

土研資料1391号

土木研究所資料

西遠流域下水道事業海洋調査報告書

昭和53年3月

建設省土木研究所

鹿島試験所

ま え が き

西遠流域下水道事業は，静岡県の浜松市を中心に，天竜川右岸流域に，流域下水道および終末処理場を建設するものであり，計画対象区域は13,600ha，計画人口は約50万人，また関係する市町村は浜松市，浜北市，天竜市，舞阪町，雄踏町，可美村にわたる。終末処理場を天竜川河口右岸に計画しており，その処理水を海岸に放流する予定である。しかし河口部は河道および海浜とも地形的に変動のはげしいところであり，処理場および放流施設の安全性と構造物による周辺海岸への影響を十分検討しておく必要がある。

静岡県においては，西遠流域下水道事業に関する海洋調査として処理水の放流施設の影響および放流水の海域水質に与える影響について検討を行なってきた。これに関連して，放流施設の隣接海岸への影響を検討するための解析手法とその成果の評価について，土木研究所に調査を委託した。

本報告書は土木研究所で検討した成果を取りまとめたものであり，資料解析・現地調査および模型実験については，静岡県浜松土木事務所で検討が行なわれており，その結果を利用し検討を行なった。

西遠流域下水道事業海洋調査報告書

海岸研究室長 橋 本 宏

鹿島試験所長 馬 場 洋 二

目 次

ま え が き	1
1. 事 業 計 画 の 概 要	3
2. 放流施設建設にともなう問題点	6
3. 調 査 目 的	8
4. 調 査 方 法	9
5. 資 料 解 析 手 法	10
6. 海浜変形予測手法	16
7. 模 型 実 験 手 法	18
8. 調 査 結 果 の 検 討	22

1. 事業計画の概要

西遠流域下水道事業は昭和48年から開始され、天竜川右岸の浜松市、浜北市、天竜市、舞阪町、雄踏町、可美村にまたがる約13,600 haの区域を対象とし、その区域の計画人口は約50万人にわたる。計画排水量は518,000 m^3 /日であり、これを処理する処理場は図-1に示すように河口部右岸に計画されており、活性汚泥法による処理を計画しており、流入水の水質はBOD 150 ppm, SS 170 ppm, 放流水の水質はBOD 15 ppm, SS 30 ppmとなっている。

処理場の位置は汚水を集めるのに最も適した下流端であり、また現在まだ利用されていない土地を利用するということで決定された。海岸の地形や海域水質に影響のあるのは放流水の吐口の位置および構造であるが、現在のところ一応図-2に示すようなものを計画している。すなわち海岸から300 m程度の沖合に、幅20 m, 長さ15 m, 高さ20 mの構造物を設け、そこまで海底を暗渠によって放流水を導く計画である。放流量としては完成時に6 m^3 /secとなる予定である。

