

港 湾 技 研 資 料

TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 603 Dec. 1987

深浅図の保存・管理および深浅図を用いた海浜変形の把握

加 藤 一 正
栗 山 善 昭
入 江 功

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
第 I 編 深浅図の保管および有効利用	
1. はじめに	3
2. 深浅図の保管の問題点	5
2.1 深浅図の保管状況	5
2.2 深浅測量の誤差	7
2.3 深浅図の保管の重要性	10
3. 深浅図の有効利用方策	11
3.1 深浅図の有効利用について	11
3.2 深浅図データ（アナログ）による海浜変形の把握とその具体例	12
3.3 深浅データ（デジタル）による海浜変形の把握とその具体例	14
4. 深浅図を用いた海浜変形予測，海浜変形監視の可能性の検討	25
4.1 デジタル深浅データによる海浜変形予測の可能性	25
4.2 深浅図による海浜変形監視	27
5. 深浅図の保管についてのガイド	29
6. おわりに	31
第 II 編 深浅図を用いた港湾周辺の海浜変形の把握	
1. はじめに	32
2. 深浅図の統計的解析法	32
2.1 トレンド法	32
2.2 経験的固有関数法	32
3. 各港湾周辺の海浜変形の把握	33
3.1 秋田港	33
3.2 酒田港	40
3.3 酒田北港西護岸前面	45
3.4 新潟東港	52
3.5 金沢港	58
3.6 滝港	63
3.7 福井港	69
3.8 福井港護岸前面	77
3.9 鹿島港	82
3.10 鳥取港	90
3.11 宮崎港	96
3.12 大井川港	102
4. 防波堤前面における長期的な海浜変形の一般的特性	106
5. おわりに	106
参 考 文 献	107

Storage of Hydrographic Charts and Investigation of Beach Topography Changes around Ports by Utilizing Hydrographic Charts

Kazumasa KATOH*
Yoshiaki KURIYAMA**
Isao IRIE***

Synopsis

This technical note is composed of two parts.

[Part 1] It is stressed that hydrographic charts are fundamentally important data for detecting the nearshore process, and that they must be stored and kept being usable at anytime. How to detect the nearshore process is shown with several examples for the cases of contour maps and digitized data, respectively. It is also shown that there are possibilities of utilizing the digitized data to predict the nearshore process empirically by computer and to monitor the sea bottom conditions.

[Part 2] Beach topography changes around ports are investigated by using the statistical analysis with digitized data. Investigated ports are Akita, Sakata, East Port of Niigata, Kanazawa, Taki, Fukui, Kashima, Tottori, Miyazaki and Oh-igawa.

The characteristics of beach topography changes in front of breakwaters are investigated and summarized as follows.

- 1) Scours occur just in front of breakwaters.
- 2) Beach topography changes on the offshore regions of breakwaters are determined by the relation between the direction of the breakwater and that of longshore sand transport.

In some cases, the influences of the sand from the river and the energy of waves on beach topography changes are recognized.

* Chief of Littoral Drift Laboratory, Hydraulic Engineering Division

** Member of Littoral Drift Laboratory, Hydraulic Engineering Division

*** Director of Marine Hydrodynamics Division

深浅図の保存・管理および深浅図を用いた海浜変形の把握

加藤 一 正*

栗山 善 昭**

入江 功***

要 旨

継続的な深浅測量成果だけが、唯一海浜変形を直接確認することの出来る資料である。この基本認識のもとに、本資料は以下の2編の構成で取りまとめたものである。

第I編では、過去の海浜変形の実態を把握するときはもちろんのこと、海浜変形の将来予測を実施するときにも、深浅図はきわめて基本的で貴重な資料であるので、十分な保存・管理をし、常に有効利用できる状態にしておかなければならないことを述べる。同時に、収集した深浅図を用いて海浜の変形を把握する方法を、深浅図そのもの（アナログデータ）を利用する場合、デジタル化して計算機で解析する場合についてそれぞれ具体的な解析例で示す。さらには、デジタル化した深浅データを用いると、海浜変形の客観的な経験工学的予測や海浜変形の監視にまで発展的に有効利用でき得ることを示す。

第II編では、蓄積されつつある深浅図のデジタルデータを電子計算機で解析することによって、港湾建設にともなう周辺海浜の変形を港湾別に把握する。解析の対象としたのは、秋田港、酒田港、新潟東港、金沢港、滝港（石川県）、福井港、鹿島港、鳥取港、宮崎港、大井川港の計10港湾である。深浅図解析の結果と、防波堤の建設の経緯、波のエネルギー、河川流量を考慮にいて、各港湾周辺の海浜変形を考察するとともに、防波堤の前面およびその沖合いの海浜変形を類型化することを試みる。

第I編 深浅図の保管および有効利用

1. はじめに

砂浜港あるいは河口港においては、何らかの人工の手が加えられると、それがいかに些細なものであっても海底地形はそれに対応した変化を起こす。逆に言えば、人工構造物によって、ある程度人為的な地形変化を引き起こすことも可能である。このような、人工構造物の築造に伴う地形変化を知り、あるいは構造物の築造によって意図した地形変化を引き起こすことが、港湾部門における漂砂の問題なのである。そして今や、事前に海底、海浜地形の変化（海浜変形）を予測することが、沿岸の開発行為に伴う重要なアセスメント項目の一つであり、「よ

り信頼性の高い海浜変形予測手法の開発」は、漂砂問題に関連して最も社会的要請の高い課題となっている。

現在、海浜変形予測の可能な手段としては、基本的には図-1.1に示すように経験工学的な予測手法、水理模型実験による予測手法、数値シミュレーションによる予測手法の3つの方法があり、これらを組み合わせて海浜変形を予測する。

経験工学的な予測手法¹⁾は、過去に生じた海浜変形の事例を収集し、これを整理解析することにより整備される。すなわち、対象海岸の特性とそこに築造される構造物の配置形状や特徴を過去の事例と照合し、その類似性からその構造物を築造することによって起こり得る海

* 水工部 漂砂研究室長

** 水工部 漂砂研究室

*** 海洋水理部長

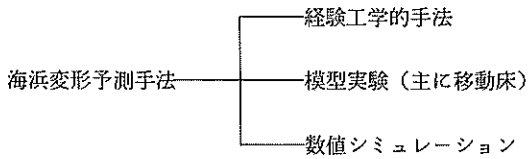


図-1.1 海浜変形予測手法の分類

浜変形を類推する方法である。したがって、この手法の基本は、過去に生じた海浜変形を正しく理解・把握することにあることは言うまでもない。

水理模型実験、特に移動床模型実験による海浜変形予測は、古く戦前から試みられている。しかし、研究の歴史は長いものの、現地を縮小して模型の中に閉じ込めるときに避けることの出来ない相似則の問題は、依然として解決されていない。このことが『移動床模型実験は、scienceではなくartである』と言われる²⁾ゆえである。そこで、実験に際しては、種々提案されている相似に関する経験式で計算した結果を考慮に入れて、模型を歪めたり、ある部分だけに注目したりしながら、最も信頼がおけると判断される模型を室内に製作し、さらには、現地の外力と直接対応はしない仮想の外力（主に波浪）を実験で用いたりしなければならぬ。ここまでの準備に、いくら時間と労力をかけても、出来上がった模型が、運動学的に現地と相似になっている保証は、どこにもない。そこで、将来の海浜変形を予測する前に、模型の運動学的相似性を確認するという重要なステップ（これが移動床模型実験の最も重要なものである）を踏む必要が生じる。その考え方は、きわめて単純でありかつ明解である。すなわち、実験対象海域において過去に生じた地形変化が模型内で再現できれば、その模型についての運動学的相似性が保証されたことになる。保証の程度は、この再現実験の再現精度に依存しており、そして再現精度は、それを確認するための過去に生じた海浜変形に関するデータの質・量・精度に左右される。結局、移動床模型実験による海浜変形予測の精度は、過去に生じた海浜変形をどこまで正確に把握できるかに依っているのである。

数値シミュレーションによる海浜変形予測は、大型電子計算機の普及を背景として、急速に発達した。まず潮汐、潮流、波浪変形等の特に現象の理論的基礎の明確な問題に関するシミュレーションが先行した。これらのシミュレーションが成功したことは、これらを主要な外力とする海浜変形の数値シミュレーションの可能性を著しく高めた。ところが、その後の海浜変形のシミュレーションの進展は、予想外に手間どっている。なぜか？ 数値シミュレーション手法開発の基本は現象のモデル化であ

る。すなわち、現象に関与する要因を把握し、これらの要因の下でどのような機構で現象が起こるのかを考え、それを定式化することが必要である。しかし、残念なことに、過去40年来の間に蓄積されて来た現地の漂砂現象に関する知見は、きわめて巨視的な視点で捕らえられた経験的なものに限られているからである。それでも、唯一One-line theory（汀線変化予測モデル）³⁾だけは、この経験式をシミュレーションの中に巧みに取り入れていて、現在のところ実用レベルに達している。この種のモデルは、本来きわめて巨視的・経験的な捕らえ方で現象を見、これをモデル化したものであるから、実際の海浜で生じている現象の再現能力という点では自ら限界があるし、また理論的基盤のしっかりした現象のシミュレーションのようにこの種のモデルによるシミュレーションを安易に実施したのでは、思いも掛けない誤った結論を導いてしまう恐れも十分ある。我々がこのモデルを使用して汀線変化予測をする決心ができるのは、移動床模型実験同様過去に生じた汀線変化をこのモデルで再現が出来たときだけに限られる。

数値シミュレーションによる海浜変形予測モデルの開発には、海底地形の変化まで予測しようとする（水深モデル）⁴⁾ もう一つの流れがあるが、今のところ実用レベルには達していない。このモデルは、One-line theoryではブラック・ボックスとして取り扱った砕波帯内の諸現象を定式化する必要がある。それだけに、検討すべき項目が多く、現象の定式化およびそのための現象の理解までの基本的事項まで含めた範囲がモデル開発の対象となっていて、数多くの研究者の努力が注がれている。進捗状況は決して見通しの明るいものではないが、それでも色々なモデルの提案がなされている。ただ現在のところ、提案だけに終わっているくらいが強く、はたしてそれで海浜変形が予測できるかどうかの確認、すなわち過去に生じた海浜変形をそのモデルで再現できるかどうかの検証がおろそかになっている。しかし、きわめて近い将来この種のモデルによる再現計算の試みが本格的に実施されるようになるであろう。再現計算が繰り返し実施されることによって、水深モデルの修正、改良がなされ、精度の向上が計られるものと考えられる。すなわち、過去に生じた海浜変形がいかなるものであったかという知識が、これからの水深モデルの発展に寄与すると言える。

さて、以上基本的な三種の海浜変形予測について述べたが、ここではそれらの手法について説明したのではなく、海浜変形の将来予測をする際に何が基本であるかを明らかにしたのである。つまり、経験工学的的手法では、もちろんのこと、水理模型実験、数値シミュレーション

においても過去の海浜変形の実態をどこまで正確に把握できるかということが基本であり、その精度が将来予測の精度に反映されるということである。このような認識に立脚すると、深浅図はきわめて貴重な資料であると言わざるを得ない。

海浜変形の立場から深浅図を利用するとき、深浅図一枚でも、海底地形の状況を知る上で価値があるのだがそれが複数枚になるとその価値は飛躍的に高くなる、測量年月日の異なる深浅図を重ねることによって海底地形の変化を知ることが出来るようになるからである。そして、現在のところ、海底地形の変化を直接知ることの出来る唯一の方法はこの深浅図の比較だけである。

2. 深浅図の保管の問題点

2.1 深浅図の保管状況

深浅図保管状況について、昭和54年度にアンケート調査した。その時点で回答が得られた第二、第三、第五港湾建設局、沖縄総合事務局の結果について述べる。集計のなされた港数は26港であるが、そのうち3港については、保管深浅図の枚数は不明であった。残り23港の合計深浅図数は、1255枚である。この中には2港でそれぞれ590枚、212枚保管しているの、それ以外の港にお

る平均保管枚数は約22枚である。

図-1.2は、港別に整理した深浅図保管枚数と最も古い深浅図の測量年の関係をプロットしたものである。全体の一般的傾向として、深浅図保管枚数が多いほど深浅図は古いものまで保管されていると言える。図中の一点鎖線及び破線は、それぞれ深浅測量が年1回、3回実施

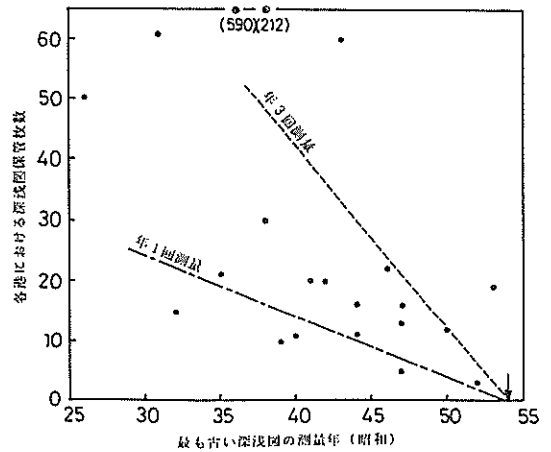


図-1.2 各港における深浅図保管枚数と最も古い深浅図の測量年

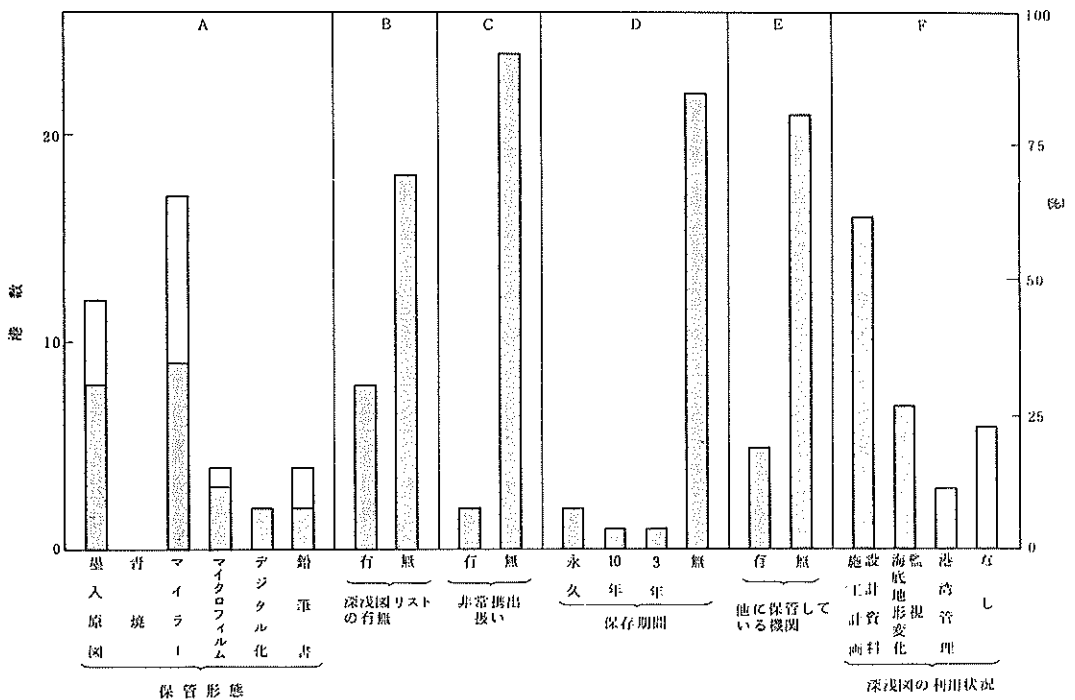


図-1.3 深浅図の保管状況

された場合の保管深淺図枚数と最も古い測量年の関係である。プロットされたデータの多くがこれらの直線の付近に存在することは、深淺測量が年2回程度であるとするならば、深淺図が散逸することなく保管されているように見える。しかしながら、このことは断定できない。というのは、アンケート調査では、深淺測量を開始した年について調べられていないからである。例えば、事務所の移転等でそれまでの深淺図を一括処分した場合や、深淺図の保管年数を決めておいて、それより古くなったものを順次処分した場合であっても、やはり、図-1.2の一点鎖線、破線の関係は成立するからである

図-1.3は、深淺図の保管状況を示したものであり、縦軸は、各項目に対応する港数である。A欄は、深淺図の保管形態である。A欄の見方について、墨入れ原図を例にとって説明すると、墨入れ原図を保管している港が12港あり、そのうち、白ぬきの棒は、深淺図の保管形態として墨入れ原図だけに限定していることを意味し、黒塗り棒で示される残り8港については、墨入れ原図以外の形態でも深淺図を保管していることを意味する。ただし、同一深淺図を2種類以上の形態で保存しているとは、必ずしも断定できず、一部の深淺図は墨入れ原図で保管されており、残りの深淺図は別の形態で保管されている場合も含まれている。

このような見方で、A欄に示される保管形態を調べると、保管形態として最も多いものはマイラーを用いるものであり、17港においてなされている。また、単一の保管形態としてマイラーを用いているのも8港となっていて最も多い。次に多いものは、墨入れ原図を保管している12港である。墨入れ原図は、深淺測量を実施した際に一番最初に得られるまとまった成果であり、他の保管形態の基本となるものである。この意味においては、鉛筆書原図も同じであり、保管形態としてはこれらは同じ範ちゅうに入れてよいものである。これらを原図と総称してまとめてしまっても、マイラーによる保管形態が最も多いことには変わりがない

マイクロフィルムによる保管は4港が実施しており、そのうち1港は、この形態だけによる保管となっている。デジタル化による保管は、2港でしか行われていない。これは、昭和54年度のアンケート結果であるが、現時点では、その後の計算機の発達および解析手法の確立により、デジタル化による保管を実施している港数はさらに増加している。なお、青焼原図を保管形態としているところは、1港もない。

B欄には、保管している深淺図のリストの有無が示されている。リストがあるのは、8港であり、残り約70%

に相当する18港にはリストがない。

C欄には、保管されている深淺図が非常持出扱いになっているかいないかについての回答を示したものであるが、非常持出扱いになっているのは、わずかに2港(8%弱)である。

D欄には、深淺図の保管期限が定められているかいないかについての質問に対する回答である。永久保存とされているところが2港、10年保存が1港、3年以下の保存が1港であり、これらすべてを加えても保管期限の定められていない22港に遠く及ばない。なお、永久保管に定めている工事事務所では、非常持出扱いになっている。

E欄は、深淺図の写しを他の機関が保管しているかどうかの結果である。深淺図の写しを他の機関が保管していないケース、すなわち、工事事務所だけで保管しているケースが圧倒的に多い(21港、約81%)。

F欄は、過去の深淺図の利用の状況と利用目的に関する問についての回答である。この項についてのアンケートは、選択方式ではなく記述式であった。それらの結果に基づき4項目に分類して表現した。工事事務所によっては、単一目的ではなく複数目的であったので、これらをたし合わせると全体の港数を超える。深淺図のもっとも多い利用は、施工計画・設計資料としてのものである。また、港湾管理に関連した利用も3港でおこなわれている。これらの利用では、常に最新の深淺図が最も利用価値が大きく、古い深淺図ほど利用価値が少ない。すなわち、深淺図の保管の必要性は薄れる。深淺図を保管し、それらを時系列としてとらえることによって始めて可能となる海底地形変化の監視は、7港で行われている。深淺図の利用状況なしの回答が6港ある。

以上に述べたなかから、B～F覧の最も多い項だけ取り出して文章を書けば次のようになる。

「深淺図は、ほとんどの場合、工事事務所単位で保管されているのであるが(81%)、保管している深淺図のリストは十分整備されていないようである(70%)。その結果、保管期間についての定めはなされていないし(85%)また非常持出扱いにもなっていない(92%)。このことは、従来の深淺図の利用が、施工計画、設計資料、港湾管理等のように、常に最新の情報を必要とするものに限られていた(73%)ことと関係があると考えられる。」

なお、ここで述べたアンケート結果については、深淺図の保管整備体制が最も進んでいる第一港湾建設局管内各工事事務所の状況が集計されていないこと、アンケート調査の実施年が古いこと、その後深淺図の保管に対する意識が急速に向上しつつあること等を合わせ考えると、

現時点の保管利用状況はさらに改善されているものと思われる。

2.2 深浅測量の誤差

音響測深機による深浅測量の誤差については、実測データに基づいて、新潟調査設計事務所が詳しい検討をしている⁵⁾。ここでは、その報告書に基づいて述べる。

まず、誤差を図-1.4のように分類した後、図中にワク囲いした項目について新潟西港の港内、港外で実施したデータに基づいて検討してある。調査を実施した期間は、風、波、潮位変化の影響のあまり介入しない条件下であったし、また、調査自体も深浅測量の精度の検討を目的とするものであったので、担当者もそれに対するある程度の緊張があったのではないかと想像される。したがって、通常の深浅測量の誤差は、この調査の誤差以下になることはほとんどないと考えられる。

〔測深誤差について〕

測深誤差の検討は、真の水深からの偏差で議論しなければならないのであるが、それが不明であるので同じ測

深を5～6回繰り返して測定し、その平均値を真の水深としてある。港内測深では、測線長150mの測線を25m間隔で21本設定し、各測線に沿った測深を1日中に5回繰り返して実施した。そして、各測線上の10m間隔の測点の水深(0.1m単位で表現されたもの)を基に測線毎の平均水深を求め、それが測深毎にどの程度バラツクかを調べた。なお測深領域は11～13mの水深を有するところである。

図-1.5は、各測線の平均水深のバラツキを標準偏差で表現したものである。これによると、標準偏差値は、各測線によって異なり、 $\pm 1.5\text{cm}$ ～ $\pm 2.5\text{cm}$ の間で変化する。全測線の標準偏差を平均すると $\pm 6.2\text{cm}$ となる。このことから逆に測線長150mの測線に沿って測深したデータから得られる平均水深は $\pm 6.2\text{cm}$ の精度(標準偏差)であるといえる。

一方、港外においては、二つの測深方法による誤差が検討されている。その一つの方法は、岸沖方向1500mの一本の測線に沿って、1日以内に5回測深をおこなうものである。このときも、測点は10m間隔である。ここでは、

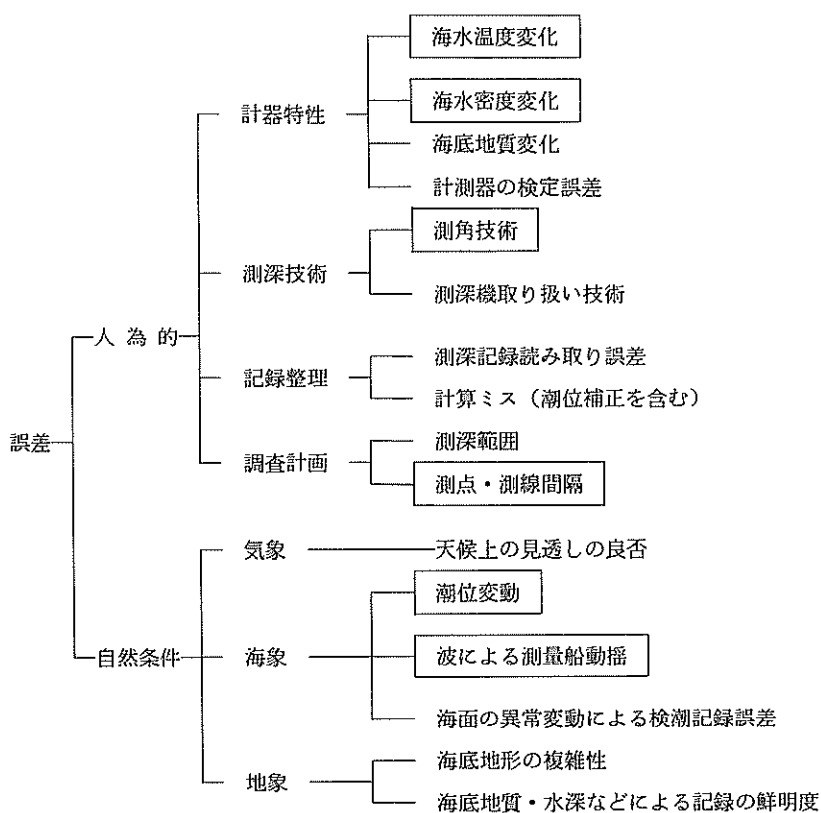


図-1.4 音響測深機による深浅測量の誤差の分類⁵⁾

1500mの測線を150m, 300m, 500m, 750m単位に分割した場合、そして1500m全体をとらえた場合について、それぞれの単位区間当りの平均水深を計算し、それが5回の測深によってどの程度バラツクかを、やはり標準偏差で評価してある。図-1.6 は、横軸に平均水深を求めた単位区間長（測線長）をとって、平均水深の計算に使用した測点間隔を変化させたときの標準偏差を示したものである。図-1.6 によると、測線長が大きい程誤差（標準偏差）は小さくなり、測線長が750m以上になると誤差はほぼ一定値となる傾向がみられる。また、測点間隔については、10mと20mの場合の比較では、誤差はほとんど同じであるが、測点間隔が50m以上になると測線長が短いほど誤差が大きくなっている。したがって、平均水深を計算する測点が多いほど、あるいは、平均水深を計算する測線が長いほど、繰り返し測定したときのバラツキ

は少なくなると言える。

次に、一点で測深したときの誤差はどの程度であるかについて調べてみる。幸いなことに、港内の336測点について5回繰り返し測深したときのデータが0.1m単位のデジタル値として残されているので、それを基にして一測点の標準偏差を計算してみる。図-1.7 は、各測点について計算された標準偏差の頻度分布である。図より、誤差（標準偏差）は、10~15cmのものをもっとも数が多いことが分かる。また、誤差が10cm以上となった測点は全体の約70%になる。このことは、一点の測深値の場合には、10~20cm程度の誤差は避けられないことを示している。

港外における今一つの測深方法は、岸沖方向測線延長1500m、測線間隔50m、測線数11本を15日間にわたって6回繰り返し測深するものである。図-1.8 は、得られ

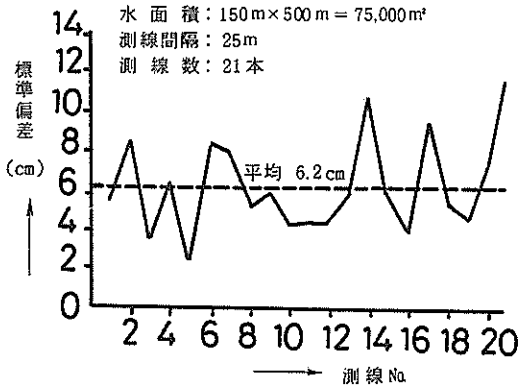


図-1.5 港内における測線ごとの平均水深の標準偏差⁵⁾

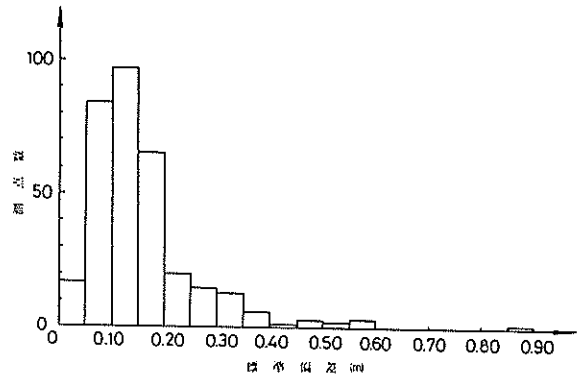


図-1.7 一点での測深値の標準偏差の頻度分布

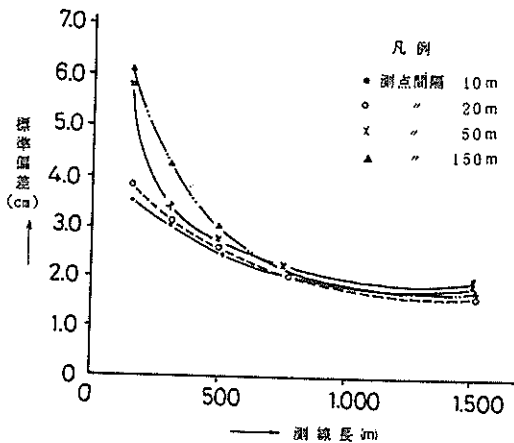


図-1.6 測線長および測点間隔による平均水深の標準偏差⁵⁾

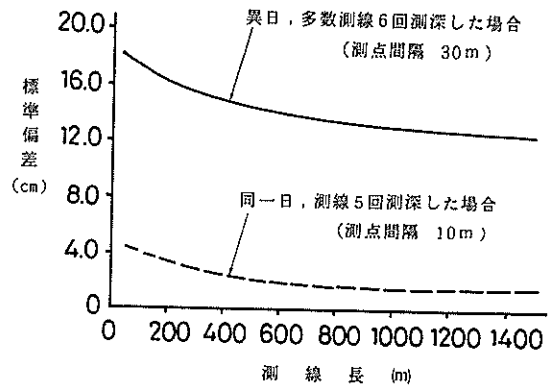


図-1.8 同じ測線を異なる日に測深したときの平均水深の標準偏差⁵⁾

たデータを図-1.6と同様にして処理した結果である。この図より明らかなように、同一日に単一測線をくり返し5回測深した場合と比較し、誤差は大きく、 $\pm 13\text{cm} \sim \pm 17\text{cm}$ と約5~8倍に達している。測深期間が15日間におよんだが、期間中に波はほとんどなかったため、海底地形が変化した可能性は低く、測深日が異なることによって、潮位移動・測深機の特長・海水の水質条件等が変化したために生じた誤差と考えられる。したがって、精度の高い測深結果を期待するには、水域を短日時の間で測量を終了することが望ましいことになる。

〔測線間隔誤差について〕

ここでいう間隔誤差とは、ある広さの水域を測深する場合に、測線間隔のとり方によって生じる誤差、すなわち特定の断面が対象領域の海底地形を完全に表していないことによる誤差である。ここでの検討は、前項と同じデータを用いた。すなわち、測線間隔は25m(港内)、50m(港外)であるので、まず、すべてのデータを用いて、測深領域の平均水深を計算し、次に適当に測線を間引きして計算した同じ領域内の平均水深が、それとどの程度の偏差を有するかについて検討した。これは、海底地形の凹凸のスケールに関連した誤差である。

図-1.9は横軸に測線間隔をとって、縦軸に標準偏差を示したものである。これによると、一般的な傾向として、測線間隔が大きい程誤差は大きくなっていること、港内水域での誤差が港外水域よりも大きいことなどが分かる。前者については、やはり平均値を計算する測点数が少なくなるほど誤差が大きくなるということである。

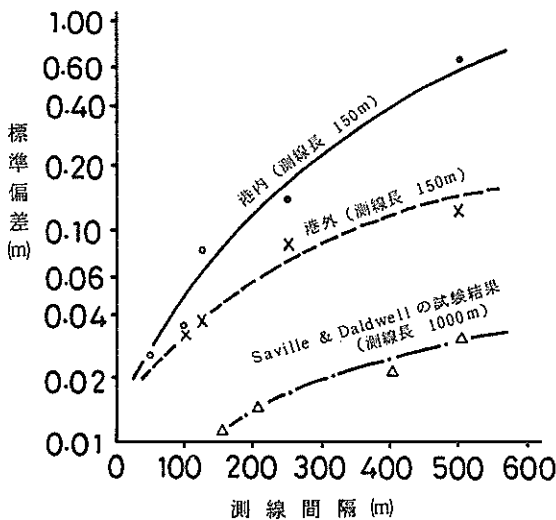


図-1.9 港内および港外における測線間隔誤差⁵⁾

なお、港内水域での誤差が大きかったのは、浚渫などの影響が残されていて、海底面が必ずしもなだらかでなかったためと考えられる。同図より、港内では50m、港外では100m間隔で測深すると、誤差(標準偏差)は0.03m程度であると推定される。

〔音響測深機の検定誤差について〕

超音波が海水中を進行する速度は、海水の密度や温度によって変わるし、機械の状態によっても変わる。そこで、一般的には港内の泊地などのように比較的波や流れの影響を受けず、しかも水深がかなりあるような場所で検定した結果を、他の場所にも適用して測深している。そこで、この検定方法による誤差を調べるために、港内の-11.0m地点で音響測深機の検定をし、港外の東西両岸の-15.0m地点において記録紙にでる水深と実際的水深との比較を行った。その結果、-15.0m水深で20cm程度の誤差が生じた。このことは、河口港のように港内外の水質条件が異なると予想される場所では、それぞれの地点で検定しなければならないことを示している。

さらに、3種類の超音波測深機を用いて同一水深を測定して相互比較したところ、水深-11.0m付近で機種による差が0.15~0.20m生じることが明らかになった。

〔潮位誤差について〕

深淺測量によって得られる深淺記録については、測深水域から離れた検潮所水位で潮位補正している場合が多い。新潟西港の港内と東西両海岸で同時に潮位観測を実施した結果によると、両海岸に対して港内の潮位が15日間平均で6~7cm高かった。これは信濃川河水の影響によるものと判断されている。

〔船位測定誤差について〕

トランシット3台より決定された測角の誤差および測深船の漂流による指定測線とのズレによる誤差を実際のデータについて調べた結果によると、全体の95%が最大偏長10m以内であった。これが、測深誤差に及ぶ影響は海底勾配によって異なる。例えば、1/100の海底勾配の場合には、10cmの誤差以内に95%が含まれるという意味になる。

〔測量船の横揺れにより生じる誤差について〕

測量船の横揺れ(ローリング)による誤差については、海底面が水平な場合の誤差が計算によって検討されている。図-1.10は横揺れによって生じる水深誤差を測量船の傾き θ と水深 h との関連において計算した結果である。当然のことではあるが、測量船の傾きが大きくなるほど、また水深が深くなる程誤差も大きくなっている。例えば、水深10mで $\theta = 15^\circ$ の場合の誤差は55cmにも達し、この検討からだけでも相当の誤差が介入する可能性があるこ

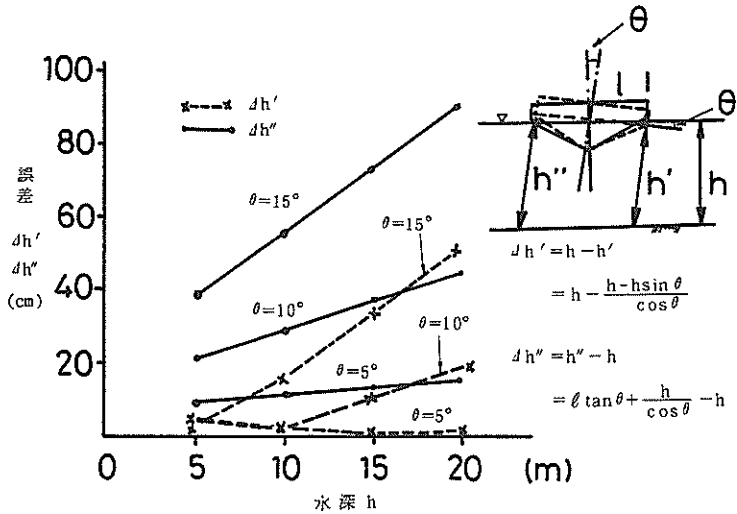


図-1.10 測深船の傾き θ による水深誤差⁵⁾

とを示している。

以上に述べた深浅測量の精度（誤差）を、概略とりまとめると、測深データを空間的な平均値としてとらえたときは、10cm程度の精度を期待できそうである。このようなことを考慮にいれたかどうか、ほとんどの深浅図は、水深が10cm単位で記入されている。ただし、一点の水深の測定精度を云々するときの精度は、少し悪く10~20cm程度に落ちるのではないと思われる。この結果は、先に述べたように、解析に用いた測深データがどちらかというと、良好な海象条件下で収集されたものであるので、通常の場合には割増す必要がある。

2.3 深浅図の保管の重要性

そもそも、深浅測量の港湾整備における性格は、必ずしも海浜変形を把握するためのものではなく、例えば、港湾計画段階においては港湾の場所設定、施設配置を目的としたり、施設設計の段階では設計条件の決定が重要であり、施設施工段階では事前調査、竣工検査等の施工管理に関連が深く、そして維持管理では施設の安定監視、航路埋没監視を目的にしている。

別の目的で実施した深浅測量の結果である深浅図を、海浜変形の基礎データとして利用するとき、測量年月日の異なるものの精度がどのようなものであるかを知らなければならぬ。まず測量年月日が異なると、測深機も異なる可能性が高い。機種が異なる場合の誤差は、水深-11m付近で0.15~0.20m程度であることが3種の比較で明らかにされている。測深日の異なる水深データの平均水深でさえそのバラツキの標準偏差は0.14m以上のよ

うである（図+1.8）。このような誤差および先に述べた測深の誤差が重なりあって互いに相殺するところもなきにしもあらずであるが、すべてを単純に加えると50cm程度の誤差になる可能性も残されている。この誤差は、大へんなものであることは、例えば、1kmの範囲の土量変化を計算したときに50万 m^3 の誤差になることを考えれば容易に分かる。どうも、深浅図の精度は細かな海浜変形を議論できるほど、精度が良いという訳ではなさそうである。だけれども、深浅図には、

- ① 海浜変化を直接知ることの出来る唯一のデータであること……深浅図自体の重要性。
- ② 深浅図の誤差以上の地形変化は十分把握できること（地形変化の割合が小さい場合でも、古い深浅図と比較することによって把握できるようになること）……古い深浅図ほど価値がある。
- ③ 空間的、時間的に平均したり、統計的な解析を加えることにより、誤差を軽減できる可能性があること……継続的な深浅図の重要性。

等の資料としての重要さがある。

得られた深浅測量の成果の保管・管理については、2.1で現況を述べたように、きわめて不備がある。昭和30年代後半以降における我が国の港湾開発の進展は、めざましいものがあつた。特に砂浜港湾の開発は、その件数の多さおよび規模の大きさにおいて、他国に類を見ないのである。この期間を通じて、数多くの深浅測量が実施され、それらの成果は港湾計画、施設設計、施設施工に生かされた。だからこそ、これだけの港湾の進展がなさ

れたのである。これらの過程においては、常に最新の深淺図の要求が強かったものと思われる。したがって、所期の目的を達した深淺図は、ある意味では処分される運命にあったのであろう。事実、深淺図の多くが散逸し、あるいは処分されてしまった。これらの処分によって、深淺図の意義がどれだけ正しく認識されていたかについて、大きな疑問を抱かざるを得ない。

たとえ、当初より深淺図の意義が十分認識されていたとしても、なお深淺図の保管管理体制の確立が困難であったらうと判断される以下の3つの問題点が指摘される。

- ① 深淺測量成果の解析作業が相当煩雑であり能率的な解析手法が未開発であった。
- ② 深淺測量成果から海浜変形の特徴を見だし、さらには変形の機構をも推察して行くような資料の見方が一般的には普及されていなかった。
- ③ 多くの地形変化の事例と対比しながら、一つの港の結果を見て行く体制になかった。

したがって、深淺図の意義をいくら力説したとしても、それは片手落ちであり、同時に深淺図を保管し再利用することが、技術的に大きなメリットとなることを明確に出来ない限りは、各港において深淺図の適正な保管がより広くおこなわれるようにはならない。

3. 深淺図の有効利用方策

3.1 深淺図の有効利用について

深淺測量を実施する所期の目的に対する深淺図の有効利用については、ここではふれない。言い換えると、港湾計画、施設設計、施設施工、維持管理などの港湾整備の各段階で必要とする海底地形の情報（主に1枚の深淺図で事が足りるもの）の有効利用については、きわめて大切であるのだが、ここでは、それ以外の有効利用について述べる。すなわち、所期の目的を達した深淺図を保存することによって得られる時系列の深淺データの有効利用についてである。

複数枚の深淺図の利用は、基本的には相互比較することによって、その間の海浜変形量を知ることであり、そうすることによって得られた結果は、以下のように活用できる。

(a) 海浜変形の実態の把握

何らかの人工構造物を沿岸部に建造すると、その影響は必ず周辺海浜の変形となって現れる。港湾建設後の周辺海浜変形がいかなる過程で生じたかを知ることが、港湾建設を遂行した者の責任においてなされなければならないことであり、他の誰も、そのような立場にはない。そして、海浜の変形が社会的損失を生じるものであるか、

あるいは逆に利益をもたらすものかの判断をしなければならぬ。特に前者の場合、損失となるような海浜変形が、港湾建設の初期の段階で著しく最近になって平衡状態になりつつあるものか、あるいは最近になって変形が著しくなっているかを知ることにより、今後の対処（対策）がまったく異なるであろう。

海浜変形の実態を知ることの、今一つの重要性は、港湾の整備過程（防波堤の延伸、航路浚渫、浚渫土砂の海上投棄等）や自然現象のゆらぎ（大きな台風が集中的に来襲したり、平穏な海象が数年にわたって続いたりすること）と海浜変形の過程を対照することによって、港湾整備そのものの影響を知ることが出来ることである。このことは大切なことである。なぜなら、海浜変形は往々にして2つ以上の複数の要因が重なって生じるからである⁶⁾。例えば、昭和30年代から40年代にかけての高度成長期には、数多くの港湾整備が急速に計られたときであるが、その時期には、同時に河川改修、砂防工事、ダム建設もまたさかんにおこなわれたときである。さらに同期間には、国土に多大な被害をもたらした台風が来襲した。したがって場所によっては、たとえ港湾を整備しなかったとしても、社会的損失を伴う海浜変形が生じていたかも知れない。なのに、港湾施設が海浜変形の生じている場所に最接近しているがために、すべての原因が港湾にあるような印象を強く与えることは、今後の海浜変形についての対策を考へるとき、また港湾建設の結果の評価がなされるとき、港湾建設の当事者自ら避けなければならないことであり、誰も積極的に協力してくれない。

(b) 海浜変形予測精度の向上

海浜変形を予測するのに、大きく分類すると、経験工学的的手法、水理模型実験による手法、数値シミュレーションによる手法の3種があることを1.で述べた。経験工学的的手法ではもちろんのこと、水理模型実験で実験規模が大型化し測定計器が高度化し、数値シミュレーションで計算機が大型、高速化がなされたとしても、最終的な予測精度は、過去の海浜変形の実態把握精度すなわち極言すれば深淺図データの精度を超えられない。海浜変形の実態を把握する唯一の直接的な資料である深淺図を活用することによって、海浜変形の実態把握精度を向上することが出来る。

(c) 深淺図による海浜変形予測

海浜変形に限らず、経験を積み重ねるほど（過去の実態を把握すればするほど）それに基づく将来予測精度は向上する。ただ残念なことには、この方法ではまず経験を積み重ねる必要があること、そしてその経験が有効に活かされるのは経験を積んだ者に限られることであり、その技

術の伝承がきわめて困難なことである。それは主に、経験というものが数量的に（定量的に）評価されにくいことにあると考えられる。海浜変形の経験工学的予測手法も、多分にこのような色彩が強い。それは、海浜変形の把握がパターン認識のように数量化されにくかったためである。海浜変形の実態を定量的に把握することが出来れば、従来属人的要素の強かった経験工学的予測手法を広く普及できるようになり、工事事務所単位、建設局単位で相当なことができるようになる。その可能性は、後述するように、デジタル化された深淺データを用いると、高い。

(d) 海浜変形の監視

最新の深淺図を入手したとき（深淺測量を実施してその成果が深淺図となったものを見たとき）、まずそれを広げて全体をながめる。次にゆっくりと部分部分を檢視するであろう。そのとき、不自然な堆積（侵食）が認められれば、「こんな堆積（侵食）は前回の深淺図にも存在したのだろうか」と思うに違いない。そこで、すぐに前回の深淺図を取り出して比較してみることになる。そこに、堆積（侵食）がなければ、この間に何か変化したこと（大きな台風が来た、防波堤が延びた、洪水があった等）があったかどうか調べるであろう。このような作業は深淺図を用いた海浜変形の監視と言える。

海浜変形の監視は、従来より意識せずに行われていたことである。だが、それは深淺図を見る人の主観が多分に介入するものであり、また次から次へと古い深淺図を取り出すのも面倒臭いことである。また、極端な地形変化は目立つのであるが、変化の小さいものは見落とすこともあろう。このあたりの不十分さは、後述するデジ

タル化による深淺データの保管によって凌ぐことができよう。

ただし、海浜変形の監視が可能なのは、定常的に深淺図が入手できることがまず必要であると同時に、過去の深淺図が整備され保存されていることが不可欠である。

海浜変形の実態を把握することの重要性およびその活用方法については、以上述べたとおりである。では、実際に深淺図によって海浜変形の実態を把握する方法はどのような方法があるかという点、大きく2つに分類して、アナログデータ（深淺図そのもの）を用いるものとデジタルデータ（深淺図を数量化したもの）を用いるものがある。以下に、これらの方法およびその具体例を示す。

3.2 深淺図データ（アナログ）による海浜変形の把握とその具体例

等深線で海底地形を表現した深淺図は、アナログデータである。これを用いて海浜変形を把握する基本的な方法は、深淺図の重ね合わせである。以下に、具体的な例を示し、それぞれの方法の長所・短所を述べる。

〔2枚の深淺図の重ね合わせ〕

図-1.11は、1968年6月と1970年12月の鹿島港周辺の深淺図を重ねたものである⁷⁾。このような重ね合わせは、2枚の深淺図の縮尺を統一しておけば、透写板上で簡単にできる。そして一枚の紙上に、時期の異なる等深線を実線と破線のように線種を違えて写し取る。さらに図-1.11の例に見られるように、2種の等深線を比較することにより堆積、侵食範囲を斜線、斑点（あるいは色分け）で表示することが多い。この作業も、比較的簡単であり、同じ水深の等深線位置を比べ、新しい等深線が沖側（水深の深い側）にある場合は、それらの2本の等深線間を

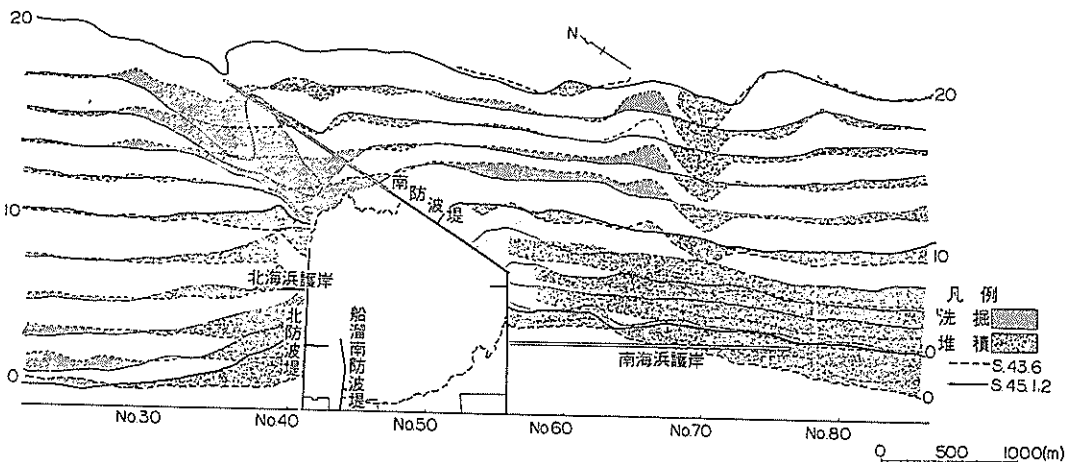


図-1.11 2枚の深淺図の重ね合わせ（鹿島港）⁷⁾

堆積とし、逆に古い等深線が沖側にあるようだと侵食とすればよい。この手法は誰にでも出来、しかも全体の海浜変形の特徴が良く把握できる。

深淺図の重ね合わせが、2枚の深淺図の比較に対し常に有効という訳ではない。その例を図-1.12, 1.13に示す。図-1.12は、新潟東港周辺の1962年7月と1973年6月の深淺図を比較したものである⁹⁾。水深6m以深の海底の変化は、鹿島港の例(図-1.11)と同様に特徴が良く把握できる。しかし、水深6m以浅の沿岸砂州が存在する範囲の海浜変形は、2種の等深線が複雑に入りこんでおり、堆積・侵食の判別がきわめて困難になる。この図にも、それらの範囲が十分に明記されていない。

