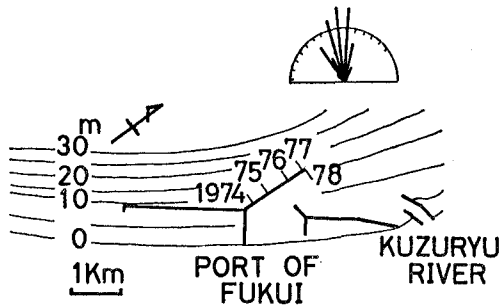


図-5 福井港の海底地形

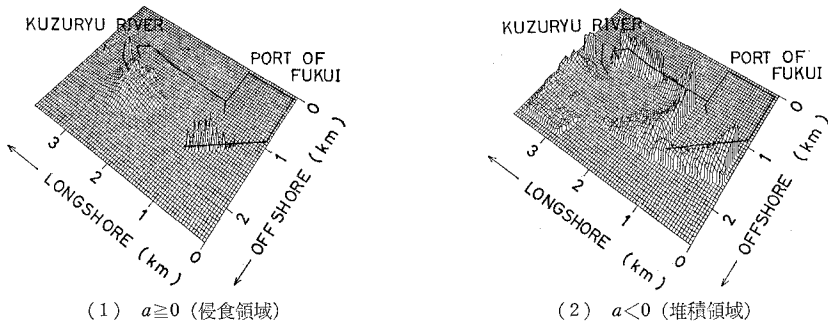
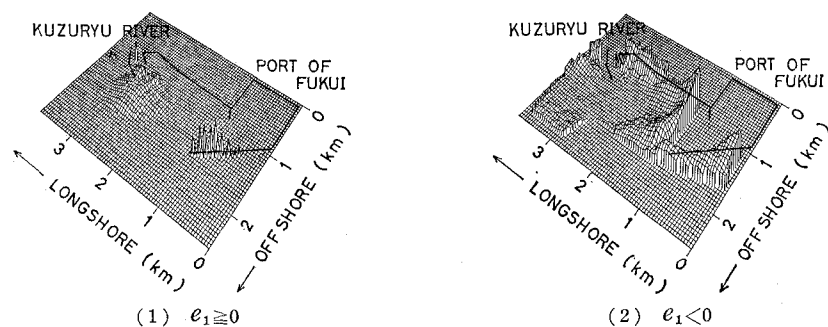
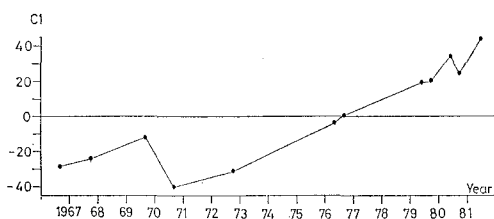


図-6 トレンジ計算による $\alpha(x, y)$ の分布図 (福井港)

図-7 経験的固有関数 e_1 の分布図 (福井港)図-8 時間係数 C_1 の経時変化 (福井港)

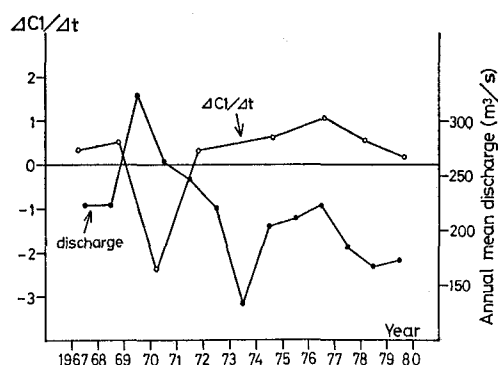
によって起こるもので、侵食傾向と堆積傾向の違いは、沿岸方向の漂砂の卓越方向と防波堤の向きとの関係によると考えられる。すなわち、防波堤の港外側が沿岸方向の漂砂の卓越方向に対して上手にある場合は堆積傾向、下手にある場合は侵食傾向になる。

4. 経験的固有関数法による海底地形変化の把握

前章で述べた様に、トレンド計算によって海底地形変化をかなり把握することができる。しかし、この解析法では、解析期間中における地形変化を一樣に侵食あるいは堆積と考えるため、洪水や高波などによって短期間におこった地形変化がならされてしまう。そこで、経験的固有関数法による解析を行い、短期間におこった急激な海底地形変化を把握すると共に、波浪データなどの他のデータと照らし合わせることによって、その要因を調べた。

解析は、福井港周辺の海底地形について行った。モード 1 (寄与率: 53%) についての結果を図-7, 8 に示す。図-7 は、 $e_1(x, y)$ を $e_1 \geq 0$ の領域と $e_1 < 0$ の領域に分けてその絶対値を立体図化したものであり、図-8 は、時間係数 C_1 の経時変化を示したものである。

計算結果から地形変化を調べるには、 $e_1(x, y)$ と $C_1(t)$ の積として考えなければいけない。すなわち、水深は下方を正にとってあるので、時間係数 C_1 が増加しているときは $e_1 > 0$ の領域で侵食 $e_1 < 0$ の領域で堆積、逆に、 C_1 が減少しているときは $e_1 > 0$ の領域で堆積、 $e_1 < 0$ の領域で侵食が生じていることになる。なお、解析は時