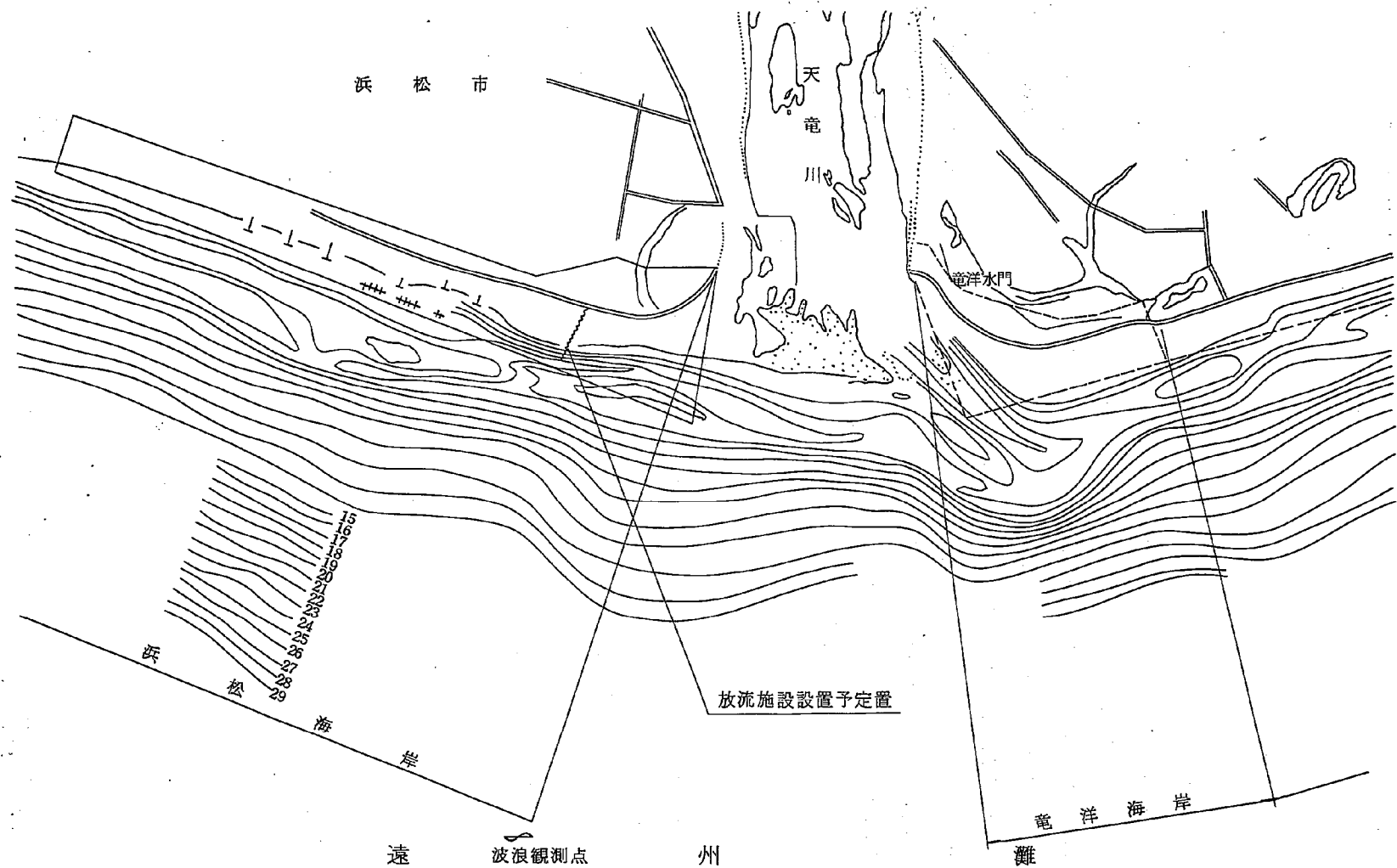


図-1 対象区域概要図

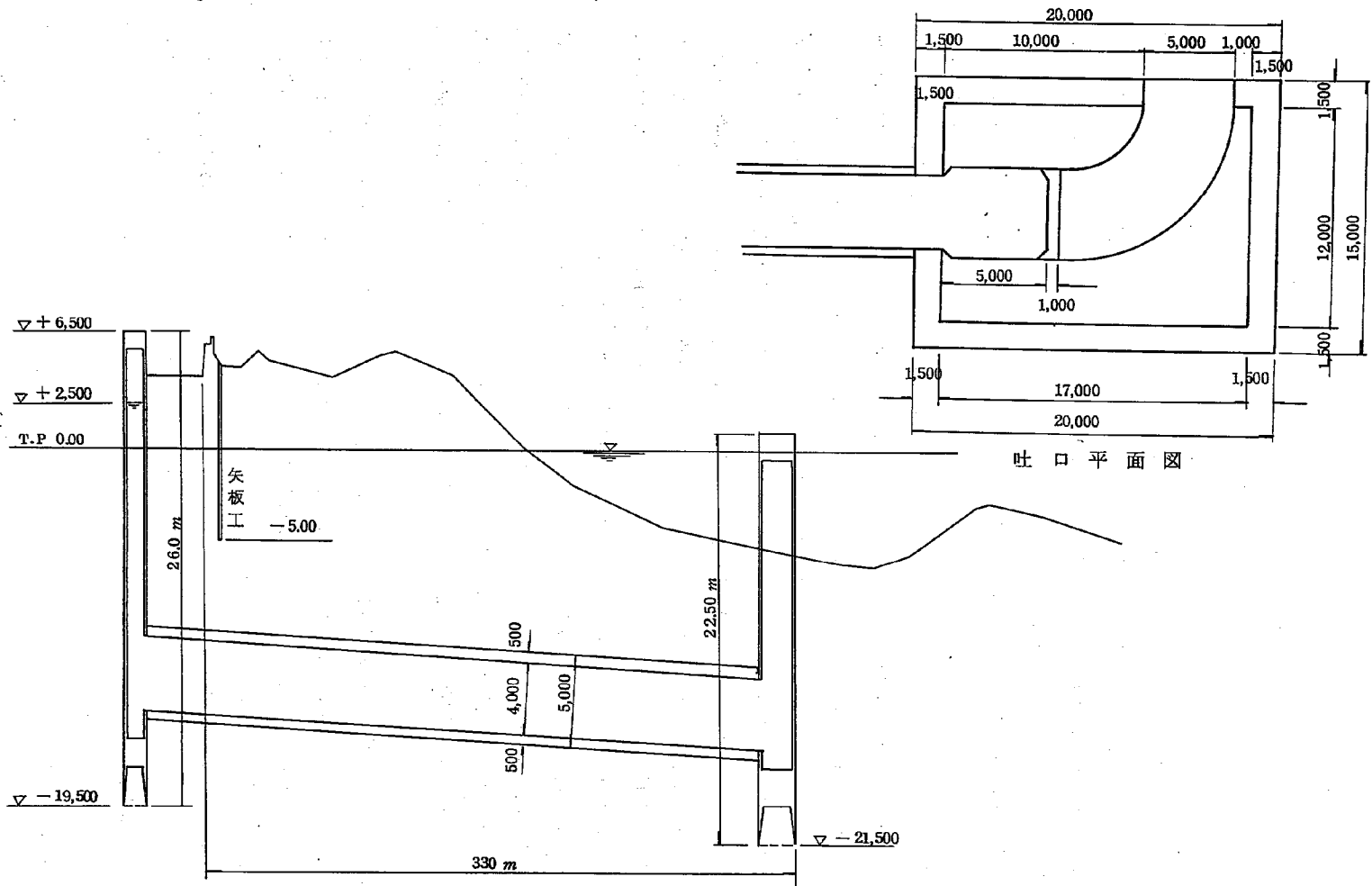


図-2 放流施設概要図

2. 放流施設建設にともなう問題点

放流施設の計画されている天竜川河口付近の海岸は、天竜川の流出土砂によって形成され、天竜川河口を頂点とする二つの弧状の海岸線からなっている。河口からの流出土砂の減少にともない、最近では侵食を生じており、過去15年間で最大200mの海岸線の後退がみられる。また太平洋に面しているために、夏から秋にかけて台風にもなつて生じた高波が来襲し、昭和50年には最大波高14mの波が観測された。このように自然条件のきびしい海岸に構造物を設ける場合には、その維持および周辺への影響について十分検討しておく必要がある。

処理場から下水処理水を海洋に放流する方式については、大別すると三つの案が考えられる。まず第1は天竜川を放流する案であるが、放流構造物の規模はあまり大きなものとならず、また維持も比較的簡単であると考えられるが、天竜川河口では白子うなぎおよびあゆの採捕が行なわれているために、河口部の水質汚濁によってこれらが影響を受ける恐れがある。第2案は天竜川河口西側の馬込川に放流する案であるが、これも第1案と同様に放流口付近の構造物の規模は大きくならず、維持も容易であろうが、ここまでの送水を行なわなければならない。また放流水は碎波帯の中を沿岸方向に広がると考えられるので、水質についても問題があろう。第3案は現在計画されているもので、直接海中に放流する方式である。海岸付近に吐出口を設ければ、隣接海岸への影響と水質については問題があり、沖に設ければ影響は少なくなるが、構造物の規模が大きくなり、またその維持についても問題を生じやすい。ここで検討を行なったのは海浜地形、水質への影響が少なくなる可能性のある第3案についてであり、各種案の詳細な検討は行なっていない。

海岸に放流施設を建設する際の問題点としては、まず施設の構造上の安全性に関するものがあげられる。来襲波が大きいために吐出口となる構造物には大きな波力が作用し、その周辺においては洗掘が生じるために、構造物としては波力および洗掘に抵抗できるものとする必要がある。特に洗掘についてはその量を予測することがかなり困難である。また構造物の形状によっては洗掘を防止することも可能である。

放流施設による隣接海岸への影響については、構造物の位置および規模によって変化する。この海岸においては天竜川の流出土砂が波によって東西に移動している。砂の移動は碎波帯で最もはげしく、この位置に突堤または離岸堤のような沿岸方向の砂の移動を阻止する構造物を設けると、その東側すなわち漂砂の上手側では堆積を、また西側では侵食を生じる。