図-1.13は、1976年9月に発生した吉野川の大洪水(このときの総雨量は、2781mm、日降雨量1114mmで日本の観測史上最大である)前後の吉野川河口周辺海底地形を重ねたものである⁹⁾。このような特異な自然現象をさむ二時期の深淺測量データは、きわめて珍しい。図によると河口前面の等深線は、洪水前後で相当異なっていることが分かるものの、堆積、侵食の範囲、程度がどのようになっているかについては十分分らない。これは、

海底地形が三次元的で、かつ複雑なためである。このような場合には、後述するデジタル値を用いたほうが海浜変形を明瞭にとらえることができる。

〔複数枚の深淺図の比較〕

海底地形が相当単純な場合には、複数枚の深淺図を重ね合わせることも可能である。図-1.14はその例であり、ともに6枚の深淺図を重ね合わせてある。6枚の深淺図は、それぞれ線種によって区別している。複数枚の場合には、2枚の深淺図の比較のように堆積領域、侵食領域を区別して表示することが出来ない。したがって、図-1.14から海浜変化を調べるためには、一つ一つ線種と測量年月を確認しなければならず、一目瞭然という訳にはいかない。

深淺図の枚数が増加するにつれて、海浜変形を見易くするために、深淺図の一部に注目して、種々の工夫がなされる。

例えば、図-1.15はある一つの等深線に注目(この場合は汀線)して、それが時間とともにどのように変化するかを立体表示したものである。この図によると、南防波堤からの距離0~2000mの範囲において、汀線が時間

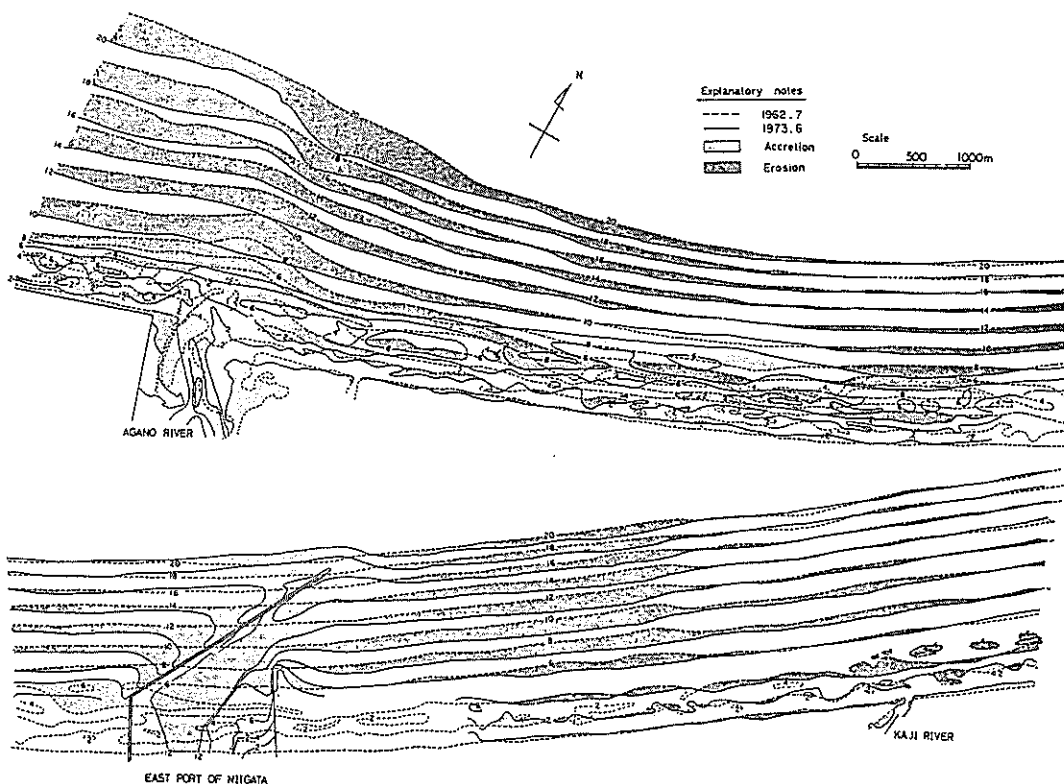


図-1.12 2枚の深淺図の重ね合わせが難しい例, その1 (新潟東港)⁹⁾

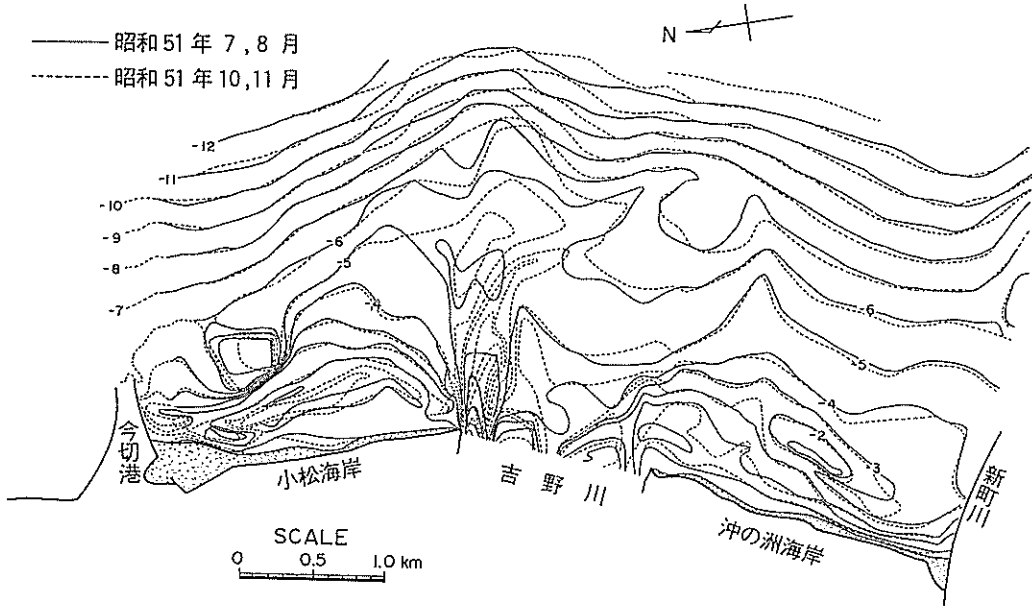


図-1.13 2枚の深浅図の重ね合わせが難しい例, その2 (吉野川河口周辺)⁹⁾

とともに前進したことがよく分かる。ただし、このような表示が可能となるためには、解析を実施する者に相当な美的感覚が必要である。また、そう簡単に描ける訳でもない。

美的感覚のない場合には、次の3例に示すような表示にたよることになる。図-1.16は、図-1.15と同一海岸について示したものであり、これはこれで図-1.15にない情報を多々含んでいる。図-1.16は汀線にほぼ直角方向に設定した測線に沿った海底断面の経年変化を4測線について示したものである。一目瞭然とまでいかなくとも、じっくり見れば海浜の堆積変化過程が読み取れる。ただし、一つ一つ年代を確認するわずらわしさがある。図-1.17は、汀線とほぼ直角に設定した測線と各等深線が交わる点と基線間の距離の経年変化を示している。この場合、距離が増加するのはその等深線が沖方向へ移動すること、すなわち海浜の堆積を示す。描かれたデータは、時間とともに堆積が進行(右上がり)していることを示している。この表示では、横軸に時間をとっているため、図-1.17のように年代を確認する必要がない反面、海浜の断面が把握しにくい。一番望ましいのは、図-1.15~1.17を用意しておきこれらを総合的に判断することであろう。

深浅図の枚数が多く、かつ明瞭な地形変化が生じている場合には、図-1.18のように深浅図そのものを時系列

で表示することも、定性的な変化状況を知る一つの方法である。

3.3 深浅データ(デジタル)による海浜変形の把握とその具体例

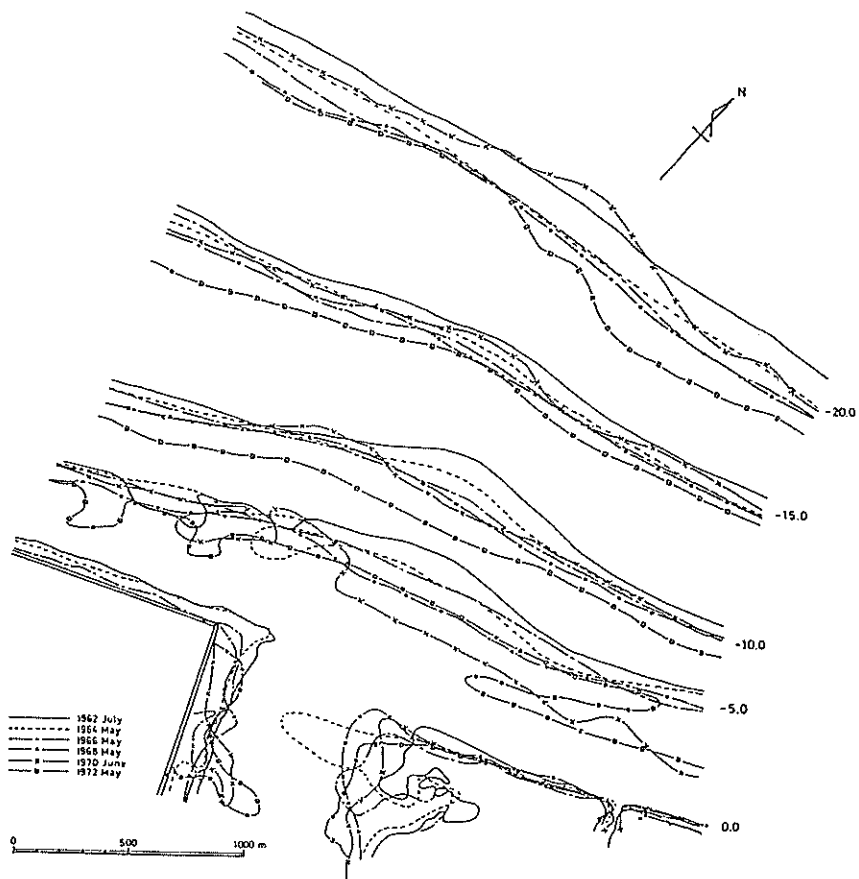
デジタルデータは、電子計算機による処理を前提としており、そのためアナログデータではほとんど不可能な各種統計処理が可能となる。以下に具体例を示す。

(三次元データの図化出力)

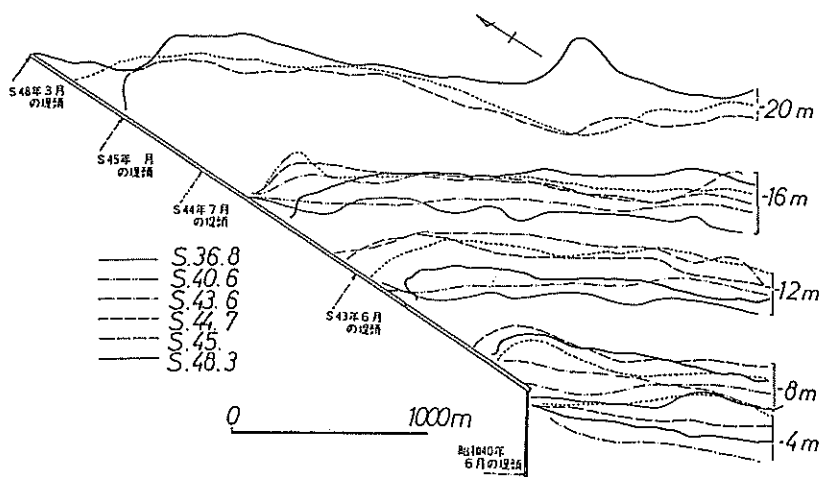
深浅デジタルデータに対し、いかなる処理をしようとも、その出力をデジタル値でおこなうと値はほとんどなくなる。すなわち、処理結果の出力はアナログでなければならない、一般に三次元データの平面上へのアナログ出力は、深浅図のようなContourを用いる方法と立体図を描く方法がよく用いられる。

図-1.19は、デジタル値を等深線で表示した海底地形の例である¹⁰⁾。通常の深浅図と見た目には同様であるが、内容的には簡単な処理をおこなってある。すなわち、12回実施された深浅データを基に各格子点の平均水深を計算した結果を図化したものであり、現実の地形とは異なる(この程度の計算でも、アナログデータではほとんど不可能である)。

図-1.20は、図-1.19に矢印で示す沖側上方より見たときの平均海底地形を立体図出力したものである。深浅図を見なれていない場合は、このような立体図のほうが



(1) 阿賀野川河口前面海底の等深線の比較図⁸⁾



(2) 鹿島港南防波堤曲部沖合の等深線の比較図⁷⁾

図-1.14 複数枚の深浅図の重ね合わせ

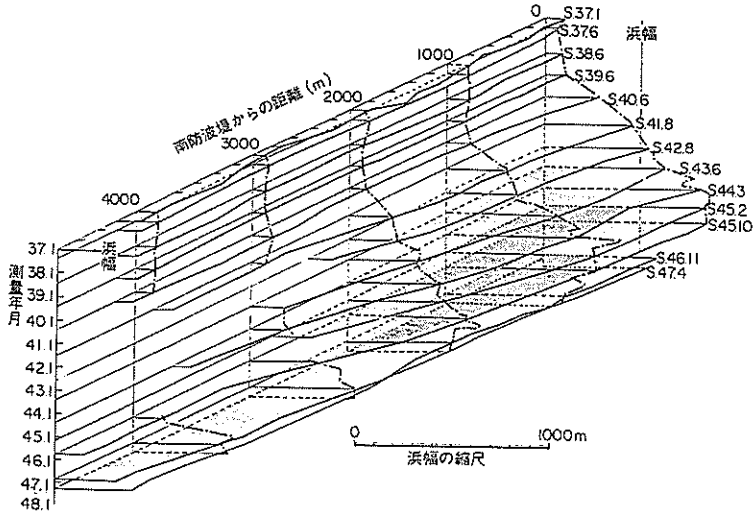


図-1.15 特定の等深線（汀線）の経時変化の立体表示（鹿児島南海岸）⁷⁾

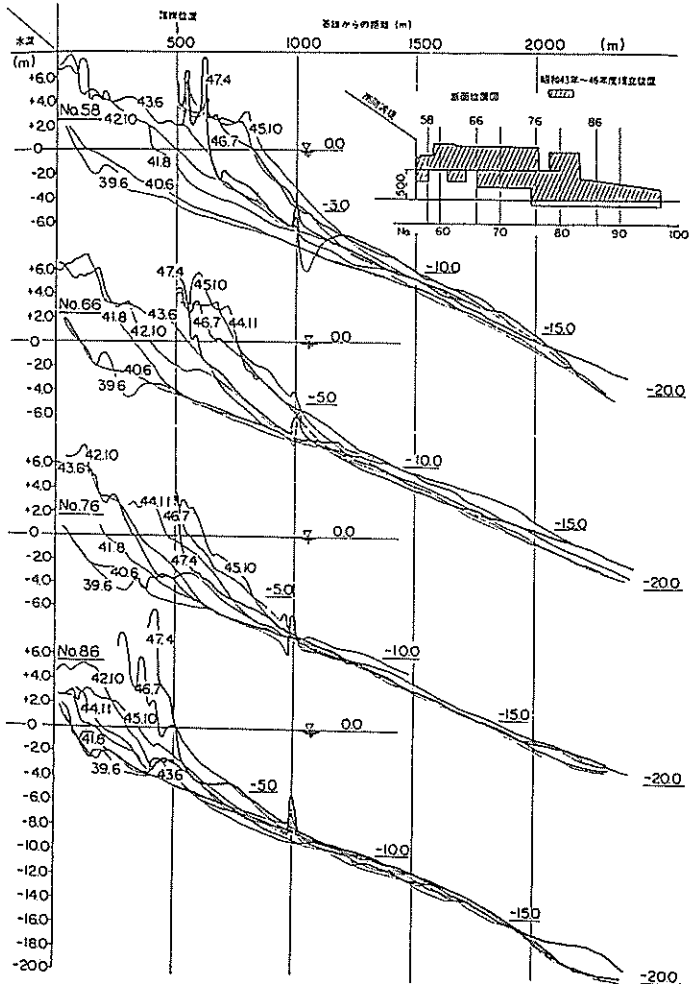


図-1.16 海岸断面の重ね合わせ表示（鹿児島南海岸）⁷⁾

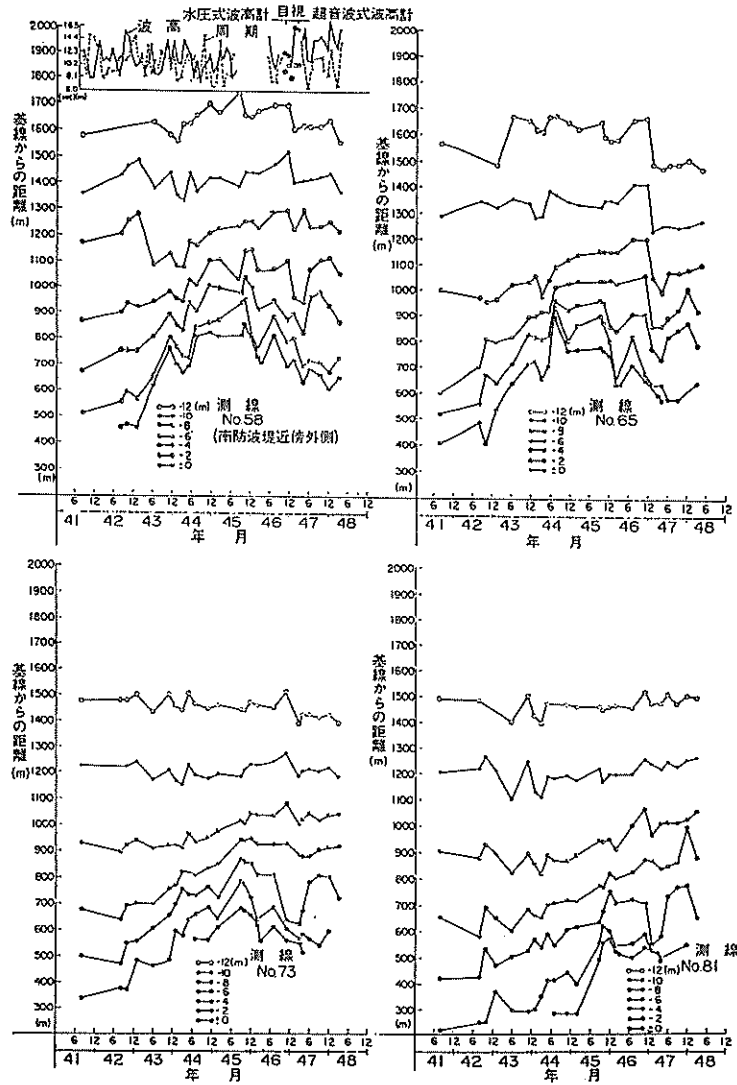


図-1.17 基線から等深線までの距離の経時変化 (鹿島港南海岸)⁷⁾

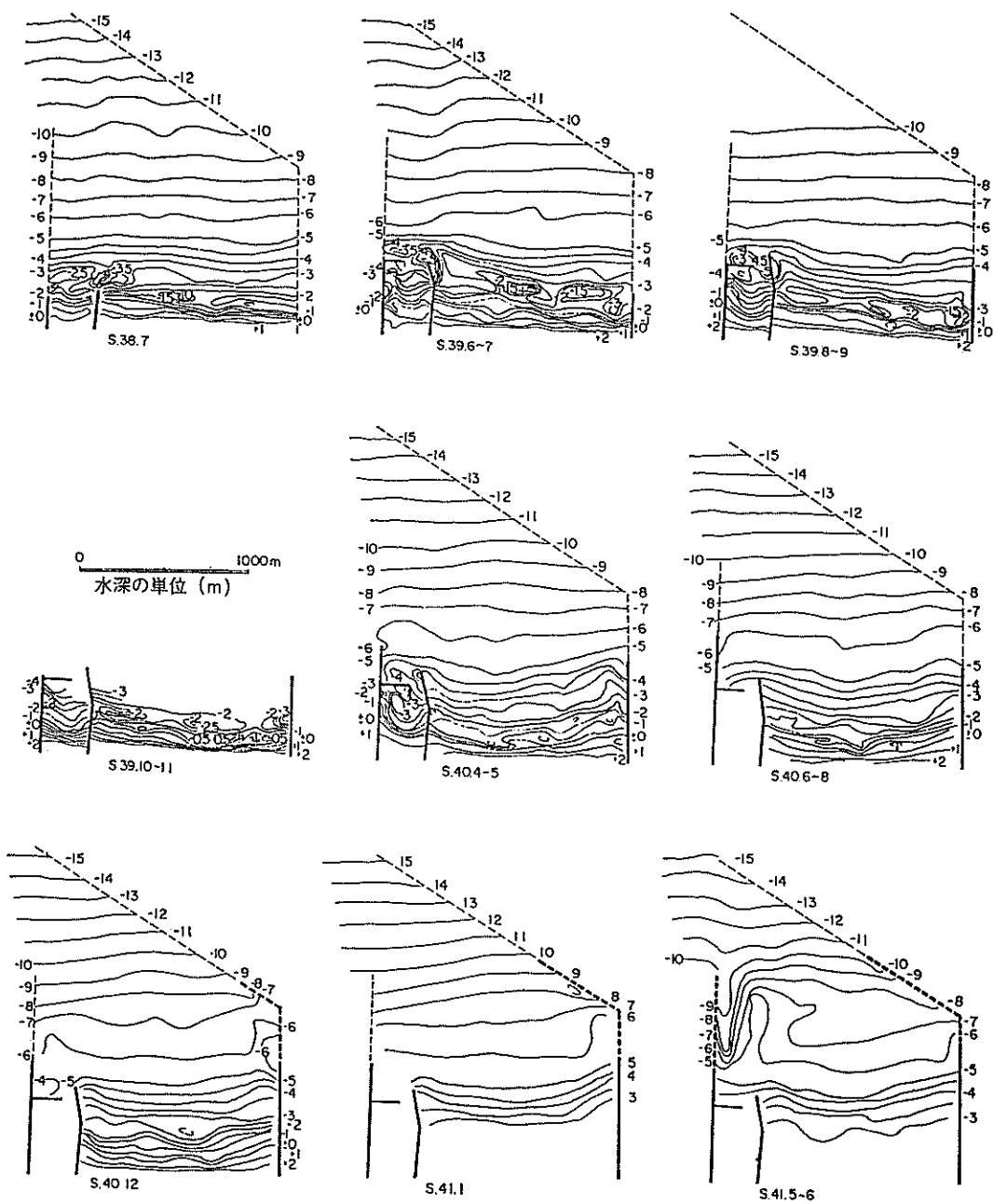


図-1.18 (1) 港内深浅図の枚数が多いときの表示 (鹿島港)⁷⁾

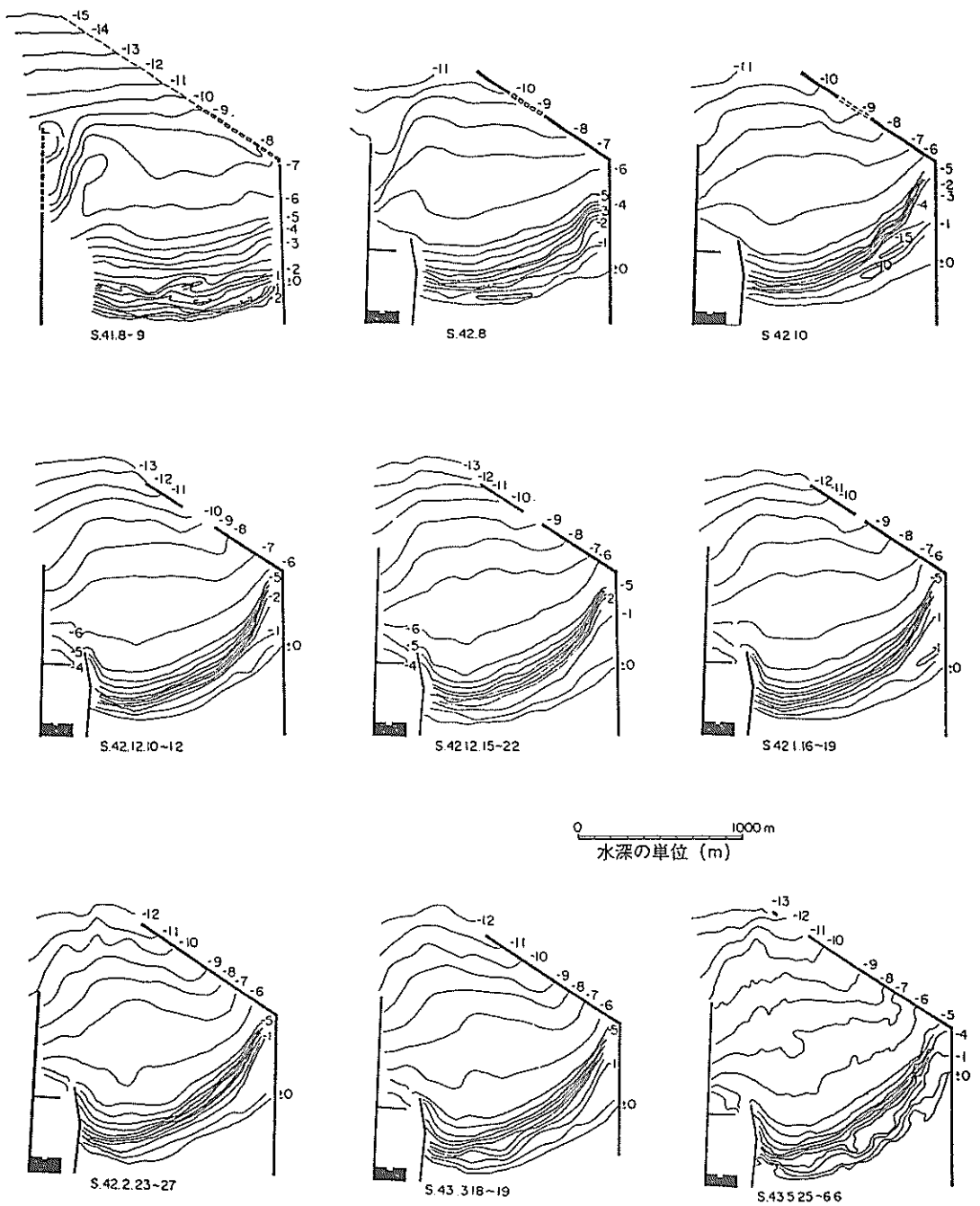


図-1.18 (2) 港内深浅図の枚数が多いときの表示 (鹿島港)⁷⁾

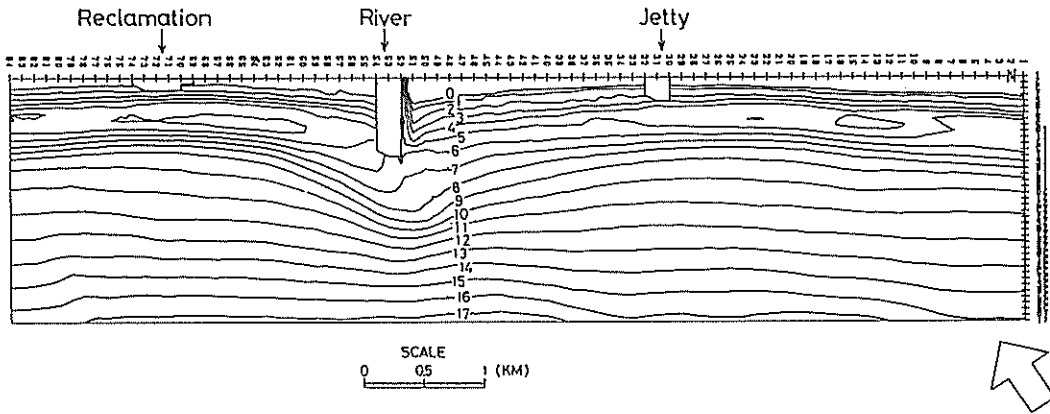


図-1.19 デジタルデータのcontour出力例 (宮崎海岸)¹⁰⁾

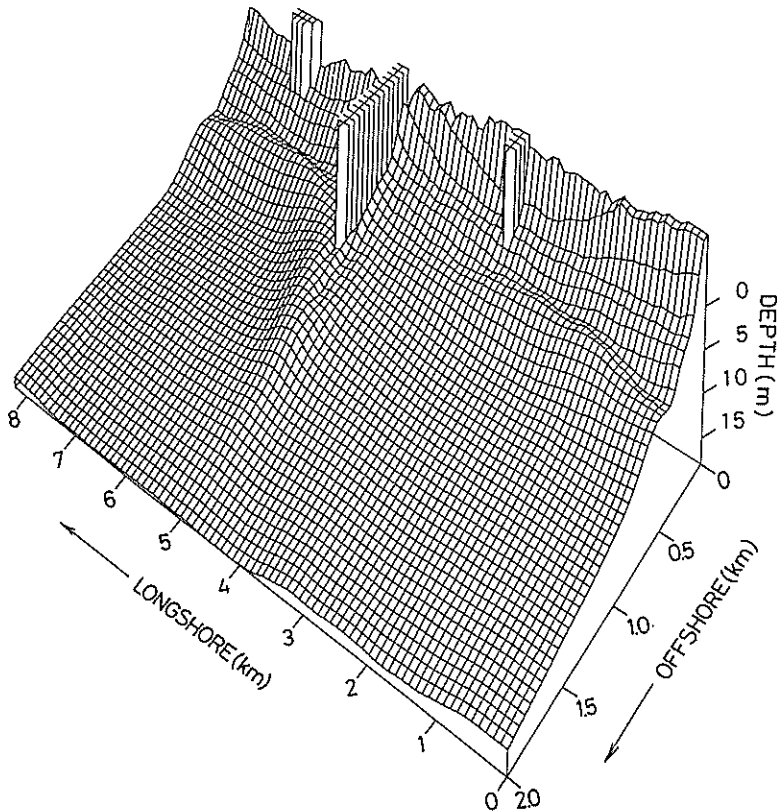


図-1.20 デジタルデータの立体図形出力例 (宮崎海岸)¹⁰⁾

格段に理解し易い。

(2枚の深浅図の重ね合わせ)

2枚の深浅図の重ね合わせは、デジタルデータ処理としては、最も簡単なものである。図-1.21は図-1.13に示した吉野川河口周辺の海底地形の洪水時変化をデジ

タルデータにより計算し、地形変化量をContour出力したものである。この図では、海底地形そのものについての情報は失われたが、地形変化量はよく分かる、すなわち、吉野川左岸沿いの細長く沖へ伸びる侵食の著しいことがまず認められる。そのなかで特に河口部の侵食が激しく

3m以上である。右岸沿いにも侵食が認められるが、左岸沿いに較べればわずかであり沖への伸びも少ない。一方堆積は、河口前面で左岸沿いの沖へ伸びる侵食を囲むように生じていることと、右岸沿いの侵食の沖側に小規模なものが生じている。さらに、小松海岸前面には沿岸方向に細長く堆積が生じている。全体に侵食地域に較べ堆積地域が広いが、堆積厚は侵食深さより少ない。

このような、デジタル値による2枚の深淺図の重ね合わせは、たとえ海底地形が複雑であっても何ら問題なく実行できる。

〔水深変化のトレンド〕

水深変化のトレンドとは、ある地点の水深変化がどのような傾向を有するかということである。トレンド計算は、図-1.22に示すようにある格子点の水深変化を最小自乗法によって、

$$h(t) = a \cdot t + b \text{-----} (1.1)$$

で直線近似するものである。水深の定義（一般に下方向を正にとってある）より、 $a > 0$ のときは侵食傾向、 $a < 0$ のときは堆積傾向をそれぞれ示す。 a の値は単位

時間当り（例えば、月、年）の水深変化量、すなわち水深変化速度に対応する。したがって a の絶対値が大きいことは、その傾向が強い。式(1.1)以外に2次曲線、対数曲線、指数曲線等で水深変化を近似することも可能であるが、それらの係数の中で水深変化速度をうまく表すものがないので、近似式としては式(1.1)の一次式が優れている。

式(1.1)のトレンド計算を各格子点についておこない、得られる a の値を図化すれば、結果として複数枚の深淺図を重ねたものと同じものになる。図-1.23は、新潟東港周辺の1962年7月～1973年10月の深淺図23枚のデジタルデータをもとに、計算した a の値をContour表示したものであり、図中の数字は水深変化速度（1.0が12cm/year）に対応している。この図を、最初と最後の2枚の深淺図を重ね合わせた図-1.11と比較すると、今度のほうが、海底地形変化の状況、範囲、速度がよく分かる。そして、簡単ではあるが最小自乗法を用いているので、深淺図の誤差もある程度取り除かれているはずである。

各格子点における a の値は立体表示することも可能で

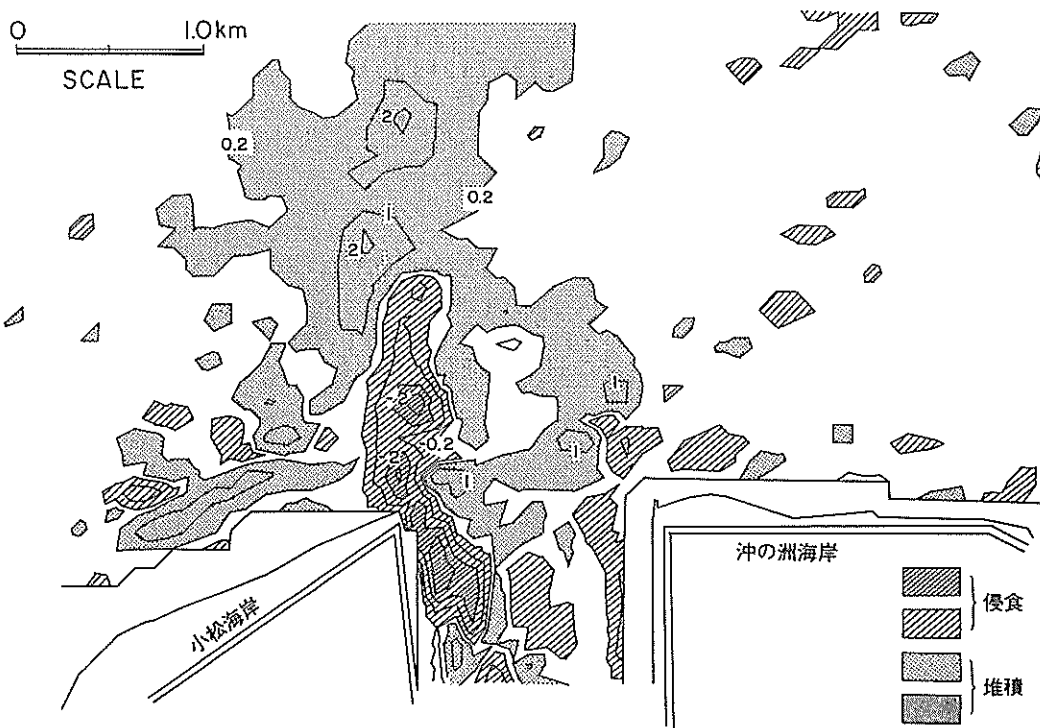


図-1.21 デジタルデータによる2枚の深淺図の比較（吉野川河口周辺）⁹⁾

ある。このときは、 a の値が正か負によって侵食傾向、堆積傾向になるので、それぞれを分けて表示したほうがよい。例えば、宮崎海岸についてトレンド計算した結果を表示したのが、図-1.24 (1), (2)である。両図とも、高く盛り上がっているほど、その傾向が強い。

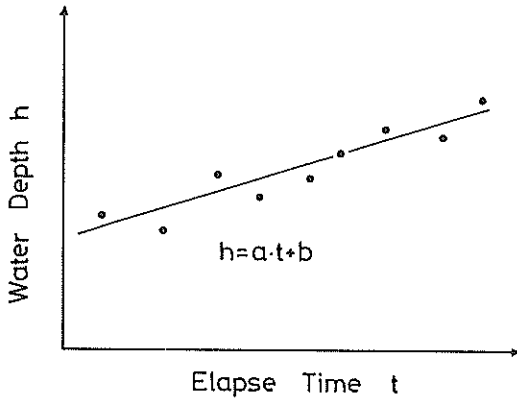


図-1.22 各測点における水深変化の直線近似
(トレンド計算)

〔海浜変形土量の計算〕

海浜変形土量の計算は、アナログデータ処理においても深浅図から水深値を拾って、しばしばおこなわれることである。しかしながら、それに大変な時間を要する作業となる。一方、デジタルデータの場合には、プログラムソフト上の問題もほとんどなく、電子計算機によって迅速に処理することが可能である。したがって、土量の計算をする区域も、計算結果を見ながら何度やり直してもあまり苦痛は感じない。

新潟東港周辺の海浜変形の検討では、変化土量の計算の代わりに、図-1.25に示す区域内の平均水深を各測量年月の地形について計算した。図-1.26は、阿賀野川河口前面区域内の平均水深の経年変化を示したものである。河口前面では、一定の速度で平均水深が深くなっていること(侵食の進行)が分かる。この図では、区域内の平均水深を表示してあるので、特定の一点の水深変化を示すよりも精度は高い(2.2参照)。なお、平均水深の変化量に各区域の面積を掛けると変化土量になる。

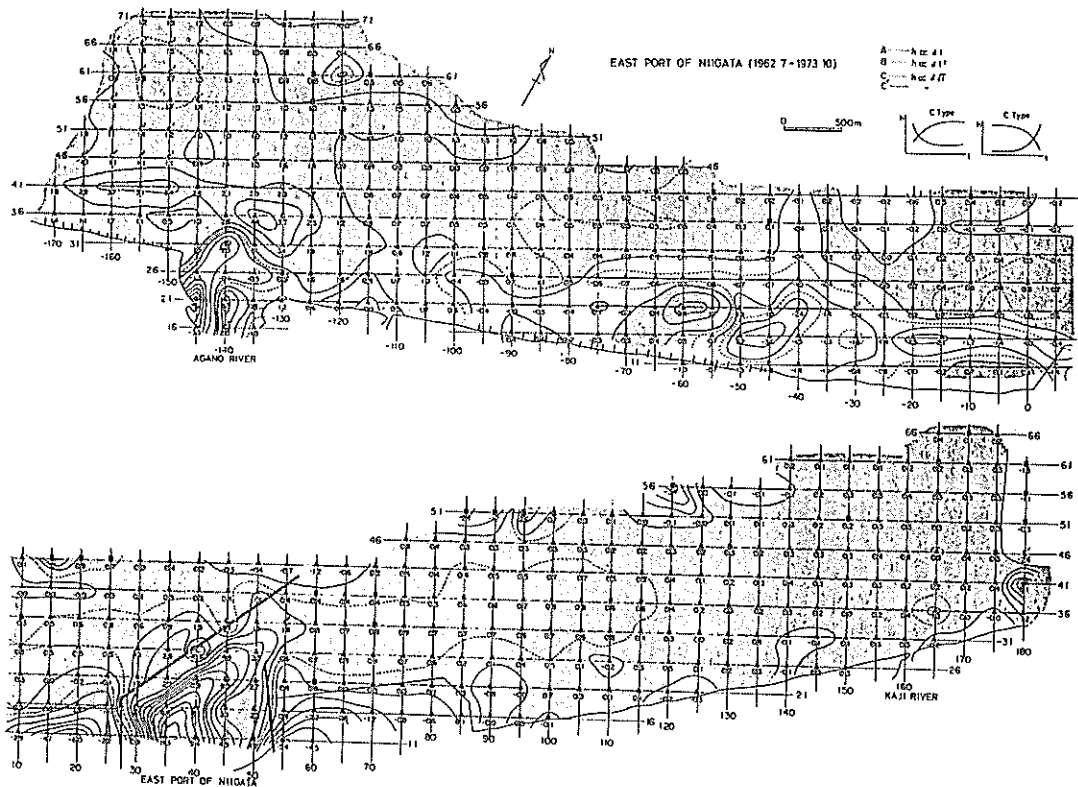
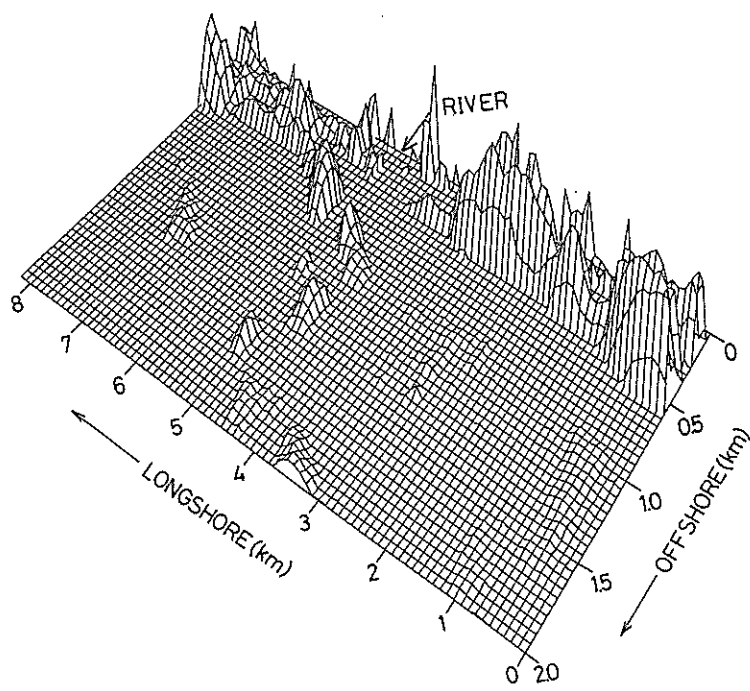
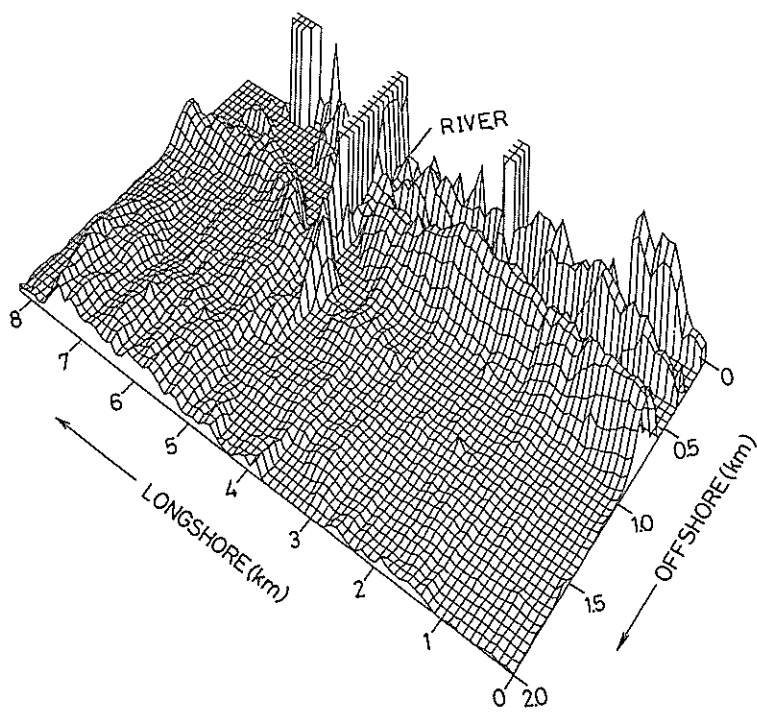


図-1.23 水深変化のトレンドのcontour表示(新潟東港周辺)⁹⁾



(1) $a < 0$, 堆積範囲



(2) $a > 0$, 侵食範囲

図-1.24 水深変化のトレンドの立体表示 (宮崎海岸)¹⁰⁾

〔水深変化の相関性〕

漂砂現象は、時間的空間的に連続したものであり 侵食および堆積は関連しあって生起するものであるから、ある区域の平均水深の時間変動は隣接区域の時間変動と相関がある。各区域間の水深変化の関連性を知ることは、海底の地形変化を理解するうえで重要なことである。デジタルデータを用いると、平均水深変化の相関係数を簡単に計算することが出来る。

図-1.27は、図-1.24に示す区域内の平均水深変化の相関係数をランク表示したものである。図によると、No.1~15の区域(阿賀野川河口前面)およびNo.29~47(新潟東港近傍周辺)区域は、それぞれ相関係数が高い。すなわち、お互によく似た変化をしていることになる。これに対して、No.19~25の区域と前二者の領域の相関係数は負になっていて、逆の変化をしていることが分かる(図-1.23より堆積と判断される)。

〔経験的固有関数による解析〕

相関係数の計算は、区域内の平均水深に限らず格子点の水深についても可能であるが、その場合は結果を図示

するマトリックス(図-1.27のようなもの)が非常に大きなものとなり、実際には不可能である。だがこれに対しては、経験的固有関数による解析が適用できる。

この解析は、ある期間、ある地域で起こっている海底地形変化をそれぞれに独立ないくつかの海底地形変化の線型結合と考え、それぞれの海底地形変化を把握することによって実際の海底地形変化を理解しようとするものである¹⁰⁾。

水深は、式(1.2)で示されるように時間の関数と場所の関数の積の線型結合で表される。

$$h(x, y, t) = \sum_{i=1}^n C_i(t) \cdot e_i(x, y) \quad \text{----- (1.2)}$$

$C_1(t) \cdot e_1(x, y), C_2(t) \cdot e_2(x, y), \dots, C_n(t) \cdot e_n(x, y)$ が前述した「それぞれに独立な、いくつかの海底地形変化」に相当する。この解析結果に基づいて、いろいろな要因が複雑にからみ合って生じた海底地形変化を、原因別に分けて考えることができる。さらにトレンド法による解析が海底地形変化を直線近似してし

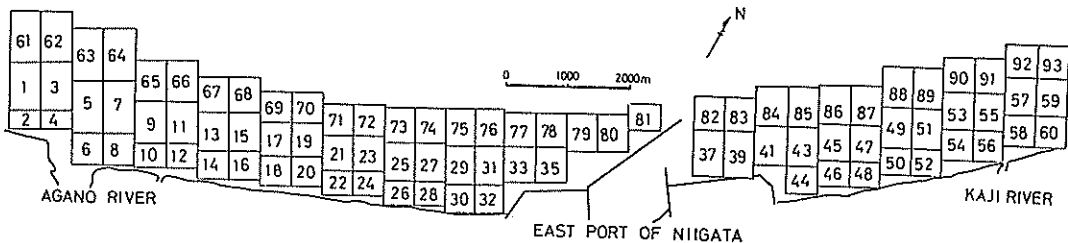


図-1.25 平均水深計算区域および区域番号(新潟東港周辺)⁸⁾

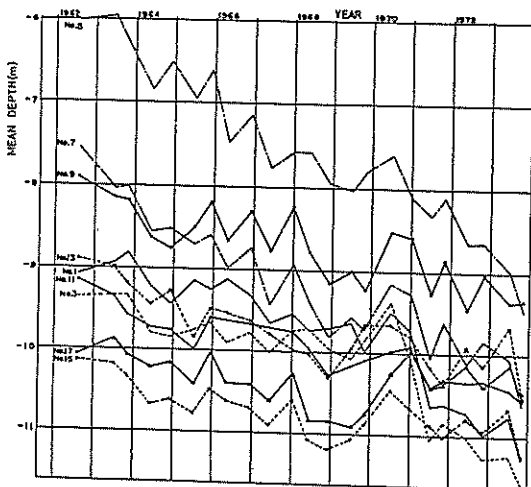


図-1.26 平均水深の経年変化(新潟東港周辺)⁸⁾

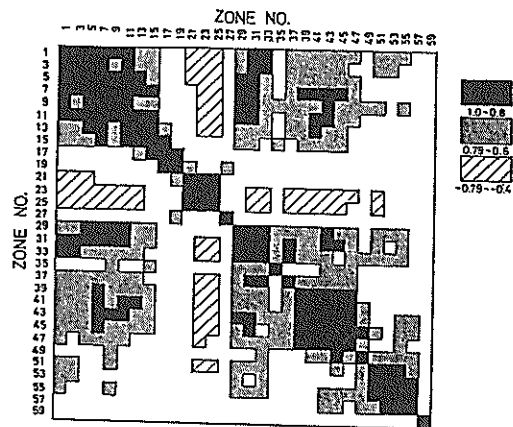


図-1.27 中間領域区域の相関係数(新潟東港周辺)⁸⁾

まっているため地形変化の時間的変化がつかめないのに対して、経験的固有関数による解析は、地形変化を時間と場所の関数の積として表しているので時間変化をも明らかにすることができる。このために、実際の地形変化を外力の変化と結びつけてより詳しく把握することができる点で有効である。