図-9 $\Delta C_1/\Delta t$ と九頭竜川河川流量との関係

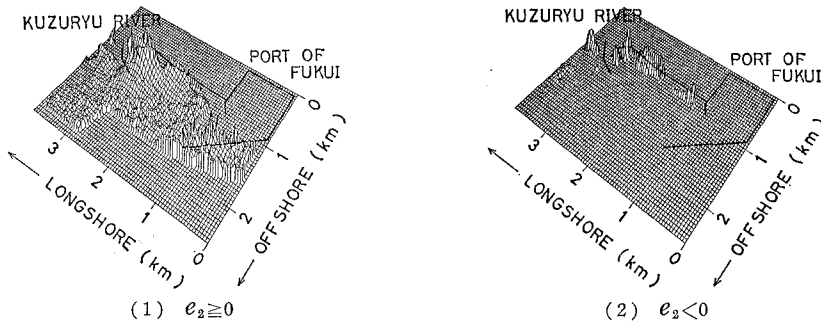
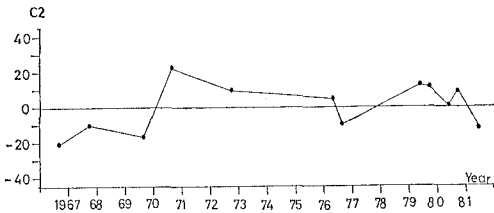
間平均水深からの水深変化について行った。

図-8 より、時間係数 C_1 は 1969 年から 1970 年にかけて一時的に減少しているものの、全体的には増加の傾向を示している。 C_1 のこの経時変化を基にして海底地形変化を論ずると、

a) 図-7 (1) より、九頭竜川の河口付近では全体的に侵食傾向にあるものの、1969 年から 1970 年にかけて一時的に堆積が生じている。

b) 図-7 (2) より、その他の領域、特に防波堤前面と港口では、逆に 1969 年から 1970 年にかけて侵食が生じているものの、全体的には堆積傾向にある。

ここで、特に九頭竜川河口前面の海底地形変化に注目する。 $e_1(x, y)$ がわかっている場合、 C_1 が増加しているか、減少しているかによって海底地形変化が決まる。そこで、河口前面の海底地形変化を示す指標として、時間係数 C_1 の時間微分 $\Delta C_1/\Delta t$ を考え、河川の流下土砂量と高い相関のある河川流量²⁾と共に、それらの経年変化を図-9 に示す。図より、河川流量が多いときに $\Delta C_1/\Delta t$ が負になっていることがわかる。 $\Delta C_1/\Delta t$ が負であるときは、河口前面は堆積領域である。とすれば、1969 年から 1970 年にかけての河口前面の堆積は、河川の流下土砂の増加の影響と考えてよい。その後、河川からの流下土砂の減少に伴い、1969 年から 1970 年にかけて堆積した土砂が波によって侵食され、その周辺の地域に堆積


 図-10 経験的固有関数 e_2 の分布図 (福井港)

 図-11 時間係数 C_2 の経時変化 (福井港)

したと考えられる。よって、全体的には河口前面は侵食傾向、その周辺地域は堆積傾向を示したと考えられる。

その他の領域で起こっている海底地形変化の原因は、トレンド計算のときに述べた原因と同じである。

次に、モード2について考える。図-10, 11にモード2 (寄与率; 15%) の解析結果を示した。図-11より、時間係数 C_2 は、1969年から1970年にかけて急激に増加している。図-10 (1)より、 e_2 はほぼ全域にわたって0以上であることがわかる。つまり、モード2は、福井港周辺の海底地形が1969年から1970年にかけて解析領域ほぼ全域にわたって侵食を受けたことを示している。この海底地形変化は地域的に特に偏りがないので、河川からの流下土砂量の増減による影響とは考えにくい。そこで、この時期の波浪データを調べたところ、1969年11月から1970年3月にかけて1月低気圧 (台湾坊主) を始めとした異常低気圧が多発し、日本海側はかってない大きな激浪に見まわっていた⁵⁾。この影響が、モード2の1969年から1970年にかけての急激な地形変化に現われたものと考えられる。

このように、経験的固有関数法による解析を行うと、トレンド計算だけではわからなかった短期間におこった地形変化が把握できる。

5. 結 語

深浅図の解析を行うとき、重ね合わせ法では海底地形変化の特徴がなかなか把握できない場合でも、トレンド計算によればかなり明瞭に把握できる。更に、経験的固有関数法を用いた解析を行い、波浪データなど他のデータと照合することにより、短期間における海底地形変化及びその要因まで考察できる。

今後、深浅図のデジタル化、集積により、構造物周辺の海底地形変化を更に詳しく把握できるものと思われる。

最後に、深浅図データを提供していただいた運輸省第一港湾建設局及び実際の計算及び図化出力を行った漂砂研究室寺崎賢次技官に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 加藤一正・吉松 晃: 三次元の経験的固有関数による深浅図解析法, 港研報告, 第13巻, 第2号, pp. 27~87, 1984.
- 2) 建設省河川局編・日本河川協会: 流量年表.
- 3) 第一港湾建設局, 新潟調査設計事務所: 観測台帳 (統計編) 波高・波向・風, 1972年~1981年, 157 p., 1983.
- 4) 第一港湾建設局, 新潟調査設計事務所: 防波堤実態調査について, 105 p., 1982.
- 5) 第一港湾建設局, 新潟調査設計事務所: 昭和45年冬期異常波浪について——昭和44年11月~昭和45年3月——, 124 p., 1971.
- 6) 東京天文台編纂: 理科年表, 丸善, 1981.