現在計画されている吐出口は海面まで延長されており、離岸堤と同じようにその背後では波高が減衰する。このために吐出口の岸側では静穏になり、また波向も変化するために海浜地形が変化する。その規模は構造物の規模、海岸からの距離によって変わるが、沖に設けられるほど海岸への影響は小さくなる。

最近の海岸地形変化を調べてみると、右岸側ではかなりの侵食を生じているために、放流施設の

周辺海岸への影響のみならず、処理場自体の安全性についても検討しておく必要がある。河口部の海岸線の後退によって、処理場前面の海岸堤防に対する波の打ち上げ高が増加したり、越波を生じる可能性を持っている。また場合によっては消波構造物などによる対策が必要となる。

3. 調 査 目 的

放流施設を海岸に設ける場合に、さきに述べたような問題点が考えられ、これらの点についての検討を行なうことが計画された。特に目的としたのは処理施設を海岸に設けた場合の隣接海岸への影響を予測することであり、合せて構造物の安全性についても検討することとした。このためには波浪などの自然条件を明らかにしておき、海岸変形の特性をあらかじめ知っておく必要があるので、検討項目としては次のようになる。

1. 地形・波浪などの自然条件の把握
2. 吐出口構造物による隣接海岸地形変化への影響予測
3. 構造物の洗掘等に対する安全性の検討

現地調査および模型実験などについては浜松土木事務所が行なうこととし、調査の全体計画樹立、解析方法の検討、結果の評価については土木研究所が行なうこととした。

4. 調 査 方 法

海岸に設けられる構造物の海浜地形変化に与える影響の予測方法については、まだ確立された方法がなく、それぞれの場合について具体的に検討を行なう必要がある。特に必要なのは波浪や地形変化などの自然条件に関するものであるが、一般には不十分な場合が多い。これは資料が必要になってから観測を始めても遅い場合が多く、将来を予想した長期間の観測資料がないためである。

海浜変形を予測する方法として最も簡単なのは、現在までの地形変化特性を調べ、それを将来に延長するものであるが、これは新たに構造物を造る場合や、人工的な構造物が増加している状況では適用できない。したがってここでは他の方法によらざるを得ない。

海浜の地形変化は大別すると沿岸方向に砂が移動しており、その量が沿岸方向に変化するために地形変化が生じる場合と、海岸に直角に岸から沖または沖から岸へと砂が移動するために地形変化が生じる場合に分けることができる。沿岸方向の移動は、海岸線に対して斜めに波が入射するために生じ、また岸—沖方向の移動は波形勾配の変化、実際には波高の変化に対応して生じている。このうち沿岸方向の地形変化については、十分な検証資料があれば一応、数値計算によって予測することが可能である。ただこれは比較的延長の長い海岸を対象とし、全体的な特性を把握するには適しているが、個々の構造物周辺の地形変化を予測する場合には不適当な場合がある。

構造物周辺における地形変化については数値計算よりも模型実験によるのがより信頼できると考えられる。ただ海底変化を生じさせるような実験、すなわち移動床模型実験の相似率についてはまだ確立した考え方がなく、十分な検証を行なう必要がある。

岸から沖、または沖から岸への地形変化を予測する方法については、数値計算にしてもまた模型実験についても現在種々の方法が試みられているにすぎず、このような変化を予測する場合には定性的なものにならざるを得ない。

天竜川河口付近の遠州海岸における地形変化の概要を調べてみると、岸から沖への移動よりもむしろ沿岸方向の移動が卓越していると考えられる。これは漂砂の供給源が河口であり、その周辺の海岸は河口からの流出土砂によって形成されていること、海岸線に対する波の入射方向が河口の東側と西側とで異なり、河口から離れる方向への成分を持っていること、河口沖の海底谷を除いては海底勾配のきつい場所が特にないこと、侵食が河口付近から始まっていることなどから推定される。したがってここでは数値計算および模型実験によって、構造物を建設した場合の海浜地形変化を予測することとした。

数値解析および模型実験を行なうに際してはまず自然条件を把握することが必要であり、それにもとづいて数値計算においては計算条件の設定や計算方法および各種係数の検討を行なった。また模型実験に際しても、実験条件の設定、相似性の検証のために、数値計算結果を使用することとした。すなわち数値計算によって全体的な海浜の変形特性を把握し、構造物による海浜への影響の概要を調べた後に、模型実験によって構造物周辺の地形変化を検討することとした。これらの方法について次に述べる。

5. 資料解析手法

資料解析に際して検討を行なったのは、次のような項目についてである。

1. 自然条件の把握
2. 海浜変形の将来予測
3. 模型実験条件の検討

自然条件については海浜変形に関連する項目を中心に、風向、風速、波高、周期、波向、潮位、海浜流、地形、地質、底質、沿岸漂砂量、天竜川河口流出土砂量を明らかにすることを目的として行なった。

海浜変形の将来予測については放流施設を建設した場合としない場合について、将来の海岸線の形状がどのようになるかを数値計算によって検討した。

模型実験条件の検討については実験を行なう際に必要となる平均的な海浜形状、底質特性、波浪条件、沿岸漂砂量をさきの自然条件および将来予測に関する検討結果から得ることを目的とした。

解析に必要な資料としては気象・海象に係る風向、風速、波高、周期、波向、潮位、沿岸流の資料、底質の粒度分布、地形に関する深浅測量成果、地形図、汀線測量成果、航空写真、構造物についての資料、天竜川河口に関する流況、河床変動状況、ダム堆砂量、河口部底質等の資料である。

集められた資料をもとに次の項目について検討を行なう。

1. 波浪解析
2. 底質特性の把握
3. 地形特性の把握
4. 海浜構造物の設置状況
5. 河口特性の把握
6. 沿岸漂砂量の推定

これらの解析の目的、方法、相互関係は次のようになる。

5.1 波浪解析

波浪は海岸の砂移動を生じさせる主要な外力であるためにその実態を十分明らかにしておく必要がある。この海岸においては建設省浜松工事事務所において観測が行なわれており、その資料を整理して1年間の波浪条件、すなわち波高と周期の頻度分布を整理すれば特性を把握できる。特に模型実験に際してどのような波浪条件で実験を行なうかを決定する資料となる。

波向に関しては、沿岸方向の漂砂量に直接関係するためぜひ必要なものであるが、観測が行な

われていない場合もあり、これを補なう意味で風から推算することも考えられる。波浪が小さい場合には局地的な風によって波高、波向ともに決定されよう、したがって風向・風速の頻度分布も調べておく必要がある。