経験的固有関数解析の解析結果については、第Ⅱ編に詳しく述べる。

4. 深浅図を用いた海浜変形予測、海浜変形監視の可能性の検討

4.1 デジタル深浅データによる海浜変形予測の可能性

我々は日常生活において実にさまざまな予測をおこなっている。それらは主に我々の過去の経験に基づいている。例えば、今夜これ以上飲むと明日は宿酔になるとか（過去のパターンの繰り返し）、このペースで原稿を書いているととうてい切までに間に合わない（過去の状況の外そう）とかである。このような経験的予想は、事象に関与する要因が増加するにしたがって、難しくなる。だが、関与する各要因の重要度を考慮に入れることにより、おおまかな予測は少ない要因だけで何とかなるようである。

海浜変形にも、種々の要因が関与している。これについても、各要因が分離でき、かつそれらの重要度が評価できれば、遠い将来はともかく近い将来の海浜変形は何か予測できるのではないかと考えられる。従来の経験工学的手法は、過去のデータに基づく要因の分離および重要度の評価を、海浜変形を調べる者の主観にたよっておこなっていた。この作業を客観的におこない、そして数量的に把握することが出来るなら、経験工学的予測手法はもっと広い範囲の人々も出来るようになる。

経験的固有関数では、過去に生じた海浜変形を空間的・時間的に独立した成分に分離することが出来、しかもそれらの重要度が寄与率という数値で表される。そして、分離された空間的成分（地形変化のモード）に対して、各々一つの時間に関する係数が対応する。

すなわち、経験的固有関数解析が終了した時点で、深浅測定の実施順に、

$$C_i(t), \quad t = 1, \dots, n_i \dots\dots\dots (1.3)$$

が既知である。 n_i は過去の深浅測定の回数である。空間モード $e_i(x, y)$ は時間的に不変であるので、近い将来 $t = \bar{t}$ （深浅測量を繰り返す間隔程度将来）の時間係数

$C_i(\bar{t})$ を予測出来れば、 $t = \bar{t}$ における海浜地形 $h(x, y, t)$ は、

$$h(x, y, \bar{t}) = \sum_{i=1}^n C_i(\bar{t}) \cdot e_i(x, y) \dots\dots\dots (1.4)$$

となる。式(1.4)で $e_i(x, y)$ は過去のデータに基づく経験的固有関数解析で得られたものをそのまま使用する。言い換えると、式(1.4)で将来地形を予測することは、 $e_i(x, y)$ が今後も変化しないという仮定をしていることになる。結局、深浅データを用いた海浜変形予測は、経験的固有関数解析で得られる $C_i(t)$ を基に将来 $t = \bar{t}$ の $C_i(\bar{t})$ をいかに予測するかという問題に帰着する。

簡単な実測データを用いて、以上述べた考え方を具体的に示す。ここでは、三次元的な海底地形のデータではなく汀線位置のデータを使用するが、海底地形データについてもまったく同様である¹⁰⁾。

用いたデータは、茨城県河原子海岸の汀線データ(D. L. + 1.5m)であり、1981年4月～1982年8月の間に1ヶ月間隔で測定された汀線データを基に1982年9月の汀線位置を予測する。図-1.28は、汀線データについて経験的固有関数解析をおこなった結果のうちモード3まで（累積寄与率89%）を図示したものである。図中の横軸の数字は、測量月を示している。まず $C_1(t)$ についてみると、ほぼ1年程度の周期変動をしているのが認められる。したがって、次に測量を実施する予定の1982年9月の $C_1(t)$ は、前年の9月を参照することにより、図中黒丸印あたりの値となるのではないかと判断されよう。同様に $C_2(t)$ についても前年の9月を参考に、図中黒丸付近の値になるものと推察される。一方、 $C_3(t)$ については、周期変動というよりは、前年7月ごろから一様の傾きで増加しているため、図中黒丸印が9月の値として予測される。

さて、このように過去の $C_i(t)$ の変動特性から予測された9月の時間係数の値 $C_i(\bar{t})$ を用い、式(1.4)で汀線位置を予測した結果を、図-1.29に実線で示してある。同図には、9月の汀線の実測値も点線で示してある。両者を比較すると、予測値は実測値によく似ていることが分かる。

以上のような海浜変形の予測は、まったく過去のデータに依存している訳であり、海浜の変形機構を無視しているのであるから、これは経験工学的予測手法であるが、従来のものと較べて予測内容の客観性が高められている。しかしながら、依然として $C_i(\bar{t})$ の評価に主観が含まれているので、次に $C_i(\bar{t})$ を客観的に評価する方法に

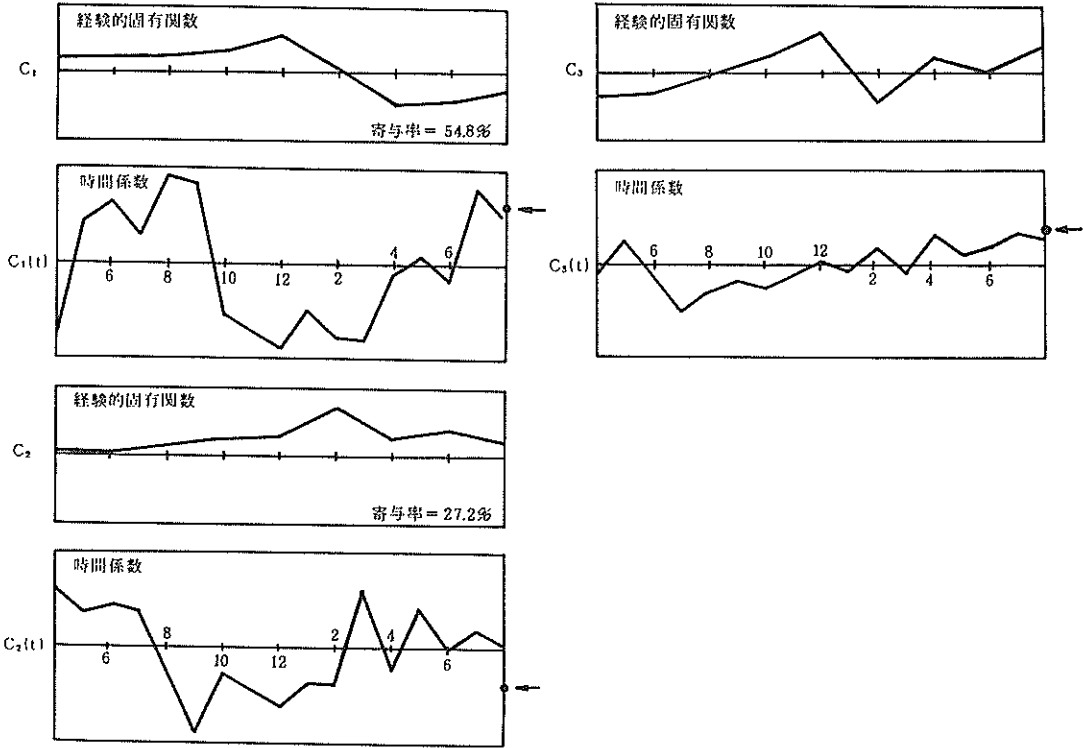


図-1.28 汀線データの経験的固有関数解析結果 (茨城県河原子海岸)

ついて述べる。

i モードの時間係数の予測値 $C_i(\bar{t})$ は、他のモードの時間係数に関係なく $C_i(t)$ の変化特性から、自己回帰することによって求められる。まず、時系列 $C_i(t)$ を現在を 0 とし過去にさかのぼる方向に番号をつける。

$$\dots, C_i(3), C_i(2), C_i(1), C_i(0), C_i(\bar{t}) \dots (1.5)$$

\uparrow \uparrow
 現在 近い将来

そして、 $C_i(\bar{t})$ は過去のデータによって次のように表現できるものと仮定する。

$$C_i(\bar{t}) = \sum_{m=0}^M a_m \cdot C_i(m) \dots (1.6)$$

ここで、 M は過去のデータについてどこまでさかのぼり考慮するかを示す数であって、前もって決めてやる必要がある¹¹⁾。式 (1.6) の係数 $a_m (m=0, \dots, M)$ は、式 (1.6) の両辺の差の自乗の期待値が最小になるように決める。すなわち、

$$\epsilon = E\left\{[C_i(\bar{t}) - \sum_{m=0}^M a_m \cdot C_i(m)]^2\right\} \dots (1.7)$$

を最小にする a_m を決める。

簡単のために $M=0$ のときの a_0 の決め方を以下に示す。 $C_i(t)$ を時刻 t のときの時間係数とし、 t から λ (測量期間間隔) だけ時間経過したときの時間係数を $C_i(t+\lambda)$ とする。 $M=0$ とおくことは、

$$C_i(t+\lambda) = a_0 \cdot C_i(t) \dots (1.8)$$

によって、 $C_i(t+\lambda)$ の値を評価するということである。したがって、

$$\epsilon = E\{[C_i(t+\lambda) - a_0 \cdot C_i(t)]^2\} \dots (1.9)$$

を最小にする a_0 を求めるために、式 (1.9) を a_0 で偏微分して、0 とおくと、

$$a_0 = \frac{E\{C_i(t+\lambda) \cdot C_i(t)\}}{E\{C_i(t) \cdot C_i(t)\}} = \frac{R(\lambda)}{R(0)} \dots (1.10)$$

となる。ここで $R(\lambda)$ 、 $R(0)$ は、自己相関係数であり、 $C_i(t)$ の時系列データから計算でき、 a_0 が求ま

る。

図-1.30は、時間係数を図-1.28のように $C_i(t)$ の変化を見て主観的に決定した場合と、式(1.8)、(1.10)を用いて計算した場合について、汀線位置の予測精度の比較をおこなったものである。ここで、予測精度は、図-1.29で示してあるように、予測汀線と実測汀線の差 Δh の標準偏差

$$Q = \left[\frac{1}{n} \sum \Delta h^2 \right]^{1/2} \quad \text{----- (1.11)}$$

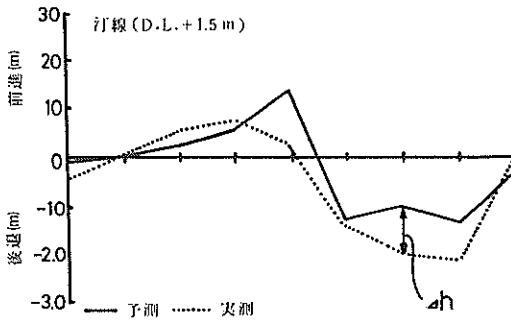


図-1.29 汀線位置の予測値と実測値の比較

で評価した。なお、図-1.30において、例えば1982年10月の白丸のプロットは、最初から1982年9月までのデータを用いて、10月の汀線を予測したときの精度である。この図によると、式(1.8)のような最も単純な自己回帰モデルでも、主観的判断程度(黒丸)あるいはそれ以上の予測精度が期待できそうである。

以上述べた予測手法をプログラム化しておけば、データ解析(経験的固有関数解析)から、それに基づく将来予測まで連続して計算機で行えるようになり、経験工学的予測が客観的(要するに、誰がやっても同じになるという意味)なものになる。

プログラム化にあたっては、若干の修正、検討を要する。それは、深淺測量が必ずしも一定期間間隔で実施されていないので、この場合の自己回帰モデルをどうするかということ、経験的固有関数解析では、地形データだけでなく外力も含めて同時に解析できるので、外力を積極的に取り入れることによって予測精度をさらに向上させることが出来るのではないかということである。

4.2 深淺図による海浜変形監視

深淺図のアナログデータを用いた海浜変形の監視は、今までも大なり小なり実施されているので、ここでは

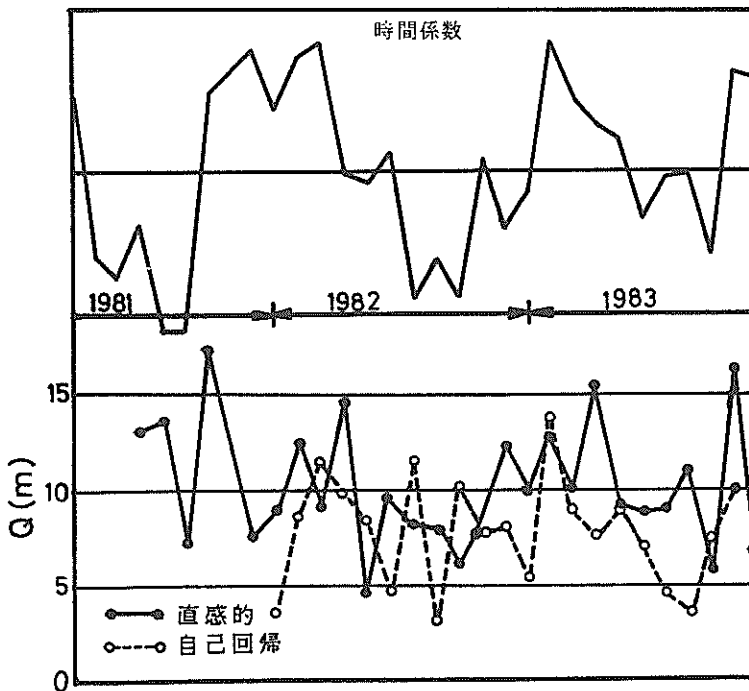


図-1.30 汀線位置の予測精度，式(1.10)

デジタルデータによる海浜変形監視について述べる。ここでの議論は、過去の深浅データがデジタル値として、電子計算機で処理できる状態で（例えば磁気テープ）保存されていて、しかも、前節で述べた経験工学的予測が数量的（客観的）に可能であることを前提としている。

図-1.31にデジタルデータを用いた海浜変形監視フローを示してある。このフローに従って以下に説明する。

「前回の深浅測量」が終了した時点で、深浅データをデジタル化してそれまでに保存していた深浅データに

追加する。と同時に、経験的固有関数解析を実施し、得られる時間係数を基に自己回帰モデルで $C_i(\tilde{t})$ （次回の深浅測量時の時間係数）を計算し、次回の深浅測量時の海浜地形を予測しておく（A）。現在港研で開発した深浅図解析プログラムではACOS-1000（港研にある大型電子計算機）を用いると、経験的固有関数解析までの計算に要するCPU時間は、図化出力計算も含めて2分弱であるので、海浜地形の予測およびその図化出力までさらに計算したとしても3分はかからないと考えられる。

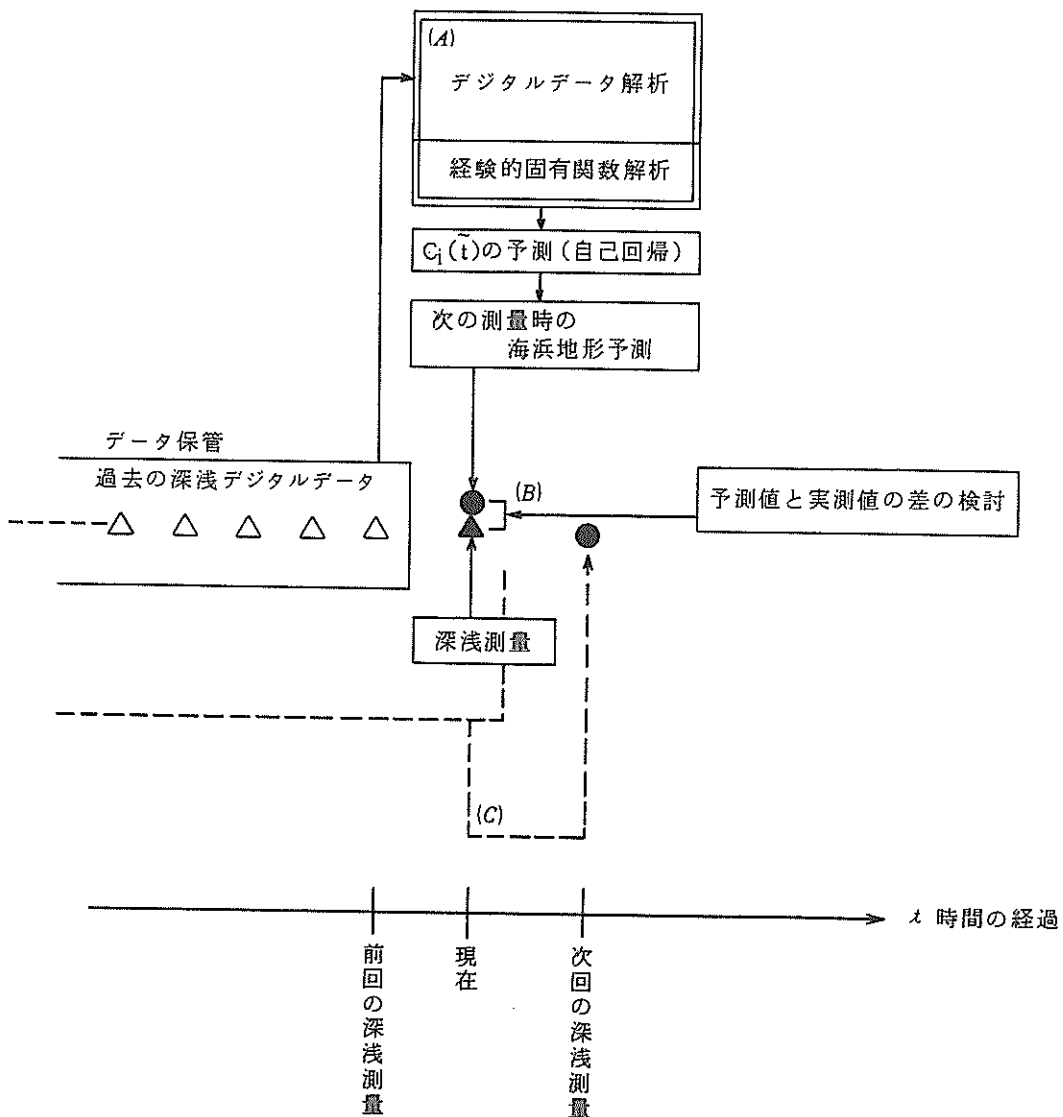


図-1.31 深浅デジタルデータによる海浜変形監視のフロー

そして「現在」、深淺測量が実施された時点での海底地形のデータが入手されたとしよう。それと、「前回の深淺測量」終了時に予測しておいた海浜地形を比較する(B)。もちろんこの比較は電子計算機でおこなう。最も手っとり早い方法は両者の差を計算して、その違いを図-1.21のような差分図で図化出力することである。その結果両者の間にあまり差がなければ問題ないが、何らかの差があるときは、それが何であるかの検討をしなければならない。経験工学的予測では、過去になかった状況についてはその性格上予測できないのであるから、防波堤の延伸、航路浚渫、異常気象等の結果生じたと考えられる海浜変形については、実測された地形と一致しない。次に、それが好ましいか好ましくないかの判断をしなければならないし、場合によっては早急に対策を講じなければならない。これは、当分の間電子計算機では無理であり、当時者が判断せざるを得ない。

次に、最新の深淺データをこれまで保存してあった深淺データに追加し、それらをまとめて再度デジタルデータ解析を実施し、「次回の深淺測量」時の海浜地形を予測しておく(C)。前回と今回の間に、海浜が新たな経験をした場合(防波堤の延伸、航路浚渫、異常気象等)は、今度はその経験が将来予測に生かされる。これが経験工学的予測手法の強みである。

説明の都合上3ステップに分けたが、実際の計算ではこれらの計算をまとめて1回ですませてしまうことが便利であろう。というのは、3ステップまとめた計算に要する時間はどんなに多めに見積っても10分とはかからないと思うし、また予測した海浜地形を次回の比較のためにデジタル値で保存しておくのは面倒だからである。

なお、これまで何回か実施した経験的固有関数解析によると、測線の間違い、潮位補正の間違い等は簡単に見つけることが出来たので、海浜変形の監視とともに、深淺測量成果の検収もできる。

5. 深淺図の保管についてのガイド

〔保管形態〕

深淺図の保管形態の考え方は、大きく2つに分類される。すなわち、深淺図を散逸することなく確実に保管する場合と、何度も取り出して種々の目的で利用するための保管である。ここでは前者について述べ、後者については後述する。

深淺図の保管だけでなく、いかなるデータ・情報の保管にも共通することは、やたらめったら何でもかんでも保管するのは、本当に貴重な情報の保管にとって極めて

大きな障害になるということである。したがって、深淺図について言うならば、深淺図の原図以外の情報(例えば、測深記録紙、測量観測野帳、測量整理台帳、水位観測記録、水位基準の記録および測量基準等の記録)は、保管の対象とはせずに、すべて棄ててしまう努力をすることである。このような資料を棄てるには、大変な勇気と決心が要求される。そして不安がともなう。だが、『参考記録を記入して疑問の余地のないように深淺原図を完成』さえしておけばよいのである。これが最もすぐれた保管方法である。

深淺原図だけを保管するという基本に立つと、たとえ一港において100年間の深淺データを保管するとしたところで、せいぜい数百枚~千枚程度にしかならないであろう。だから、保管のための空間もたいしたことはない。

深淺原図を保管する際に、出来る限り考慮しておきたいことにデータの複製と、データの画一化がある。データの複製というのは、深淺原図を永久保存するための安全装置である。すなわち、何らかの天災、災害により深淺原図がなくなってしまうことを防止するために、原図の複製をとっておくということである。この目的のためには、複製は原図と異なる材質を用いて、かつ原図と空間的に隔たれた場所に保管しておくのが理想的である。例えば、深淺原図をコピーし、原図を工事事務所、コピーを建設局で保管というようにしておけば、たとえ一方がなくなっても、他方のものから復元することが出来る。

深淺原図から保管のための複製をつくる方法として考えられるものに、以下の3形態がある。

- (a) マイクロフィルム
- (b) マイラー原図
- (c) 光ディスク、フロッピーディスクへの記録

マイクロフィルム化は通常35mmのものが使用される。これは、小さなものであるので保管場所のスペースの問題はないのだが、逆に小さすぎてどこかに紛れ込む恐れがあるほどである。また、深淺原図を一枚のマイクロフィルムにしたのでは、やや凝縮しすぎるきらいがあり、何らかの理由(深淺原図の紛失、マイラーの作成等)で復元するときに精度上の問題を生じる。そこで、一枚の深淺原図を適当な大きさに分割してそれぞれを一枚のマイクロフィルムにするのがよい¹³⁾。このように分割してマイクロフィルム化しても、そのままでは小さすぎて、そこから海浜変形を調べることは困難である。

これに対し、マイクロフィルム作成時のネガフィルム

をA-3版マイラーに焼き付けることによりマイラー原図を作るのがよい¹²⁾。これは、このままで保管することもできるし、また後述するように深浅図を利用するための保管形態としても便利なものである。

最近ではミニコンを用いた画像情報ファイルシステムが実用化されている。画像情報ファイルの記録媒体である光ディスクは、現在のところ最も信頼のおけるものであり、記録された情報は半永久的に保存することが出来る。しかも、記録密度は高く、直径30cmの光ディスク1枚(両面)にA4サイズの図面だと60,000枚、直径20cmの場合だと16,000枚記録できる。

光ディスクへの図面の記録は、常にCRTディスプレイで確認しながら、通常の電子コピーと同じような操作で出来る。入力可能な最大用紙サイズはA1版であるので深浅図を入力するにはあまり問題ないし、場合によっては、マイクロフィルム、マイラーのように分割して入力してもよい。画像の入力精度(読み取り密度)は、1mmあたり16ドットあるいは8ドットあるので、0.0625mmあるいは0.125mmとなっている。これを縮尺1万分の1の深浅図の場合の入力精度にあてはめると、後者の場合現地スケールで1.25mとなり、精度上の問題はない。

システム全体は、マイクロコンピュータで制御されているので、ファイルされた深浅図の検索は種々の方法により短時間で効率よく行え、必要な深浅図をCRTディスプレイに表示できる。さらに、表示画面上で指定した点を中心として、2倍、4倍、8倍、に画像を拡大表示することも簡単である。表示した深浅図が必要ならば、プリンター装置で印刷出力する。

画像情報ファイルシステムは大変便利なものであるが、強いて言うならば二つの欠点がある。その一つは、画像の入力がモノクロ(白黒)に限られるということである。ただ、この欠点は深浅図の場合、ほとんど障害とはならない。しかし、もう一つの欠点、すなわちシステムの全体価格が高価であることは問題である。

画像情報ファイルシステムは、先に述べたように光ディスク1枚(30cm)にA4版で60,000枚の図画が記録できるものである。光ディスクの枚数を増やせば記録枚数は膨大なものになる。当分の間、深浅図の枚数がこんなに増大することはとても考えられない。したがって、画像情報ファイルシステムは、深浅図保管という単一目的で考えるのではなく、他の資料、文章を含めた多目的で考えるものであろう。このように考えると、システム全体価格もある程度導入可能なものに近づけるのではないだろうか。

深浅原図は、測量範囲、縮尺が年によってまちまちで

あるので、その用紙の大きさが不揃いである。これは、情報の整理、保管という面からやりづらいものである。これに対し、マイクロフィルム、マイラー、光ディスク等では、情報が画一化されて保管されるので、整理・検索の点で優れている。

[深浅図の基準点]

深浅図の価値は、年代の異なる複数枚の深浅図を重ね合わせて海底地形変化を調べることが出来るようになって、飛躍的に増大する。そこで、深浅図の保管に際しては、後で重ね合わせが出来るようにしておかなければならない。そのために変化しない固定された基準点を設定しておく必要がある。また、空間的にも、前述したように深浅原図を分割保管する可能性が高いので、相互関係が明確になっていなければならない。このようなことを考慮すると基準点位置を深浅図に記入すると同時に、その座標値を明記しておくのがよい。

深浅図を分割保管する場合には、それぞれの分割図の中に最小限2地点の基準点、同座標値を記入しておく必要がある。

[深浅図有効利用のための保管]

(a) アナログデータの保管

アナログデータの解析は、深浅図をそのまま利用するものであるから、深浅原図、マイクロフィルム、マイラー、光ディスク等の保管形態のいずれのものも使用し得るものとなる。しかしながら、深浅原図は基本となるデータであるので、繰り返し使用しないほうが望ましい。また、マイクロフィルム(35mm)は、小さすぎて実際の作業に使用することが困難である。したがって、マイラーか光ディスクに保管している深浅図データを使用することになる。ただし、マイラー原図はそのままでももちろん使用できるのであるが、繰り返し使用するので出来る限り直接使用することは避け、そのコピーを取って利用するようにすべきである。光ディスクに保管しているデータは、先に述べたように簡単に印刷できるのでその印刷されたものを利用する。

したがって、深浅図をアナログデータとしてだけ利用するのならば、前項で述べたように保管してよいことになる。

(b) デジタルデータの保管

深浅図の枚数が多くなっても、計算機でデータ処理できれば、解析は能率良く行える。また、深浅図を計算機で処理した結果を使用して、客観的な経験的海浜変形予測や海浜変形監視を実施できる可能性がある。このようなことを考えると、深浅図の本格的解析はデジタルデータを用いて計算機で行うべきであろう。

デジタル手法は、一般に連続なものを多数の不連続点で表現しようとするものであるから、できる限り忠実にその特性を数値で表現するものでなければならない。図形情報をデジタル化する手法は、いろいろ考えられるが、そのうちの手法によるかは、Case by Caseであって、一概には言えない。

深浅図のデジタル化の場合は、格子交点の水深値を利用するのがよいと考えられる。その主な理由は次のとおりである。

- ① 各地域において統一した格子を設定することは、多数枚の深浅図を処理解析するとき、きわめて系統的にできる。
- ② もともと深浅図（アナログ）があるのであるから、デジタルデータを深浅図に変換する必要は少ない。たとえ、そのような事態になったとしても電子計算機のソフトで十分対応できる。

3. 3のデジタルデータの解析例はすべて、格子交点の水深をデジタル化したデータを使用している。

設定する格子は、前項で述べた基準点と同様に、同一地域の一連の深浅図に時間とともに変化しない固定した格子を設定しておく必要がある。水深をデジタル化する精度は、深浅測量の精度を考えると、10cmのオーダーが限度である。

深浅図のデジタル化は、深浅図が何枚かたまつたところでまとめてするものも一つのやり方であろうが、経験的海浜変形予測、海浜変形監視に利用するためには、深浅測量実施毎にデジタル化する必要がある。そもそも、深浅図は、アナログデータである測深記録から測線に沿ってある間隔で水深をデジタル化し、その結果を平面図上に記入し等深線を描いたものである。すなわち、深浅図の製作過程において、デジタルデータを取り扱う部分がある。この部分をうまく処理すれば、計算機解析用のデジタルデータとして利用できる。したがって、従来の深浅測量業務の中に、デジタル化の作業も含めてしまうのが最もよい方法となろう。

デジタルデータの記録・保管は、現在のところ磁気テープが適していると考えられる。それは、記録容量が大きいことと、異なる計算機種間の互換性がよいということのためである。磁気テープへのデジタルデータの記録の形式は、極端なことを言えば、格子交点座標とその地点の水深データが対応するようにさえなっていれば、どのような形式であってもよい。ただし、同一地域の深浅図については、各年とも同じ形式でデータを記録しておく。また、将来何らかの都合により磁気テープに記録してあるデジタルデータの記録形式を変更しなければならなく

なった場合には、計算機を用いて過去のデータの記録形式を容易に修正・変更できる。

新しく深浅測量から得られるデジタルデータはそれまでのデジタルデータが記録されている磁気テープの後に追加記録して保管するのがよい。

6. おわりに

継続的な深浅測量成果だけが、唯一海浜変形を直接確認することの出来る資料である。このため、過去海浜変形の実態を把握することはもちろんのこと、経験工学的手法、水理模型実験、数値シミュレーションにより海浜変形の将来予測を実施しようとするときに、深浅図はきわめて基本的で貴重なものである。さらには、深浅図を用いた客観的な経験工学的予測や海浜変形の監視にまで利用できそうであるということを考えて、その価値はさらに増大する。したがって、港湾の計画、設計、施工、管理の各過程で実施された深浅測量の成果は、その時点での目的を達した後も、十分な保存・管理をし、常に有効利用できる状態にして置かなければならない。

しかしながら、現状の深浅図の保存・管理体制は必ずしも十分なものではないようである。それは、海浜変形を調べるときの深浅図の有する意義が十分認識されなかったことと、せっかく保存してもその有効活用法、解析法が不明確であったことも起因していたと考えられる。

現地深浅測量を実施し、データ整理をおこない、製図を経て一枚の深浅図が完成するまでに要する経費に比較すると、その深浅図が散逸することなく保管することに要する経費はきわめて少ないものであろう。だから、今までの深浅測量の費用にほんの少し上載せをすることによって、深浅図の保存・管理を確実にすることが出来るようになるものと期待される。ただし、深浅図を継続的に保存管理していくためには、深浅図の意義を認識し続けるという努力をしていかなければならない。保存に要する経費よりもむしろこの努力が大変なことである。

本編をとりまとめるにあたっては、昭和54年～昭和61年度に開催された「海浜変形予測手法の開発ワーキンググループ」の議論を大いに参考にした。出席されました各位に感謝する次第である。

第Ⅱ編 深浅図を用いた港湾周辺の海浜変形の把握

1. はじめに

海浜変形を予測する手法には、数値シミュレーションによる方法、移動床模型実験による方法、経験工学的な手法がある。このうち経験工学的な手法では、今までに起こった海浜変形を把握し、類型化することにより、他の類似の条件にある海浜の変形を予測する。

航空写真による海浜変形の把握及び類型化は田中らによって実施されまとめられた^{1)~4)}。しかし、航空写真では海浜の情報が汀線付近に限られるため、それ以外の領域の海浜変形を把握することはできなかった。

沖合を含めた海浜変形を把握する方法として深浅図を用いる方法がある。以前の方法は深浅図を重ね合わせるものであり、深浅図の枚数が多くなると作業が繁雑になり、海浜変形の把握が困難であった。

最近、深浅図のデジタル化が進み、計算機を用いての深浅図の解析方法も開発され⁵⁾、海浜変形の把握が容易に行えるようになってきた。そこで、今までにデジタル化され蓄積されている港湾周辺の深浅図データを用いて、各港湾周辺の海浜変形の把握を行い、類型化を試みた。

2. 深浅図の統計的解析法

深浅図の解析は、二つの方法で行った。一つは長期的な海浜変形を把握するためのトレンド法であり、他の一つは、短期的な海浜変形を把握するための経験的固有関数法である。解析には、各港毎に決められた格子点のデジタルデータを用いた。

2.1 トレンド法

トレンド法は、図-2.1 のようにある地点の水深変化を最小自乗法で直線近似し、長期的な海浜変形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

$$h(x, y, t) = a(x, y) \cdot t + b(x, y) \dots\dots\dots (2.1)$$

で近似する。ここで、 $h(x, y, t)$ は地点 (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、 $a(x, y)$ が正であることは、その地点が解析期間中、長期的には侵食傾向であることを、 $a(x, y)$ が負であることは堆積傾向であることを意味している。 $a(x, y)$ の絶対値が大きい程、侵食・堆積の速度が大きい。

2.2 経験的固有関数法⁵⁾

経験的固有関数法では、水深の経年変化を、場所の関数 $e_i(x, y)$ と時間の関数 $c_i(t)$ の積で表わされる地形変化の重ね合わせで表現する。

トレンド法を用いた解析の場合、解析期間中における地形変化を一様な侵食、あるいは堆積と考えるため、洪水などによって短期間に起こった海浜変形がならされてしまう。しかし、経験的固有関数法を用いた解析の場合水深変化を時間と場所の関数の積として考えるため、短期間に行った海浜変形を把握することができ、さらに、それぞれ独立な原因によって生じた海浜変形を分離することができる。

水深値そのものよりも水深変化を問題とするので、各測点毎にあらかじめ深浅図データから解析期間中の平均水深値を引いておく。すると、平均水深からの差 $\Delta h(x, y, t)$ は、

$$\Delta h(x, y, t) = \sum_i e_i(x, y) \cdot c_i(t) \dots\dots\dots (2.2)$$

で表わされる。寄与率を実際海浜変形 $\sum_i e_i(x, y) \cdot c_i(t)$ に対する $e_i(x, y) \cdot c_i(t)$ で表わされる海浜変形の割合と定義すると、寄与率の大きい順に、 $e_1(x, y)$ はモード1の固有関数、 $e_2(x, y)$ はモード2の固有関数、……と呼ばれる。

計算結果から海浜変形を論ずる場合 $e_i(x, y)$ と $c_i(t)$ の積を考えなければならない。すなわち、水深は下方を正にとってあるので、時間係数 c_i が増加しているときは

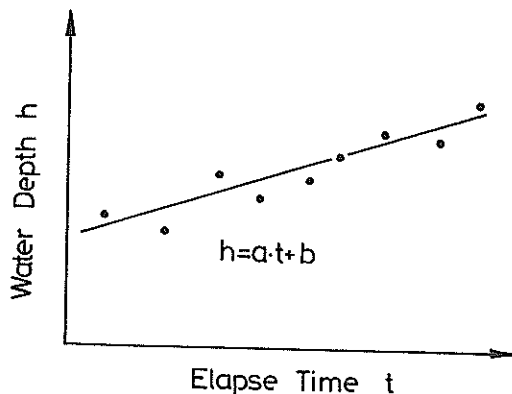


図-2.1 各測点における水深変化の直線近似

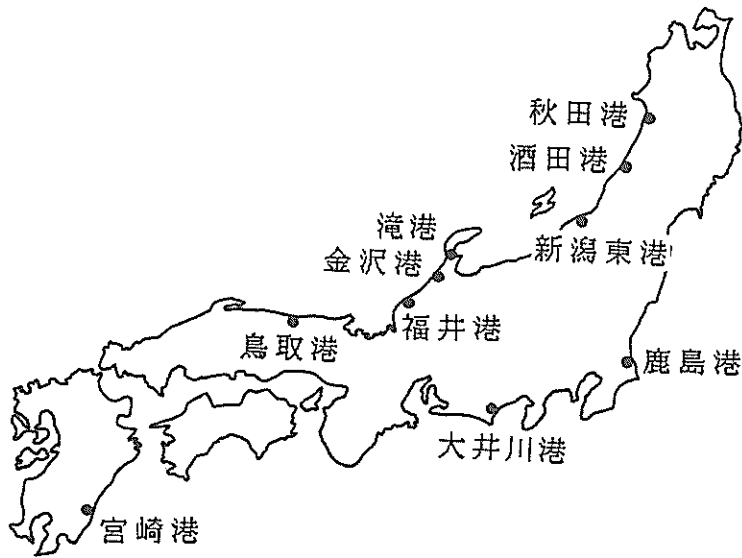


図-2.2 解析対象港湾

$e_1 > 0$ 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。

3. 各港湾周辺の海浜変形の把握

解析の対象とした10港湾の位置を図-2.2 に示す。解析に用いた波のデータは、港湾技術研究所の波浪データベースに収録されているもの及び各建設局所有のものである。

3.1 秋田港

図-2.3 に、秋田港周辺の海底地形、防波堤の建設状況⁶⁾及び波のデータを示す。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、秋田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分布を表わしたものである。解析に用いたデータの測量年月を表-2.1 に示す。

(1) トレンド法を用いた解析

式(2.1)の計算の結果得られる $a(x, y)$ の値を $a(x, y) > 0$ の領域と $a(x, y) < 0$ の領域に分け、その絶対値を図-2.4(1),(2)に立体表示した。図は、沖から岸を

眺めたものである。水深は下方を正にとっているので、 $a(x, y) > 0$ である図-2.4(1)が長期的に侵食の生じた領域を表わしており、 $a(x, y) < 0$ である図-2.4(2)が長期的に堆積の生じた領域を表わしている。

侵食は南防波堤直前面及び南側海岸(向浜)の水深約10mから20mまでの領域で生じており、堆積は南防波堤沖合及び北側海岸の汀線付近から水深約20mまでの領域、南側海岸の水深10m以下の領域で生じている。

図-2.3 の方向別の波のエネルギーの分布からエネルギー平均波向を求めると海岸線に対してやや北よりとなる。したがって、この海岸における沿岸漂砂は南向きと考えられる。すると、北側海岸の堆積は、南向きの沿岸漂砂が北防波堤によって阻止されたために生じたと考えられる。南防波堤沖合の堆積は南向きの沿岸漂砂の一部が港口を越えて南防波堤沖合に流れ込んだことによって生じ、南側海岸における侵食は沿岸漂砂の供給が南防波堤によって阻止されたために生じたと考えられる。

(2) 経験的固有関数法を用いた解析

a) モード1 (寄与率; 41%)

時間係数 c_1 の経時変化を図-2.5 に、固有関数 e_1 の分布を図-2.6(1),(2)に示す。時間係数 c_1 が、1971年

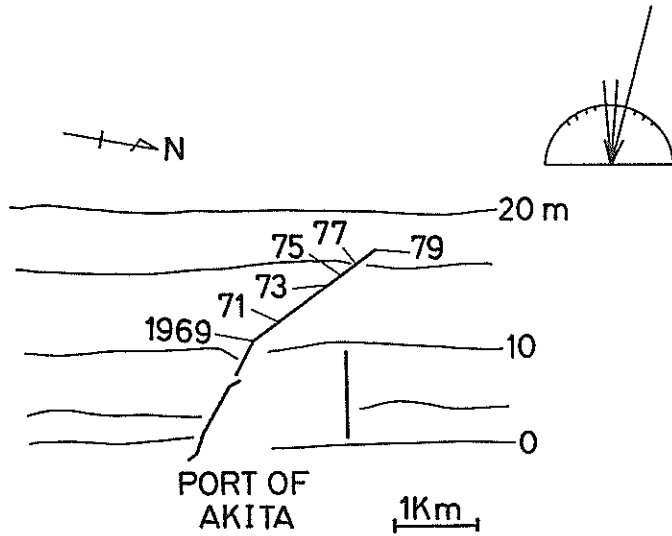


図-2.3 秋田港周辺の海底地形

表-2.1 解析に用いたデータの測量実施年月
(秋田港)

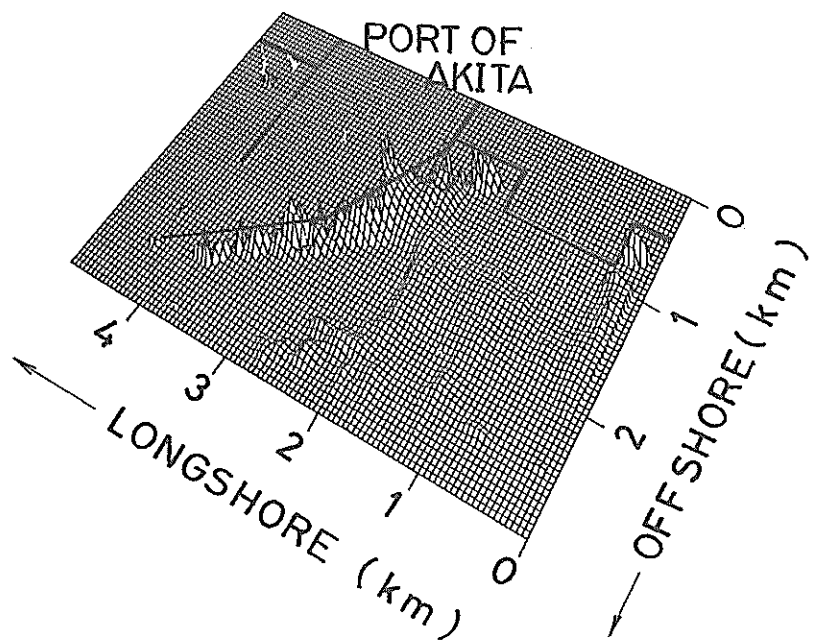
測量年月
1966. 11
1967. 11
1968. 11
1969. 11
1970. 11
1971. 11
1972. 11
1976. 10
1977. 10

を境として減少から増加の傾向に変化している。したがって、 $e_1 > 0$ の領域、すなわち南防波堤直前面及び南側海岸では、1970年以前に堆積が1970年以降に侵食が起きている。一方、 $e_1 < 0$ の領域すなわち、南防波堤の沖合及び北側海岸では1970年以前に侵食が、1970年以降に堆積が起きている。

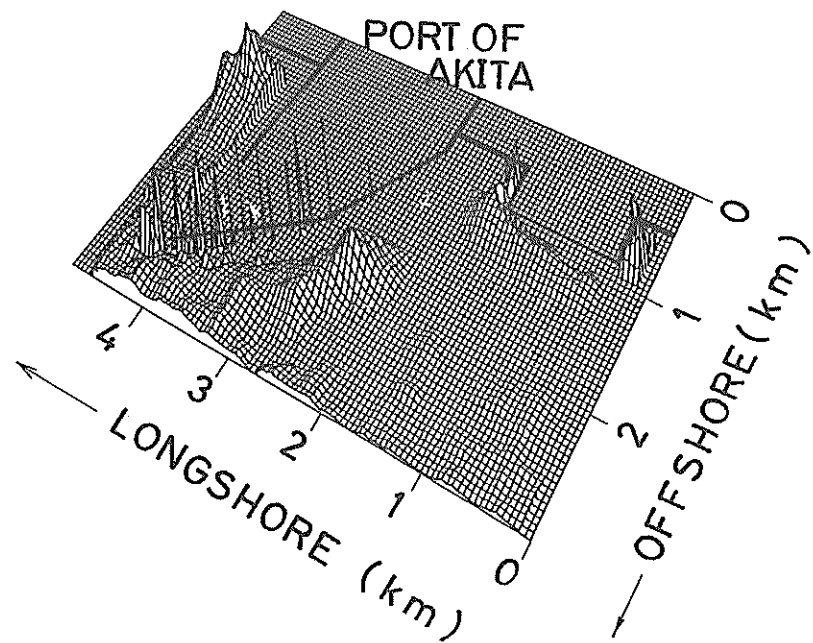
1970年以降の海浜変形は、トレンド法による解析結果と同様であり、その原因として南防波堤による南向きの沿岸漂砂の阻止が考えられる。

次に、経験的固有関数法によって表わされる海浜変形と、波のエネルギーフラックス、防波堤先端水深の関係を調べた。秋田港の波のデータは1981年12月からしかなく、海浜変形との相関を調べるにはデータ数が少なすぎるので、秋田港より約90km南の酒田港の波のデータを用いることとした。

酒田港の波のデータを用いる前に、秋田港の波のデータと酒田港の波のデータの相関を検討した。図-2.7(1)は、秋田港と酒田港の月平均の波のエネルギーフラックスの時系列変化を比較したものであり、図-2.7(2)は両者の相関を調べたものである。図-2.7(2)によると、秋田港における波のエネルギーフラックスは酒田港の波のエネルギーフラックスの約1.4倍となっているものの、両者の相関は強く、秋田港の波のエネルギーフラックス



(1) $a > 0$ の領域 (侵食領域)



(2) $a < 0$ の領域 (堆積領域)

図-2.4 トレンド法における $a(x,y)$ の分布図(秋田港)

として酒田港の波のエネルギーフラックスを使っても定性的には問題がないと考えられる。

図-2.8 は、時間係数 c_1, c_2 及び防波堤先端水深 h_t ^④、波のエネルギーフラックス E の経時変化を示したものである。実線が c_1 を、破線が c_2 を、一点鎖線が h_t を示して

おり、柱状の長方形が E を示している。但し、水位データの測得率が70%以下の月については $E=0$ としている。酒田港における波高計は、1973年9月まで水深15mに設置された水圧式であったものの、1973年9月からは水深20mに設置された超音波式となり、さらに1981年8月か

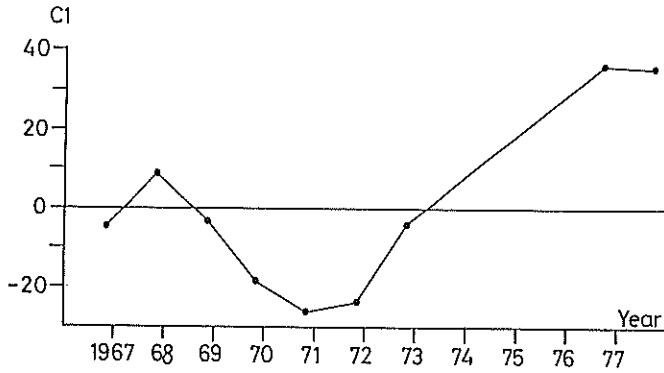
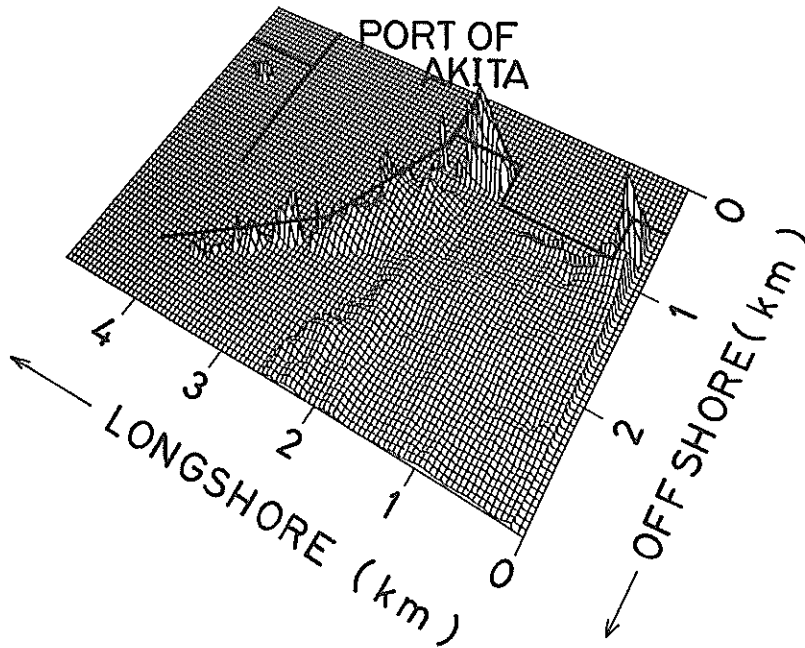
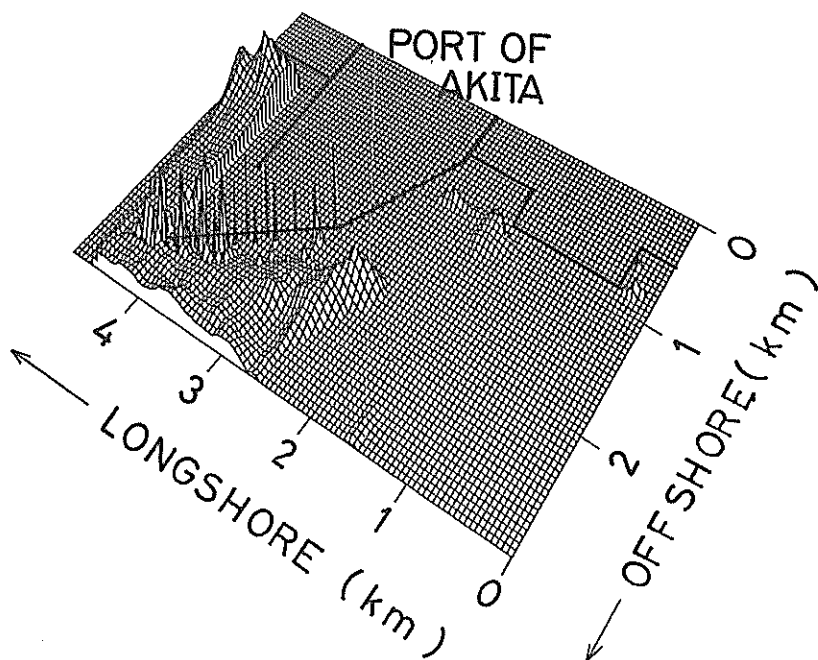


図-2.5 時間係数 c_1 の経時変化(秋田港)



(1) $e_1 > 0$ の領域

図-2.6 経験的固有関数 $e_1(x, y)$ の分布図(秋田港)



(2) $e_1 < 0$ の領域

図-2.6 経験的固有関数 $e_1(x,y)$ の分布図(秋田港)

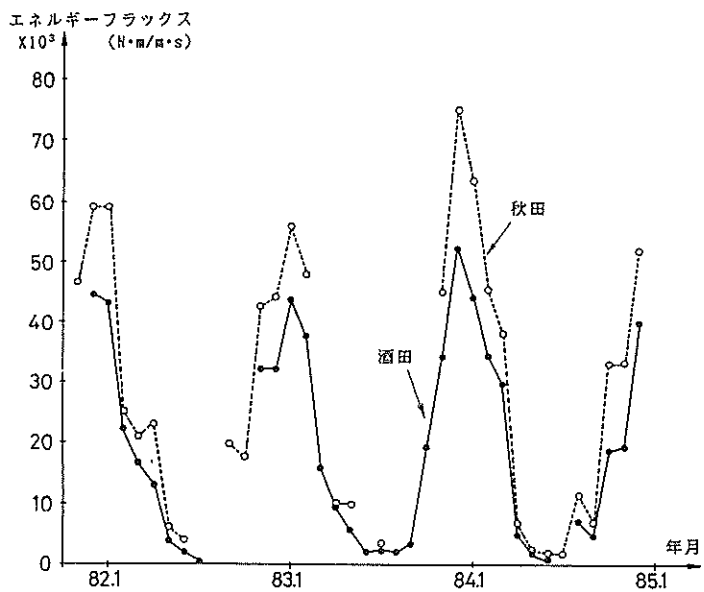


図-2.7 (1) 秋田港と酒田港の波のエネルギーフラックスの時系列変化

エネルギーフラックス(秋田)

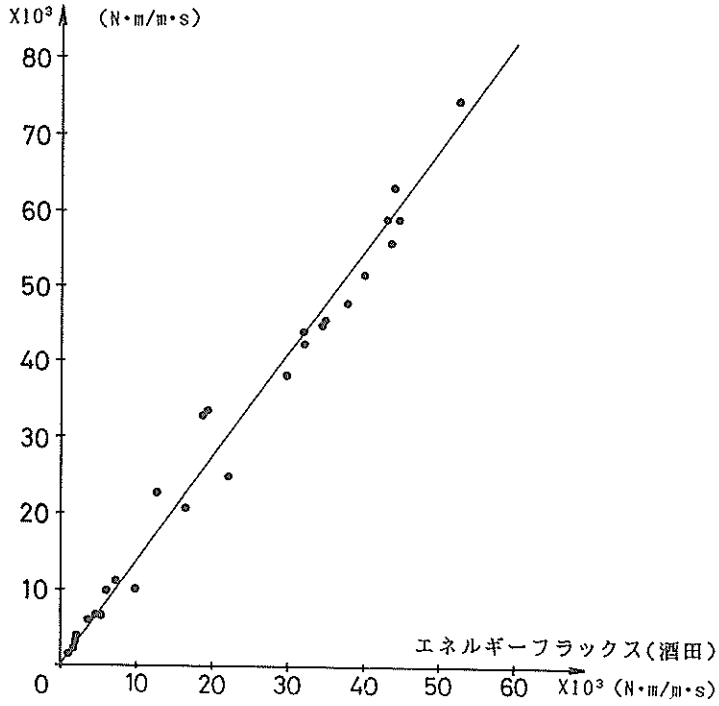


図-2.7 (2) 秋田港と酒田港の波のエネルギーフラックスの相関

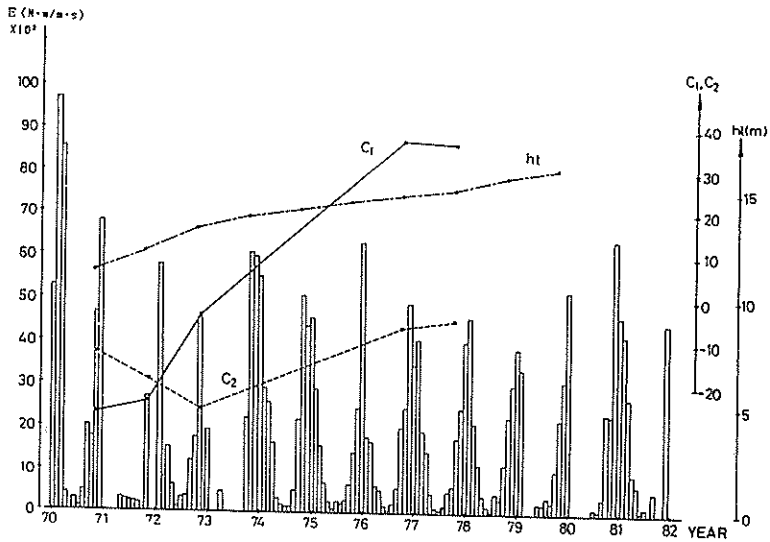


図-2.8 時間係数 c_1 , c_2 と防波堤先端水深 h_t , 波のエネルギーフラックス E の経時変化(秋田港)

らは波高計の感度が良くなっている。図-2.8によると、時間係数 c_1 と彼のエネルギーフラックス E の相関は小さい。

b) モード2 (寄与率; 26%)

時間係数 c_2 の経時変化を図-2.9に、固有関数 e_2 の分布を図-2.10(1),(2)に示す。

時間係数 c_2 は、1969年から1970年にかけて急激に減少している。したがって、1969年11月から1970年11月にかけて $e_2 > 0$ の領域、すなわち解析領域ほぼ全域にわたって堆積が起っており、 $e_2 < 0$ の領域、すなわち防波堤屈曲部前面で侵食が起っている。

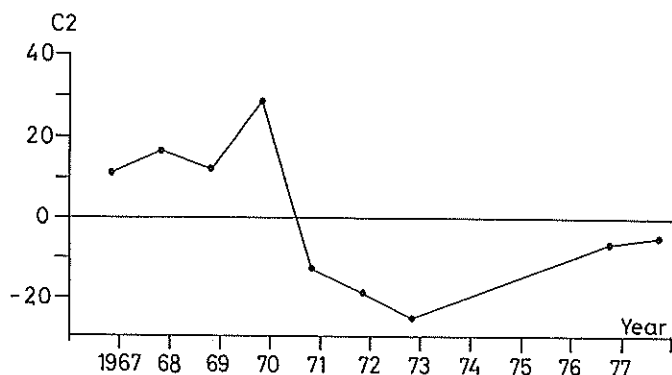
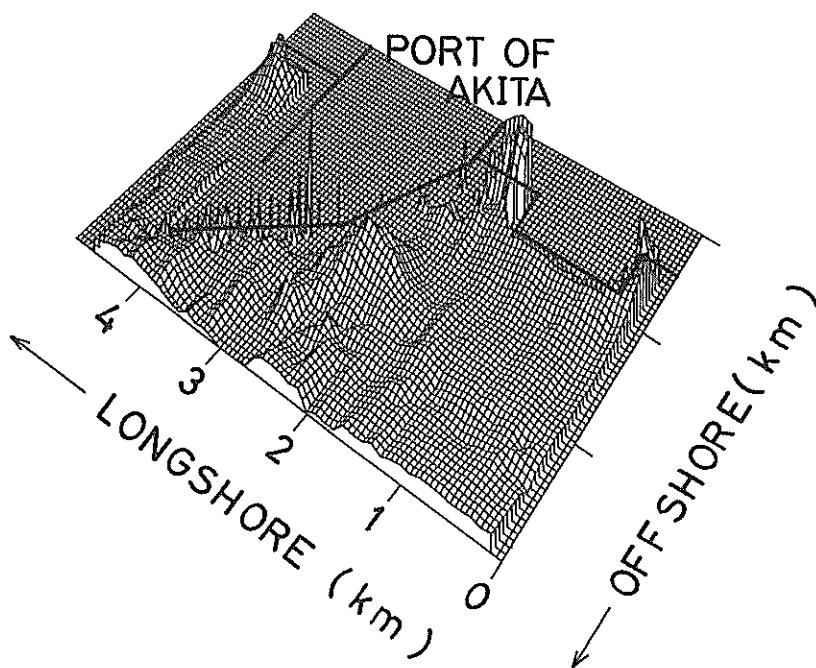
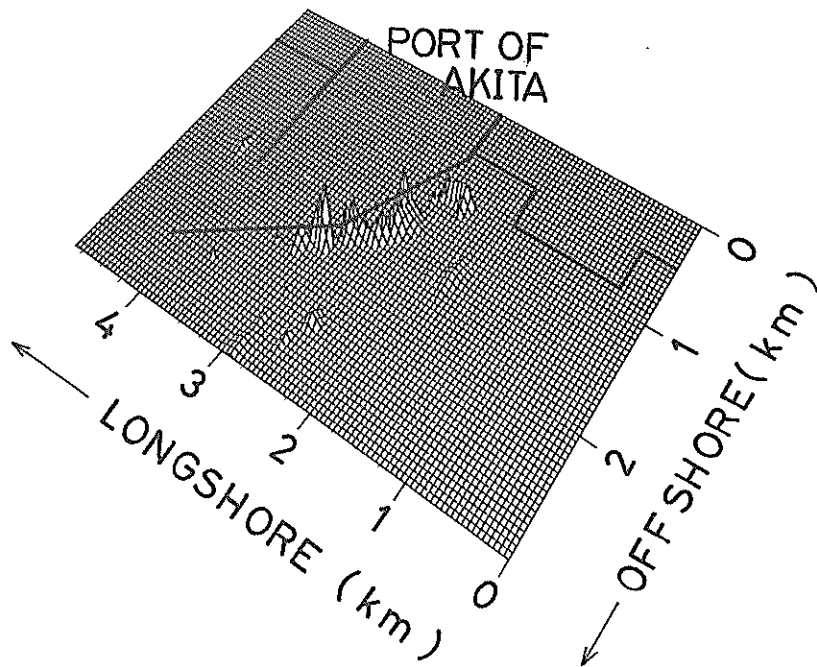


図-2.9 時間係数 c_2 の経時変化(秋田港)



(1) $e_2 > 0$ の領域

図-2.10 経験的固有関数 $e_2(x,y)$ の分布図(秋田港)



(2) $e_2 < 0$ の領域

図-2.10 経験的固有関数 $e_2(x, y)$ の分布図(秋田港)

3.2 酒田港

酒田港周辺の海底地形、防波堤の建設状況⁶⁾および波のデータを図-2.11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 $340\text{m}^3/\text{s}$ と多く⁷⁾、海浜変形に対する最上川からの流出土砂の影響は無視できないと考えられる。解析に用いたデータの測量年月を表-2.2に示す。

(1)トレンド法を用いた解析

図-2.12(1),(2)に解析結果を示す。(1)が長期的に侵食の生じている領域を示しており、(2)が長期的に堆積の生じている領域を示している。侵食は、北港北防波堤前面の領域及び北港と本港にはさまれた領域の水深約10m以浅の領域で生じており、堆積は北港と本港にはさまれた領域の水深約10m以深の領域で生じている。

図-2.11の波のデータを用いてエネルギー平均波向を計算すると汀線に対してほぼ直角となるものの、酒田海岸における沿岸漂砂の卓越方向は北向き⁸⁾であると考えられる。すると、北港北防波堤前面の侵食は、沿岸漂砂が北港北防波堤によって阻止されたこと及び防波堤に沿う流れによる洗掘によって生じたと考えられる。本港防波堤先端から北側にかけての堆積は、沿岸漂砂が北港北

表-2.2

解析に用いたデータの測量実施年月(酒田港)

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

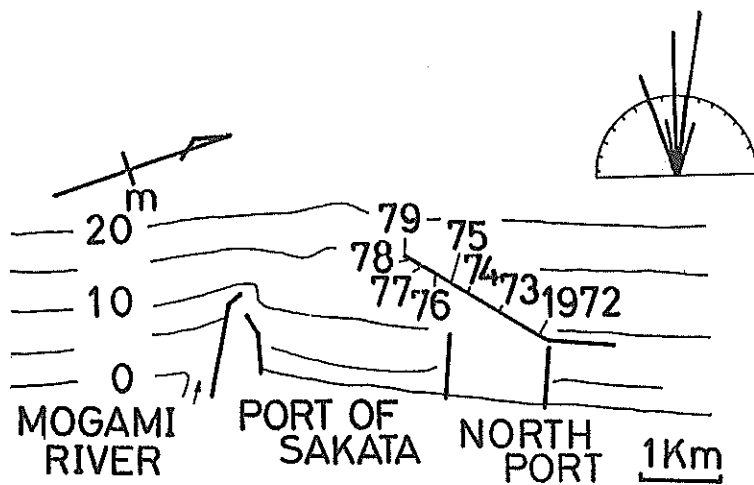


図-2.11 酒田港周辺の海底地形

防波堤によって阻止されたこと及び最上川からの流出土砂の堆積によって生じたと考えられる。

(2) 経験的固有関数法を用いた解析

a) モード1 (寄与率; 76%)

時間係数 c_1 の経時変化を図-2.13に、固有関数 e_1 の分布を図-2.14(1),(2)に示す。

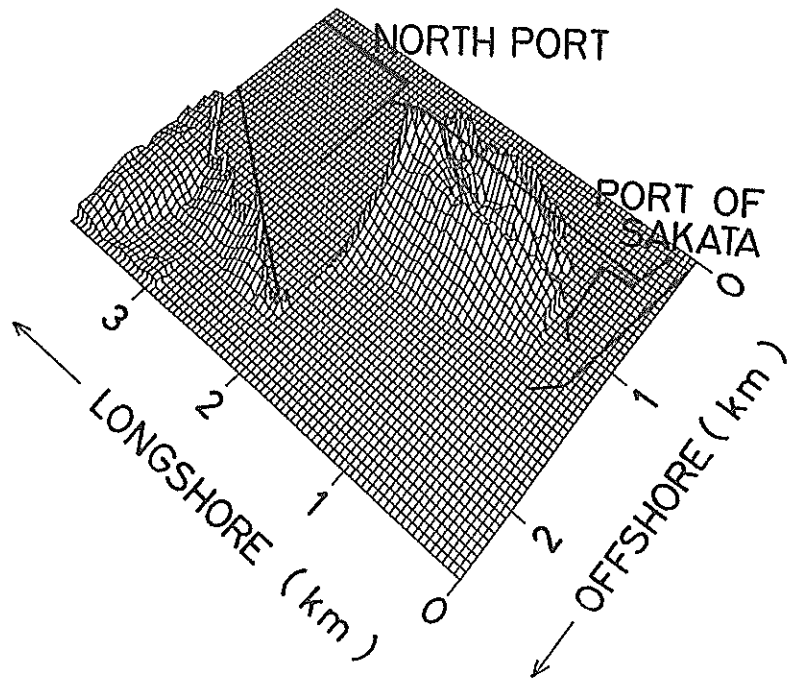
時間係数 c_1 は直線的に減少している。したがって $e_1 > 0$ の領域、すなわち北港と本港にはさまれた領域の水深約10m以深の領域では解析期間中堆積が起っており、 $e_1 < 0$ の領域すなわち北港北防波堤前面の領域および北港と本港にはさまれた領域の水深約10m以浅の領域では侵食が起きている。モード1で表わされるこの海浜変形は、(1)トレンド法による解析結果とほぼ等しい。酒田北港の防波堤建設が1972年から始まり1976年には先端が水深14mに達していること、時間係数 c_1 が1963年から1976年にかけて減少しそれ以降も減少傾向が続いていることを考えると、モード1にもトレンド法を用いた解析結果と同様に酒田北港の防波堤の影響が現われたと考えられる。すなわち北港北防波堤前面の侵食は北向きの沿岸漂砂が防波堤によって阻止されたため、及び防波堤に沿う流れによる洗掘によって生じたものであり、本港と北港にはさまれた領域の水深約10m以深の領域の堆積は沿岸漂砂が北港北防波堤によって阻止されたため、及び

最上川からの流出土砂の堆積によって生じたものであると考えられる。

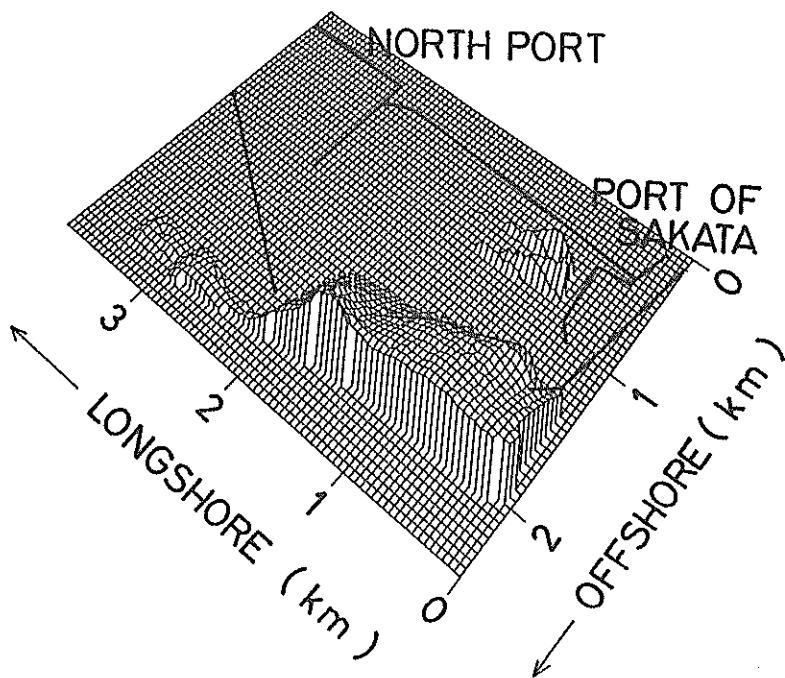
水深の経時変化を直線近似して求めたトレンド法による解析結果(図-2.12(1) $a > 0$ (侵食)の領域、図-2.12(2) $a < 0$ (堆積)の領域)と、経験的固有関数法による解析結果(図-2.14(2) $e_1 < 0$ (侵食)の領域、図-2.14(1) $e_1 > 0$ (堆積)の領域)が良く一致した原因は、時間係数 c_1 がほぼ単調に減少していることからわかるように、各格子点における水深が時間と比例関係にあったためと考えられる。

短期的な海浜変形と外力との関係を調べるために、図-2.15に時間係数 c_1 、 c_2 と波のエネルギーフラックス E の経時的变化を示した。同図には、防波堤先端水深 h_t の経時变化も示してある。実線が c_1 を、破線が c_2 を、一点鎖線が h_t を示しており、柱状の長方形が E を示している。但し、水位データの測得率が70%以下の月については $E=0$ としている。3.1で述べたように、酒田港の波高計は、1973年9月までが水深15mに設置された水圧式であり、1973年9月からは水深20mに設置された超音波式となり、1981年8月からは波高計の感度が良くなっている。図-2.15によると、時間係数 c_1 と波のエネルギーフラックス E の相関は小さい。

b) モード2 (寄与率; 9%)



(1) $a > 0$ の領域 (侵食領域)



(2) $a < 0$ の領域 (堆積領域)

図-2.12 トレンド法における $a(x,y)$ の分布図 (酒田港)

時間係数 c_2 の経時変化を図-2.16に、固有関数 e_2 の分布を図-2.17(1),(2)に示す。時間係数 c_2 は1979年以前はほぼ一定で1979年以降増加している。したがって $e_2 > 0$ の領域、すなわち、北港北防波堤直前の領域および

本港と北港にはさまれた領域は、1979年以降侵食を受けており、 $e < 0$ の領域、すなわち北港北防波堤直前の侵食領域よりやや沖側の領域および本港と北港にはさまれた領域の一部は1979年以降堆積が生じている。

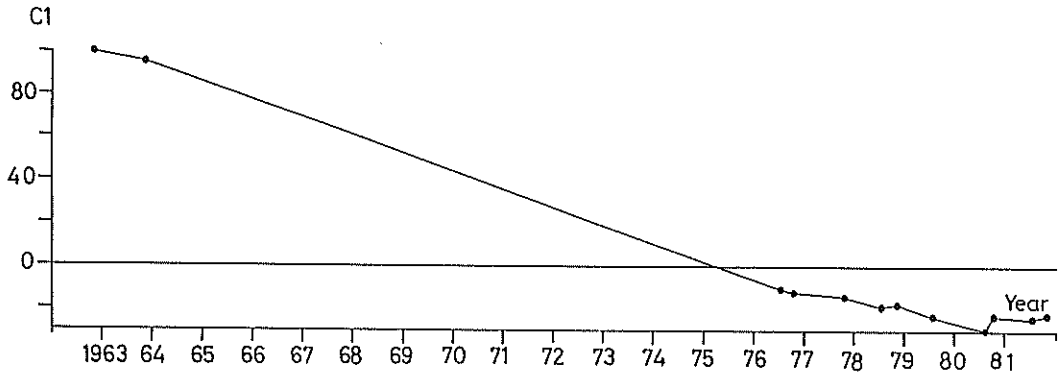
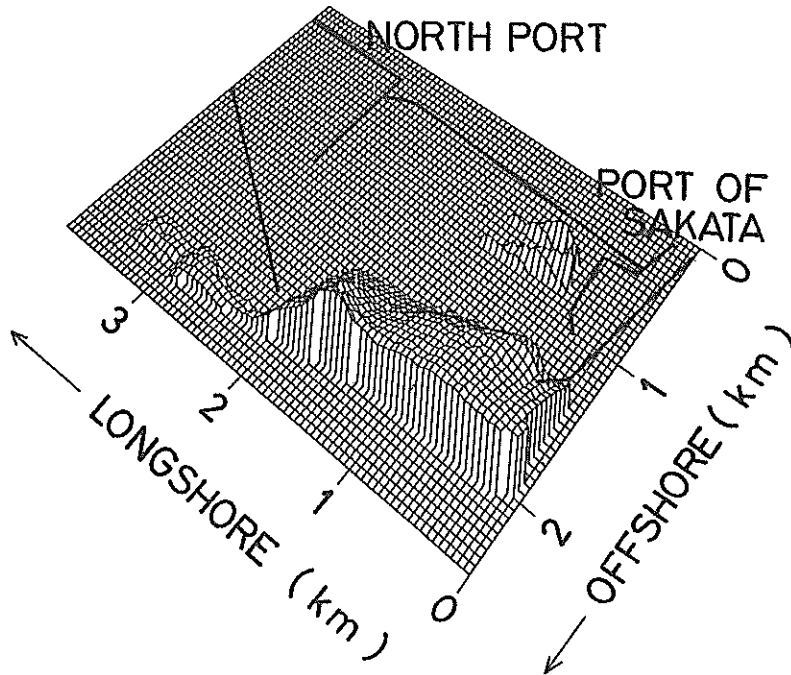
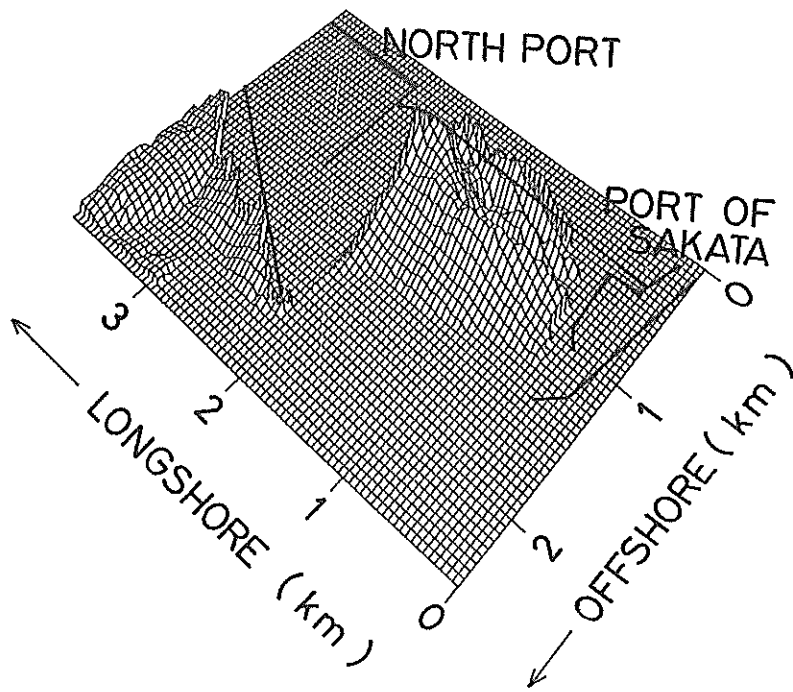


図-2.13 時間係数 c_1 の経時変化(酒田港)



(1) $e_1 > 0$ の領域

図-2.14 経験的固有関数 $e_1(x,y)$ の分布図(酒田港)



(2) $e_1 < 0$ の領域

図-2.14 経験的固有関数 $e_1(x, y)$ の分布図 (酒田港)

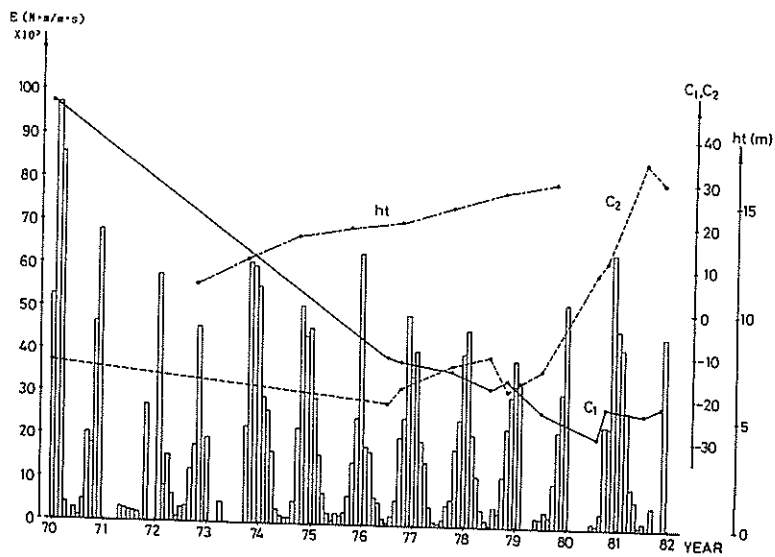


図-2.15 時間係数 c_1, c_2 と防波堤先端水深 h_t 、波のエネルギーフラックス E の経時変化 (酒田港)

3.3 酒田北港西護岸前面

酒田北港の北防波堤前面及び西護岸前面における海浜変形の解析を行った。酒田北港周辺の海底地形及び北防波堤、西護岸の建設状況を図-2.18に示し、解析に用いたデータの測量年月を表-2.3に示す。

(1) トレンド法を用いた解析

解析結果を図-2.19(1),(2)に示す。防波堤及び護岸前

面の広い領域が $a > 0$ となっており長期的に侵食傾向を示す領域となっている。この結果は、前述の酒田港の解析結果と矛盾しておらず、北向きの沿岸漂砂が防波堤によって阻止されることによって生じたものと考えられる。

(2) 経験的固有関数法を用いた解析

a) モード1 (寄与率; 50%)

図-2.20に時間係数 c_1 の経時変化を図-2.21(1), (2)に

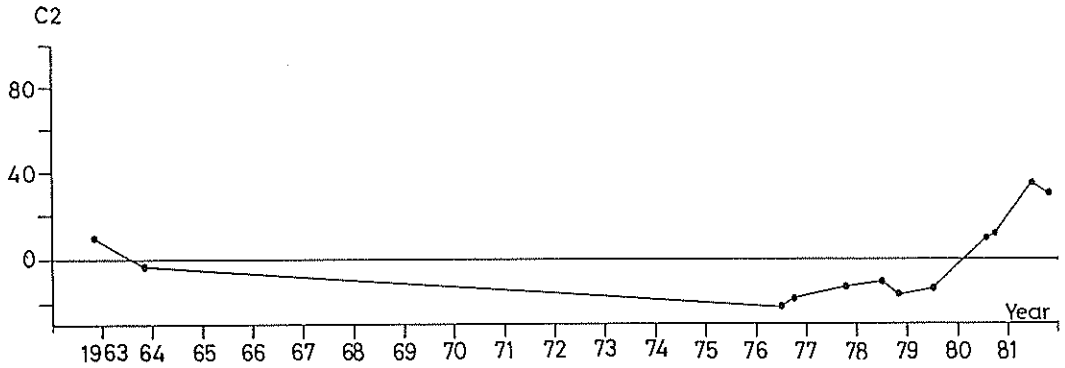
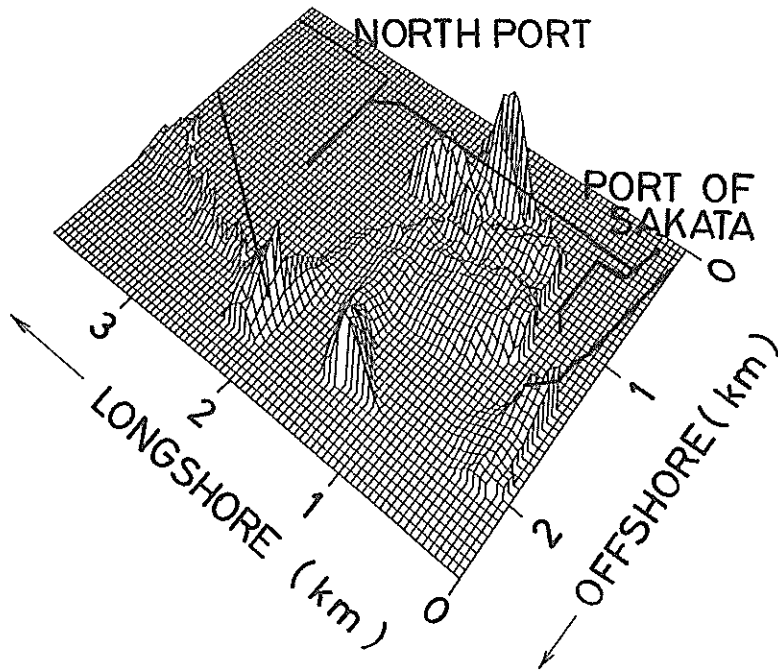
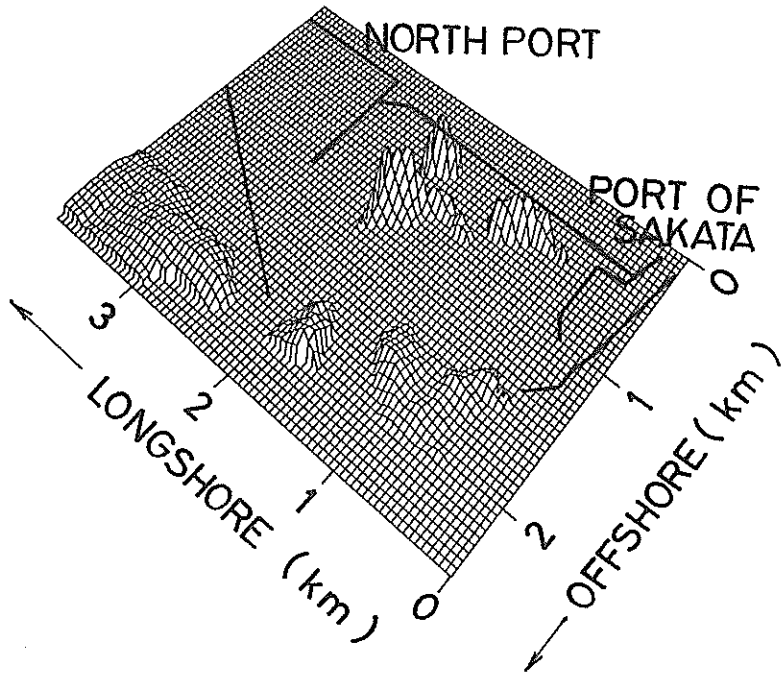


図-2.16 時間係数 c_2 の経時変化(酒田港)



(1) $e_2 > 0$ の領域

図-2.17 経験的固有関数 $e_2(x,y)$ の分布図(酒田港)



(2) $e_2 < 0$ の領域

図-2.17 経験的固有関数 $e_2(x,y)$ の分布図 (酒田港)

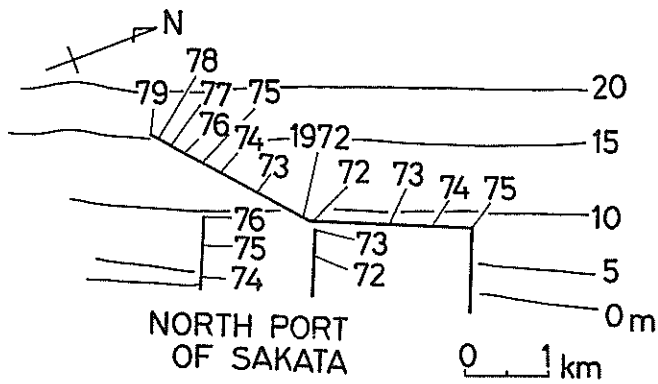


図-2.18 酒田北港周辺の海底地形

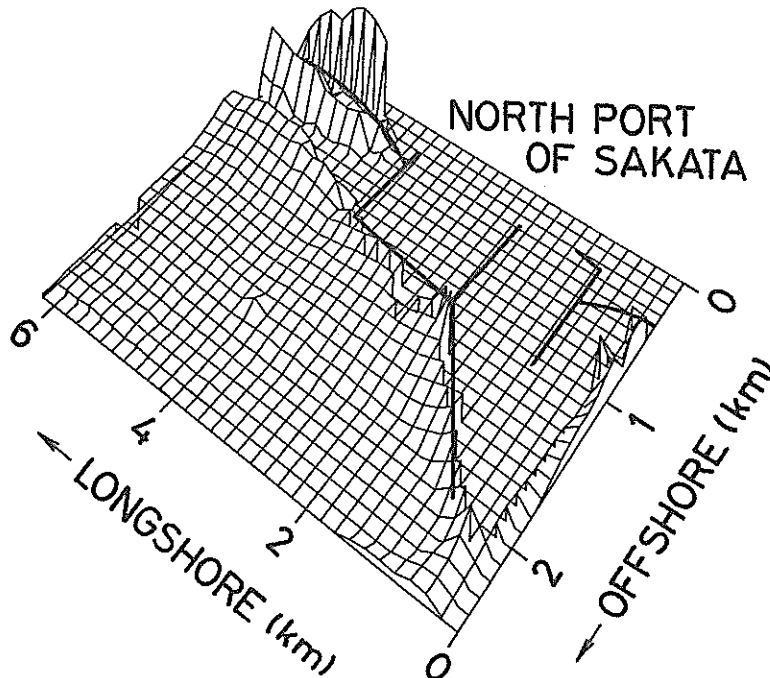
固有関数 e_1 の分布を示す。時間係数 c_1 は、1974年10月から1975年6月にかけて急激に増加しているものの、長期的には減少傾向にある。したがって、 $e_1 < 0$ である解析領域はほぼ全域にわたって長期的には侵食傾向となっている。この結果は、トレンド法を用いた解析結果とほぼ一致しており、北向きの沿岸漂砂が防波堤によって阻止されたために生じたと考えられる。

図-2.22に、時間係数 c_1 、 c_2 及び防波堤の先端水深 h_t 、波のエネルギーフラックス E の経時変化を示す。実線が c_1 を、破線が c_2 を、一点鎖線が h_t を示しており、柱状の長方形が E を示している。但し、水位データの測得率が70%以下の月については $E = 0$ としている。時間係数 c_1 は、1972年7月から1973年10月にかけて、及び1974年10月から1975年6月にかけて、1975年6月から1976年10月にかけて急激に変化している。すなわち、 $e_1 < 0$ である解析領域はほぼ全域にわたって1972年7月から1973年10月にかけて侵食が、1974年10月から1975年6月にかけて堆積が、1975年6月から1976年10月にかけて侵食が比較的大規模に起こっていたことになる。しかし、これらの時期の波のエネルギーフラックス E が他の時期に比べて特異であるとは認められず、時間係数 c_1 と波のエネルギー

表-2.3

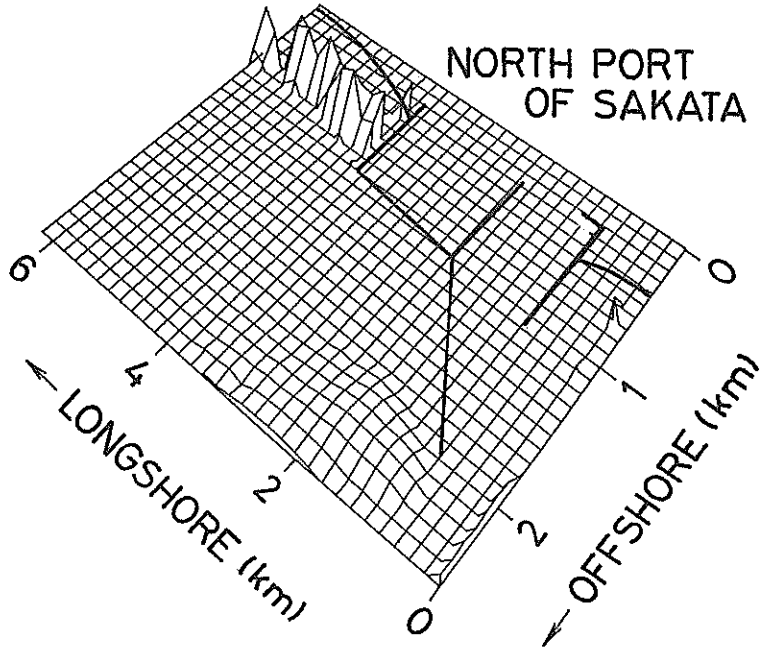
解析に用いたデータの測量実施年月
(酒田北港西護岸前面)

測量年月
1971. 7
1972. 7
1973. 10
1974. 10
1975. 6
1976. 10
1977. 7
1978. 7
1979. 7
1980. 7
1981. 8
1982. 6
1983. 7



(1) $a > 0$ の領域 (侵食領域)

図-2.19 トレンド法における $a(x, y)$ の分布図 (酒田北港西護岸前面)



(2) $a < 0$ の領域 (堆積領域)

図-2.19 トレンド法における $a(x,y)$ の分布図 (酒田北港西護岸前面)

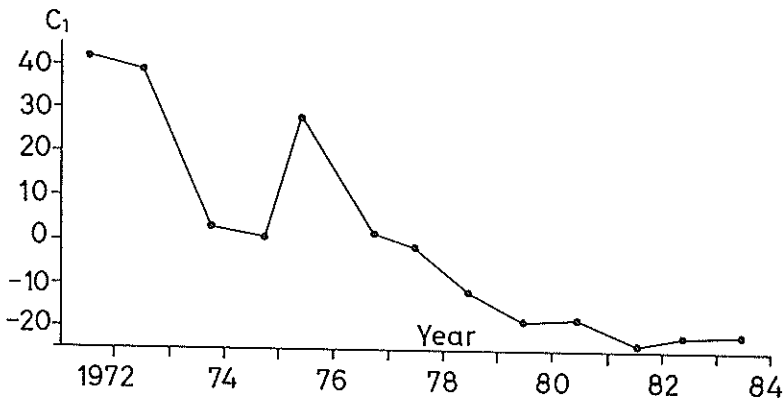


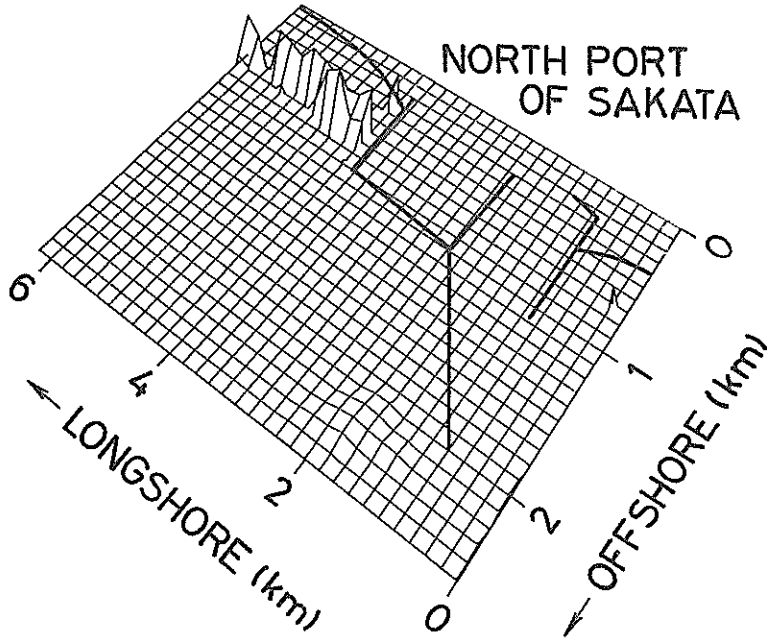
図-2.20 時間係数 c_1 の経時変化 (酒田北港西護岸前面)

フラックス E の相関は小さい。

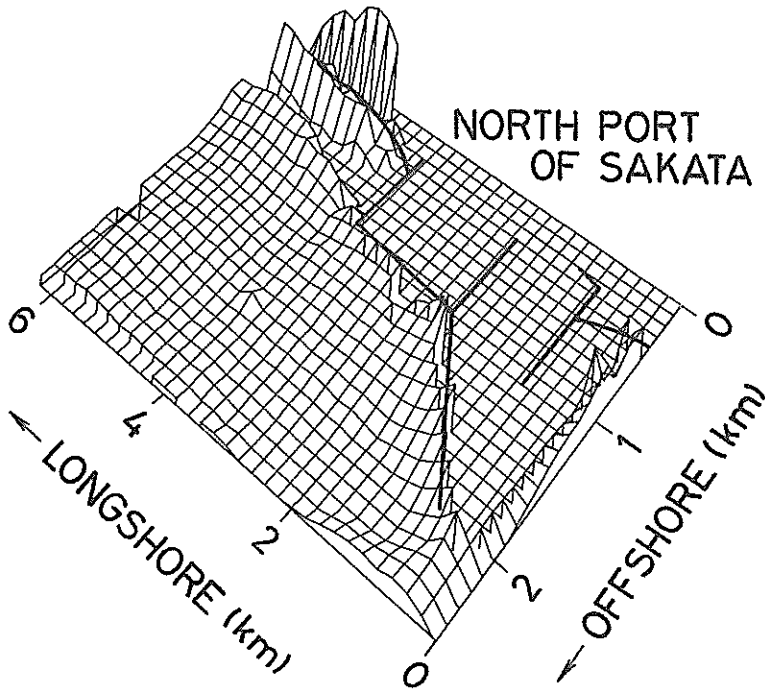
b) モード2 (寄与率; 21%)

図-2.23に時間係数 c_2 の経時変化を、図-2.24(1),(2)に固有関数 e_2 の分布を示す。時間係数 c_2 が1972年7月から1973年10月にかけて急激に増加し、1974年10月から1975年6月にかけて急激に減少している。解析領域はほ

全域にわたって $e_2 > 0$ となっているので、1972年7月から1973年10月にかけては解析領域はほぼ全域にわたって侵食が、1974年10月から1975年6月にかけては堆積が生じたことになる。この海浜変形はモード1の結果とほぼ同じ結果となっている。



(1) $e_1 > 0$ の領域



(2) $e_1 < 0$ の領域

図-2.21 経験的固有関数 $e_1(x,y)$ の分布図(酒田北港西護岸前面)

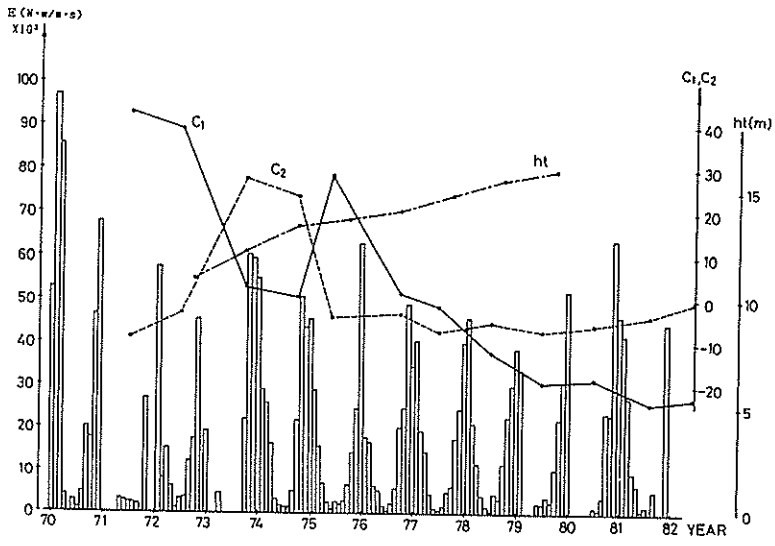


図-2.22 時間係数 c_1 , c_2 と防波堤先端水深 h_t , 波のエネルギーフラックス E の経時変化 (酒田北港西護岸前面)