一般に沿岸漂砂量は沖での波浪条件ではなく、砕波点での波高、波向であるために、波浪資料にもとずいて砕波点での波浪特性を調べなければならない。このためには波の入射方向、周期を数種類選定し、その屈折状況を屈折図によって求めればよい。特に問題となるのは沖においては同一の方向であっても、天竜川河口の西側と東側では海岸線の方向が異なるために、海岸に入射する波の方向が異なることである。これは屈折によって沖における傾きよりも砕波点では小さくなり、その程度を明らかにしておく必要がある。

5.2 底質特性の把握

海底の底質は漂砂の移動方向を知るのによい手がかりとなり、また移動床模型実験においてどのような材料を海底の構成物質として用いるかの検討に際して必要となる。河口から流出した土砂は一部は河口付近に堆積し、一部は浮遊状態で沖へ失なわれる。堆積した物質は波によって沖および沿岸方向に運ばれ、それにともなう粒度分布が変化する。したがって河口から流出した土砂のどの程度の割合が海岸に寄与しているかは、河道内または河口を流出する土砂の粒度分布と、海岸を構成する底質の粒度分布を比較することによって一応の限界を設定することができる。また河口流出土砂量が、ダムの建設などによって減少している場合にはその粒度分布が変化するのので、粒度分布の経年変化を調べると流出土砂の時間的変化を予測するための資料となる。

調査は現地において砂を採取し、その粒度分析を行なうことによって行なうことができる。

5.3 地形特性の把握

模型実験を行なう場合には平均的な海底地形がどのようになっているかを明らかにしておく必要がある。海底の地形変化は波浪特性の変化に対応して生じる非常に短期的なものと、数年にわたる侵食や堆積などの長期的な変化に分けることができる。ここで検討の対象としているのは短期的なものよりもむしろ長期にわたる変化であるために、実験条件として与える地形についても平均化した地形を与えるのがよいと考えられる。したがって深淺測量の結果から、各横断面について平均値を求めておく必要がある。

短期的な変動については、沿岸方向の漂砂も影響しているが、それよりも沖一岸方向の移動が支配的と考えられ、これを模型実験によって予測することは非常に困難である。したがってこの変動を予測する一つの方法として、深淺測量の資料や汀線変化の資料を用いた解析を行なって予測することが考えられる。すなわち長期間にわたる深淺測量の結果から、まず平均的な海浜形状を求め、次にその平均値のまわりの変動を例えば標準偏差によって求めれば、変動の大きさを予測すること

ができよう。特に重要なのはこれらの資料をだれが整理しても同じ結果を得るという方式を確立することであり、資料およびそれから導かれる結論を信頼できるものにする。

海岸の地形変化を解析する手法として経験的直交関数を用いる方法が提案されている。これは複雑な現象を要素に分割し、その本質を明らかにしようとする試みの一つであり、これまでに得られた資料を統計的に処理してあるまとまった数値で表示する手法である。

海の波のようにほぼ同じ周期を持って繰り返す現象を表わすものとして正弦波、余弦波形が提案されており複雑な現象をしている場合でも、それはこれらの波の振幅と周期または波長の種々の組合せによって表わすことができると考えられている。周期成分を持った現象については正弦波・余弦波、すなわちフーリ工級数によって表示するのが適当と考えられるが、海底の地形変化のように周期成分を持たない場合にはこの方法は適当ではない。

非常に多数の現象がからみ合っている中でどのような成分が主なものであるかを見出す手法として、多変量解析の手法が考えられる。これは相互に関連する多数の測定データを統計的に処理して、複雑なデータを簡潔に要約したり、またデータの背後にかくれている、ある現象の構造を明らかにするための方法である。この中でも手法はいくつかに分類されるが、外的に与えられた基準のない場合に、もとの多数の変量に含まれる幾つかの要素を抽出する手法として主成分分析という方法がある。この考え方を海浜の地形変化に応用したものが経験的直交関数による手法である。

深淺測量によって海浜地形が空間的にも、また時間的にも測定されるのであるが、その測定資料をもとに、地形変化が空間および時間に分離できるとまず考える。すなわち海浜形状が全体として堆積または侵食する場合に海岸線に対して直角方向の海浜形状の時間的変化を、岸から沖までの標準的な横断形状（空間的な変化）の時間的な変化として表わすことができると仮定する。すなわち平均的な海浜形状と、その時間的な変化に分離できると考える。岸から沖または沖から岸への地形変化については、沖で正、岸で負となる空間関数が、時間的にその大きさおよび符号を変化することによって表わすことができる。もしこの岸—沖方向の移動がある点を境界として変化するものではなく、岸から徐々に沖へ、または沖から徐々に岸へ移動するものであれば、それは位相の90°異なった組合せ、すなわち正弦波と余弦波で進行する波を表わすことのできるような形で表示することができる。

深淺測量の資料にもとづいて、このような解析手法を適用すると、かなり複雑な地形変化をしている場合においても、その特性を要約することができる。具体的な計算手法については、まず海浜の形状をある基準点、 $x=0$ からの水平距離 x と それでの高さまたは水深 h で表わし、 h は x と時間 t の関数の積で表わされると考える。すなわち、距離 x 、時間 t における水深 h_{xt} は 次のように表わされたとする。

$$h_{xt} = \sum_n c_{nt} \cdot e_{nx}$$

ここで添字 x は 1 から n_x (n は測定点数) まで, t は 1 から n_t (n は時間に関する測定回数) まで変わる。ただし, ここで

$$\sum_n e_{nx} e_{mx} = S_{nm}$$

であり, ベクトル e は直交単位ベクトルである。また S_{nm} はデルタ関数で,

$$S_{nm} = 1 \quad (n = m \text{ の場合})$$

$$S_{nm} = 0 \quad (n \neq m \text{ の場合})$$

である。観測値から e を求めるには, 測定値を用いて対称マトリックス

$$a_{ij} = \frac{1}{n_x n_t} \sum_{t=1}^{n_t} h_{it} h_{jt}$$

を作り, この行列の固有値を求めればよい。すなわち

$$A \cdot e_n = \lambda_n e_n$$

である。また c (+) はベクトル e の直交性を利用すれば

$$c_{nt} = \sum h_{xt} e_{nx}$$

より求まる。なお固有値 λ はその固有関数の寄与度を表わす。

海岸線に対して直角に測られた資料, すなわち横断形状に関する資料にこの手法を適用すると, まず最も主要な成分として海浜の平均形状が e_{nx} として得られる。またこれに対応する時間変化は海浜全体の侵食または堆積を表わす。