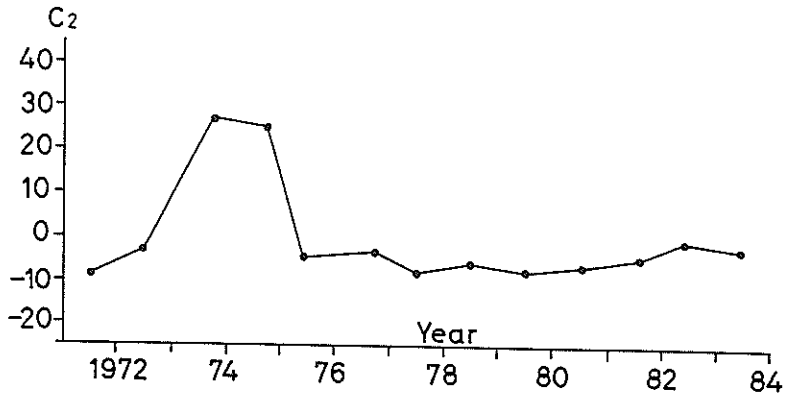
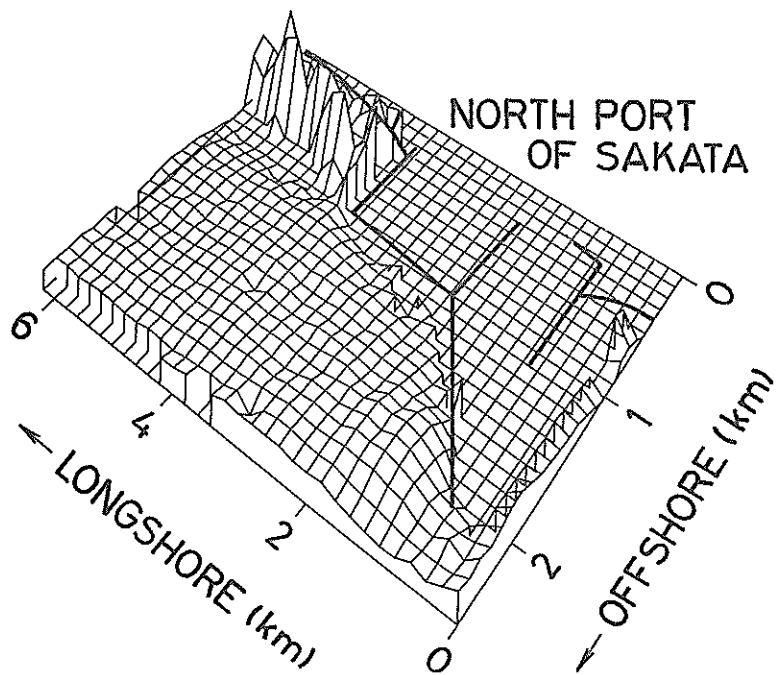
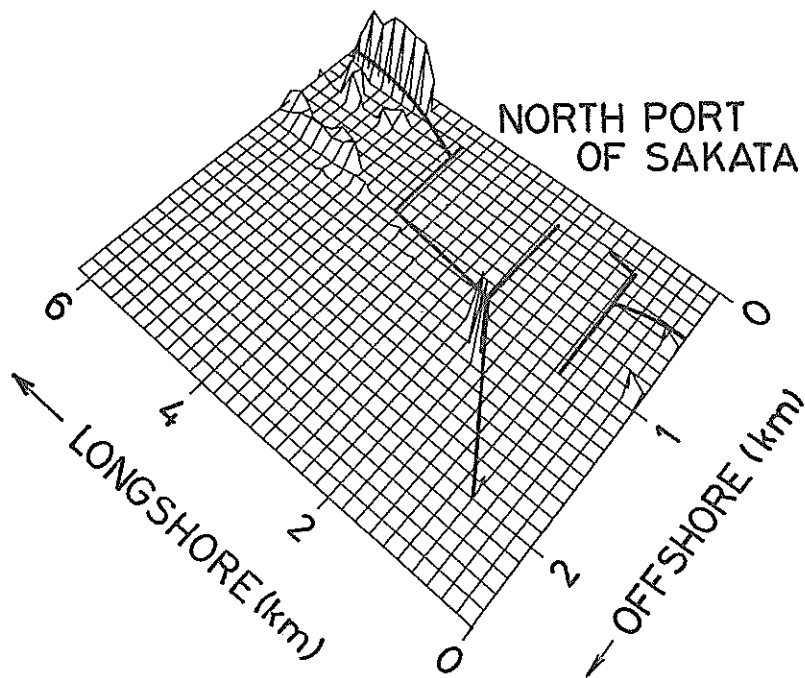


図-2.23 時間係数 c_2 の経時変化 (酒田北港西護岸前面)



(1) $e_2 > 0$ の領域



(2) $e_2 < 0$ の領域

図-2.24 経験的固有関数 $e_2(x,y)$ の分布図(酒田北港西護岸前面)

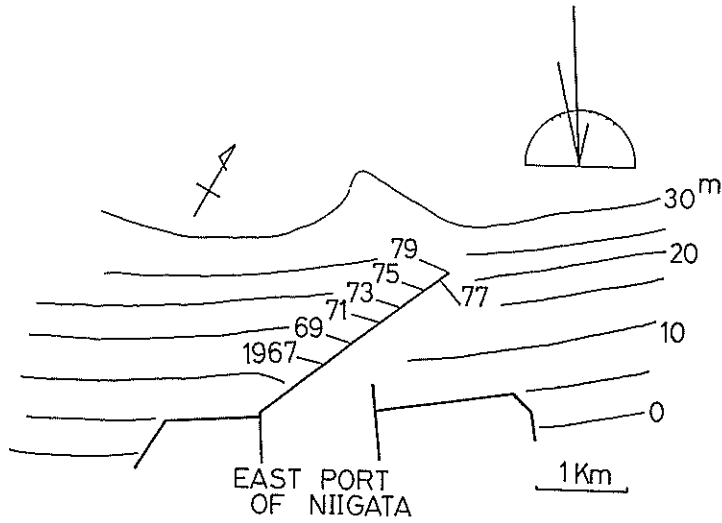


図-2.25 新潟東港周辺の海底地形

表-2.4 解析に用いたデータの測量実施年月(新潟東港)

測 量 年 月	
1962. 7	1969. 10
1963. 6	1970. 6
1963. 10	1970. 12
1964. 11	1971. 6
1965. 11	1971. 10
1966. 4	1972. 5
1966. 11	1972. 10
1967. 5	1973. 6
1967. 12	1973. 10
1968. 5	1977. 10
1968. 11	1979. 10
1969. 6	

3.4 新潟東港

新潟東港の海底地形及び防波堤の建設状況⁹⁾、波のデータを図-2.25に示す。解析に用いたデータの測量年月を表-2.4に示す。

(1) トレンド法を用いた解析

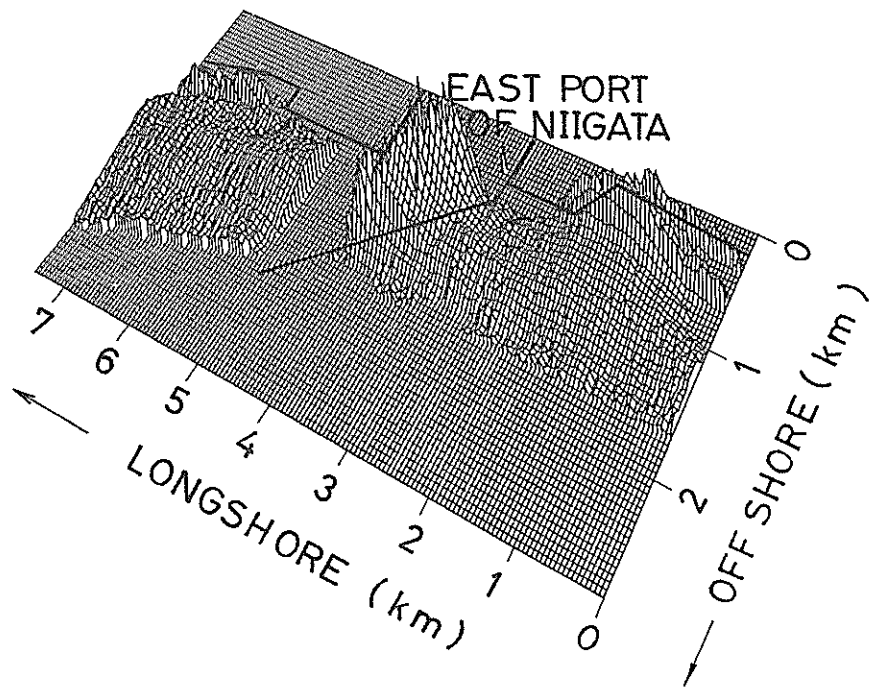
図-2.26(1)、(2)に解析結果を示す、(1)が長期的に侵食の生じている領域を、(2)が長期的に堆積の生じている領域を表わしている。図より、解析領域ほぼ全域にわたって侵食の発生していることがわかる。そのうち、侵食量の大きい防波堤直前面では防波堤に沿う流れによる洗掘が生じていたと考えられる。

図-2.25の波のデータからエネルギー平均波向を計算すると海岸線に対してやや南寄りとなる。したがって、新潟東港周辺では北向きの沿岸漂砂が卓越していると考えられる。しかし、図-2.26に表わされている海浜変形は港の南側と北側でそれ程大きな差は無く、海浜変形の原因が沿岸漂砂であるとは考えにくい。地盤沈下あるいは岸沖漂砂が原因ではないかと思われる。

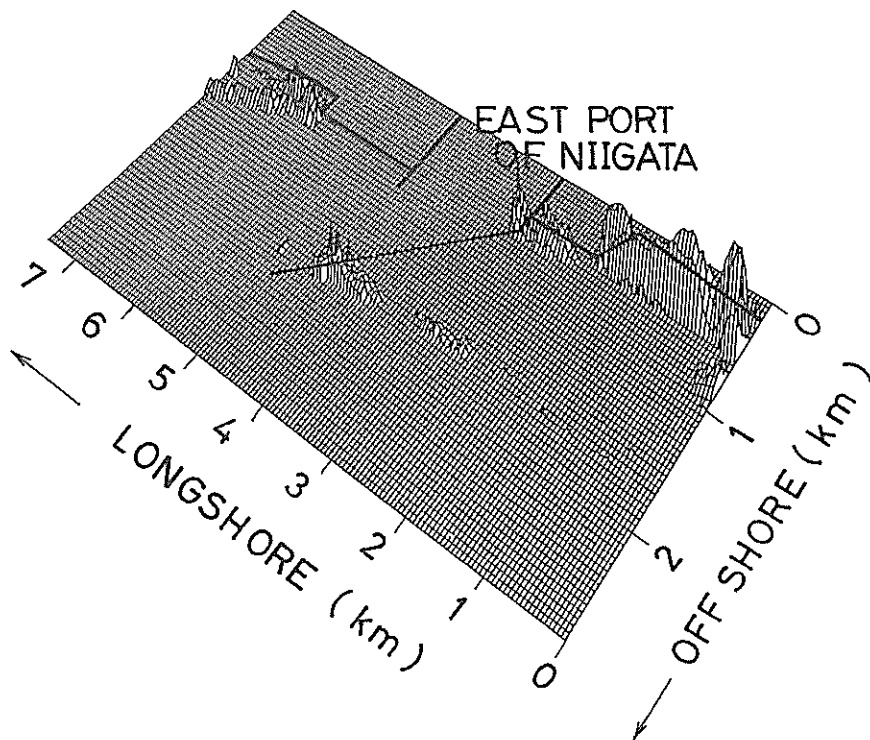
(2) 経験的固有関数法を用いた解析

a) モード1 (寄与率; 37%)

図-2.27に時間係数 c_1 の経時変化を、図-2.28(1)、(2)に固有関数 e_1 の分布を示す。固有関数 e_1 は解析領域ほぼ全域にわたって負となっている。一方、時間係数 c_1 は1963年から1965年にかけて減少し、1965年から1967年



(1) $a > 0$ の領域 (侵食領域)



(2) $a < 0$ の領域 (堆積領域)

図-2.26 トレンド法における $a(x,y)$ の分布図 (新潟東港)

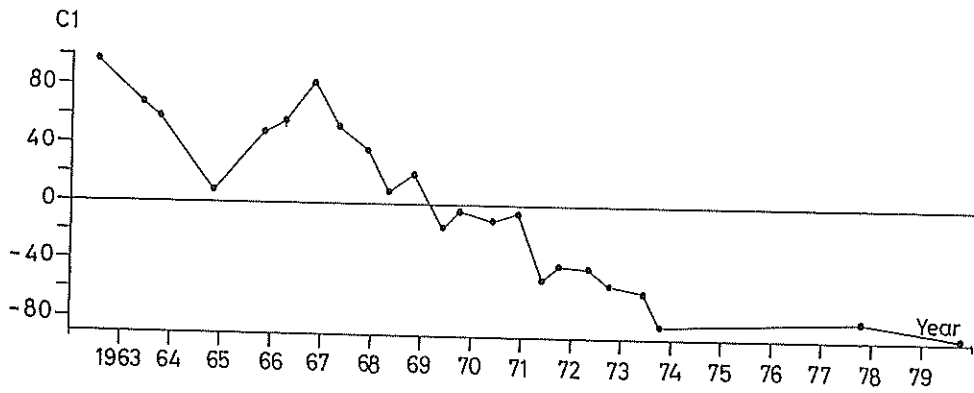
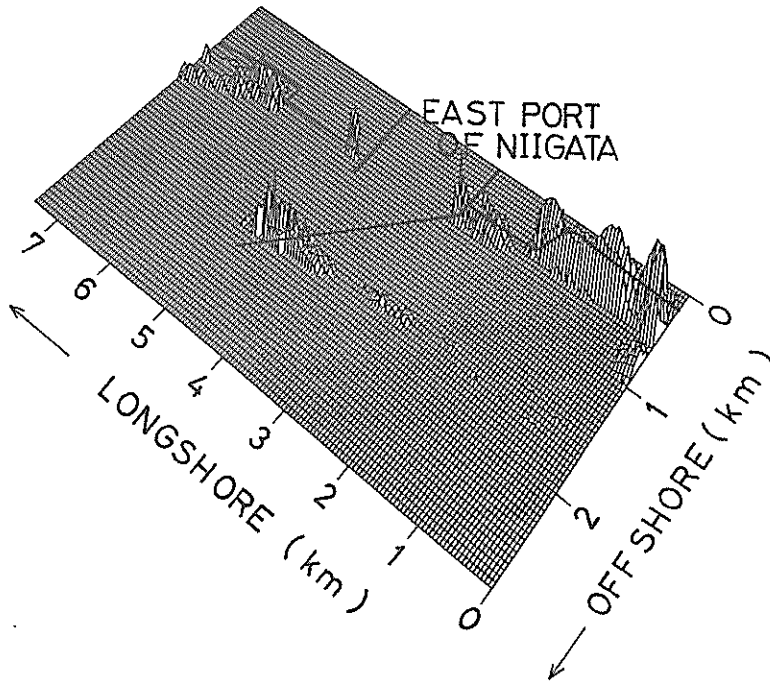
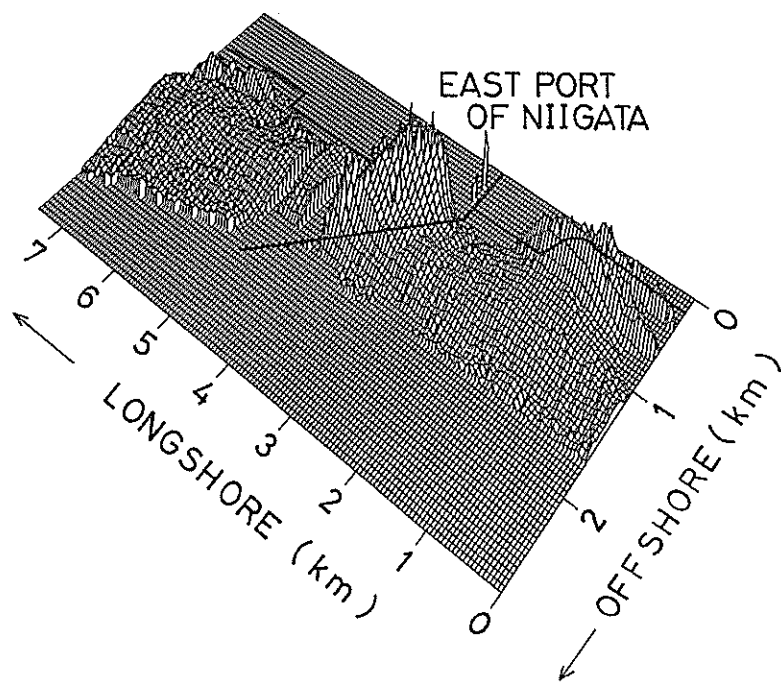


図-2.27 時間係数 c_1 の経時変化(新潟東港)



(1) $e_1 > 0$ の領域

図-2.28 経験的固有関数 $e_1(x,y)$ の分布図(新潟東港)



(2) $e_1 < 0$ の領域

図-2.28 経験的固有関数 $e_1(x,y)$ の分布図 (新潟東港)

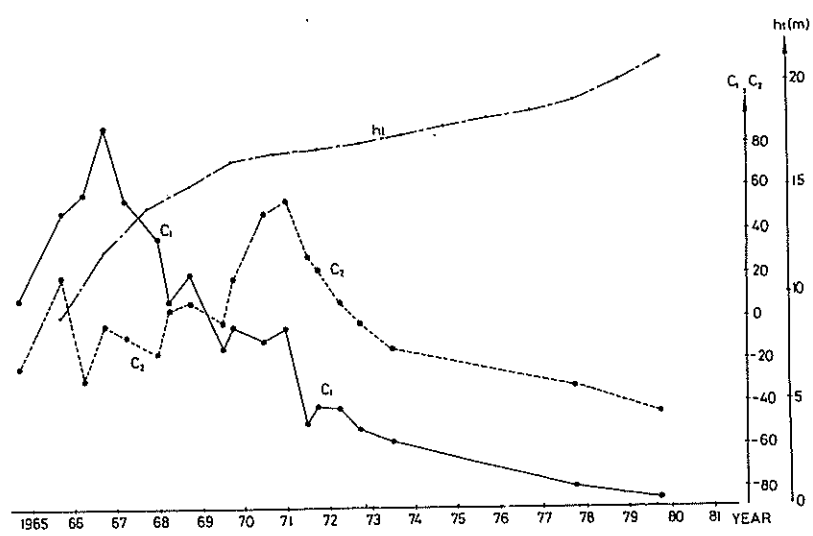


図-2.29 時間係数 c_1, c_2 と防波堤先端水深 h の経時変化 (新潟東港)

にかけて増加している。その後、1967年から1974年にかけてはほぼ直線的に減少し、1974年以降ほとんど変化していない。したがって1963年から1965年にかけて解析領域はほぼ全域にわたって侵食が起り、1965年から1967年にかけては堆積が起っている。その後1967年から1974年

にかけては解析領域ほぼ全域にわたって再び侵食を受けたものの、1974年以降、侵食量が非常に小さくなっている。

図-2.28(2)における防波堤近傍の e_1 の大きい領域では防波堤に沿う流れによる洗掘が生じていたと考えられる。

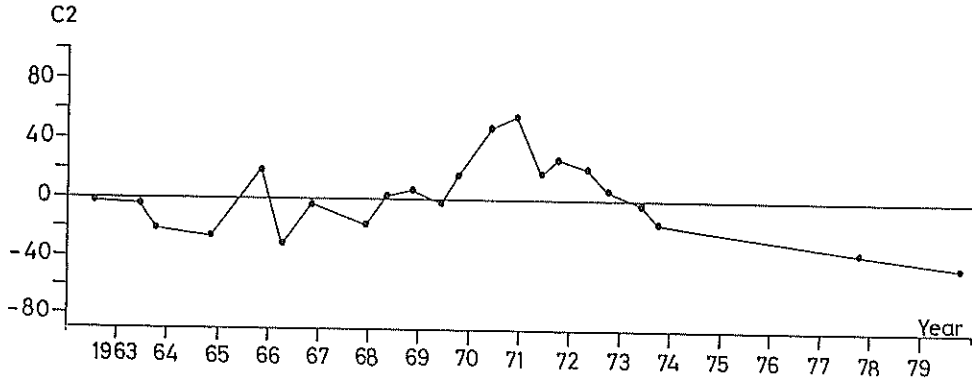
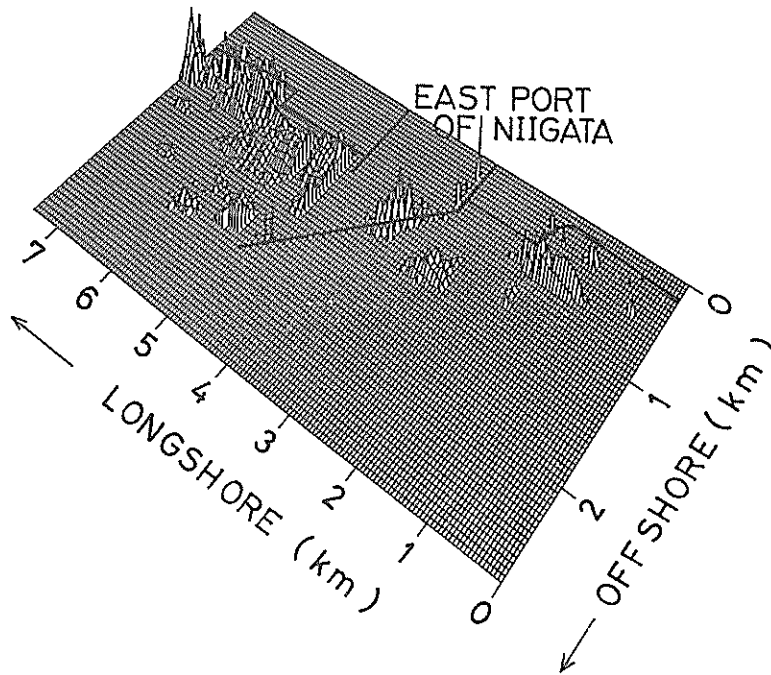
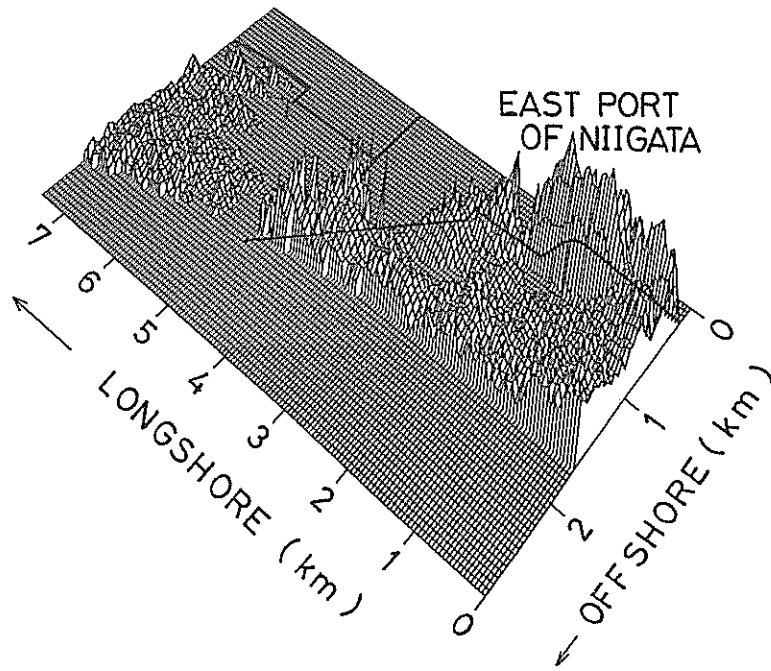


図-2.30 時間係数 c_2 の経時変化(新潟東港)



(1) $e_2 > 0$ の領域

図-2.31 経験的固有関数 $e_2(x,y)$ の分布図(新潟東港)



(2) $e_2 < 0$ の領域

図-2.31 経験的固有関数 $e_2(x, y)$ の分布図 (新潟東港)

しかし、防波堤近傍を除いて考えると港の北側と南側において e_1 の絶対値の差は小さい。したがって、モード1では、防波堤による沿岸漂砂阻止の影響が小さいと考えられる。

1967年から1972年に注目すると、波のエネルギーが小さいと考えられる夏季において、 c_1 の減少量が小さかったり、あるいは c_1 が増加している。すなわち、1967年から1974年にかけて新潟東港周辺の海浜では長期的には侵食が生じているものの、波のエネルギーの小さい夏季には侵食量が少くなっている。

図-2.29に時間係数 c_1 、 c_2 と防波堤先端 h_t の経時変化を示す。実線が c_1 を、破線が c_2 を、一点鎖線が h_t を表わしている。図-2.29によると時間係数 c_1 、 c_2 と防波堤先

端水深 h_t の相関は小さい。

b) モード2 (寄与率; 13%)

図-2.30に時間係数 c_2 の経時変化を、図-2.31(1), (2)に固有関数 e_2 の分布を示す。時間係数 c_2 は、1963年から1967年にかけてはほぼ一定であり、1967年から1971年にかけて増加し、1971年から1979年にかけて減少している。したがって、 $e_2 < 0$ の領域、すなわち港の北側海岸の岸近くの領域を除く解析領域ほぼ全域にわたって1967年から1971年にかけて堆積が生じ、1971年から1979年にかけて侵食が生じている。逆に、港の北側海岸の岸近くの領域では、1967年から1971年にかけて侵食が生じ、1971年から1979年にかけては堆積が生じている。

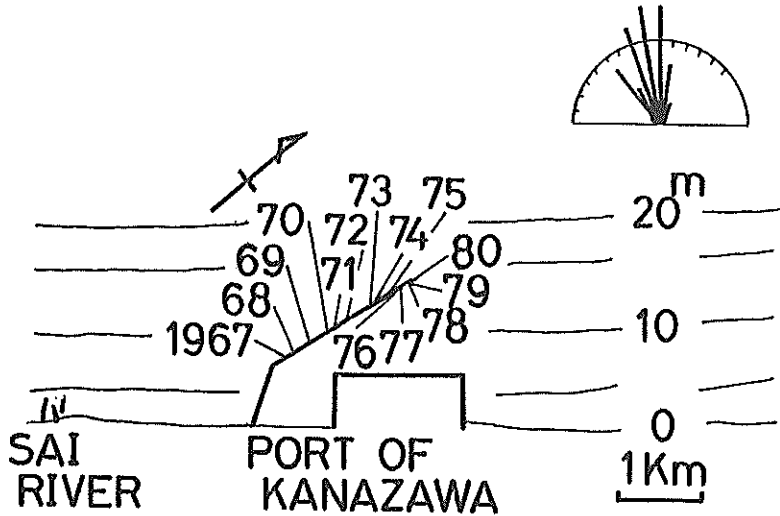


図-2.32 金沢港周辺の海底地形

表-2.5 解析に用いたデータの測量実施年月(金沢港)

測 量 年 月	
1964. 10	1977. 10
1965. 10	1978. 7
1966. 10	1978. 10
1968. 10	1979. 9
1969. 10	1980. 8
1970. 10	1980. 10
1976. 6	1981. 7
1976. 10	1981. 11
1977. 6	

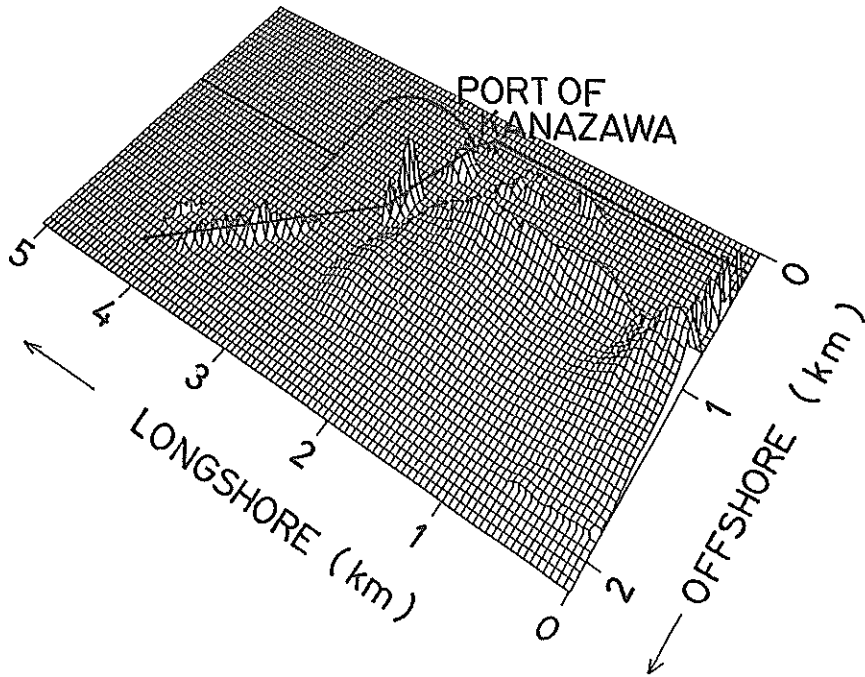
3.5 金沢港

金沢港周辺の海底地形及び防波堤の建設状況⁹⁾、波のデータを図-2.32に示す。金沢港では波向別波高頻度が整理されていなかったため、福井港で観測された波浪データを基にして、方向別の波のエネルギーを求めた。金沢港と福井港は70kmしか離れておらず海岸線の向きもほぼ等しいことから、両港における波の特性はほぼ等しいと考えられる。解析に用いたデータの測量年月を表-2.5に示す。

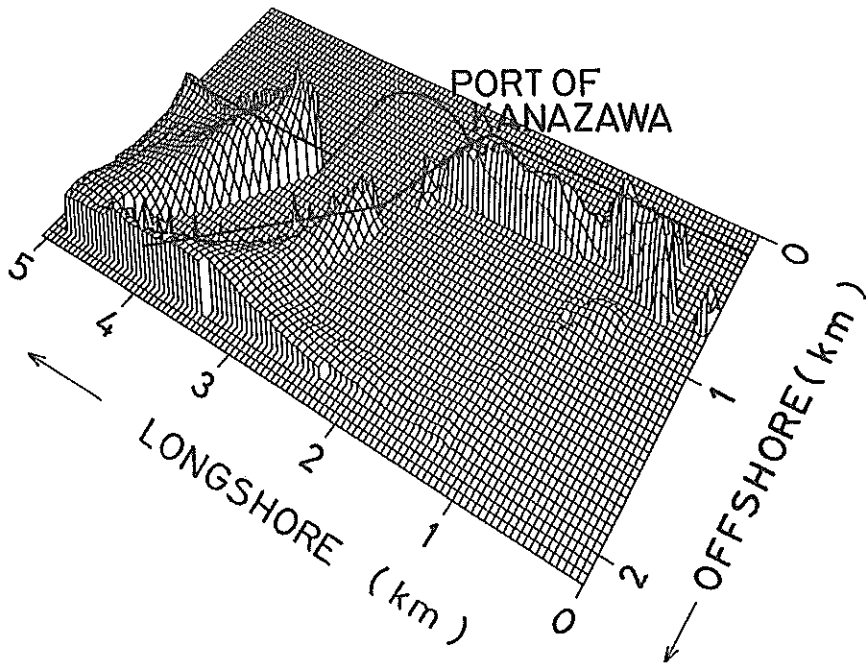
(1) トレンド法を用いた解析

図-2.33(1)、(2)に解析結果を示す。(1)が長期的に侵食の生じた領域であり、(2)が長期的に堆積の生じた領域である。侵食領域が防波堤前面に帯状に存在し、防波堤南側の沖合にも広域にわたって存在している。堆積領域は、防波堤直前面の侵食領域の南側に存在しており、港口及び北側護岸前面、南側海岸の汀線付近にも存在している。

図-2.32の波のデータを用いてエネルギー平均波向を求めると、海岸線に対してやや南寄りとなった。恒流は北向き⁹⁾なので金沢港周辺海浜における沿岸漂砂の卓越方向は北向きであると考えられる。すると、防波堤の南側の堆積領域は北向きに運ばれた底質が防波堤の上手に堆積したことによって生じたと考えられ、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港口付近に堆積したことによって生じたと考えられる。しかし



(1) $a > 0$ の領域 (侵食領域)



(2) $a < 0$ の領域 (堆積領域)

図-2.33 トレンド法における $a(x,y)$ の分布図(金沢港)

防波堤の南側の侵食領域は、防波堤による沿岸漂砂阻止の影響とは考えられず、他の要因によって生じていると考えられる。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であると考えられる。

(2) 経験的固有関数法を用いた解析

a) モード1 (寄与率; 52%)

図-2.34に時間係数 c_1 の経時変化を、図-2.35(1),(2)に固有関数 e_1 の分布を示す。時間係数 c_1 は防波堤の建設が始まった1968年以降単調に減少している。したがって、1968年以降、 $e_1 > 0$ である防波堤南側の領域及び港口、

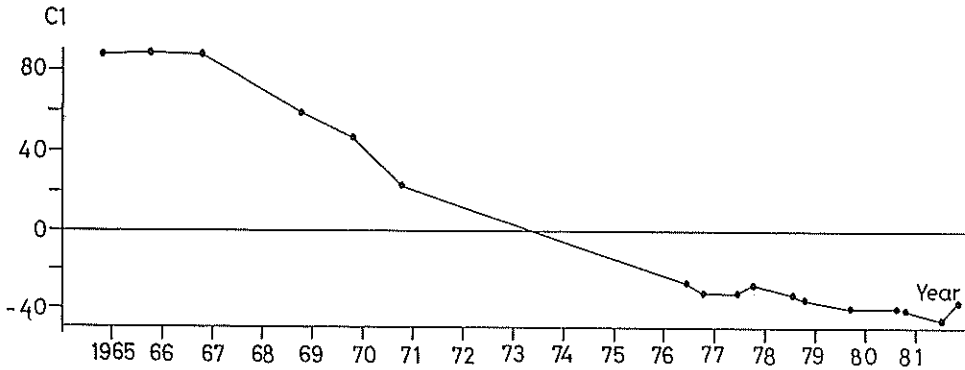
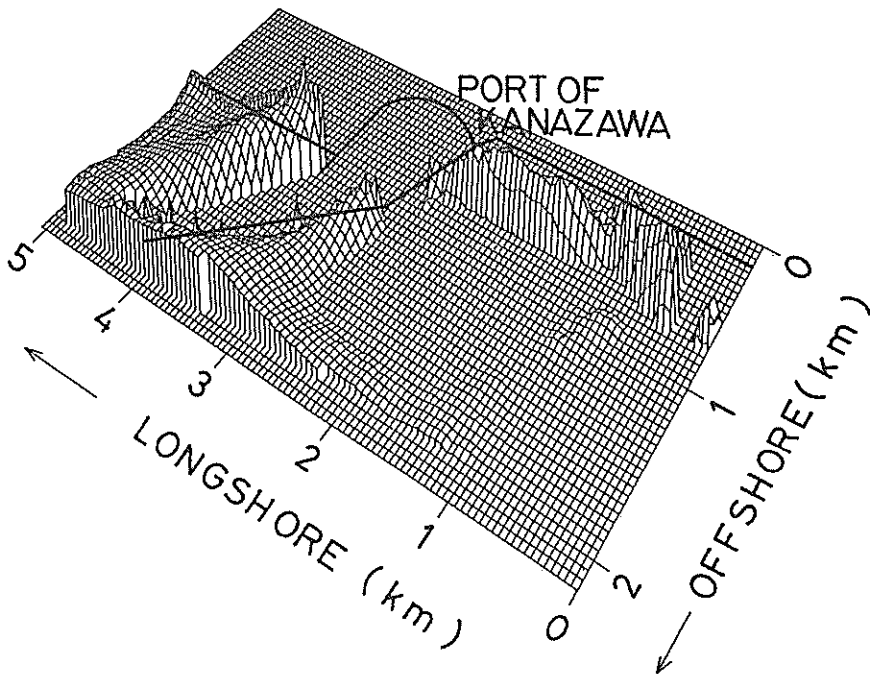
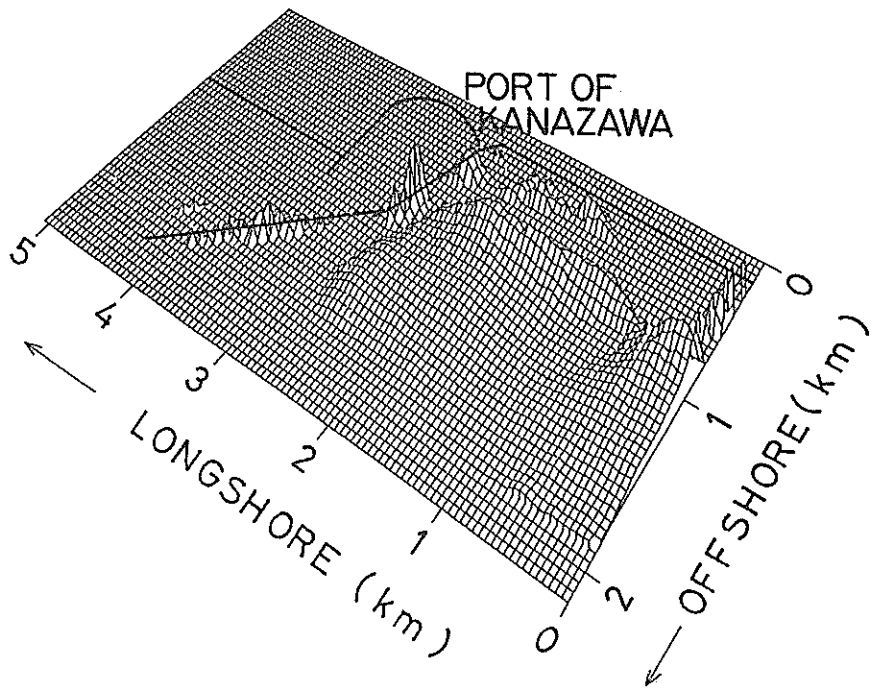


図-2.34 時間係数 c_1 の経時変化 (金沢港)



(1) $e_1 > 0$ の領域

図-2.35 経験的固有関数 $e_1(x,y)$ の分布図 (金沢港)



(2) $e_1 < 0$ の領域

図-2.35 経験的固有関数 $e_1(x,y)$ の分布図 (金沢港)

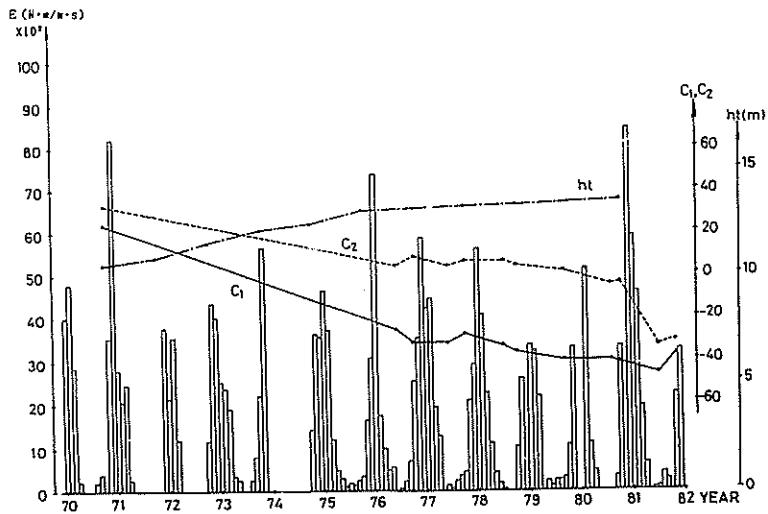


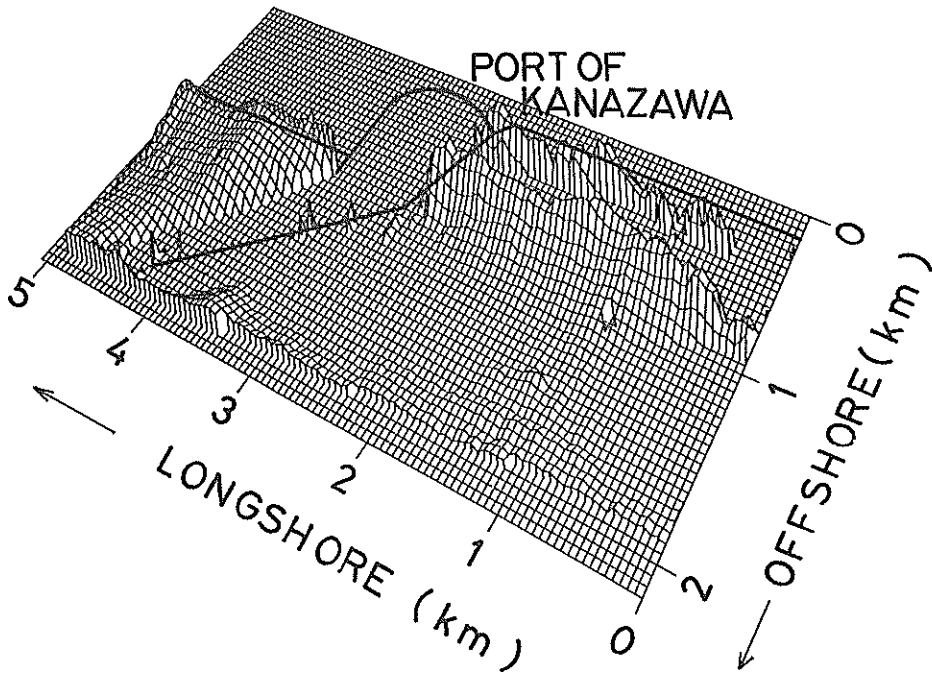
図-2.36 時間係数 c_1, c_2 と防波堤先端水深 h , 波のエネルギーフラックス E の経時変化 (金沢港)

北側護岸前面，南側海岸の汀線付近では堆積が生じ， $e_1 < 0$ である防波堤直前面及び防波堤南側の領域では侵食が生じている。この解析結果は，トレンド法による解析結果と一致しており，モード1では主として防波堤による沿岸漂砂阻止の影響が現われたと考えられる。

図-2.36は時間係数 c_1 ， c_2 及び防波堤先端水深 h_t ，波のエネルギーフラックス E の経時変化を示したものである。実線が c_1 を，破線が c_2 を，一点鎖線が h_t を示しており，柱状の長方形が E を示している。但し，水位データの測得率が70%以下の月については $E=0$ としている。

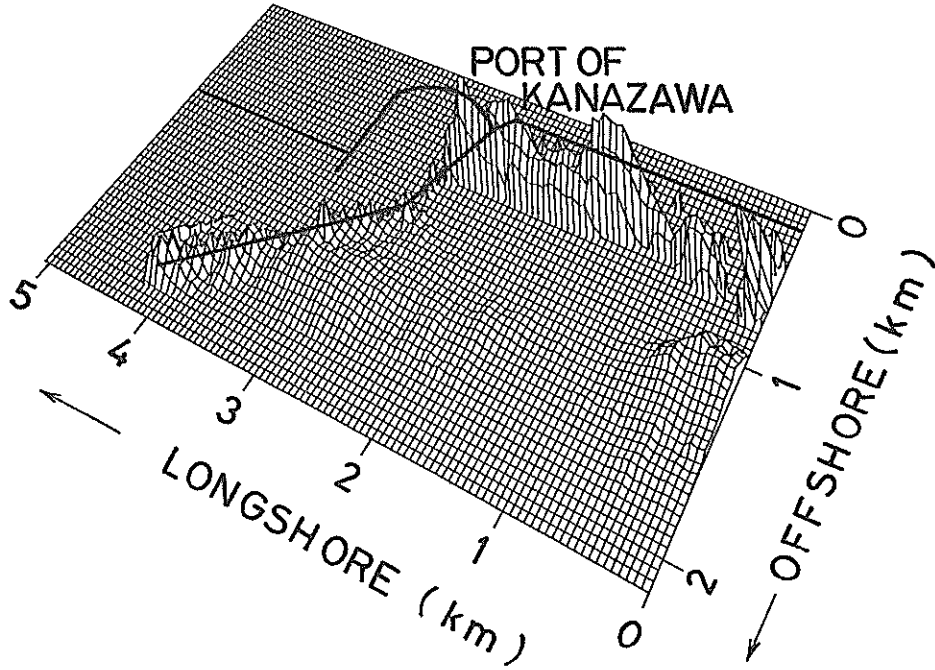


図-2.37 時間係数 c_2 の経時変化（金沢港）



(1) $e_2 > 0$ の領域

図-2.38 経験的固有関数 $e_2(x,y)$ の分布図（金沢港）



(2) $e_2 < 0$ の領域

図-2.38 経験的固有関数 $e_2(x, y)$ の分布図 (金沢港)

金沢港における波高計は、水深20mに設置されている超音波式で、1971年11月からは設置地点が南へ約5 km移動したものの水変は変化していない。1980年11月からは感度が良くなっている。図-2.36によると時間係数 c_1 と波のエネルギーフラックス E の相関は小さい。

b) モード2 (寄与率; 16%)

図-2.37に時間係数 c_2 の経時変化を、図-2.38(1), (2)に固有関数 c_2 の分布を示す。時間係数 c_2 は1965年から1970年にかけて増加し、1970年から1981年にかけてゆるやかに減少している。したがって、 $e_2 > 0$ の領域、すなわち港の北側の領域及び港の南側の岸近くの領域では、1965年から1970年にかけて侵食が生じ、1970年から1981年にかけて堆積が生じている。一方、 $e_2 < 0$ の領域、すなわち南防波堤の直前面及び港の南側の岸近くの領域では、1965年から1970年にかけて堆積が生じており、1970年から1981年にかけて侵食が生じている。

1970年から見られる南防波堤の侵食は、防波堤に沿う流れによる洗掘と考えられる。しかし、1970年以降の防波堤南側領域での侵食、北側領域での堆積の原因は不明である。

3.6 滝港

滝港周辺の海底地形及び防波堤の位置を図-2.39に示す。滝港は能登半島の西岸に位置し、これより南西へ向けには全長約80kmの大砂丘があり、北には急峻な岩礁地帯が存在している¹⁰⁾。図-2.39の矢印は、金沢港の波のデータを用いて計算した滝港におけるエネルギー平均波向である¹⁰⁾。解析に用いたデータの測量年月を表-2.6に示す。

(1) トレンド法を用いた解析

図-2.40(1), (2)に解析結果を示す。(1)が長期的に侵食の生じている領域を、(2)が長期的に堆積の生じている領域を表わしている。長期的に侵食の生じている領域は、西防波堤の港外側及び港内の西側の領域、泊地内である。一方、長期的に堆積の生じている領域は港内に広く存在している。

泊地内における侵食は浚渫の影響が現われたものと考えられる。港内の西側の領域における侵食は、西防波堤開口部から港外へ向かう流れによって、底質が港外へ運び去られたことによって生じたと考えられる。港内に生じた堆積は港外から港内へ進入する底層の流れによって底質が運ばれ港内に堆積した結果と考えられる。

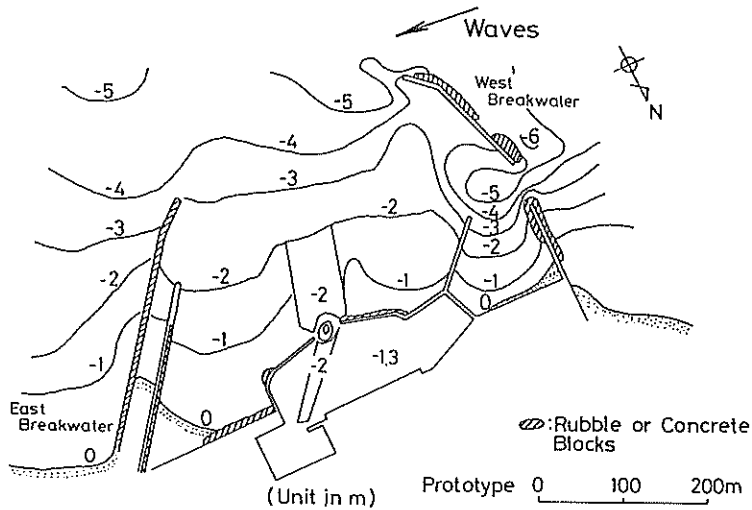


図-2.39 滝港周辺の海底地形

表-2.6

解析に用いたデータの測量実施年月（滝港）

測 量 年 月	
1978.	2
1979.	3
1980.	2
1981.	3
1982.	2

(2) 経験的固有関数法を用いた解析

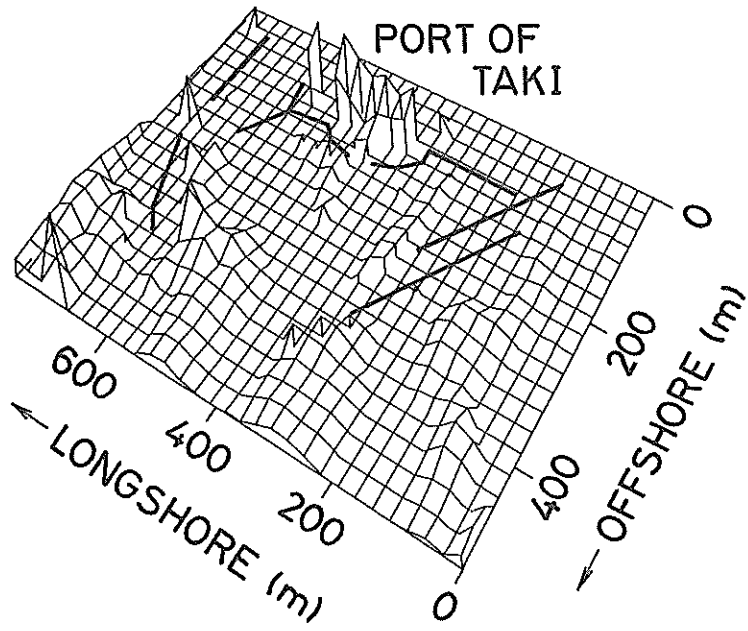
a) モード1（寄与率；35%）

図-2.41に時間係数 c_1 の経時変化を、図-2.42(1),(2)に固有関数 e_1 の分布を示す。時間係数 c_1 は1980年2月から1981年3月にかけて急激な増加を示しているものの、他の期間は減少の傾向にある。したがって、 $e_1 > 0$ である西防波堤の港内側、港外側と泊地では、1980年2月から1981年3月にかけて侵食が起きているものの、他の