海浜の変形特性は深浅測量の資料を十分分析すれば, 経験的固有関数を用いなくても解析することは可能であるが, この手法を用いれば機械的に解析できること, また数量的な評価ができることなどの特性を持っている。

遠州海岸においては深浅測量の資料が豊富であり, これらの資料を用いた解析を行なうことによって, 平均海浜形状, その長期的な変化特性, 季節的な変動を把握できると考えられる。

海浜変形の予測に際して一つの重要な要素として, 海浜の移動する高さまたは水深がある。波の作用は海面付近でいちじるしく, 水深が深くなるにしたがって減衰するために, 波による地形変化についても, ある水深にその変化は限定される。来襲波が明らかになればそれと底質の粒径および比重によってどの水深まで底質が移動するかを予測する式はあるが, ここで考察の対象としているのは, かなり多量の漂砂移動のある範囲であるために, 波浪条件よりはむしろ深浅測量の結果をもとに地形の変化する高さを予測するのがよいと考えられる。

その方法としては二つあり、まず第一は海岸線に直角方向に断面をとり、地形変化がどの水深までおよんでいるかを測量の成果をもとに調べるもので、平均的な海浜断面からのばらつきが小さくなる水深をもって、地形変動の生じている高さとするができる。この方法は深淺測量の資料があればできるが、場合によっては測量の精度が悪い場合、または十分地形変動の生じない範囲まで測量が行なわれていない場合などでは問題がある。

第二の方法は海浜の堆積または侵食が生じている場合で、深淺測量の資料があるとき適用できる方法である。すなわち汀線の後退量 l とそれに対応する断面積の減少量 A から次式によって移動する平均高を求めるものである。

$$h = \frac{A}{l}$$

この場合、侵食ばかりでなく堆積している場合にも用いることができるが、それらの値が大きくなれば測定のはらつきがあるために精度が悪くなる。

ここで得られた海浜の移動高は海浜変形の数値計算による予測および模型実験の波浪条件と底質、すなわち相似性を決定するために必要な資料となる。

5.4 海浜構造物の設置状況

海岸に造られる堤防、突堤、離岸堤などの構造物は海浜変形に大きな影響をおよぼしているので、その設置状況と周辺の地形変化状況を調べることによって放流施設の影響や、将来の海浜変形予測に際して貴重な資料となる。特に数値計算によって海浜変形を予測する場合に構造物をどのようにモデル化し計算に取り入れるかという事項を検討する際の検証材料となる。したがって構造物について、その種類、位置、構造、規模、設置年月日等を明らかにしておく必要がある。特に海浜変形に関係するのは突堤、海岸堤防の場合はその先端水深、また離岸堤の場合においても前面水深とその高さなどであり、これらは沿岸漂砂量を変化させる主要な要素となっている。

模型実験においては、相似性の検討のために過去に設置された構造物周辺の地形変化を再現しその妥当性を明らかにすることが必要であり、この場合に上記の項目についての資料が必要となる。

海岸に設けられた構造物が何らかの原因で災害を受けた場合についても、被災状況、その時期等を調べておかなければならない。

5.5 河口特性の把握

遠州海岸は天竜川からの流出土砂によって形成されており、河口の位置および流出土砂量が海岸の地形変化と密接に結びついている。河口から流出した土砂は河口付近の海岸に堆積し、それが波によって次第に沿岸方向に運ばれ、一部は沖へ移動し、一部は堆積し、残りはさらに沿岸方向に移動する。これらは連続的につながっており、流出土砂量の変化は地形変化および沿岸漂砂量の変化

にすぐ表われる。

近年になってダム建設や砂利採取によって河川の流出土砂量が変化しているために、数値予測モデルや模型実験によって過去の地形変化を再現する場合には、過去における流出土砂の変化状況を把握しなければならない。また将来予測を行なう場合においても、構造物の影響とともに流出土砂が非常に重要な要素となる。

流出土砂量を予測する方法としては、水理量をもとにした流出土砂量計算、河床変動状況の解析などによって行なうことができる。流出土砂量計算において特に注意すべき項目は、流況の変化が生じていないか、河床の構成材料が変化していないか、流出した土砂のうちどの程度の割合が海浜への供給土砂として寄与しているかなどの問題である。

天竜川の河口幅は広く、その中を実際の河口は移動しているために河口の位置の変遷は海浜変化と結びついている。したがって地形図や航空写真などによってその状況を調べなければならない。

5.6 沿岸漂砂量の推定

沿岸漂砂量は地形変化の予測および模型実験における地形変化の時間縮尺の決定と実験の境界条件を決定する場合に必要となる。その方法としては実測を行なう方法、波浪条件から沿岸漂砂量公式を用いて計算する方法、地形変化にもとづいて計算する方法などがあるが、いずれの方法によっても確実な値を得るのは資料が不十分なこともあって困難なので、各種方式によって計算した値を相互に比較検討することによってその値を推定することが望ましい。この場合、沿岸漂砂量は場所的にも、また時間的にも変化するものであることに気を付ける必要がある。

推定された沿岸漂砂量は海浜変形の数値計算によってその妥当性を検証することができる。数値計算手法については次の項で述べる。

6. 海浜変形予測手法

海岸の地形変化は岸から沖または沖から岸に向う砂の移動によるものと、沿岸方向の漂砂によるものに分けられる。さらに時間的には1年を単位とする季節的な変化と長期間にわたるものに分けられる。最も大きな問題となるのは長期的な変化であり、これを予測する手法として海岸線の変化予測モデルが提案されてきた。

一般の海岸においては、水深が深くなれば砂が移動しなくなり、また海底勾配も緩くなるために、波以外の原因による沖への移動は生じなくなる。したがってこの移動限界を境界とし、その岸側の土砂収支を考える場合においては、沖一岸方向の移動は単なる汀線の変動として考えることができる。したがってこの場合には沿岸方向の漂砂の違いが海岸の堆積・侵食を生じることになる。これを数式化すると次のようになる。

まず基本となるのは来襲する波浪条件と沿岸漂砂量の関係であり、これは次のように表わすことができる。

$$q = F \sin \alpha \cdot \cos \alpha$$

ここで q は沿岸漂砂量、 F ：来襲波のエネルギー、海底勾配、底質などによって変化する係数、 α は各場所および時間によって変化する砕波長での波の入射角である。海岸に固定した座標軸をとり、それを基準に海岸線の方向および波の入射方向を決めると α は次のようになる。

$$\alpha = \alpha_0 - \frac{\partial y}{\partial x}$$

ここで α_0 は座標軸に対する波の入射角、 x は沿岸方向の距離、 y は海岸線の位置である。

沿岸漂砂量の違いが海岸の侵食または堆積となるとする関係、すなわち連続の式は次のようになる。

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0$$

ここで A は海岸に直角方向の断面積である。 A と y の関係をつけないければならないが、これを線形な関係、

$$A = yh$$

とおくことによって上記の沿岸漂砂量公式と連続の式が結びつく。これらの計算は単純な場合を除き、数値計算によって行なわれる。

突堤および離岸堤などの沿岸漂砂を阻止する構造物が存在する場合には、それに応じたモデルを考えなければならない。突堤の場合は、それが十分長い場合は沿岸漂砂を完全に阻止し、上手側の

堆積などによって短くなり、また突堤の先端の位置と海岸線の位置が一致した場合には漂砂量は変化し、突堤の影響は減少するものとする。離岸堤の場合には、その位置と構造によって漂砂の阻止割合が変化し、海岸から離れていれば影響は少なく、近づくにつれて大きく阻止し、また堆積によって海岸線が前進すれば漂砂量に対する影響は少なくなるとする。

数値計算に際しては、波の入射方向 α_0 、移動高さ h 、沿岸漂砂量に関する係数 F 、構造物の種類と位置、初期条件と境界条件を与えて計算を行なう。差分化の手法については精度、安定性、構造物に関する条件の与えやすさなどを考慮して決定する。

7. 模型実験手法

構造物周辺の地形変化については模型実験による検討がよいと考えられるが、実験において最も問題となるのは相似率である。したがってここでは主として移動床模型実験の相似率についての考え方と、縮尺、底質などの決定方法について述べる。

一般に模型実験によってある現象を再現しようとする場合においては、完全に相似にすることは困難であり、支配的な現象のみを取り上げて相似にすることが行なわれる。したがってここでもこのような観点から相似性を考えることにする。

移動床模型実験において相似にすべき項目としては次のようなものがある。

1. 波浪現象
2. 海浜流
3. 砂の移動および地形変化

波浪現象については縮尺があまり小さくない限り、フルードの相似則、すなわち重力と慣性力が支配的であるとして導びかれた相似則に従うとしてよい。これは長さ l 、時間 t 、速度 u とするとき模型および実物で次の量を一致させればよい。

$$Fr = \frac{u}{\sqrt{gl}}$$

したがって添字 p と m でそれぞれ実物および模型を表わせば、長さの縮尺を S とするとき、各量の縮尺は次のようになる。

$$\frac{l_m}{l_p} = S, \quad \frac{u_m}{u_p} = \frac{t_m}{t_p} = \sqrt{S}$$

なおここでは縦および横方向の長さの縮尺を違える歪模型は一応考えていない。したがって波浪現象についてはこの相似則に従えばよい。

波によって生じる海浜流については、離岸堤や放流施設の背後で沿岸流や離岸流が生じると考えられ、相似にする必要があるが、相似則については、底面の摩擦係数を一致させる必要がある。模型における摩擦係数はそれを制御することは困難で、特に減らすことは非常にむずかしい。実物および模型における摩擦係数も十分明らかにされていないために、一応ここでは考えないことにする。摩擦係数の実物と模型の違いは、数倍模型が大きいと考えられる。

砂の移動および地形変化に関しては、また相似性についての確定した考え方がない。特に移動床模型実験においては海底が変形するために種々の問題を生じる。ここでは沿岸漂砂が支配的であると考えて相似性を検討する。

まず第一に必要なのは波浪および流れについての相似性から要求される地形、特に海岸に直角方向の地形の相似性である。波浪条件と底質を与えるとそれに対応して横断形状は変化し、一応平衡

的な形状となる。この形状は任意に与えることはできず、波浪条件、底質の粒径と比重を変えることによって実物と合うものを選択しなければならない。海浜形状としてはステップ型とバー型に分けられ、これは主として波形勾配によって変化するといわれており、実際の海浜形状を調べることによってこの特性を明らかにし、それに対応した波浪条件を設定する必要がある。

沿岸方向の漂砂を主体に考える場合に、次に問題となるのは、砂の移動する範囲を模型と実物で相似にすることである。これも当然波浪条件と底質によって変化する。例えば波による砂の移動限界については、海底に作用する剪断力と粒径および比重によって定まる無次元量がある一定値になる。すなわちこの値を I とするとき次のようになる。

$$I = \frac{C u^2}{\left(\frac{\sigma}{p} - 1\right) g d}$$

ここで C : 摩擦係数, u : 波による海底での流速, σ : 底質の密度, p : 水の密度, g : 重力の加速度, d : 粒径である。

模型で相似にする必要のあるのは移動限界よりもさらに移動の大きい場合であるが、基本的にはこのような量の相似性が問題となる。しかし実際の海岸では波浪条件が常に変化しており、その集積された結果としてある範囲の砂が移動しているために、模型実験は全体としての相似をはかる必要がある。したがって、地形解析によって求められた実際の移動高と、模型での与えられた波浪条件に対する移動高を相似にする必要がある。

これまでの結果をまとめると、海浜形状と移動高を相似にするために、波浪条件および底質の粒径・比重を決定することになる。波浪条件としては選択の任意性はあまりなく、その海岸に來襲する波浪特性からその範囲は限定される。具体的には種々の波浪条件および底質を用いた実験によって海浜形状と移動高についての資料を得ておき、その中から実際に適合したものを選択する必要がある。

移動量については、地形変化がかなり長時間にわたるものであるために、地形変化の時間の縮尺と、波浪現象に関する時間の縮尺を変えることによって、実物と模型を相似にすることができる。すなわち地形変化に関する時間を T 、漂砂量を q とするとき、これらの間の実物と模型の関係は次のようになる。

$$\frac{T_m}{T_p} = \left(\frac{\ell_m}{\ell_p}\right)^3 / \left(\frac{q_m}{q_p}\right) = S^3 / \left(\frac{q_m}{q_p}\right)$$

ここで S は長さの縮尺である。したがって実物および模型における沿岸漂砂量が求められれば、時間の縮尺 T_m/T_p を求めることができる。

模型実験においては構造物の影響を明らかにするための実験を行なう前に、予備実験を行なって相似性を十分確認しておく必要がある。したがって実験は予備実験と本実験に分けられる。

これらの実験方法を検討する前に、資料解析および海浜変形の予測によって、次の項目についての資料が得られているものとする。

1. 模型実験を行なう範囲に各測点における平均海浜形状
2. 底 質
3. 卓越波向
4. 波高、周期の頻度分布
5. 沿岸方向の波エネルギー
6. 海浜の移動高
7. 沿岸漂砂量 模型境界における値および平均的な漂砂量の時間的变化
8. その他実験に必要な構造物形状、設置位置、年月日等