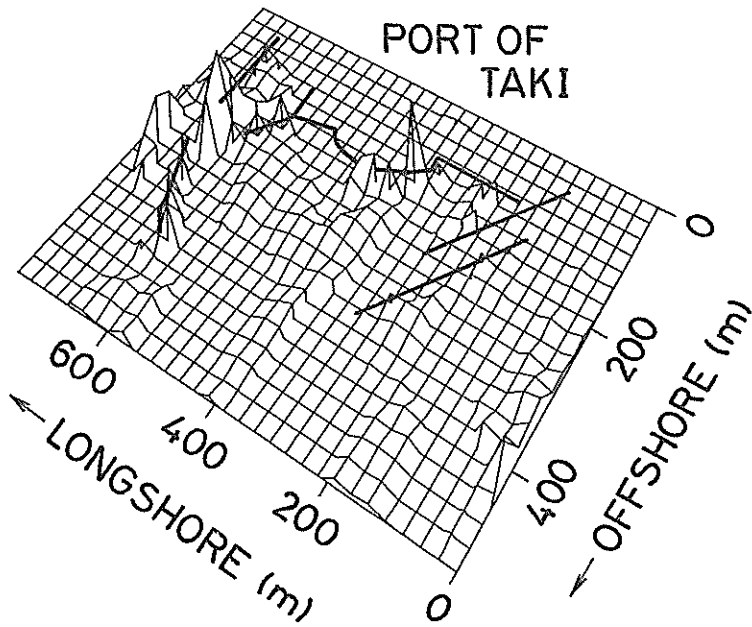
期間では堆積が起きている。港内に広く存在している $e_1 < 0$ の領域では、1980年2月から1981年3月にかけて堆積が起きているものの、他の期間では侵食が起きている。

海浜変形の原因として東防波堤の効果を検討する。二基ある東防波堤のうち、東側の透過堤は1978年以前に建設されたものであり、西側の不透過堤は1980年に180m、1984年に84.5m建設されたものである。時間係数 c_1 が急激に増加した1980年2月から1981年3月は不透過堤建設の時期と一致している。しかし、不透過堤によって港の東からの漂砂を遮断したにもかかわらず港内が堆積領域となっていることから、時間係数 c_1 の1980年から1981年にかけての増加は不透過堤建設の影響とは考えにくい。

図-2.43は、時間係数 c_1 、 c_2 と3.5金沢港の波のエネルギーフラックス E を比較したものである。実線が c_1 を、破線が c_2 を示しており、柱状の長方形が E を示している。但し、水位データの測得率が70%以下の月については $E = 0$ としている。滝港と金沢港の距離が40kmなので、滝港における波のエネルギーの経年変化は定性的には金沢港の波のエネルギーに等しいと考えられる。時間係数 c_1 が増加している1980年2月から1981年3月までの期間において波のエネルギーフラックス E が大きくなっている。したがって、1980年2月から1981年3月にかけての港内の堆積は、波高の大きい波によって大量の底質が運び込まれたために生じたと考えられる。



(1) $a > 0$ の領域 (侵食領域)



(2) $a < 0$ の領域 (堆積領域)

図-2.40 トレンド法における $a(x,y)$ の分布図(滝港)

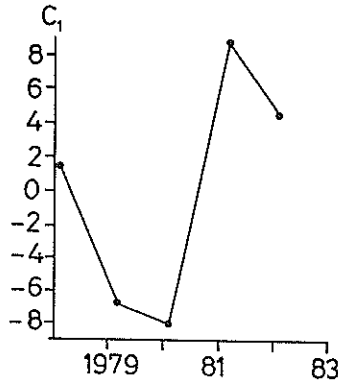
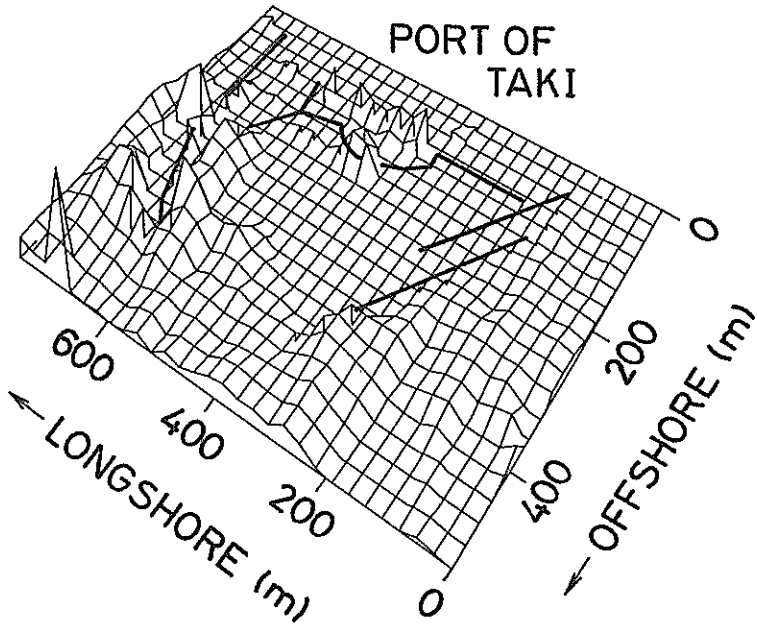
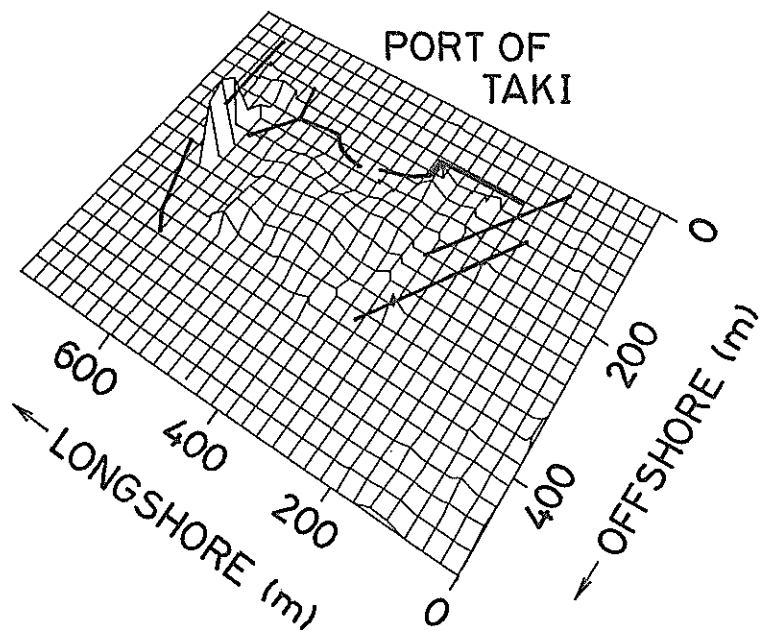


図-2.41 時間係数 c_1 の経時変化(滝港)



(1) $e_1 > 0$ の領域

図-2.42 経験的固有関数 $e_1(x,y)$ の分布図(滝港)



(2) $e_1 < 0$ の領域

図-2.42 経験的固有関数 $e_1(x,y)$ の分布図 (滝港)

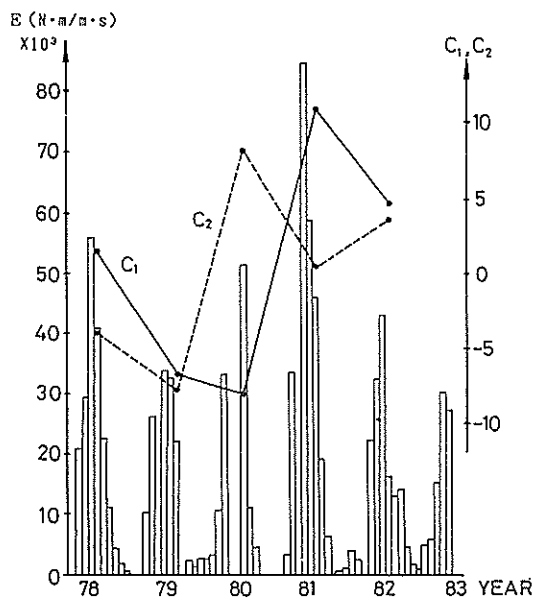


図-2.43 時間係数 c_1 , c_2 と波のエネルギーフラックス E の経時変化 (滝港)

b) モード 2 (寄与率; 29%)

図-2.44に時間係数 c_2 の経時変化を、図-2.45(1),(2)に固有関数 e_2 の分布を示す。時間係数 c_2 は減少と増加を繰り返しており、特に1979年3月から1980年2月にかけての変化量が大きい。 $e_2 > 0$ の領域が泊地、東防波堤近

傍、西防波堤近傍に存在しているものの、解析領域ほぼ全域にわたって $e_2 < 0$ となっている。したがって、1979年3月から1980年2月にかけては、解析領域ほぼ全域にわたって堆積が起こっている。

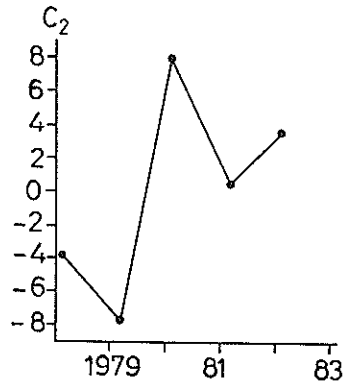
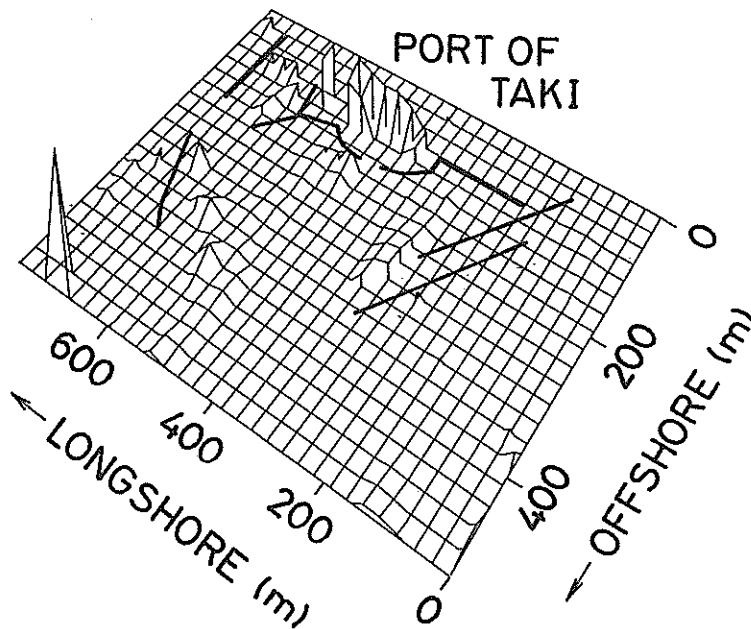
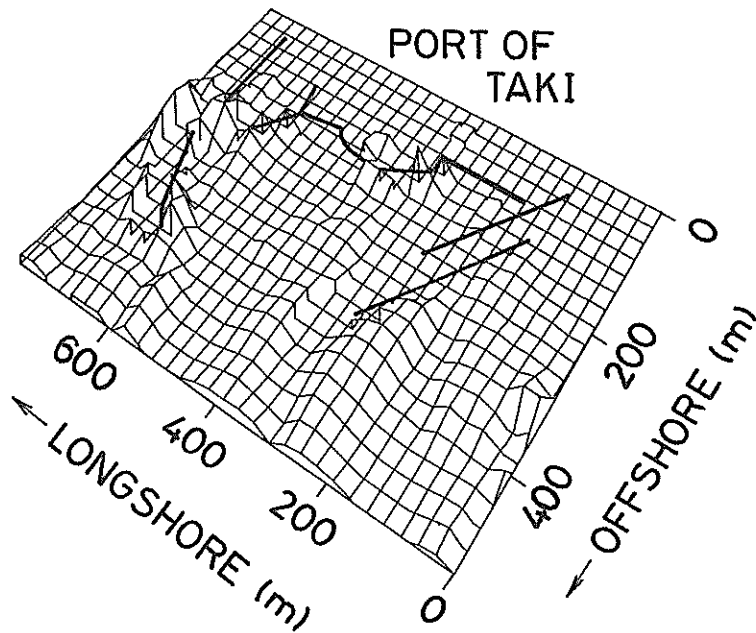


図-2.44 時間係数 c_2 の経時変化 (滝港)



(1) $e_2 > 0$ の領域

図-2.45 経験的固有関数 $e_2(x, y)$ の分布図 (滝港)



(2) $e_2 < 0$ の領域

図-2.45 経験的固有関数 $e_2(x, y)$ の分布図 (滝港)

3.7 福井港

福井港周辺の海底地形および防波堤の建設状況⁹⁾、波のデータを図-2.46に示す。解析に用いたデータの測量年月を表-2.7に示す。解析範囲は九頭竜川河口から福井港南防波堤までの沿岸方向約3.7km、岸沖方向約2.5kmである。

(1) トレンド法を用いた解析

図-2.47(1), (2)に解析結果を示す。(1)が長期的に侵食の生じた領域を表わしており、(2)が長期的に堆積の生じた領域を表わしている。侵食領域は防波堤直前面に帯状に存在し、河口前面にも半球状に存在している。堆積領域は、防波堤直前面の侵食領域よりも沖合の領域及び港口に存在し、河口付近では堆積領域が侵食領域をとり囲むように存在している。

図-2.46の方向別の波のエネルギー分布からエネルギー平均波向を求めると海岸線に対してほぼ直角となるものの恒流は北向きが卓越している¹⁰⁾。したがって、この海浜では北向きの沿岸漂砂が卓越していると考えられる。すると、防波堤沖合の堆積は北向きの沿岸漂砂が防波堤によって阻止されたために生じたと考えられ、港口にお

ける堆積はラディエーションストレスで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港口付近に堆積したために生じたと考えられる。防波堤直前面の侵食は、防波堤に沿う流れによる洗掘であると考えられる。

(2) 経験的固有関数法を用いた解析

a) モード1 (寄与率: 53%)

図-2.48に時間係数 c_1 の経時変化を、図-2.49(1), (2)に固有関数 e_1 の分布を示す。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、長期的には増加の傾向にある。したがって、 $e_1 > 0$ である九頭竜川河口付近の領域は、長期的には侵食が生じているものの、1969年から1970年にかけて一時的に堆積が生じている。一方 $e_1 < 0$ の領域、特に防波堤沖合と港口では1969年から1970年にかけて一時的に侵食が生じているものの、長期的には堆積が生じている。長期的な海浜変形は、(1)トレンド法を用いた解析結果と同様である。したがって、防波堤沖合の堆積は沿岸漂砂が防波堤によって阻止されたことの影響、港口の堆積はラディエーションストレスによる流れの影響、防波堤直前面の侵食は防波堤に沿う流れによる洗掘であると考えられる。

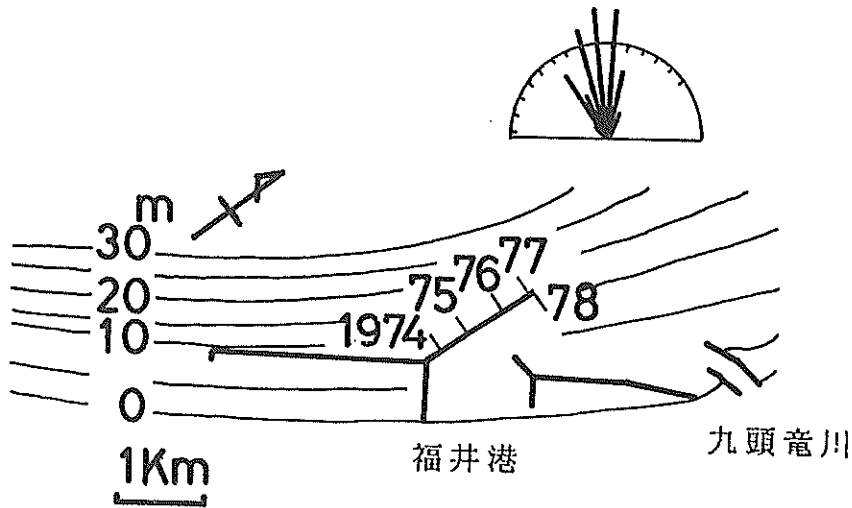


図-2.46 福井港周辺の海底地形

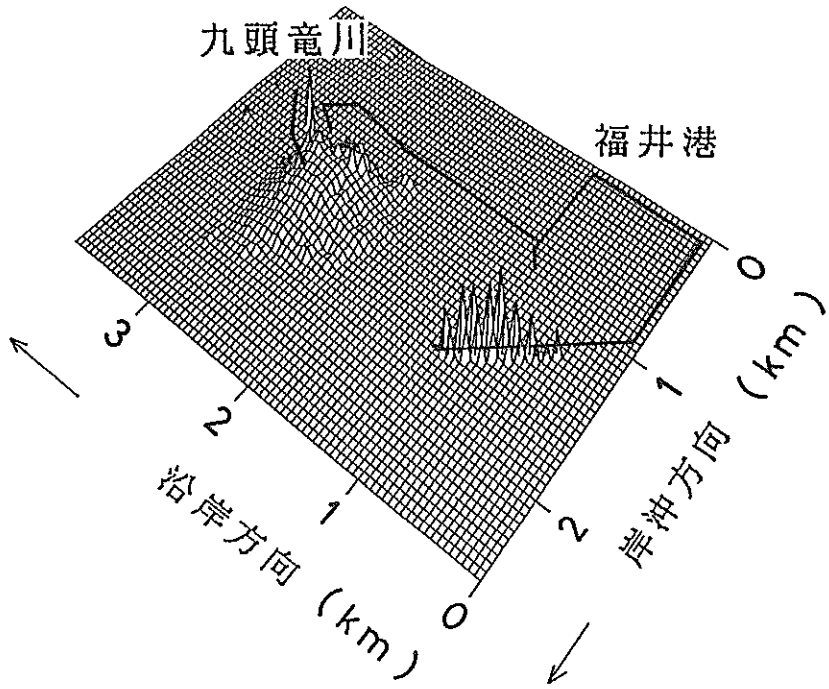
表-2.7
解析に用いたデータの測量実施年月
(福井港)

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

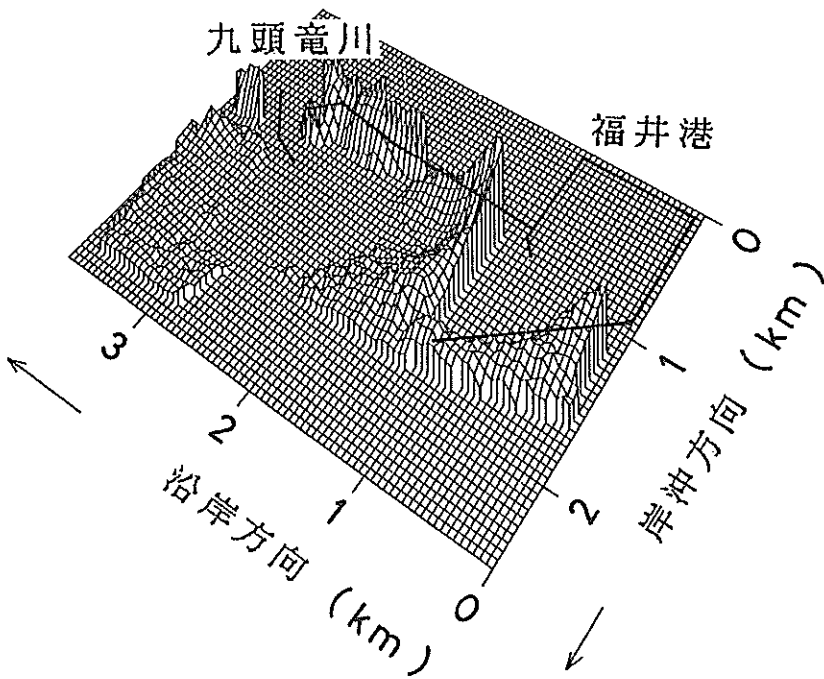
1969年9月から1970年9月の海浜変形について考える。ここで、特に九頭竜川河口前面の海浜変形に注目する。ある領域における固有関数 $e_1(x,y)$ がわかっている場合、時間係数 c_1 が増加しているか、あるいは減少しているかによってその領域のある期間の海浜変形の傾向を知ることができる。そこで、河口前面の海浜変形を示す指標として時間係数 c_1 の時間微分 $\Delta c_1 / \Delta t$ を考え、河川からの流下土砂量と高い相関のある河川流量⁷⁾と共に、それらの経年変化を図-2.50に示す。図-2.50では、河川流量の多いときに $\Delta c_1 / \Delta t$ が負となっている。河口前面では $e_1 > 0$ なので $\Delta c_1 / \Delta t$ が負であるときは河口前面は堆積領域である。したがって、1969年から1970年にかけての河口前面の堆積は、河川からの流下土砂の増加の影響と考えられる。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したと考えられる。したがって、長期的には河口前面において侵食が生じ、その周辺海浜では堆積が生じたと考えられる。

次に、時間係数 c_1, c_2 と波のエネルギーフラックス E と防波堤先端水深 h_t との関係を調べた。福井港の波のデータは1981年4月からのデータしかなく、海浜変形との相関を調べるにはデータ数が少ないので、福井港の北約60 kmの金沢港のデータを用いることとした。

図-2.51(1)は、福井港と金沢港の月平均の波エネルギーフラックスの時系列変化を比較したものであり、



(1) $a > 0$ の領域 (侵食領域)



(2) $a < 0$ の領域 (堆積領域)

図-2.47 トレンド法における $a(x,y)$ の分布図 (福井港)

図-2.51(2)は両者の相関を調べたものである。図-2.51(2)によると、福井港の波のエネルギーフラックスは金沢港のその約0.9倍となっているものの、両者の相関は強く、福井港の波のエネルギーフラックスとして金沢港の波のエネルギーフラックスを用いても定性的には問題がないと考えられる。

図-2.52は、時間係数 c_1 、 c_2 及び防波堤先端水深 h_i ⁶⁾

波のエネルギーフラックス E の経時変化を示したものである。実線が c_1 を、破線が c_2 を、一点鎖線が h_i を示しており、柱状の長方形が E を示している。但し、水位データの測得率が70%以下の月については $E=0$ としている。3.5で述べたように金沢港における波高計は、水深20mに設置されている超音波式で、1971年11月からは設置地点が南へ約5km移動したものの水深は変化しておらず、

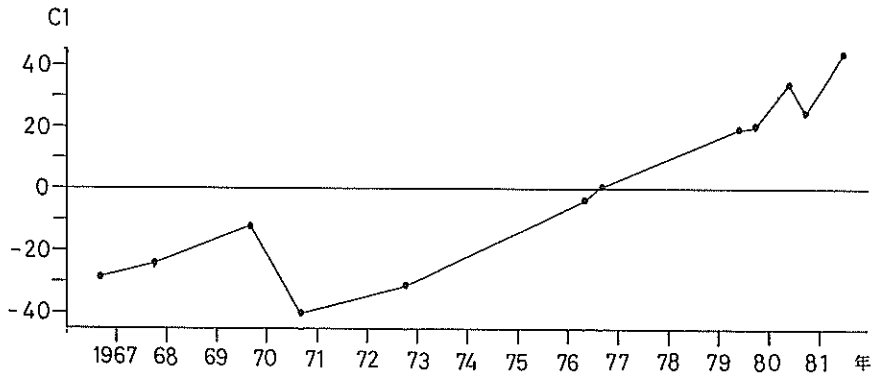


図-2.48 時間係数 c_1 の経時変化(福井港)

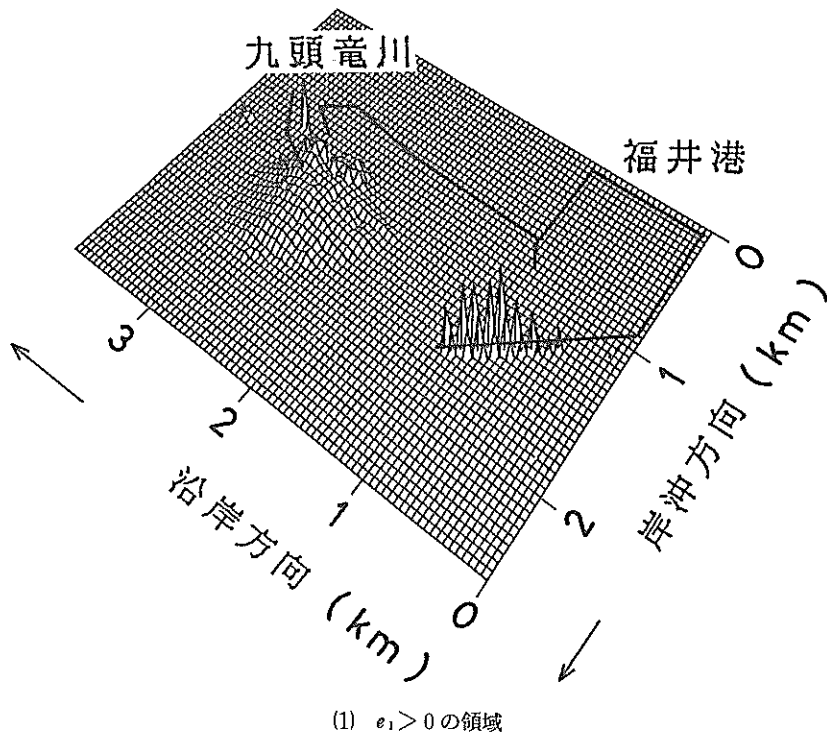


図-2.49 経験的固有関数 $e_1(x, y)$ の分布図(福井港)

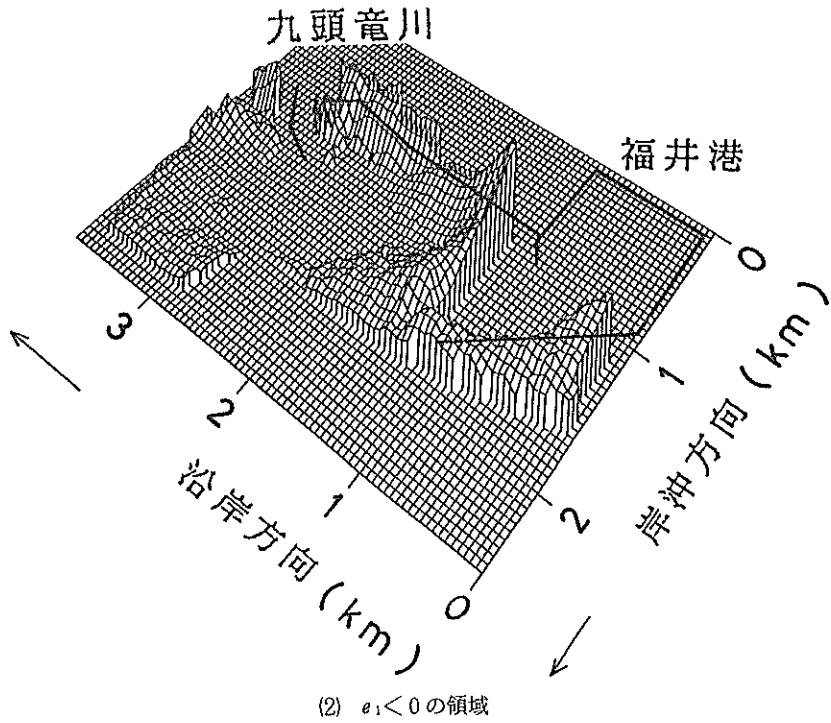


図-2.49 経験的固有関数 $e_1(x,y)$ の分布図(福井港)

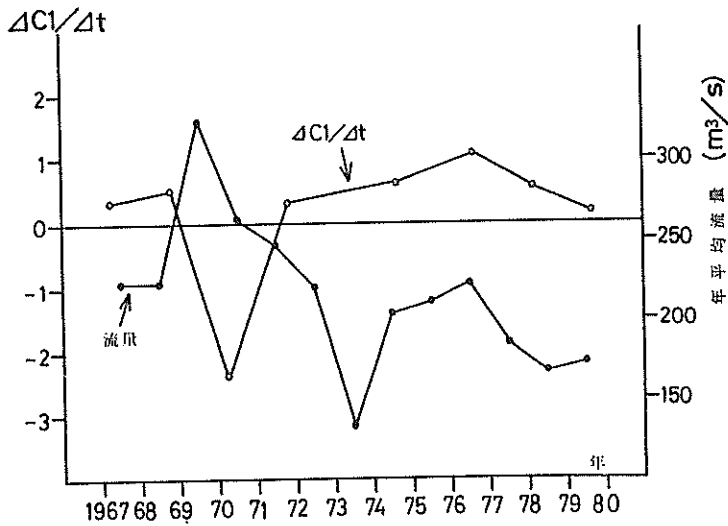


図-2.50 $\Delta c_1 / \Delta t$ と九頭竜川の流量との関係

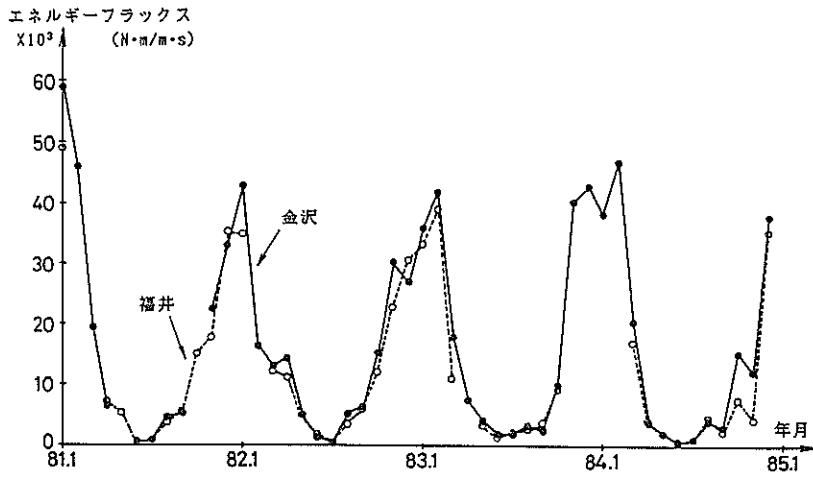


図-2.51 (1) 福井港と金沢港の波のエネルギーフラックスの時系列変化

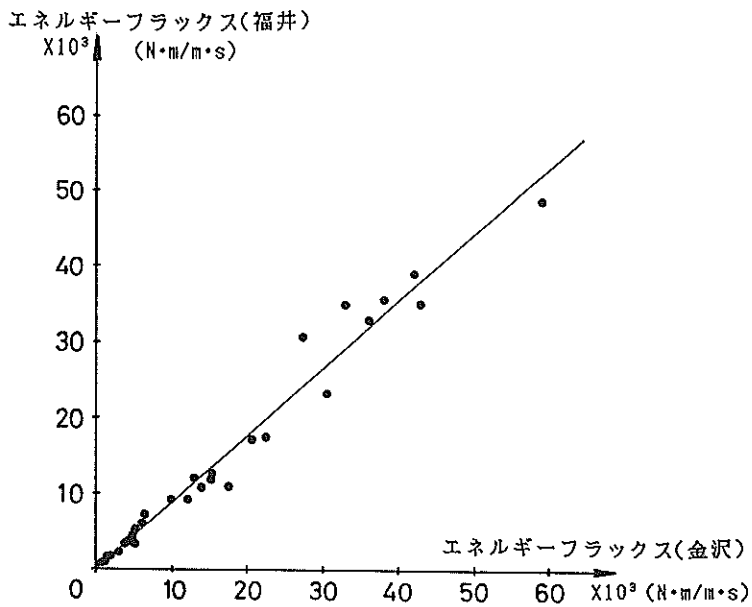


図-2.51 (2) 福井港と金沢港の波のエネルギーフラックスの相関

1980年11月からは感度が良くなっている。波のエネルギーフラックスが比較的大きいのは1970年12月、1976年1月、1980年12月であるけれども、時間係数 c_1 はこの時期に大きな変化を示しておらず、よって時間係数 c_1 と波のエネルギーフラックス E の相関は小さいと考えられる。

b) モード2 (寄与率; 15%)

図-2.53に時間係数 c_2 の経時変化を、図-2.54(1), (2)に固有関数 e_2 の分布を示す。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。解析領域ほぼ全域にわたって $e_2 > 0$ なので、 c_2 が増加しているときは解析領域ほぼ全域にわたって侵食が生じていたことになる。

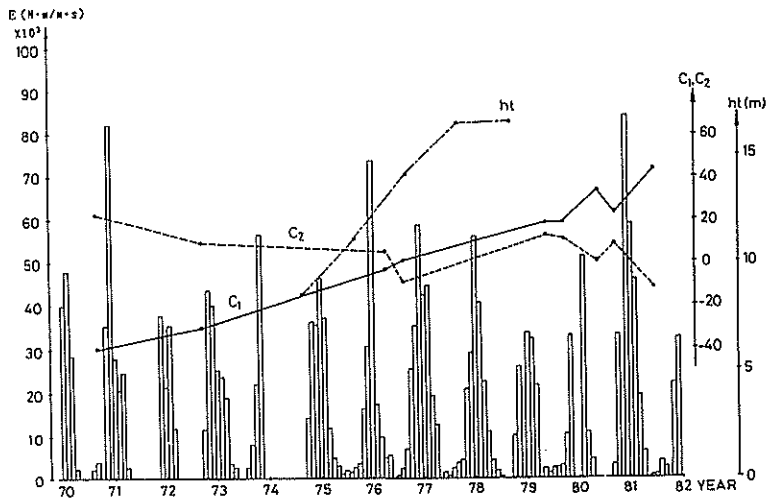


図-2.52 時間係数 c_1 , c_2 と防波堤先端水深 ht , 波のエネルギーフラックス E の経時変化 (福井港)

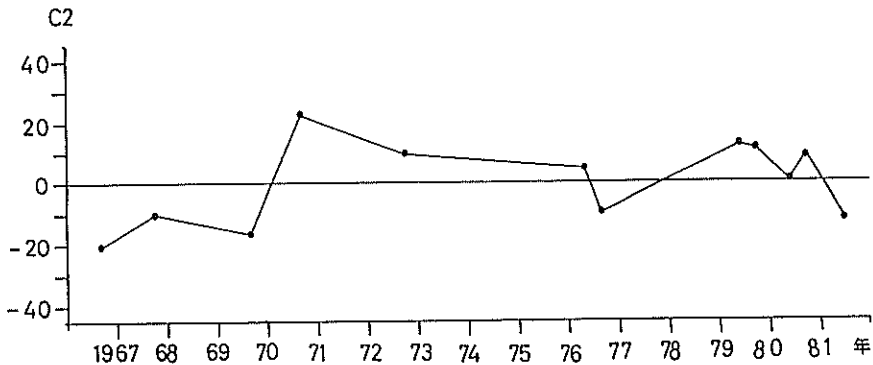
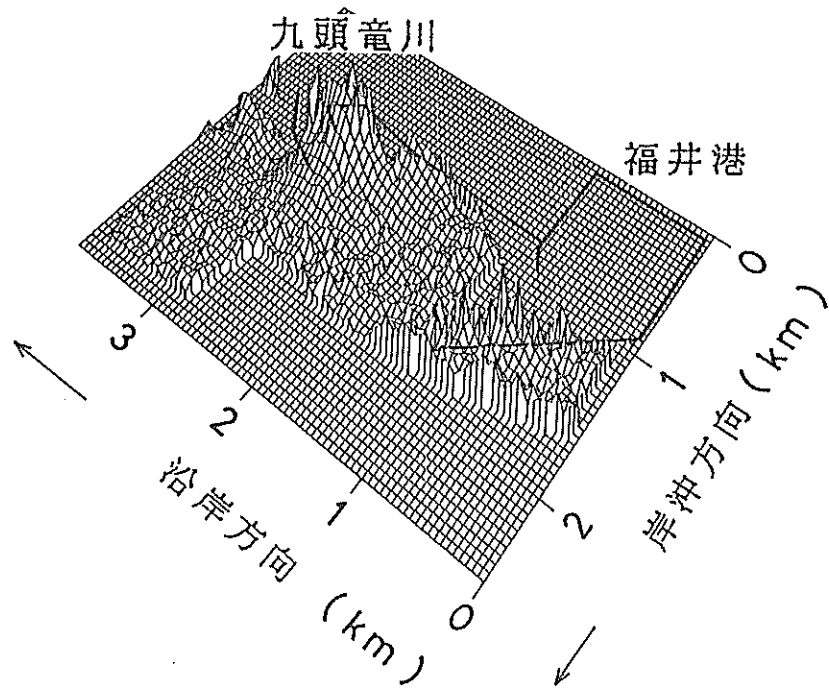
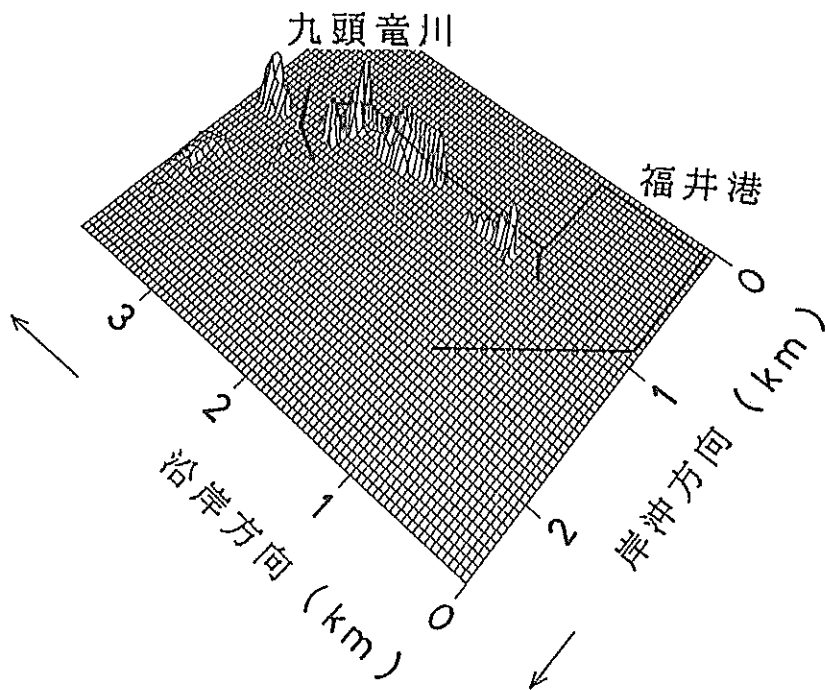


図-2.53 時間係数 c_2 の経時変化 (福井港)



(1) $e_2 > 0$ の領域



(2) $e_2 < 0$ の領域

図-2.54 経験的固有関数 $e_2(x,y)$ の分布図 (福井港)

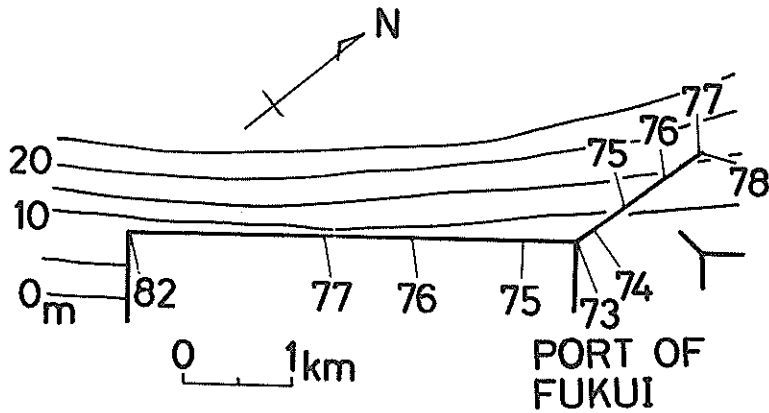


図-2.55 福井港護岸前面の海底地形

3.8 福井港護岸前面

福井港南防波堤前面及び南護岸前面における海浜変形の解析を行った。解析領域の海底地形、南防波堤と南護岸の建設経過を図-2.55に示す。解析に用いたデータの測量年月を表-2.8に示す。

(1) トレンド法を用いた解析結果

解析結果を図-2.56(1), (2)に示す。(1)が長期的に侵食の生じた領域であり、(2)が長期的に堆積の生じた領域である。 $a < 0$ の領域、すなわち長期的に堆積の生じている領域が解析領域ほぼ全域に広がっている。この解析結果は、3.7福井港の解析結果と矛盾しておらず北向きの沿岸漂砂が南防波堤によって阻止されることにより南防波堤前面及び南護岸前面において長期的に堆積が生じたと考えられる。

(2) 経験的固有関数法を用いた解析

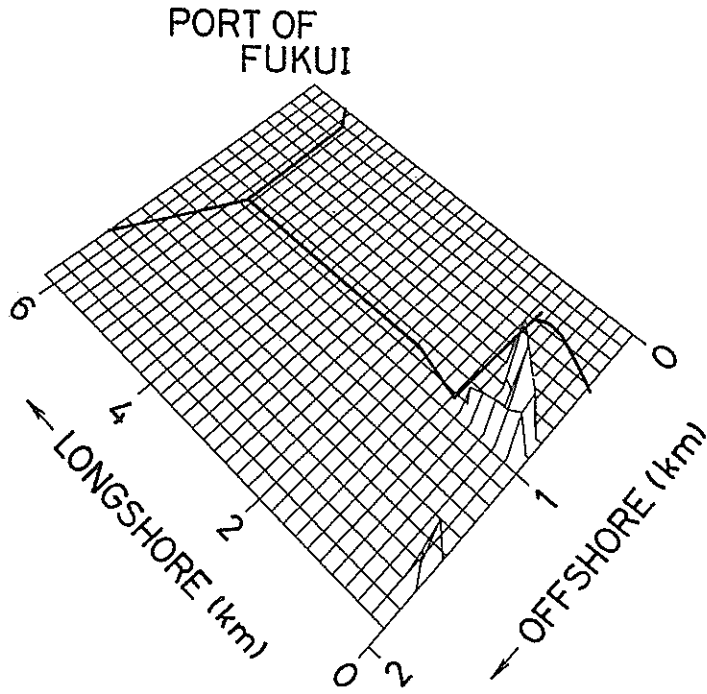
a) モード1 (寄与率; 66%)

図-2.57に時間係数 c_1 の経時変化を、図-2.58(1), (2)に固有関数 e_1 の分布を示す。時間係数 c_1 は1973年6月から1973年10月にかけて急激に増加しているものの、他の期間は減少している。一方、固有関数 e_1 は解析領域ほぼ全域にわたって $e_1 > 0$ である。したがって、解析領域ほぼ全域において、1973年6月から12月にかけて侵食が生じたものの、他の期間では堆積が生じていたことになる。

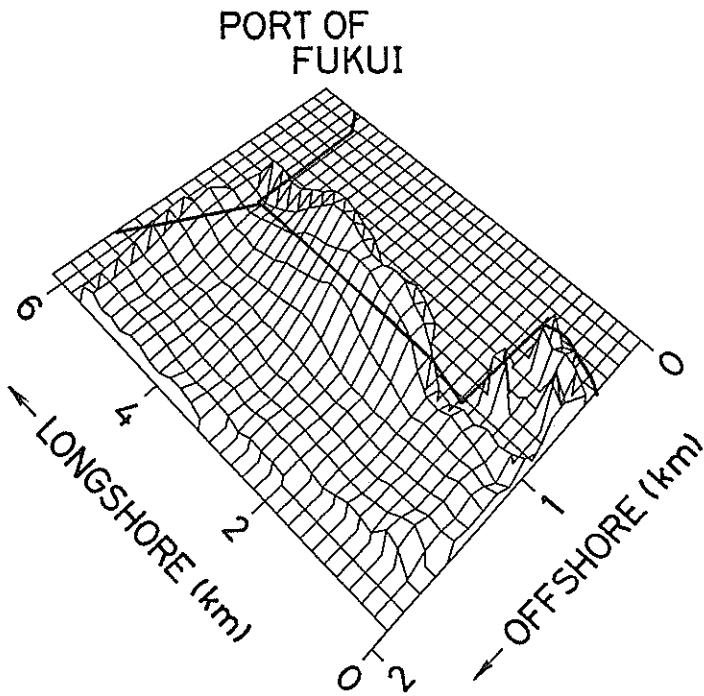
表-2.8 解析に用いたデータの測量
実施年月 (鹿島港護岸前面)

測量年月
1972. 10
1973. 6
1973. 10
1974. 11
1977. 2
1978. 10
1982. 9

図-2.59は、時間係数 c_1 、 c_2 と防波堤先端水深 h_t 、波のエネルギーフラックス E の経時変化を示したものである。実線が c_1 を、破線が c_2 を、一点鎖線が h_t を示しており、柱状の長方形が E を示している。但し、波のエネルギーフラックスは3.7と同様に金沢港の波のデータを用いて計算し測得率が70%以下の月については $E = 0$ とした。図によると時間係数 c_1 と波のエネルギーフラックス E の相関は小さく、よって、1973年6月から12月につ



(1) $a > 0$ の領域 (侵食領域)



(2) $a < 0$ の領域 (堆積領域)

図-2.56 トレンド法における $a(x,y)$ の分布図(福井港護岸前面)

ての解析領域全域における急激な侵食の原因は不明である。

b) モード2 (寄与率; 12%)

図-2.60に時間係数 c_2 の経時変化を図-2.61(1), (2)に固有関数 e_2 の分布を示す。時間係数 c_2 は1973年6月から

1973年10月にかけて減少し、1973年10月以降はほぼ一定である。したがって、 $e_2 > 0$ である、南護岸前面の領域では1973年6月から1973年10月にかけて堆積が生じ、 $e_2 < 0$ の領域、すなわち $e_2 > 0$ の領域より沖側の領域では1973年6月から1973年10月にかけて侵食が生じている。