7. 1 予 備 実 験

予備実験の目的は、波高・周期・波向・底質の粒径・比重・供給土砂量・採取土砂量（模型両端）などの実験条件を決定するためのものと、時間の縮尺の決定など相似性の検討のためのものに分けられる。

まず第一に海浜形状と砂の移動する高さを相似にするための実験を行なう必要があり、これは水路を使用した実験によって検討することができる。現地での波浪条件と海浜形状を参考に、各種の波高・周期・粒径・比重の組合せについて水路において20時間程度波を作用させて、そのとき形成される海浜地形および変化状況を測定することによって、実物と相似な場合の波高・周期・比重・粒径を決定する。実験に際しての測定項目は波高・周期および海浜形状の時間的变化である。

地形変化の時間縮尺および模型実験の再現性を検討するためには、平面水槽を用いた実験を行なう必要がある。実験に用いる底質としては、さきに決定したものをを用い、波高・周期についても同様であるが、波向に関しては一応数値解析によって用いた値を用い、地形変化を調べることによってその妥当性を検討する。したがってこの場に、まず第1に与えられた波高・周期・底質条件のもとで、波向と沿岸漂砂量の関係を明らかにする必要がある。次に実際の海浜形状についての模型を製作し、地形変化を調べる。この場合に、実験に合せて海岸の構造物を設けるとともに、その構造物による変形を測定する。したがって波高・流況・地形・沿岸漂砂量などを測定する。またこの場合、模型の漂砂の上手側には土砂を供給し、下手側では採取する。これらの量については、海浜変形の予測の際に計算した値を、地形変化についての時間縮尺で縮小した量とする。

7. 2 本 実 験

予備実験において、河口付近の過去に生じた海浜変形が再現出来ることが明らかになった後に、放流施設の影響および安定性に関する模型実験を行なう。この場合においては、施設がない場合の

将来の海浜形状および施設のある場合の将来の海浜形状についての実験を行なう必要がある。

実験条件としては、過去の地形変化を再現できた波高・周期・波向・底質を用い、模型上手および下手の沿岸漂砂量については数値計算によって求められた値を使用する。

実験に際して検討すべき項目としては、構造物の規模・位置などの変化に対応する周辺地形への影響と、構造物周辺での地形変化である。構造物の周囲には洗掘が生じると予想されるが、この量については縮尺が小さいために信頼できるとは考えられず、大型模型実験または類似の実施例で検討する必要がある。

8. 調査結果の検討

これまでに述べた手法にもとずいて資料解析および模型実験が、浜松土木事務所によって行なわれた。ここではその結果の概要と問題点について述べる。なお模型実験についてはその成果がまだまとまっていないので、ここでは除くことにする。

8.1 自然条件

海象および気象条件に関しては、まず風向・風速に関する資料を調べると、この海岸における卓越風向は南西から北西であり、この方向は海岸線に対してほぼ平行である。また風速 6 m/sec 以上の風は西風に集中している。これらの資料によれば沿岸における波高と波向は波高の小さい場合には西からの方向成分が大きく、また波高の小さい場合には西向きとなろう。この海岸における漂砂移動は平常の波浪条件の他に台風期における波浪条件によって左右される。

遠州海岸における波浪特性は図-3に示されており、平常時には波高・周期ともかなり小さい。

海浜における底質は中央粒径が $0.4 \text{ mm} \sim 0.3 \text{ mm}$ であり、また河口部の粒度組成と比較すると、河口部では $0.6 \text{ mm} \sim 0.4 \text{ mm}$ の粒径の土砂がそのほとんどを占めている。

地形変化については、海岸侵食が河口右岸から始まりそれが次第に西へ移動している。この原因については天竜川の流出土砂の変化とともに、河口の位置が西から東に移動したためと考えられる。海浜形状の特性としては水深 5 m 付近に水平部があり、海浜形状としてはかなり緩やかな海岸を形成している。

表-1 中央粒径

(単位: mm)

地点 \ 年	36・10	38・7	38・10	52・9
後浜 (汀線より陸へ 50 m)	0.29	0.35	0.33	
前浜 (汀線)	0.70	0.40	0.46	0.39
海底 (沖へ 250 m)	0.38	0.40	0.39	0.29
海底 (沖へ 500 m)	0.40	0.40	0.38	0.19
平均	0.44	0.39	0.39	0.29

海浜を構成している底質特性は表-1のようになり、かなり細粒成分の多いことを示している。

河口における地形変化は図-4に示すように昭和20年代においては河口が西向であったのに対して、昭和30年代においては東向に変わっている。これは河口部西海岸の侵食に結びついてると予想される。

天竜川河口、遠州海岸における地形変化特性は、河口における流出土砂量の減少と河口位置の変化に伴って河口の西側に侵食を生じ、それに対する対策が現在行なわれていることが明らかである。したがって河口付近に構造物を造ると、それは沿岸漂砂を阻止する働きをし、構造物の東側では海浜は安定となるが、西側では侵食される傾向を示す。

現在までに得られる資料を用いて解析が行なわれているが、それらの成果は有機的に結びついておらず、さらに詳細な検討を行なうことによって海浜変形の将来予測に際して有力な資料となろう。

海岸線の変形モデルによる地形変化の解析については、図-5に示すような実態に合った解析が行なわれており、海浜変形の概略については、あまり問題はないと考えられるが、その詳細について調べるとまだかなりの問題点を残している。特に構造物のモデル化については、海岸から構造物が離れるにしたがって沿岸漂砂が減少するモデルを考える必要がある。

放流施設の建設によって、その周辺の海岸に生じる地形変化については図-6に示すように、構造物の東側では堆積を、また西側では侵食を生じており、定性的にはこのような現象が生じると考えられるが、その量については、さきに述べたような問題点もあり、模型実験による詳細な検討が必要であろう。

図-3 昭和50年の波高・周期の規模別生起分布図

〔波 高〕

波高 年 回数	0.5 m 以下	0.5 ~ 1.0 m	1.0 ~ 2.0 m	2.0 ~ 3.0 m	3.0 ~ 4.0 m	4.0 ~ 5.0 m	5.0 ~ 6.0 m	6.0 ~ 7.0 m	7.0 ~ 8.0 m	8.0 ~ 9.0 m	9.0 ~ 10.0 m	10.0 m 以上
700												
600												
500												
400												
300												
200												
100												
0												
回数	163	715	499	33	9	5	2	3	2	3	0	0

〔周 期〕

周期 年 回数	5.0 S 以下	5.0~6.0 S	6.0~7.0 S	7.0~8.0 S	8.0~9.0 S	9.0~10.0 S	10.0 S 以上
500							
400							
300							
200							
100							
0							
回数	69	264	565	355	117	44	26

図-4 航空写真による天竜川河口部の移動状況

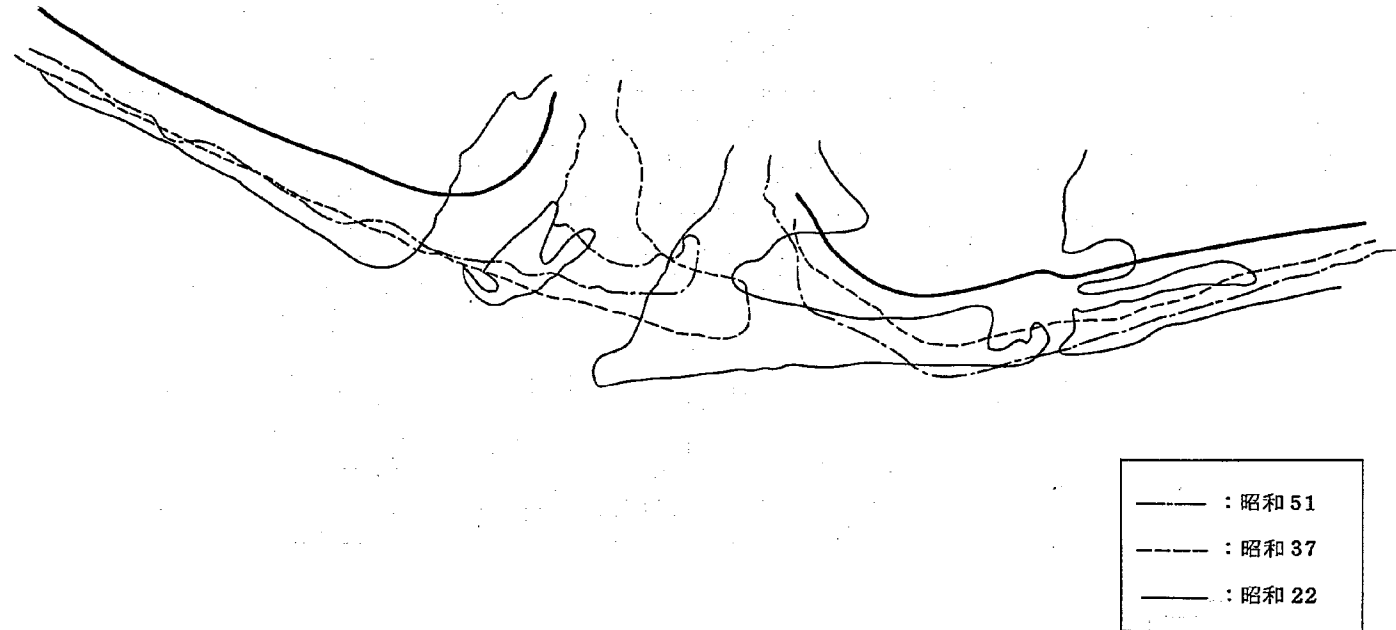


図-5 現況再現結果

(昭和51年)

凡例
—— : 実測値
----- : 計算値

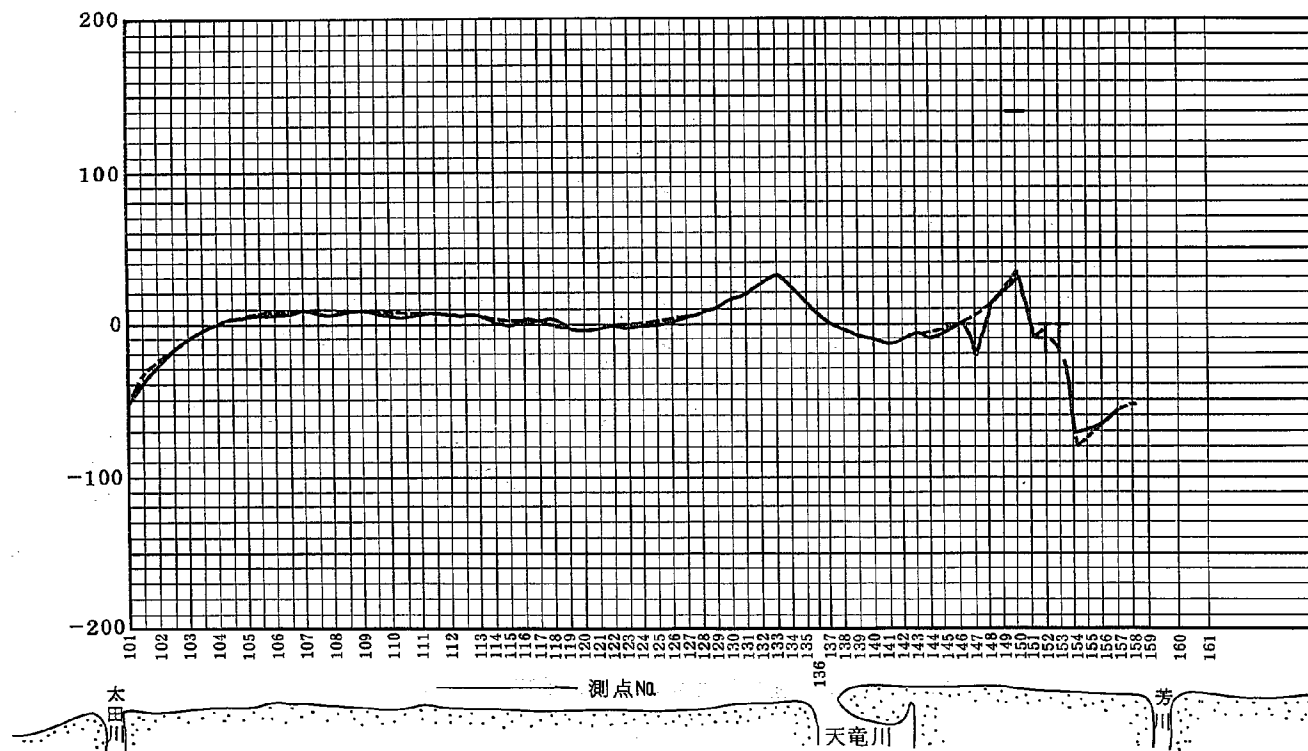


図-6 予 測 計 算 結 果

(昭和71年)
20年後