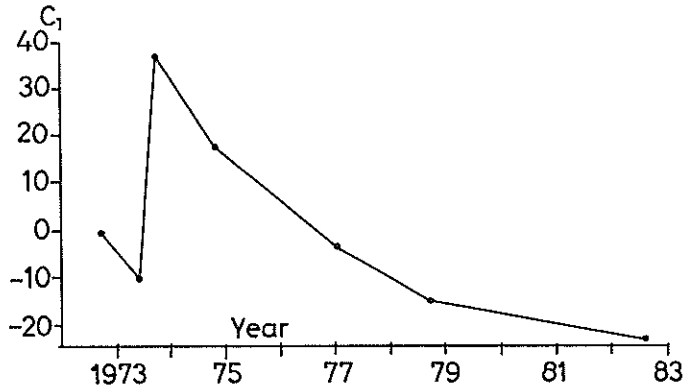
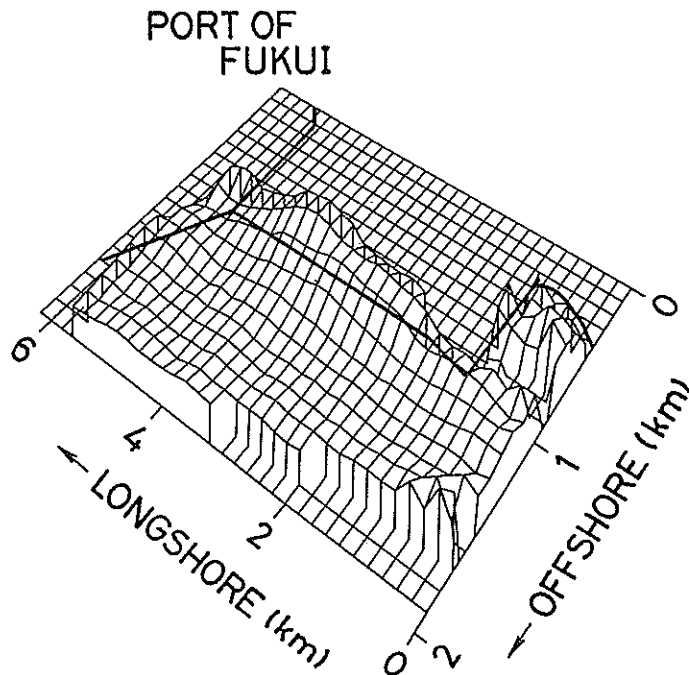
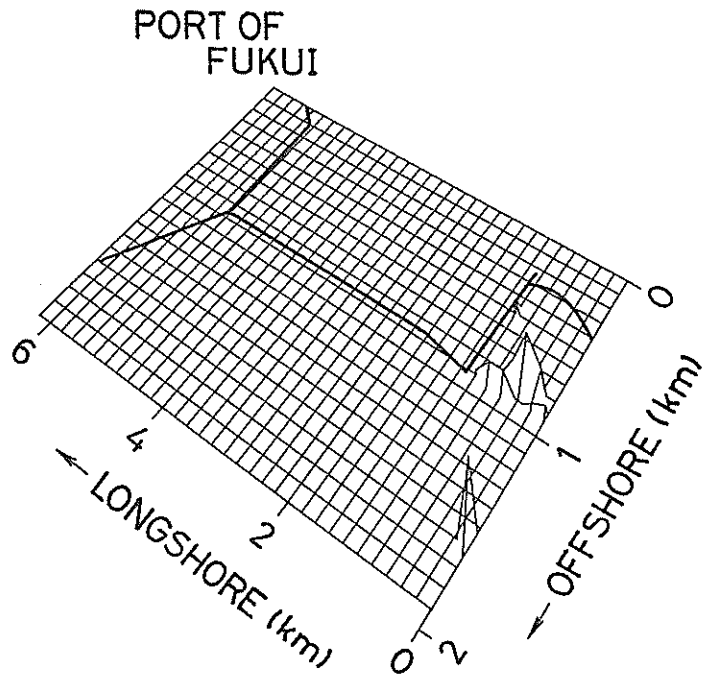


図-2.57 時間係数 c_1 の経時変化 (福井港護岸前面)



(1) $e_1 > 0$ の領域

図-2.58 経験的固有関数 $e_1(x, y)$ の分布図 (福井港護岸前面)



(2) $e_1 < 0$ の領域

図-2.58 経験的固有関数 $e_1(x, y)$ の分布図 (福井港護岸前面)

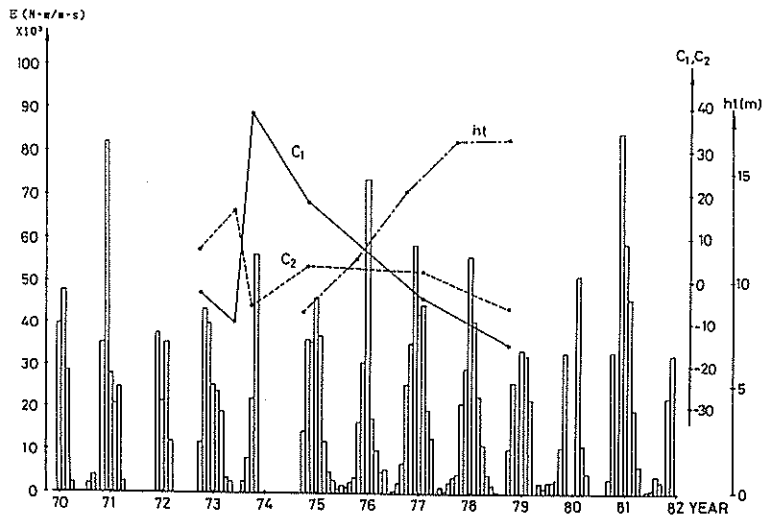


図-2.59 時間係数 c_1 , c_2 と防波堤先端水深 h_t , 波のエネルギーフラックス E の経時変化 (福井港護岸前面)

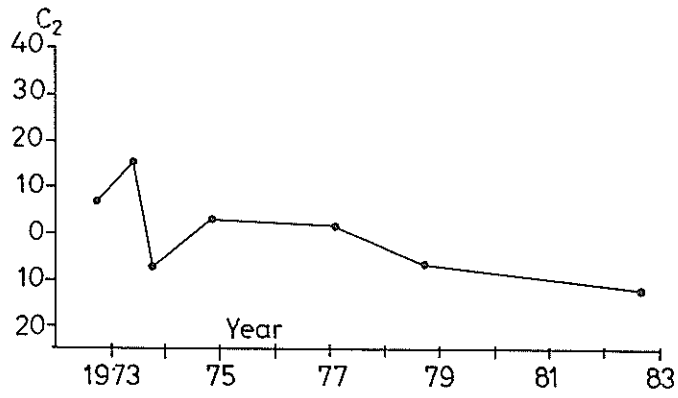
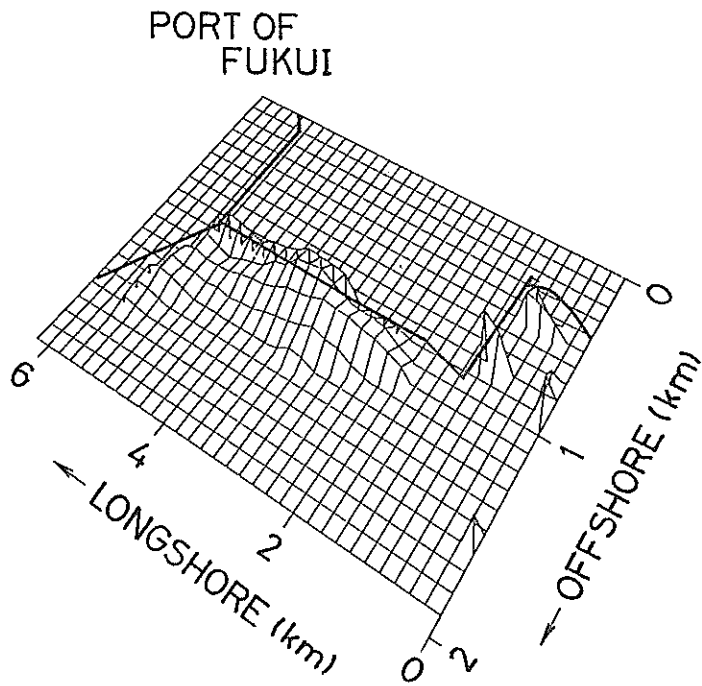


図-2.60 時間係数 c_2 の経時変化(福井港護岸前面)



(1) $e_2 > 0$ の領域

図-2.61 経験的固有関数 $e_2(x, y)$ の分布図(福井港護岸前面)

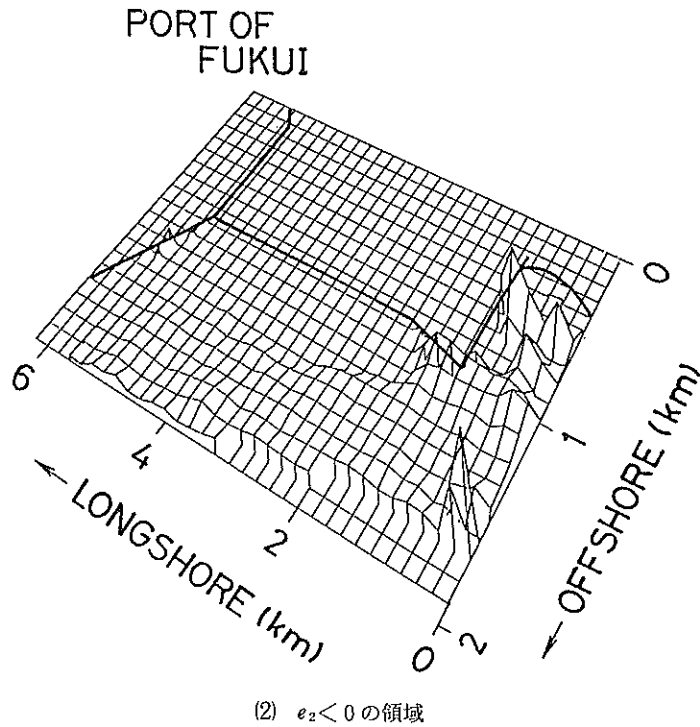


図-2.61 経験的固有関数 $e_2(x,y)$ の分布図(福井港護岸前面)

3.9 鹿島港

鹿島港周辺の海底地形及び防波堤や護岸の建設経過⁸⁾を図-2.62に示す。解析に用いたデータの測量年月を表-2.9に示す。

(1) トレンド法を用いた解析

図-2.63(1), (2)に解析結果を示す。(1)が長期的に侵食の生じた領域であり(2)が長期的に堆積の生じた領域である。防波堤の南側では、南防波堤に沿って侵食領域が存在し、付け根において侵食量が大きい。防波堤直前面の侵食領域の沖側には広く堆積領域が存在している。防波堤の北側では、護岸のやや北側の水深15m以下の領域に侵食領域が存在している。それよりも沖側の領域、及び港内側には堆積領域が存在している。

鹿島港周辺における沿岸漂砂の卓越方向は北向きである。すると、防波堤南側の沖における堆積は北向きの漂砂が南防波堤によって阻止されたために生じたと考えられ、港口付近の堆積は南防波堤によって阻止された北向きの漂砂の一部が南防波堤先端を越えて港内に入り込むことによって生じたと考えられる。南防波堤前面の侵食は防波堤に沿う流れによる洗掘であると考えられる。

表-2.9

解析に用いたデータの測量実施年月
(鹿島港)

測量年月
1970. 12
1971. 12
1972. 11
1973. 11
1974. 11
1975. 10
1976. 11
1977. 11

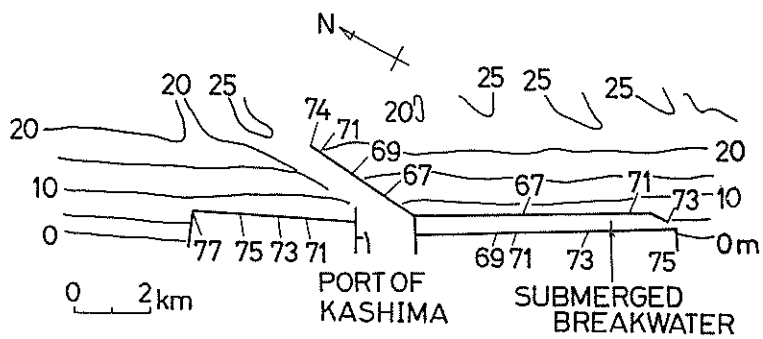
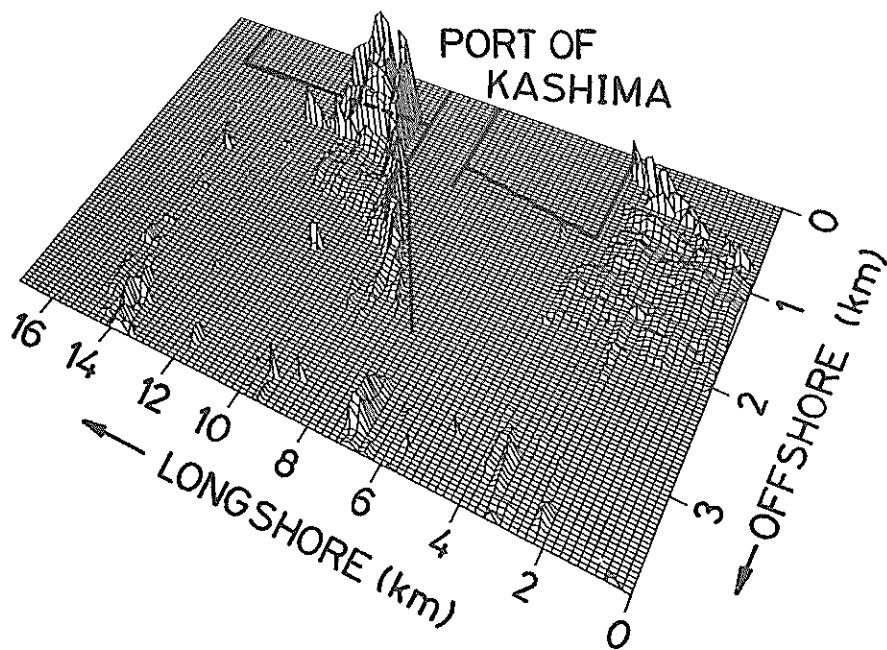
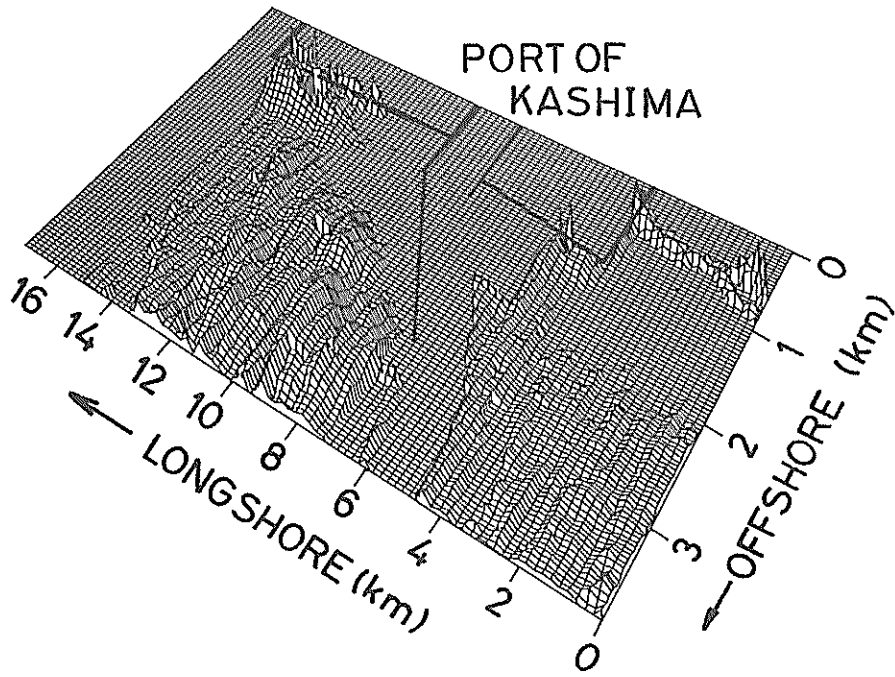


図-2.62 鹿島港周辺の海底地形



(1) $a > 0$ の領域 (侵食領域)

図-2.63 トレンド法における $a(x,y)$ の分布図(鹿島港)



(2) $a < 0$ の領域 (堆積領域)

図-2.63 トレンド法における $a(x,y)$ の分布図(鹿島港)

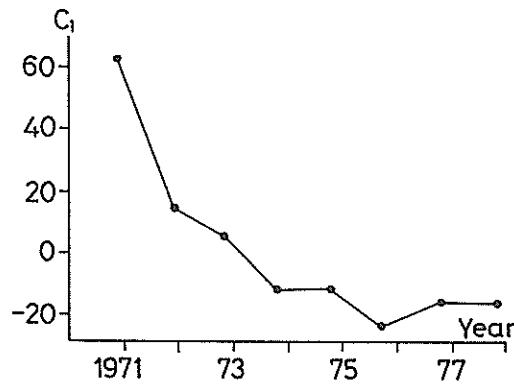


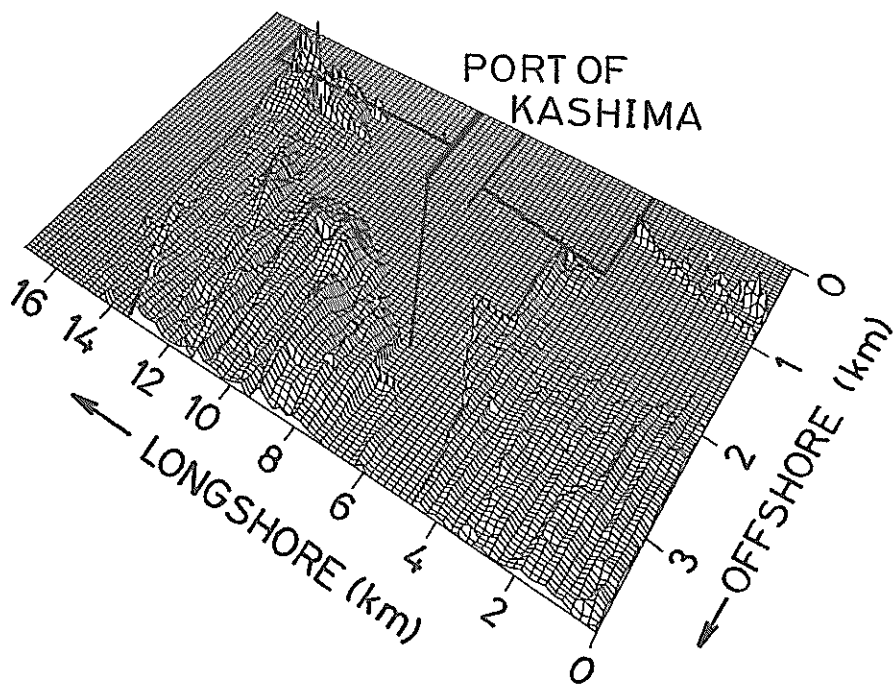
図-2.64 時間係数 c_1 の経時変化(鹿島港)

(2) 経験的固有関数法を用いた解析

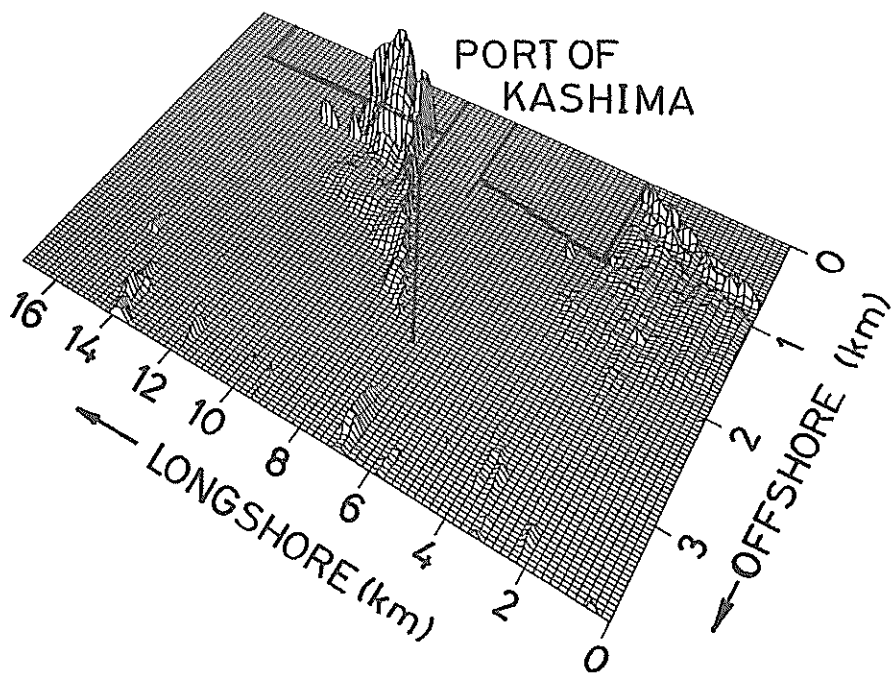
a) モード1 (寄与率; 48%)

時間係数 c_1 の経時変化を図-2.64に、固有関数 e_1 の分布を図-2.65(1), (2)に示す。時間係数 c_1 は1970年12月から1973年11月にかけて単調に減少し、1973年11月から19

77年11月にかけてほぼ一定の値となっている。したがって、 $e_1 > 0$ である防波堤南側の領域及び港口を含めた南防波堤北側の沖側の領域では1970年12月から1973年11月にかけてある速度で堆積が進み、1973年以降堆積量が小さくなっている。一方 $e_1 < 0$ である防波堤直前面の領域と



(1) $e_1 > 0$ の領域



(2) $e_2 < 0$ の領域

図-2.65 経験的固有関数 $e_i(x,y)$ の分布図 (鹿島港)

南防波堤北側の岸近くの領域では1970年12月から1973年11月にかけて侵食が進み、1973年以降侵食量が小さくなっている。

1970年12月から1973年11月にかけての海浜変形は(1)トレンド法を用いた解析の結果に等しく防波堤による沿岸漂砂阻止の影響であると考えられる。

図-2.66に、時間係数 c_1, c_2, c_3 と防波堤先端水深 h_t 、波のエネルギーフラックス E の経時変化を示す。実線が c_1 を、破線が c_2 を、細かい破線が c_3 を、一点鎖線が h_t を示しており、柱状の長方形が E を示している。但し、測得率が70%以下の月については $E=0$ とした。鹿島港の波高計は水深22mに設置された超音波式で、1979年12月から感度が良くなっている。図-2.66によると波のエネルギーフラックスは1975年11月において非常に大きい。しかし、1975年11月をさむ1975年10月から1976年11月にかけての時間係数 c_1 の変化は小さい。モード1に波のエネルギーフラックスの影響が現われなかった原因は1976年11月の海浜に1975年11月のエネルギーフラックスが大きいときの海浜変形の痕跡が残っていなかったためであると考えられる。

1973年11月以降海浜変形量が小さくなった原因として、

1972年以降防波堤がそれ程延長されおらず鹿島港周辺の海浜が平衡状態に近くなったことが考えられる。

b) モード2 (寄与率; 16%)

時間係数 c_2 の経時変化を図-2.67に、固有関数 e_2 の分布を図-2.68(1),(2)に示す。水深の小さい領域の e_2 の分布に注目すると防波堤の南側の護岸前面と北側の護岸よりさらに北の汀線付近で $e_2 < 0$ となっており、 $e_2 < 0$ の領域の沖側に $e_2 > 0$ の領域が存在している。

c) モード3 (寄与率; 13%)

時間係数 c_3 の経時変化を図-2.69に、固有関数 e_3 の分布を図-2.70(1),(2)に示す。防波堤の南側の護岸前面と北側の護岸よりさらに北の汀線付近で $e_3 < 0$ となっており、 $e_3 < 0$ の領域の沖側に $e_3 > 0$ の領域が存在している。この水深の小さい領域における e_3 の分布は e_2 の分布に非常に良く似ている。図-2.66によると時間係数 c_2, c_3 の経時変化曲線は位相が少しずれているものとともに周期関数的となっている。さらに、モード2とモード3の寄与率がほぼ等しいことから、モード3の海浜変形はモード2のそれと時間遅れはあるもののほぼ等しいものであると考えられ、モード2とモード3を重ねた海浜変形はバーやトラフの移動を表現していると思われる。

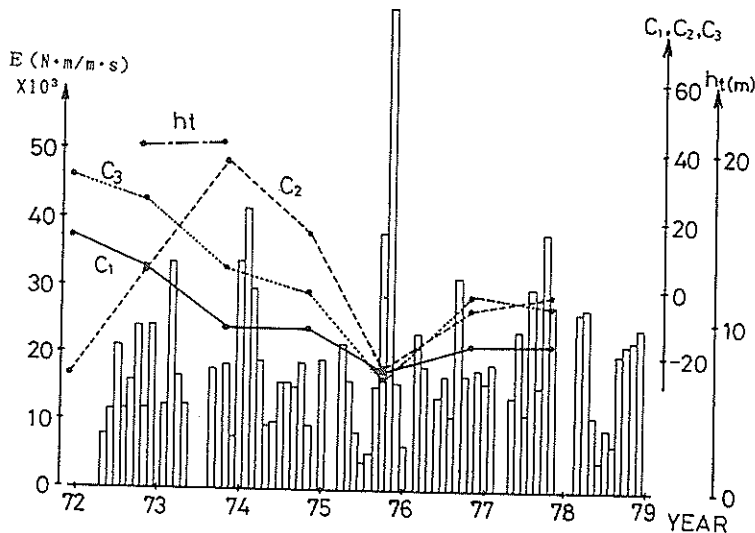


図-2.66 時間係数 c_1, c_2, c_3 、と防波堤先端水深 h_t 、波のエネルギーフラックス E の経時変化 (鹿島港)

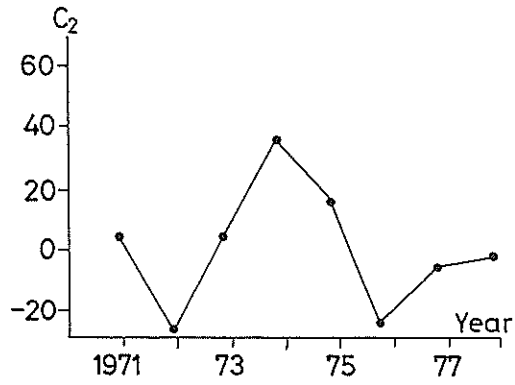
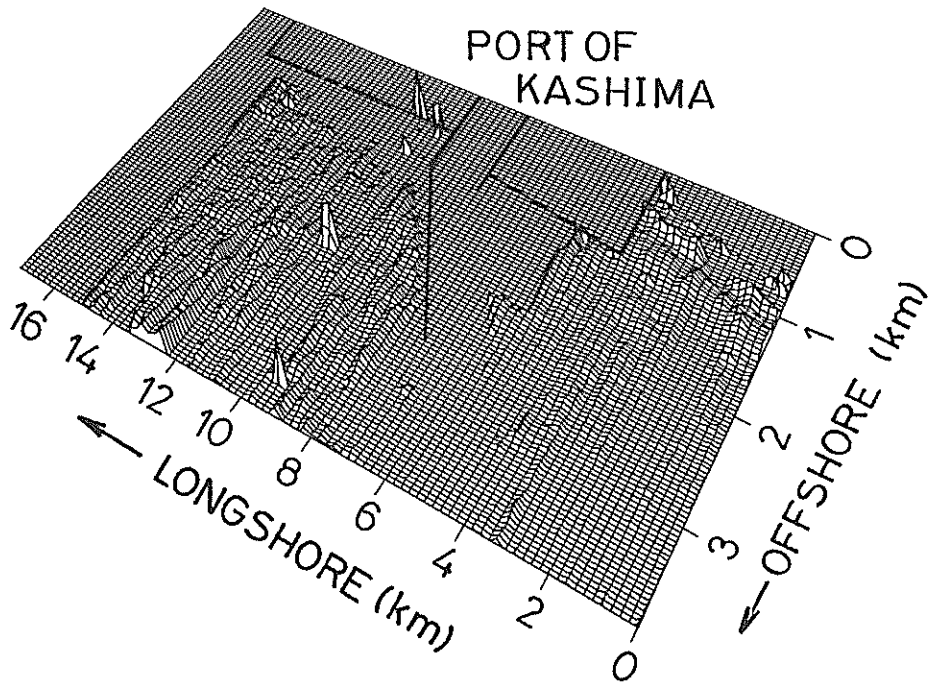
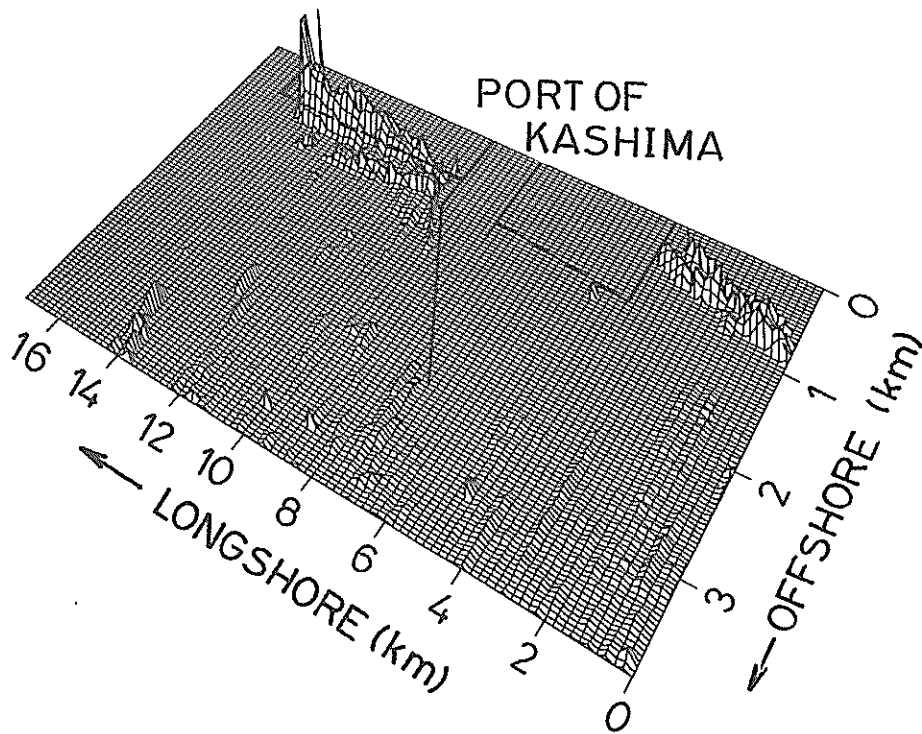


図-2.67 時間係数 c_2 の経時変化(鹿島港)



(1) $e_2 > 0$ の領域

図-2.68 経験的固有関数 $e_2(x,y)$ の分布図(鹿島港)



(2) $e_2 > 0$ の領域

図-2.68 経験的固有関数 $e_2(x,y)$ の分布図 (鹿島港)

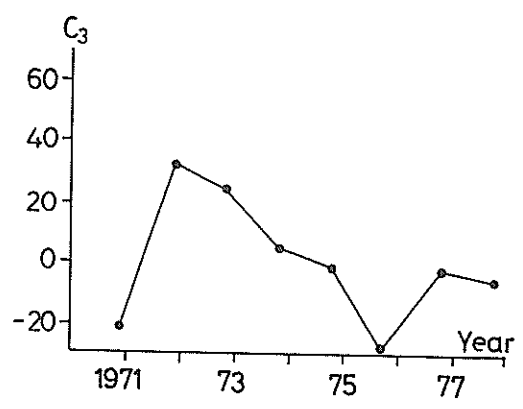
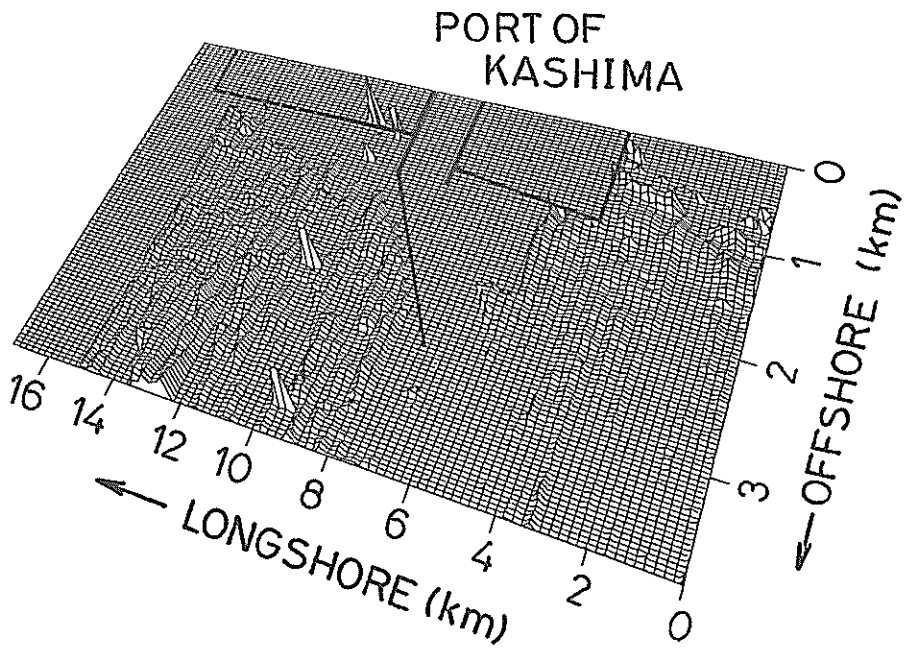
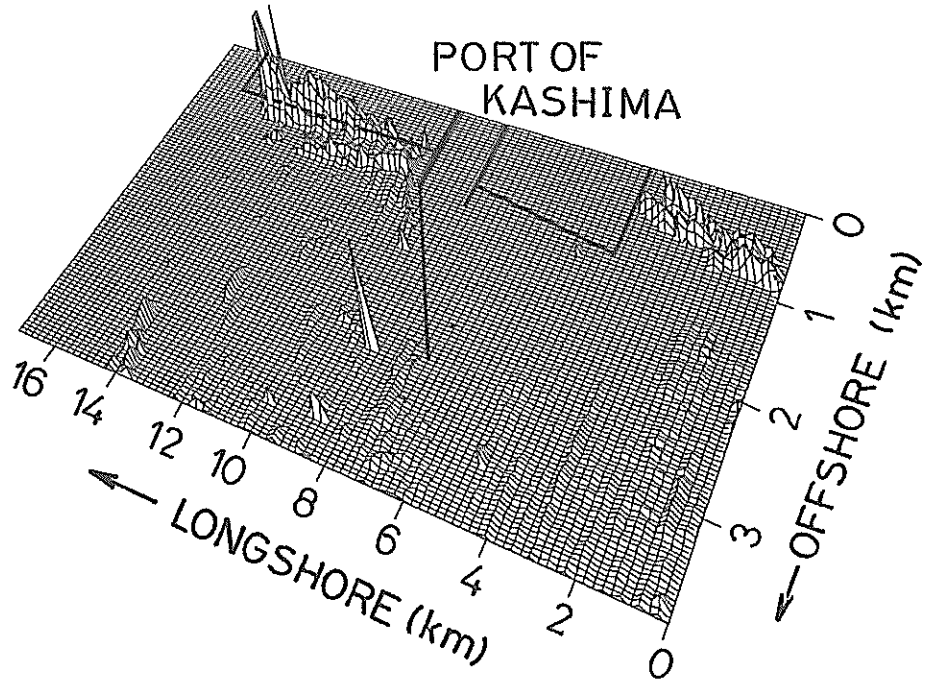


図-2.69 時間係数 c_3 の経時変化 (鹿島港)



(1) $e_3 > 0$ の領域



(2) $e_3 < 0$ の領域

図-2.70 経験的固有関数 $e_3(x,y)$ の分布図 (鹿島港)

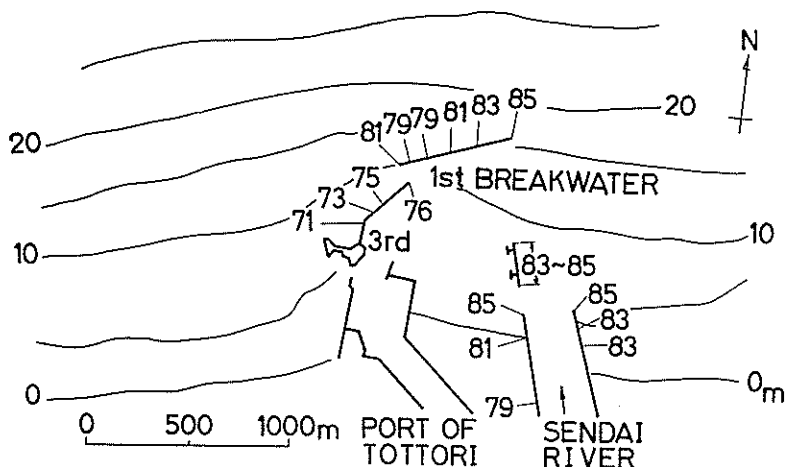


図-2.71 鳥取港周辺の海底地形

表-2.10 解析に用いたデータの測量
実施年月（鳥取港）

測量年月
1981. 12
1982. 3
1982. 10
1983. 3
1983. 10
1984. 3
1984. 10
1985. 3

3.10 鳥取港

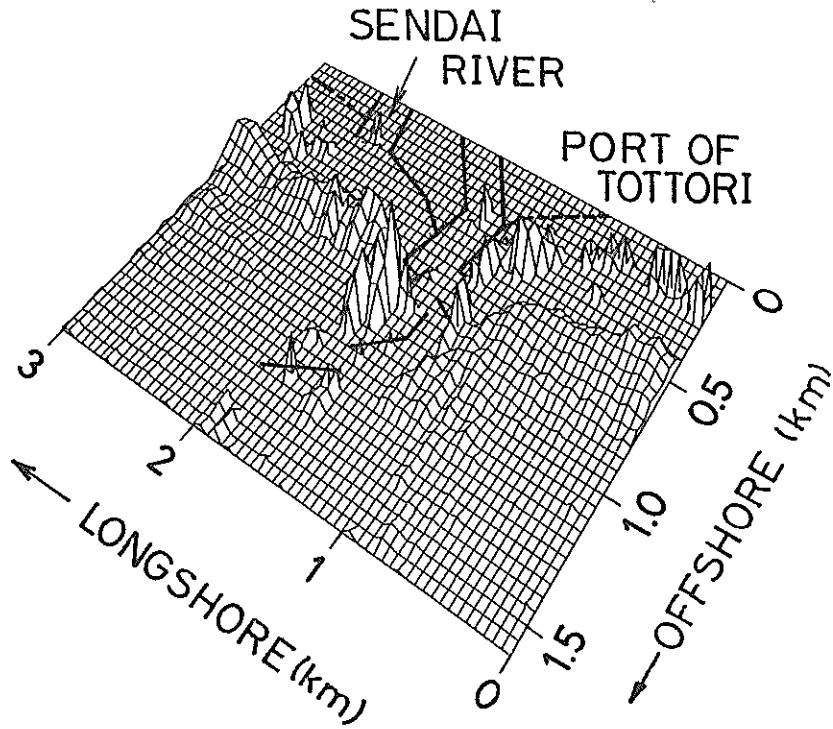
鳥取港周辺の海底地形及び防波堤の建設状況を図-2.71に示す。水深10m以深では等深線が汀線とほぼ平行であるけれども、水深5m付近ではバーやトラフが存在し複雑な地形となっている。港内に流れ込んでいた千代川の河道は、1983年3月に現在の位置に変更された。解

析に用いたデータの測量年月を表-2.10に示す。

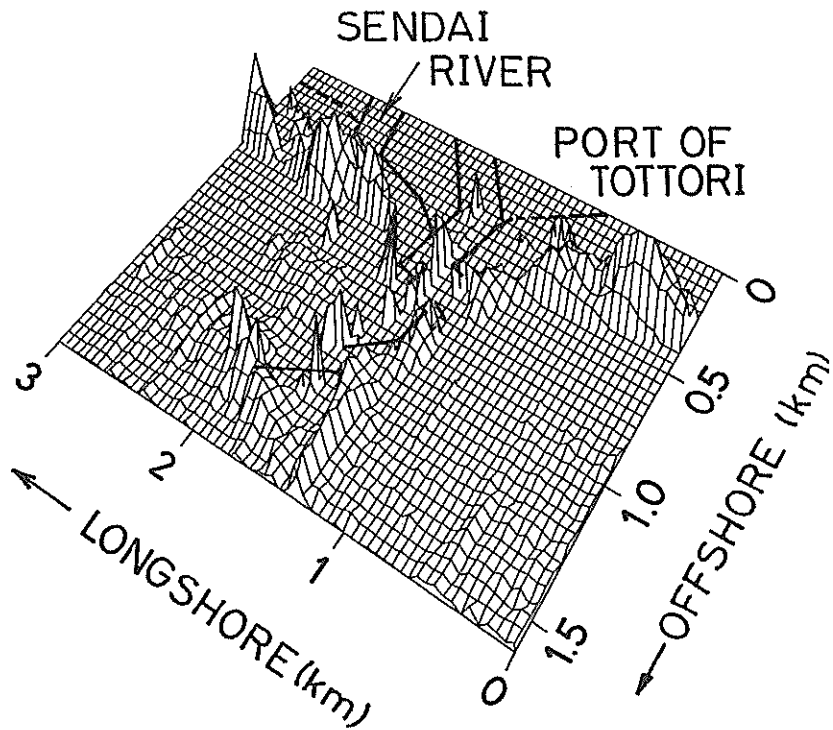
(1) トレンド法を用いた解析

図-2.72(1),(2)に解析結果を示す。(1)が長期的に侵食の生じた領域であり、(2)が長期的に堆積の生じた領域である。港の東側の海浜では、千代川河口に堆積領域が存在している。その沖側の水深5m付近には侵食領域が存在し、その沖側には堆積領域が存在している。第1防波堤の港内側は堆積領域となっており、第3防波堤の港内側は侵食領域となっている。一方、港の西側の海浜では、汀線近くの狭い領域が侵食領域となっており、その沖側の水深3~5m付近では堆積領域となっている。水深5~10m付近は侵食領域であり、その沖側の水深10m以深は堆積領域となっている。第1防波堤、第3防波堤の直前面は、侵食領域が若干存在しているものの、その沖側の大部分の領域は堆積領域となっている。

千代川河口の堆積は千代川からの流出土砂が堆積したために生じ、第3防波堤の港内側の侵食は浚渫の影響であると考えられる。防波堤前面に関して別の調査で防波堤前面の洗掘が確認されているにもかかわらず、今回の解析結果に現われなかった原因は、防波堤近傍が解析領域に含まれていなかったためであると考えられる。鳥取港周辺では潮流が西から東へ向かっているため漂砂の卓越方向も東向きと考えられる¹²⁾が、今回の解析ではその影響は現われなかった。



(1) $a > 0$ の領域 (侵食領域)



(2) $a < 0$ の領域 (堆積領域)

図-2.72 トレンド法における $a(x,y)$ の分布図(鳥取港)

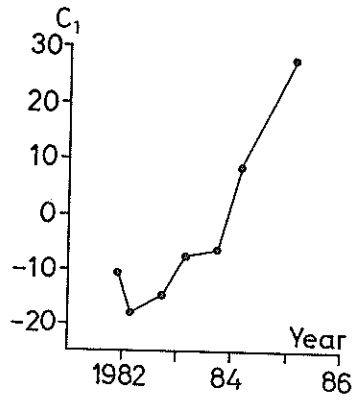
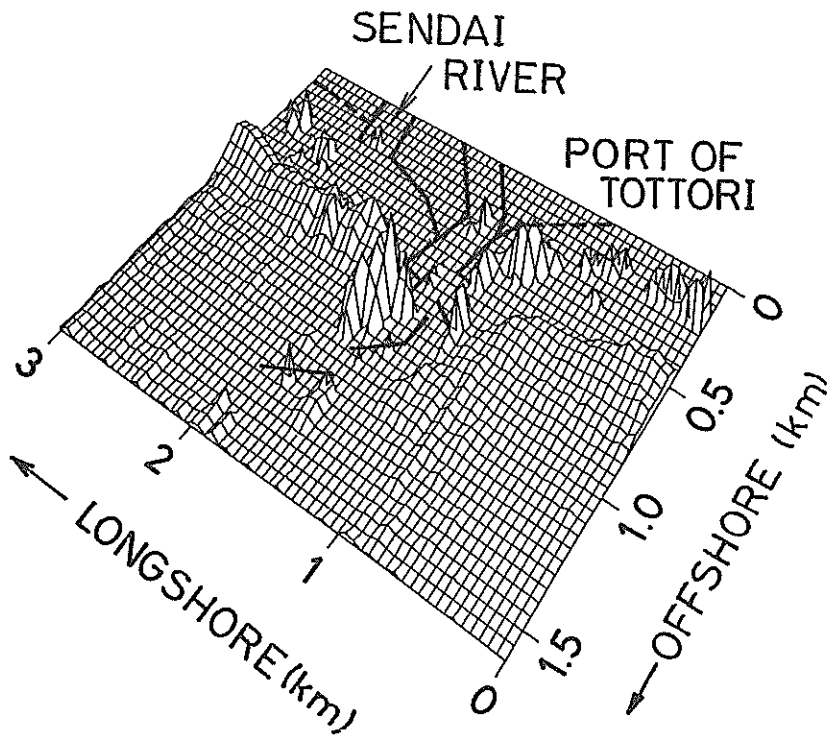
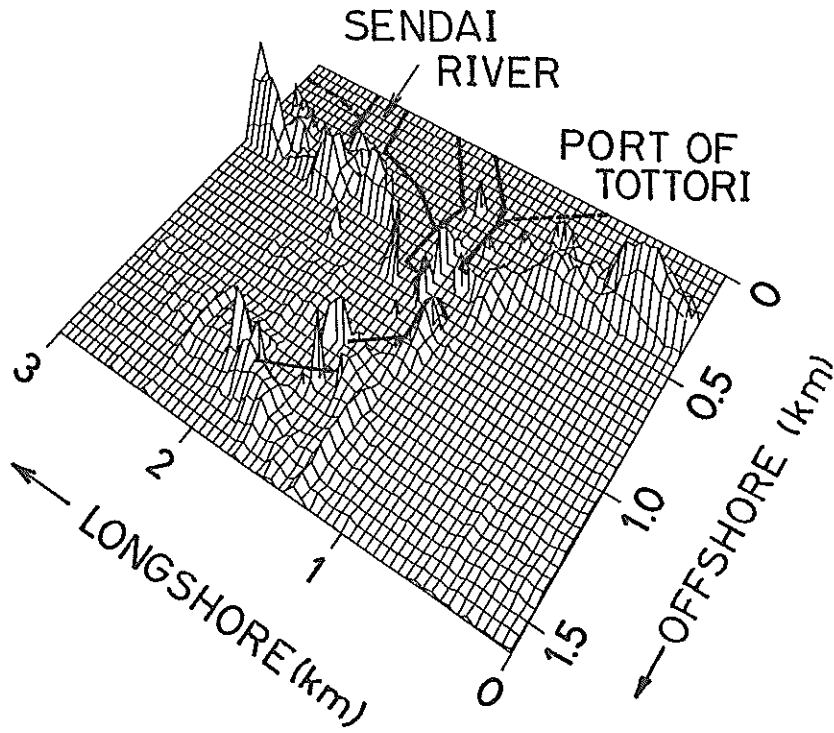


図-2.73 時間係数 c_1 の経時変化(鳥取港)



(1) $e_1 > 0$ の領域

図-2.74 経験的固有関数 $e_1(x,y)$ の分布図(鳥取港)



(2) $e_1 < 0$ の領域

図-2.74 経験的固有関数 $e_1(x,y)$ の分布図 (鳥取港)

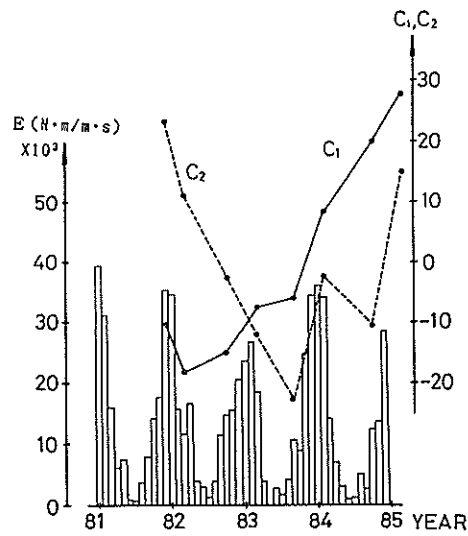


図-2.75 時間係数 c_1, c_2 と波のエネルギーフラックス E の経時変化 (鳥取港)

(2) 経験的固有関数法を用いた解析

a) モード1 (寄与率; 32%)

時間係数 c_1 の経時変化を図-2.73に、固有関数 e_1 の分布を図-2.74(1),(2)に示す。時間係数 c_1 がほぼ単調に増加していることから、 $e_1 > 0$ である港の東側の水深5m付近の領域、港の西側の汀線近くの領域及び水深5~10mの領域、第3防波堤の港内側では、侵食が生じ、 $e_1 < 0$ である千代川河口及び第1防波堤の港内側、水深10m以深の領域では堆積が生じている。

モード1で示されたこの海浜変形は(1)トレンド法を用いた解析結果と同じであり、千代川河口については河川からの流出土砂の影響が現われたものと考えられる。

図-2.75は、時間係数 c_1 、 c_2 と波のエネルギーフラックス E の経時変化を示したものである。実線が c_1 を、破線が c_2 を示しており、柱状の長方形が E を示している。鳥取港における波高計は水深30mに設置された超音波式である。時間係数 c_1 は波のエネルギーが大きい冬季において増加率が大きくなっており、モード1で表わされる地形変化は波の影響を大きく受けていると考えられる。

b) モード2 (寄与率; 22%)

時間係数 c_2 の経時変化を図-2.76に、固有関数 e_2 の分布を図-2.77(1),(2)に示す。 $e_2 < 0$ の領域が千代川河口

の東側の海浜及び鳥取港の西側の海浜の水深10m付近の領域に存在しているものの、解析領域に広く $e_2 > 0$ の領域が存在し、特に千代川河口、港内において e_2 が大きい。したがって、千代川河口など解析領域の広い範囲で、 c_2 の増加する1983年10月から1984年3月にかけて及び1984年10月から1985年3月にかけて堆積が生じ、それ以外の c_2 の減少する期間で侵食が生じている。

図-2.78に、時間係数 c_2 と平均有義波高 $H_{1/3}$ 、千代川平均流量 Q の経時変化を示す。縦軸の平均有義波高 $H_{1/3}$ と千代川平均流量 Q は、 $(n-1)$ 回目の深浅測量実施時から n 回目の深浅測量実施時までの月平均有義波高と千代川月平均流量の平均を示しており、横軸は n 回目の深浅測量年月を示している。千代川の河道が変更された1983年3月以降のデータに注目すると、時間係数 c_2 が増加しているときは波高が小さく、千代川の流量が大きい。一方、時間係数 c_2 が減少しているときは波高が大きく、千代川の流量が小さい。したがって波高が小さく流量の大きいときは、千代川からの流出土砂が河口近くに堆積したために河口周辺の領域で堆積が生じ、波高が大きく、流量が小さいときは、河口周辺に堆積していた土砂が運び去られることによって河口周辺で侵食が生じたと考えられる。

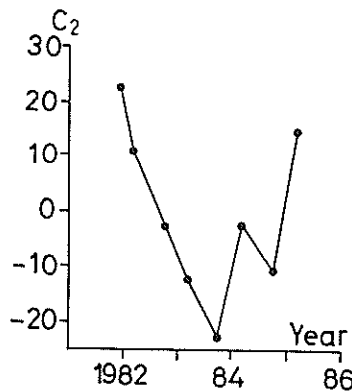
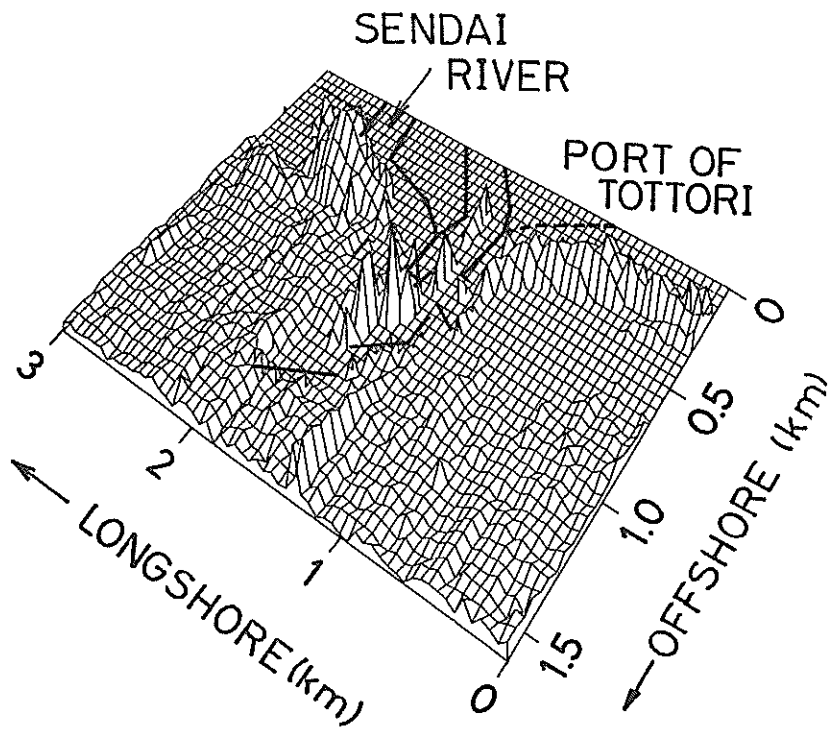
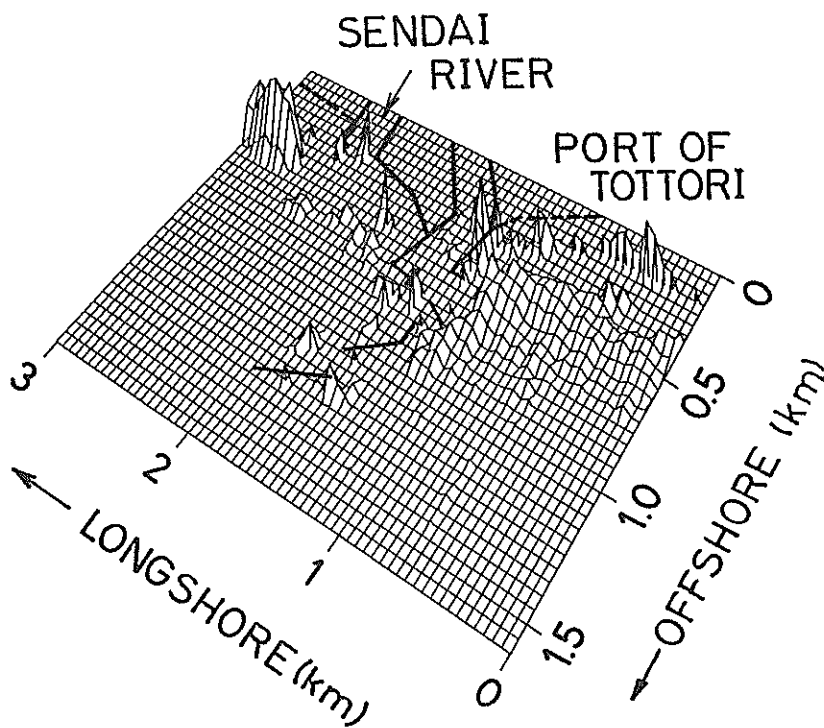


図-2.76 時間係数 c_2 の経時変化(鳥取港)



(1) $e_2 > 0$ の領域



(2) $e_2 < 0$ の領域

図-2.77 経験的固有関数 $e_2(x,y)$ の分布図 (鳥取港)

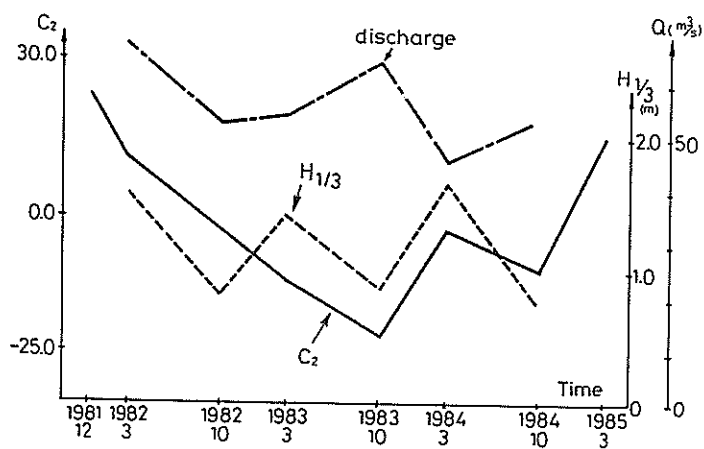


図-2.78 時間係数 c_2 と $H_{1/3}$, 千代川流量 Q の経時変化

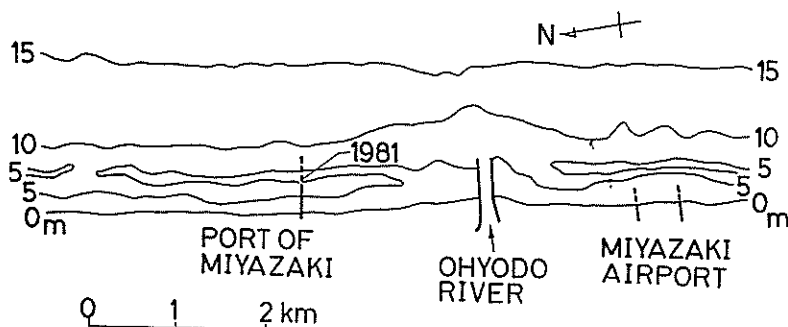


図-2.79 宮崎港周辺の海底地形

表-2.11 解析に用いたデータの測量実施年月(宮崎港)

測量年月	
1974.	6
1974.	9
1975.	2
1977.	8
1977.	12
1978.	10
1979.	2
1979.	9
1980.	1
1980.	10
1981.	3
1981.	10

3.11 宮崎港

宮崎港周辺の海底地形を図-2.79に示す。解析に用いたデータの測量年月を表-2.11に示す。解析に用いたデータは1981年10月までのデータであるために、宮崎港は南防波堤の一部が建設されていたにすぎない。

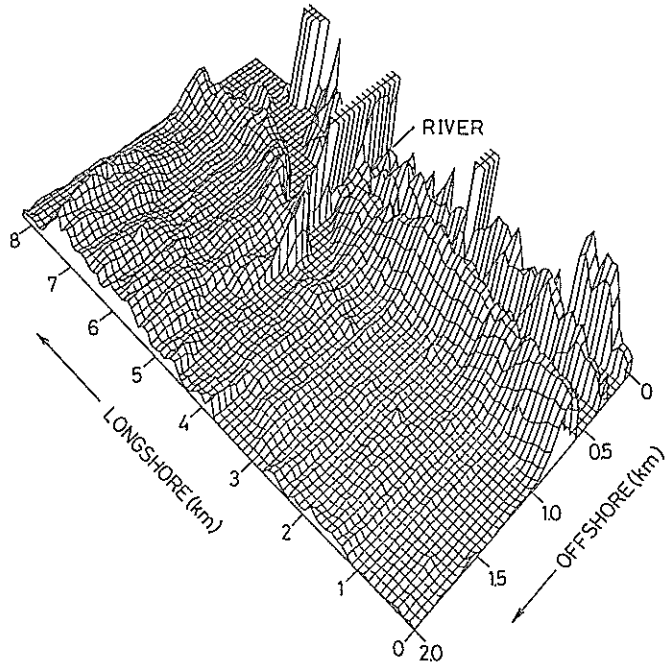
(1) トレンド法を用いた解析

図-2.80(1),(2)に解析結果を示す。(1)が長期的に侵食が生じた領域であり、(2)が長期的に堆積の生じた領域である。水深2~3m付近のバーの存在する領域で堆積が生じている。しかし、その他のほとんどの領域では侵食が生じており、なかでも侵食量の大きい領域は堆積領域のすぐ沖側の領域と河口導流堤南側の沖側の領域である。

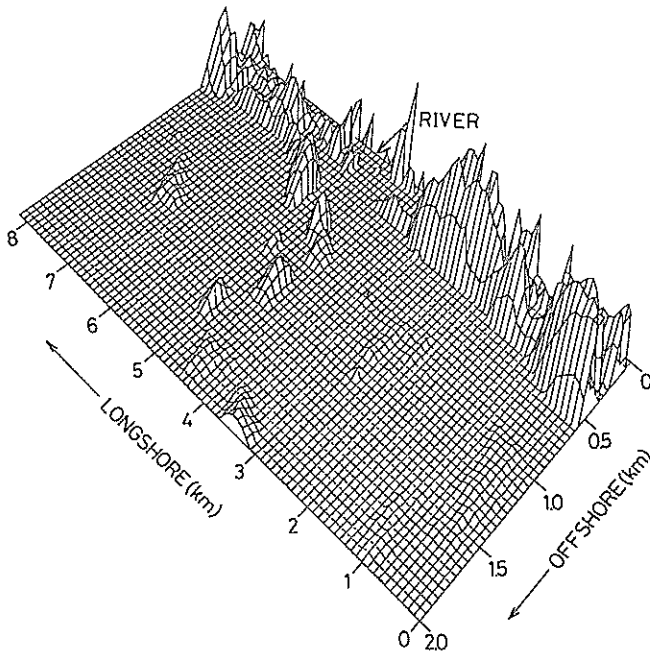
(2) 経験的固有関数法を用いた解析

a) モード1(寄与率; 46%)

時間係数 c_1 の経時変化を図-2.81に、固有関数 e_1 の分布を図-2.82(1),(2)に示す。時間係数 c_1 が直線的に減



(1) $a > 0$ の領域 (侵食領域)



(2) $a < 0$ の領域 (堆積領域)

図-2.80 トレンド法における $a(x,y)$ の分布図 (宮崎港)

少しているため、 $e_1 > 0$ である水深2～3m付近の領域では堆積が生じており、その他のほとんどの領域、すなわち $e_1 < 0$ の領域では侵食が生じている。モード1で示される海浜変形は、(1)トレンド法を用いた解析と同様である。

図-2.83は、時間係数 c_1 、 c_2 と波のエネルギーフラックス E の経時変化を示したものである。実線が c_1 を、破線が c_2 を示しており、柱状の長方形が E を示している。ただし、宮崎港においては波のデータが無いため、油津のデータを用いることとした。油津と宮崎は40kmしか離れておらず、波の特性は両地点においてはほぼ等しいと考えられる。水位データの測得率が70%以下の月については $E = 0$ とした。図-2.83によると、時間係数 c_1 と波のエネルギーフラックス E の相関は小さい。

b) モード2 (寄与率; 17%)

時間係数 c_2 の経時変化を図-2.84に、固有関数 e_2 の分布を図-2.85(1),(2)に示す。時間係数 c_2 は、1980年頃を境として減少から増加の傾向となっている。したがって $e_2 > 0$ の領域、すなわち1980年以前には堆積が生じ、1980年以降は侵食が生じている領域は、河口導流堤の

すぐ南側の領域を含む水深2～5mの領域と大淀川前面を除いた水深約10m以深の領域である。 $e_2 < 0$ の領域、すなわち1980年以前は侵食が生じ、1980年以降は堆積が生じている領域は、水深約5m付近の領域と河口導流堤すぐ北側の領域及び大淀川前面の水深約10m以深の領域と大淀川導流堤南側の $e_2 > 0$ の領域より南側の領域である。

これらの海浜変形の原因を考えるために、時間係数 c_2 の経時変化を示すグラフに、大淀川の流量を加える。1979年から1980年にかけての流量の増大にやや遅れて時間係数 c_2 が1980年から1981年にかけて増大している。モード2においては、1980年から1981年にかけて大淀川導流堤すぐ南側の領域で侵食、大淀川導流堤すぐ北側の領域及び大淀川前面の水深約10m以深の領域で堆積が生じており、流量増大の影響と考えられる。それ以外の時期では逆に大淀川導流堤すぐ南側の領域で堆積、大淀川導流堤すぐ北側の領域及び大淀川前面の水深約10m以深の領域で侵食が生じており、流量が少なくなったことの影響と考えられる。モード2では、大淀川の流量の影響を受けた海浜変形が表わされていると考えられる。

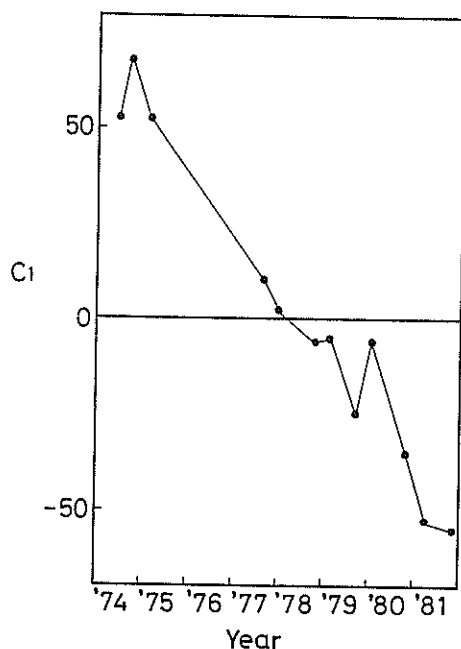
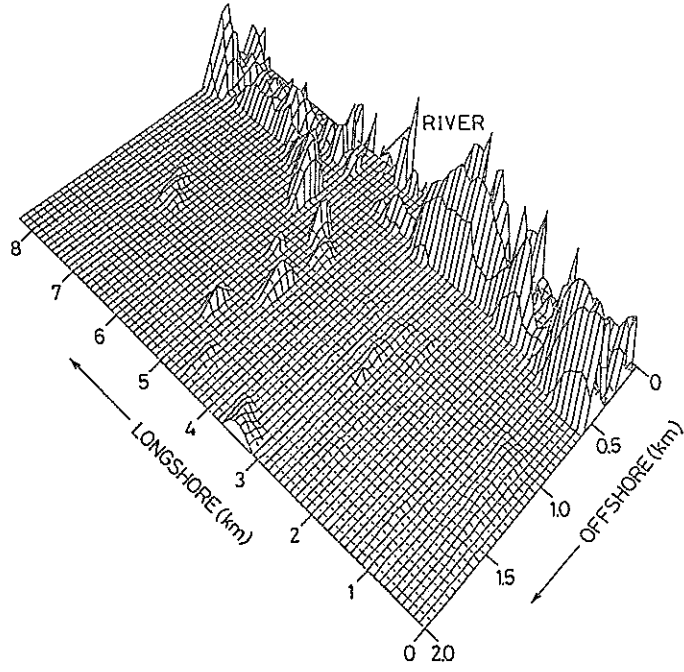
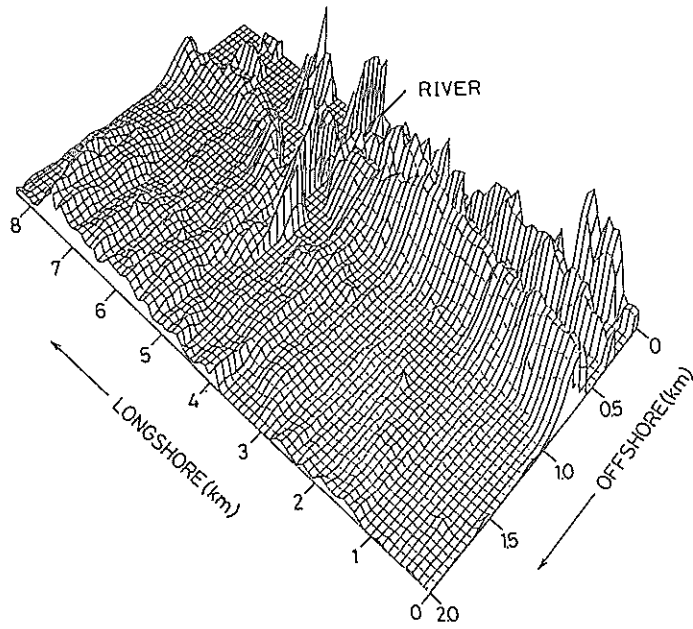


図-2.81 時間係数 c_1 の経時変化 (宮崎港)



(1) $e_1 > 0$ の領域



(2) $e_1 < 0$ の領域

図-2.82 経験的固有関数 $e_1(x,y)$ の分布図 (宮崎港)

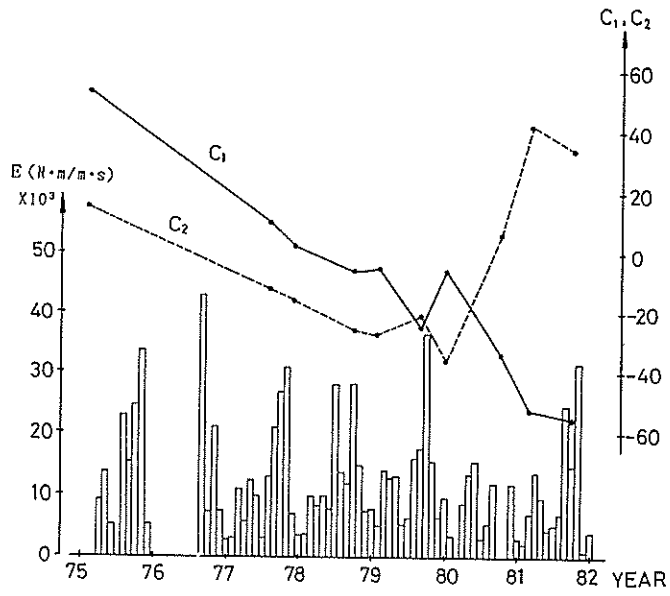


図-2.83 時間係数 c_1 , c_2 と波のエネルギーフラックス E の経時変化(宮崎港)

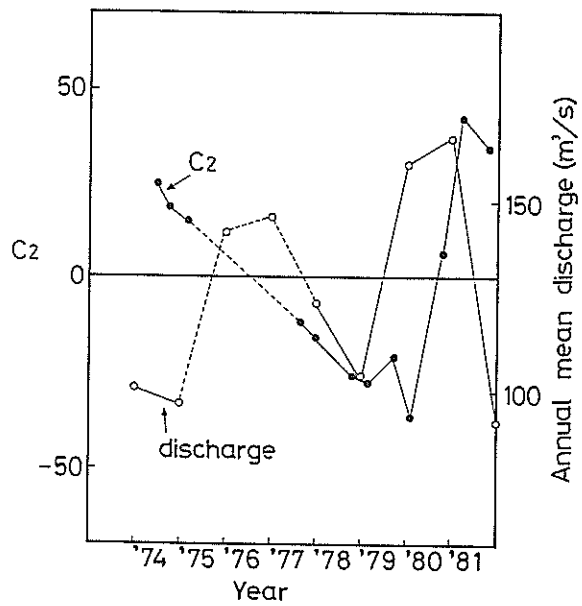
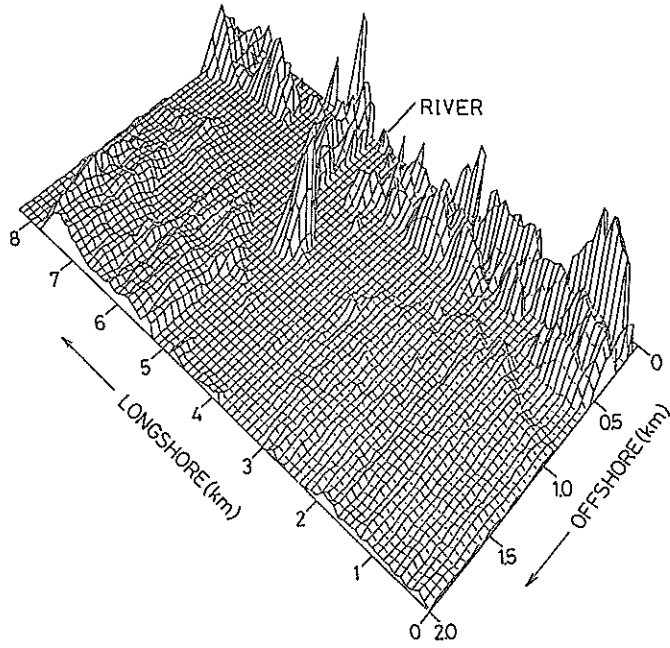
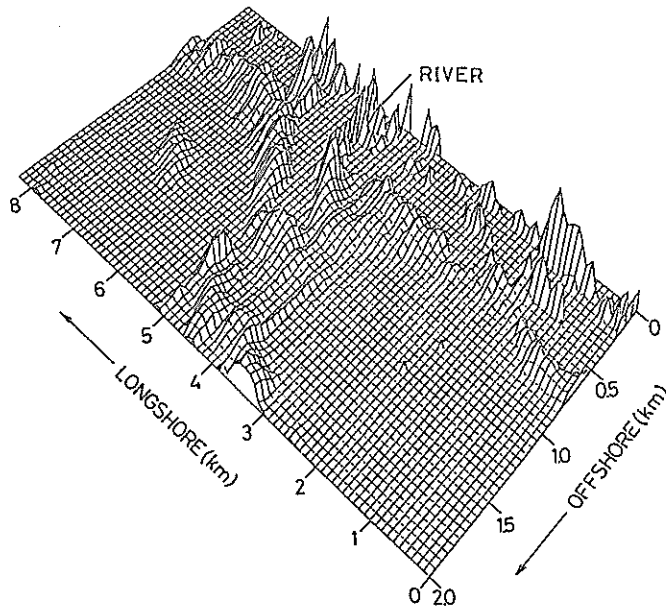


図-2.84 時間係数 c_2 と大淀川流量の経時変化(宮崎港)



(1) $e_2 > 0$ の領域



(2) $e_2 < 0$ の領域

図-2.85 経験的固有関数 $e_2(x,y)$ の分布図(宮崎港)

3.12 大井川港¹³⁾

大井川港周辺の海底地形と防波堤などの建設状況を図-2.86に示す。図中の数字は、構造物の建設された年度を表わしたものである。解析は1965年から1974年の期間と、1974年から1982年の期間に分けて行った。ただし、今までと逆に水深値を負として扱っているので注意されたい。

(1) 経験的固有関数法を用いた解析

a) モード1 (1965年～1974年, 寄与率; 67%)

1965年～1974年のデータを用いて解析を行ったときの時間係数 c_1 の経時変化を図-2.87に、固有関数 e_1 の分布を図-2.88に示す。 c_1 が解析期間中直線的に減少し、 e_1 が解析領域ほぼ全域にわたって負となっていることから、モード1では解析領域全域において侵食が生じている。

大井川では、建設されたダムに図-2.89に示される量の砂が堆積している。このことは逆に河川からの流出土砂量の減少を示しており、北側海浜及び南側海浜の侵食の原因になっていると考えられる。さらに、北側海浜では、北向きの沿岸漂砂が大井川港によって阻止された影響及び南側海浜で土砂を採取したため大井川港南防波堤の先端をう回して北側海浜へ向かう漂砂量が減少したことの影響が現われたと考えられる。

b) モード1 (1974年～1982年, 寄与率; 51%)

1974年～1982年のデータを用いて解析を行ったときの時間係数 c_1 の経時変化を図-2.90に、固有関数 e_1 の分布

を図-2.91に示す。 c_1 が解析期間中はほぼ直線的に減少していることから、 $e_1 > 0$ の領域、すなわち大井川港の北側の海浜及び南側の海浜では解析期間中堆積が生じており、 $e_1 < 0$ の領域、すなわち大井川港の北側の海浜に存在する $e_1 > 0$ の領域よりもさらに北側の海浜では解析期間中侵食が生じている。

大井川港の南側の海浜の堆積は北向きの漂砂が大井川港南防波堤によって阻止された影響であり、北側の海浜の堆積は、北向きの漂砂のうち南防波堤先端をう回した漂砂の影響であると考えられる。但し、北側の海浜では航路維持浚渫で発生した土砂を投棄していることから、この影響も北側の海浜変形に含まれている。

c) モード2 (1974年～1982年, 寄与率; 17%)

1974年～1982年のデータを用いて解析を行ったときの時間係数 c_2 の経時変化を図-2.90に、固有関数 e_2 の分布を図-2.92に示す。 c_2 は、1974年～1978年の期間に減少し、その後は一定となっている。一方、解析領域ほぼ全域にわたって $e_2 < 0$ となっているため、モード2は、1974年～1978年に解析領域の広い範囲で侵食が生じ、その後海浜変形量が小さくなったことを示している。1974年～1978年にかけての海浜変形は、a)の地形変化と連続してとらえられるものでありその原因もa)で述べたものに等しいと考えられる。

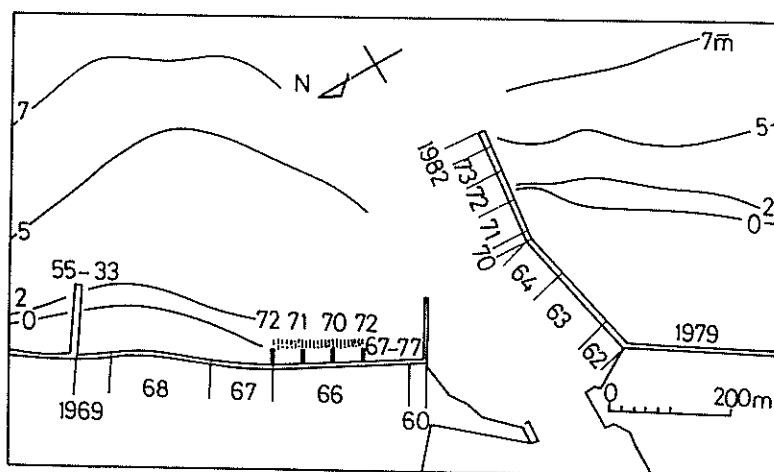


図-2.86 大井川港周辺の海底地形

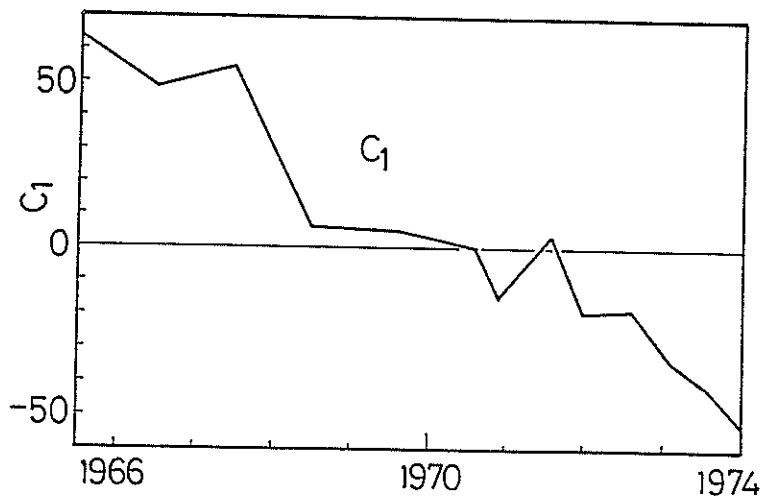


図-2.87 時間係数 c_1 の経時変化(1965~1974年, 大井川港)

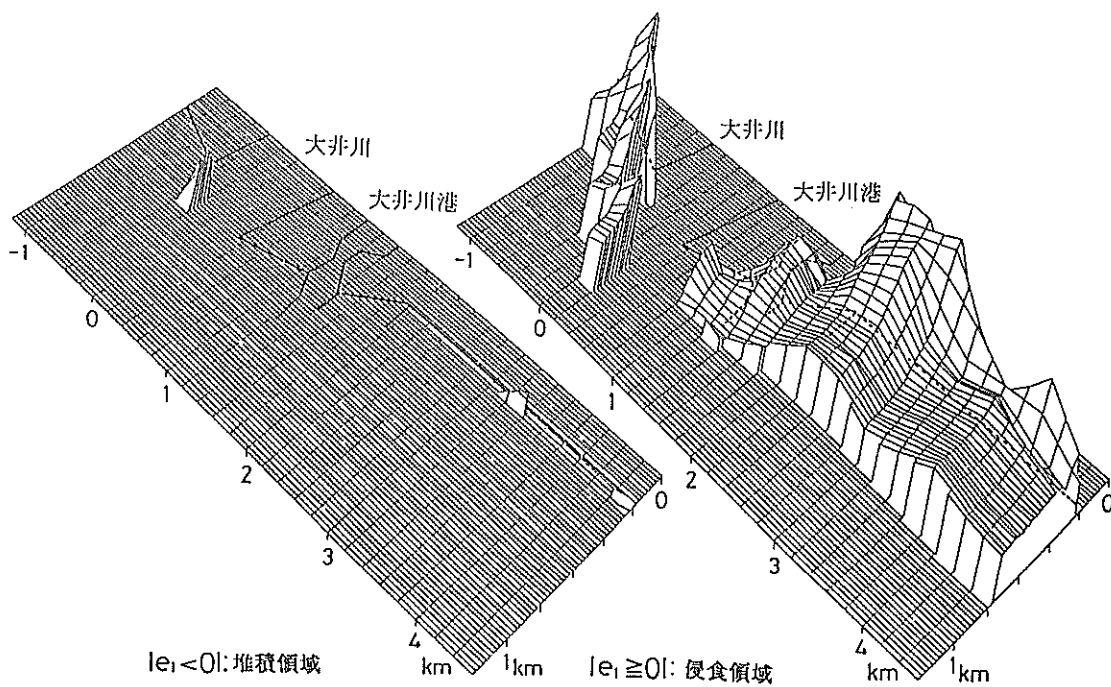


図-2.88 経験的固有関数 $e_1(x,y)$ の分布図(1965~1974年, 大井川港)

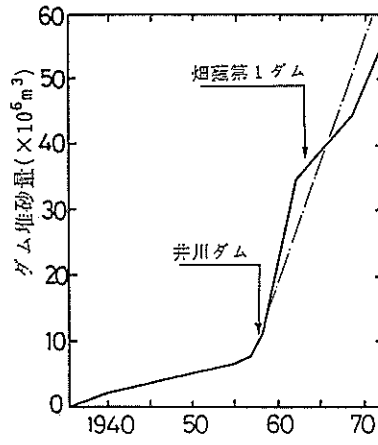


図-2.89 大井川水系のダム堆砂量の経年変化

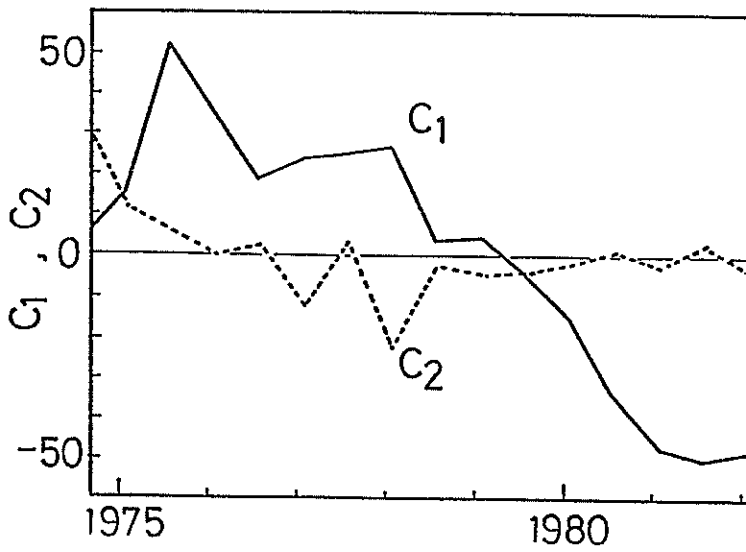


図-2.90 時間係数 c_1 , c_2 の経時変化 (1974~1982年, 大井川港)

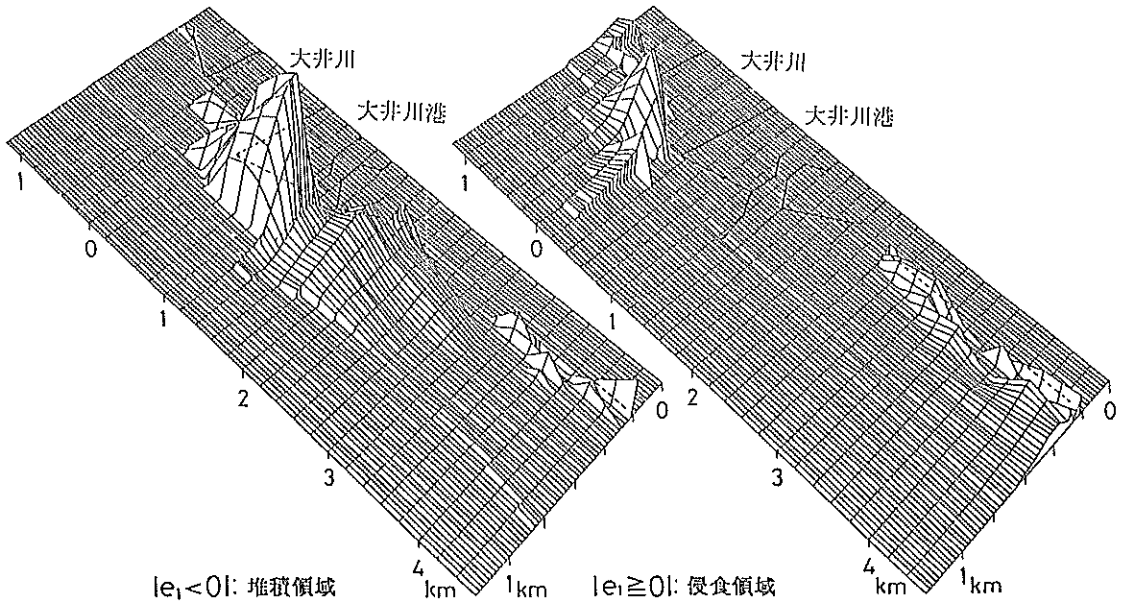


図-2.91 経験的固有関数 $e_1(x,y)$ の分布図(1974~1982年, 大井川港)

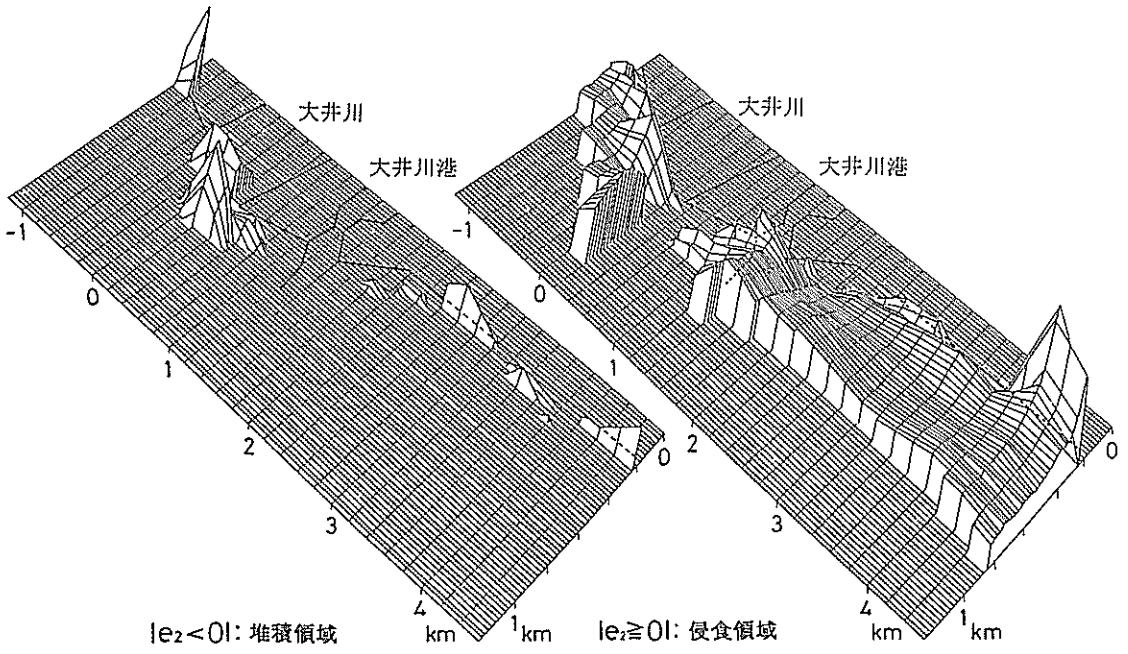


図-2.92 経験的固有関数 $e_2(x,y)$ の分布図(1974~1982年, 大井川港)

4. 防波堤前面における長期的な海浜変形の一般的特性

トレンド法を用いた解析結果を基に、防波堤前面における長期的な海浜変形の一般的特性をまとめると以下のようになる。

a) 防波堤直前面では、細い帯状の侵食領域が存在する。この侵食は、防波堤に沿う流れによる洗掘と考えられる。(秋田、酒田、酒田北港西護岸、新潟東、金沢、福井、鹿島)

b) 防波堤沖合の地形変化はその原因を基にして次の三つに分類することができる。

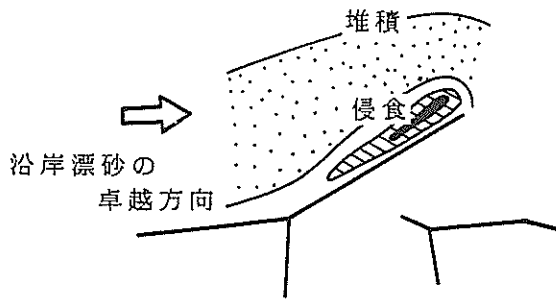
- ① 防波堤の港外側が沿岸漂砂の卓越方向に対して上手側にあるために沿岸漂砂が防波堤沖合に堆積し、防波堤沖合が堆積領域となる場合 (図-2.93(1))
(秋田、金沢、福井、福井港護岸、鹿島、大井川)
- ②防波堤の港外側が沿岸漂砂の卓越方向に対して下手側にあるために防波堤沖合において上手からの底質の供給が少なくなり、防波堤沖合が侵食領域となる場合 (図-2.93(2)) (酒田、酒田北港西護岸)
- ③防波堤沖合の海浜変形が沿岸漂砂以外の原因による場合 (新潟東、澁、鳥取、宮崎、大井川)

5. おわりに

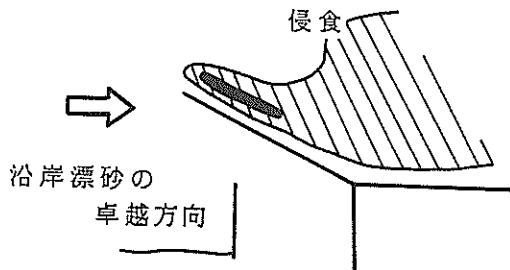
デジタル化してある深浅図データを電子計算機によって統計解析した。トレンド法による解析結果を用いれば、その港で今後起こるであろう海浜変形をおおよそ予測することができ、解析を行ってない港についても沿岸漂砂の方向が明らかであれば防波堤前面の海浜変形をある程度予測することができる。また、短期的な海浜変形の原因が明らかになっている場合には、その予測も可能であると考えられる。しかし、短期的な海浜変形の原因究明はなかなか難しく、そのためには外力の履歴を考慮した解析を行う必要があると考えられる。

なお、本研究の遂行に際して田中則男前海洋水理部長 (現在、日本テトラポット㈱) から貴重な御示唆をいただいた。解析を行った12例のうち7例の計算および図化出力は当時漂砂研究室寺崎賢次技官 (現在、秋田港工事事務所) が行った。ここに記して感謝の意を表します。

(1987年9月30日受付)



(1) 防波堤港外側が沿岸漂砂の卓越方向の上手側にある場合



(2) 防波堤港外側が沿岸漂砂の卓越方向の下手側にある場合

図-2.93 防波堤前面の海浜変形の一般的特性

参 考 文 献

第 I 編

- 1) 田中則男：日本沿岸の漂砂特性と沿岸構造物築造に伴う地形変化に関する研究，港湾技研資料，No.453，1983年，148p.
- 2) Whalin, R. W. and C. E. Ckatham, Jr. : V. Coastal Erosion, in Coastal Hydraulic Models, U.S.Army, Corps of Eng., CERC, Special Report No. 5, 1979, 284~313.
- 3) 例えば，田中則男・灘岡和夫：汀線変化予測モデルの開発と現地への適用，港湾技研資料，No.436,1982年，40p.
- 4) 例えば，渡辺 晃・丸山康樹・清水隆夫・榊山 勉：構造物設置に伴う三次元海浜変形の数値予測モデル，第31回海岸工学講演会論文集，1984年，pp.406~410.
- 5) 新潟調査設計事務所：深淺測量の誤差に関する調査について，第一港湾建設局，1966年，46p.
- 6) 加藤一正・入江 功・田中則男：大井川河口周辺海岸の海浜変形の巨視的把握，第32回海岸工学講演会論文集，1985年，pp. 390~394.
- 7) 佐藤昭二・田中則男・佐々木克博：鹿島港建設に伴う海底地形変化について一事例研究一，港湾技術研究所報告，第13巻，第4号，1974年，pp. 3~78.
- 8) 田中則男・加藤一正・柳島慎一：阿賀野川河口近傍海岸の海底地形変化について（1962年~1973年），港湾技術研究所報告，第15巻，第2号，1976年，pp.89~165.
- 9) 加藤一正・田中則男・木村久雄・赤石正広：大河川河口部周辺の移動床模型実験一吉野川河口周辺地形変化について一，港湾技術研究所報告，第22巻，第2号，1983，pp. 3~87.
- 10) 加藤一正・吉松 晃：三次元の経験的固有関数による深淺図解析法，港湾技術研究所報告，第23巻，第2号，1984年，pp. 27~47.
- 11) 赤池弘次・中川東一郎：ダイナミックシステムの統計的解析と制御，サイエンスライブラリ，情報電算機=9，サイエンス社，1972年，189p.
- 12) 田中則男・加藤一正・柳島慎一：深淺図ライブラリーの整備について一深淺図の集中保存，管理，解析システム一，港湾技研資料，No. 203，1975年，33p.

第 II 編

- 1) 田中則男・沢本正樹：砂浜港湾周辺における海浜変形一航空写真による現状把握と海浜変形形態類型化の試み一，港湾技研資料，No. 180，1974年，121p.
- 2) 田中則男・小笹博昭・小笠原 昭：海浜変形調査資料（第1報）一航空写真による汀線変化の解析（東日本編）一，港湾技研資料，No. 163，1973年，95p.
- 3) 田中則男・小笹博昭：海浜変形調査資料（第2報）一航空写真による汀線変化の解析一，港湾技研資料，No.192，1974年，106p.
- 4) 田中則男・小笹博昭・蜂須賀和吉・三好英一：海浜変形調査資料（第3報）一航空写真による汀線変化の解析一，港湾技研資料，No. 266，1977年，159p.
- 5) 加藤一正・吉松 晃：三次元の経験的固有関数による深淺図解析法，港湾技術研究所報告，第23巻，第2号，1984年，pp. 27~47.
- 6) 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，第20回管内工事報告会，1982年，105p.
- 7) 東京天文台編集：理科年表，丸善，1981年.
- 8) 田中則男：日本沿岸の漂砂特性と沿岸構造物築造に伴う地形変化に関する研究，港湾技研資料，No.453，1983年，148p.
- 9) 第一港湾建設局，七尾港工事事務所：金沢港（自然条件）調査資料，1970年，pp. 60~67.
- 10) 入江 功・栗山善昭：底質の移流沈降過程を入れた航路・港内埋没の予測，港湾技術研究所報告，第24巻，第2号，1985年，pp. 157~204.
- 11) 第一港湾建設局，敦賀港工事事務所：福井港建設十年史，1972年，pp. 38~46.
- 12) 池田正夫：鳥取港の漂砂特性について，第三港湾建設局 昭和57年度 第13回管内直轄港湾工事報告会資料，1982年，pp. 327~335.
- 13) 加藤一正・入江 功・田中則男：大井川河口周辺海岸の海浜変形の巨視的把握，第33回海岸工学講演会論文集，1985年，pp. 390~394.

港湾技研資料 No. 603

1987・12

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 新宿総合印刷センター協業組合

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan.