

新 制
工
691
京大附図

二次元海浜変形の特性とその相似則 に関する研究

昭和61年9月

伊 藤 政 博

二次元海浜変形の特性とその相似則 に関する研究

昭和61年 9 月

伊 藤 政 博

目 次

第1章 結 論	1
第2章 二次元海浜変形の特性に関する研究	7
2.1 概 説	7
2.2 海浜変形に関する研究の分類	7
2.3 海浜変形に関する実験誤差の評価法	8
2.4 海浜変形に及ぼす諸因子の影響	19
2.5 海浜断面変形量の表示法	41
2.6 結 語	59
第3章 海浜変形の相似則に関する研究	65
3.1 概 説	65
3.2 相似性の判定基準	67
3.3 海浜変形の相似則	68
3.4 海浜変形の時間縮尺	97
3.5 来襲波浪の急変による海浜変形の再現実験法	109
3.6 長期的な海浜変形の再現実験法	117
3.7 海浜変形の相似則の検証	124
3.8 結 語	125
第4章 海岸堤防前面における局所海浜変形に関する研究	131
4.1 概 説	131
4.2 海岸堤防の模型実験における波の多重再反射軽減法	132
4.3 海岸堤防前面における局所海浜変形の相似性	138
4.4 現地海岸堤防前面における局所海浜変形の模型実験	146
4.5 海岸堤防前面における局所海浜変形, 特に洗掘	153
4.6 海岸堤防の洗掘限界	161
4.7 結 語	165
第5章 結 論	169

第 1 章 緒 論

風、波および海浜流など海浜に作用する自然の営力は、長い年月の間に絶景とか奇景と称される屏風ヶ浦・九十九里浜（千葉県）、三保ノ松原（静岡県）、千里浜（石川県）、および鳥取砂丘などで代表される海浜特有の地形を創造してきた。このような海浜地形は、自然の法則に従いつつ、さながら生き物のように変形している。したがって、沿岸海域の利用あるいは海岸災害防止の目的で、海岸堤防、護岸、防波堤、および離岸堤などの構造物を海岸に新たに設置すると、自然の営力との均衡が崩れ、構造物付近の海浜が急激に変化するとともに、その影響が周辺海岸まで波及し、思わぬ事態を併発することがある。また、河川流域では、開発のためにダムを始めとする各種構造物の構築や、砂利採取などにより、従来河口から周辺海岸へ放出されていた流送土砂が減少し、海岸侵食が助長されてきた場合も少なくない。このような海岸侵食に伴って、汀線が後退し、砂浜が痩せ細り、海岸堤防まで波が届くようになって反射波が発生するようになると、堤防部が洗掘され、堤防が倒壊するといった事態が日本各地で発生している。このような海岸侵食の事態とその原因について、小池¹⁾（1974）、石原ら²⁾（1975）、著者³⁾（1976）、および田中⁴⁾（1978）を始めとする多くの研究者によって調査報告されている。また、世界諸国の海岸に関する諸問題が海岸工学国際会議で発表されるが、例えば1984年9月、第19回海岸工学国際会議が米国テキサス州ヒューストンで開催され、約270編の論文が発表された⁵⁾。その中で、海浜変形に関係したCoastal morphology, Sedimentation, Sedimentation problems in coastal areasおよびField measurementなどの論文が75編で、全体の約28%を占めていることから世界的にこの種の問題がいかに多いかを知ることができよう。

従来、海岸侵食に対しては、海岸堤防や突堤などの堅固な構造物で防御してきた。このような防御法は、元来、それらの前面に十分な砂浜が存在することが前提となるが、漂砂量の変化などの要因によって侵食が進み、砂浜が減少すると、堤防前面からの反射波が増大するために、急激に前浜が消失したり、また沿岸漂砂の阻止による周辺海岸の侵食を助長して思わぬ弊害の発生や、海浜特有の景観を遮るといったことがある。そのため、最近、建設省、運輸省および農林水産省など海岸を担当する省庁では、堤防のような線的防御法に代って自然の浜の持つ消波機能を積極的に活用した養浜と離岸堤などとの組み合わせや、人工リーフおよびヘッドランド工法などの面的防御法による海岸保全工法を推進することになっている。このような海岸保全工法を検討するためには、自然の浜、つまり海浜変形の特性や構造物の設置による浜の応答変形を熟知することが肝要である。

海浜変形に関する法則を究明するためには、二次元または三次元模型による実験的研究、漂砂機構に基づいた理論的研究、および現地観測の結果を総合した手法が必要であろう。その中でも海浜変形の研究のひとつとして、海浜変形を岸沖方向に二次元的断面形状として取扱うと、その挙動が抽象化できるので、その把握が容易となる。例えば、二次元的な模型実験では、底質の粒径、初期形状、波の特性および波の作用時間などの諸要因の大きさを比較的簡単に変えることができるので、海浜変形の特性と要因の関係を

調べるためには非常に好都合であるばかりでなく、現象の可視化も可能である。したがって、海浜変形の二次元模型を用いた実験的研究は、各種の海岸構造物の企画・設計、その機能や影響の将来予測および漂砂に関する研究には欠せないものとなっている。

以上のような理由から、海浜変形に関する研究は比較的古くから実施されてきているので、これを簡単に概説し、考察する。Johnson⁶⁾ (1951) は二次元実験における海浜断面形状における沿岸砂州の発生に注目し、その発生限界を沖波波形勾配との関係で正常海浜、暴風海浜およびそれらの中間型に分類した。この分類法は、現地海岸規模の波を用いた実験結果とは必ずしも適合しない場合もあり、ときには全く逆の海浜形状になることを Saville⁷⁾ (1957) が実験的に確かめ、その原因として縮尺効果の影響を指摘した。この事実は、現地の海浜変形を縮小して実験的に研究する模型実験には、致命的な警告ともいえよう。岩垣・野田⁸⁾ (1961) は、大小のスケールで行なわれた数多くの実験結果について、沿岸砂州の存在の有無に注目し、これを沖波波形勾配と底質粒径・沖波波高比の関係で整理し、縮尺効果の影響を論じた。さらに、Nayak⁹⁾ (1970) は、粒径波高比の中に底質の比重の効果を取り込んだパラメーターを用いて、海浜変形に及ぼす底質の比重の効果を定性的に明らかにした。堀川・砂村ら¹⁰⁾ (1975) は、粒径波長比の中に初期浜勾配の影響を組み込んだパラメーターと沖波波形勾配との関係で、数多くの実験資料を整理し、汀線の前進後退の限界の判別式を提示した。この式は、波のスケールによって式中の定数を変えなければならず、その原因として海浜変形の縮尺効果を挙げている。一方、Dean¹¹⁾ (1973) は、波によって浮遊した底質が沈降する間に岸沖のいずれの方向に移動するかを理論的に検討して、無次元沈降速度と沖波波形勾配の関係で数多くの実験資料を整理した。この結果は、波のスケールの大小に係わらず、海浜断面形状を画一的に分類できるといった特色を有し、海浜変形の縮尺効果を究明する上で、非常に意義深いといえよう。また、服部・川又¹²⁾ (1978) は、砕波帯の海浜形状においても底質の沈降速度を含むパラメーターを用いると、うまく分類表示できることを見出している。

海浜変形の特性を主要な要因を用いて評価しようとする研究と並行して、海浜変形の相似則に関する研究が、Beach Erosion Board¹³⁾ (現在, U.S. Army, Coastal Engineering Research Center, CERC) で、二次元模型実験を用いて行われて以来、Noda¹⁴⁾ (1972) , Paulら¹⁵⁾ (1972) および野田¹⁶⁾ (1978) らによって、比重の軽い底質を用いたり、また水平と鉛直縮尺比を変えて模型を歪めて、原型と模型の対象とする現象を相似にする方法が試みられた。これらの実験的研究は、汀線付近の海浜変形のみを対象にして相似性を検討したものや、比較的狭い縮尺範囲について検討したものがほとんどで、現地海岸による検証は不十分である。最近、Vellinga¹⁷⁾ (1982) は、Dean (1973) の無次元沈降速度を準用して誘導した相似則に従って、オランダにおける暴風による砂丘侵食を水平と鉛直縮尺に歪をつけたスケールの大きな模型実験を行い、汀線付近(限られた範囲)の海浜断面ではあるが、現地海岸をある程度再現することに成功している。

一方、理論的な相似則の研究が、Le Méhauté¹⁸⁾ (1970) , Kamphuis¹⁹⁾ (1972) , および Mogridge²⁰⁾ (1974) によって行われているが、まだ十分な実験的裏付けがなされるまでに至っていない。最近、Hallermeier²¹⁾ が、原型と模型の底質の移動限界流速について相似則を求め、従来の海浜変形の相似則との比較を行なうとともに、実験資料との対応を検討している。

以上のように、普遍的な海浜変形の相似則ははまだ十分確立されるに至っていないが、海岸構造物の設置による海浜変形を予測するための1手法として、従来Reinalda²²⁾(1961)、Ozaki²³⁾(1964)を始めとする研究者によって平面(三次元)模型実験が、さらに二次元模型実験についても同様数多くの研究者によって実施されてきた。これらの模型実験では、野田²⁴⁾による浮遊砂の濃度分布から求まる関係や、Nodaによる底質の比重、粒径および縮尺歪で表示される関係式¹⁴⁾、あるいは経験的方法などを参考にして、模型の実験条件を定めるといった苦心が払われている。しかしながら、相似則の信頼性、現地海岸の波を規則波で代表する場合の代表波の決定法、および実験誤差の大きさが定量的に把握されていないために、従来の模型実験の多くは、定性的傾向を調べるにとどまっている場合が多い。

一方、近年の目ざましい電子計算機の能力・容量の発達に伴って、海浜変形を1-Lineあるいは2-Lineモデルなどの汀線変化の予測法のほか、最近では三次元海浜変形の予測数値シミュレーションなどによって予測する研究が行なわれている。しかし、これらの数値シミュレーションには適確な漂砂量則の導入をはじめとして、なお改良すべき点が多く、また、局所的な地形変化の表示が困難であるばかりでなく、計算所要時間などの実際的な問題も残っている。

本論文では、まず二次元海浜変形の特性を詳しく調べた上で、現地海浜変形を模型実験で忠実に再現させるための相似則について研究し、その適用性を明らかにする。以下、本研究の内容を各章ごとに概述する。

まず、第2章においては、海浜変形を実験的に取扱う際に避けたい実験誤差の存在を明らかにし、その大きさを定量的に表示する。さらに、実験誤差を計算の段階で除外して取扱える実験計画法を用いて海浜変形に及ぼす諸要因の影響を寄与率および要因効果として表示する。さらに、大小の規模の実験装置を用いて実施された従来の二次元海浜変形の実験資料の中で入手可能なものをすべて取上げ、海浜変形に影響を及ぼす主要な要因のみを逐次選出できる重回帰分析法を用いて、汀線の移動量表示式を求める。この式に基づいて海浜変形の特性と、そこに存在する要因効果について考察する。

第3章においては、まず原型と模型の相似性を判定する場合に必要な判定基準を明確にしたうえで、海浜変形の相似則を実験的に究明するために、原型と模型における外力としての波に対してはFroudeの相似則を適用し、漂砂、海浜変形の相似則を底質粒径の相似則として実験的に見出すことにする。したがって模型に使用する底質砂の粒径縮尺は、実験縮尺とは無関係に決めることとし、実験縮尺と粒径縮尺をそれぞれ無関係に定め、原型と模型の平衡海浜断面形状を相似にさせることのできるような実験縮尺と粒径縮尺の関係を見出す。また、原型と模型の海浜変形が一樣勾配から平衡形状への移行過程においても両者が相似性を保つことのできるような海浜変形の時間縮尺を究明するために、原型の特定な波の作用時間における海浜断面形状に対して模型の海浜形状をどのような時間縮尺にすれば両者が相似になるかを調べる。このように実験的に得られた時間縮尺と、海浜変形の相似則、連続式、および漂砂量表示式から求まる時間縮尺との対応性を検討する。さらに、海浜変形の相似則および時間縮尺を現地海岸の模型実験に適用し、その妥当性を検証するとともに、海浜変形の模型実験における現地海岸の代表波の決定法を検討する。

第4章では、海岸堤防の模型を二次元造波水槽に設置した場合、水槽内に発生する波の多重再反射を軽減するための装置を幾つか考案し、それぞれの波の多重再反射の軽減効果特性を実験的に見出す。その中

で、最も波の多重再反射の軽減効果の良い装置を使って、海岸堤防前面の海浜変形および洗掘について体系的な実験を行ない、これらの実験結果に基づいて、堤防前面の海浜変形と洗掘の相似性、ならびに時間縮尺について検討する。さらに、現地の海岸堤防前面における局所海浜変形の模型実験を行ない、その再現性や代表波の選定法について検討する。このような海岸堤防前面における局所海浜変形の再現結果と、3章で得られる海浜変形の相似則および時間縮尺との対応を調べる。さらに、海岸堤防の設置が海浜変形、洗掘、波の反射率、および砕波などに及ぼす影響について考察する。また、従来の実験資料も含めて、堤防前面における洗掘の発生条件、いわゆる海岸堤防の洗掘限界の位置を明らかにするとともに、この種の現地海岸調査資料との対応性を検討する。

最後に、本論文で得られた主要な研究成果をまとめて結論とする。

参 考 文 献

- 1) 小池一之：砂浜海岸線の変化について（予報），地理学評論，47-11, 1974, pp. 719~725.
- 2) 石原藤次郎：土砂の流送・運搬に伴う自然環境変化に関する研究，自然災害科学総合研究班，自然災害特別研究研究成果報告，No A-50-9, 1975, 117 p.
- 3) 伊藤政博：天竜川の土砂形態と遠州海岸の海浜変形，土木学会第31回年次学術講演会講演概要集，第2部，1976, pp. 17~18.
- 4) 田中則男：汀線変化の変遷，水工学に関する夏期研修会講義集，1978, pp. B-4-1~21.
- 5) ASCE: Coastal Engineering Abstracts 1984, 1984, 543p.
- 6) Johnson, J. W.: Scale effects in hydraulic models involving wave motion, Trans. AGU, Vol. 30, 1949, pp. 517~525.
- 7) Saville, T. Jr.: Scale effects in two dimensional beach studies, Proc. 7th IAHR, 1957, pp. A3-1~10.
- 8) 岩垣雄一，野田英明：海浜変形に及ぼす scale effect の研究，京都大学防災研究所年報，第4号，1961, pp. 210~220.
- 9) Nayak, I. V.: Equilibrium profiles of model beaches, Proc. 12th ICCE, ASCE, 1970, pp. 1321~1340.
- 10) 堀川清司・砂村継夫・近藤浩右・岡田 滋：波による二次元汀線変化に関する一考察，第22回海岸工学講演会論文集，1975, pp. 329~334.
- 11) Dean, R. G.: Heuristic models of sand transport in the surf zone, Proc. Conf. Eng. Dyn. in Surf Zone, 1973, pp. 208~214.
- 12) 服部昌太郎・川又良一：砕波帯内の海浜変形過程，第25回海岸工学講演会論文集，1978, pp. 218~222.
- 13) U. S. Army Corps of Engineers, Beach Erosion Board: A study of comparative action of waves on model beaches of different scales, Bulletin, B. E. B., Vol. 1, No. 2, 1947, pp. 8~12.
- 14) Noda, E. K.: Equilibrium beach profile scale-model relationship, Jour. Waterw. Harb. & Coastal

- Eng. Div., ASCE, 1972, pp. 511~528.
- 15) Paul, M. J., Kamhuis, J. W., and Brebner, A.: Similarity of equilibrium beach profiles, Proc. 13th ICCE, ASCE, 1972, pp. 1217~1236.
 - 16) Noda, H.: Scale relations for equilibrium beach profiles, Proc. 16th ICCE, ASCE, 1978, pp. 1531~1541.
 - 17) Vellinga, P.: Beach and dune erosion during storm surges, Coastal Eng., Vol. 6, No. 4, 1982, pp. 361~387.
 - 18) Le Méhauté, B.: A comparison of fluvial and coastal similitude, Proc. 12th ICCE, ASCE, 1970, pp. 1077~1096.
 - 19) Kamphuis, J. W.: Scale selection for mobile bed wave model, Proc. 13th ICCE, ASCE, 1972, pp. 1173~1216.
 - 20) Mogridge, G. R.: Scale laws for bed forms in laboratory wave models, Proc. 14th ICCE, ASCE, 1974, pp. 1069~1085.
 - 21) Hallermeier, R. J.: Unified modeling guidance based on a sedimentation parameter for beach Changes, Coastal Eng., Vol. 9, No. 1, 1985, pp. 37~70.
 - 22) Reinalda, R.: Scale effects in models with littoral sand-drift, Proc. 7th ICCE, ASCE, 1961, pp. 318~341.
 - 23) Ozaki, A.: On the effect of an offshore breakwater on the maintenance of a harbor constructed on a sandy beach, Proc. 9th ICCE, ASCE, 1964, pp. 323~345.
 - 24) 野田英明：栲崎漁港の漂砂に関する実験（その1），京都大学防災研究所年報，第9号，1966，pp. 359 ~ 371.

第2章 二次元海浜変形の特性に関する研究

2.1 概説

現在、海浜の保全や海岸侵食制御工法として、自然の浜の持つ景観や消波機能を有効に使う方法が模索されている。海浜の保全・利用には、まず海浜の変形の特性とこれに影響を及ぼしている諸要因との関係を明らかにすることが重要である。

この種の実験的研究としては、支配的な要因を取上げ、これを二次元造波水槽内で変化させ、規則波を作用させて得られた平衡海浜断面形状の特性を各種の要因で関係付けて表示する試みが、Rector¹⁾(1954)によって行なわれた。その後、多くの研究者によって、海浜断面における berm crest の位置、前浜勾配、汀線の移動、断面形状の分類、海浜の変形限界および数値計算による断面形状の表示、さらに砂の移動に注目した移動限界水深、漂砂の移動方向、および岸沖漂砂量などについて、二次元あるいは三次元的に取扱った研究が報告されている。最近では、より実際の海岸に近い条件でその本質を見極めるために、不規則波を用いた海浜変形の実験が行なわれるようになってきた。一方、Bascom²⁾(1951)によって現地海岸における底質粒径と前浜勾配の関係が調査報告された以後、数多くの調査報告がされている。このように実験および現地調査などによって、海浜変形とそれに影響を及ぼす要因との関係が研究されてきた。しかし、海浜変形を実験的に取扱う場合に生じる実験誤差や、いかなる要因が海浜変形にどのような影響を及ぼしているか、さらに実験のスケールが海浜変形に及ぼす影響などがまだ十分明らかにされていないので、これらを明らかにする必要がある。

本章では、2.2節で、まず従来行われた二次元海浜変形に関する実験的研究を分類・整理し、その概要を紹介する。2.3節では、海浜変形を実験的に取扱う上で不可欠な実験特有の誤差を明らかにするために、一定条件の下で繰り返し実験を行ない、その大きさを定量的に表示する。2.4節では、従来の実験・解析法では不可避であったが、実験誤差を加味した解析が可能な実験計画法を用いて、一連の「実験計画 — 実験 — 解析」を行ない、要因が海浜変形に及ぼす要因効果および寄与率分布を明らかにする。2.5節では、汀線の移動量に影響を及ぼす要因として、次元解析から求まるすべての無次元水理量を取上げ、これらで構成したモデル式に基づいて重回帰分析を行い、汀線移動量を定式化する。さらに、この式に基づいて、各種の要因が汀線移動量に及ぼす影響ならびに縮尺効果について検討を加える。2.6節では、本章で明らかになった結果を総括的に述べて結語とする。

2.2 海浜変形に関する研究の分類

二次元海浜変形に関する研究は、海浜断面形状の特性と漂砂に関するものに大別され、次のように細分できよう。

1) 海浜断面形状

(a) Berm crest の位置

- (b) 前浜勾配
 - (c) 汀線の移動
 - (d) 海浜断面形状の区分 (bar型あるいはstep型地形)
 - (e) 数値計算による断面形状の表示
 - (f) 海浜断面形状の特異点 (変形限界)
- 2) 漂砂, 特に岸沖漂砂
- (g) 移動限界水深
 - (h) 漂砂の移動方向

これらの分類項目に従って, 従来の代表的な研究結果を整理すると, 表-2.1のように表わされる。ただし, 表中, H_0 ; 沖波波高, H ; 波高, L_0 ; 沖波波長, T ; 周期, C ; 波速, ν ; 動粘性係数, g ; 重力の加速度, d_{50} ; 底質の中央粒径, d_m ; 底質の平均粒径, d ; 底質の粒径, w ; 底質の沈降速度, i_0 ($= \tan \beta$); 初期浜勾配, i_j ; 前浜勾配, i_{SWL} ; 汀線の浜勾配, i ; 任意の地点の海浜勾配, B ; 静水面からの berm 頂の高さ, X_{sl} ; 初期浜勾配からの汀線移動量, l_B ; berm 頂から任意の位置までの水平距離, h_B ; berm 頂から海底までの鉛直距離, z ; 海浜の寸法, s ($= \sigma/\rho - 1$); 底質の水中比重, σ/ρ ; 底質の比重, h_i ; 漂砂の移動限界水深, \bar{h} ; 海浜の変形限界水深, h_N ; null point (砂粒子の平均変位が零となる水深), U_c^* ; 限界摩擦速度, δ ; 境界層の厚さ, π ; 円周率, $C_1', C_2, \alpha, n, A', B'$; 定数である。

これらの研究のほとんどが, 中規模の造波水槽で規則波を用いた実験結果に基づいて, 海浜変形の特徴と主要な要因との関係を議論したものである。このように従来の研究では, 実験結果に基づいて研究が行われてきたにもかかわらず実験誤差について言及していないが, 実験的研究においては, 当然実験誤差の特徴を考慮した解析を行うことが重要である。さらに, 実験的研究成果を現地海岸へ拡大して適用するためには, 海浜変形の相似則が明らかにされなければならない。

2.3 海浜変形に関する実験誤差の評価法

(1) 実験誤差

Chesnutt²²⁾ や Smithら²³⁾ は, 実験中の水温変化や造波水槽内の水位の微小な変化が海浜変形に有意な影響を及ぼすことを実験的に示している。一般に, 実験誤差として, 次の3種類があげられる²⁴⁾。

a) 系統誤差 (systematic error)

これは, 理論的に除去することが可能な誤差で, 機械誤差, 物理誤差および個人誤差から成っている。機械誤差は目盛りの誤差, 構成部品の不正による誤差などで, 外部の条件に関係なく一定であるため, 標準器を用いれば検出することができる。物理誤差は, 測定環境および測定条件による誤差で, 環境の要因を補助測定することにより, 補正または除去することができる。個人誤差は, 目盛りの読み取り時に生じ, 測定者の癖に左右されるので, 他の測定者との比較によって補正が可能である。

b) 偶然誤差 (accidental error)

不確定な幾つかの原因が重なり合って生じる誤差で, 生起の方向および大きさが不規則である。したが

表 2.1 二次元海浜変形に関する主要な研究の分類

No	特性	研究者 (発表年)	特性表示式あるいは図	備考																
1	berm crest の高さ	Rector, R. L. ¹⁾ (1954)	$\frac{B_x}{L_0} = 0.18 \left(\frac{H_0}{L_0}\right)^{0.5} \quad H_0/L_0 < 0.018$ $\frac{B_x}{L_0} = 0.024 \quad H_0/L_0 > 0.024$																	
2	前 浜 勾 配	Bascom, W. N. ²⁾ (1951)	$i_f = f(d_{50})$	海浜勾配 i_f と底質の中央粒径 d_{50} との関係を図示																
3		Rector, R. L. ¹⁾ (1954)	$i = 0.07 \left(\frac{H_0}{L_0}\right)^{-0.42} \left(\frac{d_{50}}{L_0}\right)^{0.10}$ (前浜勾配) $i_{SWL} = 0.30 \left(\frac{H_0}{L_0}\right)^{-0.30} \left(\frac{d_{50}}{L_0}\right)^{0.2}$ (汀線における勾配)																	
4		Nayak, I. V. ³⁾ (1970)	$i_{SWL} = f\left(\frac{H_0}{wT}\right)$	i_{SWL} と H_0/wT との関係を図示																
5	汀 線 の 移 動	岩垣・野田 ⁴⁾ (1961)	$\frac{X_{sL}}{L_0} = f\left(\frac{H_0}{L_0}, \frac{d_m}{H_0}, i_0\right)$	$\frac{H_0}{L_0}$ と i_0 をパラメータとして, $\frac{X_{sL}}{L_0}$ を $\frac{d_m}{H_0}$ の関係で図示																
6		堀川ら ⁵⁾ (1974)	$\frac{X_{sL}}{L_0} = 0.15 \left\{ \frac{H_0^2}{gT}, \frac{1}{d}, \frac{1}{\tan\beta} \right\}^{0.75} \left\{ 1 - \log_{10} \frac{H_0 \tan\beta}{d} \right\}$	汀線の最終変化量表示式																
7		砂村・堀川ら ⁶⁾ (1975)	$\frac{H_0}{L_0} = C_1' \tan\beta^{-0.27} \left(\frac{d}{L_0}\right)^{0.67}$	汀線の前進・後退の限界式 <table border="1"> <tr> <td>定数</td> <td>実験</td> <td>現地海岸</td> <td>汀線移動</td> </tr> <tr> <td>></td> <td>10</td> <td>18</td> <td>後退</td> </tr> <tr> <td>$C_1' =$</td> <td>3~10</td> <td>9~18</td> <td>前進or後退</td> </tr> <tr> <td><</td> <td>3</td> <td>9</td> <td>前進</td> </tr> </table>	定数	実験	現地海岸	汀線移動	>	10	18	後退	$C_1' =$	3~10	9~18	前進or後退	<	3	9	前進
定数		実験	現地海岸	汀線移動																
>	10	18	後退																	
$C_1' =$	3~10	9~18	前進or後退																	
<	3	9	前進																	
8	伊藤・増田 ⁷⁾ (1982)	汀線移動量を 10 変数多項式で表示	基本的には、無次元量 $\frac{H_0}{L_0}, \frac{d}{H_0}, \frac{h}{L_0}, i_0, \frac{\sqrt{gH_0d}}{\nu}$ で構成される多項式																	
9	海 浜 断 面 形 状 (バ ー 型 あ る い は ス テ ノ ブ 型 地 形)	Johnson, J. W. ⁸⁾ (1949)	$\frac{H_0}{L_0} > 0.03$ Storm beach $\frac{H_0}{L_0} = 0.025 \sim 0.03$ Transition $\frac{H_0}{L_0} < 0.025$ Ordinary beach																	
10		Rector, R. L. ¹⁾ (1954)	$\frac{h_B}{L_0} = 0.223 \left(\frac{H_0}{L_0}\right)^{0.5} \left(\frac{d_{50}}{L_0}\right)^{-0.10} \left(\frac{L_B}{L_0}\right)^{-0.62} (H_0/L_0)^{-0.05}$	L_B : berm crest からの水平距離 h_B : 海底から berm 頂までの鉛直距離 沖浜の海浜断面形状表示式																
11		岩垣・野田 ⁴⁾ (1961)	$\frac{z}{L_0} = f\left\{ \frac{H_0}{L_0}, \frac{d_m}{H}, \frac{i}{T}, \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1\right), \frac{\nu}{d_m \sqrt{gH_0}}, i_0 \right\}$	$\frac{H_0}{L_0}$ と $\frac{d_m}{H}$ との関係で沿岸砂州の発生限界を表示																
12		Nayak, I. V. ³⁾ (1970)	沿岸砂州の発生限界を $\frac{H_0}{L_0}$ と $\frac{H_0}{sd}$ との関係で図示																	
13		Dean, R. G. ⁹⁾ (1973)	$\frac{H_0}{L_0} > 1.7 \frac{\pi w}{gT}$ Normal profile $\frac{H_0}{L_0} < 1.7 \frac{\pi w}{gT}$ Storm profile	$\frac{H_0}{L_0}$ と $\frac{\pi w}{gT}$ との関係図で Normal-Storm profile を分類し、関係式を提示																
14		Coastal Engineering Reserch Center ¹⁰⁾ (1977)	$\frac{H_0}{wT} > 1 \sim 2$ Bar type $\frac{H_0}{wT} < 1 \sim 2$ Berm type	$\frac{H_0}{L_0}$ と $\frac{H_0}{wT}$ との関係図で Bar-Berm の分類																
15	砂村・堀川 ¹¹⁾ (1974)	$\frac{H_0}{L_0} = C_2 \tan\beta^{-0.127} \left(\frac{d}{L_0}\right)^{0.67}$ $C_2 = 4 \sim 8$ Type I $C_2 = 4 \sim 8$ Type II $C_2 < 4$ Type III	実験資料の海浜断面形を Type I, II, および III に分類・図示し、限界式を表示																	
16	尾崎・渡辺 ¹²⁾ (1976)	$\left(\frac{H_0}{L_0}\right)^{0.96} \frac{\sqrt{gH_0d}}{d^{1.8}} \tan\beta > 64$ Type I (汀線後退) $\left(\frac{H_0}{L_0}\right)^{0.96} \frac{\sqrt{gH_0d}}{d^{1.8}} \tan\beta < 64$ Type II or III (汀線前進)	この式は次元を有する																	

No	特性	研究者 (発表年)	特性表示式あるいは図	備考
17	海浜断面形状 (バ型地形あり)	尾崎・渡辺 ¹³⁾ (1978)	$\frac{d_{50}}{H_0} > 0.0073 \quad \text{Type III}$ $\frac{d_{50}}{H_0} = 0.002 \sim 0.0073 \quad \text{Type I} \sim \text{II}$ $\frac{d_{50}}{H_0} < 0.002 \quad \text{Type I}$	碎波帯相似パラメータ $\left(\frac{\tan \beta}{\sqrt{H_0/L_0}}\right)$ と $\frac{d_{50}}{H_0}$ との関係で、Type の分類を試みたが、碎波帯相似パラメータの影響は見出されなかった
18		服部・川又 ¹⁴⁾ (1978)	$\frac{H_0}{L_0} \tan \beta > \quad \text{侵食性海浜}$ $= 0.5 \quad \text{平衡性海浜}$ $\frac{w}{gT} < \quad \text{堆積性海浜}$	碎波帯内の海浜形状を対象にして、実験資料を分類図示
19	数値海浜計算状 形による示	Swart, D. H. ¹⁵⁾ (1976)	D-Profile 侵食性の海岸について、波の遡上最高点と沖で漂砂の移動が顕著でなくなる点までの海浜断面形状を実験値にもとずけて表示	
20		柴山・堀川 ¹⁶⁾ (1982)	入射波浪の浅海変形・底面流速の時間波形および漂砂量を用いて、海浜変形の数値シミュレーション	
21	海浜断面形状 の特異点	Rector, R. L. ¹⁾ (1954)	$\frac{\bar{h}}{L_0} = 3.5 \left(\frac{H_0}{L_0}\right) \left(\frac{1000 d_{50}}{L_0}\right)^{-0.75} \left(\frac{H_0}{L_0}\right)^{0.20}$	沖で海浜変形が顕著になる地点の水深
22		Hallermeir, R. J. ¹⁷⁾ (1978)	$\frac{\bar{h}}{H_0} = 2.28 - 10.9 \frac{H_0}{L_0}$	$H_0 \approx H_e$ (局所的有義波高), $T \approx T_e$ (局所的有義波周期) として変形
23		権木 ¹⁸⁾ (1961)	(1) $U_c^* d / \nu < 10$; $U_c^{*2} / \left\{ \left(\frac{g}{\rho} - 1\right) g d \right\} = 0.114 (U_c^* d / \nu)^{-2/3}$ (2) $10 < U_c^* d / \nu < 60$; $U_c^{*2} / \left\{ \left(\frac{g}{\rho} - 1\right) g d \right\} = 0.028$	限界掃流力と粒子 Reynolds 数との関係で漂砂の移動限界水深を表示
24	漂砂の移動 限界水深	佐藤・田中 ¹⁹⁾ (1962)	$\frac{H_0}{L_0} = \alpha \left(\frac{d}{L_0}\right)^n \left(\sinh \frac{2\pi h_1}{L_0}\right) \frac{H_0}{H}$	実験および現地海岸観測により漂砂の移動限界式を表示 $n = 1/3$ $\alpha \begin{cases} 0.565 \text{ (実験)} \\ 1.35 \sim 2.4 \text{ (現地海岸)} \end{cases}$
25		堀川・渡辺 ²⁰⁾ (1966)	(1) $\frac{H_0}{L_0} \left(\sinh \frac{2\pi h_1}{L_0}\right)^{-1} \left(\frac{H}{H_0}\right) = \left(\frac{2s}{\pi B'}\right)^{\frac{1}{2+A'}} \cdot \left(\frac{d}{L_0}\right)^{\frac{1+A'}{2+A'}}$ $\cdot \left(\frac{d}{\delta}\right)^{\frac{A'}{2+A'}}$ (2) $\frac{H_0}{L_0} \left(\sinh \frac{2\pi h_1}{L_0}\right) \left(\frac{H}{H_0}\right) = \left\{ \frac{2(1+A')s}{\pi B'} \right\}^{\frac{1}{2+A'}} \left(\frac{d}{L_0}\right)^{\frac{-1+A'}{2-A'}}$ ここに、 $\delta = \sqrt{\nu T / \pi}$, A' , B' は定数	底面の状態によって次の値を取る 層流: $A' = 1, \log_{10} B' = 1.075$ 滑面乱流: $\begin{cases} A' = -0.74 \\ \log_{10} B' = 0.508 \end{cases}$ 粗面乱流: $\begin{cases} A' = -0.53 \\ \log_{10} B' = 0.322 \\ A' = -0.45 \\ \log_{10} B' = 0.176 \end{cases}$
26	漂砂の移動方向	Rector, R. L. ¹⁾ (1954)	$\frac{d_{50}}{L_0} < 0.0146 \left(\frac{H_0}{L_0}\right)^{1.25} \quad \text{沖向き}$ $> \quad \text{岸向き}$	
27		Ippen & Eagleson ²¹⁾ (1955)	$\frac{H}{h_N} > 3.4 \left(\frac{H}{L} \frac{w}{C}\right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{岸向き}$ $< \quad \text{沖向き}$	Null point (砂粒子の移動変位の平均が0となる点)
28		Dean, R. G. ⁹⁾	$\frac{H_0}{L_0} > 1.7 \quad \frac{\pi w}{gT} \quad \text{岸向き}$ $< \quad \text{沖向き}$	

って、原因別にその大きさを計算することができず、一般に計算では除去することができない。

c) 過誤 (mistake) による誤差

この誤差は、測定機械の操作、読み取り、記録の各段階および計算処理過程で生じる誤差である。したがって、注意深く行なえば、除去可能で、理論的に誤差として取扱うべきものでない。また、その性質からして誤差の大きさを数値的に解析することが困難である。この誤差は、同一の測定条件で繰り返し測定することにより見出すことができる。

以上、3種類誤差の中で、a) および c) は実験の工夫や馴れによって取り除くことができるが、b) の偶然誤差はこれが不可能である。海浜変形の相似則を実験的に究明する場合、すなわち原型と模型の海浜断面形状の相似性を比較するときには誤差を考慮して判定しなければならない。さらに、模型実験結果から現地海岸の変形予測をするときにもこの偶然誤差の量的な大きさが無視できない。このように、海浜変形の実験に付随する除去不可能な偶然誤差を定量的に表わす。

(2) 実験装置および実験方法

図-2.1に示す長さ30m、幅1mおよび深さ1mの鋼鉄製片面ガラス張りの逆フラッター式の造波機

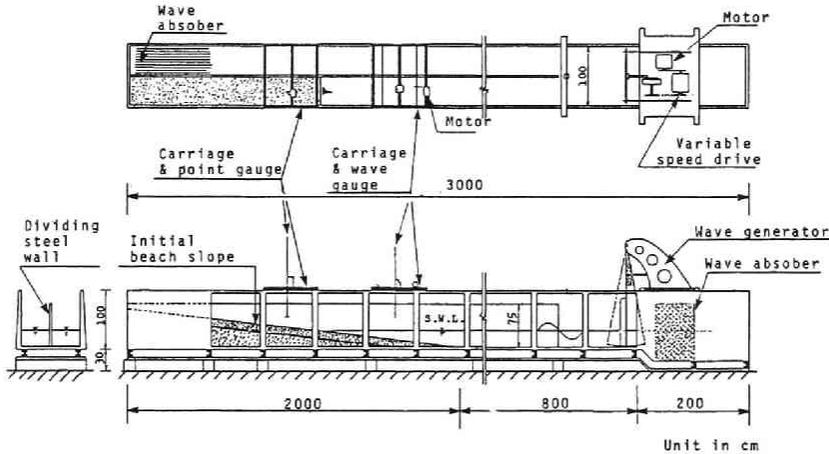


図-2.1 実験装置の概略図

を有する造波水路内を長さ方向に幅約50cmに中仕切板で2分し、その片側部分を使用した。海浜断面形状の測定は、ポイントゲージを改良した砂面測定器を用いた。また、抵抗線式波高計および容量式波高計を移動用測定台車に取付け、沖→岸および岸→沖に一定速度で移動させて、波の包絡線を熱ペン式レコーダーに記録した。

実験は、表-2.2に示すように Series A と B に分け、一樣な初期勾配 i_0 の海浜を造り、水槽水平床部の水深 h 、波高 H および周期 T などの実験条件を固定して、4~6回の繰り返しを行った。Series A の実験では、初期浜勾配に波を24時間作用させて、海浜断面形状、砕波点の位置、砕波高などの砕波特性および波の包絡線を測定した。さらに、波を作用させて、48時間後にも同様の測定を行った。一方、

表-2.2 繰り返し実験条件の1例

Series	Run No.	Initial beach slope i_0	Grain size d_{50} (mm)	Wave height in deep water H_0 (cm)	Period T (sec)	Wave steepness in deep water H_0/L_0	Water depth h (cm)	Wave duration time t (hrs)	Repeated runs
A	3M-28	1/30	0.42	6.0	1.73	0.013	33.3	24 & 48	5~6
	4M-18			6.5	1.15	0.032	33.3		
	6M-17			12.6	0.95	0.064	25.0		
	3M-23	1/15	0.35	7.3	1.76	0.015	34.5		
	4M-14			6.5	1.15	0.033	33.3		
	6M-14			9.0	1.12	0.064	35.0		
B	TM-27	1/15	0.35	12.1	3.57	0.0061	42.7	24	4
	TM-57			21.9	1.98	0.036	55.3		

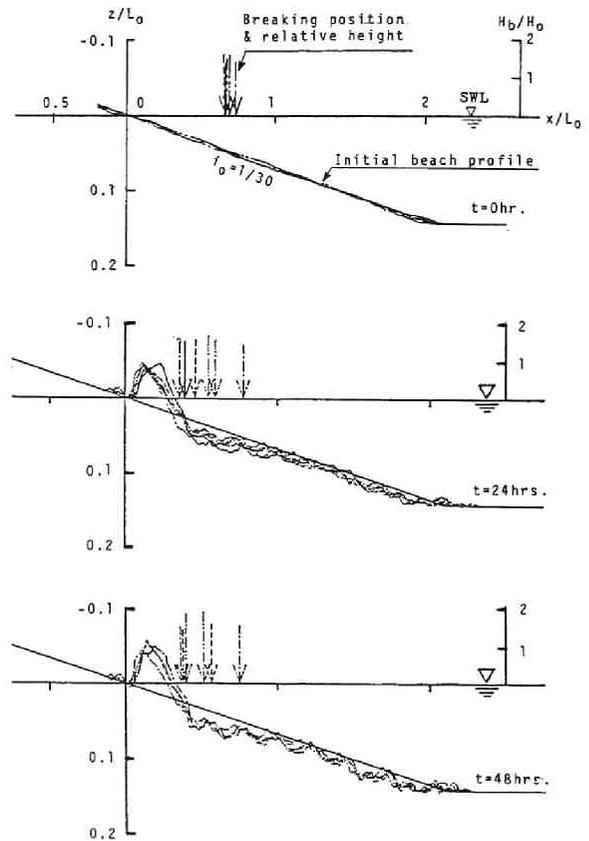
1) Sorting coef.=1.19, specific gravity=2.68
 2) " " =1.12, " " =2.55 sand
 3) " " =1.57, " " =2.37 mesa-light

Series Bの実験では、砂より若干比重の軽い(空中比重2.37)のメサライトを底質として使い、波の作用24時間後に測定を行った。

(3) 実験結果およびその解析

a) 実験結果

繰り返し実験結果の例として、表-2.2のRun No. 3M-28および砂より比重が若干軽いメサライト砂を使用した場合のRun No. TM-57が図-2.2および2.3に示してある。いずれの実験も初期浜勾配は繰り返しを通じて出来る限り同一になるようにしたが、図2.2および2.3に見られるような微小な相違が生じた。図-2.2(a)の海浜断面形状と(b)図の波の包絡線は右左対応させてある。この図から、波の包絡線は波の作用時間が $t = 0 \rightarrow 24 \rightarrow 48$ hrs.と変化しても繰り返しによる相違は一定である。しかし、(a)図の海浜断面形状と矢印で示した碎波点の位置は波の作用時間に伴って変動している。 $t = 0$ hr. における碎波点の位置、碎波高および波の包絡線は相互に微小な相違が生じている²⁵⁾。この程度の碎波特性(碎波点の位置)の相違は、固定床実験にも見られる。波の作用時間が $t = 24$ hrs. さらに48 hrs. になると、繰り返しによる海浜断面形状および碎波特性の相違が



(a) 海浜断面形状と碎波特性

図-2.2 繰り返し実験による海浜断面形状、碎波特

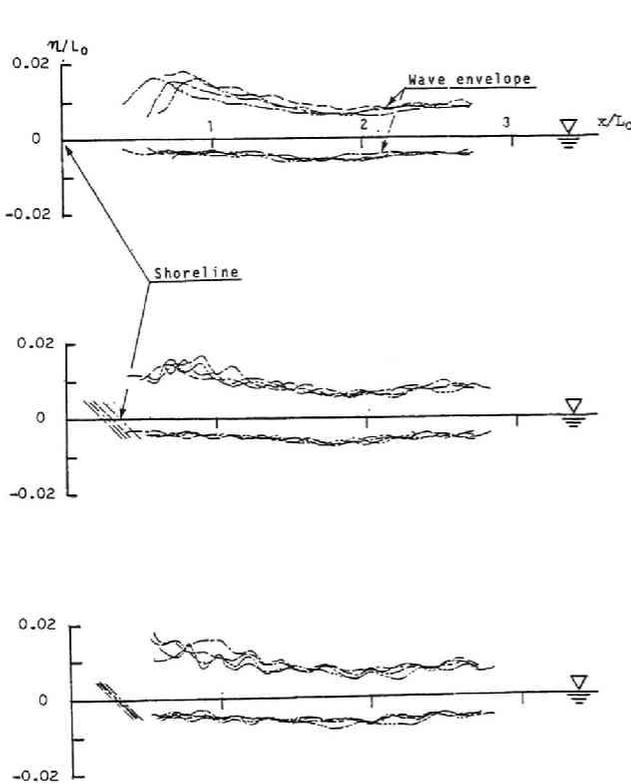
はっきり現われている。このような相違は、図-2.3に示したように、メサライト砂 ($s' \approx 2.4$) を用いた繰り返し実験にも見られる²⁶⁾。

いま、汀線移動量 $X_{s,l}$ 、berm 頂の位置 B_x 、berm 頂の高さ B_z 、砕波点の位置 X_b 、および海浜変形の起点水深 \bar{h}_i をそれぞれ図-2.4のように定め、これらの特性を無次元表示し、その経時変化 ($t = 24, 48 \text{ hrs.}$) を図-2.5に示してある。この図には、後述3.3節の表-3.2中の Run No. 3M-23' の実験結果 ($t = 0 \sim 35 \text{ hrs.}$) の経時変化が併示してある。この図から、波の作用時間 $t/T \geq 10,000$ になると海浜の変形および砕波点の位置はほとんど平衡になるが、繰り返し実験によるばらつきは、波の作用時間にあまり関係なく生じていることがわかる。このようなばらつきは、波を77時間作用させた Smithら²³⁾の実験結果にも現われている。

b) 実験誤差の解析法

実験誤差の解析法には、平均自乗誤差 (error of mean square) 確率誤差 (probable error) および平均誤差 (mean error) の3種類がある。

(i) 平均自乗誤差 Gaussは、この誤差を mean error と呼んでおり、標準偏差に等しく、次式で定義している。



(b) 波の包絡線

性、および入射波の包絡線の相違 (Run No. 3M-28)

$$\epsilon_{e.m.s} = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m)^2}{n}} \quad (2.1)$$

ここに、 x_i は i 番目の測定値、 m は真の値、 n は測定回数である。測定値が $\pm \epsilon_{e.m.s}$ の範囲に入る確率は約 68% である。式 (2.1) で m は未知であるので、これを有限個の平均値 $\bar{x} (= \sum_{i=1}^n x_i / n)$ であらわすと、次式のようにになる。

$$\epsilon'_{e.m.s} = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2.2)$$

(ii) 確率誤差 平均自乗誤差に $0.6745 \cdot \epsilon_{e.m.s}$ を乗じたもので、

$$\epsilon_p = \pm 0.6745 \epsilon_{e.m.s} \quad (2.3)$$

で表わされ、公算誤差あるいは蓋然誤差とも呼ばれる。実際の使用には、

$$\epsilon'_p = \pm 0.6745 \epsilon'_{e.m.s} \quad (2.4)$$

が用いられる。

(iii) 平均誤差 偏差の絶対値の平均で表わされ、平均偏差 (mean deviation) に等しく、

$$\epsilon = \pm \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - m|}{n} \quad (2.5)$$

で表わされ、 n が十分大きくなると、この値は $\pm 0.7979\sigma$ (σ : 標準偏差値) に近づき、この範囲内に測定値の約58%が入る。実際の計算には、

$$\epsilon' = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{n} \quad (2.6)$$

すなわち、平均残差 (mean residual) が用いられる。

海浜の変形を取扱う実験では、実験の所要時間が一般に24~28時間あるいはこれ以上にも及ぶので、繰り返し数を十分多くすることが難しい。そこで、(i)~(iii)の誤差の中でこの種の実験資料の解析に相当と考えられる式(2.6)を使用する。

したがって、この式で求めた海浜変形の偶然誤差を以下単に実験誤差と呼ぶことにする。

(4) 海浜断面形状の実験誤差

図-2.4で定義した海浜変形を次のような無次元量で表示し、実験誤差を定量的に評価しよう。

無次元汀線移動量 $X_{s,i}/L_0$ は、初期勾配からの移動量を前進の場合「正」、後退の場合「負」として表わす。berm頂の位置は初期汀線からの水平距離とし、汀線より沖方向を「正」として、無次元量 B_x/L_0

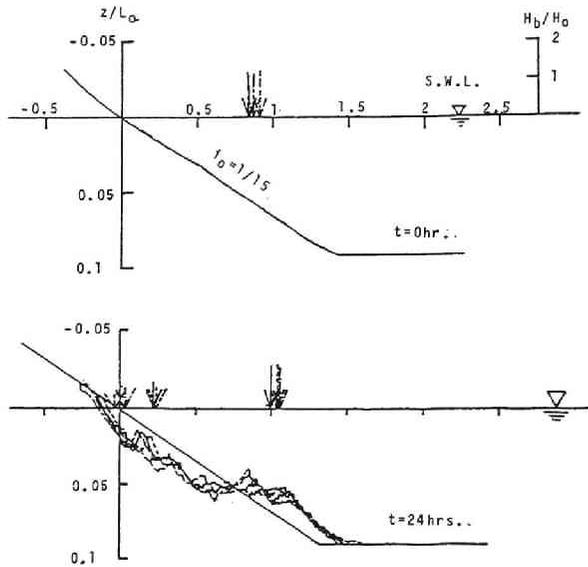


図-2.3. 繰り返し実験による海浜断面形状および碎波特性の相違 (Run No. TM-57)

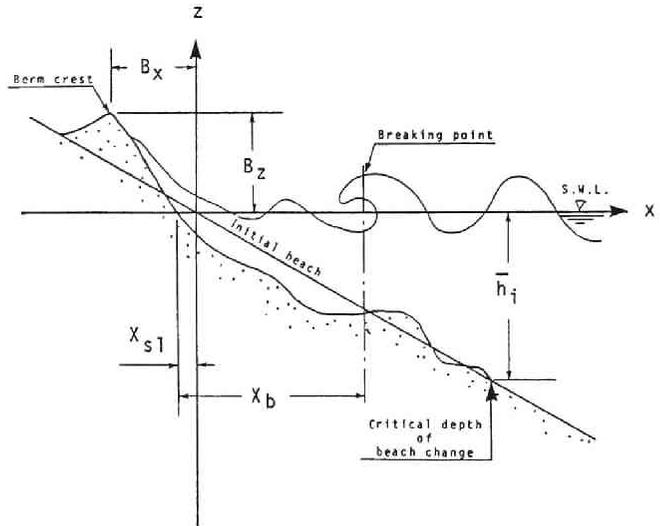


図-2.4 海浜変形および碎波特性の定義図

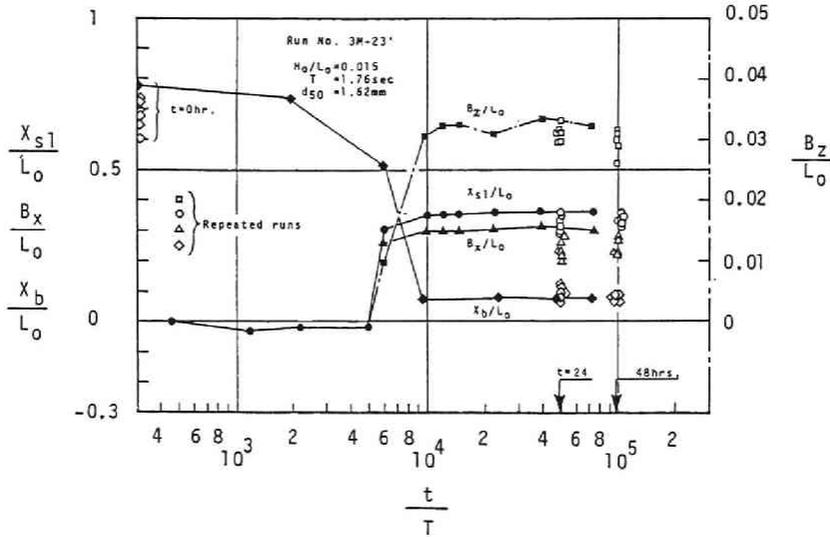


図-2.5 繰り返し実験による海浜断面の特性および砕波点位置の経時変化

で表わし、また berm 頂の高さは静水面からの高さとして、無次元量 B_z/L_0 で表わす。特に、ここでは berm が発生しない場合は外象外とした。海浜変形の起点いわゆる無次元変形限界水深 \bar{h}_i/L_0 は、沖側で初期海浜勾配から海浜の変形が顕著になる点の水深とした。

繰り返し実験によるばらつきを式(2.6)で計算した実験誤差をそれぞれ、 $\epsilon' \Delta X_{s1}/L_0$ 、 $\epsilon' \Delta B_x/L_0$ 、 $\epsilon' \Delta B_z/L_0$ 、および $\epsilon' \Delta \bar{h}_i/L_0$ で表わし、沖波波形勾配 H_0/L_0 との関係で、図-2.6 (a)~(d) に示してある。これらの図中には、参考までに完全な繰り返し実験ではないが、Watts²⁷⁾による波の周期を作為的に変化させたものや、玉井²⁸⁾による beach cusp を取扱った三次元平面実験結果も含めてある。実験結果の整理に際して、沖波波高 H_0 と底質粒径 d とその水中比重 s との比、 $H_0/sd = 60$ ($s = \sigma/\rho - 1 = 1.65$ の砂の場合、 $H_0/d \approx 100$ に相当する値) で、図中の記号の大きさを区分し、また、初期汀線から前進および後退が明示してある。このようにしてプロットした実験結果のばらつきの最大値を包含する線を図中に実線で示す。これらの図からは、 H_0/sd (粒径波高比) や i_0 (初期浜勾配) が実験誤差に及ぼす影響を見出せなかった。

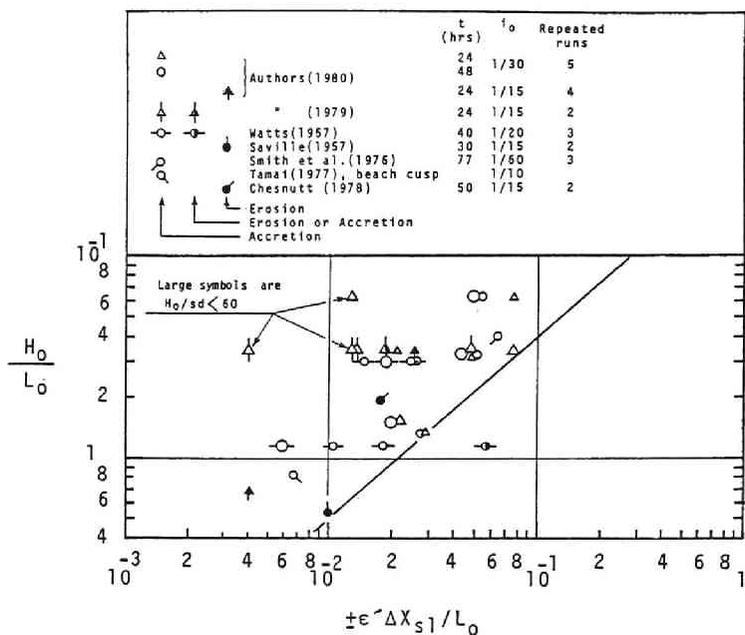
図-2.6 (a)~(d) 中に示した実線、すなわちそれぞれの実験誤差の最大値は、沖波波形勾配との関係式で次のように表わせる。

$$\epsilon' \Delta X_{s1}/L_0 = \pm 5.7 (H_0/L_0)^{1.20} \quad (2.7)$$

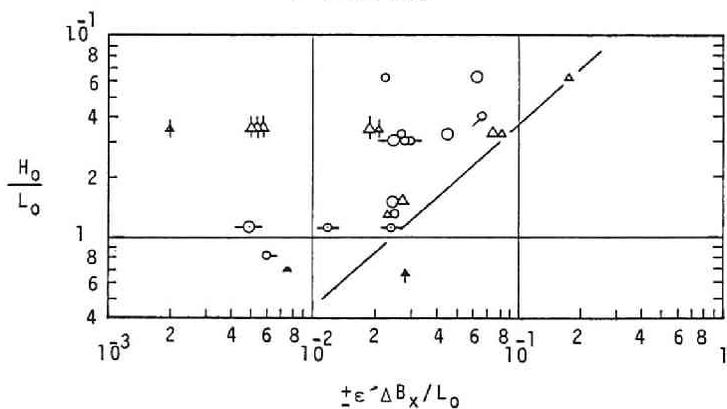
$$\epsilon' \Delta B_x/L_0 = \pm 4.0 (H_0/L_0)^{1.10} \quad (2.8)$$

$$\epsilon' \Delta B_z/L_0 = \pm 0.0094 (H_0/L_0)^{0.24} \quad (2.9)$$

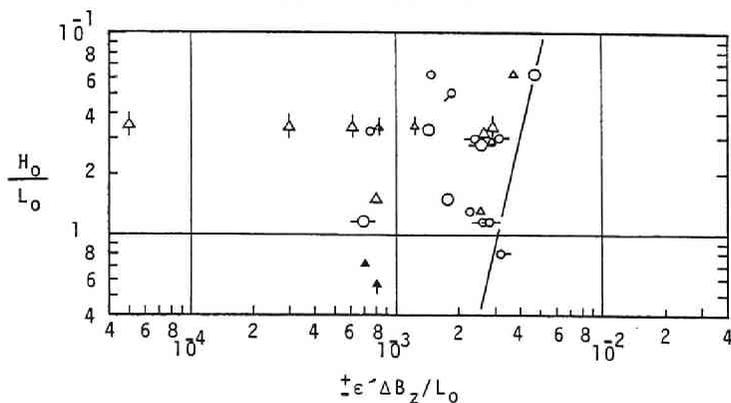
$$\epsilon' \Delta \bar{h}_i/L_0 = \pm 0.031 (H_0/L_0)^{0.23} \quad (2.10)$$



(a) 汀線移動量

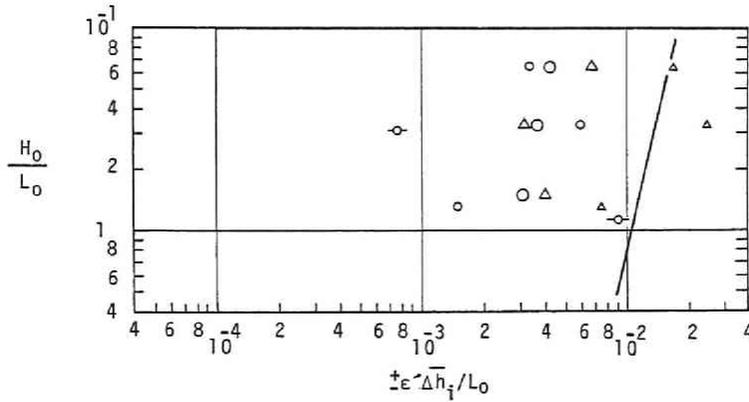


(b) berm頂の位置



(c) berm頂の高さ

図-2.6 海浜変形断面の実験誤差(つづく)



(d) 海浜の変形限界水深

図一 2.6 海浜変形断面の実験誤差

(5) 砕波の実験誤差

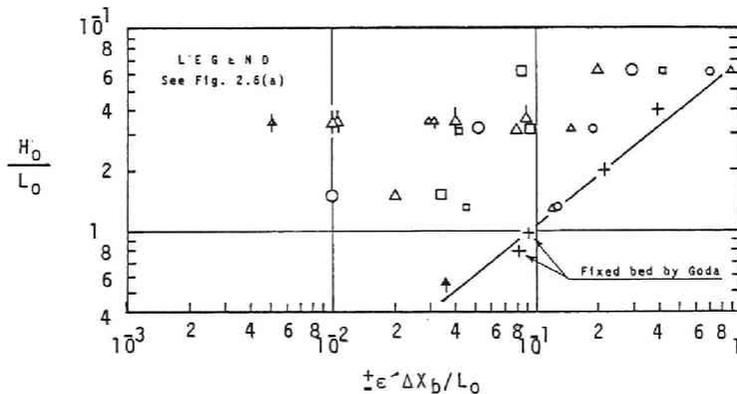
海浜の断面形状と同じように図一 2.2 および 2.3 から、砕波点の位置および砕波高にもかなりのばらつきがあることがわかる。砕波の特性を代表する砕波点の位置の実験誤差について検討する。

砕波点が 2 つ以上存在する場合は、主たる砕波点（沖側の第 1 砕波点）を対象とし、図一 2.4 のように汀線から砕波点までの無次元距離 X_b/L_0 を砕波点の位置とする。海浜の変形に伴う砕波点 X_b/L_0 の経時変化が図一 2.5 に示してある。砕波点の実験誤差 $\epsilon' \Delta X_b/L_0$ を式 (2.6) で計算し、沖波波形勾配との関係で図一 2.7 に表わしてある。この図には、合田²⁹⁾による固定床における実験結果が併示してあるが、移動床の実験誤差は固定床より小さくなる傾向にある。この実験誤差のばらつきを包含する線が図中に実線で示してあるが、これは沖波波形勾配との関係で次のように表わされる。

$$\epsilon' \Delta X_b/L_0 = \pm 27.5 (H_0/L_0)^{1.24} \quad (2.11)$$

(6) 各種実験誤差の比較検討

海浜断面形状の特性ならびに砕波点の位置の実験誤差は、式 (2.7) ~ (2.11) で表わすことができる



図一 2.7 砕波点の位置の実験誤差

が、これらはいずれも次のような一般式で表わされる。

$$\epsilon' = \pm a (H_0/L_0)^b \quad (2.12)$$

ここに、 a は定数、 b は指数である。各実験誤差を水平方向と鉛直方向の変動に分けると、表-2.3に示すようになる。

この表から、水平方向の変化を表わす汀線移動、berm頂の位置および砕波点の位置の各実験誤差はそれぞれの指数が同程度の値であり、特に汀線移動とberm頂の位置は定数 a も同程度の値となっている。また、鉛直方向の変化を表わす berm 頂の高さおよび海浜変形の限界水深についても同程度の指数になっていることが興味深い。このことは各実験誤差を一括して表わした図-2.8からも容易に理解できる。

表-2.3 式(2.12)中の a および b の値

変動方向	実験誤差	a	b
水平	$\epsilon' \Delta X_{s,e} / L_0$	5.7	1.20
	$\epsilon' \Delta B_x / L_0$	4.0	1.10
	$\epsilon' \Delta X_b / L_0$	27.5	1.24
鉛直	$\epsilon' \Delta B_z / L_0$	0.0094	0.24
	$\epsilon' \Delta \bar{h}_i / L_0$	0.031	0.23

実験誤差の原因について、合田³⁰⁾は、特に波の周期および波高の変動を実験的に調べ、電源の電圧および周波数の変動に伴うモーター回転変動、造波水槽内の反射波による部分重複波の形成、波の進行に伴う変形および水路内の横方向の波の変化をあげている。また、Smithらは造波水槽内の静水位の微小な違い(1cm以下)を、Clesnuttは造波水槽の幅、初期汀線から造波板までの距離および実験中の水温変動などによる影響を指摘している。しかし、本研究の繰り返し実験ではモーターの回転変動はほとんど無く造波水槽の幅および初期汀線から造波板までの距離などがすべて固定して行うとともに、実験中の水温変動は5°C以内であった。このように繰り返し実験中の条件はできる限り一定にして行っただが、不可避な偶然誤差が発生している。この原因については、2.3(1)b)で述べた理由によるものが考えられるが、このような原因による各種の実験誤差は沖波波形勾配との関係で定量的に表示できた。

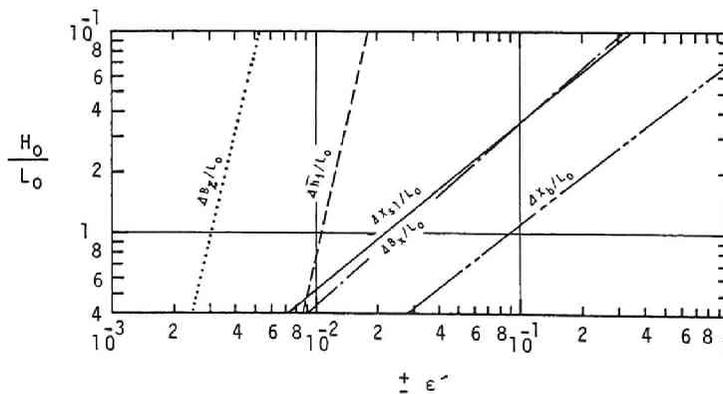


図-2.8 各実験誤差の比較

2.4 海浜変形に及ぼす諸因子の影響

(1) 実験計画法^{31), 32)}

実験計画法 (design of experiments) は、1920年頃に Fisher によってその基礎が確立された。当初は農業試験に用いられていたが、第2次大戦以後は工場試験などに広く取入れられている。

この方法は、実験結果 (特性値) に影響を及ぼす原因を寄与率および要因効果として量的に表示し、諸原因と結果との間の最適条件あるいは最悪条件を容易に求めることができる。この方法は適用に際して、研究対象の現象がある程度限定されるが、次のような特色を有している。

- ① 現象を構造模型式 (mathematical model) で仮定し、この式にもとづいて解析、表示する。
- ② 構造模型式は、因子の単独効果および因子相互の交互作用 (相乗作用あるいは相殺作用) から成っている。
- ③ 因子が相当多くても取扱うことができ、実験順序については無作為に行い、いわゆる無作為化の原理に従う。

このように、実験計画法は推測統計的手段により実験条件を合理的に割付けて実験を行い、実験結果を分散分析することができる。したがって、この方法を用いて海浜変形に及ぼす諸因子の影響を調べると次のことが明らかにできる。

- ① 海浜変形に対して相対的に大きな影響を及ぼしている因子は何か。
- ② その因子がどの程度の影響を与えているか。
- ③ 一方、影響を与える因子および実験誤差は全体としてどの程度存在するか。

a) 実験計画法を適用するための因子の抽出法^{33), 34)}

一般に海浜変形には非常に多くの因子が関与しているが、二次元海浜変形に限定して、海浜変形にある程度の影響を与え、実験的に因子の大きさを変化させることができるものを実験因子とする。一様な初期浜勾配に規則波を作用させた場合の海浜変形は、岩垣・野田³⁵⁾の次元解析を参考にして、次式で表わされる。

$$\frac{z}{L_0} = f_1 \left(\frac{x}{L_0}, \frac{h}{L_0}, \frac{d}{H_0}, i_0, \frac{H_0}{L_0}, \frac{t}{T}, \frac{\sigma}{\rho} - 1, \frac{\sqrt{gH_0} d}{\nu} \right) \quad (2.13)$$

ここに、 z ; 海浜の対象地点における静水面からの深さ、 x ; 対象地点までの汀線からの距離、 L_0 ; 沖波波長、 h ; 造波水槽水平床部の水深、 d ; 底質の粒径、 H_0 ; 沖波波高、 i_0 ; 初期浜勾配、 t ; 波の作用時間、 T ; 波の周期、 σ/ρ ; 底質の比重、 ν ; 動粘性係数および g ; 重力の加速度である。海浜の変形が初期海浜勾配の範囲内で起り、水の動粘性の影響が無視できるものとする、式(2.13)中の h/L_0 および $\sqrt{gH_0} d/\nu$ の項は無視できる。さらに、図-2.9で示す比重 ($s' = \sigma/\rho$) の等しい2種類の底質砂を実験に用いると、 $(\sigma/\rho - 1)$ の効果は省略できる。したがって、任意の地点 (x/L_0) における初期海浜からの鉛直方向の変化量 $\Delta z/L_0$ は、次のように表わされる。

$$\frac{\Delta z}{L_0} = f_2 \left(\frac{x}{L_0}, \frac{d}{H_0}, i_0, \frac{H_0}{L_0}, \frac{t}{T} \right) \quad (2.14)$$

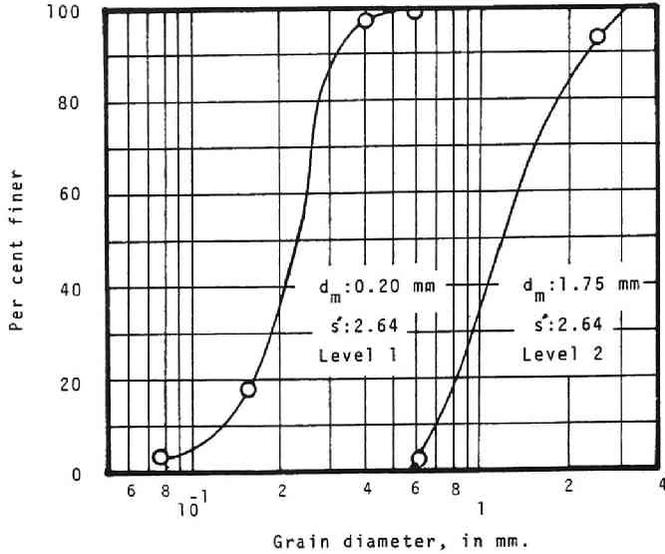


図-2.9 実験に使用した底質砂の粒径分布

結局、位置 x/L_0 における海浜の変化量 $\Delta z/L_0$ は d/H_0 、 i_0 、 H_0/L_0 および t/T の4個の因子で表わせる。実験計画法に従って、実験および解析を行なうための第1段階として、4個の因子を直交配列に割付ける。この割付けに先だって、実験因子は次の①～⑤の内容を持つものとする。

- ① 底質粒径 d_{50} : 図-2.9の粒径分布を持つ川砂で、 $(d_{50})_1 = 0.20\text{ mm}$ ($d_m = 0.20\text{ mm}$) および $(d_{50})_2 = 1.20\text{ mm}$ ($d_m = 1.75\text{ mm}$)。ここで添字1および2は実験因子の水準値を表わす。
- ② 初期浜勾配 i_0 : 造波水槽の長さから規定される2種類の一様斜面 $(i_0)_1 = 1/10$ および $(i_0)_2 = 1/18$ 。
- ③ 沖波波形勾配 : 造波機の機能と水槽の長さから定まる表-2.4の特性を持った $(H_0/L_0)_1 = 0.0054$ および $(H_0/L_0)_2 = 0.0314$ の2種類の波。
- ④ 波の作用時間 t : 一様な初期海浜に波を8時間作用させると海浜の変形はある程度平衡状態に近

表-2.4 実験波の特性

Factor	Period T (sec)	Wave length in deep water Lo (m)	Wave height in deep water Ho (cm)	Wave steepness in deep water Ho/Lo	Water depth h (cm)
Level 1:[C] ₁	2.84	12.58	6.76	0.0054	45
Level 2:[C] ₂	1.90	5.63	17.66	0.0314	45

づくので、この間を $(t)_1 = 0.5 \text{ hr.}$, $(t)_2 = 1 \text{ hr.}$, $(t)_3 = 2 \text{ hrs.}$, $(t)_4 = 4 \text{ hrs.}$, $(t)_5 = 6 \text{ hrs.}$, および $(t)_6 = 8 \text{ hrs.}$ に区切って海浜断面形状を測定する。

以上の内容を持つ d_{50} , i_0 , H_0/L_0 , および t を実験因子とし、波の作用時間は6水準とし、他はすべて2水準とする。これらの実験因子と水準値が表-2.5 にまとめてある。

b) 実験因子の直交配列表 (orthogonal array table) への割付け

直交配列表³⁶⁾には、 $L_4(2^3)$, $L_8(2^7)$, $L_{16}(2^{15})$, $L_{64}(2^{63})$, $L_9(3^4)$, $L_{27}(3^{13})$ および $L_{81}(3^{40})$ などがあるが、本研究では $L_8(2^7)$ を用いることにする。この直交配列表は8行7列で、0と1の水準値を0→1, 1→2に変えた表-2.6を使用する。この表中の Col. No. [1] に d_{50} , Col. No.[2] に i_0 , Col. No. [4] に H_0/L_0 , および表の右側の欄外へ t の各実験因子を割付けたものが表-2.7である。

参考までに、 $L_8(2^7)$ 直交配列表に割付けた実験因子について、Johnson⁸⁾ および岩垣・野田⁴⁾ による沿岸砂州の発生限界との比較が図-2.10に示してある。図中の No. は表-2.7の No. を示している。この図から、実験因子は正常海浜と暴風海浜の両方に位置していることがわかる。

各実験因子を直交配列表に割付けた表-2.7にもとづいて実験を行うために、2.4(1)㉑の無作為化の原理として、乱数表を使って実験順序 (Run No.) を決めたので、表-2.7中の Experi. No. と Run No. とは一致していない。

(2) 実験装置と方法

実験は、V-ベルト式無段変速機によるフラッター式造波装置を有する長さ15m、幅0.9m および深さ1mのコンクリート製の造波水槽を使用した。表-2.7の実験条件に従って一様な初期海浜を造り、所定

表-2.5 実験因子と実験条件

Experimental factors	Level value & experimental condition	Remarks
Median diameter of beach sand : d_{50}	$(d_{50})_1 = 0.2\text{mm}$ $(d_{50})_2 = 1.2\text{mm}$	Beach sands are different size distribution as shown in Fig. 2.9
Initial beach slope : i_0	$(i_0)_1 = 1/10$ $(i_0)_2 = 1/18$	Uniform flat slope
Wave steepness in deep water : H_0/L_0	$(H_0/L_0)_1 = 0.0054$ $(H_0/L_0)_2 = 0.0314$	Regular waves which have different characteristics as indicated in Table 2.4
Wave duration time : t	$(t)_1 = 0.5\text{hr.}$ $(t)_2 = 1 \text{ hr.}$ $(t)_3 = 2 \text{ hrs.}$ $(t)_4 = 4 \text{ hrs.}$ $(t)_5 = 6 \text{ hrs.}$ $(t)_6 = 8 \text{ hrs.}$	Duration time of wave is not enough long, but stoped in 8 hours through all run. Beach profile is measured at $(t)_1$, $(t)_2$, ..., and $(t)_6$, respectively.

表-2.6 $L_8(2^7)$ 直交配列表

Col. No. No.	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]
1	1 [†])	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2 [†])	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2
	A		A*		A		A*
		B	B		*	B*	B*
				C	C	C	C
	Factor effect						

†) 1 and 2 denote level of factor, respectively.

表-2.7 実験因子の直交配列表への割付けと実験順序 (Run No.)

Experi. No.	Col. NO. [1] Median diameter of beach sand d_{50}	Col. NO. [2] Initial beach slope i_0	Col. NO. [4] Wave steepness in deep water H_0/L_0	[Outside of orthogonal array] table Wave duration time t	Run No. & replication
	1	$(d_{50})_1$	$(i_0)_1$	$(H_0/L_0)_1$		$(t)_1 (t)_2 (t)_3 (t)_4 (t)_5 (t)_6$	$7 \begin{smallmatrix} -1 \\ -2 \\ -3 \end{smallmatrix}$
2	$(d_{50})_1$	$(i_0)_1$	$(H_0/L_0)_2$	. . . . .	$8 \begin{smallmatrix} -1 \\ -2 \\ -3 \end{smallmatrix}$
3	$(d_{50})_1$	$(i_0)_2$	$(H_0/L_0)_1$	. . . . .	$5 \begin{smallmatrix} -1 \\ -2 \\ -3 \end{smallmatrix}$
4	$(d_{50})_1$	$(i_0)_2$	$(H_0/L_0)_2$	. . . . .	$6 \begin{smallmatrix} -1 \\ -2 \\ -3 \end{smallmatrix}$
5	$(d_{50})_2$	$(i_0)_1$	$(H_0/L_0)_1$	. . . . .	$2 \begin{smallmatrix} -1 \\ -2 \\ -3 \end{smallmatrix}$
6	$(d_{50})_2$	$(i_0)_1$	$(H_0/L_0)_2$	. . . . .	$1 \begin{smallmatrix} -1 \\ -2 \\ -3 \end{smallmatrix}$
7	$(d_{50})_2$	$(i_0)_2$	$(H_0/L_0)_1$	. . . . .	$4 \begin{smallmatrix} -1 \\ -2 \\ -3 \end{smallmatrix}$
8	$(d_{50})_2$	$(i_0)_2$	$(H_0/L_0)_2$	$(t)_1 (t)_2 (t)_3 (t)_4 (t)_5 (t)_6$	$3 \begin{smallmatrix} -1 \\ -2 \\ -3 \end{smallmatrix}$

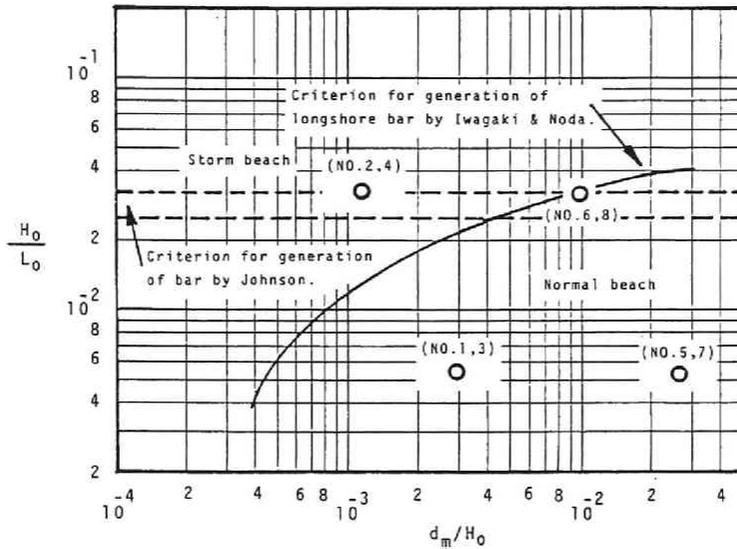


図-2.10 実験因子と沿岸砂州の発生限界との比較

の波を作用させ、0.5, 1, 2, 4, 6, および 8 時間後の各海浜断面形状をポイントゲージを用いて測定した。なお、実験の繰り返しは 3 回とした。

(3) 実験結果

実験結果は初期浜勾配の汀線を原点とし、横軸に x/L_0 、縦軸に z/L_0 を取って整理した。図-2.11 には、表-2.7 の Run No.8 の実験について波の作用時間ごとに海浜断面形状が示してある。また、 $x/L_0 = 0.2$ における初期浜勾配からの海浜の鉛直方向の変化量 $\Delta z/L_0$ が、堆積の場合を正として波の作用数 t/T との関係で図-2.12 に示してある。この図から、海浜の変化量はある程度平衡状態に達していることがわかる。

(4) 解析因子^{37), 38)}

図-2.12 で示した海浜の変化量 $\Delta z/L_0$ は、 d_{50} , i_0 , H_0/L_0 , および t の 4 個の実験因子の組み合わせで生じたものと考えることができる。 d_{50} の実験因子は表-2.7 の Experi. No. 1 ~ 4 では、 $(d_{50})_1 = 0.2 \text{ mm}$ の同一粒径であるが、

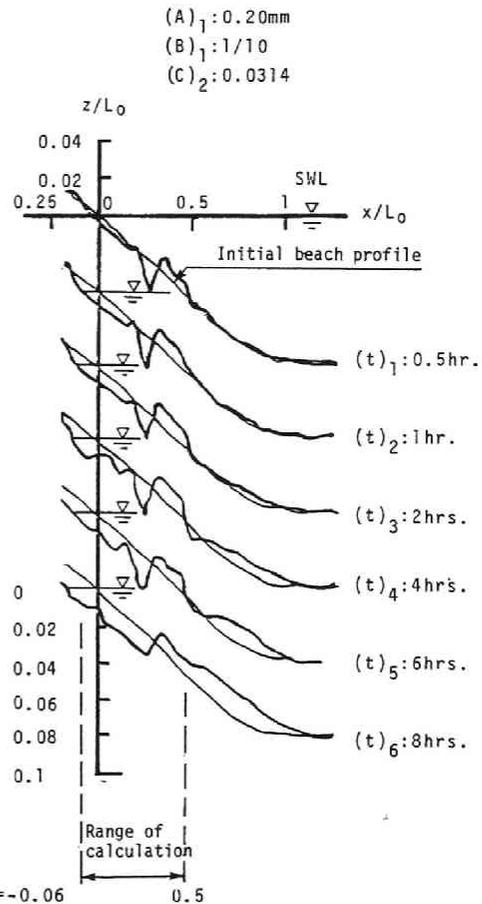


図-2.11 海浜断面形状の時間的变化 (Run No. 8)

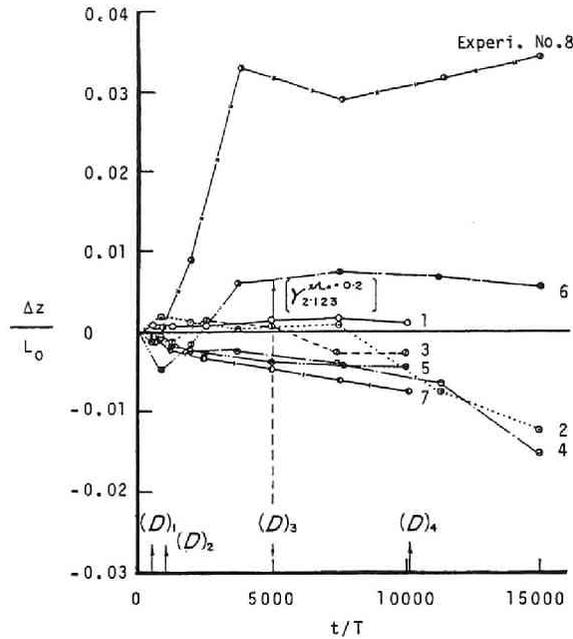


図-2.12 $x/L_0 = 0.2$ における鉛直方向の海浜
の変化量の経時変化

沖波波形勾配は Experi. No. 1と3で $(H_0/L_0)_1 = 0.0054$, また Experi. No. 2と4では $(H_0/L_0)_2 = 0.0314$ となって, 沖波波高が一定でないので, 底質粒径を d/H_0 で表わすと若干問題が生じる。そこで, 式(2.14)のように海浜の変化量に影響する因子を無次元量として取扱うために, 特に d_{50} と t の実験因子については, 次の便法を講じることにする。平均波高 $\tilde{H}_0 = [(H_0)_1 + (H_0)_2]/2$ を用いた底質の粒径波高比 d/\tilde{H}_0 を解析因子 A とする。すなわち,

$$\text{解析因子 } A \left\{ \begin{array}{l} (A)_1 : (d_{50})_1 / \tilde{H}_0 = 0.00163 \\ (A)_2 : (d_{50})_2 / \tilde{H}_0 = 0.00983 \end{array} \right\} \quad (2.15)$$

また, i_0 および H_0/L_0 の実験因子にそのまま解析因子として用いる。

$$\text{解析因子 } B \left\{ \begin{array}{l} (B)_1 : (i_0)_1 = 1/10 \\ (B)_2 : (i_0)_2 = 1/18 \end{array} \right\} \quad (2.16)$$

$$\text{解析因子 } C \left\{ \begin{array}{l} (C)_1 : (H_0/L_0)_1 = 0.0054 \\ (C)_2 : (H_0/L_0)_2 = 0.0314 \end{array} \right\} \quad (2.17)$$

実験因子 τ を無次元量 t/T とすると, 沖波波形勾配によって周期が異なる。そこで, 図-2.12 で表わされる $(D)_1 \sim (D)_4$, すなわち, 式(2.18) で表わすように所定の各波の作用数における海浜の変化量 $\Delta z/L_0$ を補間法で求める。

$$\text{解析因子 } D \left\{ \begin{array}{l} (D)_1 : (t/T)_1 = 500 \\ (D)_2 : (t/T)_2 = 1000 \\ (D)_3 : (t/T)_3 = 5000 \\ (D)_4 : (t/T)_4 = 10140 \end{array} \right. \quad (2.18)$$

図-2.12中には、位置 $x/L_0 = 0.2$ における Experi. No. 6 $\{(A)_2, (B)_1, (C)_2, (D)_3$ の組合せ}による海浜の変化量 $Y_{2123}^{x/L_0=0.2} = \Delta z/L_0$ が示してある。このように表-2.7を再整理し、解析因子 $A \sim D$ と海浜の変化量 Y との関係を表-2.8に示した。

(5) 分散分析

この分析法は、全平均値と測定値 $Y_{x_1 x_2 x_3 x_4}$ の偏差の2乗和を求め、個々の成分(解析因子)の寄与度を明らかにするものである。実験因子の水準値を実験計画法を用いて定め、組合せているので、個々の解析因子の変化が全体の変動に占める割合を容易に求めることができる。解析因子の寄与率や要因効果の算定は、F検定で有意となった場合に行う。

実験は、同一実験条件で3回の繰り返しを行ったので、任意の位置 x/L_0 における海浜の変化量の平均値 $\bar{Y}_{x_1 x_2 x_3 x_4}^{x/L_0}$ は、解析因子 A, B, C および D による $(A)_{x_1}, (B)_{x_2}, (C)_{x_3},$ および $(D)_{x_4}$ を用いて次のような構造模型式で表わせるものとする。

$$\begin{aligned} \bar{Y}_{x_1 x_2 x_3 x_4}^{x/L_0} = & m + a_{x_1} + b_{x_2} + C_{x_3} + d_{x_4} \\ & + (ab)_{x_1 x_2} + (ac)_{x_1 x_3} + (ad)_{x_1 x_4} \\ & + (bc)_{x_2 x_3} + (bd)_{x_2 x_4} + (cd)_{x_3 x_4} \\ & + (abc)_{x_1 x_2 x_3} + (abd)_{x_1 x_2 x_4} + (acd)_{x_1 x_3 x_4} + (bcd)_{x_2 x_3 x_4} \\ & + (abcd)_{x_1 x_2 x_3 x_4} \end{aligned} \quad (2.19)$$

表-2.8 解析因子 $A \sim D$ と海浜の変化量 Y との関係

Experi. No.	Col. No. [1] A d_{50}/\bar{H}_0	Col. No. [2] B i_0	Col. No. [4] C Ho/Lo	t/T				Run No.
				[0] ₁	[0] ₂	[0] ₃	[0] ₄	
				500	1000	5000	10140	
1	0.00163	1/10	0.0054	Y_{1111}	Y_{1112}	Y_{1113}	Y_{1114}	7
2	0.00163	1/10	0.0314	Y_{1121}	Y_{1122}	Y_{1123}	Y_{1124}	8
3	0.00163	1/18	0.0054	Y_{1211}	Y_{1212}	Y_{1213}	Y_{1214}	5
4	0.00163	1/18	0.0314	Y_{1221}	Y_{1222}	Y_{1223}	Y_{1224}	6
5	0.00983	1/10	0.0054	Y_{2111}	Y_{2112}	Y_{2113}	Y_{2114}	2
6	0.00983	1/10	0.0314	Y_{2121}	Y_{2122}	Y_{2123}	Y_{2124}	1
7	0.00983	1/18	0.0054	Y_{2211}	Y_{2212}	Y_{2213}	Y_{2214}	4
8	0.00983	1/18	0.0314	Y_{2221}	Y_{2222}	Y_{2223}	Y_{2224}	3

ここに、 m は一般平均、 $a_{x_1}, b_{x_2}, c_{x_3}, d_{x_4}$ はそれぞれ解析因子 A, B, C, D の効果、 $(ab)_{x_1x_2}, (ac)_{x_1x_3}, \dots, (cd)_{x_3x_4}$ はそれぞれ $A*B, A*C, \dots, C*D$ の 2 因子交互作用効果、 $(abc)_{x_1x_2x_3}, (abd)_{x_1x_2x_4}, \dots, (bcd)_{x_2x_3x_4}$ はそれぞれ $A*B*C, A*B*D, \dots, B*C*D$ の 3 因子交互作用効果、および $(abcd)_{x_1x_2x_3x_4}$ は $A*B*C*D$ の 4 因子交互作用効果である。図-2.13 で示す $-0.06 \leq x/L_0 \leq 0.5$ の範囲の汀線を含む海浜の変化量は間隔 $\Delta x/L_0 = 0.02$ ごとに式(2.19)で表示できるものとする。したがって、横軸 x/L_0 における海浜の変形量 $\bar{Y}_{x_1x_2x_3x_4}^{x/L_0}$ は、各因子の水準値がそれぞれ $x_1 = 1, 2; x_2 = 1, 2; x_3 = 1, 2; x_4 = 1, 2, 3, 4$ であるから、32 個の連立方程式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} \bar{Y}_{1111}^{x/L_0} &= m + a_1 + b_1 + c_1 + d_1 + \dots (abcd)_{1111} \\ \bar{Y}_{1112}^{x/L_0} &= m + a_1 + b_1 + c_1 + d_2 + \dots (abcd)_{1112} \\ &\dots \dots \dots \\ \bar{Y}_{2224}^{x/L_0} &= m + a_2 + b_2 + c_2 + d_6 + \dots (abcd)_{2224} \end{aligned} \right\} \quad (2.20)$$

この式にもとづいて、 $\bar{Y}_{1111}^{x/L_0}, \bar{Y}_{1112}^{x/L_0}, \dots, \bar{Y}_{2224}^{x/L_0}$ に及ぼす各解析因子の寄与率および要因効果を分散分析で求める。分散分析で因子の分散比が 1 より小さくなることがあるので、1 回の計算ですべての因子および交互作用を求めることはできない。そこで計算を 2 回に分けて行うことにして、第 1 回目の計算では、1 因子および 2 因子交互作用までを求め、第 2 回目の計算でさらに高次 (3 因子以上) の交互作用を求める。したがって、第 1 回目の計算では式(2.19)の 3 因子以上の交互作用を誤差項 ($E_{x_1x_2x_3x_4}^I$) に含

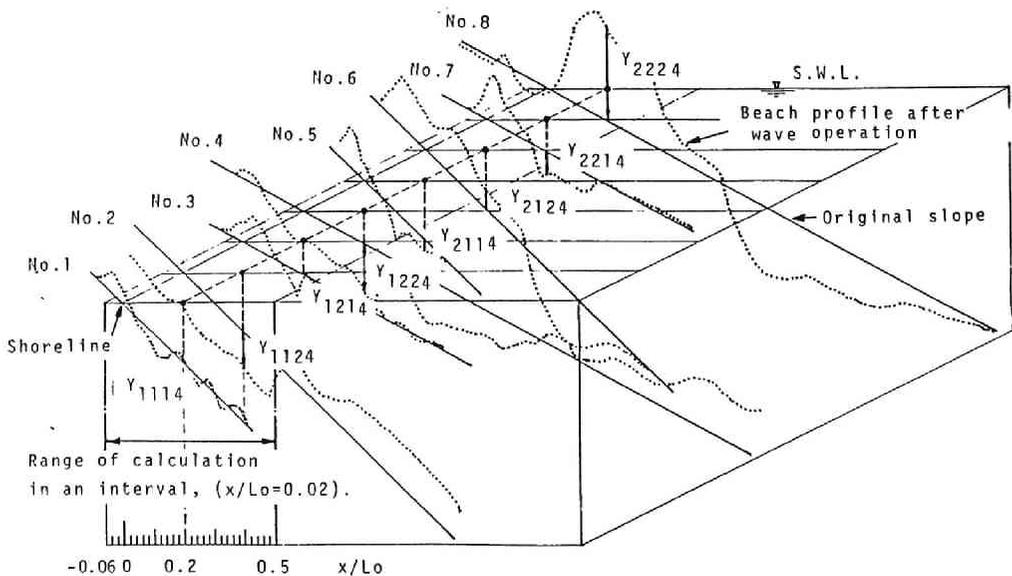


図-2.13 直交配列表 (Experi. No. 1 ~ 8) と海浜の変化量との関係

めて次のように表わす。

$$\begin{aligned} \bar{Y}_{x_1x_2x_3x_4}^{x/L_0} &= m + a_{x_1} + b_{x_4} + c_{x_3} + d_{x_4} + (ab)_{x_1x_2} + (ac)_{x_1x_3} \\ &\quad + (ad)_{x_1x_4} + (bc)_{x_2x_3} + (bd)_{x_2x_4} + (cd)_{x_3x_4} \\ &\quad + E_{x_1x_2x_3x_4}^{\text{I}} \end{aligned} \quad (2.21)$$

さらに、第1回目の計算で分散比が1より小さくなった因子を誤差項 ($E_{x_1x_2x_3x_4}^{\text{II}}$) として、第2回目の計算で高次交互作用まで求める。実際に、実験値を入れた計算では、 d_{x_4} および $(bd)_{x_3x_4}$ の分散比が非常に小さくなったので、ここでは d_{x_4} を誤差項として、第2回目の計算を次式のようにする。

$$\begin{aligned} \bar{Y}_{x_1x_2x_3x_4}^{x/L_0} &= m + a_{x_1} + b_{x_2} + c_{x_3} + (ab)_{x_1x_2} + (ac)_{x_1x_3} \\ &\quad + (ad)_{x_1x_4} + (bc)_{x_2x_3} + (bd)_{x_2x_4} + (cd)_{x_3x_4} + (abc)_{x_1x_2x_3} \\ &\quad + (abd)_{x_1x_2x_4} + (acd)_{x_1x_3x_4} + (bcd)_{x_2x_3x_4} \\ &\quad + (abcd)_{x_1x_2x_3x_4} + E_{x_1x_2x_3x_4}^{\text{II}} \end{aligned} \quad (2.22)$$

式(3.22)による分散分析の要約が表-2.9にまとめてある。この表で、 $\phi_A, \phi_B, \dots, \phi_{\text{total}}$ はそれぞれ因子 A, B, \dots , 全体の自由度; $SS_A, SS_B, \dots, SS_{\text{total}}$ はそれぞれ因子 A, B, \dots , 全体の平方和; $F_A, F_B, \dots, F_{A*B*C*D}$ はそれぞれ因子 A, B, \dots , 4因子交互作用 $A*B*C*D$ の分散比。 $F(\phi_A, \phi_E^{\text{II}}; \alpha)$ は危険率 α における因子 A の自由度 ϕ_A および誤差 E の自由度 ϕ_E^{II} に対応する F 分布値。 $K_A, K_B, \dots, K_{A*B*C*D}$ はそれぞれ因子 A, B, \dots , 4因子交互作用 $A*B*C*D$ の寄与率、および $\pm \sqrt{F(1, \phi_{[E]}; 0.05/n \cdot MS_{[E]})}$ は F 検定の結果5%の危険率で有意となった要因の信頼区間を表わす。表中の判定欄で、各因子の分散比(F)が F 分布値 [$F(\phi, \phi_E^{\text{II}}; 5\%)$] と比較して $F \leq F(\phi, \phi_E^{\text{II}}; \alpha)$ のとき、対象因子が“ $\alpha = 5\%$ 危険率で有意”として、寄与率 K を次式で与える。例えば、因子 A は、

$$K_A = (SS_A - MS_{[E]}) \times \phi_A \times 100 / SS_{\text{Total}} \quad (2.23)$$

一方、 $F < F(\phi, \phi_{[E]}; \alpha)$ のとき、“有意でない”とし、 $K = 0$ とする。表-2.10には、 $x/L_0 = 0$ (汀線) における海浜の変化量を与えて電子計算機で計算した結果がまとめてある。この表中、分散比の判定は危険率 $\alpha \leq 1\%$ で有意の場合“**”， $1\% < \alpha \leq 5\%$ で有意の場合“*”，これ以外 ($\alpha > 5\%$) の場合“/”の印で示してある。判定で“/”のついたいわゆる有意でない場合は $K = 0\%$ とした。したがって、有意な因子のみについて式(2.23)で寄与率が求めている。

以上で述べた実験の計画、実施および解析の手順の概要が図-2.14に示してある。このような計算で、 $-0.06 \leq x/L_0 \leq 0.5$ の範囲について、 $x/L_0 = 0.02$ ごとに、解析因子 A, B, C および D とそれぞれの交互作用による14個の解析因子の寄与率を求めた結果が、図-2.15に整理してある。この図から、各因子が海浜の変化量に及ぼす影響とその分布が非常によくわかる。特に誤差項(実験誤差)は汀線付近とや

表一 2.9 分散分析表

Source of variance	Degree of freedom	Sum of square	Mean square	Variance ratio
A	ϕ_A	SS_A	$SS_A/\phi_A = MS_A$	$MS_A/MS_{E^{II}} = F_A$
B	ϕ_B	SS_B	$SS_B/\phi_B = MS_B$	$MS_B/MS_{E^{II}} = F_B$
C	ϕ_C	SS_C	$SS_C/\phi_C = MS_C$	$MS_C/MS_{E^{II}} = F_C$
$E^{II}(D)$	$\phi_{E^{II}}^{1)}$	$SS_{E^{II}}^{2)}$	$SS_{E^{II}}/\phi_{E^{II}} = MS_{E^{II}}$	
A*B	ϕ_{A*B}	SS_{A*B}	$SS_{A*B}/\phi_{A*B} = MS_{A*B}$	$MS_{A*B}/MS_{E^{II}} = F_{A*B}$
A*C	ϕ_{A*C}	SS_{A*C}	$SS_{A*C}/\phi_{A*C} = MS_{A*C}$	$MS_{A*C}/MS_{E^{II}} = F_{A*C}$
A*D	ϕ_{A*D}	SS_{A*D}	$SS_{A*D}/\phi_{A*D} = MS_{A*D}$	$MS_{A*D}/MS_{E^{II}} = F_{A*D}$
B*C	ϕ_{B*C}	SS_{B*C}	$SS_{B*C}/\phi_{B*C} = MS_{B*C}$	$MS_{B*C}/MS_{E^{II}} = F_{B*C}$
B*D	ϕ_{B*D}	SS_{B*D}	$SS_{B*D}/\phi_{B*D} = MS_{B*D}$	$MS_{B*D}/MS_{E^{II}} = F_{B*D}$
C*D	ϕ_{C*D}	SS_{C*D}	$SS_{C*D}/\phi_{C*D} = MS_{C*D}$	$MS_{C*D}/MS_{E^{II}} = F_{C*D}$
A*B*C	ϕ_{A*B*C}	SS_{A*B*C}	$SS_{A*B*C}/\phi_{A*B*C} = MS_{A*B*C}$	$MS_{A*B*C}/MS_{E^{II}} = F_{A*B*C}$
A*B*D	ϕ_{A*B*D}	SS_{A*B*D}	$SS_{A*B*D}/\phi_{A*B*D} = MS_{A*B*D}$	$MS_{A*B*D}/MS_{E^{II}} = F_{A*B*D}$
A*C*D	ϕ_{A*C*D}	SS_{A*C*D}	$SS_{A*C*D}/\phi_{A*C*D} = MS_{A*C*D}$	$MS_{A*C*D}/MS_{E^{II}} = F_{A*C*D}$
B*C*D	ϕ_{B*C*D}	SS_{B*C*D}	$SS_{B*C*D}/\phi_{B*C*D} = MS_{B*C*D}$	$MS_{B*C*D}/MS_{E^{II}} = F_{B*C*D}$
A*B*C*D	$\phi_{A*B*C*D}$	$SS_{A*B*C*D}$	$SS_{A*B*C*D}/\phi_{A*B*C*D} = MS_{A*B*C*D}$	$MS_{A*B*C*D}/MS_{E^{II}} = F_{A*B*C*D}$
[E^{II}]	$\phi_{[E^{II}]}^{4)}$	$SS_{[E^{II}]}$		
Total	ϕ_{Total}	SS_{Total}		

1) $\phi_{E^{II}} = \phi_D$

2) $SS_{E^{II}} = SS_D$

3) $K_{[E^{II}]} = 100 - (K_A + K_B + K_C + K_{A*B} + K_{A*C} + K_{A*D} + K_{B*C} + K_{B*D} + K_{C*D} + K_{A*B*C} + K_{A*B*D} + K_{A*C*D} + K_{B*C*D} + K_{A*B*C*D})$

4) $\phi_{[E^{II}]} = \phi_{Total} - (\phi_A + \phi_B + \phi_C + \phi_{A*B} + \phi_{A*C} + \phi_{A*D} + \phi_{B*C} + \phi_{B*D} + \phi_{C*D} + \phi_{A*B*C} + \phi_{A*B*D} + \phi_{A*C*D} + \phi_{B*C*D} + \phi_{A*B*C*D})$

や沖部分 ($x/L_0 \approx 0.4$) で非常に小さくなっていることがわかる。

(6) 要因効果^{39), 40)}

a) 要因効果の計算

各解析因子の要因効果は、構造模型式 (2.19) の右辺の各項で表わされるので、次のように計算できる。

$$\begin{aligned} \hat{\mu}(A_{x_1}) &= \widehat{m + a_{x_1}} = \frac{1}{N(x_4)_{\max}} \sum_{x_4=1}^4 \bar{Y}_{x_1 x_2 x_3 x_4} \\ &= \frac{(x_1)_{\max}}{N(x_4)_{\max}} \bar{Y}_{x_1 x_2 x_3} \end{aligned} \quad (2.24)$$

$$\hat{\mu}(B_{x_2}) = \widehat{m + b_{x_2}} = \frac{(x_2)_{\max}}{N(x_4)_{\max}} \bar{Y}_{x_1 x_2 x_3} \quad (2.25)$$

$$\hat{\mu}(C_{x_3}) = \widehat{m + c_{x_3}} = \frac{(x_3)_{\max}}{N(x_4)_{\max}} \bar{Y}_{x_1 x_2 x_3} \quad (2.26)$$

(第2回目の計算)

Decision	Contribution rate (%)	Confidence interval
$F_A : F(\phi_A, \phi_{E^{\text{II}}}; \alpha)$	$(SS_A - MS_{[E^{\text{II}}]} \times \phi_A) \times 100 / SS_{\text{Total}} = K_A$	$\pm \sqrt{\frac{F(1, \phi_{[E^{\text{II}}]}; 0.05)}{n} \cdot MS_{[E^{\text{II}}]}}$ <p>n : Data number</p>
$F_B : F(\phi_B, \phi_{E^{\text{II}}}; \alpha)$	$(SS_B - MS_{[E^{\text{II}}]} \times \phi_B) \times 100 / SS_{\text{Total}} = K_B$	
$F_C : F(\phi_C, \phi_{E^{\text{II}}}; \alpha)$	$(SS_C - MS_{[E^{\text{II}}]} \times \phi_C) \times 100 / SS_{\text{Total}} = K_C$	
	$K_{[E^{\text{II}}]}$ ③)	
$F_{A+B} : F(\phi_{A+B}, \phi_{E^{\text{II}}}; \alpha)$	$(SS_{A+B} - MS_{[E^{\text{II}}]} \times \phi_{A+B}) \times 100 / SS_{\text{Total}} = K_{A+B}$	
$F_{A+C} : F(\phi_{A+C}, \phi_{E^{\text{II}}}; \alpha)$	$(SS_{A+C} - MS_{[E^{\text{II}}]} \times \phi_{A+C}) \times 100 / SS_{\text{Total}} = K_{A+C}$	
$F_{A+D} : F(\phi_{A+D}, \phi_{E^{\text{II}}}; \alpha)$	$(SS_{A+D} - MS_{[E^{\text{II}}]} \times \phi_{A+D}) \times 100 / SS_{\text{Total}} = K_{A+D}$	
$F_{B+C} : F(\phi_{B+C}, \phi_{E^{\text{II}}}; \alpha)$	$(SS_{B+C} - MS_{[E^{\text{II}}]} \times \phi_{B+C}) \times 100 / SS_{\text{Total}} = K_{B+C}$	
$F_{B+D} : F(\phi_{B+D}, \phi_{E^{\text{II}}}; \alpha)$	$(SS_{B+D} - MS_{[E^{\text{II}}]} \times \phi_{B+D}) \times 100 / SS_{\text{Total}} = K_{B+D}$	
$F_{C+D} : F(\phi_{C+D}, \phi_{E^{\text{II}}}; \alpha)$	$(SS_{C+D} - MS_{[E^{\text{II}}]} \times \phi_{C+D}) \times 100 / SS_{\text{Total}} = K_{C+D}$	
$F_{A+B+C} : F(\phi_{A+B+C}, \phi_{E^{\text{II}}}; \alpha)$	$(SS_{A+B+C} - MS_{[E^{\text{II}}]} \times \phi_{A+B+C}) \times 100 / SS_{\text{Total}} = K_{A+B+C}$	
$F_{A+B+D} : F(\phi_{A+B+D}, \phi_{E^{\text{II}}}; \alpha)$	$(SS_{A+B+D} - MS_{[E^{\text{II}}]} \times \phi_{A+B+D}) \times 100 / SS_{\text{Total}} = K_{A+B+D}$	
$F_{A+C+D} : F(\phi_{A+C+D}, \phi_{E^{\text{II}}}; \alpha)$	$(SS_{A+C+D} - MS_{[E^{\text{II}}]} \times \phi_{A+C+D}) \times 100 / SS_{\text{Total}} = K_{A+C+D}$	
$F_{B+C+D} : F(\phi_{B+C+D}, \phi_{E^{\text{II}}}; \alpha)$	$(SS_{B+C+D} - MS_{[E^{\text{II}}]} \times \phi_{B+C+D}) \times 100 / SS_{\text{Total}} = K_{B+C+D}$	
$F_{A+B+C+D} : F(\phi_{A+B+C+D}, \phi_{E^{\text{II}}}; \alpha)$	$(SS_{A+B+C+D} - MS_{[E^{\text{II}}]} \times \phi_{A+B+C+D}) \times 100 / SS_{\text{Total}} = K_{A+B+C+D}$	
	100	

$$\hat{\mu}(D_{x_4}) = \widehat{m + d_{x_4}} = \frac{1}{N} \bar{Y}_{\cdot \cdot \cdot x_4} \quad (2.27)$$

$x_4 = 1, 2, 3, 4$

$$\hat{\mu}(A_{x_1} B_{x_2}) = \widehat{m + (ab)_{x_1 x_2}} = \frac{(x_1)_{\max} (x_2)_{\max}}{N (x_4)_{\max}} \bar{Y}_{x_1 x_2 x_3 \cdot} \quad (2.28)$$

$x_1 = 1, 2$
 $x_2 = 1, 2$

$$\hat{\mu}(A_{x_1} C_{x_3}) = \widehat{m + (ac)_{x_1 x_3}} = \frac{(x_1)_{\max} (x_3)_{\max}}{N (x_4)_{\max}} \bar{Y}_{x_1 x_2 x_3 \cdot} \quad (2.29)$$

$x_1 = 1, 2$
 $x_3 = 1, 2$

$$\hat{\mu}(A_{x_1} D_{x_4}) = \widehat{m + (ad)_{x_1 x_4}} = \frac{(x_1)_{\max} (x_4)_{\max}}{N} \bar{Y}_{x_1 x_2 x_3 x_4} \quad (2.30)$$

$x_1 = 1, 2$
 $x_4 = 1, 2, 3, 4$

$$\hat{\mu}(B_{x_2} C_{x_3}) = \widehat{m + (bc)_{x_2 x_3}} = \frac{(x_2)_{\max} (x_3)_{\max}}{N (x_4)_{\max}} \bar{Y}_{x_1 x_2 x_3 \cdot} \quad (2.31)$$

$x_2 = 1, 2$
 $x_3 = 1, 2$

表- 2.10 海浜の変化量の分散分析

Source of variance	ϕ Degree of freedom	SS Sum of square ($\times 10^{-4}$)	MS Mean square ($\times 10^{-4}$)	F Variance ratio	Deci- sion	K Contri- bution rate(%)	Confidence interval ($\times 10^{-4}$)
A	1	2.8465	2.8465	1186.6	**	26.1	± 5.45
B	1	0.5907	0.5907	246.2	**	5.3	5.45
C	1	0.4367	0.4367	182.0	**	3.9	5.45
A*B	1	1.1516	1.1516	480.1	**	10.5	5.45
A*C	1	2.5027	2.5027	1043.2	**	22.9	5.45
A*D	3	0.0785	0.0262	10.9	*	0.5	10.90
B*C	1	0.8537	0.8537	355.9	**	7.8	5.45
B*D	3	0.2968	0.0989	41.2	**	2.5	10.90
C*D	3	0.7065	0.2355	98.2	**	6.2	10.90
A*B*C	1	1.1786	1.1786	491.3	**	10.7	5.45
A*B*D	3	0.0783	0.0261	10.9	*	0.5	10.90
A*C*D	3	0.0847	0.0282	11.8	*	0.5	10.90
B*C*D	3	0.0297	0.0099	4.1	/		
A*B*C*D	3	0.0466	0.0155	6.5	/		
$E^{\text{II}}(D)$	3	0.0072	0.0024				
$[E^{\text{II}}]$	[9]	[0.0835]	[0.0093]				
Total	31	10.8888				2.6	

$$\hat{\mu}(B_{x_2} D_{x_4}) = \overbrace{m + (bd)}_{x_2=1,2, x_4=1,2,3,4} = \frac{(x_2)_{\max}}{N} \bar{Y}_{x_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4} \quad (2.32)$$

$$\hat{\mu}(C_{x_3} D_{x_4}) = \overbrace{m + (cd)}_{x_2=1,2, x_4=1,2,3,4} = \frac{(x_3)_{\max}}{N} \bar{Y}_{x_1 x_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4} \quad (2.33)$$

$$\hat{\mu}(A_{x_1} B_{x_2} C_{x_3}) = \overbrace{m + (abc)}_{x_1=1,2, x_2=1,2, x_3=1,2} = \frac{(x_1)_{\max} (x_2)_{\max} (x_3)_{\max}}{N (x_4)_{\max}} \bar{Y}_{x_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3} \quad (2.34)$$

$$\hat{\mu}(A_{x_1} B_{x_2} D_{x_4}) = \overbrace{m + (abd)}_{x_1=1,2, x_2=1,2, x_3=1,2,3,4} = \frac{(x_1)_{\max} (x_2)_{\max}}{N} \bar{Y}_{x_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4} \quad (2.35)$$

$$\hat{\mu}(A_{x_1} C_{x_3} D_{x_4}) = \overbrace{m + (acd)_{x_1 x_3 x_4}}^{(x_1)_{\max}(x_3)_{\max}} = \frac{(x_1)_{\max}(x_3)_{\max}}{N} \bar{Y}_{x_1 x_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4} \quad (2.36)$$

$x_1 = 1, 2$
 $x_3 = 1, 2$
 $x_4 = 1, 2, 3, 4$

$$\hat{\mu}(A_{x_2} C_{x_3} D_{x_4}) = \overbrace{m + (bcd)_{x_2 x_3 x_4}}^{(x_2)_{\max}(x_3)_{\max}} = \frac{(x_2)_{\max}(x_3)_{\max}}{N} \bar{Y}_{x_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4} \quad (2.37)$$

$x_2 = 1, 2$
 $x_3 = 1, 2$
 $x_4 = 1, 2, 3, 4$

$$\hat{\mu}(A_{x_1} B_{x_2} C_{x_3} D_{x_4}) = \overbrace{m + (abcd)_{x_1 x_2 x_3 x_4}}^{(x_1)_{\max}(x_2)_{\max}(x_3)_{\max}} = \frac{(x_1)_{\max}(x_2)_{\max}(x_3)_{\max}}{N} \bar{Y}_{x_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4} \quad (2.38)$$

$x_1 = 1, 2$
 $x_2 = 1, 2$
 $x_3 = 1, 2$
 $x_4 = 1, 2, 3, 4$

ここに、 $\hat{\mu}(A_{x_1})$, $\hat{\mu}(B_{x_2})$, $\hat{\mu}(C_{x_3})$, ……., $\hat{\mu}(A_{x_1} B_{x_2} C_{x_3} D_{x_4})$ は各解析因子の要因効果、 $(x_1)_{\max}$, $(x_2)_{\max}$, $(x_3)_{\max}$, $(x_4)_{\max}$ はそれぞれの解析因子の最大の水準値で、 $(x_1)_{\max} = 2$, $(x_2)_{\max} = 2$, $(x_3)_{\max} = 2$, $(x_4)_{\max} = 4$ である。例えば $\bar{Y}_{x_1 x_2 x_3}$ は解析因子 A の水準値が同じものについて特性値（海浜の変化量）をすべて加えることを表わす。 N は直交配列表の行数で $N = 8$ である。

これらの式で計算した要因効果を図示する場合、式(2.24)～(2.33)の1因子および2因子交互作用は容易に表示できるが、式(2.34)～(2.38)の3因子および4因子交互作用は、3次元および4次元の座標が必要となる。このように交互作用が高次になるにつれて図的表示が難しくなるので、合同式(congruence)を使って、2次元座標で表示することを考える。

b) 合同式による要因効果

表-2.6の直交配列表は、実験因子を割付けやすいように、表中の水準値が1と2で表わされるので、ある因子 G_{x_i} , H_{x_j} , I_{x_k} の組合せで得られた特性値 $Y_{x_i x_j x_k}$ の水準値の和は $p = (x_i - 1) + (x_j - 1) + (x_k - 1)$ で表わされる。この p を整数 n で除したときの剰余が r ($0 \leq r < n$) のとき、 $p = nq + r$ (q : 整数) で表わすと、 $p \equiv r \pmod{n}$ なる整数論的表示ができる。この表示法を用いると、式(2.24)～(2.38)は、次のように表わされる。解析因子 A の要因効果 (B, C も同様)。

$$\left. \begin{aligned} Y_{x_1 x_2 x_3} &= Y_{1 x_2 x_3} ; (x_1 - 1) \equiv 0 \pmod{2} \\ Y_{x_1 x_2 x_3} &= Y_{2 x_2 x_3} ; (x_1 - 1) \equiv 1 \pmod{2} \end{aligned} \right\} \quad (2.39)$$

解析因子 D の要因効果は、水準値が4であるから、mod. 4で整理すると

$$\left. \begin{aligned} Y_{\dots \bar{x}_4} &= Y_{\dots 1} ; (x_4 - 1) \equiv 0 \pmod{4} \\ \dots \dots \dots &\dots \dots \dots \\ Y_{\dots \bar{x}_4} &= Y_{\dots 4} ; (x_4 - 1) \equiv 3 \pmod{4} \end{aligned} \right\} \quad (2.40)$$

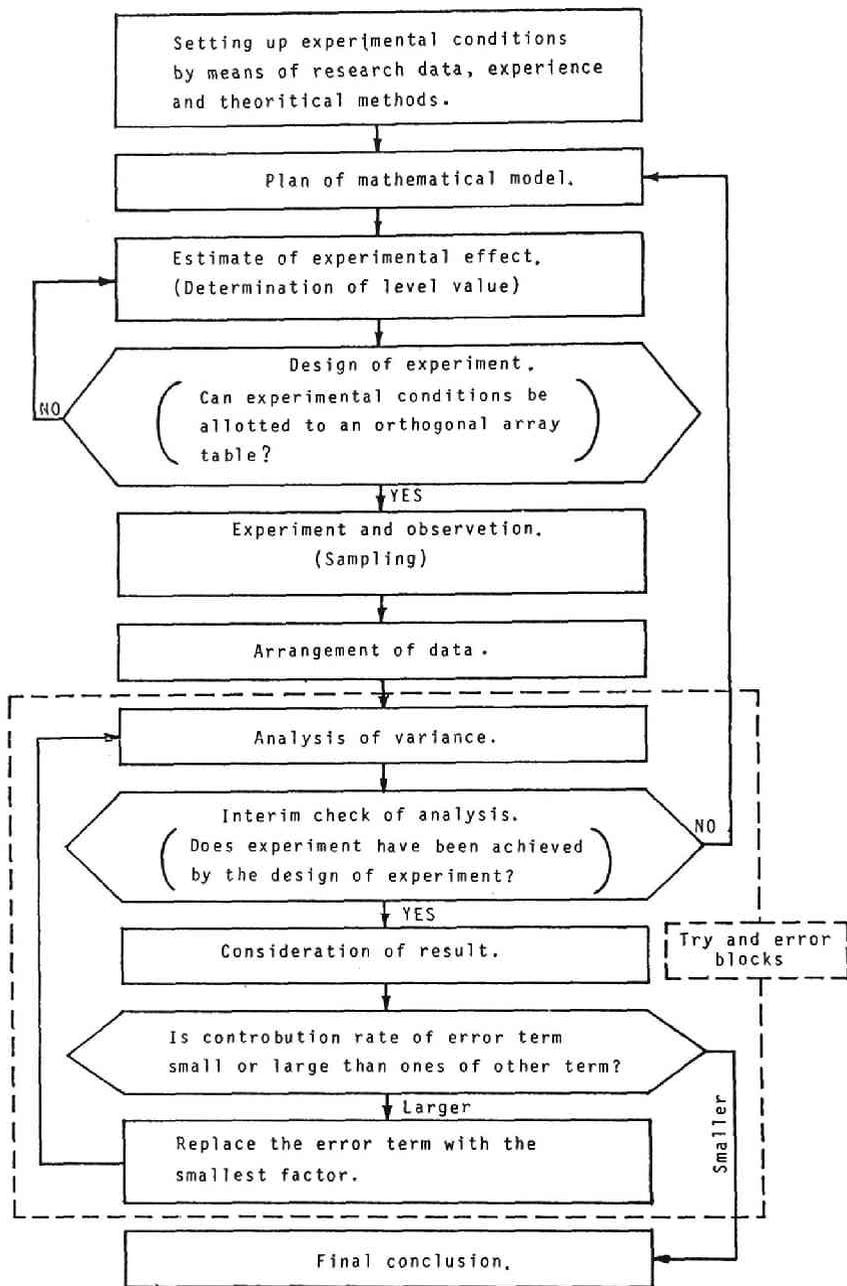


図- 2.14 実験計画法による実験の計画・実施および解析の手順

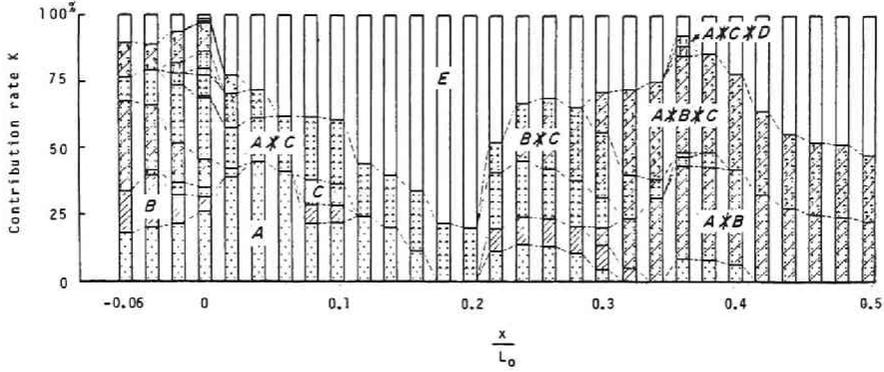


図-2.15 海浜の変化量に及ぼす各因子の寄与率分布

2 因子交互作用効果 $A*B$ ($A*C$ および $B*C$ も同様)

$$\left. \begin{aligned}
 Y_{\bar{x}_1 \bar{x}_2 x_3 x_4} &= Y_{11x_3} \\
 Y_{\bar{x}_1 \bar{x}_2 x_3 x_4} &= Y_{22x_3} \\
 Y_{\bar{x}_1 \bar{x}_2 x_3 x_4} &= Y_{12x_3} \\
 Y_{\bar{x}_1 \bar{x}_2 x_3 x_4} &= Y_{21x_3}
 \end{aligned} \right\} \begin{aligned}
 &(x_1 - 1) + (x_2 - 1) \equiv 0 \pmod{2} \\
 &(x_1 - 1) + (x_2 - 1) \equiv 1 \pmod{2}
 \end{aligned} \quad (2.41)$$

2 因子交互作用効果 $A*D$ ($B*D$ および $C*D$ も同様)

$$\left. \begin{aligned}
 Y_{\bar{x}_1 \bar{x}_2 x_3 \bar{x}_4} &= Y_{(1x_2 x_3) 1} ; (x_4 - 1) \equiv 0 \pmod{4} \\
 \text{-----} \\
 Y_{\bar{x}_1 \bar{x}_2 x_3 \bar{x}_4} &= Y_{(1x_2 x_3) 4} ; (x_4 - 1) \equiv 3 \pmod{4} \\
 Y_{\bar{x}_1 \bar{x}_2 x_3 x_4} &= Y_{(2x_2 x_3) 1} ; (x_4 - 1) \equiv 0 \pmod{4} \\
 \text{-----} \\
 Y_{\bar{x}_1 \bar{x}_2 x_3 x_4} &= Y_{(2x_2 x_3) 4} ; (x_4 - 1) \equiv 3 \pmod{4}
 \end{aligned} \right\} (2.42)$$

3 因子交互作用 $A*B*C$

$$\left. \begin{aligned}
 Y_{\bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3} &= Y_{111} \\
 Y_{\bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3} &= Y_{122} \\
 Y_{\bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3} &= Y_{212} \\
 Y_{\bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3} &= Y_{221}
 \end{aligned} \right\} (x_1 - 1) + (x_2 - 1) + (x_3 - 1) \equiv 0 \pmod{2}$$

$$\left. \begin{aligned}
 Y_{\bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3} &= Y_{112} \cdot \\
 Y_{\bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3} &= Y_{121} \cdot \\
 Y_{\bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3} &= Y_{211} \cdot \\
 Y_{\bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3} &= Y_{222} \cdot
 \end{aligned} \right\} (x_1 - 1) + (x_2 - 1) + (x_3 - 1) \equiv 1 \pmod{2} \quad (2.43)$$

3 因子交互作用効果 $A * B * D$ ($A * C * D$ および $B * C * D$ も同様) はいずれも水準値 4 の解析因子 D を含んでいるので, これらは $(A * B) * D$, $(A * C) * D$ および $(B * C) * D$ として,

$$\left. \begin{aligned}
 & \left. \begin{aligned}
 Y_{\bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4} &= Y_{(11x_3)1} \\
 Y_{\bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4} &= Y_{(22x_3)1} \\
 \text{-----} & \\
 \text{-----} & \\
 \text{-----} &
 \end{aligned} \right\} (x_4 - 1) \equiv 0 \pmod{4} \\
 & \left. \begin{aligned}
 Y_{\bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4} &= Y_{(11x_3)4} \\
 Y_{\bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4} &= Y_{(22x_3)4} \\
 \text{-----} & \\
 \text{-----} & \\
 \text{-----} &
 \end{aligned} \right\} (x_4 - 1) \equiv 3 \pmod{4} \\
 & \left. \begin{aligned}
 Y_{\bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4} &= Y_{(12x_3)1} \\
 Y_{\bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4} &= Y_{(21x_3)1} \\
 \text{-----} & \\
 \text{-----} & \\
 \text{-----} &
 \end{aligned} \right\} (x_4 - 1) \equiv 0 \pmod{4} \\
 & \left. \begin{aligned}
 Y_{\bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4} &= Y_{(12x_3)4} \\
 Y_{\bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4} &= Y_{(21x_3)4} \\
 \text{-----} & \\
 \text{-----} & \\
 \text{-----} &
 \end{aligned} \right\} (x_4 - 1) \equiv 3 \pmod{4}
 \end{aligned} \right\} (2.44)$$

4 因子交互作用効果 $A * B * C * D$ は $(A * B * C) * D$ として,

$$\left. \begin{aligned}
 & \left. \begin{aligned}
 Y_{\bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4} &= Y_{(111)1} \\
 Y_{\bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4} &= Y_{(122)1} \\
 Y_{\bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4} &= Y_{(212)1} \\
 Y_{\bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4} &= Y_{(221)1} \\
 \text{-----} & \\
 \text{-----} & \\
 \text{-----} &
 \end{aligned} \right\} (x_4 - 1) \equiv 0 \pmod{4} \\
 & \left. \begin{aligned}
 Y_{\bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4} &= Y_{(111)4} \\
 Y_{\bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4} &= Y_{(122)4} \\
 Y_{\bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4} &= Y_{(212)4} \\
 Y_{\bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4} &= Y_{(221)4} \\
 \text{-----} & \\
 \text{-----} & \\
 \text{-----} &
 \end{aligned} \right\} (x_4 - 1) \equiv 3 \pmod{4}
 \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{array}{l}
Y_{\bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4} = Y_{(112)1} \\
Y_{\bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4} = Y_{(121)1} \\
Y_{\bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4} = Y_{(211)1} \\
Y_{\bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4} = Y_{(222)1} \\
----- \\
----- \\
----- \\
----- \\
----- \\
Y_{\bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4} = Y_{(112)4} \\
Y_{\bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4} = Y_{(121)4} \\
Y_{\bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4} = Y_{(211)4} \\
Y_{\bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4} = Y_{(222)4}
\end{array} \right\} \begin{array}{l}
(x_4 - 1) \equiv 0 \pmod{4} \\
----- \\
(x_4 - 1) \equiv 3 \pmod{4}
\end{array} \quad (2.45)$$

以上の結果が表-2.11にまとめてある。この表は合同式を用いた要因効果に“[]”が付けてある。計算の結果、海浜変化量に対して比較的大きな要因効果を与える解析因子のみが、初期海浜からの変化量 A_2/L_0 を縦軸に堆積の場合(+), 侵食を(-)として、汀線からの距離 x/L_0 を横軸に取って、図-2.16(a)~(b)に示してある。この図中には、次の2.4(6)dで説明する実験結果のばらつきを表わす区間推定値が↓印で併示してある。この区間推定値は、因子がF検定で有意となったときのみ計算してある。図-2.16から、各因子が海浜の変化量に与える定量的な効果を知ることができる。すなわち、因子の水準値の相違(図中、○と●印の違い)が大きい程、因子の影響が大きくなる。

式(2.24)~式(2.38)の要因効果を式(2.39)~(2.45)の合同式で表示した場合の相違が、2因子交互作用 $A*B$ を例にとって図-2.17に説明してある。図-2.17(a)の交互作用がない場合、合同式を用いると $[A*B]_1$ と $[A*B]_2$ を結ぶ線が“水平”となる。一方、交互作用が存在する場合には、図-2.17(b)あるいは(c)のようにある“傾き”を持ち、この傾きが“右下り”のときは相乗作用が、また“右上”りのときは相殺作用(拮抗作用)が働いている。なお、単独因子による要因効果は、当然のことながら、一般の表示法と合同式によるものと同じである。

結局、単独因子の場合、要因効果の相違が、海浜の変化量に及ぼす効果を直接表わし、正の値は堆積、負の値は侵食を表わす。2個あるいはこれ以上の因子による交互作用の場合は、因子が交互作用として海浜の変化量に及ぼす影響の大きさを示す。

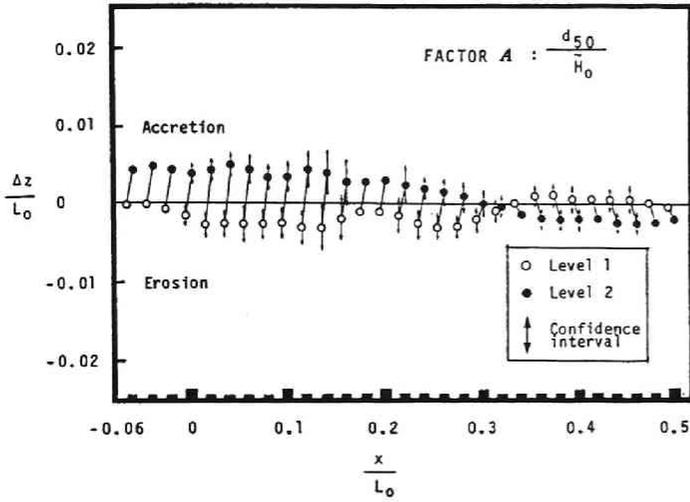
c) 要因効果の区間推定

要因効果は、実験値のばらつきの平均を表わすものである。このばらつきの区間を表わす区間推定について説明する。分散 σ^2 を持つ正規母集団 $N'(\mu, \sigma^2)$ の平均値 μ' を推定する場合、任意の n 個の標本 $(z_1, z_2, z_3, \dots, z_n)$ の平均を $\bar{z} = \sum_{i=1}^n z_i$ とすると、

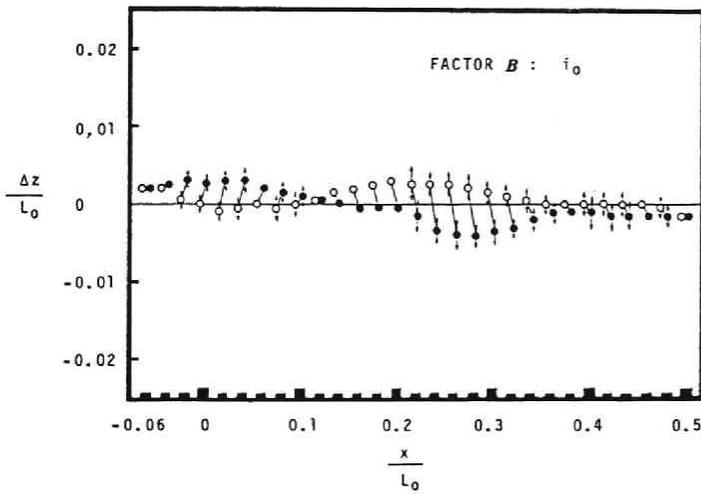
表- 2.11 各解析因子の要因効果

Source of variance	Contents of factor effect	Graphic symbol	Alphabet in Fig. 2.16
<i>A</i>	Comparison of $(x_1-1) \equiv 0$ with $(x_1-1) \equiv 1$ for mod. 2	$[A]_1, [A]_2$	(a)
<i>B</i>	Comparison of $(x_2-1) \equiv 0$ with $(x_2-1) \equiv 1$ for mod. 2	$[B]_1, [B]_2$	(b)
<i>C</i>	Comparison of $(x_3-1) \equiv 0$ with $(x_3-1) \equiv 1$ for mod. 2	$[C]_1, [C]_2$	(c)
<i>D</i>	Comparison of $(x_4-1) \equiv 0, (x_4-1) \equiv 1, (x_4-1) \equiv 2$ with $(x_4-1) \equiv 3$ for mod. 4	$[D]_1, [D]_2, [D]_3, [D]_4$	#
<i>A * B</i>	Comparison of $(x_1-1) + (x_2-1) \equiv 0$ with $(x_1-1) + (x_2-1) \equiv 1$ for mod. 2	$[A * B]_1, [A * B]_2$	(d)
<i>A * C</i>	Comparison of $(x_1-1) + (x_3-1) \equiv 0$ with $(x_1-1) + (x_3-1) \equiv 1$ for mod. 2	$[A * C]_1, [A * C]_2$	(e)
<i>A * D</i>	Case $(x_1-1) \equiv 0$ mod. 2, comparison of $(x_4-1) \equiv 0, (x_4-1) \equiv 1, (x_4-1) \equiv 2$ with $(x_4-1) \equiv 3$ mod. 4	$[A * D]_{11}, [A * D]_{12}, [A * D]_{13}, [A * D]_{14}$	#
	Case $(x_1-1) \equiv 1$ mod. 2, comparison of $(x_4-1) \equiv 0, (x_4-1) \equiv 1, (x_4-1) \equiv 2$ with $(x_4-1) \equiv 3$ mod. 4	$[A * D]_{21}, [A * D]_{22}, [A * D]_{23}, [A * D]_{24}$	
<i>B * C</i>	Comparison of $(x_2-1) \equiv 0$ with $(x_2-1) \equiv 1$ for mod. 2	$[B * C]_1, [B * C]_2$	(f)
<i>B * D</i>	Case $(x_2-1) \equiv 0$ mod. 2, comparison of $(x_4-1) \equiv 0, (x_4-1) \equiv 1, (x_4-1) \equiv 2$ with $(x_4-1) \equiv 3$ mod. 4	$[B * D]_{11}, [B * D]_{12}, [B * D]_{13}, [B * D]_{14}$	#
	Case $(x_2-1) \equiv 1$ mod. 2, comparison of $(x_4-1) \equiv 0, (x_4-1) \equiv 1, (x_4-1) \equiv 2$ with $(x_4-1) \equiv 3$ mod. 4	$[B * D]_{21}, [B * D]_{22}, [B * D]_{23}, [B * D]_{24}$	
<i>C * D</i>	Case $(x_3-1) \equiv 0$ mod. 2, comparison of $(x_4-1) \equiv 0, (x_4-1) \equiv 1, (x_4-1) \equiv 2$ with $(x_4-1) \equiv 3$ mod. 4	$[C * D]_{11}, [C * D]_{12}, [C * D]_{13}, [C * D]_{14}$	#
	Case $(x_3-1) \equiv 1$ mod. 2, comparison of $(x_4-1) \equiv 0, (x_4-1) \equiv 1, (x_4-1) \equiv 2$ with $(x_4-1) \equiv 3$ mod. 4	$[C * D]_{21}, [C * D]_{22}, [C * D]_{23}, [C * D]_{24}$	
<i>A * B * C</i>	Comparison of $(x_1-1) + (x_2-1) + (x_3-1) \equiv 0$ with $(x_1-1) + (x_2-1) + (x_3-1) \equiv 1$ mod. 2	$[A * B * C]_1, [A * B * C]_2$	(g)
<i>A * B * D</i>	Case $(x_1-1) + (x_2-1) \equiv 0$ mod. 2, comparison of $(x_4-1) \equiv 0, (x_4-1) \equiv 1, (x_4-1) \equiv 2$ with $(x_4-1) \equiv 3$ mod. 4	$[A * B * D]_{11}, [A * B * D]_{12}, [A * B * D]_{13}, [A * B * D]_{14}$	#
	Case $(x_1-1) + (x_2-1) \equiv 1$ mod. 2, comparison of $(x_4-1) \equiv 0, (x_4-1) \equiv 1, (x_4-1) \equiv 2$ with $(x_4-1) \equiv 3$ mod. 4	$[A * B * D]_{21}, [A * B * D]_{22}, [A * B * D]_{23}, [A * B * D]_{24}$	
<i>A * C * D</i>	Case $(x_1-1) + (x_3-1) \equiv 0$ mod. 2, comparison of $(x_4-1) \equiv 0, (x_4-1) \equiv 1, (x_4-1) \equiv 2$ with $(x_4-1) \equiv 3$ mod. 4	$[A * C * D]_{11}, [A * C * D]_{12}, [A * C * D]_{13}, [A * C * D]_{14}$	#
	Case $(x_1-1) + (x_3-1) \equiv 1$ mod. 2, comparison of $(x_4-1) \equiv 0, (x_4-1) \equiv 1, (x_4-1) \equiv 2$ with $(x_4-1) \equiv 3$ mod. 4	$[A * C * D]_{21}, [A * C * D]_{22}, [A * C * D]_{23}, [A * C * D]_{24}$	
<i>B * C * D</i>	Case $(x_2-1) + (x_3-1) \equiv 0$ mod. 2, comparison of $(x_4-1) \equiv 0, (x_4-1) \equiv 1, (x_4-1) \equiv 2$ with $(x_4-1) \equiv 3$ mod. 4	$[B * C * D]_{11}, [B * C * D]_{12}, [B * C * D]_{13}, [B * C * D]_{14}$	#
	Case $(x_2-1) + (x_3-1) \equiv 1$ mod. 2, comparison of $(x_4-1) \equiv 0, (x_4-1) \equiv 1, (x_4-1) \equiv 2$ with $(x_4-1) \equiv 3$ mod. 4	$[B * C * D]_{21}, [B * C * D]_{22}, [B * C * D]_{23}, [B * C * D]_{24}$	
<i>A * B * C * D</i>	Case $(x_1-1) + (x_2-1) + (x_3-1) \equiv 0$ mod. 2, comparison of $(x_4-1) \equiv 0, (x_4-1) \equiv 1, (x_4-1) \equiv 2$ with $(x_4-1) \equiv 3$ mod. 4	$[A * B * C * D]_{11}, [A * B * C * D]_{12}, [A * B * C * D]_{13}, [A * B * C * D]_{14}$	#
	Case $(x_1-1) + (x_2-1) + (x_3-1) \equiv 1$ mod. 2, comparison of $(x_4-1) \equiv 0, (x_4-1) \equiv 1, (x_4-1) \equiv 2$ with $(x_4-1) \equiv 3$ mod. 4	$[A * B * C * D]_{21}, [A * B * C * D]_{22}, [A * B * C * D]_{23}, [A * B * C * D]_{24}$	

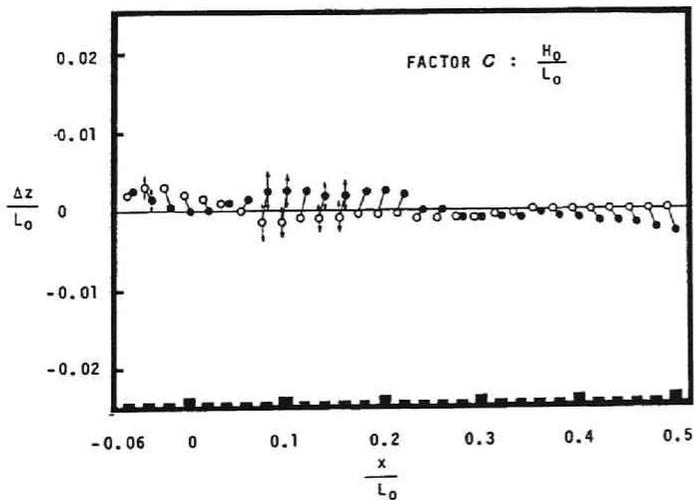
mark denotes cases that analytical factors are not shown in Fig. 2.16 to have less effect for beach changes.



(a) 解析因子 A (粒径波高比)

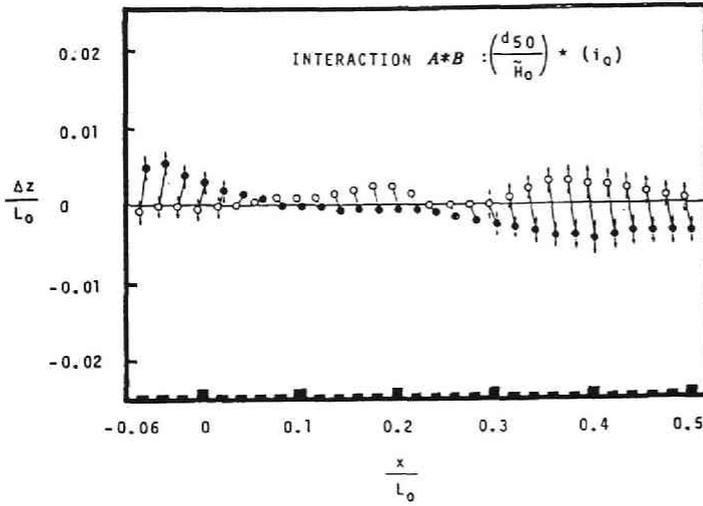


(b) 解析因子 B (初期浜勾配)

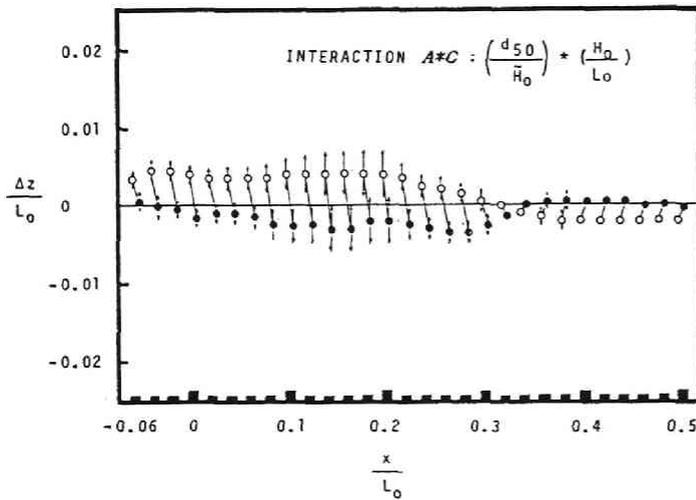


(c) 解析因子 C (沖波波形勾配)

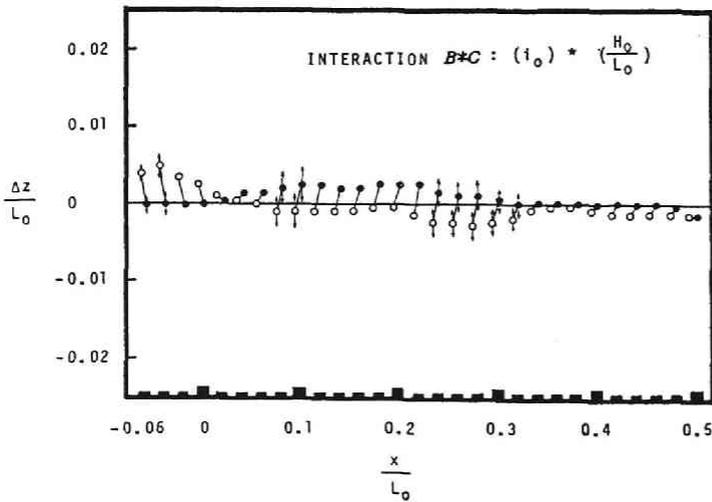
図一 2.16 各因子が海浜の変化量に及ぼす要因効果(つづく)



(d) 解析因子 $A * B$
 (粒径波高比 * 初期浜勾配)

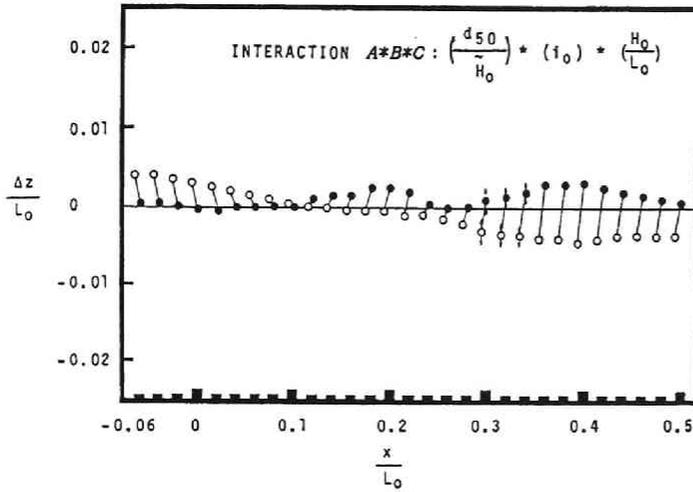


(e) 解析因子 $A * C$
 (粒径波高比 * 沖波波形勾配)



(f) 解析因子 $B * C$
 (初期浜勾配 * 沖波波形勾配)

図-2.16 各因子が海浜の変化量に及ぼす要因効果(つづく)



(E) 解析因子 $A * B * C$
 (粒径波高比 * 初期浜勾配 * 沖波波形勾配)

図-2.16 各因子が海浜の変化量に及ぼす要因効果

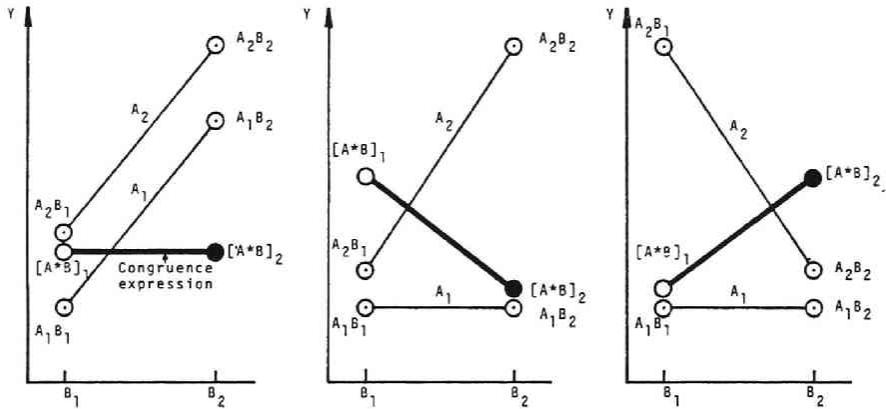


図-2.17 合同式による交互作用の表示

$$u = (\bar{z} - \mu') \frac{\sqrt{n}}{\sigma} \quad (2.46)$$

は正規分布 $N'(0, 1^2)$ に従う。そこで、 $0 < \alpha < 1$ のときの分布関数 $\phi(t_\alpha)$ は、

$$\phi(t_\alpha) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-t_\alpha}^{t_\alpha} e^{-(u/2)} du = 1 - \alpha \quad (2.47)$$

この式を満足させる t_α の累積確率 P_r は次式で与えられる。

$$\begin{aligned}
& P_r \left\{ \bar{z} - \frac{\sigma}{\sqrt{n}} t_\alpha < \mu' < \bar{z} + \frac{\sigma}{\sqrt{n}} t_\alpha \right\} \\
&= \left\{ P_r \frac{\bar{z} - \mu'}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}} \leq t_\alpha \right\} \\
&= P_r \{ |t| \leq t_\alpha \} \\
&= \phi(t_\alpha) \\
&= 1 - \alpha
\end{aligned} \tag{2.48}$$

したがって、母集団の平均値 μ' が区間 $[\bar{z} - (\sigma/\sqrt{n}) t_\alpha, \bar{z} + (\sigma/\sqrt{n}) t_\alpha]$ に含まれる確率は $1 - \alpha$ である。これを μ' に対する信頼度 $1 - \alpha$ の信頼区間という。

t -分布の2乗は自由度 $(1, \phi_{[E]})$ の F 分布と等しいので、

$$t(\phi_{[E]}; \alpha) = \sqrt{F(1, \phi_{[E]}; \alpha)} \tag{2.49}$$

の関係が存在する。さらに、

$$\sigma = \sqrt{MS_{[E]}} \tag{2.50}$$

$$\bar{z} = \hat{\mu}(\) \tag{2.51}$$

とすると、要因効果の信頼区間は $\pm \sqrt{F(1, \phi_{[E]}; \alpha)/n} \cdot MS_{[E]}$ で表わされる。分散分析で判定結果が $\alpha \leq 5\%$ で有意となった因子について、式(2.49)で信頼区間を求めた結果が、図-2.16に↓印で表示してある。ただし、分散分析の判定で有意でない場合、この計算がしてない。また、この図で信頼区間の値が非常に小さい(↓印の幅が非常に狭い)場合には、図中の○および●印と重なっている。

(7) 因子の影響

a) 各種の因子が海浜の変化に及ぼす影響は、図-2.15の寄与率分布から岸沖方向にかなり変動していることがわかる。この中で、海浜の変化に大きな寄与($K \geq 20\%$)を及ぼす因子が表-2.12にまとめられている。

表-2.12 海浜の変化に大きく寄与する因子

1 因子	$A(d/\tilde{H}_0), E(e)$
2 因子交互作用	$A * B \{(d/\tilde{H}_0) * (i_0)\}$
	$A * C \{(d/\tilde{H}_0) * (H_0/L_0)\}$ $B * C \{(i_0) * (H_0/L_0)\}$
高次交互作用	$A * B * C \{(d/\tilde{H}_0) * (i_0) * (H_0/L_0)\}$

b) 要因効果を表わす図-2.16から、各因子ごとにそれぞれ特有の効果が見られ、水準値の1と2で要因効果の相違が大きい位置では、寄与率も大きくなっている。また、 $-0.06 \leq x/L_0 \leq 0.50$ の範囲で、水準値1と2で要因の効果(堆積と侵食)が1~2度反転している。これは底質の移動と関係しているものと推定される。

c) 単独因子：底質粒径・沖波波高比の因子 $A(d/\tilde{H}_0)$ は、図-2.15から特に汀線付近の変化量にかなり影響を及ぼしていることがわかる。また、図-2.16(a)から d/\tilde{H}_0 の値が大きくなると堆積の傾向を示すことがわかる。初期浜勾配の因子 $B(i_0)$ 、沖波波形勾配の因子 (H_0/L_0) および波の作用時間の因子 $D(t/T)$ が単独に浜変形に及ぼす影響は比較的小さく、因子 B および C は交互作用として影響を及ぼしていることがわかる。

d) 交互作用： $A*B\{(d/\tilde{H}_0)*(i_0)\}$ 、 $A*C\{(d/\tilde{H}_0)*(H_0/L_0)\}$ および $B*C\{(i_0)*(H_0/L_0)\}$ の2因子交互作用、および $A*B*C\{(d/\tilde{H}_0)*(i_0)*(H_0/L_0)\}$ の3因子交互作用が浜の変化量に比較的大きな影響を及ぼしている。これらの作用は、いずれも d/H_0 、 i_0 および H_0/L_0 の無次元量で構成され、従来より浜変形の特性を議論する際によく引用される因子であることは非常に興味深い。さらに、これらの交互作用は、それぞれ固有の位置で浜の変化量に強く影響を及ぼしている。特に、汀線付近 ($-0.06 \leq x/L_0 \leq 0.3$) では $A*C$ が、沖側 ($0.2 \leq x/L_0 \leq 0.5$) では $A*B$ 、 $B*C$ および $A*B*C$ の影響が大きくなっている。

e) 誤差：汀線よりやや沖 ($x/L_0 \approx 0.1 \sim 0.2$) で、誤差項 $[E^I]$ が比較的大きな寄与率 ($K \approx 75\%$) を占めている。この理由の1つとして、その位置が最終の砕波点であることが考えられる。また、汀線より沖では、全体に誤差が大きくなっているが、これは本実験に用いた造波装置が2.4(2)で述べたように旧式の無段変速機を用いて造波機を駆動させたので、造波板の周期が完全に一定にならなかったためと考えられる。

f) 上述の a) ~ e) は、いずれも浜の底質として砂(比重: 2.65)を用いた結果について検討したが、比重の軽いメサライト砂(比重: 2.30)を用いた場合の解析結果³⁸⁾(寄与率分布および要因効果)は、大局的に砂と同じような傾向を示すが、しかし沖浜部 ($x/L_0 \geq 0.2$) では若干の相違が生じた。

2.5 浜断面変形量の表示法

2.4節で、実験計画法を適用して浜の変化量に及ぼす各種因子の寄与率および要因効果を定性的に表示した。本節では、さらに一歩進めて、浜断面の変化量の一特性として、初期浜勾配からの汀線の移動量を定量的に表示する。

汀線の移動量を取扱った従来の研究は、表-2.1で示したような堀川・砂村ら⁵⁾による汀線の最終変化量の表示式および汀線の前進・後退の限界を判別する関係式⁶⁾がある。また、尾崎ら¹²⁾および服部ら¹⁴⁾は、緩勾配の浜変形の実験を追加して、Dean⁹⁾が取扱ったように底質粒径の効果を沈降速度の形で取込んだパラメータで、浜断面形状を分類するとともに汀線の前進・後退の判別式を表示している。これらの研究方法は、いずれも対象となる現象に対して支配的な要因を経験的に2~3個に限定・集約した上で、特性と要因の関係を物理的に解析したものである。しかし、浜変形の特性を忠実に表現するためには、

これに関する要因をすべて取上げて解析する必要がある。

本研究^{41), 42)}では、汀線の移動量に影響を及ぼす要因として、次元解析からすべての無次元水理量を取上げ、これらで構成した2種類のモデル式にもとずいて、汀線移動量を定式化する。ここで用いる方法は⁴³⁾、従来の物理的に取扱う方法に比べ現象に影響を及ぼす要因を客観的かつ数値的に選択抽出(後述 Efrogmson段階的回帰方法)することができる。この計算には、従来の入手可能なほとんどすべての二次元海浜変形に関する実験資料を使用し、汀線移動量の表示式を提示する。さらに、汀線移動の特性とこれに影響する諸要因との関係ならびに縮尺効果についても言及する。

(1) 重回帰分析による汀線移動量の表示

a) 重回帰分析法

多変量解析法の一方法である重回帰分析法は目的変数(criterion variable)として汀線移動量を、また、説明変数(prediction variable)として次元解析で限定される汀線移動量に影響を与える諸要因を用いれば、汀線移動量を表示することができる。この方法を適用するにあたって、まず汀線移動量を表わすことのできる適切なモデル式を設定しなければならない。ここで用いる重回帰分析法には次の3つの特色があるので、これらを積極的に利用する。すなわち、

- ① 汀線移動量に影響を及ぼす要因を次元解析により無次元水理量として選出し、これらの要因で構成したモデル式中の説明変数をその影響の度合に応じて取捨選択できる。
- ② 汀線移動量に対して大きな影響を与える説明変数から順次選出できる。
- ③ 汀線移動量を表わすために設定されたモデル式にもとづいて、汀線移動量を最も精度良く予測できる関数式を与える。

まず、説明変数が複数個(p 個)存在する場合に適用できる重回帰分析法の概略を述べる。説明変数(諸要因)を x_1, x_2, \dots, x_p で表わすと、目的変数(汀線移動量) y は、次式のように表わすことができる⁴⁴⁾。

$$y = F(x_1, x_2, x_3, \dots, x_p) + e \quad (2.52)$$

ここに、 $F(x_1, x_2, x_3, \dots, x_p)$ の関数形は一般に不明であり、 e は y を $x_1, x_2, x_3, \dots, x_p$ で説明しきれない部分を表わす。説明変数 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_p$ がそれぞれある基準値 $m_1, m_2, m_3, \dots, m_p$ のまわりに変動し、その変域がそれほど大きくなく、 F の関数形が滑らかであると考えられるときは、 F を $m_1, m_2, m_3, \dots, m_p$ のまわりにテイラー展開して、その1次の項のみをとると、次式のようになる。

$$y = m_y + \sum_{i=1}^p \left. \frac{\partial F}{\partial x_i} \right|_{x_1, x_2, \dots, x_p} (x_i - m_i) + e' \quad (2.53)$$

ここに、 m_y は定数。 e' は式(2.52)中の e とテイラー展開における2次以上の項を含む。ここで用いた導関数を β_i とおき、さらに β_0 を、

$$\left. \begin{aligned} \beta_i &= \frac{\partial F}{\partial x_i} \Big|_{x_i=m_1, x_2=m_2, \dots, x_p=m_p, (i=1,2,3,\dots,p)} \\ \beta_0 &= m_y - \sum_{i=1}^p \beta_i m_i \end{aligned} \right\} \quad (2.54)$$

で定義すると、式(2.54)は次のように表わされる。

$$\begin{aligned} y &= m_y + \beta_1(x_1 - m_1) + \beta_2(x_2 - m_2) + \dots + \beta_p(x_p - m_p) + e' \\ &= \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_p x_p + e' \end{aligned} \quad (2.55)$$

この式は重回帰モデルとよばれるもので、 $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$ に関して1次式となっている。式(2.55)から最良不偏推定値 $b_0, b_1, b_2, \dots, b_p$ を求める方法の詳細は省略するが、結果のみを示すと、次の重回帰推定式が得られる。

$$Y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_p x_p \quad (2.56)$$

式(2.56)の重回帰推定式を用いて実測値をどの程度表わすことができるかを判定するために分散分析を行なう。分散分析で式(2.56)の推定値が、有意水準95%以上(危険率 $\alpha \leq 5\%$)で有意となったとき、この式の妥当性が確認される。また、これらの推定値と実測値との一致性の度合を表わす指標として、重回帰係数 R および寄与率 $r = R^2 \times 100\%$ が計算できる。重回帰係数は常に正の値のみを取る。一方、相関係数の場合、正あるいは負の値をとるがその数学的意味は同じである。

b) 汀線移動量モデル式の設定

一様な初期浜勾配 i_0 に波が作用すると、海浜は波の作用時間の経過に伴って漸次変形し、最終的にはいわゆる平衡形状に近づくものと考えられる。このような二次元海浜変形過程において、初期汀線位置 $x/L_0 = 0$ からの汀線移動量 $X_{s,t}$ に及ぼす諸要因について次元解析を行なうと、無次元汀線移動量 $X_{s,t}/L_0$ は、式(2.13)の右辺で表示される。

この関係を式(2.52)と対応させると、 $X_{s,t}/L_0$ は目的変数、 $h/L_0, d/H_0, i_0, H_0/L_0, t/T, (\sigma/\rho - 1), \sqrt{gH_0} d/\nu$ が説明変数となる。底質粒径については、後述の実験資料によっては、 d_{50} (中央粒径)あるいは d_m (平均粒径) のいずれか一方のみが表示されている場合があるので、便宜的に $d \approx d_m, d \approx d_{50}$ として次の2種の汀線移動量のモデル式を考える。

① モデル A (乗積式)

汀線移動量に関与するすべての無次元水理量を説明変数を、べき乗の積とし、汀線の移動量を次のように表示する。

$$\begin{aligned} \frac{X_{s,t}}{L_0} + C_{s,t} &= \exp(\beta_0^*) \left(\frac{h}{L_0}\right)^{\beta_1^*} \left(\frac{d}{H_0}\right)^{\beta_2^*} (i_0)^{\beta_3^*} \\ &\quad \left(\frac{H_0}{L_0}\right)^{\beta_4^*} \left(\frac{t}{T}\right)^{\beta_5^*} \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1\right)^{\beta_6^*} \left(\frac{\sqrt{gH_0} d}{\nu}\right)^{\beta_7^*} \end{aligned} \quad (2.57)$$

ここに、 $C_{s,l}$ は定数、 β_1^* 、 β_2^* 、……、 β_7^* は、それぞれ指数である。このモデル式 A に類似した従来の関係式としては、次式のような堀川・砂村ら⁶⁾の汀線の前進・後退の判別式があげられる。

$$\frac{H_0}{L_0} = C'_1 (i_0)^{-0.27} \left(\frac{d}{L_0} \right)^{0.67} \quad (2.58)$$

周知のように、この式は表-2.1のNo.7のように定数 C'_1 によって汀線の前進・後退の区別をしている。また、この式は、若干の変形を行なうと次のようにも表わされる。

$$1 = C'_1 \left(\frac{d}{H_0} \right)^{0.67} (i_0)^{-0.27} \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{-0.33} \quad (2.59)$$

いま、式(2.57)で、汀線の前進・後退の限界を表わす条件として、汀線の移動量が零 ($X_{s,l}/L_0 = 0$) となる場合を仮定すると、式中の定数および指数をそれぞれ $C_{s,l} = 1$ 、 $\beta_2^* = 0.67$ 、 $\beta_3^* = -0.27$ 、 $\beta_4^* = -0.33$ とし、さらに $\exp(\beta_0^*) (h/L_0)^{\beta_1^*} (t/T)^{\beta_5^*} (\sigma/\rho - 1)^{\beta_6^*} (\sqrt{dH_0} d/\nu)^{\beta_7^*} = C'_1$ とすれば、式(2.59)と同じになる。したがって、モデル A は式(2.58)の一般表示でもある。

① モデル B (多変数多項式)

ここでは、式(2.13)の右辺で表わされる無次元汀線移動量に影響を及ぼす7変数の関数をテイラー級数に展開し、その n 次の代数関数で汀線移動量を近似することを考える。一般には、関数をテイラー級数に展開する場合、 n の次数を多くすれば級数はそれだけ真の値に近づくが、本研究では3次の項まで級数展開した変数多項式をモデル B とする。

$$\begin{aligned} \frac{X_{s,l}}{L_0} = & \beta_0^{**} + \beta_1^{**} \left(\frac{h}{L_0} \right) + \beta_2^{**} \left(\frac{d}{H_0} \right) + \beta_3^{**} (i_0) + \beta_4^{**} \left(\frac{H_0}{L_0} \right) \\ & + \beta_5^{**} \left(\frac{t}{T} \right) + \beta_6^{**} \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) + \beta_7^{**} \left(\frac{\sqrt{gH_0} d}{\nu} \right)^{-1} \\ & + \beta_8^{**} \left(\frac{h}{L_0} \right)^2 + \beta_9^{**} \left(\frac{d}{H_0} \right)^2 + \beta_{10}^{**} (i_0)^2 + \dots + \beta_{14}^{**} \left(\frac{\sqrt{gH_0} d}{\nu} \right)^{-2} \\ & + \beta_{15}^{**} \left(\frac{h}{L_0} \right) \left(\frac{d}{H_0} \right) + \beta_{16}^{**} \left(\frac{h}{L_0} \right) (i_0) + \dots + \beta_{35}^{**} \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) \left(\frac{\sqrt{gH_0} d}{\nu} \right)^{-2} \\ & + \beta_{36}^{**} \left(\frac{h}{L_0} \right)^3 + \beta_{37}^{**} \left(\frac{d}{H_0} \right)^3 + \dots + \beta_{42}^{**} \left(\frac{\sqrt{gH_0} d}{\nu} \right) \\ & + \beta_{43}^{**} \left(\frac{h}{L_0} \right)^2 \left(\frac{d}{H_0} \right) + \beta_{44}^{**} \left(\frac{h}{L_0} \right)^2 (i_0) + \dots + \beta_{84}^{**} \left(\frac{\sqrt{gH_0} d}{\nu} \right)^{-2} \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) \\ & + \beta_{85}^{**} \left(\frac{h}{L_0} \right) \left(\frac{d}{H_0} \right) (i_0) + \beta_{86}^{**} \left(\frac{h}{L_0} \right) \left(\frac{d}{H_0} \right) \left(\frac{H_0}{L_0} \right) + \dots \\ & \dots + \beta_{119}^{**} \left(\frac{t}{T} \right) \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) \left(\frac{\sqrt{gH_0} d}{\nu} \right)^{-1} + R_n \end{aligned} \quad (2.60)$$

ここに、 $\beta_0^{**}, \beta_1^{**}, \beta_2^{**}, \dots, \beta_{119}^{**}$ は定数、 R_n は剰余項を表わす。

c) モデル式の計算

汀線移動量を表示するために設定した2種のモデル式AおよびBの係数は次のように計算する。

まず、モデルAについては、式(2.57)の両辺に対数をとると、

$$\begin{aligned} \ln\left(\frac{X_{s,l}}{L_0} + C_{s,l}\right) &= \beta_0^* + \beta_1^* \ln\left(\frac{h}{L_0}\right) + \beta_2^* \ln\left(\frac{d}{H_0}\right) \\ &+ \beta_3^* \ln(i_0) + \beta_4^* \ln\left(\frac{H_0'}{L_0}\right) + \beta_5^* \ln\left(\frac{t}{T}\right) \\ &+ \beta_6^* \ln\left(\frac{\sigma}{\rho} - 1\right) + \beta_7^* \ln\left(\frac{\sqrt{gH_0} d}{\nu}\right) \end{aligned} \quad (2.61)$$

この式では、 $X_{s,l}/L_0 + C_{s,l} > 0$ でなければならない。汀線が後退する場合、 $X_{s,l}/L_0 < 0$ となるので、定数 $C_{s,l}$ は計算に使用する実験資料の中で、汀線の後退量 ($X_{s,l}/L_0$) の最大値よりも大きくする必要がある。そこで、二次元海浜変形に関する従来の実験資料をまとめた表-2.13を参考 { $(X_{s,l}/L_0)_{\min.} = -1.78$ } にして、 $C_{s,l} = 2.0$ とする。式(2.61)を式(2.55)に対応づけて、各項の係数 ($\beta_0^*, \beta_1^*, \beta_2^*, \dots, \beta_7^*$) を求めることができる。

次に、モデルBについては、式(2.60)の右辺の剰余項 R_n は定数 β_0^{**} に含め、式(2.55)に対応づけると、各係数 ($\beta_0^{**}, \beta_1^{**}, \beta_2^{**}, \dots, \beta_{119}^{**}$) が求まる。

(2) 解析方法および実験資料

a) 解析方法

式(2.60)および(2.61)には汀線移動量に関係する説明変数がすべて式の中に含まれているが、これらの変数を全部使用しなくても、汀線移動量に有意な影響を与えるもののみで構成された式であれば実用上十分であると考えられる。

汀線移動量に有意な影響を及ぼす変数を数値的に取り出すことのできる方法がいくつか提案されているが、本研究では Efroymson⁴³⁾の段階的回帰方法 (stepwise regression procedure) を用いることにする。この方法は、汀線の移動量に対して最も大きな偏相関係数を持つ変数から順次選出し、そのつど分散分析で F 検定を行ないながら計算を進めるものである。 F 検定で有意な変数がなくなったとき、計算は終了する。

b) 実験資料

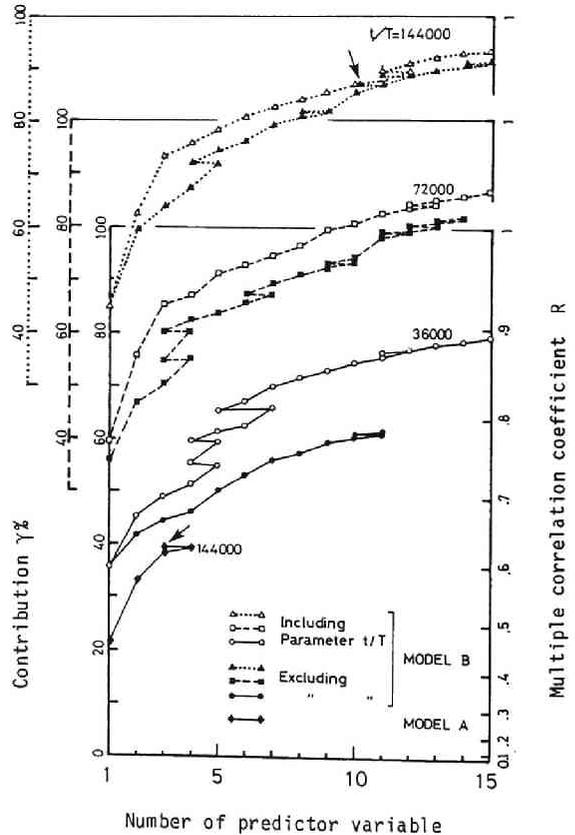
二次元海浜変形に関する実験結果がすでに数多く発表がなされているので、これらの中から式(2.13)の右辺の無次元水理量が計算できるものを選んで、表-2.13に一括表示してある。海浜変形に関して汀線の移動を検討する場合には、波の作用時間 t 、すなわち t/T による影響が大きいことが従来の研究で指摘されている。ここでは、海浜形状がほぼ平衡状態に達している場合の汀線移動量を外象にする。しかしながら、堀川ら⁵⁾が述べているように、海浜が平衡形状になるに要する時間は、一般に底質粒径や波の特性などによって一定ではない。Chesnuttら⁵⁸⁾は、波の作用が375時間 ($t/T \approx 470,000$) におよんでもなお平衡形状に達しなかったと報告している。

表一 2.13 二次元海浜

No.	実験諸量 実験者名	汀線移動量 X_{st} (cm)	水槽水平 床部水深 h (cm)	底質粒径		沖波波高 H_0 (cm)	周期 T (s)	波の作用時間 t (h)
				d_{50}	d_m			
1	Bulletion of B. E. B. 45)	-34~ 62	20~ 91	d_{50} 0.28, 0.56		2.4~ 11.6	0.90~ 3.30	1 ~ 30
2	Rector, R. L. 1)	-216~ 336	84	d_{50} 0.22, 0.47, 3.44		10.1~ 13.1	1.30~ 3.30	70 ~200
3	Watts, G. M. 27)	-111~ 205	91	d_{50} 0.22~3.44		12.7~ 18.7	2.00~ 2.68	40
4	Saville, T. Jr. 46)	-1963~ 349	427~457	d_{50} 0.22, 0.45		46.0~171.0	5.60~11.33	1 ~ 40
5	Shinohara, K. et al. 47)	76~ -7	35	d_m 0.20, 0.30		3.8~ 5.0	0.89~ 1.65	7
6	井島・青野 48)	7~ 62	40	d_m 0.28		6.8, 7.7	1.50, 3.00	6
7	榎木 亨 49)	-53~ 5	30	d_m 0.30		2.3, 3.8	0.88, 1.21	1 ~ 15
8	Popov, I. J. 50)	-95~ -53	162	d_{50} 6.00		30.0	1.73	3.6 ~ 16.8
9	Eagleson, P. S. et al. 51)	-20~ 112	45~ 49	d_m 0.37		9.1~ 10.8	1.15, 1.53	48 ~222
10	増田・伊藤 34)	-82~ 165	45	d_m 0.20, 1.75		6.8, 17.7	1.90, 2.84	0.5 ~ 8.0
11	土屋・稲田 52)	-78~ 98	45, 150	d_{50} 0.22~0.73		1.9~ 18.7	0.87, 1.34	1 ~ 60
12	Raman, Dr. H. et al. 53)	-29~ 32	35	* 0.30		6.5~ 7.5	1.00, 2.00	5 ~ 45
13	田中・新保 54)	-226~ 40	40	d_m 0.20, 0.30		2.8~ 10.8	0.95~ 2.20	1 ~ 15
14	堀川・砂村・鬼頭 55)	-117~ 20	40	d_{50} 0.20		5.3~ 7.3	1.40, 1.70	6 ~240
15	Paul, M. J. et al. 56)	-29~ 46	19~ 68	d_{50} 0.36~0.91		2.1~ 18.3	0.91~ 1.71	12, 36
16	増田・伊藤 57)	-103~ 167	45	d_m 0.30, 2.75		9.8, 12.1	1.58, 2.30	0.25~ 8.0
17	堀川・砂村・近藤 5)	-203~ 208	25~ 48	d_m 0.20, 0.70		3.4, 7.6	1.00, 2.00	1 ~160
18	堀川・砂村・近藤・岡田 6)	-245~ 11	40	d_m 0.20, 0.70		3.4, 7.6	1.00, 2.00	9 ~266
19	名城大学・土木工学科卒業研究論文	-147~ 285	50	d_m 0.44		11.4, 14.8	1.45, 2.30	0.25~200
20	Chesnutt and Galvin 58)	-348, -155	71	* 0.20		11.8	1.90	150, 370
21	尾崎・渡辺 12)	-9~ 35	30	d_{50} 0.22, 0.49		4.4~ 14.4	0.86~ 2.52	20 ~120
22	伊藤・土屋・山下 59)	-40~ 869	14~100	d_{50} 0.38, 0.94		3.5~ 29.5	1.13~ 3.0	1 ~ 60
	maximum	869	457	6.00		171	11.33	370
	minimum	-1963	14	0.20		1.9	0.87	0.25

(注) *は論文に d_m あるいは d_{50} の記載がない場合を示す。

そこで、前もって t/T の効果を検討するために、表一 2.13 の実験結果を $t/T \geq 36,000, 72,000$ および $144,000$ に分けて、モデル式 B を使って解析した結果を図一 2.18 に示す。これは、モデル B の右辺で t/T を含んだ項を無視した場合と、そうでない場合に分けて解析し、両者の寄与率 r 、重相関係数 R の違を図示したものである。この図には、モデル式 B の式 (2.60) の右辺の項で汀線移動量に大きな影響を及ぼす項のみが計算で順次抽出されるので、抽出された項数と r および R との関係として表わしてある。したがって、 $r \rightarrow 100\%$ 、 $R \rightarrow 1.0$ になるほど精度は良くなる。図一



図一 2.18 波の作用時間 t/T が汀線移動量に与える影響とモデル式の r と R の変化

変形に関する実験資料

無次元水理量								備考	
$\frac{X_d}{L_0}$	$\frac{h}{L_0}$	$\frac{d}{H_0} \times 10^3$	i_0	$\frac{H_0}{L_0}$	$\frac{t}{T} \times 10^{-3}$	$\frac{\sigma}{\rho} - 1$	$\frac{\sqrt{gH_0d}}{\nu}$	底質材料名	実験数
-0.09 ~ 0.37	0.05~0.35	0.48~1.15	1/15	0.006~0.044	1.6~ 83.1	1.65	119~ 520	砂	24
-0.29 ~ 0.76	0.05~0.32	0.18~3.42	1/30	0.006~0.045	75.9~553.8	1.65	190~3450	砂	20
-1.78 ~ 0.26	0.08~0.15	0.17~2.72	1/20	0.011, 0.030	53.7~ 72.0	1.63	214~4000	砂	8
-0.36 ~ 0.02	0.02~0.09	0.01~0.03	1/15	0.002~0.035	0.3~ 25.7	1.65	408~ 787	砂	9
-0.24 ~ -0.02	0.08~0.28	0.40~0.70	1/10	0.010~0.040	15.3~ 28.3	0.29, 1.66	107~ 186	石炭粉, 砂	3
0.019~ 0.089	0.03, 0.11	0.36, 0.41	1/20	0.005, 0.022	1.2~ 56.0	1.9	200, 213	砂	6
-0.44 ~ 0.06	0.13, 0.25	0.79, 1.29	1/10	0.01, 0.03	3.0~ 61.4	1.63	125, 159	砂	7
-0.21 ~ -0.12	0.36	2.00	1/3	0.067	7.5~ 35.0	1.65	90	砂	5
-0.10 ~ 0.84	0.12~0.24	0.34~0.41	1/20, 1/30, 1/45	0.025~0.048	112.9~522.8	1.67	305~ 333	砂	7
-0.15 ~ 0.40	0.04~0.08	0.11~2.59	1/10, 1/18	0.005, 0.031	0.6~ 15.2	1.64	142~2000	砂	48
-0.52 ~ 0.69	0.16~1.94	0.12~1.68	1/15	0.016~0.081	5.1~306.8	0.26~1.65	87~ 820	おがくず, 石炭粉, 砂	26
-0.81 ~ 0.21	0.06~0.22	0.40~0.46	1/8~1/15	0.012~0.04	9.0~151.2	1.65	209~ 225	砂	17
-0.54 ~ 0.21	0.05~0.29	0.19~0.82	1/10, 1/20	0.005~0.048	1.6~ 37.9	0.6, 1.65	98~ 207	石炭粉, 砂	71
-0.32 ~ 0.07	0.09~0.13	0.27~0.38	1/24	0.013~0.024	12.7~617.1	1.65	126~ 147	砂	17
-0.13 ~ 0.14	0.15	0.34~2.55	1/5, 1/10, 1/20	0.016~0.060	3.6~100.5	0.6, 1.71	219~ 826	ベークライト, 砂	24
-0.26 ~ 0.43	0.06~0.12	0.25~2.88	1/10, 1/18	0.012~0.031	4.0~ 18.2	1.30	257~2610	メサライト	56
-1.07 ~ 0.97	0.07~0.21	0.26~2.06	1/10, 1/20, 1/30	0.012~0.049	1.8~576.0	1.65	101~ 526	砂	59
-1.57 ~ 0.03	0.06~0.26	0.26~2.06	1/10	0.005~0.049	32.4~640.8	1.65	101~ 526	砂	16
-0.45 ~ 0.53	0.06~0.15	0.30~0.39	1/10, 1/20, 1/30	0.001~0.045	0.4~496.6	1.57	405~ 463	砂	85
-0.62, -0.28	0.13	0.17	1/10	0.021	284.2, 710.5	1.65	203	砂	2
-0.04 ~ 0.08	0.03~0.26	0.14~1.11	1/50, 1/70, 1/90	0.005~0.081	28.6~502.3	1.65	127~ 408	砂	14
-0.06 ~ 0.75	0.07~0.16	0.32~1.65	1/30	0.014~0.047	1.2~108.0	1.54	943~1200	砂	41
0.97	1.94	3.42	1/3	0.081	710.5	1.9	4000	全データ数	565
-1.78	0.02	0.01	1/90	0.001	0.3	0.26	87		

2.18 から、 t/T の値が大きくなるにつれて、 t/T を含む場合と、含まない場合との相違が少なくなり、 t/T の効果が小さくなるがよくわかる。したがって、汀線の移動がほぼ平衡状態になるに必要な波の作用時間は、実用上、 $t/T \geq 144,000$ であれば十分であると考えられる。よって、 $t/T \geq 144,000$ の実験結果を使用してモデル式 A および B を計算すると、汀線移動量に対する t/T の効果はほとんどなくなるものとして、モデル A については t/T の項を式から外し、モデル B については t/T を含む項を除外して考えることにする。

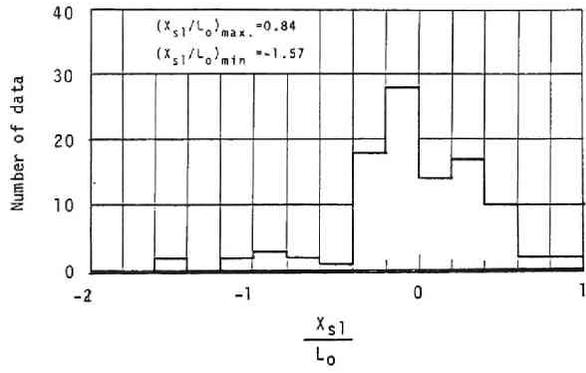
図-2.19 は、表-2.13 の実験結果の中で、 $t/T \geq 144,000$ を満足する 101 ケースの実験について、各無次元水理量の頻度分布を図示したものである。特に、図-2.19 (8) で $(\sigma/\rho - 1)$ の分布はその範囲が 1.57 ~ 1.67 であることから計算に使用できる実験結果は、底質が砂の場合に限定されたことになる。

(3) 計算結果

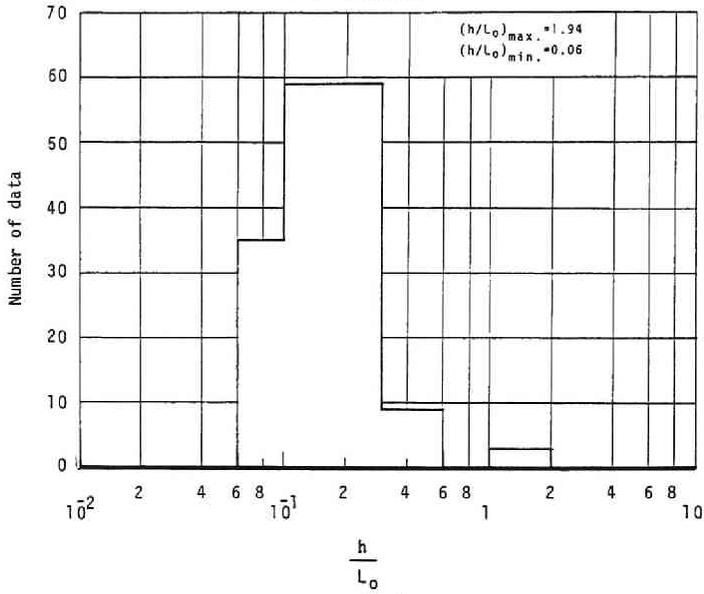
計算によって求まる寄与率 r および重相関係数 R は、説明変数の数が増すにつれて急激に増加することが図-2.18 から認められる。しかし、ある程度以上になると、その増加割合は少なくなるので、図-2.18 中に、モデル A については“ \surd ”，モデル B については“ \searrow ”で示したところで計算を打ち切れば、その目的が十分達せられたものと考えられる。計算で出てきた順序に結果を記すと次のようになる。

モデル式 A による汀線移動量推定式は、 $R = 0.62$ および $r = 38.5\%$ であり、次式で表わされる。

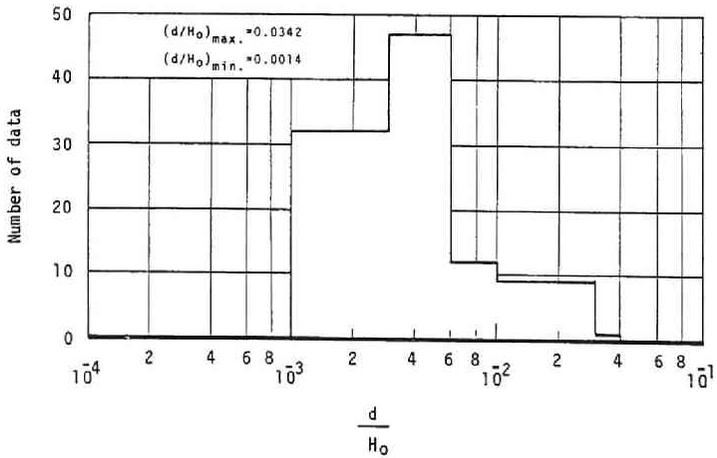
$$\frac{X_{sd}}{L_0} + 2 = \exp(-1.177) \left(\frac{\sqrt{gH_0d}}{\nu} \right)^{0.148} (i_0)^{-0.195} \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{-0.105} \quad (2.62)$$



(a) 汀線移動

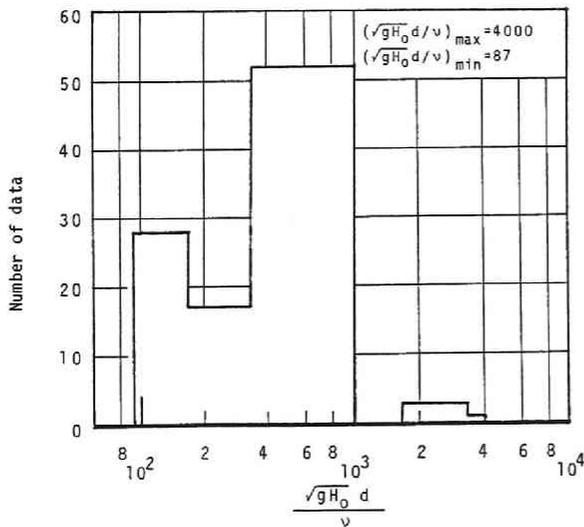
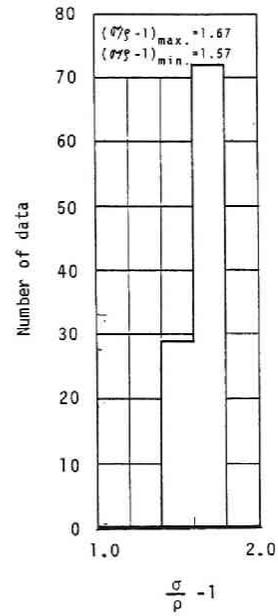
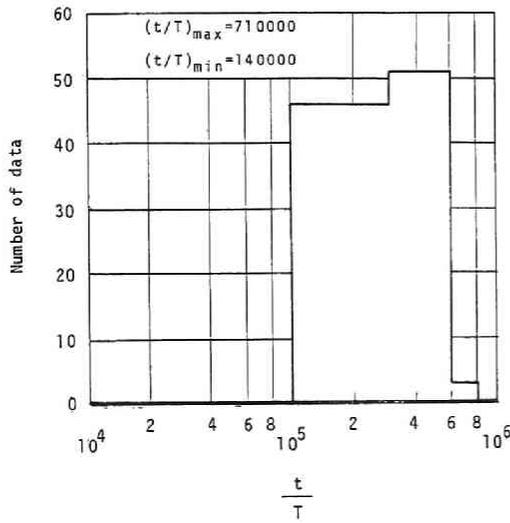
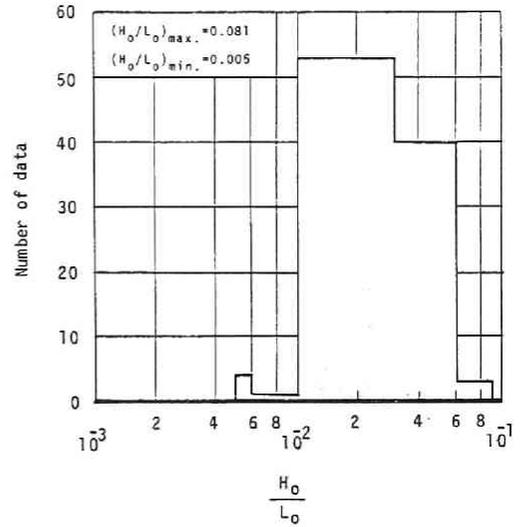
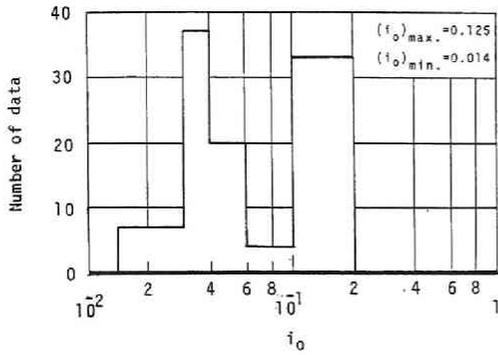


(b) 水深波長比



(c) 粒径波高比

図-2.19 解析計算に用いた実



験資料の無次元水理量の頻度分布

あるいは、次のように書き直せる。

$$\frac{X_{sl}}{L_0} = -2 + 0.308 \left(\frac{\sqrt{gH_0} d}{\nu} \right)^{0.148} (i_0)^{-0.195} \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{-0.105} \quad (2.63)$$

また、モデルBでは、 $R = 0.93$ および $r = 87.0\%$ で次式となる。

$$\begin{aligned} \frac{X_{sl}}{L_0} = & 1.722 \times 10^{-1} - 5.528 \times 10^5 \left(\frac{H_0}{L_0} \right) \left(\frac{\sqrt{gH_0} d}{\nu} \right)^{-2} \\ & + 5.196 \times 10^5 \left(\frac{d}{H_0} \right) \left(\frac{H_0}{L_0} \right) \left(\frac{\sqrt{gH_0} d}{\nu} \right)^{-1} \\ & - 6.320 \times 10^5 \left(\frac{d}{H_0} \right)^2 \left(\frac{\sqrt{dH_0} d}{\nu} \right)^{-1} \\ & + 2.267 \times 10^6 \left(\frac{d}{H_0} \right) \left(\frac{\sqrt{gH_0} d}{\nu} \right)^{-2} \\ & - 1.069 \times 10^4 \left(\frac{\sqrt{dH_0} d}{\nu} \right)^{-2} \\ & - 3.857 \times 10^3 \left(\frac{h}{L_0} \right) \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^2 \\ & + 1.623 \times 10^2 \left(\frac{h}{L_0} \right) \left(\frac{H_0}{L_0} \right) \\ & + 2.169 \times \left(\frac{h}{L_0} \right)^3 + 5.876 \times 10^3 \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^3 \\ & - 1.973 \times 10^2 (i_0) \left(\frac{H_0}{L_0} \right) \end{aligned} \quad (2.64)$$

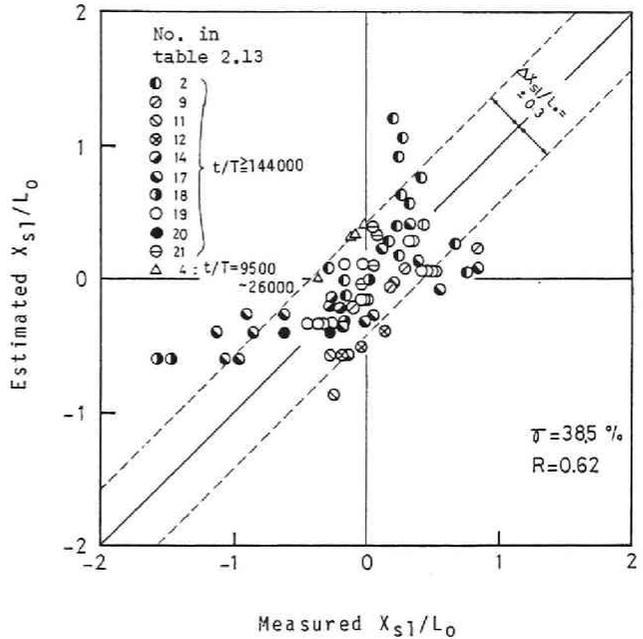
式(2.64)を整理すると、次式のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{X_{sl}}{L_0} = & 1.722 \times 10^{-1} + \left\{ (-5.528 \frac{H_0}{L_0} + 22.67 \frac{d}{H_0} - 0.1069) \right\} \frac{\sqrt{gH_0} d}{\nu} \\ & + \left\{ 5.196 \frac{H_0}{L_0} - 6.320 \frac{d}{H_0} \right\} \frac{d}{H_0} \frac{\sqrt{gH_0} d}{10^5 \nu} \\ & + \left\{ 58.76 \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^2 - 38.57 \frac{h H_0}{L_0} \right. \\ & \left. + 1.623 \frac{h}{L_0} - 1.973 i_0 \right\} \frac{100 H_0}{L_0} + 2.169 \left(\frac{h}{L_0} \right)^3 \end{aligned} \quad (2.65)$$

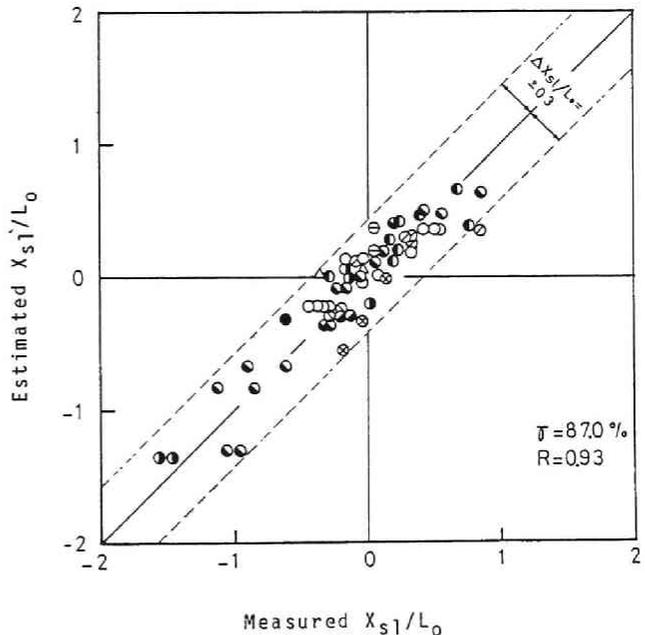
式(2.63)あるいは(2.64)と実験結果との比較を図-2.20に示す。ただし、この図では、結果が同一の点に多数重複する場合は、代表値で示してある。

図-2.20 (a)は、式(2.63)によるものであり、この図から乗積型の関数で汀線の移動量を表わすと、汀線移動量が比較的少ない($X_{s,l}/L_0 \approx 0$)場合には実験結果とよく一致するが、汀線移動量が大きくなると両者の相違が顕著になる。一方、式(2.64)の場合、 R および r の値が式(2.63)よりも大きく、図-2.20 (b)のように、実験結果ともよく一致する。この図では、実験値と推定値との相違は、 $\Delta X_{s,l}/L_0 \leq \pm 0.3$ である。Smithら⁶⁰⁾が同一実験条件で3回の繰り返し実験を行なった結果($t/T = 231,000$)でも、汀線移動のばらつきは $\Delta X_{s,l}/L_0 \approx \pm 0.1$ 程度である。いま、式(2.7)の汀線移動に関する実験誤差の表示式に、この計算で用いた実験資料の中で最大の沖波波形勾配($H_0/L_0 = 0.081$)と最小($H_0/L_0 = 0.005$)を入れると、実験誤差は $\varepsilon' \Delta X_{s,l}/L_0 = \pm 0.28 \sim \pm 0.01$ となる。したがって、図-2.20 (b)のばらつきは、実験誤差と同程度となり、問題はない。

このように、実験誤差を考慮に入れると、モデルBで推定できる汀線移動量の精度は非常に良いことがわかる。以上から、汀線移動量の推定精度は、モデルAよりモデルBによる式(2.64)の方が良いことがわかる。この汀線移動量推定式は、 $t/T \geq 144,000$ の実験資料について求めたものであるから、図-2.19で示される各要因の頻度分布以内ではこの式の推定精度は高いが、当然のことながらこれらの領域から外



(a) 式(2.63)によるモデルAとの比較



(b) 式(2.64)によるモデルBとの比較

図-2.20 モデル式で推定した汀線移動と実験結果との比較

れるに従って精度が落ちるであろう。

(4) 汀線移動量に及ぼす諸要因の影響

式(2.64)は、式の形が多少複雑ではあるが、汀線移動量をかなり正確に推定できることがわかった。この式は、右辺第1項は定数第2項以降しだいに汀線の移動に及ぼす影響は少なくなるが、これらの項の中には $\sqrt{gH_0} d/\nu$ 、 H_0/L_0 、 d/H_0 、 h/L_0 および i_0 の要因が含まれている。これらの要因の中で、 H_0/L_0 、 d/H_0 および i_0 は2.3節および従来の研究で、その影響の大きさが指摘されていたものである。本研究では、従来指摘されていた要因のほかに、波と底質に関する Reynolds数 $\sqrt{gH_0} d/\nu$ および水深波長比 h/L_0 が新たに含まれている点が興味深い。そこで、式(2.64)をもとにして、汀線移動量に及ぼす諸要因の影響について考察を加える。

a) 粒径波高比 d/H_0 および波と底質に関する Reynolds数 $\sqrt{gH_0} d/\nu$ の影響

式(2.64)に、 $h/L_0 = 0.1$ 、 $i_0 = 1/20$ および $H_0/L_0 = 0.03$ を代表値として与え、 $\sqrt{gH_0} d/\nu$ と d/H_0 とをそれぞれ変化させて、 X_{sl}/L_0 を計算する。この計算では、水理模型実験では一般に水温 15°C ($\nu = 0.0114 \text{ cm}^2/\text{s}$)、 $d \geq 0.1 \text{ mm}$ および $H_0 \geq 4.0 \text{ cm}$ の条件で行なわれるので、これらの条件を満足する $\sqrt{gH_0} d/\nu$ および d/H_0 の値を決めた。そのため、 $\sqrt{gH_0} d/\nu$ をパラメーターとして X_{sl}/L_0 と d/H_0 との関係を表わす図-2.21には、以上の条件範囲における計算結果が示してあるので、図中の曲線が途中で止まっている場合がある。さらに、図-2.21には表-2.13の実験結果の中で、計算に使用した実験条件に近いものが比較のためにプロットしてある。このように、 $\sqrt{gH_0} d/\nu$ をパラメーターにして分類整

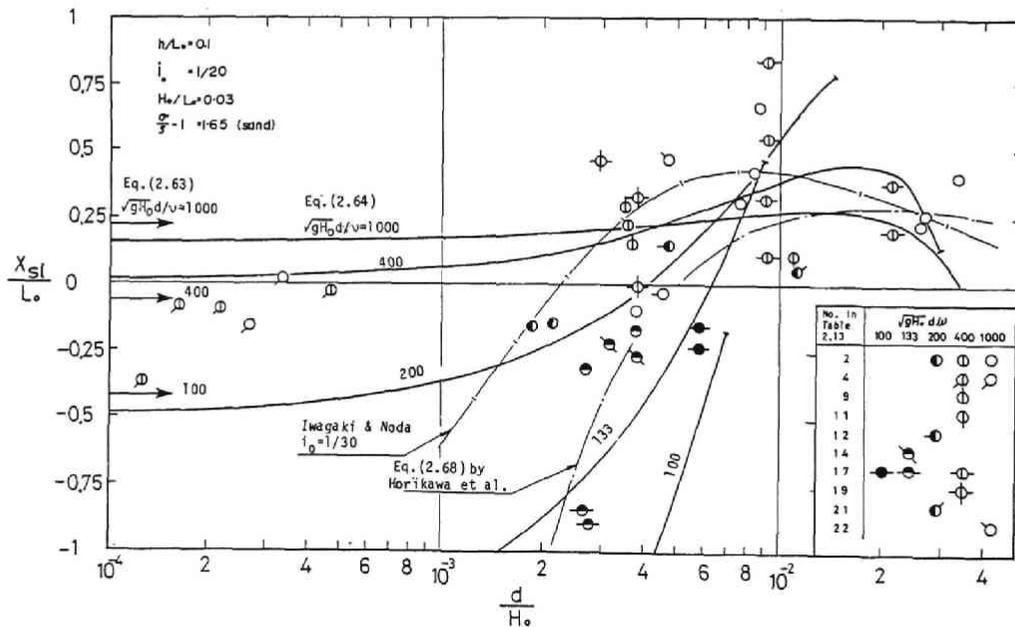


図-2.21 汀線移動に及ぼす粒径波高比 d/H_0 および波と底質に関する Reynolds数 $\sqrt{gH_0} d/\nu$ の影響

理すると多少のばらつきがみられるが、その傾向は計算による曲線と比較的よく一致している。中でも、現地海岸に匹敵するスケールの Saville の実験値（表-2.13 の No. 4 で示される記号）は、 $h/L_0=0.02 \sim 0.09$ 、 $i_0=1/15$ 、 $H_0/L_0=0.007 \sim 0.035$ および $t/T=9,500 \sim 26,000$ であり、計算による曲線の条件と多少異なるが、その傾向はよく一致している。また、図-2.21 にプロットした Saville およびその他の実験資料について式(2.64)を用いて推定した結果が図-2.20 (b) に示してあるが、計算と実験値とは実験誤差以内で一致している。このことから、図-2.21 における実験値のばらつきは、計算に使用したパラメーターおよび無次元水理量と実験条件との間の相違および実験誤差が原因していると考えられる。

また、式(2.63)についても同様に、 $\sqrt{gH_0} d/\nu$ をパラメーターとし、 $X_{s,t}/L_0$ と d/H_0 との関係が図-2.21 に併示してあるが、この式の場合、汀線移動量は d/H_0 の値による影響を受けることなく、 $\sqrt{gH_0} d/\nu$ によって汀線移動量が規定される。したがって、この図中には $\sqrt{gH_0} d/\nu = 1,000, 400$ および 100 における汀線移動量が左側の縦軸に矢印(→)で示してある。この図から、式(2.24)の場合、 h/L_0 、 i_0 および H_0/L_0 が一定であっても、汀線移動量は底質と波のスケールの比を表わす d/H_0 と底質と波の Reynolds 数 $\sqrt{gH_0} d/\nu$ による影響を強く受けることがわかる。

b) 沖波波形勾配 H_0/L_0 、水深沖波波長比 h/L_0 および初期浜勾配 i_0 の影響

式(2.64)に基づいて汀線移動に及ぼす H_0/L_0 、 h/L_0 および i_0 の影響について検討する。まず、式(2.64)中の無次元水理量を次のように変形する。

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{H_0} &= \frac{d}{L_0} \cdot \frac{L_0}{H_0} \\ \frac{\sqrt{gH_0} d}{\nu} &= \frac{d}{L_0} \cdot \frac{L_0}{H_0} \cdot \frac{\sqrt{gH_0} H_0}{\nu} \end{aligned} \right\} \quad (2.66)$$

この式を用いて、式(2.64)の右辺を整理すると、次のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{X_{s,t}}{L_0} &= 1.722 \times 10^{-1} - 5.528 \times 10^{-5} \left(\frac{d}{L_0}\right)^{-2} \left(\frac{H_0}{L_0}\right)^3 \left(\frac{\sqrt{gH_0} H_0}{\nu}\right)^{-2} \\ &\quad + 5.196 \times 10^5 \left(\frac{H_0}{L_0}\right) \left(\frac{\sqrt{gH_0} H_0}{\nu}\right)^{-1} \\ &\quad - 6.322 \times 10^5 \left(\frac{d}{L_0}\right) \left(\frac{H_0}{L_0}\right)^{-1} \left(\frac{\sqrt{gH_0} H_0}{\nu}\right)^{-1} \\ &\quad + 2.267 \times 10^6 \left(\frac{d}{L_0}\right)^{-1} \left(\frac{H_0}{L_0}\right) \left(\frac{\sqrt{gH_0} H_0}{\nu}\right)^{-2} \\ &\quad - 1.069 \times 10^4 \left(\frac{d}{L_0}\right)^{-2} \left(\frac{H_0}{L_0}\right)^2 \left(\frac{\sqrt{gH_0} H_0}{\nu}\right)^{-2} \\ &\quad - 3.857 \times 10^3 \left(\frac{h}{L_0}\right) \left(\frac{H_0}{L_0}\right)^2 + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + 2.169 \times \left(\frac{h}{L_0}\right)^3 + 5.876 \times 10^3 \left(\frac{H_0}{L_0}\right)^3 \\
& - 1.937 \times 10^2 (i_0) \left(\frac{H_0}{L_0}\right)
\end{aligned} \tag{2.67}$$

この式で、 $\sqrt{gH_0} H_0/\nu = 87,000$ （この値は $\nu = 0.0114 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 、 $H_0 \approx 10 \text{ cm}$ に相当する）とし、 $h/L_0 = 0.1$ あるいは 0.05 （造波水槽水平床部の水深が海浜の変形限界水深⁶¹⁾より浅くなるような値）とし、さらに $i_0 = 1/10$ 、 $1/20$ および $1/40$ とした場合、 $X_{sL}/L_0 = +0.1$ および -0.3 を満足する H_0/L_0 と d/L_0 との関係を試算で求める。この計算結果を h/L_0 と X_{sL}/L_0 をパラメーターにして図-2.22に示す。この図には、これらの要因の関係が計算で求まる部分のみが示してある。この図から、沖波波形勾配 H_0/L_0 の影響は、従来指摘されていたように d/L_0 が一定でも H_0/L_0 の値が変わる（小→大）と、汀線が後退 ($X_{sL}/L_0 = +0.1 \rightarrow -0.3$) することがわかる。また、造波水槽水平床部の水深と沖波波長との比の影響は比較的小さい。一方、初期浜勾配 i_0 の影響については、勾配が急 ($i_0 > 1/20$) になると、汀線移動量に及ぼす影響が無視出来なくなり、特に、汀線が前進する場合にこの要因の影響が顕著になる。

(5) 汀線の前進・後退の限界

堀川・砂村らによる初期勾配からの汀線の前進・後退の限界は、式(2.58)で表わされるが、式(2.63)および(2.64)からも同様にその限界条件を求めることができる。ここでは、汀線移動量の推定精度のよいモデル式Bの式(2.64)を用いて、限界条件を詳しく調べることにする。

そこで、式(2.67)の左辺の $X_{sL}/L_0 = 0$ とおき、 h/L_0 の値を定めて、 i_0 および $\sqrt{gH_0} H/\nu$ をパラ

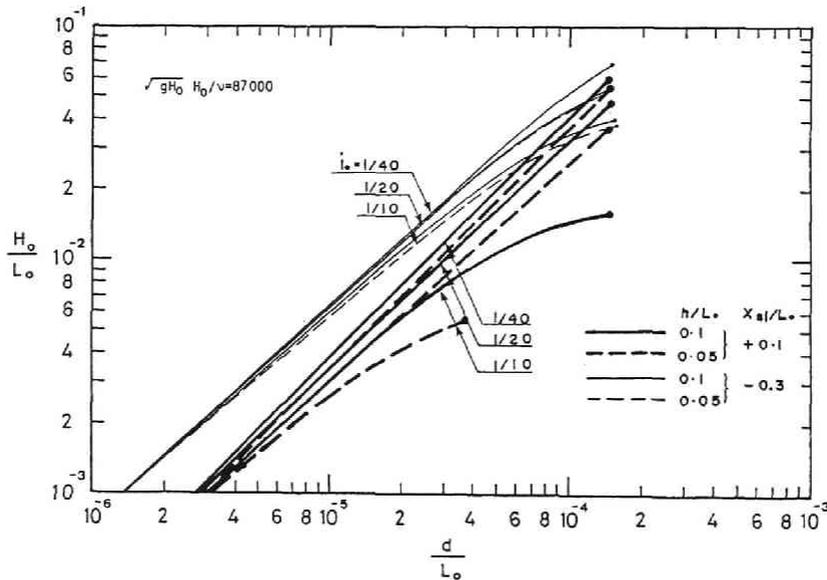


図-2.22 汀線移動量に及ぼす沖波波形勾配 H_0/L_0 、水深波長比 h/L_0 、および初期浜勾配 i_0 の影響

メーターとして、 H_0/L_0 と d/L_0 との関係を計算法で求める。いま、 $h/L_0 = 0.1$ 、 $i_0 = 1/10, 1/20, 1/40$ 、および $\sqrt{gH_0} H_0/\nu = 87,000$ および $690,000$ ($\nu = 0.0114 \text{ cm}^2/\text{sec}$, $H_0 = 40 \text{ cm}$) の値を使用する。これらの値を使って計算すると、方程式を満足する値はいくつか求まるが、実験結果と比較して意義のあるもののみを取上げて、汀線の前進・後退の限界が図-2.23 (a)および(b)に実線で示してある。この図中には、式(2.67)の関係を満足する値のみが示してある。

以上のようにして求めた汀線の前進・後退の限界曲線と、表-2.13で $h/L_0 \approx 0.1$ 、 $i_0 \approx 1/10 \sim 1/40$ 、 $\sqrt{gH_0} H_0/\nu \approx 87,000$ および $t/T \geq 140,000$ を満足する実験値との比較が図-2.23 (a)に示してある。この図で、 $H_0/L_0 < 0.01$ の部分については、表-2.13中のNo.4の実験結果が $t/T \approx 9,500 \sim 26,000 < 140,000$ となるが、図中にプロットしてある。一方、実験のスケールが大きい場合、すなわち、現地海岸に近い実験条件($\sqrt{gH_0} H_0/\nu = 690,000$)を用いて求めた限界曲線が図-2.23 (b)に示してある。この図中には、表-2.12中のNo.4のSavilleの実験は、 t/T の値が前述のように若干小さいが図示してある。図-2.23 (a)および(b)では、実験による汀線の前進・後退が、実験誤差の大きさを考慮し、汀線の後退($E: X_{s,t}/L_0 < -0.03$)、汀線の移動なし($NC: -0.03 \leq X_{s,t}/L_0 \leq 0.03$) および汀線の前進($A: X_{s,t}/L_0 > 0.03$)とに3分類し図示してある。比較のために、堀川・砂村らの判別式(2.58)に、 $i_0 = 1/20$ とし実験資料による係数($C'_1 = 10, 3$)および現地資料($C'_1 = 18.9$)を入れて得られる関係がそれぞれ図-2.23 (a)および(b)に破線で示してある。これらの2本の破線で挟まれる領域は、汀線の前進・後退の限界を表わしている。著者らが示した関係が、これらの領域内に位置していることは注目に値しよう。

以上から、式(2.67)において $X_{s,t}/L_0 = 0$ として得られる関係は、従来の汀線の前進・後退の限界に関する式(2.58)ともかなりよく一致することがわかる。この式中、 $\sqrt{gH_0} H_0/\nu$ は汀線移動を表わす非常に重要な要因であり、実験のスケールの影響、すなわち縮尺効果を表わすものと考えられる。

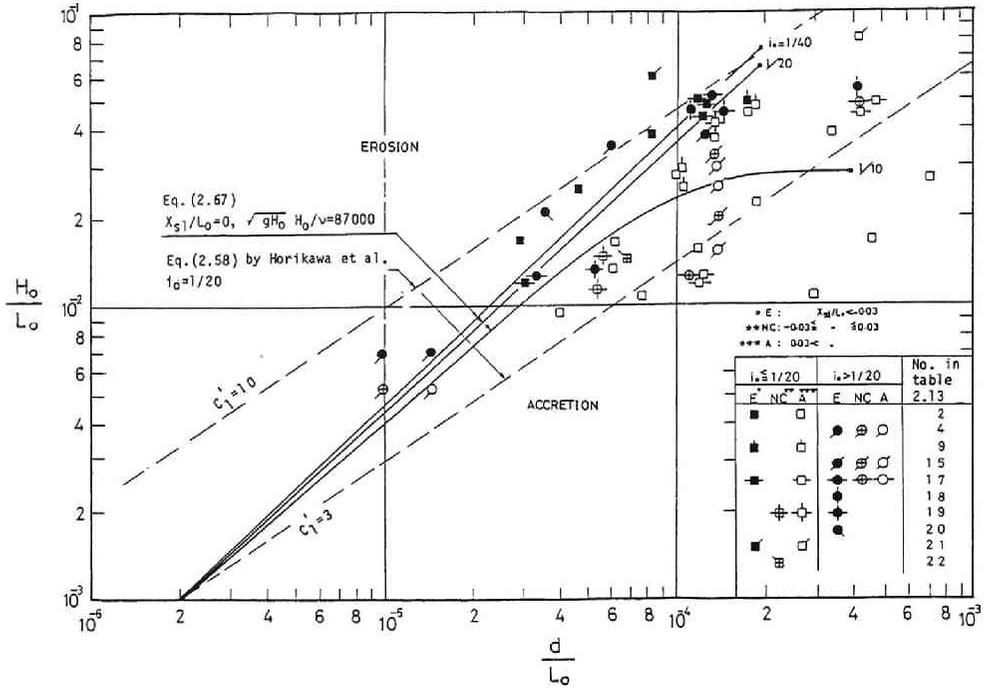
(6) 各種の汀線移動量表示式とその比較

従来、岩垣・野田³⁵⁾は、粒径波高比および沖波波形勾配が汀線の移動量に及ぼす影響を図的に示した。また、堀川・砂村ら⁵⁾は、次の汀線の最終変化量 X_s^* を表わす式を提示している。

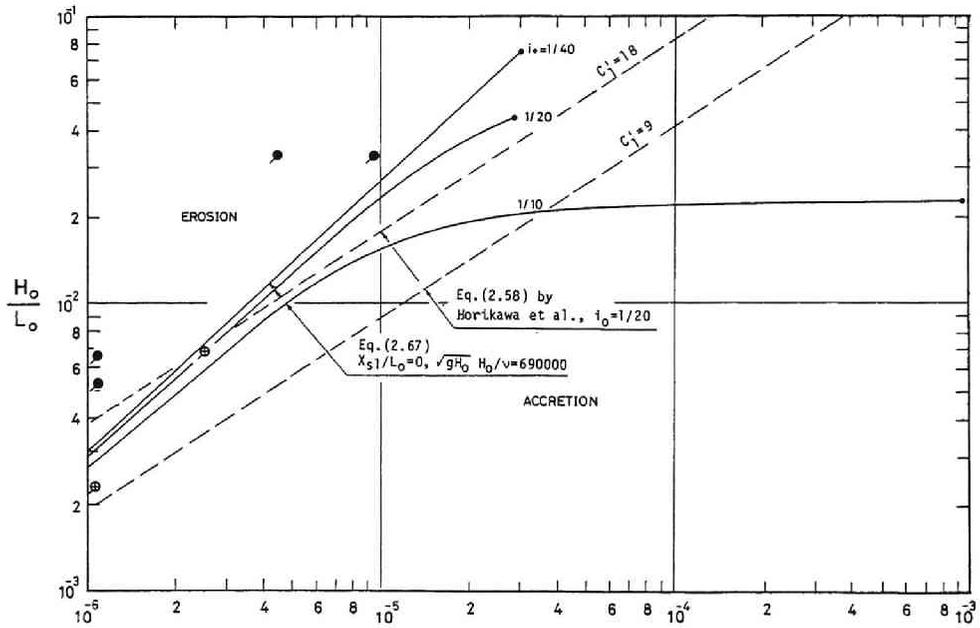
$$\frac{X_s^*}{L_0} = 0.15 \left\{ \frac{H_0^2}{gT^2} \cdot \frac{1}{d} \cdot \frac{1}{i_0} \right\}^{0.75} \left\{ 1 - \log_{10} \frac{H_0 i_0}{d} \right\} \quad (2.68)$$

この式中の記号は、本論文で使用しているものである。本研究の式(2.63)および(2.64)と岩垣・野田および堀川・砂村らの式を図-2.21に併示したので、相互の比較が容易にできる。従来の汀線移動量表示式では、底質に及ぼす水の粘性の影響が考慮されていないので、底質と波の相対的なスケールを表わす d/H_0 の値が比較的小さい場合には、式(2.64)と同じ傾向にある。しかし、実験のスケールが現地海岸に近づく($d/H_0 \lesssim 10^{-3}$)につれて、式(2.64)と相違が生じることが図-2.21からわかる。

さらに、本研究の汀線移動量推定式(2.63)および(2.64)と堀川・砂村らによる式(2.58)および(2.68)とを比較するために、 $X_{s,t}/L_0 = 0$ 、 $i_0 = 1/20$ 、 $\sqrt{gH_0} H_0/\nu = 87,000$ および $690,000$ として、汀線の前進・後退の限界が H_0/L_0 と d/L_0 との関係で図-2.24に示してある。この図から、いずれの式



(a) 実験スケールが比較的小さい場合 ($H \approx 10$ cm)



(b) 実験スケールが大きい場合 ($H \approx 40$ cm)

図-2.23 式(2.67)による汀線の前進・後退の限界

も同じような傾向を表わすが、式(2.63)および(2.64)は $\sqrt{gH_0} H_0/\nu$ の値によって、また式(2.58)は定数 C_1 によって、汀線の前進・後退の限界が変化することが興味深い。しかし、限られた実験資料から求められた式(2.68)は、比較的スケールの小さい実験結果とよく一致する。

以上から、本研究で指摘した粘性の影響を含む波と底質の Reynolds 数 $\sqrt{gH_0} d/\nu$ あるいは波の Reynolds 数 $\sqrt{gH_0} H_0/\nu$ は、汀線移動すなわち海浜変形の scale effect に関する重要なパラメーターであることがわかる。

(7) 海浜断面形状特性の表示式との比較

表-2.1で示したように、二次元海浜変形に関する従来の研究は、主要因として沖波波高勾配 H_0/L_0 、底質沖波波高比 d/H_0 (あるいは d/L_0)、初期浜勾配 i_0 および無次元沈降時間 H_0/wT (あるいは $\pi w/gT$)を取上げている。一方、2.5(4)~(7)では波と底質の Reynolds 数 $\sqrt{gH_0} d/\nu$ (あるいは $\sqrt{gH_0} H_0/\nu$)の重要性を指摘した。そこで、表-2.1の Nos. 4, 13, 14 および 18の研究で取扱っているパラメーター H_0/wT と本研究の式(2.65)および式(2.66)との関連性について若干の検討を加える。

いま、表-2.1のNo. 13, 14 および 18の関係式は、 $L_0 = gT^2/2\pi$ を用いて変形すると、いずれも次式で表示できる。

$$\frac{H_0}{L_0} = K_1 \sqrt{\frac{2\pi}{g}} \sqrt{\frac{w^2}{L_0}} \quad (2.69)$$

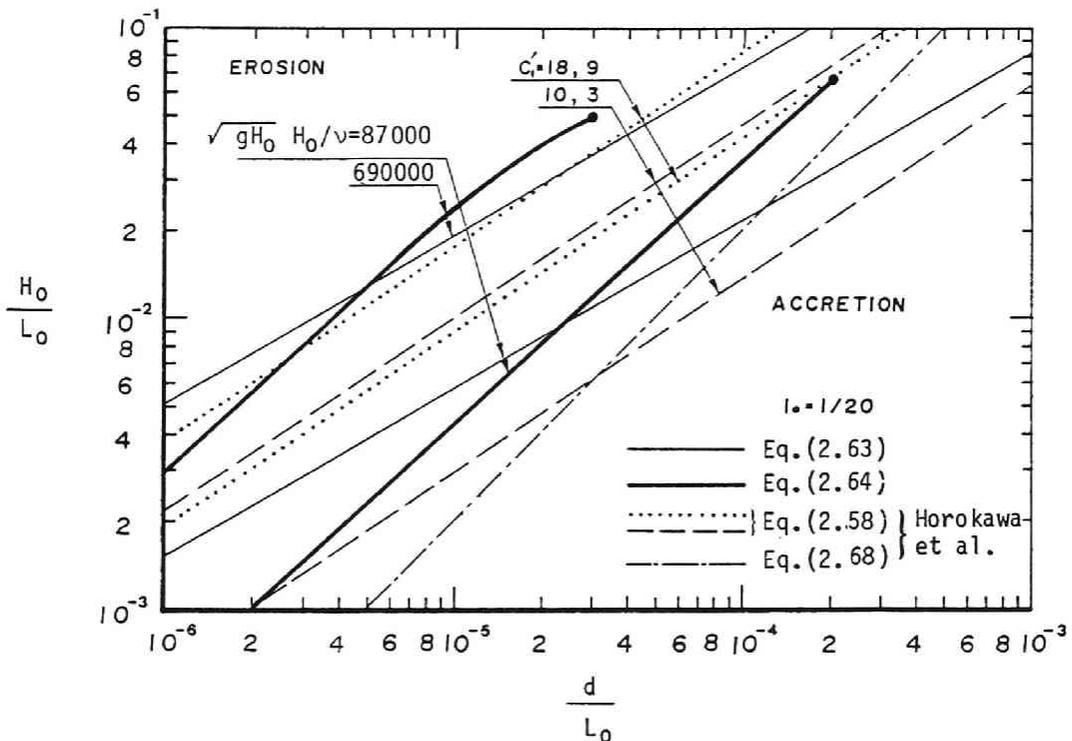


図-2.24 汀線の前進・後進に関する各表示式の比較

ここに、Dean⁹⁾: $K_1 = 0.85$, CERC¹⁰⁾: $K_1 = 1 \sim 2$ および服部ら¹⁴⁾: $K_1 = 0.0796/i_0$ である。また、沈降速度は、

$$w = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{1}{C_D} \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) g d} \quad (2.70)$$

ここに、 C_D ; 沈降物体の抗力係数、 σ/ρ ; 沈降物体の密度である。式(2.69)と(2.70)から、次式が得られる。

$$\frac{H_0}{L_0} = K_1 \sqrt{\frac{8\pi}{3} \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) \left(\frac{1}{C_D} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{d}{L_0} \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (2.71)$$

また、沈降速度が乱流状態 ($R_e = wd/\nu > 1.0$) のとき、 $C_D = R_e^{-n}$ ($0 < n < 1$) であるから、式(2.71)は次のようにも表わされる。

$$\frac{H_0}{L_0} = K_1 \sqrt{\frac{8\pi}{3} \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) R_e^{\frac{n}{2}} \left(\frac{d}{L_0} \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (2.72)$$

例えば、 $\sigma/\rho - 1 = 1.65$ (砂)、 $i_0 = 1/20$ さらに砂粒子を球とみなし、 $C_D = 0.5$ ($R_e \geq 1000$) および $C_D = 10$ ($R_e \approx 2$) とすると、式(2.71)は次のようになる。

$$\frac{H_0}{L_0} = K_2 \left(\frac{d}{L_0} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.73)$$

ただし、Dean: $K_2 = 1.01 \sim 4.42$, CERC: $K_2 = 1.19 \sim 10.41$, および服部ら: $K_2 = 1.89 \sim 8.29$ である。このように式中の定数 K_2 の範囲が研究者によって若干違っているが、無次元沈降時間を式(2.73)のように表わすと、 H_0/L_0 と d/L_0 との関係で海浜断面形状を正常海浜 (step型, deposition onshore, 堆積性海岸) と暴風海浜 (bar型, deposition offshore, 侵食性海浜) に統一分類できる。いま、この式に代表的な定数として、CERCの $K_2 = 1.19 \sim 10.41$ を H_0/L_0 と d/L_0 との関係で表わすと、図-2.25 中の実線で示される。この図では、底質砂の Reynolds 数 ($C_D = R_e^{-n}$) によって限界が変わるので、2本の実線で限界線が示してある。したがって、それぞれの限界線の上の部分では暴風海浜、下の部分では正常海浜となるので、2本の限界線で挟まれた領域では両者の中間状態を表わすものと考えられる。特に、式(2.69)の K_1 が一定値を取り、底質粒径も同一の場合には、当然のことながら図-2.25の中間領域はなくなり、一本の限界線で表わされる。

さらに、比較のために、表-2.1の Nos. 26, 11 および 12 で示す Rector による漂砂の移動方向、岩垣・野田および Nayak による沿岸砂州の発生限界がそれぞれ点線、1点鎖線、および破線で図-2.25に併示してある。図中、点線による限界線は、この線を境にして上側は沖向き、下側は岸向きの漂砂移動方向を表わしている。また、1点鎖線および破線の左上側は、沿岸砂州が発生する暴風海浜、反対に右下側は step 型の正常海浜を表わしている。このような関係および発生限界が無次元沈降時間による中間領域

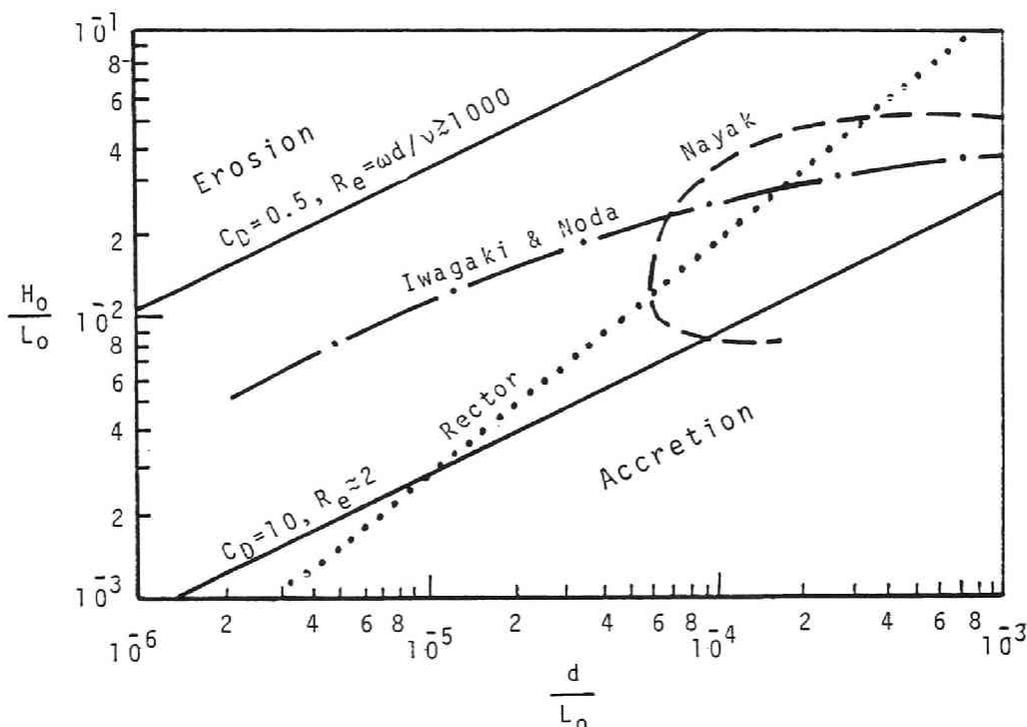


図-2.25 海岸断面形状の特性の表示法の比較

に入ることが興味深い。また、図-2.25と各種の汀線の前進・後退の限界表示式を示す図-2.24とを対比すると、式(2.73)の無次元沈降時間による中間領域内に汀線の前進・後退の限界が入ることも非常に興味深い。

2.6 結 語

本章では、二次元海浜変形を実験的に取扱う際に不可避な断面形状および波に関する実験誤差を明らかにするとともに、その大きさを定量的に表示した。次いで、この種の実験誤差を含む実験結果を解析的に考慮できる実験計画法を適用して、海浜変形を支配している主要な因子を対象にし、一連のプロセス(実験計画—実験—解析)で海浜変形に及ぼす因子の影響および効果を定性的に明らかにした。また、海浜変形の中で、特に汀線移動に注目して次元解析を行ない、この現象に関与しているすべての要因を取上げ、重回帰分析法を用いて汀線移動量表示式を提示した。この式にもとづいて、汀線移動量に及ぼす各種要因の影響、汀線の前進・後退の限界、および縮尺効果について検討した。

以下に各節の主要な結果を要約して結語とする。

- (1) 従来の二次元海浜変形に関する主な研究を系統的に整理し、相互の比較や問題点について検討し、実験誤差の定量化、海浜変形に及ぼす諸要因の影響について実験誤差を考慮した解析法、およびこれらの実験的研究結果を現地海岸へ適用するための相似則に関する研究の必要性を述べ、その問題点を明らかにした。
- (2) 海浜変形における berm頂の位置、汀線の移動量、砕波点の位置、berm頂の高さ、および海浜変

形の限界水深などの実験誤差を沖波波形勾配との関係で図示した。その結果、汀線の移動量と berm 頂の位置の実験誤差は、その傾向および大きさがよく一致しており、さらにこれらの傾向は碎波点の位置の実験誤差ともよく類似することがわかった。また、berm 頂の高さと海浜変形の限界水深の実験誤差は互いにその傾向がよく一致する。これらの実験誤差は、いずれも沖波波形勾配との関係で表示することができた。

(3) 海浜変形に及ぼす諸因子の影響を実験計画法を用いて調べた結果、海浜の変化量に有意な影響を及ぼしている因子として粒径波高比 d_{50}/H_0 の単独因子、 $(d_{50}/H_0) * (i_0)$ 、 $(d_{50}/H_0) * (H_0/L_0)$ および $(i_0) * (H_0/L_0)$ の 2 因子交互作用、さらに $(d_{50}/H_0) * (i_0) * (H_0/L_0)$ の高次交互作用である。さらに、これらの因子の寄与率分布は岸沖方向にかなり変動し、それぞれの因子に特有な位置で最大の寄与率を示す。これらの因子および交互作用は、基本的に粒径波高比、初期浜勾配および沖波波形勾配で構成されており、従来の海浜変形に関する研究に引用・議論された因子と同じである。誤差の寄与率、いわゆる実験誤差は岸沖方向にかなり変動するが、汀線付近で最も小さくなる。この実験誤差は、実験装置の性能(精度)にも大きく左右されることを指摘した。

(4) 次元解析で抽出した無次元水理量で構成した 2 種類のモデル式にもとづいて重回帰分析を行い、初期汀線からの汀線移動量の表示式を求めた。特に、汀線移動量は多変量多項式で表示できることがわかり、これから汀線移動量は、 d/H_0 、 i_0 、および H_0/L_0 などの要因が一定でも波と底質に関する Reynolds 数 $\sqrt{gH_0} d/\nu$ に依存することが明らかにされた。汀線移動量の表示式から求めた汀線の前進・後退の限界は、堀川・砂村らの判別式ともよく一致するのみならず、波に関する Reynolds 数 $\sqrt{gH_0} d/\nu$ あるいは波の Reynolds 数 $\sqrt{gH_0} H_0/\nu$ は、海浜変形の scale effect に関係する非常に重要なパラメーターであることがわかった。

(5) 従来の研究で海浜断面形状を正常海浜と暴風海浜とに分類するパラメーターとして、底質の無次元沈降時間 $\pi w/gT$ が有用視されているが、このパラメーターによる限界は、沈降速度の Reynolds 数 wd/ν によって変化するが、本研究で表示した汀線の前進・後退の限界ともよく一致する。さらに、このパラメーターと Rector による漂砂の移動方向表示式、岩垣・野田および Nayak の沿岸砂州の発生限界との対応性を明らかにした。

参 考 文 献

- 1) Rector, R. L.: Laboratory study of equilibrium profiles of beaches, Tech. Memo., No. 41, U. S. Army, BEB, 1954, pp. 1~38.
- 2) Bascom, W. N.: The relationship between sand size and beach-face slope, Trans. AGU, Vol. 32, No. 6, 1959, pp. 866~874.
- 3) Nayak, I. V.: Equilibrium profile of model beaches, Proc. 12th ICCE, ASCE, 1970, pp. 132~1340.
- 4) 岩垣雄一・野田英明：海浜変形に及ぼす scale effect の研究，京都大学防災研究所年報，第 14 号，1961，pp. 210~220.

- 5) 堀川清司・砂村継夫・近藤浩右：波による二次元海浜変形に関する実験的研究，第21回海岸工学講演会論文集，1974，pp. 193～199.
- 6) 堀川清司・砂村継夫・近藤浩右・岡田 滋：波による二次元汀線変化に関する一考察，第22回海岸工学講演会論文集，1975，pp. 329～334.
- 7) 伊藤政博・増田重臣：重回帰分析による二次元海浜変形実験における汀線移動量の表示について，土木学会論文報告集，第321号，1982，pp.91～101.
- 8) Johnson, J. W.: Scale effects in hydraulic models involving wave action, Trans. AGU, Vol. 30, 1949, pp. 517～525.
- 9) Dean, R. G.: Heuristic models of sand transport in the surf zone, Proc. Eng. Dyn. in Surf-zone, Institution of Engineers, Australia, 1973, pp. 208～214.
- 10) U. S. Army, Coastal Engineering Research Center: Shore Protection Manual, Vol. 1, 1977, pp. 4-82～4-83.
- 11) Sunamura, T. and Horikawa, K.: Two-dimensional beach transformation due to wave, Proc. 14th ICCE, ASCE, 1974, pp. 920～937.
- 12) 尾崎 晃・渡辺 揺：波による二次元汀線変化の相似則に関する実験的研究，第23回海岸工学講演会論文集，1976，pp. 329～334.
- 13) 榎木 亨：漂砂の動態と海岸侵食制御に関する研究，自然災害科学総合研究班，自然災害特別研究成果，No. A-53-6，1978，pp. 61～66.
- 14) 服部昌太郎・川又良一：砕波帯内の海浜変形過程，第25回海岸工学講演会論文集，pp. 218～222，1978，pp. 218～222.
- 15) Swart, D. H.: Predictive equations regarding coastal transports, Proc. 15th ICCE, ASCE, 1976, pp. 1113～1132.
- 16) 柴山知也：地形変形に伴う水理現象の変化を考慮した実験，砕波帯のダイナミックスに関する共同研究，海岸環境工学研究センター，Report No. 15, 1982, pp. 47～67.
- 17) Hallermeier, R. J.: Uses for a calculated limit depth to beach erosion, Proc. 16th ICCE, ASCE, 1978, pp. 1493～1512.
- 18) 榎木 亨：移動床実験の現地海岸への適用に関する一考察，第8回海岸工学講演会講演集，1961，pp. 134～138.
- 19) 佐藤昭二・田中則男：水平床における波による砂移動について，第9回海岸工学講演会講演集，1962，pp. 95～100.
- 20) 土木学会編：水理公式集，昭和46年度改訂版，1971，pp. 546～548.
- 21) Ippen, A. I. and Eagleson, P. S.: A study of sediment sorting by waves shoaling on a plane beach, Tech. Memo., No. 63, BEB, 1955, 83p.
- 22) Chesnutt, C. B.: Laboratory effects in beach studies, Analysis of results from 10 movable-bed experiments, Miscellaneous Report, No. 77-7, U. S. Army, CERC, 1978, 127p.

- 23) Smith, D. C., Herbich, J. B. and Spence, T. W.: Factors influencing equilibrium of a model sand beach, TAMU-SG-77-203, Report No. COE189, Texas A & M Univ., 1976, 83p.
- 24) 日本工業計測技術大系編集委員会編：工業計測概説/資料，日本工業新聞社，1969.
- 25) 芝田育彦・堀田重臣・伊藤政博：繰り返し実験による海浜変形の再現性について，名城大学理工学部研究報告，第21号，1981，pp.180～190.
- 26) 伊藤政博：海浜変形の模型実験における実験誤差，—特に汀線移動について—，名城大学理工学部研究報告，第22号，1982，pp.141～149.
- 27) Watts, G. M.: Laboratory study of effects of varying wave periods on beach profiles, Tech. Memo., No. 53, BEB, 1945, 19p.
- 28) 玉井佐一：海浜カスプの特性と海岸地形の変動予測に関する研究，京都大学学位論文，1979，pp. 56～59.
- 29) 合田良実：碎波指標の整理について，土木学会論文報告集，第180号，1970，pp.39～49.
- 30) 合田良実：造波水路における波浪実験の二・三の問題点について，第15回海岸工学講演会講演集，1968，pp.50～57.
- 31) 田口玄一：実験計画法 上・下，丸善，1962.
- 32) 依田 浩：実験計画法入門，朝倉書店，1973.
- 33) 増田重臣・伊藤政博：実験計画法による海浜変形の研究，第17回海岸工学講演会講演集，1970，pp.235～240.
- 34) Masuda, S. and Ito, M.: A study on the deformation of beach profiles by means of design of experiment, Coastal Engineering in Japan, JSCE, Vol. 14, 1971, pp. 83～95.
- 35) 岩垣雄一・野田英明：海浜変形の実験における縮尺効果の研究，第8回海岸工学講演集，1961，pp.139～143.
- 36) 田口玄一：直交表と線点図，丸善，1962.
- 37) 増田重臣・伊藤政博：海浜変形過程の推測統計的解析，土木学会論文報告集，第227号，1974，pp.29～43.
- 38) Masuda, S. and Ito, M.: Analysis of beach processes by means of the design of experiments, Coastal Engineering in Japan, JSCE, Vol. 18, 1975, pp. 75～93.
- 39) 増田重臣・伊藤政博：実験計画法による海浜変形の研究，—因子の要因効果について—，第18回海岸工学講演会論文集，1971，pp.365～370.
- 40) 増田重臣・伊藤政博：実験計画法による海浜変形の研究，—高次交互作用について—，第19回海岸工学講演会論文集，1977，pp.162～166.
- 41) 増田重臣・伊藤政博：多変量解析法による海浜変形過程の汀線移動量モデル式，第24回海岸工学講演会論文集，1977，pp.162～166.
- 42) 伊藤政博・増田重臣：重回帰分析による二次元海浜変形における汀線移動量の表示について，土木学会論文報告集，第321号，1982，pp.91～101.

- 43) 中村慶一 訳：応用回帰分析，森北出版株式会社，1968.
- 44) 奥野忠一他：多変量解析法，日科技連，1971.
- 45) U. S. Army Corps of Engineers, Beach Erosion Board: Laboratory study of equilibrium beach profiles, Bulletin of BEB, Vol. 1, No. 1, 1947, pp. 5~11.
- 46) Saville, T. Jr.: Scale effects in two dimensional beach studies, Proc. 7th IAHR, 1957, pp. A-3-1~8.
- 47) Shinohara, K., Tsubaki, T., Yoshitaka, M. and Agemori, C.: Sand transport along a model sandy beach by wave action, Coastal Engineering in Japan, JSCE, Vol. 1, 1958, pp. 111~129.
- 48) 井島 武・青野 尚：海岸汀線物質の砂堆積におよぼす影響（第1報），第6回海岸工学講演集，1959, pp. 65~72.
- 49) 樺木 亨：海岸侵食に関する基礎的研究，京都大学学位論文，1960, 305 p.
- 50) Popov, I. J.: Experimental research information by waves of stable profiles of upstream faces of earth dams and reservoir shores, Proc. 7th ICCE, ASCE, 1960, pp. 282~293.
- 51) Eagleson, P. S., Glenne, B., and Dracup, J. A.: Equilibrium characteristics of sand beaches in the offshore zone, Tech. Memo., No. 126, BEB, 1961, 66p.
- 52) 土屋義人・稲田和則：風波による海浜変形に関する実験，— 特に沿岸砂州の発生限界について —，第21回海岸工学講演会論文集，1974, pp. 219~224.
- 53) Raman, Dr. H. and Erattupuzha, J. J.: Equilibrium conditions in beach wave interaction, Proc. 13th ICCE, ASCE, 1972, pp. 1237~1256.
- 54) 田中則男・新保 修：移動床模型実験用底質材料としての石炭粉の特性について，港湾技術研究所報告，第12巻1号，1973, pp. 3~57.
- 55) 堀川清司・砂村継夫・鬼藤平三：波による海浜変形に関する一考察，第20回海岸工学講演会論文集，1973, pp. 357~363.
- 56) Paul, M. J., Kamphuis, J. W. and Brebner, A.: Similarity of equilibrium beach profiles, Proc. 13th ICCE, ASCE, 1972, pp. 1217~1236.
- 57) 増田重臣・伊藤政博：過渡状態下にある海浜変形過程の実験計画法による実研的研究(1)，第21回海岸工学講演会論文集，1974, pp. 225~230.
- 58) Chesnutt, C. B. and Galvin, Jr. C. B.: Lab profile and reflection changes for $H_0/L_0 = 0.02$, Proc. 14th ICCE, ASCE, 1974, pp. 958~977.
- 59) 伊藤政博・土屋義人・山下隆男：海浜変形の相似則に関する基礎実験，第33回年次学術講演会講演概要集第Ⅱ部，1978, pp. 810~811.
- 60) 前出 23)
- 61) 前出 13)

第3章 海浜変形の相似則に関する研究

3.1 概説

港湾を始めとする各種海岸構造物の設計に際しては、その周辺海域に及ぼす影響を前もって予測する1手法として、従来より移動床による二次元および平面実験が数多く実施されてきた。その代表的な実験例を表-3.1に示す。この種の模型実験では、まず何よりも現地海岸を水理学的に再現しなければならないが、再現性の鍵ともいえる相似則がまだまだ十分明らかになっていない。そのため、模型の実験条件設定には非常に苦心が払われている。例えば、模型の底質の比重を軽くしたり、水平・鉛直方向の縮尺に適当な歪を与えるなどして、現地海岸と相似になるよう数々の工夫が試みられてきた。しかし、再現性は必ずしも十分でなく、模型実験からは定性的な海浜変形の傾向を知るに止まっている場合が少なくない。

海浜変形に関する相似則の本格的研究の始まりは、おそらく1947年に Beach Erosion Board¹⁰⁾ (現在、U.S. Army, Coastal Engineering Research Center, CERC) が規則波を用いて行った二次元模型実験であろう。その後、海浜変形の相似則に関する理論的あるいは実験的研究が行われてきた。前者では、Le Méhauté¹¹⁾が砂の移動量を無次元量で表示し、これにもとずいて相似則を求めている。また、底面粗度および縮尺の歪効果を考察して、Kamphuis¹²⁾は底質の移動に関する時間縮尺を研究し、さらに、Mogridge¹³⁾は底面粗度および境界層厚の影響を考慮した相似則を提案している。一方後者では、Saville¹⁴⁾および岩垣ら¹⁵⁾は波および底質砂の粒径を Froude 則に従って縮小すると、原型と模型の海浜断面形状が必ずしも相似にならないことを確かめ、その原因としてそこに存在する縮尺効果を指摘した。Paulら¹⁶⁾および出口ら¹⁷⁾は、底質の比重を変えて実験的に相似則を検討した。また、Dalrympleら¹⁸⁾および野田¹⁹⁾は、模型の底質として砂を用い、縮尺の歪が相似性に与える影響を検討した。さらに、縮尺の歪のみならず、底質の粒径および比重を変えた Noda²⁰⁾の研究がある。以上の研究で提示された相似則は、一般に、特定な実験条件では有効であるが、現地海岸を直接対象とした検証実験がほとんど行われていない。

さらに、現地の海浜変形を模型実験で再現する場合、その時間的な変化についても相似則が保たれるような時間縮尺を明確にしておかなければならない。時間縮尺については、野田²¹⁾および榎木²²⁾が海浜変形の連続式と岸沖漂砂量式を用いて、若干の考察を行っている。佐藤ら²³⁾は、須磨海岸を対象にして、水平と鉛直方向の縮尺に歪を与えた模型実験で、現地海岸と実験で海浜変形に伴う土量変化が相似になるように時間縮尺を定めている。また、オランダの Vellinga⁸⁾は Delta Flume と称する超大型の造波水槽を使い、台風が接近し、通過する場合の砂丘の侵食について、鉛直縮尺 1/7.5、および水平縮尺 1/7.13 の模型を造り、時間縮尺を鉛直縮尺に対する Froude 則で与えた興味ある実験を行っている。このように海浜変形の時間縮尺についてもかなり多くの研究が行われてきたが、現地海岸を対象にした十分な検証はほとんど実施されておらず、一般的には普通性に乏しいといわざるをえない。

3.2 節では、原型と模型の二次元平衡海浜断面形状および碎波特性がどの程度一致しておれば、両者が相似とみなせるかを判定するための基準を、2章 2.3 節の実験誤差の表示式に基づいて示す。3.3 節で

表-3.1 現地海岸の模型実験例

No	実験者名 あるいは 依頼機関	実験名 あるいは 研究報告名	対象海岸	現地条件	模 型 実 験				実験の概要	
					規模	縮 尺		底 質		
						鉛直	水平			時間
1	Ozaki, A. ¹⁾ (1964)	On the effect of an offshore breakwater on the maintenance of a harbor constructed a sandy beach	北海道 節婦港	$H=1.5\sim 2.0\text{ m}$ $T=7\sim 10\text{ s}$ 波向: SSW	平面 実験	1/100 1/50	1/100 1/50	6~90 時間 (平衡 状態)	現地海浜砂	離岸堤によるトンボロの発生を実験的に予測。現地海岸に離岸堤を施工した結果、実験と同様のトンボロが発生
2	野田英明 ²⁾ (1966)	茨崎漁港の漂砂に関する実験 (その1)	福井県 茨崎漁港	$H=4\text{ m}$ $T=6\text{ s}$ 波向: NW $d_{50}=0.2\text{ mm}$	平面 実験	1/50	1/50	5時間 (平衡 状態)	$d_{50}=1.13\text{ mm}$ $s'=1.15$ 塩化ビニール粒 (沈降速度による相似則で粒径を決定)	実験結果から定性的な傾向を見出した
3	堀川清司 ・ 佐々木民雄 ³⁾ (1970)	養浜工に関する基礎実験	新潟海岸	$H_0=2.53\text{ m}$ $T=8\text{ s}$ $d_{50}=0.3\text{ mm}$	平面 実験	1/50 1/33	1/50	5時間	$d_{50}=0.17\text{ mm}$ $s'=2.00$ バーライト $d_{50}=0.15\text{ mm}$ $s'=1.70$ メサライト $d_{50}=0.16\text{ mm}$ $s'=2.65$ 砂	養浜と離岸堤による海岸地形変化の検討。現地との相似性については詳しく調べてない
4	Zwamborn, J.A. et al. ⁴⁾ (1970)	Under water mound for the protection of Durban's beach	南アフリカ Durban 海岸	$d_m=0.35\text{ mm}$	2次元 実験	1/100	1/100	平衡 状態	$d_m=0.27\text{ mm}$ $s'=1.35$ Anthracite (摩擦速度と沈降速度との比による相似則)	土砂による潜堤の変形およびその効果を実験。結果は現地とよく一致した。
5	佐藤昭二 ⁵⁾ 他 (1973)		静岡県 清水港	$H=2\text{ m}$, $T=9\text{ s}$ 波向: ENE $H=5\text{ m}$, $T=18\text{ s}$ 波向: SSE $d=5\text{ mm}$	平面 実験	1/100	1/100	4時間 現地との対応で決定	$d_m=0.2\text{ mm}$	防波堤設置による周辺海岸への影響を実験。定性的に現地海岸を再現している
6	静岡県 ⁶⁾ (1973)	田子の浦港海岸侵食対策水理模型実験報告書	静岡県 田子の浦 海岸	$H_0=1.5\sim 10\text{ m}$ $T=12\sim 17\text{ s}$ $d_{50}=0.4\sim 0.5\text{ mm}$	2次元 実験	1/50	1/50	4時間	$d_{50}=0.18\text{ mm}$ $d_{50}=0.24\text{ mm}$ $s'=2.68$ 砂 $d_{50}=0.31\text{ mm}$ $s'=1.53$ 石炭粉 (沈降速度による相似則を参考)	離岸堤設置による洗掘・安定性を調べ、最適堤体断面形状を検討
				$H_0=3\text{ m}$ $T=12\text{ s}$	平面 実験	1/75	1/120	現地と 模型で 欠潰土 量と比 較して 時間縮 尺を決定	$d_{50}=0.24\text{ mm}$	離岸堤による侵食防止工法の実験
7	田中則男 ⁷⁾ 小山内英雄	養浜工に関する研究 (その2) <昭和51年実施>	兵庫県 須磨海岸	$H_{1/3}=2.4, 4.6\text{ m}$ $T_{1/3}=8, 10\text{ s}$ 波向: S $d_{50}=0.3\sim 1.0\text{ mm}$	平面 実験	1/60	1/60	6時間	$d_{50}=0.19$	T型突堤開口部への離岸堤設置の適否を実験的に検討。定性的に一致
8	Vellinga, P. ⁸⁾ (1982)	Beach and dune erosion during storm surges	オランダの Dutch 海岸	$H=1.5\sim 2.0\text{ m}$ $T=5.4\sim 7.6\text{ m}$ 最大潮位偏差 $=5\text{ m}$	2次元 実験	1/1 1/7.5	1/1 1/7.13	鉛直縮 尺の Froude 則	$d_{50}=0.095\text{ mm}$ $s'=0.225\text{ mm}$ 波高・周期および沈降速度の無次元パラメータ $\pi w/gT$ で決定	現地海岸に匹敵するような大規模模型と中規模模型を用いて縮尺関係調べ、台風通過による砂丘侵食を検討。比較的現地海岸をよく再現
9	Hughes, S. A. ⁹⁾ (1983)	Movable-bed modeling law for coastal dune erosion	米国 フロリダ州 Panahandle 海岸	$H=2.6\text{ m}$ $T=11\text{ s}$ 潮位偏差= 2.4 m $d_m=0.262\text{ mm}$	2次元 実験	1/25	1/51.56	1/10.31	$d_m=0.147\text{ mm}$ (同上)	ハリケーン Erois の通過による砂丘侵食の再現。再現性は比較的良好

は、現地海岸に近い条件の規則波を起せる実験装置を使用して得た平衡海浜断面形状および実験条件を原型として、模型の実験縮尺と粒径縮尺をそれぞれどのように定めると、両者の海浜断面形状が相似となるかを実験的に見出し、海浜変形の相似則を明らかにする。3.4節では、現地の海岸のように、入射波浪の特性が時間的に変化する過波状態下の海浜変形を実験的に再現するためには、時間縮尺が不可欠である。そこで、原型と模型の実験条件を3.3節の海浜変形の相似則で定め、原型の特定な波の作用時間における海浜形状に対して模型の波の作用時間がどのようなときに、海浜形状が相似になるかといった時間縮尺を明らかにする。

さらに、3.5節では、明らかになった海浜変形の相似則と時間縮尺を検証するため、季節風の通過に伴う新潟県大潟海岸における比較的短期間の海浜変形について、その再現実験を行うとともに、実験に用いる代表波の取扱いについて検討する。同様に、3.6節では、比較的長期間（6ヶ月間）に及ぶ静岡県遠州海岸の海浜変形の再現実験を行って、相似則の適用性を検証し、代表波の取扱い方を考察する。3.7節では、3.5節および3.6節に示した現地海岸の再現実験結果ならびに他の研究者によって従来実施された再現実験結果と、3.3節に示した海浜変形の相似則とを比較検討する。3.8節では、本研究で得られた研究結果を総括的にとりまとめて結語とする。

3.2 相似性の判定基準

(1) 定量的判定法

原型と模型で海浜変形が相似になるためには、海底地形、波、および波による底質の移動などの諸現象がそれぞれ相似とならなければならない。いま、平衡状態にある二次元海浜変形を対象とするならば、次の諸現象が相似とならなければならないであろう。

- ① 海浜断面形状
- ② 漂砂の移動形式と移動限界水深、および岸沖漂砂量とその分布
- ③ 碎波点の位置、破波高、碎波形式、波のそ上高さ、および反射率などの波の諸特性

ここでは、①海浜断面形状に関して、実験誤差の中にかくれる砂れん程度の微地形については相似性の対象としない。一般に、原型と模型の海浜断面形状が、実験誤差の範囲内で幾何学的に相似であるならば、②の現象も大局的に相似性を満足しているものと考えて、①による相似則の判定によることにする。③については、波の諸特性の中で、特に碎波点の位置も相似性の判定条件の参考とする。このような観点で、海浜変形の相似性を次の3つに分けて判定する。

① 相似：原型と模型で、汀線移動量、berm頂の位置と高さ、および海浜の変形限界水深などの海浜断面形状を代表する量や、碎波点の位置などの相違が、式(2.7)、(2.8)、(2.9)、(2.10)、および(2.11)で表示される実験誤差の2倍以内に入る場合。

② 擬相似：相似と非相似との中間的な場合。

③ 非相似：海浜断面形状が正常海浜と暴風海浜のように根本的に異なるか、あるいは実験誤差の4倍以上の相違がある場合。

(2) 定性的 (タイプ) 判定法

Johnson²⁴⁾は、海浜の平衡断面形状をbarあるいはstepの存在によって正常海浜、暴風海浜および中間型の3種類に大別し、沖波波形勾配との関係で論じた。土屋ら²⁵⁾は底質の移動方向と移動量に注目して、海浜断面形状を3種類に分類している。その後、堀川・砂村ら²⁶⁾は汀線の移動を加味した分類法を提示してとる。さらに、田中・新保²⁷⁾による4種類に分類する方法なども提唱されている。

ここでは、従来のタイプに分類する方法に実験誤差による影響を考慮して、図-3.1のように初期地形からの海浜変形について、次のように分類する。

タイプ I : 汀線が後退し、沖に砂が堆積する

bar型地形

タイプ II : 汀線の前進あるいは後退量が非常に

少なく、実験誤差以内で、断面形状がタイプ I あるいはタイプ III のいずれにも属さない地形

タイプ III : 汀線が前進し、沖に砂が堆積しないstep型地形

原型と模型の海浜断面形状を I ~ III のタイプに分け、タイプの一致の割合によって次のように判定する。

- ① 相似 : 両者のタイプが同じ場合。
- ② 擬相似 : 原型と模型で、タイプ I と II あるいは II と III になる場合
- ③ 非相似 : タイプ I と III のように全く相反する場合。

3.3 海浜変形の相似則

(1) 研究方法^{28), 29), 30)}

実験的に海浜変形の相似則を求めるために、次の考えに従って研究を進める。すなわち、海浜変形の相似性については、まず対象とする現地海浜における波の変形、特に碎波特性が相似にならなければならない。さらに、波の作用による漂砂が相似性を保てば、少なくとも海浜変形は実際上相似になるものといえよう。したがって、まず初期海浜地形は幾何学的相似を満足すべきである。さらに波の変形特性を相似にするためには、Froude の相似則を満足しなければならない。この場合、縮尺をあまり小さくすると、碎波の縮尺効果が現われるので、できるだけ実験波の周期を 1 sec 以上とする。同一の初期勾配に対して、大小の波の特性を Froude の相似則で相似にしておき、数種の底質 (この場合は比重 2.65 程度の砂) について海浜変形の実験を行い、その中で海浜断面形状が最も相似となる底質を見出し、底質に関する相似則を実験的に究明する。換言すれば、波の特性の方は Froude 則に従うものとした場合、海浜断面

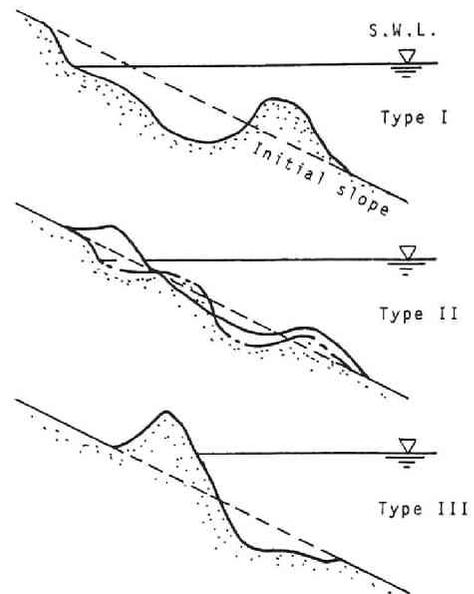


図-3.1 海浜変形断面のタイプ分類

が相似になる底質特性（ここでは底質の粒径）を実験的に見出すことになるから、漂砂現象における縮尺効果を底質粒径に集約して究明することになる。

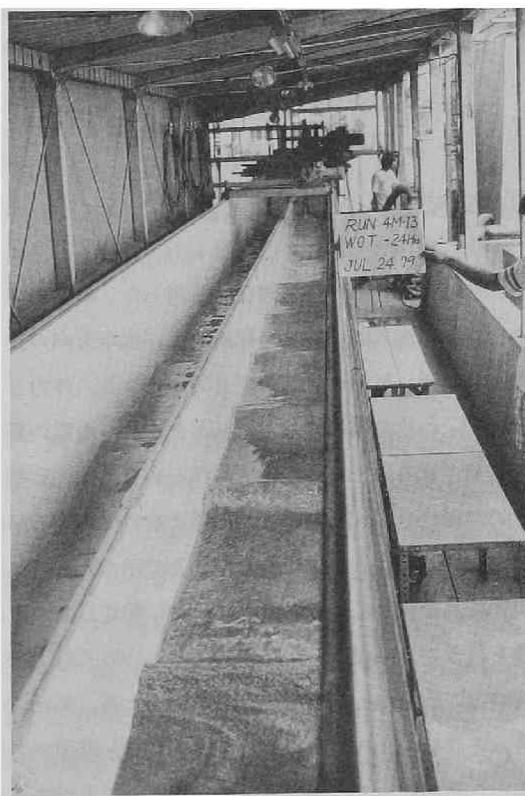
したがって、原型と模型で、外力である波の特性の縮尺（実験縮尺）は、Froude の相似則に従って定める。一方、底質特性（粒径縮尺）は Froude 則とは無関係に定め、実験縮尺に対して粒径縮尺をどのように歪ませれば、両者の海浜変形が相似（漂砂が相似）となるかを見出す。

(2) 実験装置および実験方法

原型としては、現地海岸に近い大スケールの実験が可能でなければならないので、写真－3.1 に示すような京都大学防災研究所附属宇治川水理実験所の長さ約 78 m、幅 1 m、および深さ 1.5 m のコンクリート造のフラッター式造波機を取付けた波浪水槽を使用した。この波浪水槽内に底質として砂を用いて、初期浜勾配 1/30 の一様海浜を作り、これに波を 60 時間作用させて、ほとんど平衡状態になった海浜断面形状を原型とした。実験条件は、表－3.2（Run No. 3）に示すように沖波波形勾配がゆるやかな場合と、表－3.3（Run No. 4）に示す比較的急な場合とに分けた。従来、Saville¹⁴⁾ は、ピストン型の造波機を有する長さ 194 m、幅 4.6 m、および深さ 6 m の超大型の造波水槽内に、砂で初期勾配 1/15 の一様海浜を作り、California の Mission Beach と同程度の波を作用させた実験結果（表－3.2 の Run No. T－26 および表－3.3 の Run No. T－56、Run No. T－52）を報告しているので、この実験も原型



写真－3.1 大型波浪水槽による海浜変形



写真－3.2 中型造波水槽による海浜変形

表-3.2 原型と模型の海浜変形の実験条件例と相似性の
($H_0/L_0 \cong 0.0065, 0.015$)

Scale	Run No.	i_0	d_{50} (mm)	T (sec)	H_0 (cm)	h (cm)	H_0/L_0	d_{50}/H_0	h/L ₀	$\frac{\sqrt{gH_0} \cdot d_{50}}{v}$	t/T
Proto.	3'		0.94	3.00	20.6	100.0	0.015	$\times 10^{-3}$ 5.0	$\times 10^{-2}$ 7.0	925	$\times 10^4$ 7.2
1/1.82	3M-30		0.42	2.22	11.8	55.0	0.015	3.6	7.2	391	3.9
1/2	3M-29		0.42	2.12	9.6	50.0	0.014	4.4	7.1	361	4.1
1/3	3M-28		0.42	1.73	6.8	33.3	0.015	6.2	7.1	296	5.0
1/4	3M-27	1/30	0.42	1.50	4.8	25.0	0.014	8.8	7.0	258	5.8
1/5	3M-28		0.42	1.34	4.6	20.0	0.017	9.1	7.1	250	6.4
1/6.7	3M-25		0.42	1.16	3.5	15.0	0.017	12.0	7.2	215	7.4
1/2.9	3M-23'		1.62	1.76	7.2	34.5	0.015	22.4	7.1	1194	0.1 7.2
Proto.	T-26		0.22	11.33	138.2	426.7	0.0069	0.16	2.1	664	1.3
1/10	T-27		0.15	3.57	13.4	42.7	0.0067	1.1	2.1	200	1.3
1/20	T-28	1/15	0.15	2.53	6.6	21.3	0.0065	2.3	2.1	134	1.3
1/30	T-29		0.15	2.06	4.4	14.2	0.0066	3.4	2.1	86	1.3
1/40	T-29'		0.15	1.79	3.4	10.7	0.0068	4.4	2.1	76	1.3

$d_{50}=1.62\text{mm}$, sorting coef.=1.12, specific gravity=2.55
 0.94mm , " " =1.15, " " =2.60 } sand
 0.42mm ; " " =1.19, " " =2.68 }
 0.15mm , " " =1.23, " " =2.77 silica-sand

として取扱う。

一方、模型としては、図-2.1 および写真-3.2 の名城大学理工学部土木工学科の造波水槽を中仕切板で二分して、その片側の部分を使用した。模型における実験条件は、前述した相似則の究明に対する考え方に従い、海浜断面形状の鉛直および水平方向の長さの寸法は、幾何学的相似則に従うものとし、縮尺の歪は与えず、原型の初期勾配と同一とする。外力としての波高および周期などの波の特性については、Froude の相似則に従ってこれらを定め、海浜の変形がほとんど平衡状態になったと考えられるまで、波を作用させる。また、模型における底質には、原型とほぼ同一の比重を有する砂あるいは珪砂を使用し、その粒径はFroude 則とは無関係に定めて、海浜断面形状が相似になる関係を見出す。

実験方法は、表-3.2 および 3.3 で示したように原型と模型の底質砂の粒径縮尺を一定にしたままで、実験縮尺を徐々に変化させる。これは、前述したように、実験縮尺に対して粒径縮尺を変えて(歪めて)実験を行うことになる。波の作用時間については、Run No. T-26, T-56 および T-52 に対する模型実験は、Froude 則の時間縮尺で決めたが、Run No. 3 および 4 の模型については、ほとんど平衡海浜となる 24~48 時間とした。なお、原型と模型で使用する造波水槽の規模、造波機の形式、および初期汀線から造波板までの距離が幾何学的に相似となるよう配慮したが、模型の縮尺によっては、これらの相似性が十分満足されない場合も生じた。実験中、沖波波高 H_0 および水の動粘性係数 ν (水温変化) が若干

判定結果

λ_d	Judge- ment	Beach profile by Fig.3.1	
		Classi- fication	Judgement by type
0.447	△	III	○
	△	III	
	○	III	
1.72	○	III	○
0.326	△	II	○
	◆	II	
	△	I	
	△	II	
	◆	II	

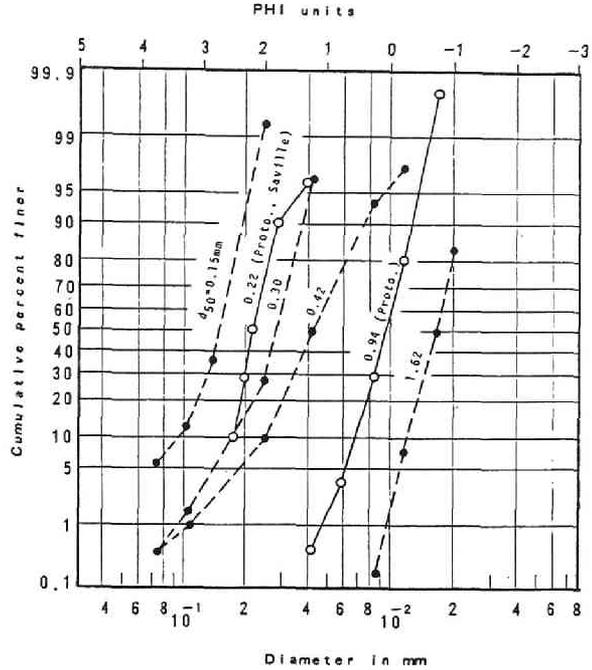


図-3.2 原型および模型に使用した底質砂の粒径分布

変動したので、実験中の値を平均して、表-3.2 および 3.3 に実験条件が整理してある。そのため、これらの表中の H_0/L_0 の値が完全に一致していない。図-3.2 には、原型および模型に使用した砂および珪砂の粒径分布を示す。

(3) 実験結果とその相似則

a) 海浜変形の相似則

表-3.2 の Run No. 3 を原型として、Run No. 3M-30~3M-25 を模型とした場合と、Saville の実験 (Run No. T-26) に対して Run No. T-27~T-29' を模型とした場合について、原型と模型の海浜断面形状の比較が図-3.3 に示してある。これらの図中には、原型と模型の海浜断面形状の比較の他に、波の特性として砕波点の位置、相対的砕波高 H_b/H_0 および (P: 巻き波砕波, S: 崩れ波砕波, SP: 砕け寄せ波砕波, およびそれぞれの中間の砕波については、例えば P+S: P と S との中間の砕波形式) が併示してある。また、表-3.3 に示した実験については、同様な比較を図-3.4 に示してある。すべての実験結果をこのように整理した後、前述した 3.2 (1) の ①~③の基準で、比較照合し、相似 (○印) 擬相似 (△印), および非相似 (◆印) のいずれかに判定し分類する。これらの判定結果が図-3.3 および 3.4 の左側に示してある。これらの判定で相似になっている場合は、海浜断面形状はもちろんのこと、砕波点の位置が原型と模型でかなり良い相似性を示している。このようにすべての実験結果の組合せ

表-3.3 原型と模型の海浜変形の実験条件例と相似性の判定結果

Scale	Run No.	i_0	d_{50} (mm)	T (sec)	H_0 (cm)	h (cm)	H_0/L_0	d_{50}/H_0	h/L_0	$\frac{\sqrt{gH_0} \cdot d_{50}}{v}$	t/T
Proto.	4		0.94	2.00	21.8	100.0	0.035	4.3×10^{-3}		1060	10.8×10^4
1/2	4M-53		0.15	1.41	10.7	50.0	0.035	1.4		135	6.1
1/4	4M-52		0.15	1.00	5.4	25.0	0.035	2.8		96	8.6
1/6.27	4M-51		0.15	0.80	3.9	16.0	0.039	3.8		81	10.8
1/10	4M-50		0.15	0.63	3.0	10.0	0.048	4.8		63	13.7
1/2	4M-63		0.30	1.41	10.9	50.0	0.035	2.8		337	6.2
1/4	4M-62		0.30	1.00	5.4	25.0	0.035	5.6		258	8.6
1/6	4M-61		0.30	0.82	3.6	16.7	0.035	8.3		203	10.5
1/10	4M-60		0.30	0.63	2.2	10.0	0.035	13.6		176	13.7
1/1.82	4M-20	1/30	0.42	1.48	14.2	55.0	0.042	3.0	0.16	433	5.8
1/2	4M-19		0.42	1.41	12.1	50.0	0.039	3.5		401	6.1
1/3	4M-18		0.42	1.15	8.1	33.3	0.039	5.2		328	7.5
1/4	4M-17		0.42	1.00	5.8	25.0	0.037	7.2		278	8.6
1/5	4M-16		0.42	0.89	4.8	20.0	0.03	8.8		253	9.7
1/6.7	4M-15		0.42	0.77	3.6	15.0	0.039	11.7		219	11.2
1/2.5	4M-14		1.62	1.26	8.7	40.0	0.035	18.6		1309	6.9
1/3	4M-13		1.62	1.15	8.1	33.3	0.039	20.0		1264	7.5
1/4	4M-12		1.62	1.00	5.9	25.0	0.038	27.5		1078	8.6
1/5	4M-11		1.62	0.89	5.5	20.0	0.045	29.5		1040	9.7
1/6.7	4M-10	1.62	0.79	3.5	15.0	0.038	46.3	832	11.2		
Proto.	T-56	1/15	0.46	5.6	171.2	442.0	0.035	0.27	9.0	1653	2.6
Proto.	T-52		0.22	5.6	171.2	442.0	0.035	0.13	9.0	790	2.6
1/8	T-57		0.15	1.98	20.4	55.3	0.033	0.74	9.0	219	2.6
1/20	T-58		0.15	1.25	7.7	22.1	0.032	1.95	9.0	132	2.5
1/30	T-59		0.15	1.02	5.8	14.7	0.036	2.59	9.0	119	2.6

(a) 原型 { Saville の実験, (Run No. T-26) } と模型 (Run No. T-27 ~ T-29') の相似性 ($H_0/L_0 \approx 0.007$)

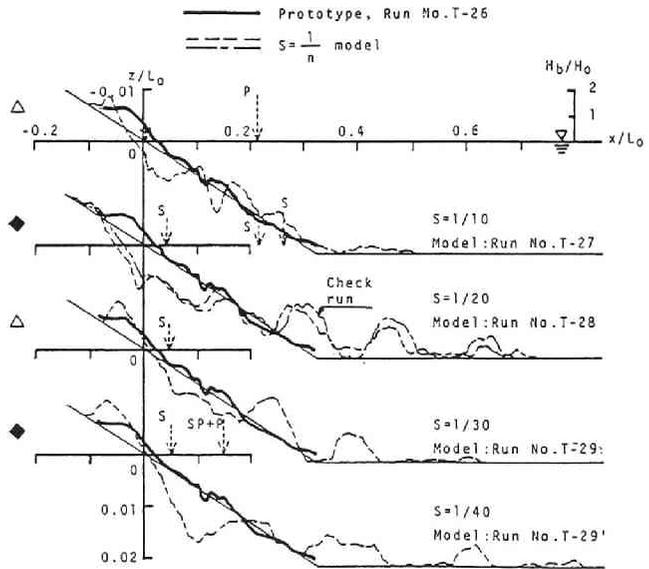
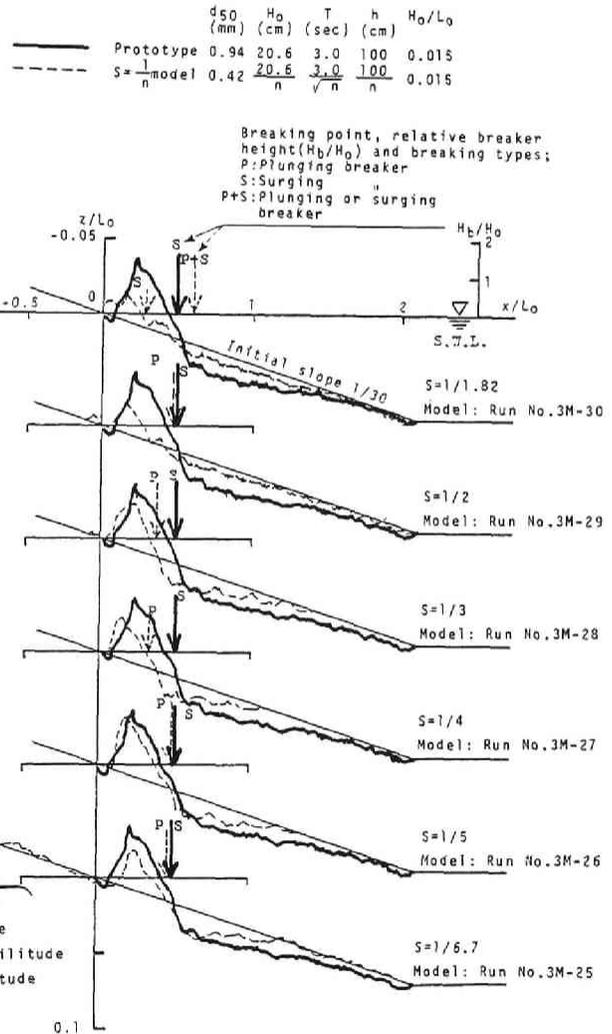


図-3.3 原型と

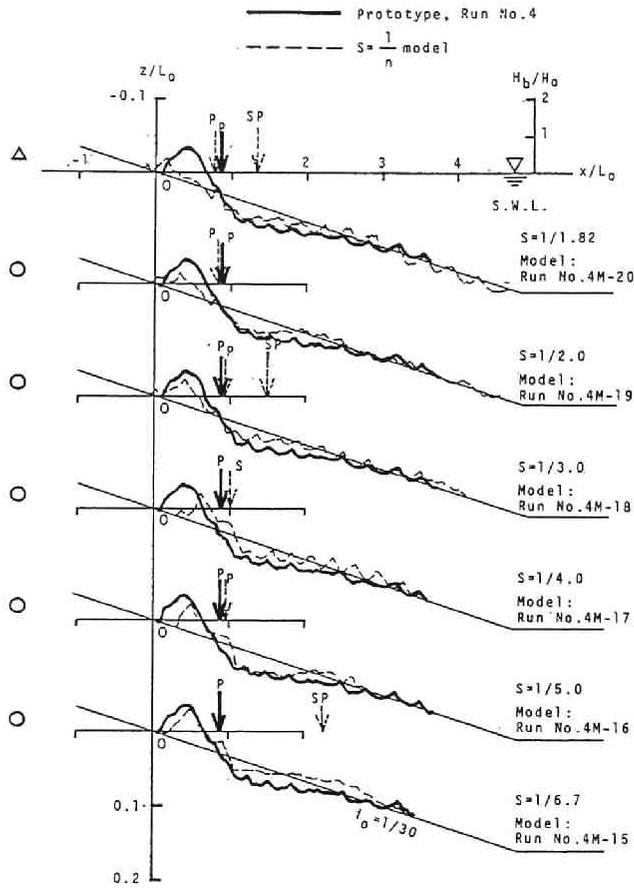
$(H_0/L_0 \doteq 0.035)$

λ_d	Judge- ment	Beach profile by Fig.3-1	
		Classi- fication	Judgement by type
0.16	◆	III	△
	◆	II	△
	◆	I	◆
	◆	II	△
0.32	△	II	△
	○	III	○
	○	III	○
0.447	△	II	△
	○	III	○
1.72	△	III	○
	△	III	○
	◆	II	△
0.33 0.68	○	I	○
	○	I	○
	○	I	○
	○	I	○

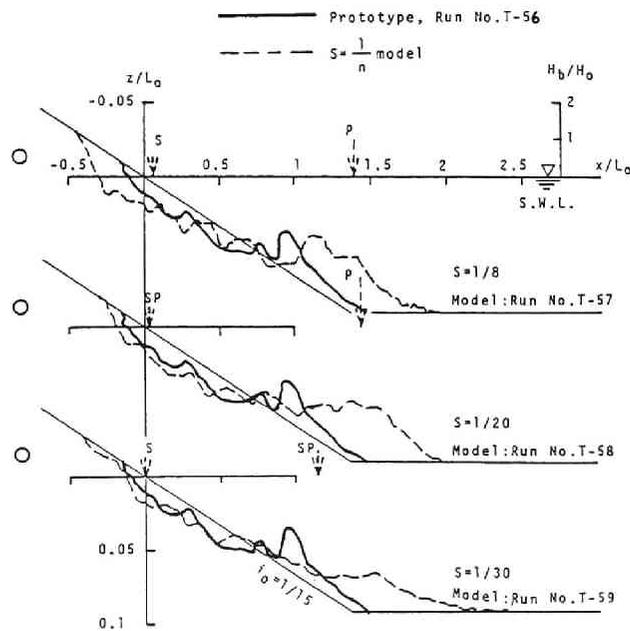


(b) 原型 (Run No. 3) と模型 (Run No. 3M-30 ~ 3M-25) の相似性 ($H_0/L_0 \approx 0.015$)

模型の相似性の照合判定



(a) 原型 (Run No. 4) と模型 (Run No. 4M-20 ~ 4M-15) の相似性

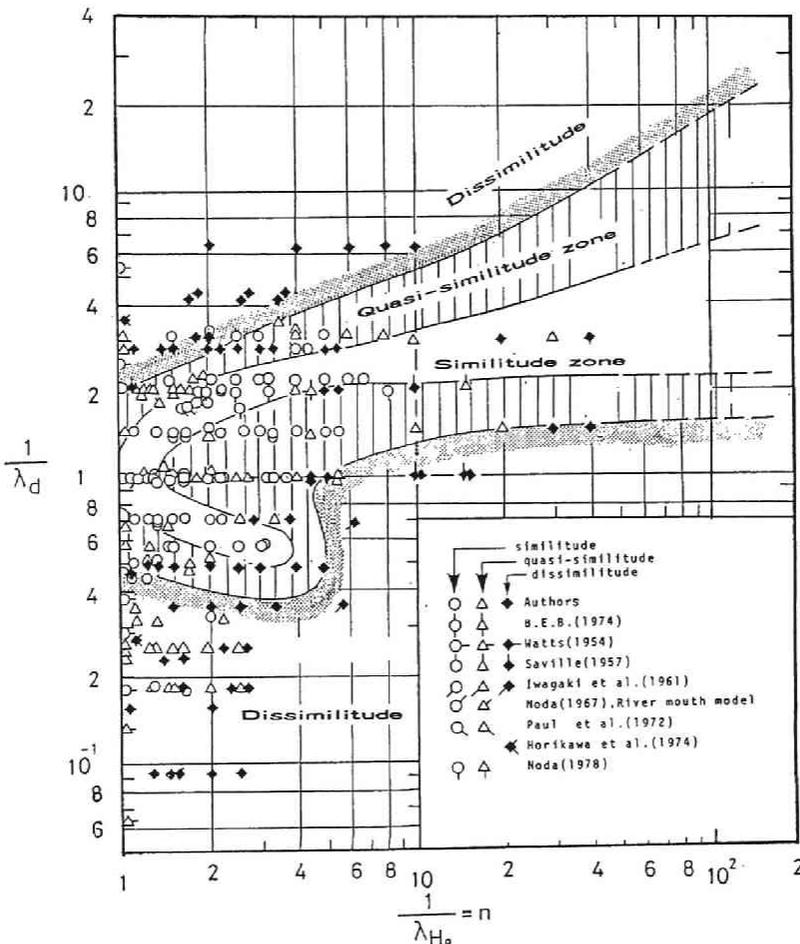


(b) 原型 (Saville の実験, Run No. T-56) と模型 (Run No. T-57 ~ T-59) の相似性

図-3.4 原型と模型の相似性の照合判定 ($H_0/L_0 \approx 0.035$)

について、比較判定した。表-3.2には、原型 (Run No. 3) と模型 (Run No. 3M-20 ~ 3M-23') および原型 (Run No. T-26) と模型 (Run No. T-27 ~ T-29') の相似性の判定結果が、実験縮尺 (Scale) と式 (3.1) の粒径縮尺 (λ_d) との関係に対応させて整理してある。表-3.3には、同様に原型と模型の判定結果が示してあるが、Run No. T-57 ~ T-59の模型は、2つの原型 (Run No. T-56 および T-52) に対する相似的判定結果が示してある。式 (3.1) で表わされる模型の底質の中央粒径 (d_m) と原型 (d_p) との比 ($= \lambda_d$; 粒径縮尺) の逆数および式 (3.2) で表わされる模型と原型の沖波波高比 ($= \lambda_{H_0}$; 実験縮尺) の逆数をそれぞれ縦軸と横軸に取って整理する。この中で、

$$\frac{1}{\lambda_d} = \frac{1}{(d_m/d_p)} = \frac{(d)_p}{(d)_m} \quad (3.1)$$



(a) $H_0/L_0 = 0.007 \sim 0.025$

図-3.5 海浜変形が定量的に相似となる実験縮尺 λ_{H_0} と粒径縮尺 λ_d の関係, $\{(d/H_0)_p \leq 0.01, i_0 = 1/10 \sim 1/30\}$ (つづく)

$$\frac{1}{\lambda_{H_0}} = \frac{1}{(H_0)_m / (H_0)_p} = \frac{(H_0)_p}{(H_0)_m} = n \quad (3.2)$$

で表わされる定義に対して、原型の粒径・波高比が $(d)_p / (H_0)_p \leq 0.01$ の条件を満たすものを対象にして沖波波形勾配 $H_0 / L_0 = 0.007 \sim 0.0025$ と $H_0 / L_0 = 0.031 \sim 0.042$ とに分けて、図-3.5 (a)および(b)にそれぞれ示してある。ただし、 $(d)_p / (H_0)_p > 0.01$ の場合には、十分な実験数が得られなかったので、本研究の対象から除外した。また、他の研究者の実験の中で、本研究の主旨と類似しており、初期勾配 $i_0 = 1/10 \sim 1/30$ 、沖波波形勾配 $H_0 / L_0 = 0.007 \sim 0.025$ および $0.031 \sim 0.042$ の範囲で行なった。Saville¹⁴⁾、Paulら¹⁶⁾、野田¹⁹⁾、Watts³¹⁾ および堀川ら²⁶⁾の結果についても相似性を判定し、図-3.5に併示してある。この図中の Watts および堀川らの実験結果は、原型と模型の実験縮尺が同じで、粒径縮尺のみが変化する場合である。

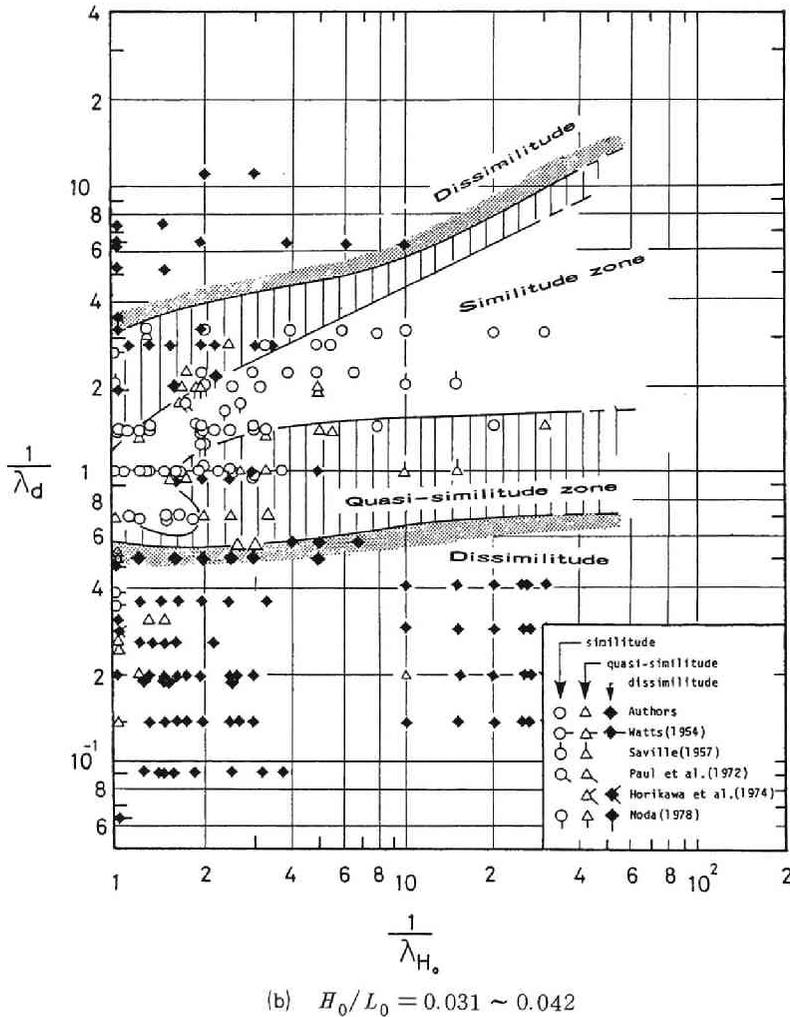


図-3.5 海浜変形が定量的に相似となる実験縮尺 λ_{H_0} と粒径縮尺 λ_d の関係、 $\{(d/H_0)_p \leq 0.01, i_0 = 1/10 \sim 1/30\}$

このようになり多くの他の研究者の実験結果を含めて整理した図-3.5(a)および(b)は、いずれも図中を相似、擬相似および非相次の3領域に区分することができる。さらに、図-3.5(a)と(b)とを重ねると、図-3.6のようになる。この図から、相似則の成立領域は沖波波形勾配の相違による若干の違いがあるが、その傾向は極めて類似している。相似則が共通して成立する領域は、ある幅で存在していることがわかるが、この原因の1つとして、前述の実験誤差による影響が考えられる。図-3.6で、相似則の成立する領域は、 $1/\lambda_d \geq 1$ および $1/\lambda_d < 1$ の2つの部分にまたがっている。 $1/\lambda_d \geq 1$ の部分では、相似則の成立する領域は、実験縮尺 $1/\lambda_{H_0} = 1 \sim 2.2$ のとき図中に2点鎖線で示したFroudeの相似則($1/\lambda_d = 1/\lambda_{H_0}$)とほぼ一致する。しかし、縮尺が $1/\lambda_{H_0} = 2.2 \sim 100$ になると、Froudeの相似則からはずれる。このことは、波に関する実験縮尺をFroudeの相似則で定めると、粒径縮尺は実験縮尺より若干歪めなければならない。つまり、底質粒径はFroudeの相似則で規定される値より粗く、かつ原型より若干細かくしなければならないことを示唆している。

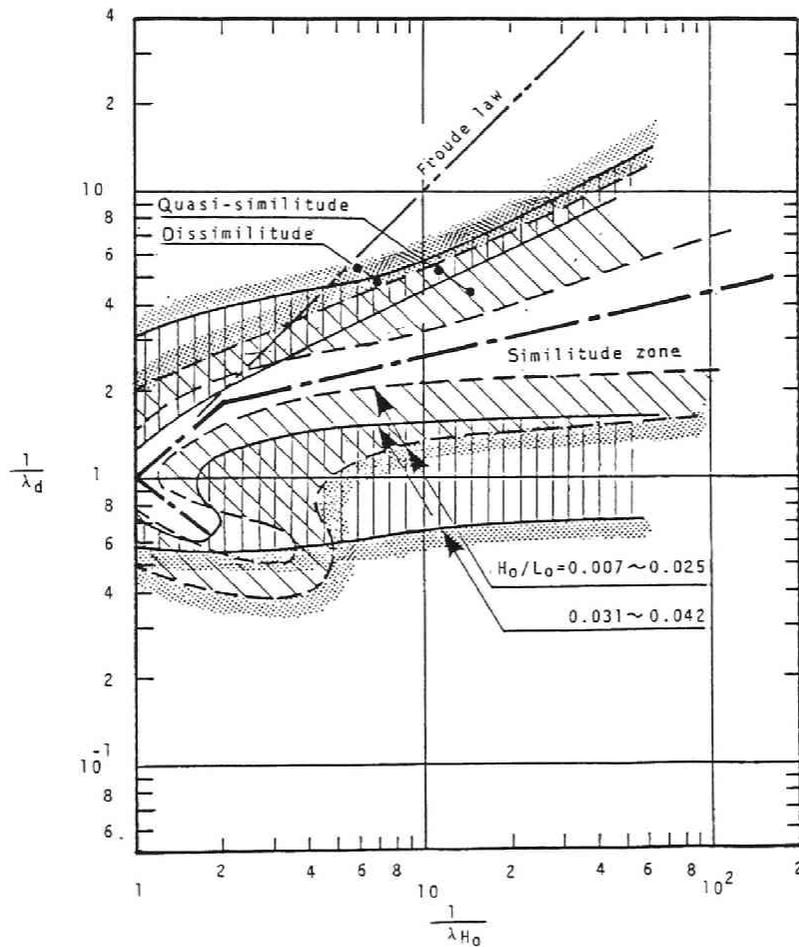


図-3.6 海浜変形の相似則が成立する領域, $\{H_0/L_0 = 0.007 \sim 0.042, (d/H_0)_p \lesssim 0.01, \varepsilon_0 = 1/10 \sim 1/30\}$

一方、 $1/\lambda_d < 1$ の部分では、相似則の成立する領域は、縮尺 $1/\lambda_{H_0} = 1 \sim 2.2$ に限って、2.5節で論じた波と底質に関する Reynolds 数 $\sqrt{gH_0} d/\nu$ による相似則 $1/\lambda_d = (1/\lambda_{H_0})^{-1/2}$ とよく一致する。

このように相似則の成立する領域の中央部分が一点鎖線で図-3.6中に示してある。ここに、一点鎖線は次式で表わすことができる。

$$\frac{1}{\lambda_d} = 1.7^a \left(\frac{1}{\lambda_{H_0}} \right)^b \quad (3.3)$$

あるいは

$$\frac{(d)_m}{(d)_p} = \left(\frac{1}{1.7} \right)^a \left(\frac{1}{n} \right)^b \quad (3.4)$$

ここに、指数 a および b の値を表-3.4に示す。 $(d)_m$ および $(d)_p$ はそれぞれ模型および原型の底質粒径、

表-3.4 式(3.3)および(3.4)における係数 a および b の値

実験縮尺 係数 底質 粒径縮尺		$1 > \frac{1}{n} \gtrsim \frac{1}{2.2}$	$\frac{1}{2.2} > \frac{1}{n}$
		$\lambda_d < 1$	a b	0 0.87	1 0.2
$\lambda_d > 1$	a b	0 -0.8	

(注) $n = 1/\lambda_{H_0}$, $\lambda_d = (d)_m/(d)_p$

および $\lambda_{H_0} = 1/n$ は実験縮尺である。特に、式(3.3)あるいは(3.4)は、 $\lambda_d < 1$ のとき、すなわち原型の底質粒径より模型のそれが細かい場合、実用的であるので、これを海浜変形の相似則としよう。そうすれば、漂砂の粒径縮尺を式(3.4)の相似則で、波の特性および長さに関する縮尺を Froude の相似則で、それぞれ定めることによって、模型の海浜変形を原型と相似にすることができる。この海浜変形の相似則は、底質砂の粒径縮尺を実験縮尺より歪めなければならないので、この歪を \mathcal{Q} とすると、次式のように表わせる。

$$\mathcal{Q} = \frac{\lambda_d}{\lambda_{H_0}} = \left(\frac{1}{1.7} \right)^a \left(\frac{1}{n} \right)^{b-1} \quad (3.5a)$$

または、これは

$$\mathcal{Q} = \frac{\lambda_d}{\lambda_{H_0}} = \frac{(d)_m}{(H_0)_m} \bigg/ \frac{(d)_p}{(H_0)_p}$$

のようにも表わすことができるので、次の関係が得られる。

$$\frac{(d)_m}{(H_0)_m} = \mathcal{Q} \frac{(d)_p}{(H_0)_p} \quad (3.5b)$$

式(3.5 a)の関係は、図-3.7に示す実線で表わされる。この図から、実験縮尺が $1/n = 1 \sim 1/2.2$ では、粒径縮尺の歪はほとんど無い ($Q \approx 1$)、 $1/n < 1/2.2$ になると歪が徐々に大きくなるのがわかる。つまり、粒径縮尺が実験縮尺と同様に Froude 則に従うときは、式(3.5)から $Q = 1$ となる。また、原型と模型の底質粒径が同じ $\{(d)_m = (d)_p\}$ 場合には、当然底質の粒径縮尺の歪は実験縮尺とともに直線的に増加することになる。

b) 海浜断面形(主としてその形状)の定性的相似性

表-3.1にこれまでに実施された現地海岸の模型実験例を整理した。これらの模型

実験の多くは、現地海浜変形を定性的に再現しているようである。そこで、従来の模型実験結果および 3.3 (3) a) で述べた海浜変形の相似則との対応関係を調べることにしよう。

3.2 (2) の①～⑩の定性的な判定基準で、本研究の実験結果を相似(○印)、擬相似(△印)、および非相似(◆印)のいずれかに分類する。このように海浜断面形状をタイプ分けして、相似性を判定した結果が表-2.2および3.3中に、定量的な相似性の判定結果の場合と同様に整理してある。また、現地海岸を対象にした従来の模型実験の中で、再現性の判定が可能な表-3.1のNo.6の二次元模型実験および Nos. 1,5および7の平面実験も対象にした。これらの判定結果を沖波波形勾配 $H_0/L_0 = 0.007$ と $0.031 \sim 0.042$ に分けて、 $(d/H_0)_p \leq 0.01$ および $i_0 = 1/10 \sim 1/30$ の場合について、それぞれ図-3.8(a)および(b)に整理してある。図-3.8(a)および(b)の中は相似、擬相似、および非相似の領域に分けることができ、これらの領域は定量的判定基準で求めた図-3.5(a)および(b)の傾向とそれぞれよく対応することがわかる。

さらに、図-3.8(a)と(b)とを重ねると、図-3.9のように海浜変形が定性的に相似になる共通領域があることがわかる。この共通領域を2本の一点鎖線で近似すれば、次式で表わされる。

$$\left(\frac{1}{\lambda_{H_0}}\right)^{0.15} \lesssim \frac{1}{\lambda_d} \lesssim 1.6 \left(\frac{1}{\lambda_{H_0}}\right)^{0.26} \quad (3.6)$$

あるいは

$$\frac{1}{1.6} \left(\frac{1}{n}\right)^{0.26} \lesssim \frac{(d)_m}{(d)_p} \lesssim \left(\frac{1}{n}\right)^{0.15} \quad (3.7)$$

この関係式は、原型と模型で海浜断面形状のタイプを相似にするための相似則である。この相似則を用いる場合には、模型に作用する底質粒径(粒径縮尺)は比較的幅の広い条件の中から選ぶことができる。当

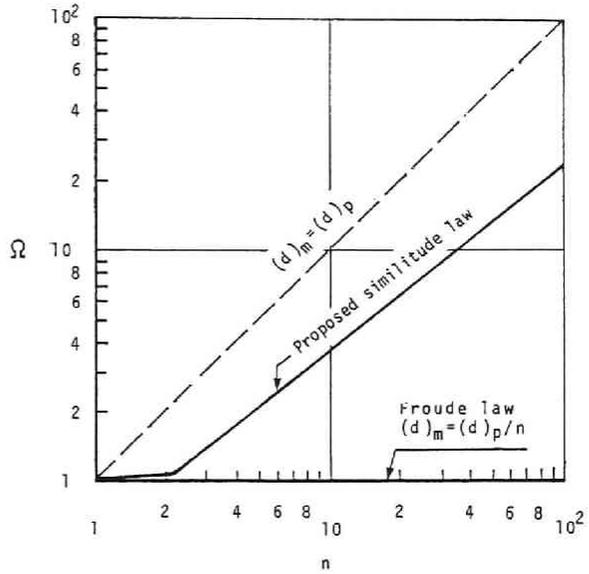
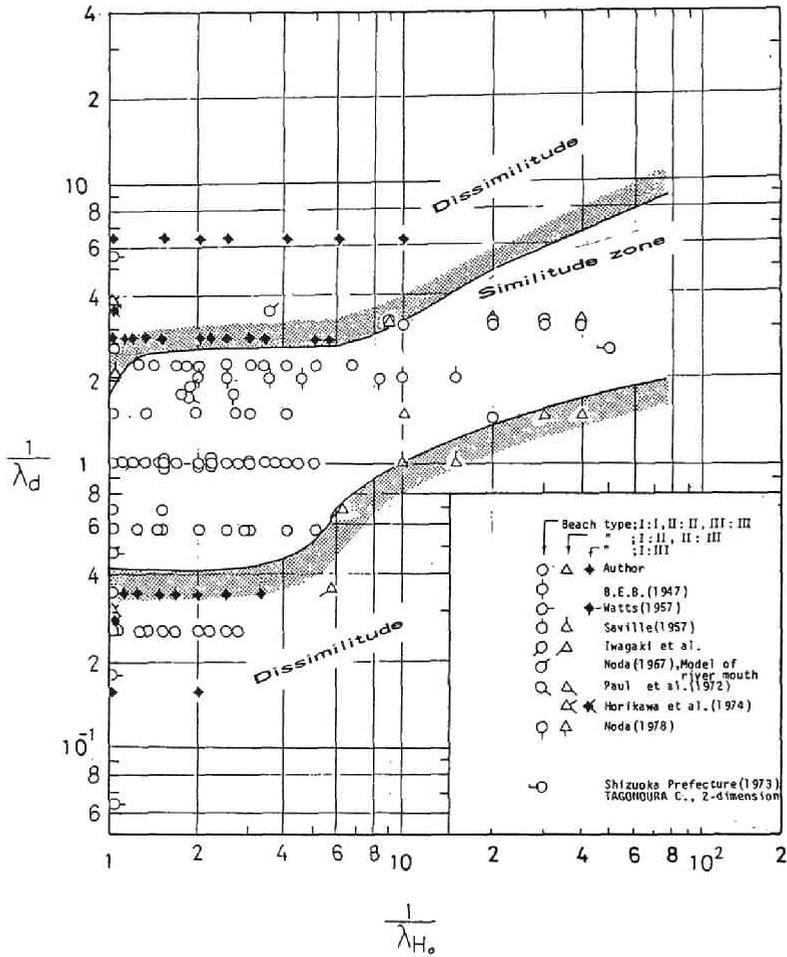


図-3.7 海浜変形の相似則(実験縮尺と粒径縮尺)における歪の関係



(a) $H_0/L_0 = 0.07 \sim 0.025$

図-3.8 海浜断面形状のタイプが相似になる実験縮尺 λ_{H_0} と粒径縮尺 λ_d の関係, $\{(d/H_0)_p \leq 0.01, i_0 = 1/10 \sim 1/30\}$ (つづく)

然のことながら、定量的な海浜変形の相似則、式(3.4)は式(3.7)の範囲に入る。

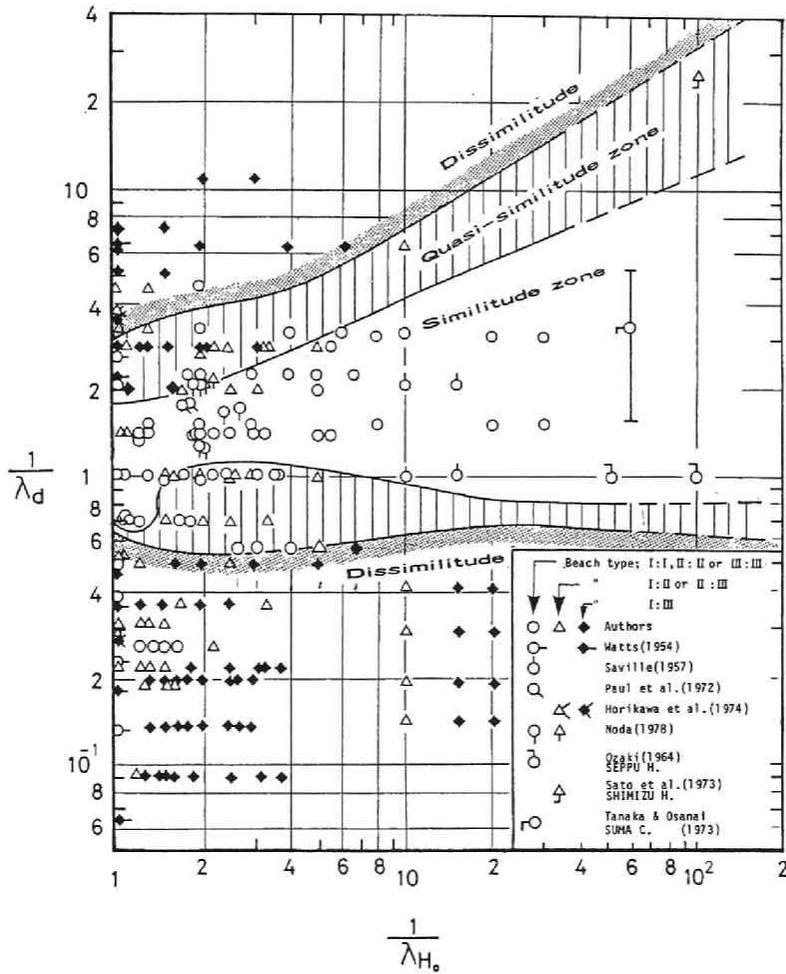
(4) 海浜変形の特性的に関する表示式および図による相似則

a) 相似則の誘導

海浜変形の相似則は、これを支配している真の力学的法則がわかっているならば、それから求められるべきものであろう。残念ながら、現在、この法則のすべてはまだ明らかになっていない。そこで、海浜変形の主な特性として汀線の移動、漂砂の移動限界水深および海浜断面形状に関する代表的な研究結果を表-2.1から取上げ、これらの相似則を検討する。

(i) 汀線移動

A. 堀川ら²⁶⁾ 多数の実験資料を整理して、初期汀線からの汀線移動量を表-2.1におけるNo.6の式



(b) $H_0/L_0 = 0.031 \sim 0.042$

図-3.8 海浜断面形状のタイプが相似になる実験縮尺 λ_{H_0} と粒径縮尺 λ_d の関係, $\{(d/H_0)_p \lesssim 0.01, i_0 = 1/10 \sim 1/30\}$

で示している。この式から相似則を求めるに当たって、まず原型と模型の比を次の関係で表わすことにする。

$$\lambda_{\text{parameter}} = \frac{\text{模型の寸法 (parameter)}}{\text{原型の寸法 (parameter)}} \quad (3.8)$$

いま、表-2.1に示したNo.6の式を変形すると、次のように表わせる。

$$\frac{X_{sl}}{L_0} = 0.15 \left(\frac{H_0^2}{gT^2} \cdot \frac{1}{d} \cdot \frac{1}{\tan \beta} \right)^{0.75} \log_{10} \frac{10d}{H_0 \tan \beta} \quad (3.9)$$

この式から相似条件を求めると、

$$\frac{\lambda_{X_{sl}}}{L_0} = \lambda_d^{-0.75} \lambda_{H_0}^{1.5} \lambda_T^{-1.5} \lambda_{\tan \beta}^{-0.75} \lambda_g^{-0.75} \quad (3.10a)$$

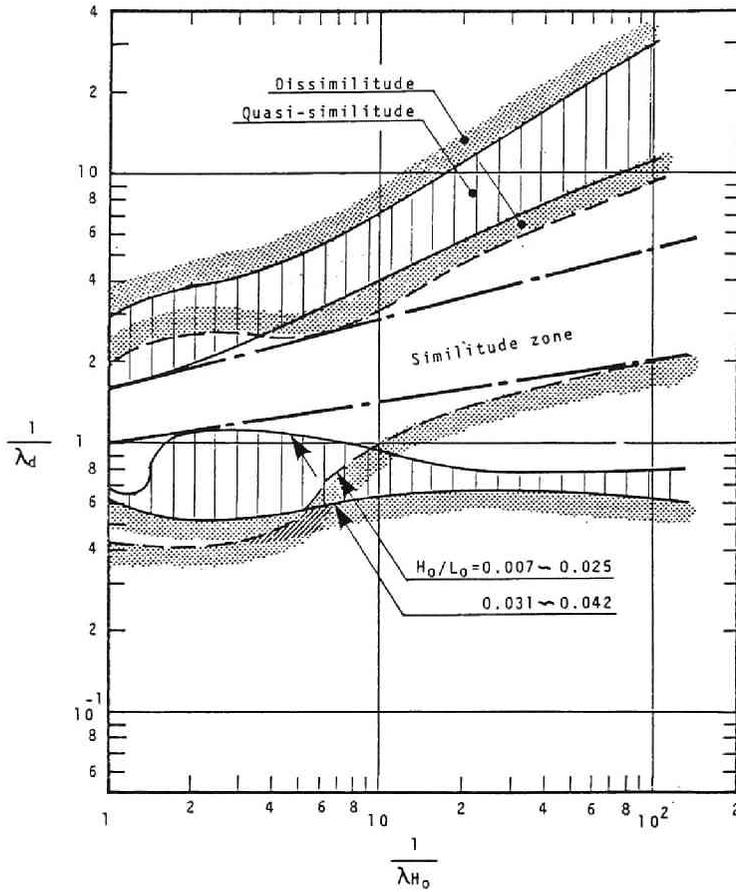


図-3.9 海浜断面形状のタイプの相似則が成立する領域
 $\{ H_0/L_0 = 0.007 \sim 0.042, (d/H_0)_p \leq 0.01, i_0 = 1/10 \sim 1/30 \}$

および

$$\frac{\lambda_{X_{sl}}}{L_0} = \lambda_d \lambda_{H_0}^{-1} \lambda_{\tan \beta}^{-1} \quad (3.10b)$$

となるが、一方、沖波の分數關係式 $L_0 = gT^2 / 2\pi$ によれば、

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{L_0} &= \lambda_T^2 \lambda_g \\ \text{あるいは,} \\ \lambda_T &= \lambda_{L_0}^{1/2} \lambda_g^{-1/2} \end{aligned} \right\} \quad (3.11)$$

が得られるので、式(3.10a)はこれを用いて書き直すと、次式のようになる。

$$\frac{\lambda_{X_{sl}}}{L_0} = \lambda_d^{-0.75} \lambda_{H_0}^{1.5} \lambda_{L_0}^{-0.75} \lambda_{\tan \beta}^{-0.75} \quad (3.12)$$

さらに、原型と模型の汀線移動が相似になるためには、 $\lambda_{X_{sl}}/L_0 \equiv 1$ であるから、式(3.12)は次のようになる。

$$\lambda_d^{-1} \lambda_{H_0}^2 \lambda_{L_0}^{-1} \lambda_{\tan \beta} = 1 \quad (3.13a)$$

同様に、式(3.10b)は、

$$\lambda_d^{-1} \lambda_{H_0} = 1 \quad (3.13b)$$

となる。したがって、原型と模型で汀線の移動量を相似にするためには、式(3.13a)および式(3.13b)を同時に満足するようにすればよい。

さらに、3.3(2)で述べたように、本研究の実験と比較するために、その実験条件、すなわち、海浜断面形状の鉛直・水平方向の縮尺歪は無く、模型の底質には原型(砂)と同じ程度の比重の砂を使用し、水は原型と模型で同程度の水温とし、波の特性はFroude則に従うものと考え、さらに海浜断面形状は、平衡海浜を対象とすると、これらの諸条件の縮尺関係は、次のように表わせる。

$$\left. \begin{aligned} \lambda_x = \lambda_{L_0} = \lambda_z = \lambda_{H_0}, \quad \lambda_{i_0} = \lambda_{\tan \beta} = 1, \\ \lambda_s = 1, \quad \lambda_\nu = 1, \quad \lambda_t = 1, \quad \lambda_{H_0} \approx \lambda_H, \\ \lambda_{L_0} \approx \lambda_L \end{aligned} \right\} \quad (3.14)$$

これらの関係を使って、式(3.13a)および式(3.13b)を書き直すと、結局次のようになる。

$$\lambda_d = \lambda_{H_0} \quad (3.15)$$

これによれば、底質の粒径縮尺 λ_d と実験縮尺 λ_{H_0} (Froude則)が同じでなければならないことになる。

B. 堀川ら³²⁾は、実験および現地海岸資料を用いて、表-2.1におけるNo.7で表わされる汀線の前進・後退の限界表示式を提示している。この式中の定数 C'_1 の値は実験と現地海岸で異なるので、この点に留意して相似条件を表わすと、

$$\lambda_{C'_1} \lambda_d^{0.67} \lambda_{H_0}^{-1} \lambda_{L_0}^{0.33} \lambda_{\tan \beta}^{-0.27} = 1 \quad (3.16)$$

この式で、現地海岸資料の後退限界は、 $(C'_1)_p = 18$ 、比較的スケールの小さな模型実験資料は $(C'_1)_m = 10$ であるから、 $\lambda_{C'_1} = 10/18$ となる。したがって、式(3.16)は式(3.14)を用いて整理すると、次のようになる。

$$\lambda_d = \frac{1}{0.42} \lambda_{H_0} \quad (3.17)$$

C. 尾崎・渡辺³³⁾は、碎波高の影響を考慮して、表-2.1のNo.16および17で示す海浜断面形および汀線の前進・後退の判別式を提示している。この式には碎波高の特性が含まれているので、

Le Méhauté-Kohによる関係式,

$$\frac{H_b}{H_0} = 0.76 \tan \beta^{-1} \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{-1/4} \quad (3.18)$$

を用いて整理し, 相似条件を調べると, 次式が得られる。

$$\lambda_d^{1.8} \lambda_{H_0}^{-1.125} \lambda_{L_0}^{0.625} \lambda_{\tan \beta}^{-1.071} \lambda_g^{-0.5} = 1 \quad (3.19)$$

さらに, 式(3.14)を用いてこれを整理すると, 次のようになる。

$$\lambda_d = \lambda_{H_0}^{1/3.6} \quad (3.20)$$

D. 著者ら³⁴⁾が示した10変数による多項式(2.64)は, 汀線移動量をかなり精度良く表わすことができる。この式による相似条件は, 両辺における各項が等しいとして求められ, 次式となる。

$$\begin{aligned} \frac{\lambda_{X_{s'l}}}{L_0} &= \lambda_{\frac{H_0}{L_0}} \frac{\lambda_{\frac{-2}{\sqrt{gH_0}d}}}{\nu} = \lambda_{\frac{d}{H_0}} \lambda_{\frac{H_0}{L_0}} \frac{\lambda_{\frac{-1}{\sqrt{gH_0}d}}}{\nu} = \dots\dots\dots, \\ &= \lambda_{i_0} \lambda_{\frac{H_0}{L_0}} = 1 \end{aligned} \quad (3.21)$$

これから, 各式が等しいとした場合と, 第2式から第11式までの各式の2の組合せを等しくした場合の相似条件(全部で55個)が得られることになる。例えば, 第2式を第3式から求まる相似条件は, 次式のようになる。

$$\lambda_{H_0}^{-1/2} \lambda_{L_0}^{-1} \lambda_{\nu}^{-1/2} \lambda_g = 1 \quad (3.22)$$

これらの55個の式を式(3.14)を用いて整理すると, 結局, 相似条件は次のように表わされる。

$$\lambda_d = \lambda_x^a, \quad (a = 5/2, 1, 1/2, 1/4, -1/2, -2) \quad (3.23a)$$

および

$$\lambda_{H_0} = \lambda_x^b, \quad (b = 0, 1) \quad (3.23b)$$

式(3.23a)は底質に対する粒径縮尺, 式(3.20b)は実験縮尺を表わしている。このように複数の粒径縮尺と実験縮尺が存在しているのは, 汀線の移動量によってそれぞれの縮尺が決まるためである。したがって, あらゆる条件の下で常に汀線移動量の相似則が成立する場合は原型のみであるということになる。

(ii) 漂砂の移動限界水深

E. 榎木³⁵⁾は, 非定常流下の層流境界層における漂砂の移動限界表示式を限界掃流力 $U_c^{*2} / \{ (\sigma/\rho - 1)gd \}$ と粒子 Reynolds数 $U_c^* d/\nu$ の関係で検討し, 表-2.1に示したNo. 23の式を提示し, 相似条件として次式を得ている。

$$\lambda_d \lambda_s^3 \lambda_x^{-1} = 1 ; \quad \frac{U_c^* d}{\nu} < 10 \quad (3.24 a)$$

$$\lambda_d \lambda_s \lambda_x^{-1/4} = 1 ; \quad 10 < \frac{U_c^* d}{\nu} < 60 \quad (3.24 b)$$

これらの関係は、式(3.14)を用いて整理すると、次のようになる。

$$\lambda_d = \lambda_x ; \quad \frac{U_c^* d}{\nu} < 10 \quad (3.25 a)$$

$$\lambda_d = \lambda_x^{1/4} ; \quad 10 < \frac{U_c^* d}{\nu} < 60 \quad (3.25 b)$$

F. 佐藤・田中³⁶⁾は、水平床上の実験結果および現地海岸調査結果に基づいて、表-2.1に示したNo. 24の移動限界水深の表示式を提示している。この表示式における定数 α は実験($\alpha_m = 0.565$)と現地海岸($\alpha_p = 1.35$)で異なり、また指数 $n = 1/3$ である。したがって、この式による相似条件は、次のようになる。

$$\lambda_{\sinh \frac{2\pi k_i}{L}} = \lambda_\alpha \lambda_d^n \lambda_H^{-1} \lambda_{L_0}^{1-n} = 1 \quad (3.26)$$

さらに、式(3.14)を用いると、次のように表わせる。

$$\begin{aligned} \lambda_d &= \left(\frac{0.565}{1.35} \sim \frac{0.565}{2.4} \right)^{-3} \lambda_{H_0} \\ &= (13.6 \sim 76.6) \lambda_{H_0} \end{aligned} \quad (3.27)$$

G. 堀川・渡辺³⁷⁾は、振動流れにおける抵抗法則および底面の粗滑や層流と乱流を考慮した底質の移動限界水深表示式を提示している。この式で、 $\tan \varphi = 1$ (ここに φ は水中における底質の内部摩擦角)として整理した結果が、表-2.1に示したNo. 25である。これらの式は、底面と境界層の状態によって異なるので、それぞれの場合における相似条件は次のようになる。

① 底面および境界層の状態が、層流あるいは滑面・乱流の場合、

$$\lambda_{\sinh \frac{2\pi k_i}{L}} = \lambda_d \lambda_s \lambda_\nu^{-\frac{A'}{2}} \lambda_H^{A'+2} \lambda_{L_0}^{-\frac{4+A'}{4}} \lambda_g^{\frac{A'}{4}} = 1 \quad (3.28)$$

定数 A' については、層流のとき $A' = -1$ で、滑面・乱流の場合 $A' = -0.74$ である。

② 底面が粗面状態で境界層が乱流の場合、

$$\lambda_{\sinh \frac{2\pi k_i}{L}} = \lambda_d \lambda_s^{\frac{1}{1+A'}} \lambda_H^{-\frac{2+A'}{1+A'}} \lambda_{L_0}^{\frac{1}{1+A'}} = 1 \quad (3.29)$$

ここに、粗面・乱流の場合 $A' = -0.53$ あるいは -0.45 である。これらを式(3.14)を用いて整理すると、式(3.28)の場合、

$$\lambda_d = \lambda_{H_0} \frac{4 + 3A'}{4}$$

となるので、定数 A' の値によって、それぞれ次のようになる。

$$\lambda_d = \lambda_{H_0}^{1/4} \quad , \quad (\text{層流の場合, } A' = -1) \quad (3.30 \text{ a})$$

$$\lambda_d = \lambda_{H_0}^{1/2.25} \quad , \quad (\text{滑面・乱流の場合, } A' = -0.74) \quad (3.30 \text{ b})$$

同様に、式 (3.29) の場合には定数に関係なく、次のようになる。

$$\lambda_d = \lambda_{H_0} \quad (3.31)$$

以上の相似条件によれば、底質の粒径縮尺と実験縮尺の関係が底面と境界層の状態によって異なることがわかる。

H. Hallermeier³⁸⁾は、多くの実験資料に基づいて、波による底質の移動限界 (general motion initiation) を底面近傍の流体混合が支配的な乱流状態 (現地スケールに対応) と、流体の粘性が支配的な層流状態 (小規模な模型実験に対応) の2つのケースについてそれぞれ次の移動限界流速の表示式を提示した。

$$(U_b)_p = (8sgd)^{0.5} \quad , \quad (\text{現地スケール}) \quad (3.32)$$

$$(U_b)_m = \frac{0.35 (sg)^{0.75} d^{0.25}}{(2\pi/T)^{0.5}} \quad , \quad (\text{中小規模模型}) \quad (3.33)$$

さらに、水平方向流速の縮尺 V_h 、鉛直方向流速の縮尺 V_v および底質の移動限界流速 U_b を用いて、次のパラメーターを考えた。

$$\psi = \frac{V_h/U_b}{V_v} \quad (3.34)$$

このパラメーターによる相似条件は、

$$\lambda_\psi = \lambda_{V_h} \lambda_{V_v}^{-1} \lambda_{U_b}^{-1} \quad (3.35)$$

で表わされるので、 $\lambda_{U_b} = (U_b)_m / (U_b)_p$ として、式 (3.32) と (3.33) から、Hallermeier は次の相似条件を提示している。

$$\lambda_\psi = 0.0495 \lambda_{V_h} \lambda_{V_v}^{-1} \lambda_d^{0.25} \lambda_g^{0.5} \lambda_s^{0.5} (T)_m^{0.5} (d)_p^{-0.25} (g)_m^{0.25} (s)_m^{0.25} = 1 \quad (3.36)$$

この条件式には、原型および模型に関する底質粒径、波の周期などの諸量が含まれている。いま、式 (3.36) を式 (3.14)、 $\lambda_{V_h} = \lambda_{V_v}$ 、および $(s)_m = 1.65$ として整理すると、次のようになる。

$$\lambda_d = 16100 \left(\frac{d}{L_0} \right)_p \lambda_{H_0}^{-1} \quad (3.37)$$

この相似条件には、原型の底質粒径・沖波波長比が含まれているので、縮尺 ($\lambda_{H_0} = 1/n$) が一定であっ

ても、粒径縮尺 λ_d が $(d/L_0)_p$ によって変化することは特記すべきである。

(iii) 海浜断面形状および漂砂の移動方向

I. Johnson²⁴⁾ は、海浜断面形状を沖波波形勾配によって、暴風海浜および正常海浜とその中間型の3種類に分類している。この分類方法は沖波波形勾配のみに依存しているため、これによる相似条件は次のようになる。

$$\lambda_{H_0} \lambda_{L_0}^{-1} = 1 \quad (3.38)$$

したがって、式(3.14)の関係をを用いると、この条件は底質の粒径縮尺に関係なく常に成立することになる。

J. 岩垣・野田¹⁵⁾ は、海浜断面形状について次元解析を行ない、6個の無次元水理量で海浜の断面形状を表示した。それぞれの無次元水理量から求まる縮尺関係は、

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{H_0} \lambda_{L_0}^{-1} = 1, \quad \lambda_d \lambda_{H_0}^{-1} = 1, \quad \lambda_t = \lambda_T = 1, \\ \lambda_s = 1, \quad \lambda_d \lambda_{H_0}^{1/2} \lambda_v^{-1} \lambda_g^{1/2} = 1, \quad \lambda_{i_0} = 1 \end{aligned} \right\} \quad (3.39)$$

となるが、さらに式(3.14)の関係をを用いて整理すると、結局、次の Froude 則および Reynolds 則で表わされる相似条件が残ることになる。

$$\lambda_d = \lambda_{H_0} \quad (3.40 a)$$

$$\lambda_d = \lambda_{H_0}^{-1/2} \quad (3.40 b)$$

K. Noda, E.K.²⁰⁾ は、海浜変形に影響する諸要因の組合せから得られる相似則を検討し、鉛直・水平方向の縮尺歪を入れた次の式を提示している。

$$\lambda_d \lambda_s^{1.85} = \lambda_y^{0.55} \quad (3.41 a)$$

$$\lambda_x = \lambda_y^{1.32} \lambda_s^{-0.386} \quad (3.41 b)$$

この相似則は、式(3.14)の関係をを用いると、当然原型以外では成立しないことになる。

L. Dean³⁹⁾ は、表-2.1に示した No. 28 のように、無次元沈降時間 $\pi w/gT$ と沖波波形勾配 H_0/L_0 との関係で、暴風海浜と正常海浜の分類と、併せて漂砂の移動方向の判別を行った。この相似条件は次のように表わされる。

$$\lambda_w \lambda_{H_0}^{-1} \lambda_{L_0}^{1/2} \lambda_g^{-1/2} = 1 \quad (3.42)$$

これに、式(3.14)の関係をを使うと、

$$\lambda_w = \lambda_{H_0}^{1/2} \quad (3.43)$$

M. 堀川ら²⁶⁾は、海浜断面タイプを式中の定数 C_2 で分けて、表-2.1に示したNo. 15の分類式を提示している。ここに、定数 C_2 は、明らかにスケールの小さい実験資料と現地海岸で使い分けなければならない。すなわち、タイプⅡとⅢの限界は、スケールの小さい実験では $C_2=4$ 、現地海岸では $C_2=9$ であるから、次の相似条件が求められる。

$$\lambda_{C_2} \lambda_d^{0.67} \lambda_{H_0}^{-1} \lambda_{L_0}^{0.33} \lambda_{\tan \beta}^{-0.27} = 1 \quad (3.44)$$

さらに、式(3.14)の係数を用いて整理すると、次式ようになる。

$$\lambda_d = \frac{1}{0.24} \lambda_{H_0} \quad (3.45)$$

N. Dalrymple¹⁸⁾は、平衡海浜断面形状に影響を及ぼしている要因を組合せて、7種類の相似条件を提示し、実験的に検討している。この中で代表的なものとして、沖波波形勾配、Froude の相似則および沈降速度表示式を組合せて得た相似条件を引用すると、次のようである。

$$\lambda_x = \lambda_y, \quad \lambda_T = \lambda_y^{1/2}, \quad \lambda_w = \lambda_y^{1/2} \quad (3.46)$$

これらの式は、式(3.14)を用いて整理すると、次のようになる。

$$\lambda_w = \lambda_y^{1/2} \quad (3.47)$$

この式は、前述のLで述べたDeanの関係式から求めた式(3.43)と同一である。

O. 服部・川又⁴⁰⁾は、砕波帯内の海浜断面形状に注目して、実験結果を整理し、海浜勾配を考慮して表-2.1に示したNo. 18の関係式を提示した。この相似条件は、

$$\lambda_w \lambda_{H_0}^{-1} \lambda_{L_0}^{1/2} \lambda_{\tan \beta}^{-1} \lambda_g^{-1/2} = 1 \quad (3.48)$$

となるが、さらに、式(3.14)を使って整理すると、次のようになる。

$$\lambda_w = \lambda_{H_0}^{1/2} \quad (3.49)$$

この条件も、前述したLにおける式(3.43)と同じである。

以上、A～Oで求めたそれぞれの相似条件を相似則として、表-3.5の⑤列に示し、さらに⑥列には著者の実験方法、つまり式(3.14)を用いて整理した相似則が表示してある。

b) 相似則の図示

表-3.5に示したNo. A～Oにおける⑤列の相似則と著者らの海浜変形の相似則(図-3.6および3.9)を比較する。そのために、⑥列の各種相似則が、図-3.6と同様に砂の粒径縮尺の逆比 $1/\lambda_d$ を縦軸、実験縮尺の逆比 $1/\lambda_{H_0}$ を横軸に取って、後述する(i)～(iv)の諸点を考慮して、図-3.11(a)～(f)に示してある。図中の記号A～Oは、表-3.5の第②列のNo.に対応する。特に、図-3.11(a)中のNo. Aで示される直線関係は、粒径縮尺と実験縮尺(Froude則)とが同一になる場合、すなわち $Q=1$ である。しかし、両者の縮尺間に歪がある場合には、No. Aの直線とは一致しなくなる。

(i) 汀線の移動

表-3.5の第④列に示した No. B の式は、波のスケールが小さい実験結果とスケールの大きいもので式中の定数が異なる（実験： $C'_1=10$ ，現地： $C'_1=18$ ）ので、この点に留意して図-3.11 (a)に示してある。

また、表-3.5のNo. Dの汀線の移動量を表示する式(2.64)が原型と模型のあらゆる条件下で常に成立するのは、当然原型のみの場合である。しかし、限られた条件{例えば、 $(d)_p/(H_0)_p \leq 0.01$ ， $H_0/L_0 = 0.035$ で、 $i_0 = 1/15$ あるいは $1/30$ ，汀線移動量 $X_{s,z}/L_0 = +0.1$ あるいは -0.3 など}では、相似則の成立する関係が $(d)_p/(H_0)_p$ の比によって決まるので、その1例が図-3.11 (b)に示してある。

(ii) 漂砂の移動限界水深

表-3.5中のNos. E, F, GおよびHで示される漂砂の移動限界水深の表示式は、水平移動床実験に基づいたものである。樫木³⁵⁾が提示した関係式から求めた表-3.5のNo. Eに示す2つの相似則を図-3.11 (c)の中にE-(1)およびE-(2)として示してある。また、No. Fは、実験と現地海岸で式中の定数 α を変えなければならない。そこで、この表示式を傾斜海浜に適用するにあたって、若干の考察を加える。著者および他の研究者による実験の中で、海浜変形が一樣な初期浜勾配内で起り、沖浜領域で初期浜勾配からの変形が顕著になる点を読み取り、これに対応した水深を海浜変形の限界水深 \bar{h}_i として、 \bar{h}_i/L_0 で無次元表示する。このときの実験条件を用いて、佐藤・田中³⁶⁾および堀川・渡辺の式によって、漂砂の移動限界水深 h_i/L_0 を計算した。佐藤・田中の完全移動限界水深の表示式では、著者らおよびRector⁴¹⁾の比較的スケールの小さい実験資料($H_0 = 3.5 \sim 29$ cm)については、 $\alpha = 0.565$ （実験）とした。また、Saville⁴⁴⁾および鹿島ら⁴²⁾のスケールの大きな実験資料($H_0 = 46 \sim 107$ cm)については、鹿島港沿岸の現地観測による $\alpha = 1.35$ とした。こうして求められた漂砂の無次元移動限界水深 h_i/L_0 と海浜変形の限界水深 \bar{h}_i/L_0 との比較が図-3.10 (a), (b)に示してある。佐藤・田中の式の場合、図-3.10 (a)のように海浜変形の限界水深が多少深くなっているが、 \bar{h}_i/L_0 と h_i/L_0 とが比較的よく対応している。しかし、堀川・渡辺の式の場合、図-3.10 (b)のように両者の対応が必ずしも十分でない。以上の簡単な比較から、表-3.5中のNo. Fの第④列の式は、波のスケールによって定数 α の値を使い分けねばならないことがわかる。そこで、実験($\alpha_m = 0.565$)と鹿島港沿岸($\alpha_p = 1.35$)および仙台湾沿岸⁴³⁾($\alpha_p = 2.4$)を使って求まる関係を提示した領域とNo. Fの関係をまとめて図-3.11 (c)に示してある。

Hallermeierの漂砂の移動限界に関する相似則、No. Hの第⑥列の式の中には、原型の $(d/L_0)_p$ の値が含まれているので、次のようにして図示する。現地の底質粒径 $(d)_p = 0.5$ mmで、沖波波長が $(L_0)_p = 156$ m { $(T)_p = 10$ sec} および $(L_0)_p = 39$ m { $(T)_p = 5$ sec} とすると、

$$\lambda_d = \left\{ \begin{array}{l} 0.0515 \\ 0.206 \end{array} \right\} \lambda_{H_0}^{-1}; \quad \left\{ \begin{array}{l} (L_0)_p = 156 \text{ m} \\ (L_0)_p = 39 \text{ m} \end{array} \right. \quad (3.50)$$

となるので、これを図-3.11 (d)に示してある。

表-3.5 海浜変形に関する特性の表示式および図による

① 区分	② No.	③ 研究者 (発表年)	④ 海浜断面形状特性の表示式 あるいは関係図	⑤ ④による相似側
汀線の移動	A	堀川・砂村・近藤 ²⁶⁾ (1974)	汀線の最終変化量表示式 $\frac{X_{sd}}{L_0} = 0.15 \left(\frac{H_0^2}{gT^2} \cdot \frac{1}{d} \cdot \frac{1}{\tan\beta} \right)^{0.75} \cdot \left(1 - \log_{10} \frac{H_0 \tan\beta}{d} \right)$	$\lambda_d^{-1} \lambda_{H_0}^2 \lambda_{L_0}^{-1} \lambda_{\tan\beta} = 1$ $\lambda_d^{-1} \lambda_{H_0} \lambda_{\tan\beta} = 1$
	B	堀川・砂村・近藤・岡田 ³²⁾ (1975)	汀線の前進・後退の限界表示式 $\frac{H_0}{L_0} = C_1 \tan\beta^{-0.27} \left(\frac{d}{L_0} \right)^{0.67}$	$\left(\frac{10}{18} \right) \lambda_d^{0.67} \lambda_{H_0}^{-1} \lambda_{L_0}^{0.33} \lambda_{\tan\beta}^{-0.27} = 1$
	C	尾崎・渡辺 ³³⁾ (1976)	$\left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{0.75} \sqrt{gH_b} d_{50}^{-1.8} \tan\beta > 164$ 汀線後退 $\left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{0.75} \sqrt{gH_b} d_{50}^{-1.8} \tan\beta < 164$ 汀線前進	$\lambda_d^{1.8} \lambda_{H_0}^{-1.125} \lambda_{L_0}^{0.625} \lambda_{\tan\beta}^{-1.071} \lambda_g^{-0.5} = 1$
	D	伊藤・増田 ³⁴⁾ (1982)	10変数多項式で汀線移動量を表示 式(2.64)	55個の相似則
漂砂の移動	E	榎木 ³⁵⁾ (1961)	(1) $U_c^* d/\nu < 10$; $U_c^{*2} / \left\{ \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) g d \right\} = 0.114 (U_c^* d/\nu)^{-2/3}$ (2) $10 < U_c^* d/\nu < 60$; $U_c^{*2} / \left\{ \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) g d \right\} = 0.028$	$\lambda_d = \lambda_s^{-3} \lambda_y$ $\lambda_d = \lambda_s^{-1} \lambda_y^{3/4}$
	F	佐藤・田中 ³⁶⁾ (1962)	$\frac{H_0}{L_0} = \alpha \left(\frac{d}{L_0} \right)^n \left(\sinh \frac{2\pi h_i}{L_0} \right) \frac{H_0}{H}$	$\lambda_\alpha \lambda_d^n \lambda_H^{-1} \lambda_{L_0}^{1-n} = 1$
移動限界水深	G	堀川・渡辺 ³⁷⁾ (1966)	(1) $\frac{H_0}{L_0} \left(\sinh \frac{2\pi h_i}{L} \right)^{-1} \left(\frac{H}{H_0} \right)$ $= \left(\frac{2s}{\pi B'} \right)^{2+A'} \cdot \left(\frac{d}{L_0} \right)^{2+A'} \cdot \left(\frac{d}{\delta} \right)^{-A'}$ (2) $\frac{H_0}{L_0} \left(\sinh \frac{2\pi h_i}{L} \right) \left(\frac{H}{H_0} \right) = \left[\frac{2(1+A')s}{\pi B'} \right]^{2+A'} \left(\frac{d}{L_0} \right)^{1+A'}$ ここに、 $\delta = \sqrt{\nu T/\pi}$, A' , B' は定数	$\lambda_d \lambda_\nu \lambda_\beta^{A'/2} \lambda_H^{2+A'} \lambda_{L_0}^{(4+A')/4} = 1$ $\lambda_d \lambda_s^{1+A'} \lambda_H^{-\frac{2+A'}{1+A'}} \lambda_{L_0}^{1+A'} = 1$

相似則 (つづく)

⑥	⑦
$\lambda_x = \lambda_y = \lambda_{H_0} = \lambda_{L_0},$ $\lambda_s = 1, \lambda_{i_0} = \lambda_{\tan\beta} = 1,$ $\lambda_T = \lambda_x^{1/2}, \lambda_\nu = 1$ および $\lambda_g = 1$ の場合	備 考
$\lambda_d = \lambda_{H_0}$	
$\lambda_d = \frac{1}{0.42} \lambda_{H_0}$	$C_1 = \begin{cases} 18 & (\text{現地資料}) \\ 10 & (\text{模型実験}) \end{cases}$
$\lambda_d = \lambda_{H_0}^{1/3.6}$	Le M'ehaute'-Koh (1966) の式 $\frac{H_b}{H_0} = 0.76 \tan\beta^{1/7} \left(\frac{H_0}{L_0}\right)^{-1/4}$ を用いて変形
$\lambda_d = \lambda_x^a$ $\left(a = \frac{5}{2}, 1 \frac{1}{2}, \frac{1}{4}, \right.$ $\left. -\frac{1}{2}, -2 \right)$ $\lambda_{H_0} = \lambda_x^b, (b = 0, 1)$	
$\lambda_d = \lambda_x$ $\lambda_d = \lambda_x^{1/4}$	
$\lambda_d =$ $\left(\frac{1}{0.073} \sim \frac{1}{0.013} \right) \lambda_{H_0}$	$n = 1/3$ $\alpha = \begin{cases} 0.565 & \text{実験} \\ 1.35 \\ 1.4 \end{cases} \text{ 現地海岸}$
層 流 : $A' = -1$ $\lambda_d = \lambda_{H_0}^{1/4}$ 滑面乱流 : $A' = -0.74$ $\lambda_d = \lambda_{H_0}^{1/2.25}$ 粗面乱流 : $A' = -0.53$ $A' = -0.45$ $\lambda_d = \lambda_{H_0}$	底面および境界層の状態によつて定数 A', B' の値が定められている

表-3.5 海浜変形に関する特性の表示式および図による

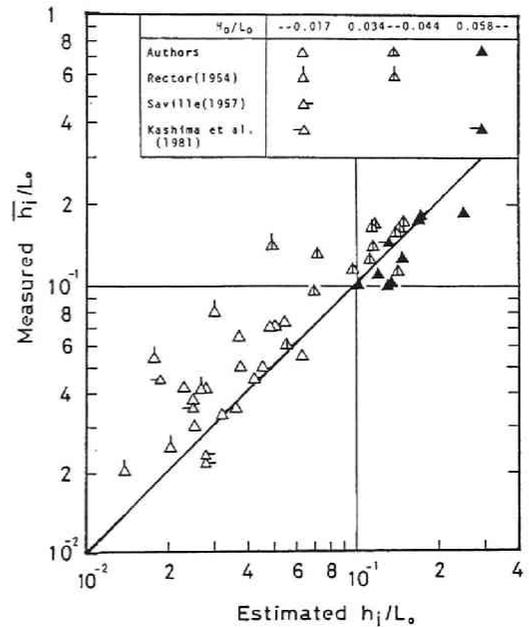
海浜断面形状・漂砂の移動方向	H	Hallermeier, R.J. ³⁸⁾ (1985)		$0.0495 \lambda_{H_0}^{-1} \lambda_{L_0}^{-1} \lambda_d^{1/4} \lambda_g^{1/2} \lambda_s^{1/2} (T_m)^{1/2} (d_p)^{-1/4} (g_m)^{1/4} (s_m)^{1/4} = 1$
	I	Johnson, J.W. ²⁴⁾ (1949)	$\frac{H_0}{L_0} > 0.03$ 暴風海浜 (storm beach) $\frac{H_0}{L_0} = 0.025 \sim 0.03$ 中間 (transition) $\frac{H_0}{L_0} < 0.025$ 正常海浜 (ordinary beach)	$\lambda_{H_0} \lambda_{L_0}^{-1} = 1$
	J	岩垣・野田 ¹⁵⁾ (1961)	$\frac{l}{L_0} = f \left\{ \frac{H_0}{L_0}, \frac{d_m}{H_0}, \frac{t}{T}, \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right), \frac{\nu}{d_m \sqrt{g H_0}}, i_0 \right\}$	$\lambda_{H_0} \lambda_{L_0}^{-1} = 1, \lambda_s = 1$ $\lambda_d \lambda_{H_0}^{-1} = 1, \lambda_d^{-1} \lambda_{H_0}^{-1/2} \lambda_\nu \lambda_g^{-1/2} = 1$ $\lambda_t \lambda_T^{-1} = 1, \lambda_{i_0} = 1$
	K	Noda, E.K. ²⁰⁾ (1972)		$\lambda_d \lambda_s^{1.85} = \lambda_y^{0.55}$ $\lambda_x = \lambda_y^{1.32} \lambda_s^{-0.386}$
	L	Dean, R.G. ³⁹⁾ (1973)	$\frac{H_0}{L_0} > 1.7 \frac{\pi w}{gT}$ 暴風海浜, 岸向き $\frac{H_0}{L_0} < 1.7 \frac{\pi w}{gT}$ 正常海浜, 沖向き	$\lambda_w \lambda_{H_0}^{-1} \lambda_{L_0}^{1/2} \lambda_g^{-1/2} = 1$
	M	堀川・砂村・近藤 ²⁶⁾ (1974)	$\frac{H_0}{L_0} = C_2 \tan \beta^{-0.27} \left(\frac{d}{L_0} \right)^{0.67}$ C_2 の値による海浜断面のタイプ分け	$\frac{4}{9} \lambda_d^{0.67} \lambda_{H_0}^{-1} \lambda_L^{0.33} \lambda_{\tan \beta}^{-0.27} = 1$
	N	Dalrymple R.A. et al. ¹⁸⁾ (1976)	$\frac{H_0}{L_0}$, Froudeの相似則, および沈降速度表示式から相似則を求めた。	$\lambda_x = \lambda_y$ $\lambda_T = \lambda_y^{1/2}$ $\lambda_m = \lambda_y^{1/2}$
	O	服部・川又 ⁴⁰⁾ (1978)	$\frac{(H_0/L_0) \tan \beta}{w/gT} >$ 偏食性海浜 $= 0.5$ 平均海浜 $<$ 堆積性海浜	$\lambda_w \lambda_{H_0}^{-1} \lambda_{L_0}^{1/2} \lambda_{\tan \beta}^{-1} \lambda_g^{-1/2} = 1$

(Ⅲ) 海浜断面形状および漂砂の移動方向

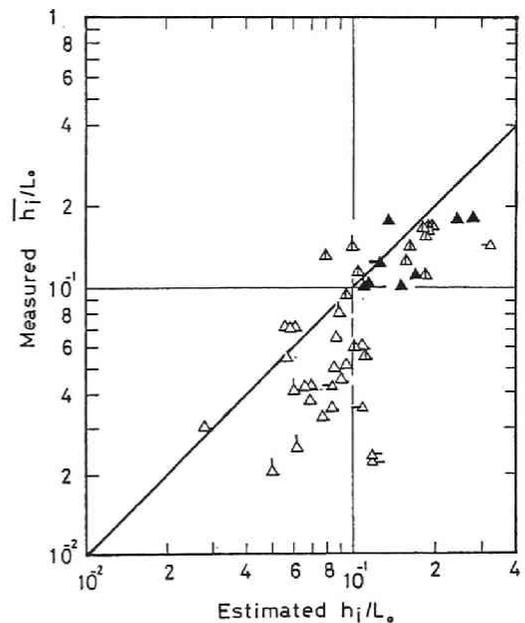
表-3.5のNo. Iは、原型に対して実験縮尺のみを決めれば、粒径縮尺に関係なく相似則が成立することになる。No. Jは、2つの相似則で表わされる。No. Kの相似則が成立する条件は原型のみである。No. Mの相似則は現地海岸と模型実験、すなわち波のスケールによる違いを考慮して、 $1/\lambda_{H_0} \geq 10$ の部分が図-3.11 (e)に示してある。同様に、Nos. L, N, Oの相似則が図-3.11 (f)に示してある。Nos. L, N, Oの相似則は、いずれも底質粒径が沈降速度で表わされているので、ここでは沈降速度と粒径の縮尺関係を調べることにする。

相似則

$\lambda_d = 16066 \left(\frac{d}{L_0} \right)^p \lambda_{H_0}$	
常に成立	底質粒径の影響は考慮されていない
$\lambda_d = \lambda_{H_0}$ $\lambda_d = \lambda_{H_0}^{-1/2}$	
原型のみ成立	汀線付近の海浜断面形状を対象にした相似則
$\lambda_w = \lambda_{H_0}^{1/2}$	
$\lambda_d = \frac{1}{0.24} \lambda_H$	$7 \leq C_2$: タイプ I $4 \leq C_2 \leq 7$: タイプ II $C_2 \leq 4$: タイプ III
$\lambda_w = \lambda_y^{1/2}$	平衡海浜断面形状について7種類の相似則を提示しているが、この中より本研究と比較できるものを取り上げた
$\lambda_w = \lambda_{H_0}^{1/2}$	砕波帯の二次元海浜変形を対象にした分類法

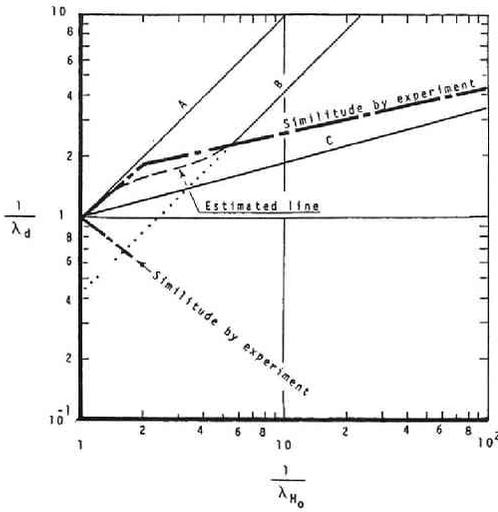


(a) 佐藤・田中の完全移動限界水深との比較

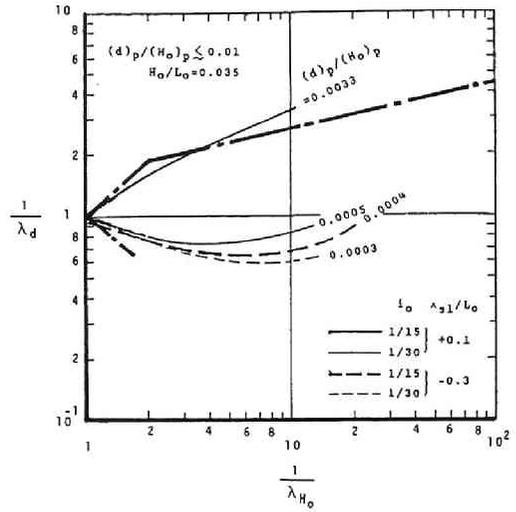


(b) 堀川・渡辺の全面移動限界水深との比較

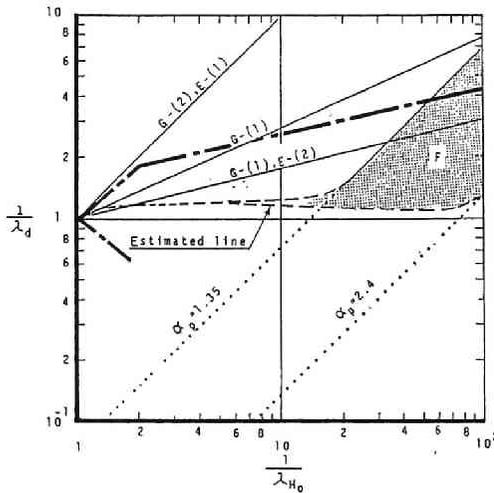
図-3.10 海浜変形の限界水深 \bar{h}_i/L_0 と計算による砂の移動限界水深 h_i/L_0 との比較



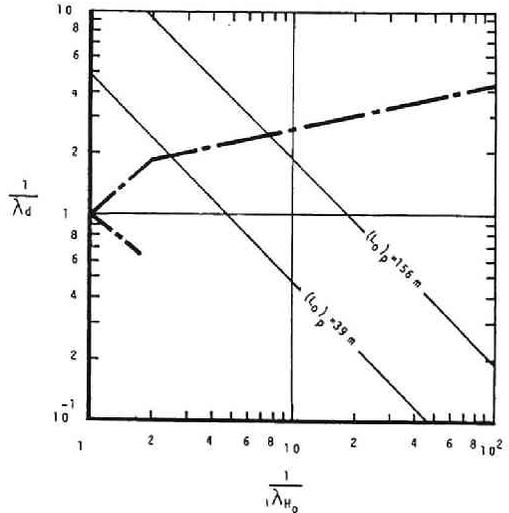
(a) Nos. A, B, C の相似則 (汀線移動)



(b) No. D の相似則 (汀線移動)



(c) Nos. E, F, G の相似則 (漂砂の移動
限界水深)

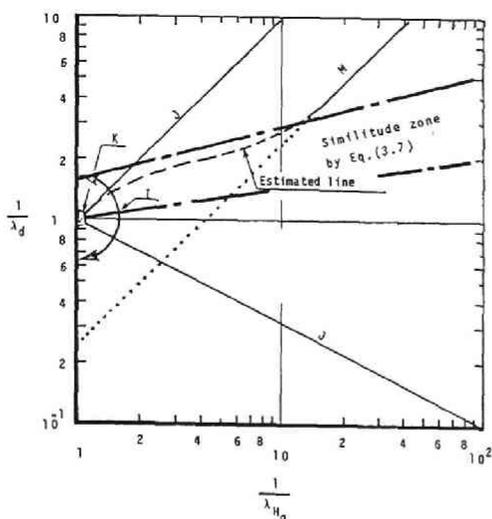


(d) No. H の相似則 (漂砂の移動
限界水深)

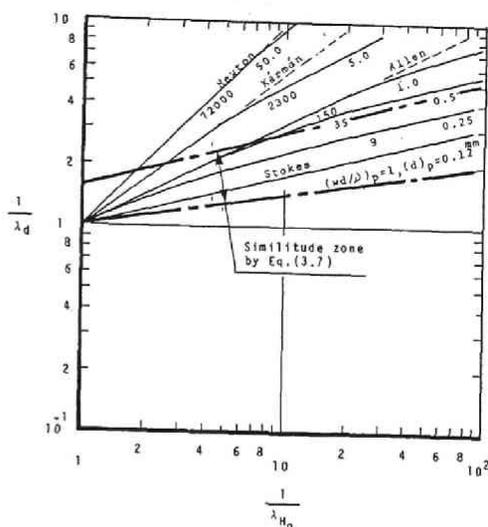
図-3.11 表-3.4の各種相似則と海浜変形の相似則との比較(つづく)

沈降速度の表示式⁴⁴⁾には、Stokes, Allen, Kármán, および Newton の各式があり、これらの式は沈降速度 w 、流体の動粘性係数 ν および粒径 d による Reynolds 数 ($R_e = w d / \nu$) によって、その適用範囲が示されている。これらの式による相似条件を本研究の実験へ同条件、すなわち式 (3.14) における $\lambda_s = 1$ 、 $\lambda_\nu = 1$ および $\lambda_g = 1$ を用いて整理すると、次のように表わされる。

Stokes の式 ($R_e \lesssim 4 \cdot 5$ の範囲で成立するので、砂の水平比重 $s = 1.65$ 、水の密度 $\rho = 1.0 \text{ g/cm}^3$ のとき $d \lesssim 0.15 \text{ mm}$)、



(e) Nos. I, J, K, M の相似則
(海浜断面形状)



(f) Nos. L, N, O の相似則 (海浜断面
形状)

図 3-11 表-3.4 の各種相似則と海浜変形の相似則との比較

$$w = \frac{1}{18} s g \nu^{-1} d^2 \quad (3.51)$$

によると、その相似条件は次のようになる。

$$\lambda_w = \lambda_d^2 \lambda_s \lambda_\nu^{-1} \lambda_g = \lambda_d^2 \quad (3.52)$$

Allen の式 ($R_e = 4.5 \sim 300$, $d = 0.15 \sim 1.1 \text{ mm}$),

$$w = \left(\frac{2}{15} s g \right)^{2/3} \nu^{-1/3} d \quad (3.53)$$

によれば、次式が得られる。

$$\lambda_w = \lambda_d \lambda_s^{2/3} \lambda_\nu^{-1/3} \lambda_g^{2/3} = \lambda_d \quad (3.54)$$

Kármán の式 ($R_e = 300 \sim 3200$, $d = 1.1 \sim 5.8 \text{ mm}$),

$$w = \left(\frac{2}{3} s g \right)^{1/2} \nu^{-1/9} d^{2/3} \quad (3.55)$$

によれば

$$\lambda_w = \lambda_d^{2/3} \lambda_s^{5/9} \lambda_\nu^{-1/9} \lambda_g^{5/9} = \lambda_d^{2/3} \quad (3.56)$$

となり、さらに Newton の式 ($R_e = 3200 \sim 10000$, $d \geq 5.8 \text{ mm}$),

$$w = \left(\frac{10}{3} s g \right)^{1/2} d^{1/2} \quad (3.57)$$

によれば、次の相似条件が得られる。

$$\lambda_w = \lambda_d^{1/2} \lambda_s^{1/2} \lambda_g^{1/2} = \lambda_d^{1/2} \quad (3.58)$$

これらの相似条件を用いると、Nos. L, N および O の相似則は、原型の R_g 数をパラメータに取って表わすと、図-3.11 (f) のようになる。

(5) 各種相似則の比較

図-3.11 (a)~(f) には、汀線の移動量および漂砂の移動限界水深などの海浜変形に関する主要な現象の相似則が表-3.4 の Nos. A ~ O に示してある。これらの図-3.11 (a)~(d) の中には、式(3.4) すなわち図-3.6 の海浜変形の相似則が一点鎖線で示し、比較してある。また、図-3.11 (e) および (f) には、海浜変形を定性的(タイプ)に取扱って求めた相似則、式(3.7) すなわち図-3.9 の相似領域が2本の一点鎖線で示し、比較してある。

これらの比較から、汀線移動については表-3.4 中の Nos. C, D, 漂砂の移動限界水深については Nos. E - (2), F および G - (1) の相似則が、式(3.4) とよく一致し、また、Nos. L, N および O の相似則は式(3.7) とよく一致する。このように、式(3.4) あるいは図-3.6 および式(3.7) あるいは図-3.9 で表わされる海浜変形の相似則は、従来の研究結果から求めた相似則ともかなりよく一致することがわかる。

図-3.9 の海浜変形が定性的に相似となる領域は、実験縮尺 ($1/\lambda_{H_0} = n$) を限定して考えると、図-3.5 (a) および (b) の定量的なものより粒径縮尺 $\{1/\lambda_d = (d)_p / (d)_m\}$ の幅が広がっているが、非相似の境界線はよく一致している。

ここでは、三次元(平面実験)については、詳しく検討しなかったが、図-3.8 (b) に示した尾崎、佐藤ら、および田中らによる現地海岸の平面実験結果と式(3.4) の傾向は比較的よく一致することがわかる。したがって、本節で明らかにした海浜変形の相似則は三次元実験にも適用できる可能性を持っているといえよう。

原型(現地海岸)の海浜変形に対する模型実験に式(3.4)の相似則を適用するに際して便利なように、原型の底質粒径 $(d)_p$ が与えられ、模型の実験縮尺 $1/n$ を決めると、模型の底質砂の粒径 $(d)_m$ が直ちに求まるように、図-3.12 を作成した。また、波についても、原型の波高 $(H)_p$ および周期 $(T)_p$ に対する模型の $(H)_m$ および $(T)_m$ が、Froude 則に基づいて破線と一点鎖線で図中に示してある。この図は、一般に模型実験に使用可能な底質砂の粒径が $(d)_m \geq 0.1 \text{ mm}$ であるので、この点に留意して示してある。

この図の使い方を簡単に説明しよう。原型(現地海岸)の底質砂の粒径 $(d)_p = 0.6 \text{ mm}$ 、波高 $(H)_p = 10 \text{ m}$ 、周期 $(T)_p = 10 \text{ sec}$ に対して、実験縮尺 $S = 1/60$ の模型実験を行う場合、図中の $(d)_p = 0.6 \text{ mm}$ の実線と実験縮尺 $1/n = 1/60$ の交点を左側の目盛で読み取ると、模型の粒径 $(d)_m \cong 0.17 \text{ mm}$ が求まる。同様に図中の $(H)_p = 10 \text{ m}$ の破線および $(T)_p = 10 \text{ sec}$ の一点鎖線と縮尺 $1/60$ の交点を右側の目盛でそれぞれ読み取ると、模型の $(H)_m \cong 17 \text{ cm}$ および $(T)_m \cong 1.3 \text{ sec}$ が簡単に求まることになる。

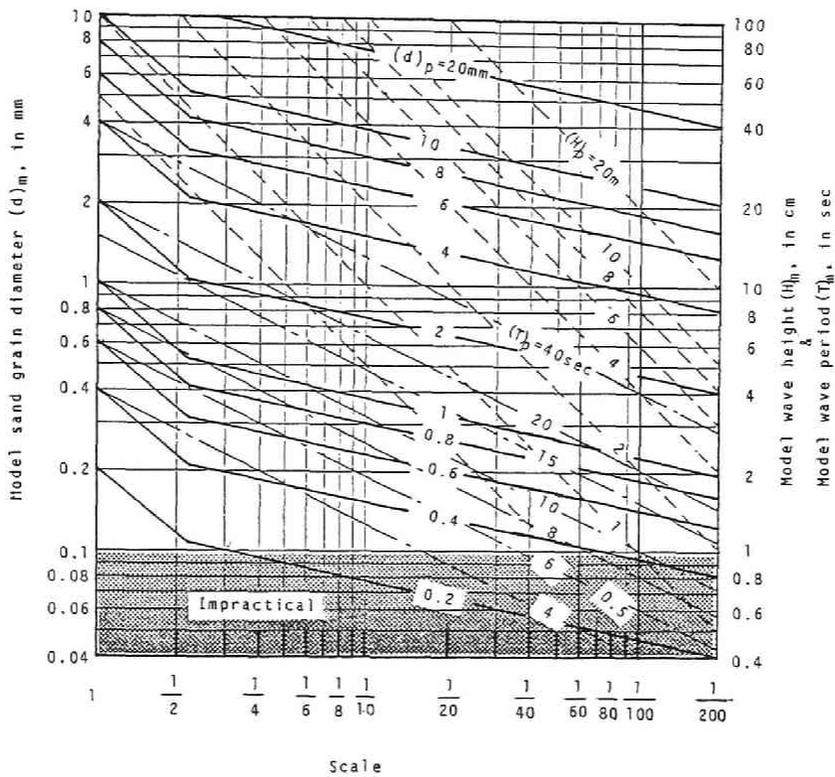


図-3.12 原型の底質粒径(d_p)、波高(H_p)および周期(T_p)から模型実験条件を求める計算図。図中の実線は粒径縮尺、破線は波高縮尺、一点鎖線は周期の縮尺を表わす。

3.4 海浜変形の時間縮尺

3.3節では、原型と模型における海浜変形がともに平衡状態にある場合の相似則を明らかにした。しかし、現地の海岸で来襲波浪の特性が時間的に変化する場合は海浜の変形過程を模型実験で再現するためには、波の特性を時間縮尺に従って変化させなければならない。

本研究では、初期海浜勾配から平衡状態へ移行する過程を対象に、二次元海浜変形の実験を系統的に行ない、海浜変形の時間縮尺を明かにする。さらに、海浜変形の連続式、岸沖漂砂量公式および海浜変形の相似則から時間縮尺を求めて、実験結果と比較検討する。

(1) 実験方法および実験装置

表-3.2に示したRun No. 3, T-26および表-3.3に示したRun No. 4, T-56, T-52などのスケールの大きな実験を原型とする。一方、模型は、あらかじめ平衡海浜断面形状が原型に対して相似になるように海浜変形の相似則、式(3.4)あるいは図-3.6を用いて実験条件を決める。模型実験では鉛直・水平方向の縮尺を同一とし、底質には原型と同程度の比重を有する砂あるいは珪砂を使用する。模型の波の作用時間は、原型より長くし、この間の海浜断面形状および碎波特性を小刻みに区切って測定する。

例えば、表-3.3中のRun No. T-56の海浜断面形状〔波の作用時間 $(t)_p = 40$ 時間〕を原型とした模型実験 (Run No. T-59)では、波の作用時間を $(t)_m = 0.5, 1, 2, 4, 5.3, 7.3, 9.3, 24, 30, 40, 60, 80, 100, 150, 200, 250, 300, 350$ および400時間に区切って測定する。この測定結果を抜粋して、海浜形状および碎波特性が破線で図-3.14 (b)に整理してある。実験装置は、図-2.1に示した中規模の二次元造波水槽を使用した。

(2) 実験による時間縮尺

特定の波の作用時間 $(t)_p$ における原型の海浜断面形状と、初期浜勾配から平衡形状に至るまでの模型の海浜断面形状とを比較する。この例として、表-3.2のRun No. 3の波の作用時間 $(t)_p = 5$ 時間における海浜の断面形状を原型とし、縮尺 $S = 1/6.7$ 模型のRun No. 3M-25の波の作用時間の経過 $(t)_m = 0.39 \sim 23.2$ 時間における海浜形状の相似性の比較が図-3.13 (a)に示してある。また、図-3.13 (b)には、原型が平衡形状 $(t)_p = 60$ 時間の場合について、同様の相似性の比較がしてある。これらは、原型と

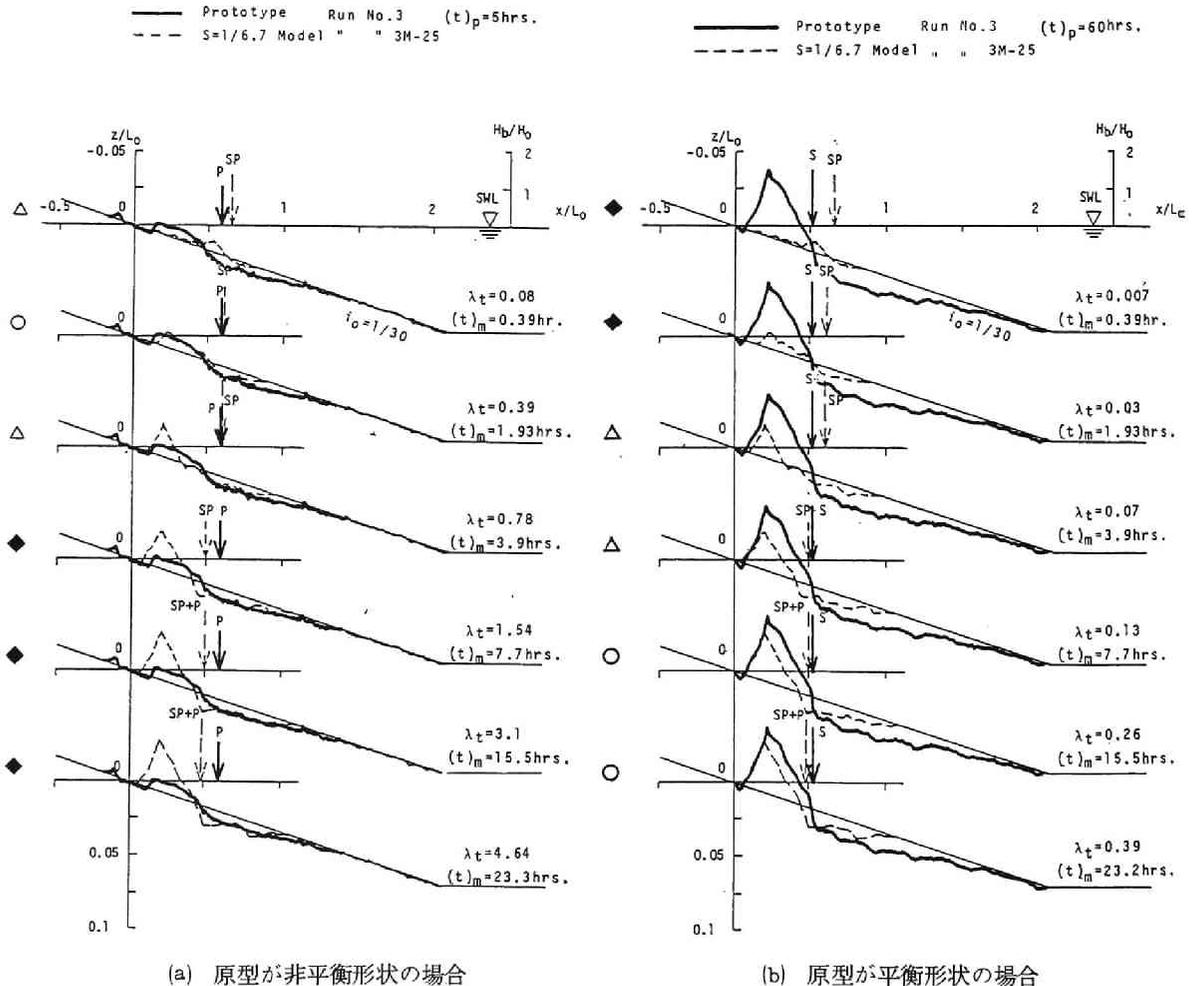


図-3.13 原型と模型の海浜変形の時間縮尺の照合判定 ($H_0/L_0 \approx 0.015$)

模型の平衡海浜断面形状が相似になるように、あらかじめ海浜変形の相似則で実験縮尺と粒径縮尺を決めておき、時間縮尺 $\lambda_t = (t)_m / (t)_p$ を変化させ、海浜の変形過程が相似になる縮尺関係を見出そうとするものである。原型と模型の海浜断面形状の相似性を 3.2 (1)の①～③の判定基準で比較照合した結果が図中の左側に印してある。

同様に、表-3.3の実験についても、図-3.14(a)および(b)に示してある。図-3.14(b)には、Savilleの実験結果を原型として、模型の時間縮尺を徐々に変化させたときの海浜断面形状を比較してある。

原型と模型の時間縮尺 $\lambda_t = (t)_m / (t)_p$ および実験縮尺 $\text{Scale} = 1/n$ について、逆数を取って次式のように表わし、

$$\frac{1}{\lambda_t} = \frac{(t)_p}{(t)_m} \quad (3.59)$$

$$\frac{1}{\text{Scale}} = n \quad (3.60)$$

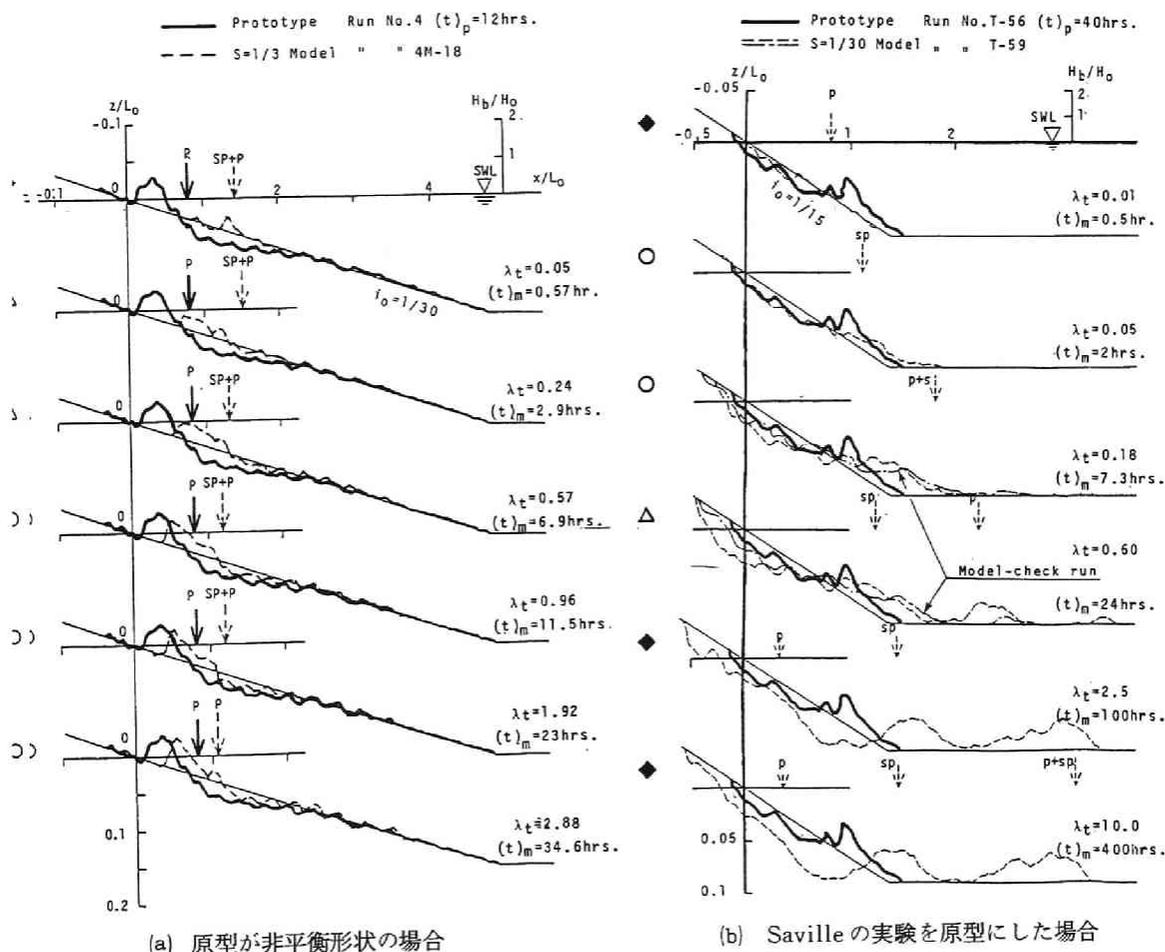


図-3.14 原型と模型の海浜変形の時間縮尺の照合判定 ($H_0/L_0 \approx 0.035$)

これらを用いて、すべての実験結果を整理し、図-3.15に示す。この図から、海浜変形の時間縮尺が成立する領域の存在が認められる。

また、原型の海浜断面形状が平衡状態にある場合について、整理した結果を図-3.16に示し、時間縮尺の成立する領域が図中に示してある。図-3.15および3.16に示された相似領域を重ねたものが図-3.17である。この図から両者の時間縮尺が成立する領域の傾向は、非常によく一致しているが、図-3.16の領域の範囲が図-3.15より多少広いことがわかる。両方に共通した領域は、原型の海浜変形が平衡状態のみならず変形の過渡状態でも、時間縮尺が成立するものと考えられる。図-3.17中の相似領域を2本の太い実線で近似すると、次式のようになる。

$$\frac{1}{1.6\sqrt{n}} \lesssim \frac{(t)_m}{(t)_p} \lesssim \frac{1}{0.65\sqrt{n}} \quad (3.61)$$

このように海浜変形の時間縮尺がある領域として表示される理由として、2章2.3節で議論した実験誤差の影響があげられる。式(3.61)で表わされる領域のほぼ中央、すなわち図-3.17に示す点線は、次式で

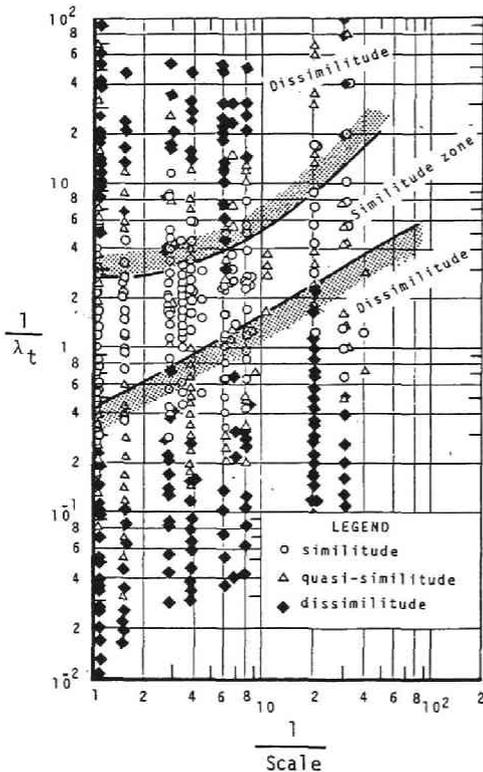


図-3.15 海浜断面形状が相似となる時間縮尺

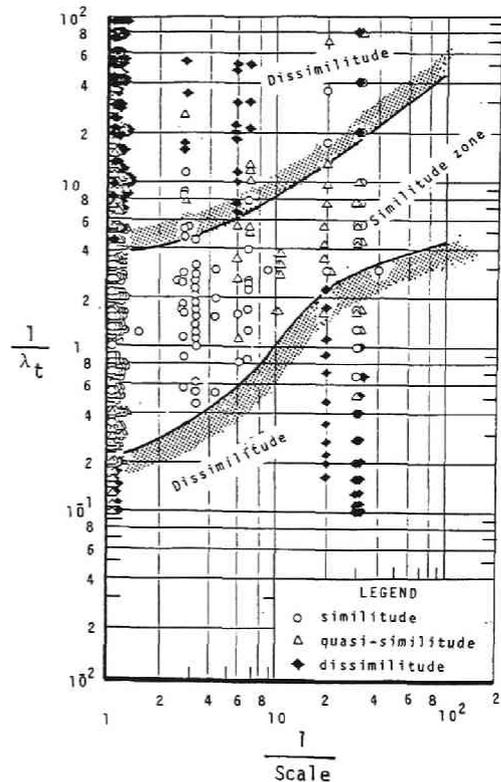


図-3.16 原型の平衡海浜断面を対象にした時間縮尺

で表わされる Froude の時間縮尺にほかならない。

$$\frac{(t)_m}{(t)_p} = \frac{1}{\sqrt{n}} \quad (3.62)$$

表-3.2 に示した Run No. 3 の原型と、その 1/6.7 模型の Run No. 3M-25 について、両者が初期浜勾配から平衡海浜へ移行する過程を式 (3.62) の Froude 則で時間縮尺を定めて行った実験による海浜形状の比較を図-3.18 (a) に示す。同様に、表 3.3 の Run No. 4 とその 1/3 模型の Run No. 4M-18 の比較を図-3.18 (b) に示す。これらの比較図から、海浜断面形状のみならず碎波特性についても、時間縮尺が十分成立していることがわかる。これらに関連して、原型と模型における初期汀線からの無次元移動量 (X_{sd}/L_0) および相対的な碎波点の位置 (X_b/L_0) の経時変化を、Froude 則による時間縮尺 $\left\{ (t/T)_m = (t/T)_p = t/T \right\}$ を用いて整理した結果が図-3.19 に示してある。特に、図-3.19 (a) の場合について、原型 (Run No. 3) と模型 (Run No. 3M-25) の汀線移動および碎波点の位置の時間的変化について、それぞれの相似性の比較を図-

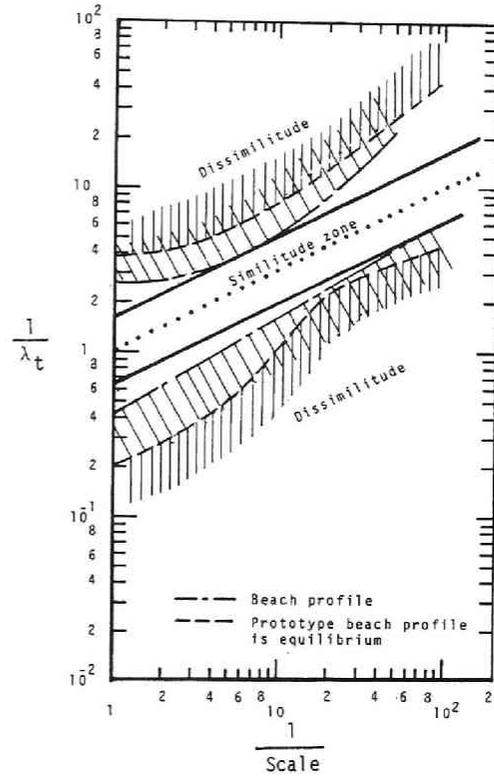


図-3.17 海浜変形の時間縮尺の表示

3.20 に示し、さらに実験誤差を式 (2.7) および式 (2.11) で計算した結果が併示してある。この図では、実験誤差の 2 倍以内は相似、2 ~ 4 倍は擬相似および 4 倍以上を非相似として区分してある。この図から、原型に対する模型の波の作用時間を式 (3.62) で定めると、両者の汀線移動量および碎波点の位置の相違がいずれも実験誤差の 4 倍以内となり、相似性が良いことがわかる。

(3) 連続式と漂砂量式による時間縮尺

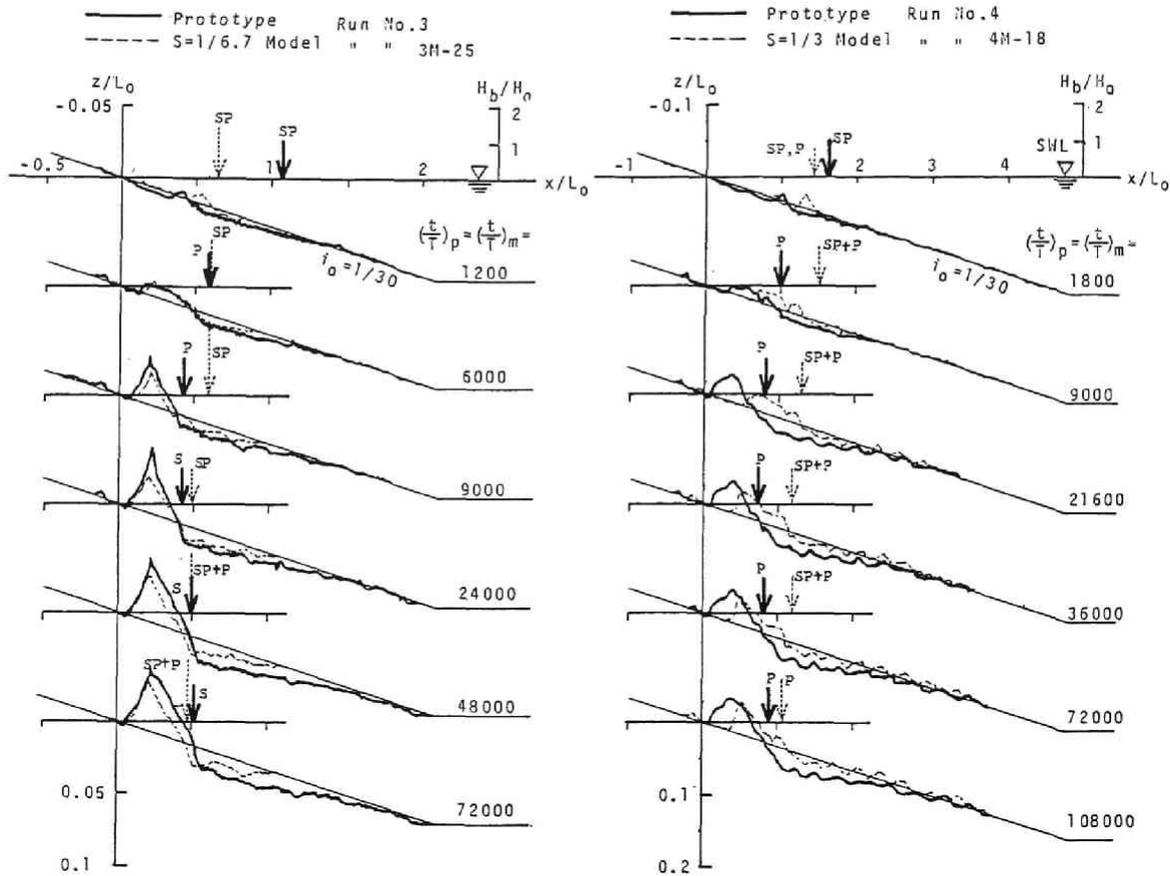
a) 海浜変形の連続式

二次元海浜変形について、汀線に直角水平方向に x 軸、鉛直方向に z 軸を取り、 (x, z) における単位幅・単位時間の x 方向の漂砂量を q_x とすると、連続の式は次のように表わせる。

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{1}{1-\epsilon} \frac{\partial q_x}{\partial x} \quad (3.63)$$

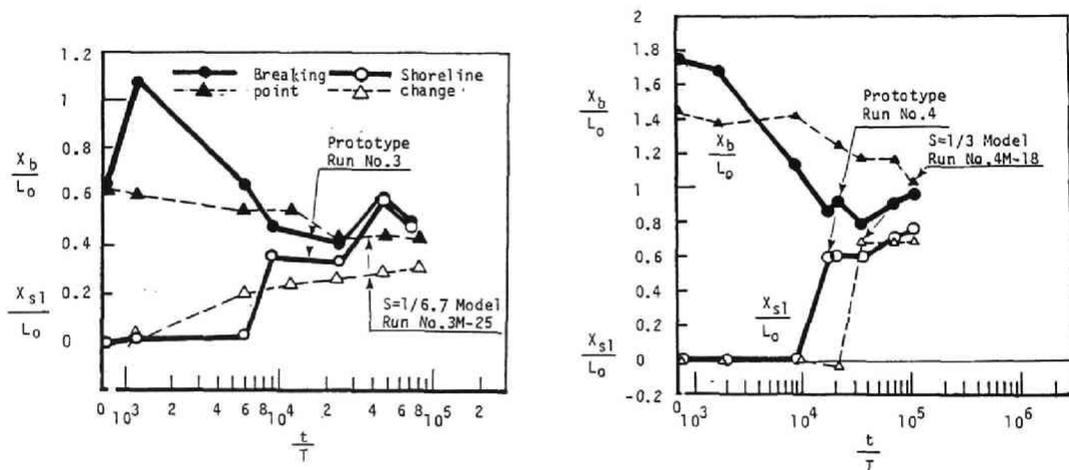
ここに、 ϵ はは底質の空隙率である。この式から原型と模型の海浜変形の時間縮尺比は、次のようになる。

$$\frac{(t)_m}{(t)_p} = \frac{(\epsilon)_m}{(\epsilon)_p} \frac{(q_x)_p}{(q_x)_m} \frac{z_m}{z_p} \frac{x_m}{x_p} \quad (3.64)$$



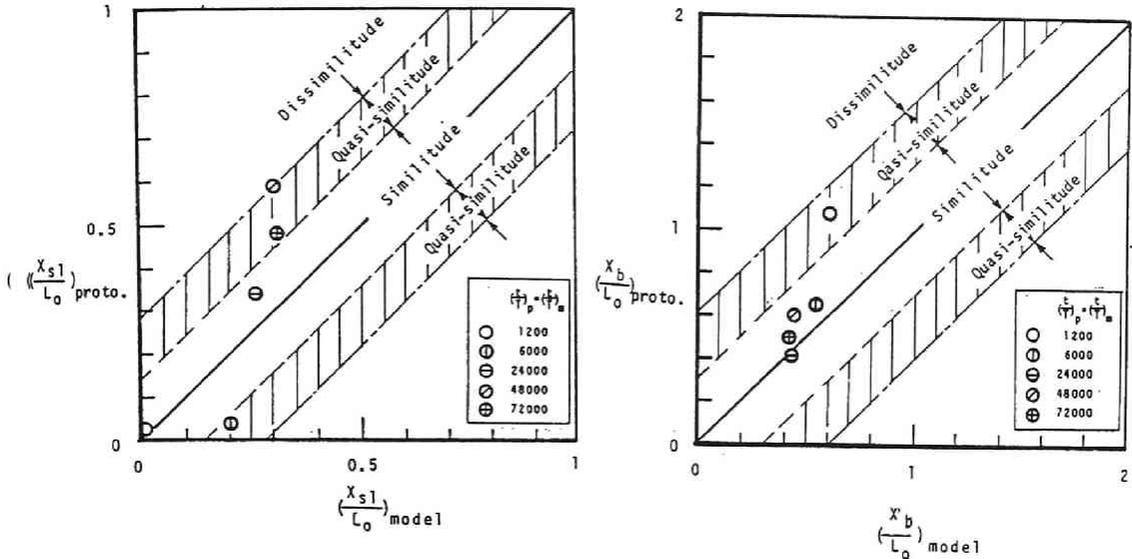
(a) 原型 : Run No. 3, 模型 : Run No. 3M-25 (b) 原型 : Run No. 4, 模型 : Run No. 4M-18

図-3.18 原型と模型の海浜変形の時間縮尺を式(3.62)で定めた場合の相似性



(a) 原型 (Run No.3) 模型 (Run No.3M-25) (b) 原型 (Run No.4), 模型 (Run No. 4M-18)

図-3.19 原型(実線)と模型(破線)の汀線移動および碎波点の位置の経時変化に関する相似性



(a) 汀線移動

(b) 砕波点の位置

図-3.20 海浜変形の時間縮尺を考慮した場合の原型と模型の一致性

さらに、原型と模型で底質の空隙率が一定 $(\epsilon)_m / (\epsilon)_p = 1$ 、鉛直・水平方向の縮尺が同じ $x_m / x_p = z_m / z_p$ とし、長さの縮尺を λ で表わせば、式(3.64)は次のようになる。

$$\frac{(t)_m}{(t)_p} = \left\{ \frac{(q_x)_m}{(q_x)_p} \right\}^{-1} \left(\frac{\lambda_m}{\lambda_p} \right)^2 \quad (3.65)$$

この式を式(3.8)のようにそれぞれの縮尺比を λ で表わすと²¹⁾ 次式となる。

$$\lambda_t = \lambda_{q_x}^{-1} \lambda_l^2 \quad (3.66)$$

式(3.65)あるいは式(3.66)から海浜変形の時間縮尺を求めるには、沖側で海浜砂が動き始める点(移動限界水深)から砕波点を含み波のその上点までの海浜変形が起る全域について、岸沖方向の漂砂量 q_x を的確に表示できる式が必要である。

b) 岸沖漂砂量表示式

現在、二次元海浜変形の全域にわたって漂砂量を的確に表示できる式は、いまだ提案されていない。しかし、砕波点より沖側の領域に適用できるものとして、一様水深における掃流漂砂の実験結果を用いて求めた榎木⁴⁵⁾、Madsen, Graut⁴⁶⁾ および土屋ら⁴⁷⁾の式がある。

以下で、これらの漂砂量表示式を用いて、時間縮尺を検討する。

(1) 榎木⁴⁵⁾は、Kalinke-Broun 型の流砂量式に基づいて次のような漂砂量式を得ている。

$$\frac{q_x}{U^* d} = K_1 \left(\frac{U^{*2}}{sgd} \right)^m \quad (3.67)$$

ここに、 U^* は摩擦速度、 K_1 および m はいずれも実験定数である。いま、乱流境界層の場合、 $\lambda_{U^*} = \lambda_l^{1/2}$ とすると、式 (3.67) による相似条件は、次式ようになる。

$$\lambda_{q_x} = \lambda_{K_1} \lambda_d^{1-m} \lambda_s^{-m} \lambda_l^{m+0.5} \lambda_g^{-m} \quad (3.68)$$

式 (3.66) および (3.68) から海浜変形の時間縮尺は、次式ようになる。

$$\lambda_t = \lambda_{K_1}^{-1} \lambda_d^{m-1} \lambda_s^m \lambda_g^m \lambda_l^{1.5-m} \quad (3.69)$$

いま、原型と模型で、式 (3.69) の K_1 が同一であるならば、式 (3.14) を用いて整理すると、次式のようにになる。

$$\lambda_t = \lambda_d^{m-1} \lambda_l^{1.5-m} \quad (3.70)$$

すなわち、この式によれば、時間縮尺は底質の粒径縮尺と実験縮尺で表わされることになる。

(ii) Madsen・Grant⁴⁶⁾ は、波の半周期における無次元漂砂量 ϕ を Shields 数 ψ_m を用いて、次式で与えている。

$$\phi = 12.5 \psi_m^3 \quad (3.71)$$

ここに、 $\phi = q_x/wd$ 、 $\psi_m = \tau_{0_m} / \rho_s g d$ である。ここで、 w ; 底質の沈降速度、 τ_{0_m} ; 振動流による摩擦応力の最大値で次式のように表わされる。

$$\tau_{0_m} = \frac{1}{2} f_w \rho U_{b_{\max}}^2 \quad (3.72)$$

ここに、 f_w は Jonsson⁴⁸⁾ による波動運動下における摩擦係数で、Swart⁴⁹⁾ による簡略式は次式で表わされる。

$$f_w = 0.0025 \exp \left\{ 5.21 \left(\frac{a_w}{k_s} \right)^{0.19} \right\}, \quad \text{ただし } \frac{a_w}{k_s} > 1.57 \quad (3.73a)$$

$$f_w = 0.3, \quad \text{ただし } \frac{a_w}{k_s} \lesssim 1.57 \quad (3.73b)$$

ここに、 a_w ; 底面における水粒子の軌道半径 $\{= H/2 (\sinh 2\pi h/L)\}$ 、 k_s ; 粗度 ($\approx d$)、 H および L ; 水深 h における波高および波長である。この式による縮尺関係は、次のようになる。

$$\lambda_{f_w} = \frac{\left\{ \exp(k_s / a_w)^{0.19} \right\}_m}{\left\{ \exp(k_s / a_w)^{0.19} \right\}_p}; \quad \frac{a_w}{k_s} > 1.57 \quad (3.74a)$$

$$\lambda_{f_w} = 1; \quad \frac{a_w}{k_s} \lesssim 1.57 \quad (3.74b)$$

また、 $U_{b_{\max}}$ は境界層外縁の最大流速で、微小振幅波の場合、

$$U_{b_{\max}} = \frac{\pi H}{2T} \frac{1}{\sinh(2\pi h/L)} \quad (3.75)$$

で表わされ、この縮尺関係は次のように表わされる。

$$\lambda_{U_{b_{\max}}} = \lambda_H \lambda_T^{-1} \lambda^{-1} \sinh \frac{2\pi h}{L} \quad (3.76)$$

式(3.71)による縮尺関係は、

$$\lambda_{q_x} = \lambda_{f_w}^3 \lambda_w \lambda_d^{-2} \lambda_s^{-3} \lambda_{U_{b_{\max}}}^6 \lambda_g^{-3} \quad (3.77)$$

となるが、式(3.76)を使って書き直すと、式次となる。

$$\lambda_{q_x} = \lambda_{f_w}^3 \lambda_w \lambda_d^{-2} \lambda_s^{-3} \lambda_H^6 \lambda_T^{-6} \lambda^{-6} \frac{2\pi h}{L} \lambda_g^{-3} \quad (3.78)$$

したがって、時間縮尺は式(3.66)および(3.78)から、

$$\lambda_t = \lambda_{f_w}^{-3} \lambda_w^{-1} \lambda_d^2 \lambda_s^3 \lambda_H^{-6} \lambda_T^6 \lambda^{-6} \frac{2\pi h}{L} \lambda_g^3 \lambda_l^2 \quad (3.79)$$

として表わされるが、式(3.14)を用いて整理すると、次のように表わされる。

$$\lambda_t = \lambda_{f_w}^{-3} \lambda_w^{-1} \lambda_d^2 \lambda_l^{-1} \quad (3.80)$$

一方、底質の沈降速度の相似条件は、式(3.52)、(3.54)、(3.56)、および(3.58)で表わされるが、これらはいずれも次式で表示できる。

$$\lambda_w = \lambda_d^{n_w} \quad (3.81)$$

ここに、Stokes 式のとき $n_w = 2$ 、Allen 式のとき $n_w = 1$ 、Kármán 式のとき $n_w = 2/3$ 、および Newton 式のとき $n_w = 1/2$ となる。この関係を使うと、式(3.80)の海浜変形の時間縮尺は、次のように表わされる。

$$\lambda_t = \lambda_{f_w}^{-3} \lambda_d^{2-n_w} \lambda_l^{-1} \quad (3.82)$$

(iii) 土屋ら⁴⁷⁾は、位相別の掃流漂砂量を Kalinske-Brown 型の式で表わし、式中の定数 K_3 を水粒子の軌道直径と底質粒径比 $2a_w/d$ の関係で表わし、次式を得ている。

$$\frac{q_x}{U^* d} = K_3 (\tau^* - \tau_c^*)^2 \quad (3.83)$$

ここに、 τ^* 、 τ_c^* 、 K_3 はそれぞれ次式で表わされる Shields 数、限界 Shields 数および係数である。

$$\tau^* = \frac{U^{*2}}{sgd} \quad (3.84)$$

$$\tau_c^* = \frac{U_c^{*2}}{sgd} \approx 0.05 \quad (3.85)$$

$$K_3 = 1.7 \left(1 + \frac{300d}{2a_w} \right); \quad \text{ただし} \quad \frac{2a_w}{d} > 100 \quad (3.86)$$

式(3.83)を式(3.84), (3.85), (3.86)用いて書き直すと, 次のようになる。

$$q_x = K_3 U^*{}^5 s^{-2} g^2 d^{-1} - 0.08 K_3 U^*{}^3 s^{-1} g^{-1} + 0.04^2 K_3 U^* d \quad (3.87)$$

これによる相似条件は, $U^* = \sqrt{f_w/2} U_{b \max}$ および式(3.75)を用いると, 次式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{q_x} &= \lambda_{K_3} \lambda_{f_w}^{5/2} \lambda_d^{-1} \lambda_H^5 \lambda_T^{-5} \lambda_{\sinh} \frac{2\pi h}{L} \\ \lambda_{q_x} &= \lambda_{K_3} \lambda_{f_w}^{3/2} \lambda_H^3 \lambda_T^{-3} \lambda_{\sinh}^{-3} \frac{2\pi h}{L} \\ \lambda_{q_x} &= \lambda_K \lambda_{f_w}^{1/2} \lambda_d \lambda_H \lambda_T^{-1} \lambda_{\sinh}^{-1} \frac{2\pi h}{L} \end{aligned} \right\} \quad (3.88)$$

さらに, これらの式と式(3.66)から時間縮尺を求めることができるが, 式(3.14)を用いて整理すると, 結局次のように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} \lambda_t &= \lambda_{K_3}^{-1} \lambda_{f_w}^{-5/2} \lambda_d \lambda_l^{-1/2} \\ \lambda_t &= \lambda_{K_3}^{-1} \lambda_{f_w}^{-3/2} \lambda_l^{1/2} \\ \lambda_t &= \lambda_{K_3}^{-1} \lambda_{f_w}^{-1/2} \lambda_d^{-1} \lambda_l^{3/2} \end{aligned} \right\} \quad (3.89)$$

したがって, 時間縮尺はこれらの3つの式を満足する条件として与えられる。

c) 海浜変形の時間縮尺

海浜変形の連続式と代表的な3種類の掃流漂砂量式を用いて, 海浜変形の時間縮尺を式(3.70), (3.82)および(3.89)で表わしたが, これらには実験縮尺 λ_l と粒径縮尺 λ_d 以外に, 諸定数および底面摩擦の縮尺効果が介入している。

式(3.70)は, 指数 m によって時間縮尺が変化するが, 榎木が示したように $m=1.5$ とすると, 時間縮尺は次式によって規定される。

$$\lambda_t = \lambda_d^{0.5} \quad (3.90)$$

この式に, 海浜変形の相似則(実験縮尺と粒径縮尺の関係)を与えれば, 時間縮尺と実験縮尺との関係を求めることができる。

式(3.3)で表わされる海浜変形の相似則を次のように一般化して表わす。

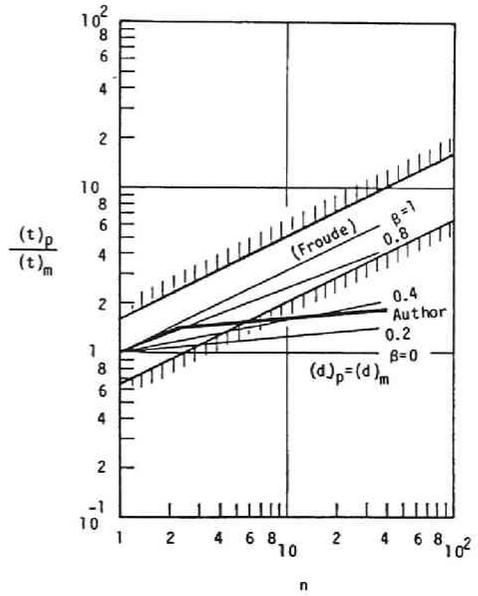
$$\lambda_d = \alpha \lambda_t^\beta \quad (3.91)$$

ここに、 α は定数で、 β は指数であり、 $\alpha=1$ および $\beta=1$ のときは、粒径縮尺が実験縮尺(Froude則)と同じになることを示す。一方、 $\alpha=1$ および $\beta=0$ のときは原型と模型の底質粒径が同一、すなわち $(d)_p=(d)_m$ となる。したがって、式(3.3)の相似則に対応させるには、 $\alpha=(1/1.7)^a$ および $\beta=b$ とすればよい。

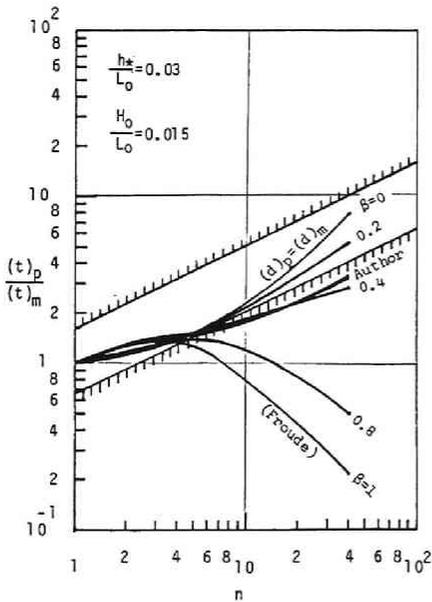
海浜変形の相似則を一般化して表わした式(3.91)と、式(3.90)から海浜変形の時間縮尺は、次式のようになる。

$$\lambda_t = \alpha^{0.5} \lambda_d^{0.5\beta} \quad (3.92)$$

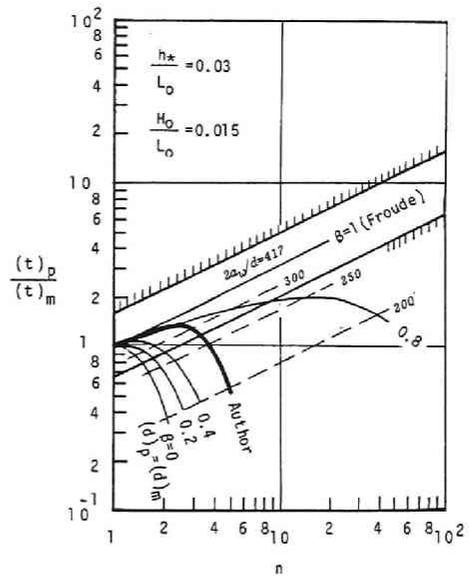
ここで、 $\alpha=1$ とし、 $\beta=0, 0.2, 0.4, 0.8, 1.0$ として得られる時間縮尺を図-3.21(a)に示す。この図から、時間縮尺は β の値によってかなり変化することがわかる。また、この図には、比較



(a) 樫木の漂砂量式による時間縮尺



(b) Madsen・Grant の漂砂量式による時間縮尺



(c) 土屋らの漂砂量式による時間縮尺

図-3.21 各種漂砂量式による時間縮尺

のために式(3.61)の時間縮尺が併示してある。

同様に, Madsen・Grantの漂砂量式による時間縮尺は, 式(3.82)および(3.91)から次のように表わされる。

$$\lambda_t = \alpha^{2-n_w} \lambda_f^{(2-n_w)\beta-1} f_w^{-3} \quad (3.93)$$

この式中には, 実験縮尺以外に定数および底面摩擦の縮尺効果が含まれているので, 時間縮尺はこの影響を受けることがわかる。図-3.21(b)には, 表-3.2に示したRun No. 3の実験条件($H_0/L_0=0.015$)で水深 $h_*/L_0=0.03$ の位置における海浜変形を原型にした場合の時間縮尺が式(3.71)を使って計算して示してある。この計算では, 模型実験が可能な縮尺{底質粒径(d) $_m \geq 0.1\text{mm}$, 波高(H) $_m \geq 1\text{cm}$, および周期(T) $_m \geq 0.8\text{sec}$ }の範囲で曲線が示してある。なお, 漂的算定の対象水深を底質の移動限界水深から碎波点まで変えて計算すると, 時間縮尺も変化することがわかった。

さらに, 土屋らの漂砂量式による海浜変形の時間縮尺は, 式(3.89)で与えられるが, この式中には底質粒径と波による水粒子の軌道直径の比の縮尺効果 λ_{K_3} および底面摩擦の縮尺効果 λ_{f_w} が含まれているので, これらの影響が無視できない。この式から時間縮尺を表わすためには, 3つの式を同時に満足する関係を求めなければならない。そこで, 表-3.2に示したRun No. 3の実験条件を原型として, 式(3.83)から λ_t と λ_f との関係を試算した。この計算は, 前述のような模型実験の限界条件を満足する範囲について行い, その結果を図-3.21(c)に示してある。この図中には, 模型における波による水粒子の軌道直径と底質砂の粒径の比による効果, $(2a_w/d)_m$ が破線で示してあるが, この効果は無視できない。土屋らが漂砂量式を求めるに当たって取扱った実験資料では, $2a_w/d=100\sim 600$ であることから, この範囲内では有効であると考えられる。図-3.21(c)では, $2a_w/d \geq 280$ ($K_3 \leq 10$)のときに, 式(3.61)との対応が良くなっている。

(4) 時間縮尺の比較

図-3.21から, 式(3.91)の指数 β の変化が時間縮尺に大きく影響することがわかる。これらの図から海浜変形の連続式と漂砂量式に式(3.3)の海浜変形の相似則を用いて得られる半理論的な時間縮尺と, 式(3.91)の β を変化させた場合の時間縮尺の対応は興味深い。特に, 式(3.3)の海浜変形の相似則を用いると, 式(3.61)の時間縮尺との一致が良くなっていることがわかる。

図-3.21で示した中で, 式(3.3)の相似則を用いて得られる時間縮尺の比較を図-3.22に示す。

この図から, 半理論的な時間縮尺は指数 m , 底質の

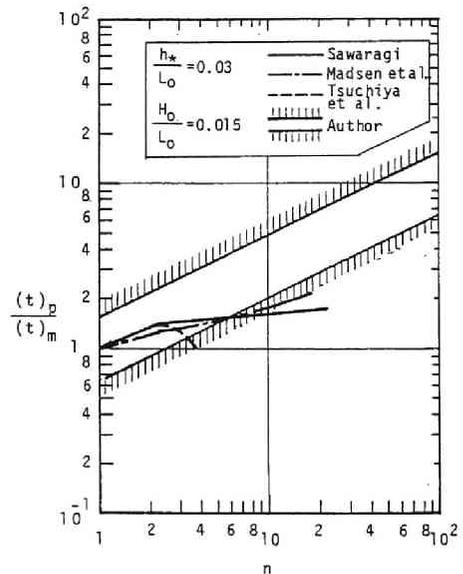


図-3.22 式(3.61)の時間縮尺と各種漂砂量表示式による時間縮尺との比較

沈降速度に関する指数 n_w 、底面摩擦係数 f_w 、および定数 K_3 の影響により、それぞれの式によって多少相違があるが、実験縮尺 $\lambda_t (= 1/n)$ が $1 \sim 1/3$ の範囲では、式(3.61)の関係と比較的よく一致することがわかる。

3.5 来襲波浪の急変による海浜変形の再現実験法

一様な初期勾配から平衡海浜へ移行する海浜変形過程を原型と模型で相似にするための相似則および時間縮尺を検討してきたが、本節では本研究で得られた海浜変形の相似則および時間縮尺を現地海岸を対象にした模型実験に適用し、その検証を行う。

1981年(昭和56年)3月11日から3月18日にかけて規模の大きな低気圧が日本海を通過し、新潟県大潟海岸の海浜変形にもかなりの影響を与えた。このような海象下の海浜変形を再現するために、海浜変形の相似則および時間縮尺の他に現地海岸のどのような波を代表波とすればよいかについて検討する。

(1) 大潟海岸の概要

図-3.23のように、大潟海岸は直江津港より東へ約10km離れた新潟県中頸城郡大潟町に位置しており、京都大学防災研究所附属大潟波浪観測所の帝国石油(株)の第1人工島棧橋で、1973年1月より毎週レッ

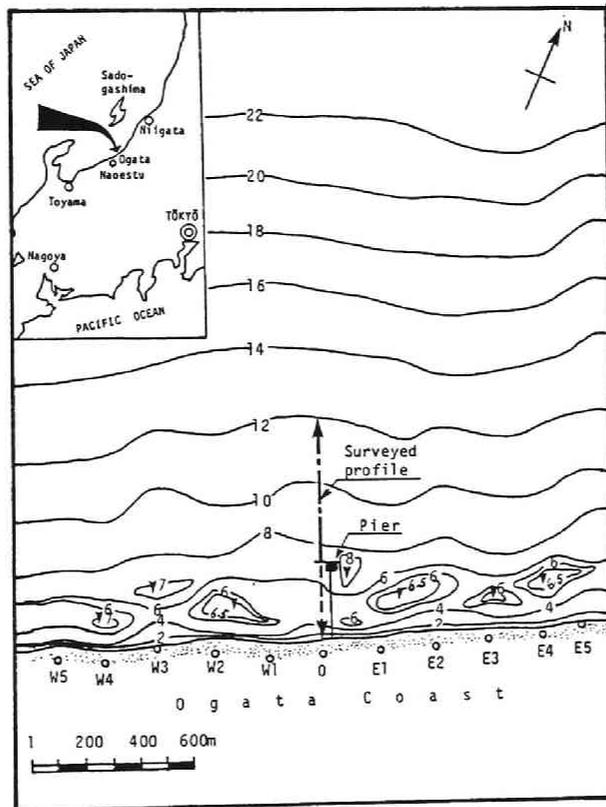


図-3.23 大潟海岸の位置および実験対象地点

ドを用いて約 300 m 沖まで海浜断面形状が詳しく測定されてきた。⁵⁰⁾ 同時に、超音波測深器による栈橋付近の海底地形測量も適宜行われてきた。この海岸は汀線より 300 m 沖までの間に、沿岸砂州が存在し、さらに沖では等深線が海岸線にほぼ平行となっている。また、入射波浪の詳細な観測が栈橋の先端、水深約 5 m の位置で行われてきた。

a) 海浜断面形状

図-3.23 に示した測点 No. 0 の沖方向約 300 m までの区域について海浜断面形状が、低気圧の通過に伴う異常波浪の前後、1981 年 3 月 11 日および 3 月 18 日に詳しく測定されているので、この観測結果を用いることにした。さらに、沖 300 m ~ 900 m の区間の海浜断面形状は、音響測深器による結果を引用した。

b) 底質特性

1972 年 7 月にかなり綿密な底質調査が行なわれ、白井ら⁵¹⁾によってその結果が報告されている。この結果によると、実験対象地点では、底質粒径は $d = 0.2 \sim 1.5 \text{ mm}$ 、淘汰の度合は、 $\sigma_\phi = 0.2 \sim 0.7$ である。

c) 波浪特性

図-3.24 には、大湊海岸の栈橋で観測した 1981 年 3 月 15 日から 3 月 17 日までの 1 時間毎の有義波高および周期を太い実線と破線で示し、直江津港の水深 21 m 地点における超音波式波高計による観測結果をそれぞれ細い実線と破線で示して、両地点について比較してある。この図から、両地点とも周期はよく一致しているが、波高については、栈橋の先端水深が約 6 m のため、約 4 m 以上の入射波高は碎波している。そのため、これ以下の波高は、直江津港のものによく一致する。また、この期間における波の入射方向は、大湊海岸の汀線にほとんど直角であった。このように両地点の波は、従来の観測⁵²⁾でも確かめられているようによく一致するので、直江津港湾事務所の観測資料から、1 時間毎の最大波高 H_{\max} 、有義波高 $H_{1/3}$ および平均波高 H_{mean} の経時変化を示す図-3.25 から実験波を定め、また周期についても同様に行った。

(2) 再現実験

模型実験は、図-2.1 の 2 次元造波水槽を用いて次のような実験条件で行った。

図-3.23 に示した St. No. 0 の地点で、1981 年 3 月 11 日に測量された後浜から沖側 300 m と、さらに超音波測深器による 900 m までの海岸断面形状を幾何学的に

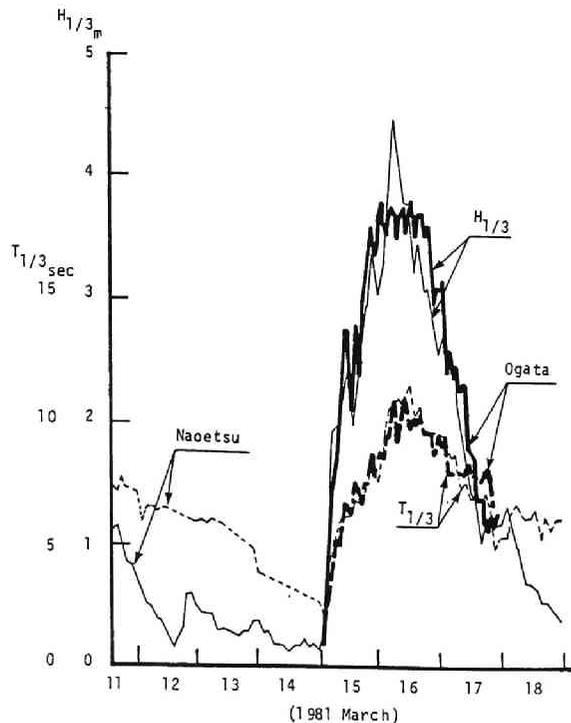


図-3.24 大湊海岸観測用栈橋および直江津港で観測された有義波高の比較

$S=1/50$ に縮小した初期海浜断面形状を造波水槽内に作った。図-3.6 および式(3.4)の海浜変形の相似側から、実験縮尺 $\lambda_{H_0} = 1/n = 1/50$ に対応する粒径縮尺は $\lambda_d = (d)_m / (d)_p \cong 1/3.7$ となるので、大潟海岸では $(d)_p = 0.2 \sim 1.5 \text{ mm}$ であるから、模型の粒径は $0.05 \sim 0.41 \text{ mm}$ となる。結局、現地の海岸変形の著しい部分の粒径が $(d)_p = 0.4 \text{ mm}$ 前後であるので、模型実験には比較的一様な粒径分布を示す中央粒径 $d_{50} = 0.09 \text{ mm}$ および 0.15 mm の2種類の珪砂を用いて実験を行う。これらの粒径はいずれも図-3.6の相似領域に入る縮尺である。これらの底質粒径はいずれも淘汰係数 $S_0 = 1.32$ および比重 2.71 である。

低気圧の通過に伴う入射波浪 (H_{\max} , $H_{1/3}$ および H_{mean}) を整理した図-3.25 から、波の特性を段階的 (Step No. ①~⑦) に変化させた3種類の波を実験に使うことにした。

Step No. ①~③, ③~⑥, および⑥~⑦は、それぞれ暴風の前、中、および後の波である。周期についても同様である。3種類の現地波浪について波高および周期を Froude 則で、波の作用時間については、式(3.61)の中央値を表わす式(3.62)を使って模型に換算した。

また、現地海岸の潮位変化の影響も無視できないと考えられるので、実験対象期間における直江津港の潮位観測結果を調べた結果を図-3.26に示してある。この潮位変化を $S=1/50$ の模型で再現すると、水位変化は $-0.2 \text{ cm} \sim +0.8 \text{ cm}$ と非常に微小となるので、実験では水位を一定にした。このような模型の実験条件を表-3.6にまとめて示す。

(3) 海浜変形の再現性

a) 海浜断面形状

実験は、表-3.6に示した Step No. ①~⑥の波をその都度造波機を止めて変化させ、あわせて海浜断面形状の測定も行った。図-3.27には、平均波、有義波および最高を作用させた結果について、前の Step No. から海浜断面が変化した部分のみが示してある。また、図-3.28には観測用栈橋で測量した3月11日と18日の大潟海岸の岸沖300m区間の海浜断面を実線で、これに対する模型の底質粒径 (d_{50}) = 0.09 mm (一点鎖線) と 0.15 mm (破線) による実験結果が比較してある。この図から、模型に使用した底質粒径の相違にあまり関係なく、平均波を用いた場合、海浜断面形状の再現性が最も良く、有義波、最

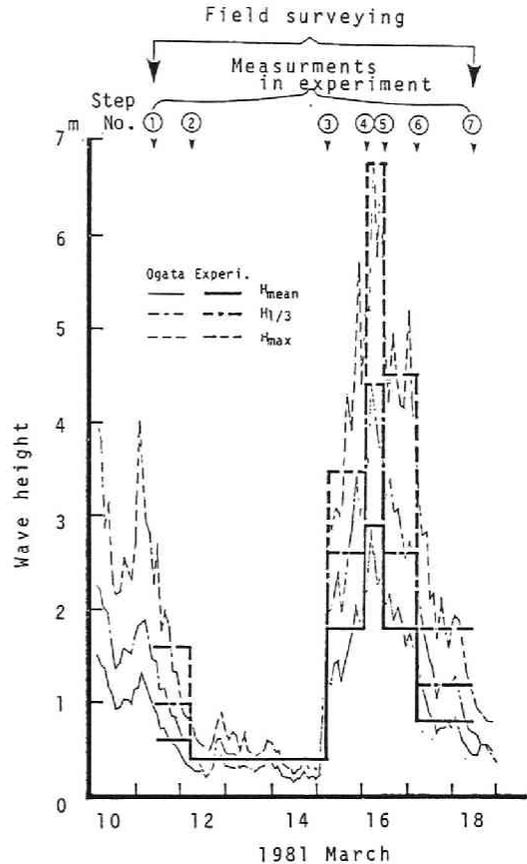


図-3.25 来襲波浪の経時変化と実験対象波の選定法

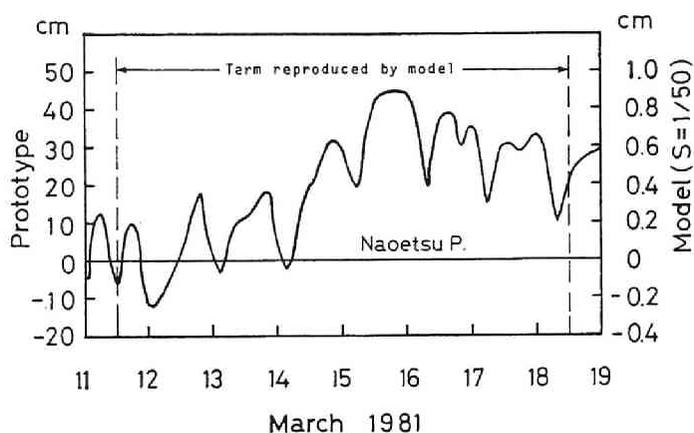


図-3.26 直江津港における潮位変化

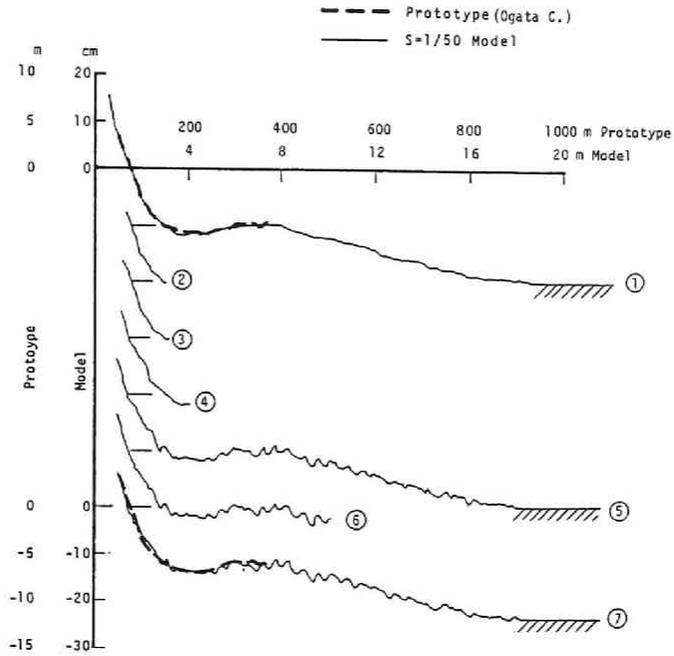
表-3.6 大潟海岸の模型実験条件

Run No.	Grain size d_{50} mm	Wave characteristics	Step No.							
			①	② -1	-2	-3	③	④	⑤	⑥
			t=2h33m	3h	6h	9h37m	3h32m	1h16m	2h33m	4h14m
2	0.15	H (cm)	1.2	0.8	0.8	0.8	3.6	5.8	3.6	1.6
4	0.09	Hmean T (s)	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	1.13	1.13	0.71
		H_0/L_0	0.0211	0.0141	0.0141	0.0141	0.0626	0.0335	0.0222	0.0283
1	0.15	H (cm)	2.0	0.8	0.8	0.8	5.2	8.8	5.2	2.4
5	0.09	$H_{1/3}$ T (s)	1.06	0.92	0.92	0.92	0.92	1.6	1.6	0.92
		H_0/L_0	0.0125	0.0079	0.0079	0.0079	0.0511	0.0234	0.0139	0.0235
3	0.15	H (cm)	3.6	0.8	0.8	0.8	7.0	13.6	9.0	3.6
6	0.09	Hmax T (s)	1.06	0.92	0.92	0.92	0.92	1.7	1.98	1.13
		H_0/L_0	0.0257	0.0079	0.0079	0.0079	0.068	0.0309	0.0142	0.0222

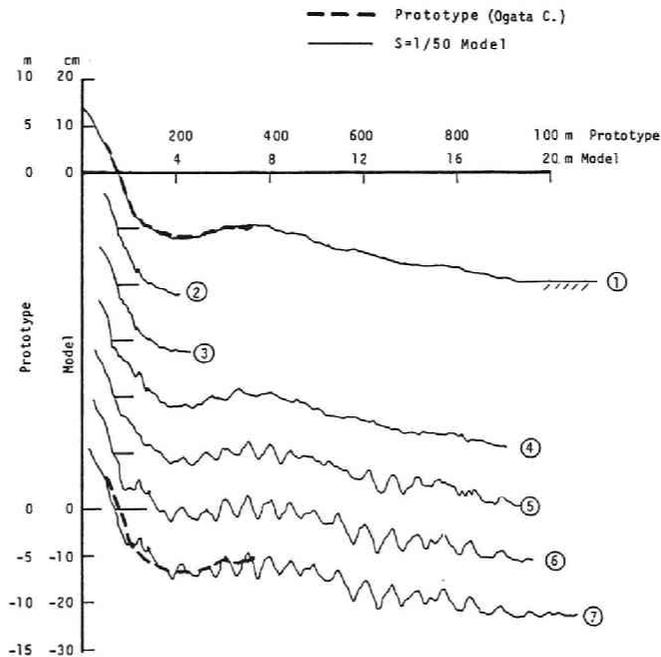
高波の順に悪くなっていることがわかる。

b) 汀線移動

平均波、有義波および最高波による初期汀線からの移動量の経時変化が図-3.29整理してある。この図中の細い実線、一点鎖線および破線は底質粒径(d_{50})_実 = 0.09 mm, 一方、太いそれぞれの線は(d_{50})_実 = 0.15 mmを表わしている。この図の Step No. ⑦の実験結果には式(2.7)で求めた実験誤差の範囲を入れて、大潟海岸と比較してある。さらに、大潟海岸の汀線移動量には、3月18日における潮位変化を考慮して変動幅が示してある。この図から、代表波として平均波を用いると、他の場合に比べて現地海岸の再現性かなり良好であることがわかる。

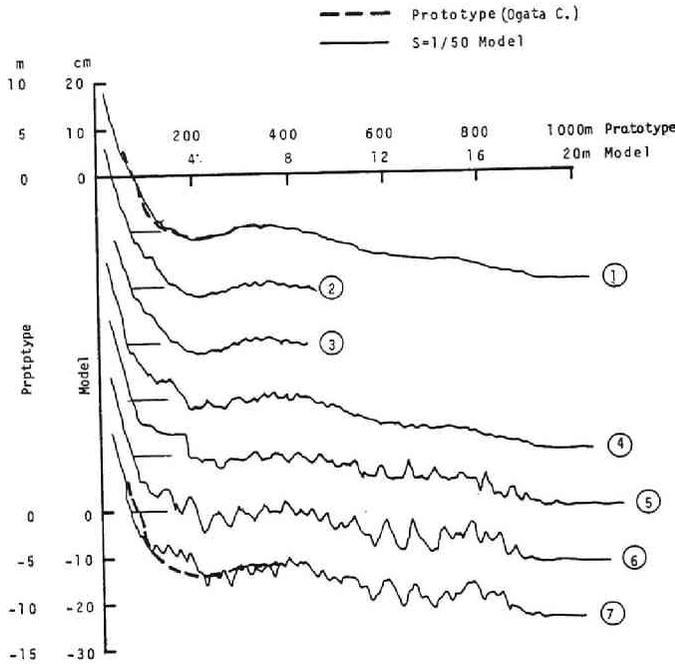


(a) Run No. O-2, H_{mean} を用いた模型実験



(b) Run No. O-1, $H_{1/3}$ を用いた模型実験

図-3.27 入射波浪特性の急変による海浜変形の模型実験結果(細い実線)。太い破線は現地海岸断面形状。Step No. ①~③は暴風前, ④~⑥は暴風中, ⑦は暴風後である(つづく)



(c) Run No. O-3, H_{max} を用いた模型実験

図-3.27 入射波浪特性の急変による海浜変形の模型実験結果（細い実線）。太い破線は現地海岸断面形状。Step No. ①～③は暴風前，④～⑥は暴風中，⑦は暴風後である

c) 土量変化

大潟海岸における3月11日と3月18日の断面形状の相違（低気圧の通過前・後）から、汀線を含む岸沖260m区間について単位幅（1m）当りの土量変化を計算した結果と、模型実験結果との比較が、底質粒径の大きさを図-3.29と同様に線の太さで分類して、図-3.30に示してある。この図から有義波および平均波によるものは現地海岸の再現性が良いことがわかる。しかし、最大波の場合、いずれの底質粒径を用いても再現性は良くない。

以上、大潟海岸の模型実験から海浜の断面形状、汀線移動および土量変化について、再現性の度を表-3.6の H_{mean} 、 $H_{1/3}$ 、 H_{max} ごとに評価した結果が表-3.7にまとめてある。この表から、海浜断面形状が相似になれば、汀線移動量および土量変化の相似性もかなり良くなっていることがわかる。

したがって、海浜変形の相似則として式(3.4)および時間縮尺として式(3.62)を用い、波の特性として現地海岸の時間当りの平均波を実験の代表波とすれば、来襲波浪の急変による海浜変形を十分再現できることがわかる。このように、実験の代表波としては現地海岸の時間平均波が最も良く、次いで有義波、最大波の順で再現性が悪くなると結論されるであろう。

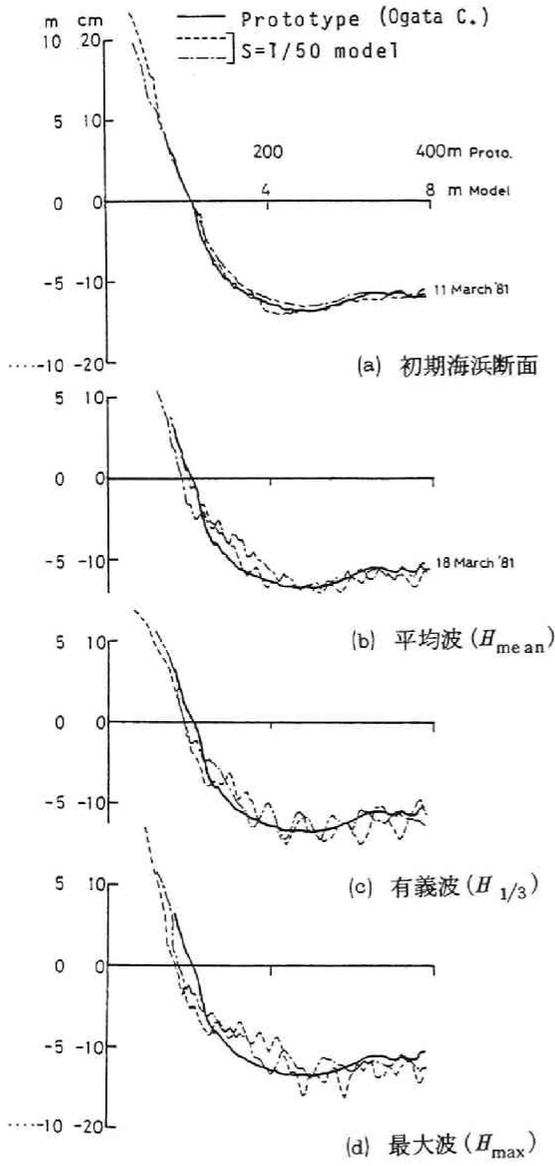


図-3.28 大潟海岸断面形状と各種の波による模型実験結果との比較。破線： $(d_{50})_m = 0.15 \text{ mm}$ ，一点鎖線： $(d_{50})_m = 0.09 \text{ mm}$

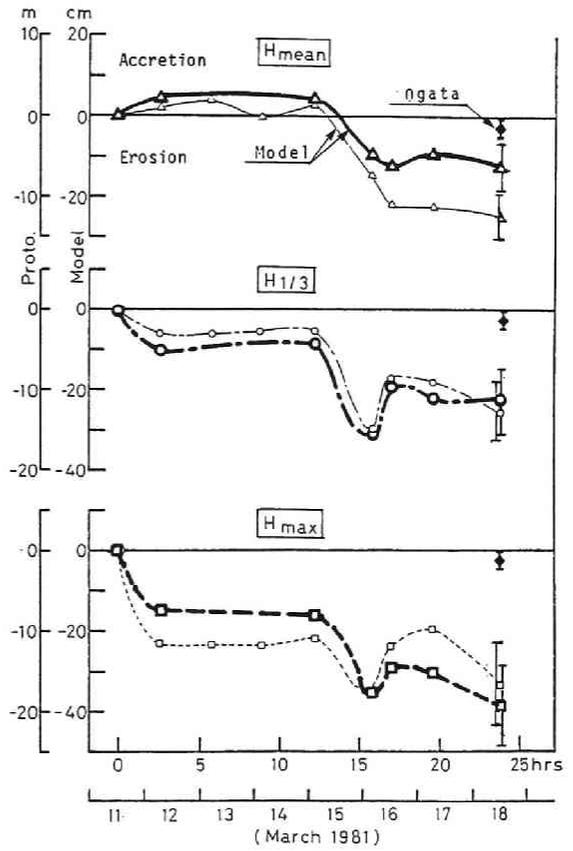
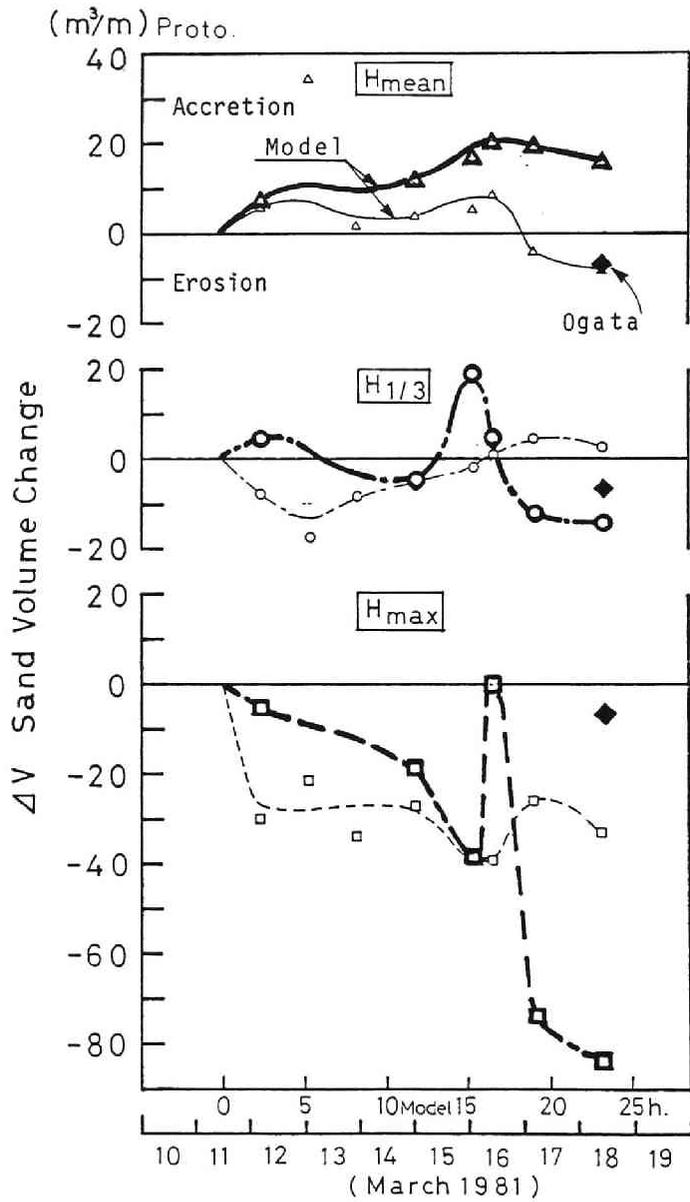


図-3.29 模型実験と大潟海岸における汀線の移動量の比較。細い実線，一点鎖線，破線は $(d_{50})_m = 0.09 \text{ mm}$ ，太いそれぞれの線は $(d_{50})_m = 0.15 \text{ mm}$ を示している



図一3.30 模型実験と大潟海岸における土量変化(岸沖300m区間)の比較(図中の線の細い, 太いの区別は図一3.29と同じ)

表-3.7 各種の実験代表波による大湊海岸の再現結果

Run No.	Wave characteristics	Beach profile	Shoreline change	Sand volume
2 4	Mean wave H_{mean}	○	○	△
1 5	Significant wave $H_{1/3}$	△	△	○
3 6	Maximum wave H_{max}	◆	◆	◆

○ : Similitude, △ Quasi-similitude, ◆ : Dissimilitude

3.6 長期的な海浜変形の再現実験法

3.5 節で、波の特性が急変した場合に起る短期間の海浜変形を模型実験で再現するためには、現地海岸の平均波を実験波とすればよいことが明らかになった。しかし、6~12ヶ月程度の期間に及ぶ現地海岸の海浜変形を再現するためには、実験波をどのように取扱えばよいかについて、静岡県遠州海岸を対象にした模型実験に基づいて検討する。⁵³⁾

(1) 遠州海岸の概要

実験の対象として、図-3.31の静岡県遠州海岸の天竜川河口から約6km離れた右岸側の測点(St. No. 165)の海浜断面形状とした。この地点は、天竜川から放出される河川流出土砂の影響が少なく、年間を通じて卓越波の入射角が汀線に対してほとんど直角に近く、沿岸方向の漂砂移動が少ない二次元性の強い海岸である。この実験対象海岸を、図-3.31中に示し、この地点の航空写真を写真-3.3に示す。

a) 海浜形状

この海岸は、建設省浜松工事事務所が1970年以後毎年1回、7月にSt. No. 101~171の範囲の深浅測量を実施してきた。この深浅測量結果から、実験対象地点(St. No. 165)の海岸断面形状を整理して図-3.32(b)に示した。この図から、1970年~1979年の9年間には、海岸断面形状に顕著な変化はほとんど見られないことがわかる。また、実験対象地点St. No. 165およびこの地点から東西にそれぞれ400m離れたSt. No. 164と166の汀線の経年変化を図-3.33に示すが、これらの地点の汀線移動は経年的に±20m以内の前進・後退を呈しており、長期的な傾向はほとんど見られない。

このようなSt. No. 165の1975年7月における海岸断面形状を実験の対象とした。

b) 底質特性⁵⁴⁾

1975年6月に、遠州海岸St. No. 101~171の天竜川河口を含む約20kmの範囲にわたって、汀線から採取した底質砂の粒径分布を図-3.34に示してあるが、この図から沿岸方向の底質分布は比較的一様

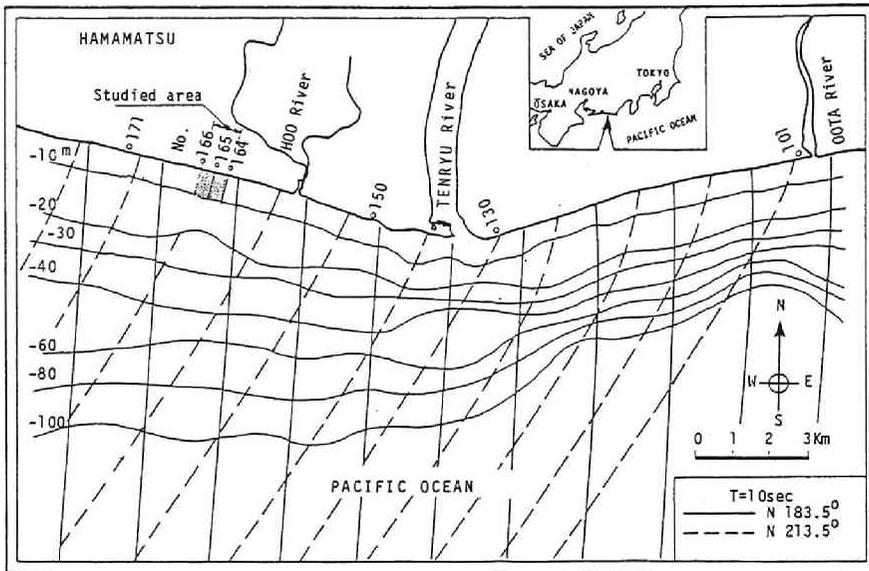


図-3.31 遠州海岸と実験対象地点

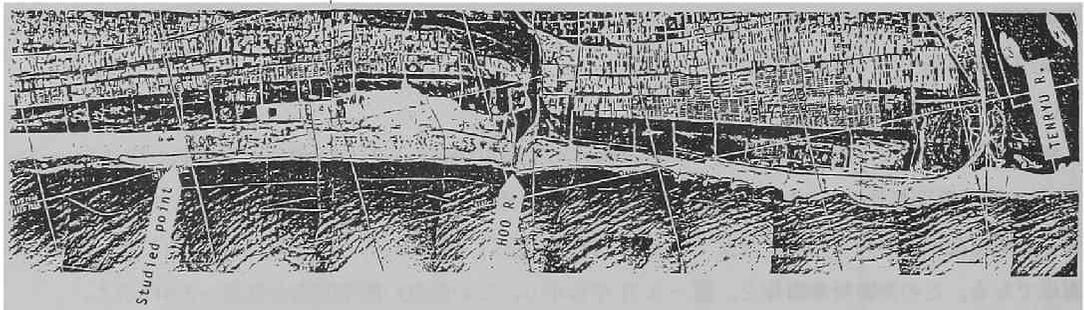


写真-3.3 遠州海岸，天竜川右岸側（昭和52年10月撮影）

であることがわかる。また，図-3.32(a)には実験対象地点の岸沖方向の底質砂の中央粒径 d_{50} および淘汰係数 S_0 の分布が海岸断面形状に対応づけて示してある，この図中には，汀線から後浜に至る区域では，St. No. 164 および 166 で採取した試料も加えて整理し，変動幅として記入してある。このように，底質粒径は汀線で最も粗く，沖方向に徐々に細くなり， $d_{50} = 0.1 \sim 1.9 \text{ mm}$ で，淘汰係数 $S_0 = 1.1 \sim 4.8$ および比重 $\sigma/\rho = 2.65$ である。

c) 波浪特性

この海岸では，1975年4月～10月には水深38m地点で超音波式波高計，この期間以外には水深4～5m地点でスタジア式波高計による観測が行なわれているので，日有義波の月平均波高 $\overline{H}_{1/3}$ ，周期 $\overline{T}_{1/3}$ および波形勾配 $(\overline{H}/L)_{1/3}$ について，それぞれの経年変化を調べた結果が図-3.35に示してある。スタ

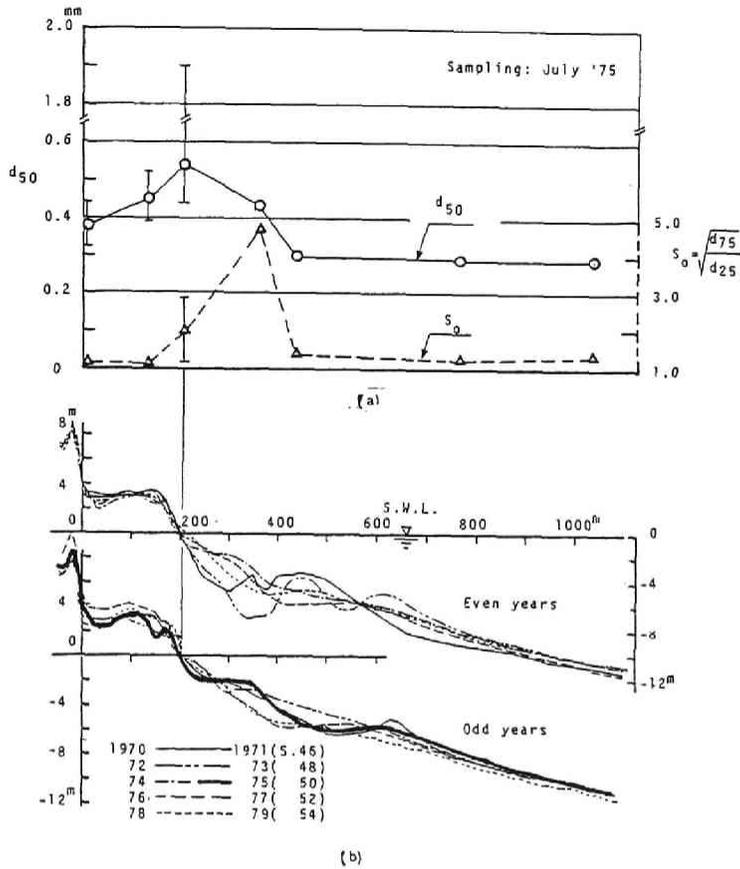


図-3.32 遠州海岸の実験対象地点の底質粒径分布および海岸断面形状の年別変動

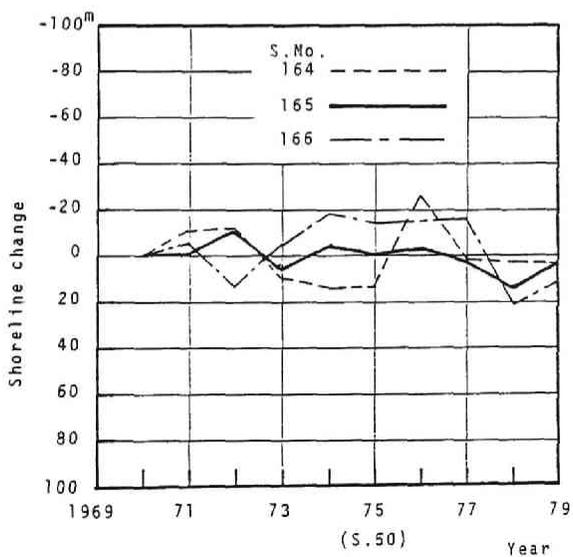


図-3.33 遠州海岸の実験対象地点 (St. No. 165) および隣接測点における汀線の経年変化

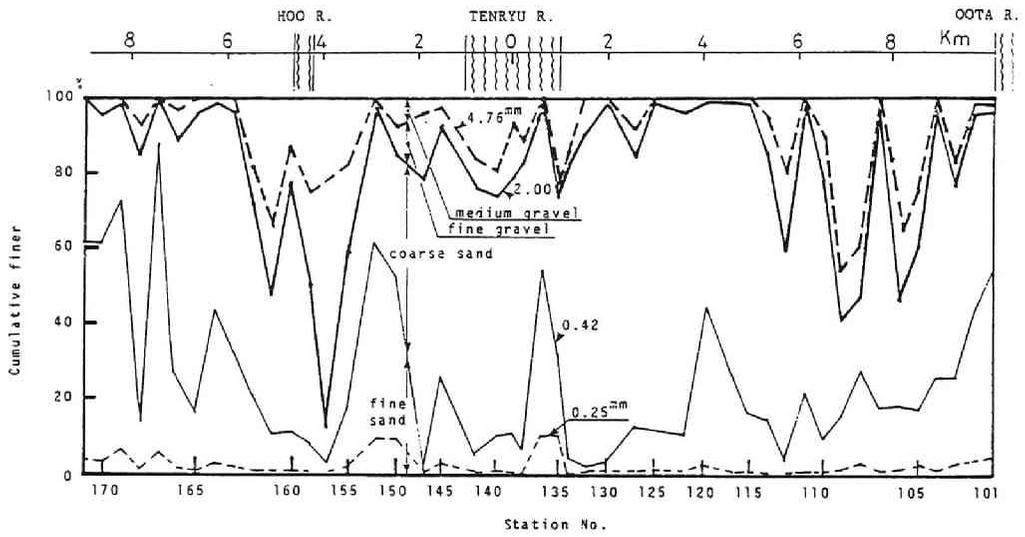


図-3.34 天竜川河口周辺海岸の汀線で採取した底質砂の沿岸方向分布, (1975年6月採取)

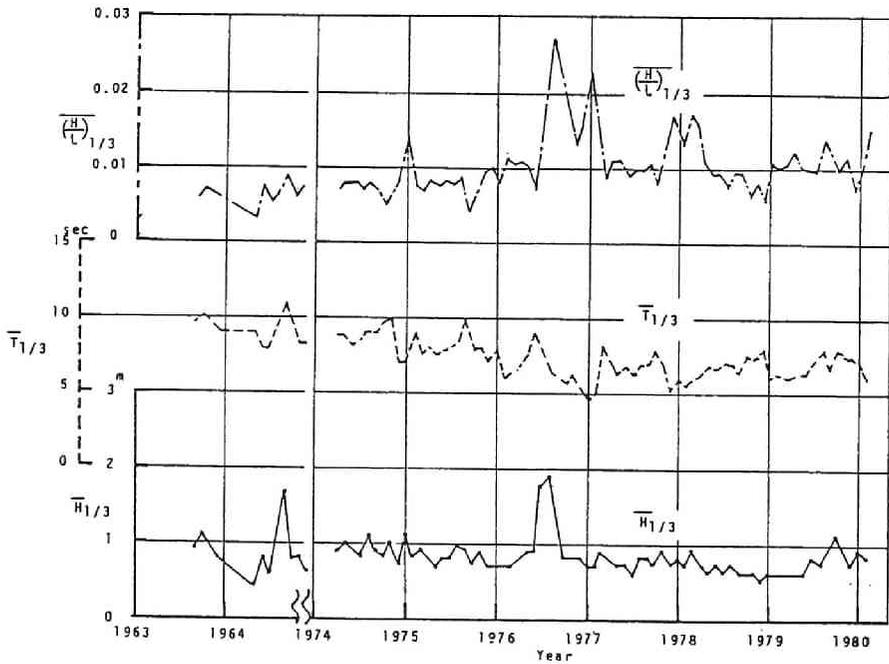


図-3.35 遠州海岸における入射波浪(日有義波の月平均値)の経年変化

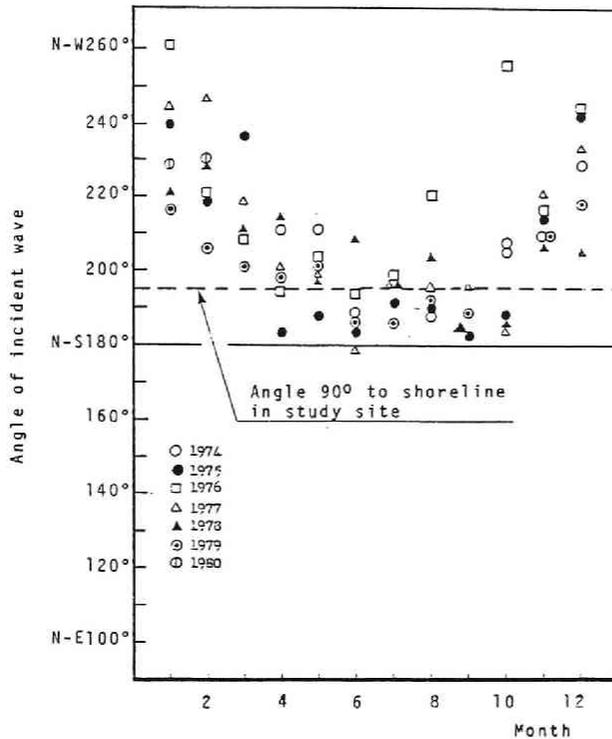


図-3.36 遠州海岸における波浪の入射角

ジャ式波高計による観測資料では波高が 2.5 m 以上になると精度がかなり落ちるとともに欠測となっている場合も多かった。

また、入射波の波向きは、図-3.36 のように毎年同じような季節的な傾向を有し、4月～10月では汀線に対してほとんど直角、冬期には南西方向から入射している。実験対象海岸に入射する代表的波向、 $N-183.5^\circ$ および $N-213.5^\circ$ について周期 $T=10\text{sec}$ の波の屈折状態が、図-3.31 に示してある。この図から実験対象海岸付近では、波の屈折のために1年間を通じて波の入射角が海岸線に対して直角に近い状態になっているので、二次元性がかなり強いといえる。

(2) 再現実験

模型実験は、図-2.1の2次元造波水槽を用いて、次のような実験条件で行った。

遠州海岸の St. No. 165 地点の後浜より沖側 1200 m (水深 12 m) の範囲を 1975 年 7 月に測量した海浜断面形状と、この地点から 400 m 離れた両側の St. No. 164 および 165 地点の海浜断面形状を加えた 3 断面の平均を取って、図-3.37 (a) の太い実線を初期海岸断面とした。現地海岸で地形変化が比較的活発な部分は水深 8 m 以浅であるので、この部分を幾何学的に水平および鉛を方向の縮尺 (実験縮尺 $1/n =$) $1/40$ として、二次元造波水槽内に移動床で設定した。また、現地海岸の水深 8 m 以深の部分については固定床にした。

遠州海岸の実験対象地点の底質は、図-3.32 (a) のように粒径が $(d)_p = 0.26 \sim 1.9\text{mm}$ の砂である。し

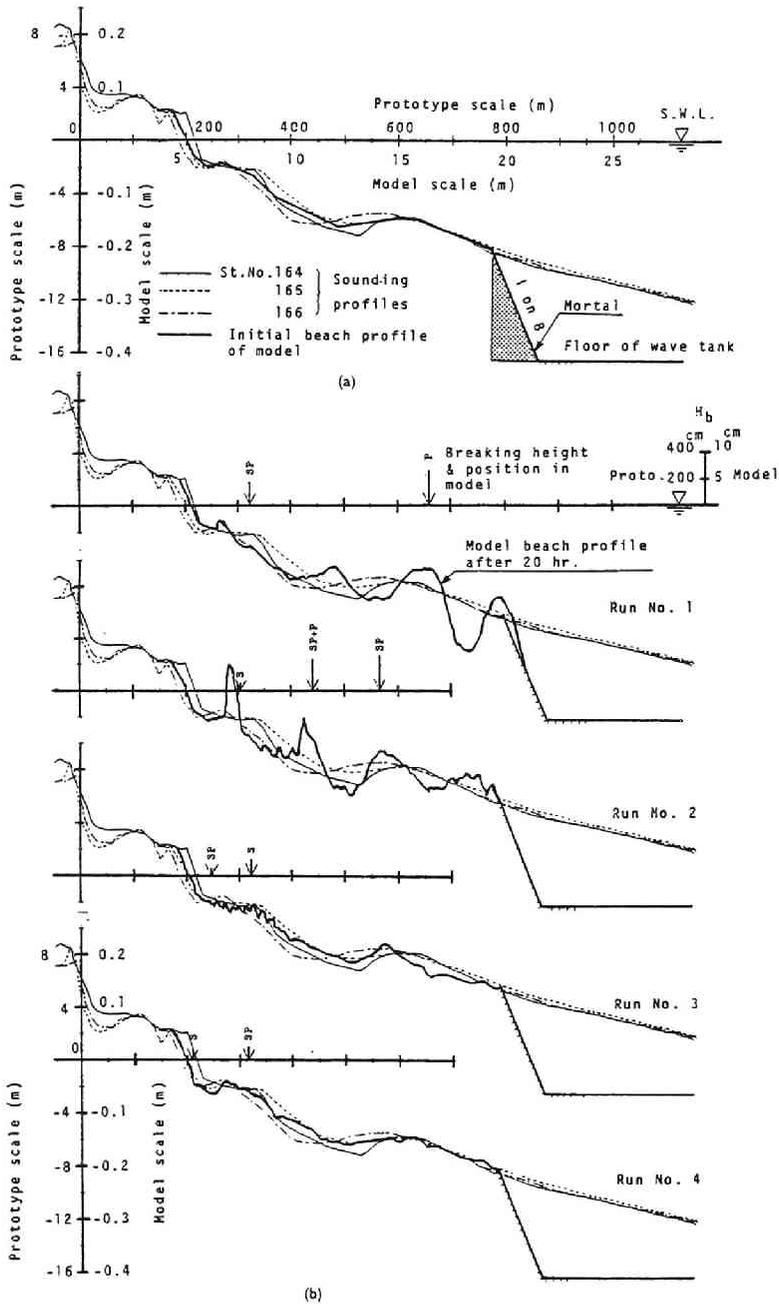


図-3.37 模型実験による再現性

たがって、模型の移動床として使用する底質の粒径縮尺は、実験縮尺を1/40とすると海浜変形の相似則式(3.4)から $\lambda_d = (d)_m / (d)_p \doteq 1/3.6$ となるので、 $(d)_m = 0.07 \sim 0.53 \text{ mm}$ となる。そこで、模型の底質としては $(d_{50})_m = 0.15 \text{ mm}$ 、 $S_0 = 1.23$ 、比重=2.77 および $(d_{50})_m = 0.30 \text{ mm}$ 、 $S_0 = 1.20$ 、比重=2.75の2種類の珪砂を用いた。

実験対象波とし、1975年7月の深浅測量の実施より6ヶ月間(同年1~6月)の波浪観測資料より日有義波高 $H_{1/3}$ とこれに対応する日有義波の周期 $T_{1/3}$ の確率分布(図-3.38参照)を求め、平均的な波(静穏時)および荒天時の波の2種類を選出した。選出したこれらの波をFroude則で1/40に縮小した波高および周期と前述した模型の底質粒径とを組合せた模型実験条件を表-3.8に示す。

模型実験では、水槽水平床部の水深40cmで一定とし、表-3.8で定めた規則波を初期海浜に作用させ、汀線の移動、海浜断面形状、碎波点の位置および碎波高の時間変化を調べた結果、波の作用が20時間でこれらの各変化がある程度平衡状態になることがわかった。このことは、汀線移動の変化を示す図-3.39からも認められる。

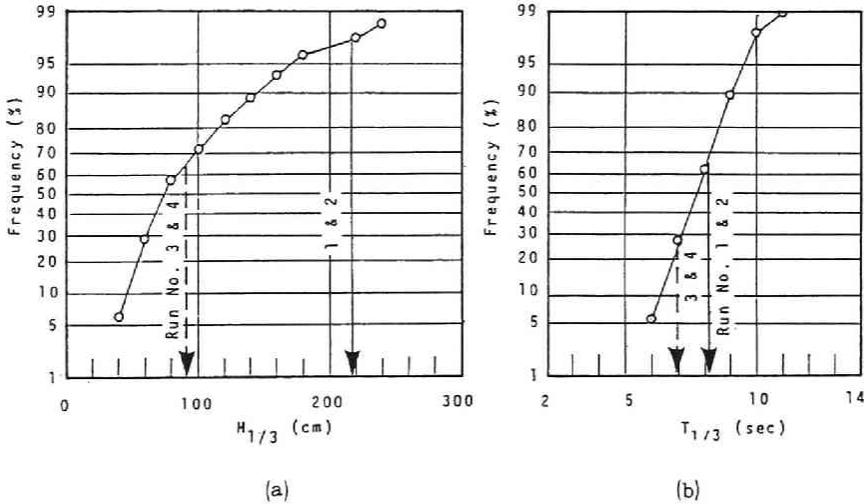


図-3.38 遠州海岸の1975年1月~6月の期間における日有義波の確率分布

表-3.8 実験条件と実験結果の再現性

Run No.	H (cm)		T (sec)		H/L	H ₀ /L ₀	d ₅₀ (mm)		k (cm)	実験結果	再現性の判定
	Proto.	Model	Proto.	Model			Proto.	Model			
1	208	5.2	8.2	1.3	0.024	0.022	0.54 +1.36 -0.3	0.15	40	汀線の移動は少ないが、沖浜の海浜変形が顕著	非相似
2	208	5.2	8.2	1.3	0.024	0.022		0.30		汀線の移動および海浜変形が顕著	非相似
3	84	2.1	7.0	1.1	0.012	0.012		0.15		全体に微小な海浜の変形が生じた	相似
4	84	2.1	7.0	1.1	0.012	0.012		0.30		海浜の変形が汀線付近のみで生じた	擬相似

(3) 海浜変形の再現性

表-3.8の模型実験結果について、波の作用20時間後の海浜断面および碎波特性と、現地海岸断面とが図-3.37(b)に、比較してある。しかし、遠州海岸における碎波特性を知る正確な資料がないので、模型実験における碎波特性の再現性の検討はできない。そのため、海浜断面形状に注目して相似性の照合判定を行う。

模型実験で、波の作用20時間後の海浜断面が初期断面より変化しても、深淺測量による現地の3地点の海岸断面(St. No. 164, 165, および166)の相違内に止まり、初期状態からの汀線移動が式(2.7)の実験誤差の2倍以内の場合、現地海岸を再現(相似)できたものとする。一方、海浜の変形がほとんど生じないか、あるいは非常に著しく、汀線移動が実験誤差の4倍以上の場合、非相似とした。また、これらの中間を擬相似とした。

このような方法で、模型実験の再現性を判定した結果が表-3.8中に記してある。この表から、遠州海岸の荒天時の波を対象にしたRun No. 1および2の実験結果はいずれも再現性が悪いが、日有義波の平均的な波を対象にしたRun No. 3および4は再現性がかなり良かった。荒天時の波を作用させると、模型実験の再現性が悪かった理由として、平穏時に測量された初期海浜断面状を使ったためであると考えられる。結局、長期的な海浜変形を模型実験で再現する場合でも海浜変形の相似則として式(3.4)を適用し、日有義波の平均波を実験の代表波とすれば、実用上問題ないことがわかる。

3.7 海浜変形の相似則の検証

来襲波浪の急変による大瀧海岸の短期間の海浜変形および遠州海岸の長期間に及ぶ海浜変形の再現法については、3.5節および3.6節で詳述したように、式(3.4)の海浜変形の相似則と式(3.62)の時間縮尺を用い、現地海岸の平均波を実験の代表波とすれば、現地海岸の変形を十分再現できることがわかった。さらに、表-3.1の従来行われた海浜変形の模型実験の中で、鉛直・水平方向の縮尺に歪みがなく、模型の底質に砂を使用した尾崎による北海道節婦港の3次元平面実験、静岡県による田子浦海岸の2次元実験、および田中・小山内による兵庫県須磨海岸の三次元平面実験の結果を再現性を底質の粒径縮尺と実験縮尺の関係で整理し、図-3.6の海浜変形の相似則との比較を図-3.40に示す⁵⁵⁾この図から、現地海岸の模型実験で再現性が良い場合の底質の粒径縮尺と実験縮尺との関係は、図-3.6の相似領域ともかなりよく一致するといえる。

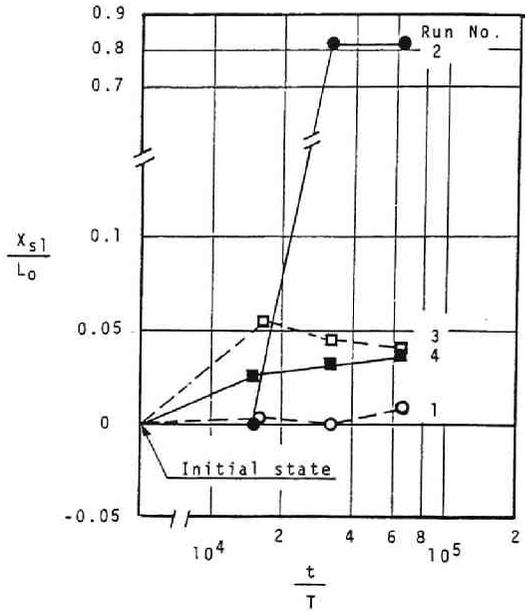


図-3.39 汀線移動の経時変化

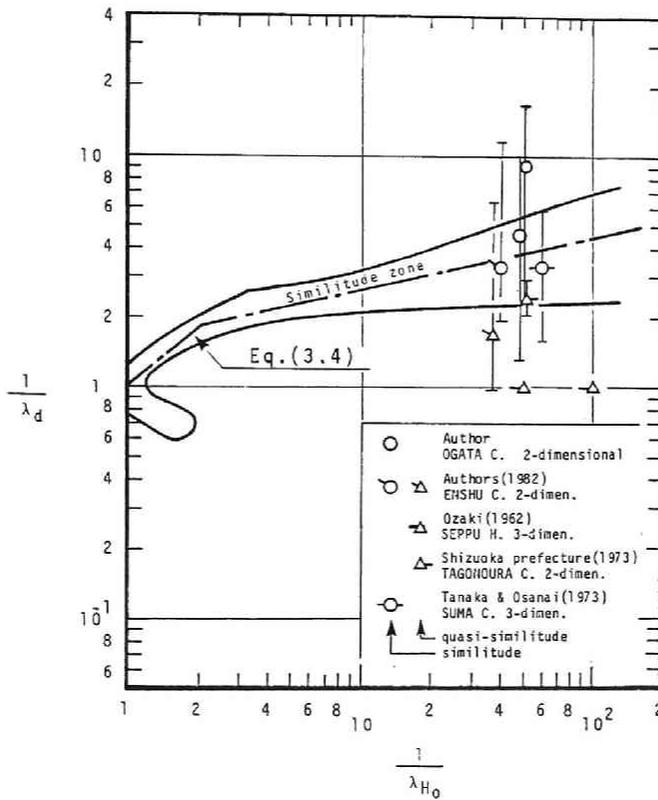


図-3.40 現地海岸の再現実験結果と海浜変形の相似則との比較

3.8 結 語

本章では、原型と模型で外力としての波の特性の縮尺（実験縮尺）は Froude の相似則に従うものとし、底質砂の粒径縮尺を実験縮尺とは無関係に定めて、実験縮尺に対して粒径縮尺をどのように歪めれば海浜変形が相似となるかを実験的に調べた。実験誤差の影響を考慮に入れた相似性の判定基準を定めて、原型と模型の相似性の判定結果を整理し、その結果に基づいて海浜変形の相似則を明らかにし、これを実験式として提示した。さらに、海浜変形の相似則と、従来の研究で明らかになった二次元海浜変形の特性から求めた相似則との対応を調べた。また、初期海浜形状から平衡形状への移行過程における時間縮尺についても検討し、その相似条件を明らかにした。この海浜変形の時間縮尺と、海浜変形の連続式および漂砂量式などを用いて半理論的に求めた時間縮尺との対応性を調べた。新潟県大潟海岸および静岡県遠州海岸の模型実験に、本研究で明らかにした海浜変形の相似則および時間縮尺を適用して、その妥当性を確かめるとともに、模型実験の代表波としてどのような波を採用すればよいかについて検討した。

以下に、得られた主要な結果を要約して結語とする。

(1) 原型と模型との相似性を照合判定するために、実験誤差を考慮した定量的な判定基準と海浜断面の

タイプにもとづいた定性的な判定基準の2種類を提案して、相似条件の判定に適用した。

原型と模型の平衡海浜形状について、両者の相似性を定量的な判定基準で判定した結果を実験縮尺と粒径縮尺との関係で整理し、海浜変形の相似則が成立する関係を見出した。こうして得られた海浜変形の相似則はある範囲として表わされ、沖波波形勾配によって多少の相違があるが、共通して相似となる領域を相似則として式示し、実験式(3.3)あるいは(3.4)を提案した。

定性的な判定基準で原型と模型の平衡海浜断面形状をタイプ別に分類して照合判定し、実験縮尺と粒径縮尺の関係で整理した結果、相似領域が明らかになり、これを式(3.7)で示した。この相似領域は、定量的な判定法によるものより若干幅が広いが、擬相似と非相似との境界線は比較的よく一致することがわかった。

(2) 海浜変形の相似則は、模型の初期海浜断面形状を原型と幾何学的に相似し、波の特性を Froude 則で定め、底質の粒径縮尺を式(3.4)に従って定めれば、 $(d/H_0)_p \leq 0.01$ および $H_0/L_0 = 0.007 \sim 0.042$ の条件下で成立することがわかった。この海浜変形の相似則は、Froude 則による実験縮尺に対して粒径縮尺を若干歪めることになるが、実用上、模型の底質粒径を Froude 則で与えられる値より粗く、かつ原型より若干細くすれば、海浜変形の相似性を確保することがわかった。

海浜変形の相似則、式(3.3)および(3.7)は、従来の海浜変形の特性の表示式の中で、波と底質の Reynolds 数 $\sqrt{gH_0} d/\nu$ や沈降速度を含んでいるもの、および漂砂の移動限界水深表示式では、底質の Reynolds 数や境界層を考慮した式などから求まる相似関係とある限られた範囲でかなりよく一致する。

これらの諸検討に基づいて、海浜変形の相似則を使用するに際して便利なように、原型の底質砂の粒径、波高および周期がわかっている場合、模型の実験縮尺を定めれば、底質砂の粒径、波高および周期などの模型実験条件がただちに求められる計算図を提示した。

(3) 初期海浜形状から平衡状態への移行過程で、原型と模型が相似となる時間縮尺は、式(3.3)の海浜変形の相似則が成立するとき、式(3.61)で表わせることがわかった。さらに、この領域の平均的傾向は Froude 則による時間縮尺と大体一致する。また、海浜変形の連続式、岸沖漂砂量式および式(3.3)の海浜変形の相似則から求まる時間縮尺ともその傾向は一致することがわかった。

(4) 入射波浪の急変による大渦海岸の海浜変形を本研究で提案した海浜変形の相似則および時間縮尺を用いて実験条件(波高、周期、底質粒径、波の作用時間)を定めると、現地海浜変形を規則波による模型実験で十分再現できることがわかった。さらに、観測波浪の時間平均波を実験の代表波として段階的に変化させて、入射波浪変化を実験的に再生すると、海浜断面形状、汀線移動および土量変化の再現性が非常に良くなることが検証できた。反対に、現地波浪の時間最大波を対象にした場合、再現性が最も悪かった。

比較的長時間(6ヶ月~1年)に及ぶ現地海岸(遠州海岸)の海浜変形の場合、本研究の相似則を用いて実験条件を定め、代表波として日有義波の平均的な波を用いると、再現性が最も良くなることが明らかになった。

(5) さらに、本研究で示した海浜変形の相似則は、他の研究者が従来実施した現地海岸の二次元および平面実験の中でも再現性の良かった実験条件ともよく対応するものであることを確かめた。

参 考 文 献

- 1) Ozaki, A.: On the effect of an offshore breakwater on the maintenance of a harbor constructed on a sandy beach, Proc. 9th ICCE, ASCE, 1964, pp. 323~345.
- 2) 野田英明：栞崎港の漂砂に関する実験（その1）、京都大学防災研究所年報，第9号，1966，pp. 729～741.
- 3) 堀川清司・佐々木民雄：養浜工に関する基礎実験，第17回海岸工学講演会論文集，1970，pp. 241～249.
- 4) Zwamborn, J. A., Fromme, G. A. W., and FitzPatrick, J. B.: Underwater mound for the protection of Durban's beaches, Proc. 12th ICCE, ASCE, 1970, pp. 975~994.
- 5) 佐藤昭二・田中則男・佐々木克博：清水港三保防波堤の漂砂に関する実験的検討，港湾技研資料，No. 154, 1973, 31p.
- 6) 静岡県：田子の浦港海岸侵食対策水理模型実験報告書，1973，211p.
- 7) 田中則男・小山内英雄：養浜工に関する研究（その2），— 神戸市須摩海岸における人工海浜の安定に関する実験およびその一般的考察 —，港湾技研資料，No. 326, 1979, 50p.
- 8) Vellinga, P.: Beach and dune erosion during storm surges, Coastal Eng. Vol. 6, No. 4, 1982, pp. 361~387.
- 9) Hughes, S. A.: Movable-bed modeling law for coastal dune erosion, Jour. Water. Port Coast. & Ocean Eng., ASCE, Vol. 109, No. 2, 1983, pp. 164~179.
- 10) U. S. Army Corps of Engineers, Beach Erosion Board: A Study of comparative action of waves on model beaches of different scales, Bulletin, BEB, Vol. 1, No. 2, 1947, pp. 8~12.
- 11) Le Méhauté, B.: A Comparison of fluvial and coastal similitude, Proc. 12th ICCE, ASCE, 1970, pp. 1077~1096.
- 12) Kamphuis, J. W.: Scale selection for mobile bed wave model, Proc. 13th ICCE, ASCE, 1970, pp. 1077~1096.
- 13) Mogridge, G. R.: Scale laws for bed forms in laboratory wave models, Proc. 14th ICCE, ASCE, 1974, pp. 1069~1085.
- 14) Saville, T. Jr.: Scale effects in two dimensional beach studies, Proc. 7th IAHR, 1957, pp. A3-1~8.
- 15) 岩垣雄一・野田英明：海浜変形における縮尺効果の研究，第8回海岸工学講演会講演集，1961，pp. 139~143.
- 16) Paul, M. J., Kamphuis, J. W. and Brebner, A.: Similarity of equilibrium beach profiles, Proc. 13th ICCE, ASCE, 1972, pp. 1217~1236.
- 17) 出口一郎・榎木 亨：波浪による移動床実験の相似について，第31回年次学術講演会講演概要集Ⅱ部，1976，pp. 1~2.

- 18) Dalrymple, R. A. and Thompson, W. W.: Study of equilibrium beach profiles, Proc. 15th ICCE, ASCE, 1976, pp. 1277~1296.
- 19) Noda, H.: Scale relations for equilibrium beach profiles, Proc. 16th ICCE, ASCE, 1978, pp. 1531~1541.
- 20) Noda, E. K.: Equilibrium beach profile scale-model relationship, Jour. Water. Harb. & Coast. Eng., ASCE, 1972, pp. 511~528.
- 21) 野田英明：海岸の模型実験，水理学・水文学における最近の進歩，昭和42年度講習会テキスト，関西支部，1967，pp. 197~209.
- 22) 榎木 亨：移動床模型実験の相似率，1984年度水工学に関する夏期研修会講義集，1984，pp. B-5-1~14.
- 23) 佐藤昭二・入江 功：須磨海岸の漂砂に関する模型実験，第17回海岸工学講演会論文集，1970，pp. 263~268.
- 24) Johnson, J. W.: Scale effects in hydraulic models involving model action, Trans. of AGU, Vol. 30, 1949, pp. 517~525.
- 25) 土屋義人・吉岡 茂：風波による海浜変形の特性について(1)，— 平衡断面形に関する実験的考察 — ，京都大学防災研究所年報，第14号，1971，pp. 347~360.
- 26) 堀川清司・砂村継夫・近藤浩右：波による二次元海浜変形に関する実験的研究，第21回海岸工学講演会論文集，1974，pp. 193~199.
- 27) 田中則男・新保 修：移動床模型実験用底質材料としての石炭粉の特性について，港湾技術研究所報告，第12巻12号，1973，pp. 3~57.
- 28) 伊藤政博・土屋義人：二次元海浜変形の相似則について，土木学会論文集Ⅱ，No. 357/Ⅱ-3，1985，pp. 177~186.
- 29) Ito, M. and Tsuchiya, Y.: Scale-model relationship of beach profile, Coastal Eng. Abstracts 1984, 1984, pp. 150~151.
- 30) 土屋義人・伊藤政博：海浜変形の相似則に関する実験的研究，第28回海岸工学講演会論文集，1981，pp. 315~319.
- 31) Watts, G. M.: Laboratory study of effects of varying wave periods on beach profiles, Tech. Memo. No. 53, BEB, 1954, 19p.
- 32) 堀川清司・砂村継夫・近藤浩右・岡田 滋：波による二次元汀線変化に関する一考察，第22回海岸工学講演会論文集，1975，pp. 329~334.
- 33) 尾崎 晃・渡辺 揺：波による二次元汀線変化の相似則に関する実験的研究，第23回海岸工学講演会論文集，1976，pp. 200~205.
- 34) 伊藤政博・増田重臣：重回帰分析による二次元海浜変形実験における汀線移動量の表示について，土木学会論文報告集，第321号，1982，pp. 91~101.
- 35) 榎木 亨：移動床実験の現地海岸への適用に関する一考察，第8回海岸工学講演会講演集，1961，

- pp. 134~138.
- 36) 佐藤昭二・田中則男：水平床における波による砂移動について，第9回海岸工学講演会講演集，1962，pp. 95~100.
 - 37) 土木学会編：水理公式集，昭和46年改訂版，1971，pp. 546~548.
 - 38) Hallermeier, R. J.: Unified modeling guidance based on a sedimentation parameter for beach changes, *Coastal Eng.*, Vol. 9, No. 1, 1985, pp. 37~70.
 - 39) Dean, R. G.: Heuristic models of sand transport in the surf zone, *Proc. Conf. Eng. Dyn. in Surf Zone*, 1973, pp. 208~214.
 - 40) 服部昌太郎・川又良一：砕波帯内の海浜変形過程，第25回海岸工学講演会論文集，1978，pp. 218~222.
 - 41) Rector, R. L.: Laboratory study of equilibrium profiles of beaches, *Tech. Memo. No. 41, BEB.*, 1954, 38p.
 - 42) 鹿島遼一・清水隆夫・丸山康樹・斉藤昭三：大型造波水路による岸沖漂砂の実験的研究，第28回海岸工学講演会論文集，1971，pp. 197~201.
 - 43) 佐藤昭二・庄司忠夫・田中則男：仙台湾沿岸の漂砂について，第13回海岸工学講演会講演集，1966，pp. 176~182.
 - 44) 鶴見一之：沈降速度の理論及び実験，*土木学会誌*，第18巻，第10号，1932，pp. 1059~1094.
 - 45) 榎木 亨：海浜過程とその予測，1977年度水工学に関する夏期研修会講義集，1977，pp. B-5-1~16.
 - 46) Madsen, O. S. and Grant, W. D.: Quantitative description of sediment transport by waves, *Proc. 15th ICCE, ASCE*, 1976, pp. 1093~1112.
 - 47) 土屋義人・上田康裕・大下哲則：掃流漂砂量則について，第13回海岸工学講演会論文集，1984，pp. 306~310.
 - 48) Jonsson I. G.: Wave boundary layer and friction factors, *Proc. 10th ICCE, ASCE*, 1966, pp. 127~145.
 - 49) Swart, D. H.: Coastal sediment transport. Computation of longshore transport, *Delft Hydraulics Laboratory, Rep. R968, Part 1*, 1976.
 - 50) 土屋義人・白井 亨・山下隆男：大潟海岸における海浜断面形状の長期変化について，第31回海岸工学講演会論文集，1984，pp. 365~369.
 - 51) Toru, S. and Tsuchiya, Y.: Characteristics of beach configuration of Ogata coast, *Coastal Engineering in Japan, JSCE*, Vol. 17, 1974, pp. 141~154.
 - 52) 土屋義人・白井 亨・中村重久・山口正隆・芝野照夫・河田恵昭・吉岡 茂：大潟海岸における海浜変形に関する観測(1)，—1979年冬季季節風時の観測結果について—，*京都大学防災研究所年報*，第14号B，1971，pp. 465~485.
 - 53) 伊藤政博：二次元模型実験による現地海浜変形の再現性に関する研究，第29回海岸工学講演会論

文集, 1982, pp. 309~313.

- 54) 伊藤政博・新井宗之・安田孝志：遠州海岸の海浜変形と底質及び波浪特性について，名城大学工学部研究報告，第20号，1980，pp. 141~150.
- 55) Ito, M. and Tsuchiya, Y.: Scale-model relationship of beach profile, Proc. 19th ICCE, ASCE, 1984, PP. 1386~1402.

第4章 海岸堤防前面における局所海浜変形に関する研究

4.1 概説

海岸侵食や波浪防御のために、海岸堤防は通常汀線より陸側に設置されることが多い。従来、海岸堤防の築造に先立って、海浜変形の予測ならびに構造上の安全性が検討されるが、海岸侵食に伴って汀線が後退すると、台風などによる異常波浪が堤防に直接衝突するようになり、堤防からの反射波によって堤脚部が急激に洗掘され、堤防が倒壊した事例が数多く報告されている^{1), 2)}。例えば、天竜川河口右側の海岸には、海岸堤防が汀線よりかなり陸側に築造されたが、海岸侵食に伴って堤防前面の汀線が後退していたところへ、台風による暴浪が急襲したために、堤防が写真-4.1のように倒壊してしまった。大河ら³⁾は、日本各地の海岸堤防・護岸の被災例337件を用いて、これを原因別に分類し、整理した結果から、海岸堤防に被災を及ぼす要因として台風時の波浪、被災形態の原因として海岸侵食による洗掘、被災の多発した海岸の底質として砂および砂礫であったことを指摘している。



写真-4.1 遠州海岸堤防の倒壊

海岸堤防の倒壊の主因である堤脚部の洗掘および前面の海浜変形に関しては、従来より数多くの研究が実施されてきた。例えば、榎木・川崎⁴⁾(1960)は、次元解析によって堤脚部の最大洗掘深の表示を考察した上で、実験的にその関係を検討し、この洗掘現象にも縮尺効果が存在することを明らかにしている。また、Herbichら⁵⁾(1965)は堤防の洗面勾配と最大洗掘深との関係を実験的に調べた。佐藤ら⁶⁾(1966)は大小2つの造波水槽を利用し、比較的広範囲な実験条件に基づいて、鉛直壁前面における洗掘形状を4

つに分類し、それぞれにおける底質の移動特性を R. I. トレーサーで調べている。最近、玉井⁷⁾(1984) および尾崎ら⁸⁾(1984) は、平面水槽を用いて、より現地海岸に近い条件で三次元の移動床実験を行ない、堤防の設置によって離岸流が助長されるために、これが洗掘に大きな影響を及ぼすことを指摘している。

海岸堤防前面の洗掘に関する現地観測は、その困難さのためにほとんど行なわれていないが、台風通過後の構造物の被害調査から洗掘深を推定した市川⁹⁾(1966) および玉井¹⁰⁾(1982)による報告がある程度である。また、著者¹¹⁾は、最近現地海岸における堤防前面の無次元洗掘深は、模型実験の結果より若干浅くなるが、一般に両者は比較的良好に一致することを見出した。このように、堤防前面の海浜変形および洗掘に関しては、現象の複雑さに加えて、現地観測の困難さや現地海岸と模型実験における相似側の問題などによって、これらの研究が遅れており、洗掘に伴う波の反射率、打上げ高、および砕波点の位置などの変化さえも十分研究されていない。

そこで、4.2節では、現地海岸では堤防からの反射波は無限遠に逸散するが、二次元模型実験では堤防と造波板との間に波の多重再反射が起り、実験波そのものの特性が変わるという厄介な現象が起るので、まずこのような波の多重再反射防止装置を考案する。次いで、4.3節では、考察した多重再反射防止装置を使用して、海岸堤防の設置による海浜変形および洗掘に関する詳細な実験を行い、そこに存在する相似関係を調べる。4.4節では、遠州海岸の海岸堤防前面の海浜変形および洗掘を対象とした模型実験に前章で提案した海浜変形の相似則を求めるための実験法を適用して実施し、その再現性を検討して、実験縮尺ならびに粒径縮尺との関係を明らかにするとともに、現地海岸における代表波の選定法について考察する。これらの結果から、原型と模型で相似になる場合の相似条件を見出し、前章で提案した海浜変形の相似則および時間縮尺との対応性を明らかにする。さらに、4.5節では、海岸堤防の設置位置が海浜変形および洗掘にどのような影響を及ぼすか、また波の打上げ高や反射率との関係はどうなるかについて検討して、これらの現象の一般的特性を明らかにする。最後に、4.6節では、海岸堤防の前面が波によって洗掘され始める洗掘限界を実験資料から求め、現地海岸の調査結果との関係からその適用性を明らかにする。以上、各節で研究した成果を4.7節で総括的にとりまとめて結語とする。

4.2 海岸堤防の模型実験における波の多重再反射軽減法

現地海岸では、海岸堤防で反射された波は一般に無限遠で逸散する。しかし、二次元造波水槽の場合には、模型の堤防からの反射波は造波装置と堤防との間を往復して多重再反射を引き起す。そのため、移動床上に海岸堤防を設置し、規則波を長時間作用させると、波の多重再反射によって入射波としての発生波の特性が変わるので、それによって海浜変形も当然この影響を受ける。このような波の多重再反射は、

表-4.1

波の多重再反射軽減法	
I. 仕切板法	(a) 両側式
	(b) 片側式
II. フィルター法	(a) 鉛直式
	(b) 可撓性水平係留式
III. 水流循環法	
IV. 造波法	(a) 鉛直振動流式
	(b) 造波板制御式

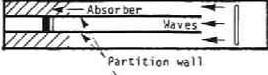
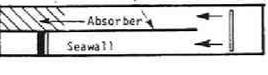
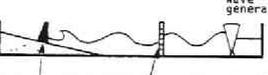
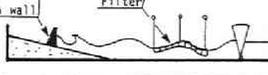
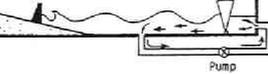
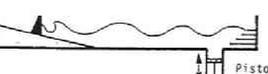
海岸構造物の消波，波の打上げ，越波，および波圧に関する実験において問題となったので，従来より種類の工夫が行われてきた。このような多重再反射を防止するための研究はあまり行われなかったが，最近，造波板の往復運動を制御して波の多重再反射を直接制御し，除去する方法が英国 Edinburgh 大学の Salter による吸収式造波機や安川電気の推力制御式不規則波装置¹²⁾などの造波板制御式が開発されてきた。しかし，これらの装置は極めて高価であるので，本節では通常の二次元造波水槽内における波の多重再反射をいかに軽減するかについて研究し，簡単な改良方法を考案する。

(1) 造波水槽における波の多重再反射軽減法

a) 分類

通常の造波水槽において波の多重再反射を軽減する従来の方法，ならびに著者が新たに考案した方法を分類して，表-4.1に示す¹³⁾。この表中，Ⅰ-(b)の片側式仕切板法，Ⅱ-(b)の可撓性水平係留式フィルター法，およびⅢの水循環法は著者が新しく考案したものである。Ⅰ-(a)の両側式仕切板法については合田¹⁴⁾が簡単な実験を行なって，その効果を報告している。Ⅱ-(a)の鉛直式フィルター法は往來より多く用いられてきているが，波の多重再反射の軽減効果についてはまだ十分わかっていない。Ⅳ-(a)の鉛直振動流式造波法は，広本ら¹⁵⁾によってその特性が詳しく調べられており，岩垣ら¹⁶⁾もこの種の造波装置を使って越波に関する模型実験を行っている。しかし，この方法は造波装置の効率が水深の影響を受けるこ

各種の波の多重再反射軽減法

概念図	特色および特性
	<p>中央部小水路からの反射波は造波板で再反射され，再び3つの小水路に分れて入射するので，波の多重再反射が軽減する。</p>
	<p>反射波は造波板で再反射され，再び2つの小水路に分れて入射する。実験対象物をガラス側の小水路に設置できるので測定が容易。</p>
	<p>フィルターを水路内に鉛直に設置し反射波を吸収させる。従来よりこの方法が多く使用されてきたが，フィルター面で発生する反射波が無視できない。</p>
	<p>水面に可撓性フィルターを水平に係留するので，波の透過性がよく，フィルター面からの波の反射が少ない。</p>
	<p>反射波が流れを遡上することによって，消散させる方法。入射波の特性が変化しやすい。</p>
	<p>造波部からの再反射を低くすることができる(5~12%)。水深が $h/L \leq 0.02$ 及び $h/L \geq 0.2$ では，造波効率が極めて悪い。</p>
	<p>最近，開発された方式で，造波板に作用する反射波を検知しながら，反射波を吸収するように造波板を駆動させる。したがって，波の再反射をかなり少なくすることが可能。設置費用が高い。</p>

とから、波形勾配の大きな波を起しにくいと、最近ではほとんど使用されていない。これらに対して、Ⅳ-(b)の造波板制御式は、最近開発・改良された新しい装置である。

以上述べた各種の方法の中で、Ⅳの方法は造波水槽の改造あるいは造波装置に相当の経費がかかるが、Ⅰ、Ⅱ、Ⅲの方法は既存の造波水槽を若干改良すればよいという経費上の利点大きい。

b) 波の多重再反射の機構

造波水槽内に固定床で一様勾配の海浜を造り、鉛直壁の海岸堤防を設置した場合、造波板との間に生じる波の多重再反射を理論的に考察する。図-4.1は造波水槽内で発生する波の多重再反射を模式的に表わしたものである。図-4.1(a)で海浜斜面および堤防前面からの反射波と造波板からの再反射が重畳して、平衡状態になった場合を考えれば、堤防に作用する最大の入射波高 H は次式で表わされるであろう。

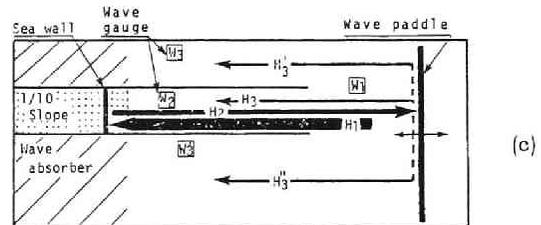
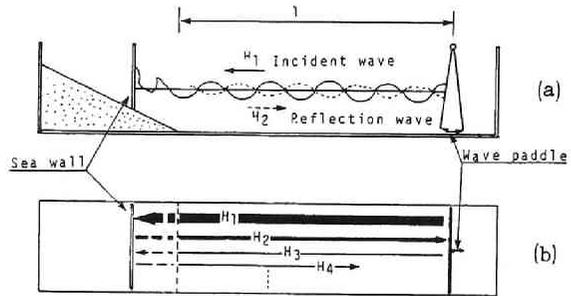


図-4.1 波の多重再反射の概念図

$$\begin{aligned}
 H &= H_1 + H_2 + H_3 \dots\dots \\
 &= H_1 + H_1 K_2 + H_1 K_1 K_2 K_f \\
 &\quad + H_1 K_1^2 K_2 K_f + H_1 K_1^2 K_2^2 K_f + \dots\dots \\
 &= H_1 + H_1 K_1 \sum_{n=1}^{\infty} (K_1^{n-1} K_2^{n-1} K_f^{n-1} \\
 &\quad + K_1^{n-1} K_2^n K_f^n) \quad (4.1)
 \end{aligned}$$

ここに、 H_1 は一様勾配の先端部における入射波高、 H_2 ；斜面および堤防からの反射波高、 H_3 ；造波板からの再反射波高、 K_1 ；斜面および堤防からの反射率、 K_2 ；造波板の反射率、および K_f ；図4.1(a)の ℓ の区間を波が伝播する際に底面と側壁に生じる摩擦および水の内部粘性による波高減衰率である。

一方、表-4.1に示した仕切板法は、反射波を回折させて他の水路へ逃して H_3 を小さくする方法である。この方法では、反射波が仕切部分から広い部分へ出るときに負の反射波¹⁴⁾が生じるが、本実験では、これは非常に微小であった。さらに、隣接水路からの反射波は非常に小さく押えることができるので、この装置による入射波高 H は次式で表すことができよう。

$$\begin{aligned}
 H &= H_1 + H_1 K_1 + H_1 K_2 K_d K_f + H_1 K_1^2 K_2 K_d K_f \\
 &\quad + H_1 K_1^2 K_2^2 K_d^2 K_f^2 + \dots\dots\dots \\
 &= H_1 + H_1 K_1 \sum_{n=1}^{\infty} (K_1^{n-1} K_2^{n-1} K_d^{n-1} K_f^{n-1} + K_1^{n-1} K_2^n K_d^n K_f^n) \quad (4.2)
 \end{aligned}$$

ここに、 K_d は反射波の回折係数である。

つぎに、フィルター法は、反射波がフィルターを通過することによって減衰させようとするものである。したがって、反射波 H_2 がフィルター面で岸方向に一部反射されるので、その選定を誤ると、かえって逆効果を招くこともある。この装置による入射波は次式で表される。

$$\begin{aligned}
 H &= H_1 + H_1 K_1 + H_1 K_1 K_R K_f' + H_1 K_1 K_2 K_T^2 K_f \\
 &\quad + (H_1 K_1 K_R K_f' + H_1 K_1 K_2 K_T^2 K_f) K_1 K_R K_f' \\
 &\quad + (H_1 K_1 K_R K_f' + H_1 K_1 K_2 K_T^2 K_f) K_1 K_2 K_T^2 K_f \\
 &\quad + \dots\dots\dots \\
 &= H_1 + H_1 K_1 + H_1 \sum_{n=1}^{\infty} (A + B)^n \tag{4.3}
 \end{aligned}$$

ここに、 $A = K_1 K_R K_f'$ 、 $B = K_1 K_2 K_T^2 K_f$ であり、また、 K_T ；フィルター波の透過率、 K_R ；フィルターによる（岸方向の）波の反射率、および、 K_f' ；斜面先端からフィルターまで波が伝播するために生じる波高減衰率である。

水流循環法は、反射波が流水を遡上する際に波高減衰を励起させるものである。したがって、式(4.2)中の K_d の代りに流水の遡上による波の減衰率 K_w がわかれば、入射波高を求めることができる。流水の遡上による波の減衰については、まだ十分明らかにされていないが、この大きさは無視出来ないと考えられる。

最後に、Ⅳとして示した造波法は、造波板からの再反射をできる限り小さくしようとするもの（鉛直振動流式）や再反射波をコントロールするもの（吸収式）である。したがって、この場合は式(4.1)中の K_2 を造波装置からの反射率（ $K_2 \approx 0$ ）とすればよい。

以上のように、これら各種の方法における波の多重再反射は、式(4.1)、(4.2)および(4.3)で近似的に表すことができる。したがって、反射波高 H_2 に対して再反射波高 H_3 が小さくなるほど、軽減効果が良いことになり、現地海岸では、 $H_3 \approx 0$ である。結局、造波水槽内に設置する軽減装置効果は、 H_3/H_2 で表わすことができよう。換言するならば、仕切板法では回折係数 K_d 、フィルター法では波の透過率 K_T と反射率 K_R 、水流循環法では波の減衰率 K_w 、および最後の造波法では造波装置の反射率 K_2 などによって、それぞれの反射法に対する軽減効果が決まることになる。

(2) 波の多重再反射軽減装置と実験方法¹³⁾

図-4.2(a)~(g)のように仕切板法、仕切板法とフィルター法との併用および仕切板と水流循環法との併用などを含めた7種類の波の多重再反射軽減法を考察し、それらの特性を調べた。それらの方法の概略は次のようである。

A：写真-4.2のように造波水槽内を3分割し、中央部小水路に堤防を設置する。造波板から仕切板先端までの開口部の長さ ℓ_s を変えて、

$$I(a)_1 : \ell_s = 4.5 \text{ m, および } I(a)_2 : \ell_s = 2.1 \text{ m とした。}$$

B：Aの装置で、 $I(a)_2$ の状態に厚さ4cmの合成樹脂網（空けき率96%、波の平均透過率 $K_T = 90\%$ ）を中央部の水路内に鉛直に固定した。

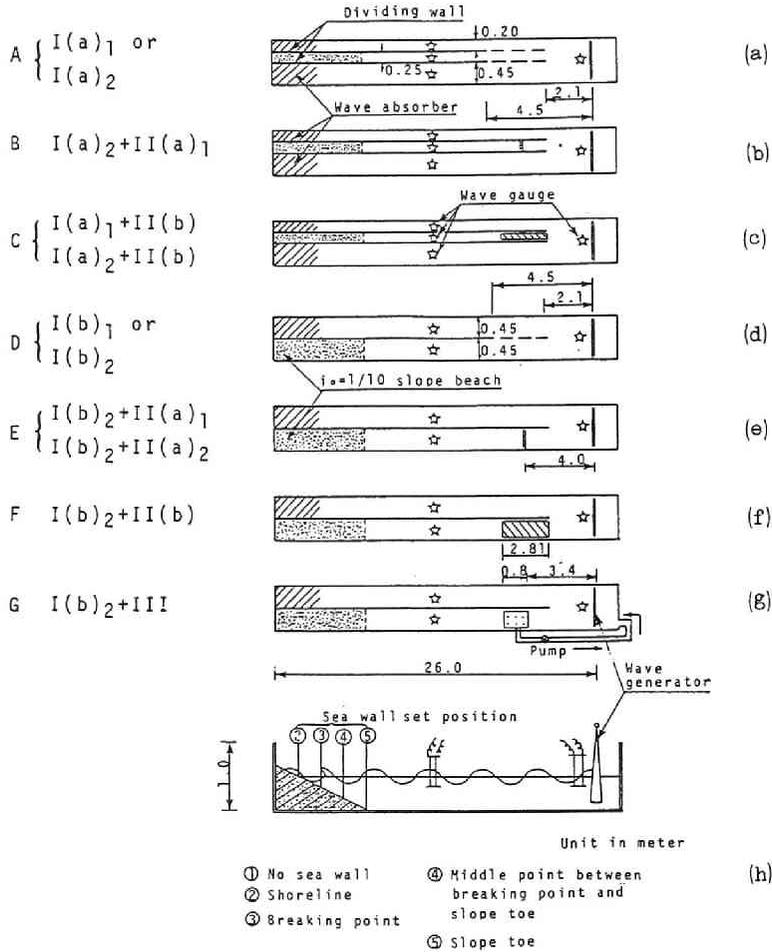


図-4.2 波の多重再反射の各種軽減法

C : Aの装置の $I(a)_2$ の状態に、長さ2.81 m、幅24 cmおよび厚さ4 cmの合成樹脂網を波の伝播に伴って撓むように中央部小水路内に吊した。

これらのA、BおよびCの方法は、いずれも中央部の小水路を模型実験に供する両側式の仕切板法であるが、次に示す4つの方法は、片側のみを実験に供する片側式仕切板法である。

D : Aと同様、 $I(b)_1 : \ell_s = 4.5$ mおよび $I(b)_2 : \ell_s = 2.1$ mのように造波板から仕切板先端までの開口部の長さを変える。

E : Dの $(b)_2$ の装置に、Bと同じように厚さ4 cmの合成樹脂網を組合せた $[I(b)_2 + II(a)_1]$ と、若干性質の異なる厚さ4 cmの合成樹脂網（空げき率96%、波の透過率70%）を組合せた $[I(b)_2 + II(a)_2]$ との2ケースを対象とした。

F : 写真-4.3で示すように、Dの $I(b)_2$ の装置にCと同じように合成樹脂網を水中に吊した $[I(b)_2 + II(b)]$ もとした。

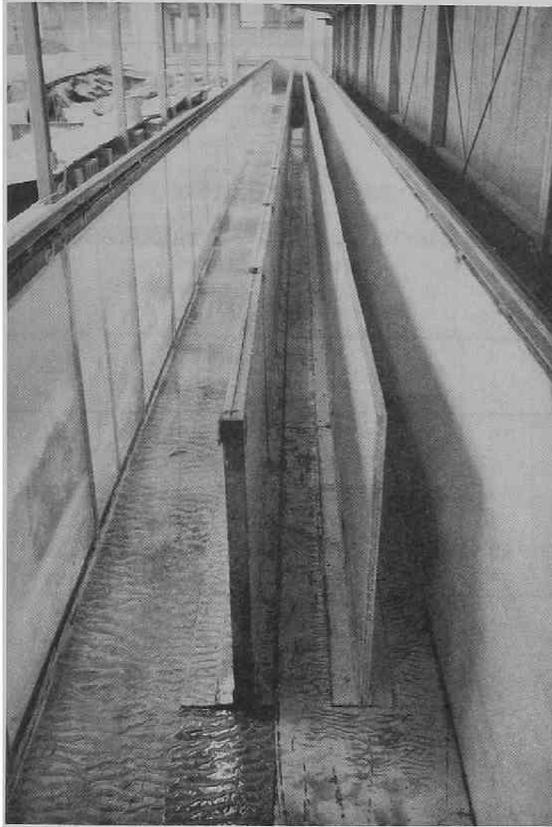


写真-4.2 両側式仕切板法

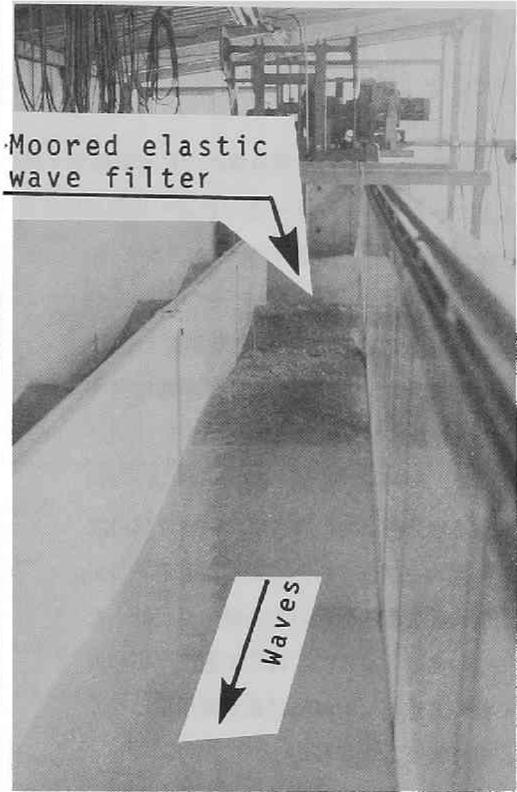


写真-4.3 片側式仕切板法と可撓性水平係留式
フィルター法を組み合わせた方法

G：DのI(b)この装置の一部にポンプで強制的な流れを引き起した。水深40cmで、流速 v と波速 c との比を $v/c = 1/13.7 \sim 1/18.2$ とした。

実験では、規則波を3～4波起した後、造波板を急止し、斜面および海岸堤防からの反射波高 H_2 と造波板ならびにフィルターで再反射される H_3 を測定した。これらの波高は図-4.2中の☆印で示す位置で測った。反射波高 H_2 は海岸堤防の位置に大きく関係するので、図-4.2(h)のように海岸堤防の設置条件を① 無堤防、② 汀線、③ 砕波点、④ 砕波点と斜面先端との中間、および⑤ 斜面先端とした。実験は、図-2.1の実験装置を使用し、各堤防設置位置について表-4.2に示した実験条件で、前述したA～Gの方法によって、それらの特性を調べた。

(3) 各種方法の効果

波の多重再反射の発生率 E_r は、反射波 H_2 と再反射波 H_3 、再々反射波 H_5 、……の和との比として、次のように表される。

$$E_r = \frac{H_3 + H_5 + H_7 + \dots}{H_2} \quad (4.4)$$

ただし、 $H_2 > H_3 > H_5 > \dots$ であるから、次式のように近似できる。

$$E_r \approx \frac{H_3}{H_2} \tag{4.5}$$

この式で、堤防の設置位置ごとに実験結果を整理し、各種の波の多重再反射の発生率 E_r の比較を図-4.3に示す。図中の②～⑤は前述の堤防設置位置を示す。無堤防の1/10の斜面の場合、反射波高 $H_2 \approx 0$ となったので、この条件は図-4.3から省いてある。また、全実験を通じて、図-4.2(a)～(b)に示した波高計で測定した反射波高 H_3 が波の減衰によって非常に小さくなった場合は、図示していない。

結局、図-4.3から、各種方法(A～G)による多重再反射の発生率は海岸堤防の設置位置および波の特性による相違があるが、両側式仕切板法を用いると発生率が低くなっていることから、これらの方法はいわゆる波の多重再反射軽減効果が実用上かなり良好であることがわかる。

表-4.2 実験条件

h (cm)	H (cm)	T (sec)	L_0	$\frac{h}{L_0}$	$\frac{H}{H_0}$	H_0	$\frac{H_0}{L_0}$
40	10	3	1404	0.028	1.3	7.69	0.0055
	5	3	1404	0.028	1.3	3.85	0.0027
	10	2	624	0.064	1.0	10.00	0.016
	5	2	624	0.064	1.0	5.00	0.008
	10	1	156	0.256	0.95	10.53	0.067
	5	1	156	0.256	0.95	5.26	0.034

4.3 海岸堤防前面における局所海岸変形の相似性^{17), 18)}

本節では、海岸堤防の設置によって生じる堤防前面における局所海浜変形が原型と模型で相似になるための縮尺関係を求め、3章で提案した海浜変形の相似則との関連性を検討する。この実験には、4.2節で考案した波の多重再射効果が最も優れている実験装置を用いた。実験は、2つに分けて実施し、Series Iは中規模の造波水槽を用いた原型と模型の実験であり、Series IIは佐藤ら⁶⁾が報告した大型の造波水路の実験を原型とした模型実験である。これらの実験条件は、3.3(1)で述べた相似条件に関する考え方によって定めたが、それらは表-4.3に示してある。

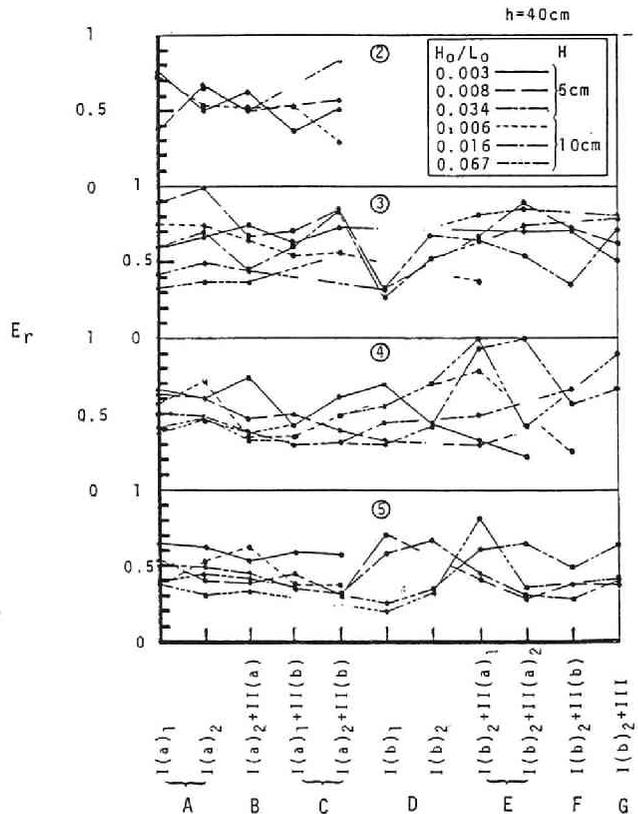


図-4.3 各種の波の多重再反射軽減効果

表-4.3 海岸堤防設置による局所海浜変形の実験条件

Series	Scale	Run No.	i_0	d_{50} (mm)	T (sec)	H_0 (cm)	h (cm)	H_0/L_0	d_{50}/H_0	h/L_0	$\frac{\sqrt{gH_0d_{50}}}{U}$	t/T	Constructed position of sea wall X/X_b
I	1/1	SD3M-1	1/30	0.3	2.24	11.4	55.6	0.015	0.0026	0.071	275	3.9×10^4	$X/X_b=0, (\text{shoreline})$ $\theta=90^\circ$
	1/1-1	SD3M-1'		0.3	2.24	10.3	50.0	0.015	0.0029	0.071	277	4.1	
	1/1-8	SD3M-2		0.3	2.12	6.9	33.3	0.015	0.0043	0.071	234	5.0	
	1/2-8	SD3M-3		0.3	1.73	4.1	20.0	0.015	0.0073	0.071	187	6.4	
	1/4-4	SD3M-4		0.3	1.34	2.6	12.5	0.015	0.0015	0.071	156	8.2	
	1/1-1	SD3M-5		0.15	1.06	10.3	50.0	0.015	0.0015	0.071	114	4.1	
	1/2-2	SD3M-6		0.15	2.12	5.2	25.0	0.015	0.0029	0.071	75	5.8	
	1/3-3	SD3M-7		0.15	1.50	3.4	16.7	0.015	0.0044	0.072	66	7.1	
1/4-4	SD3M-8	0.15	1.22	2.6	12.5	0.015	0.0058	0.071	57	8.2			
II	Proto. (Sato et al., 1966)	ST1-1 $\frac{1}{6}$		0.21	5.10	26.0	106.0	0.0065	0.0008	0.026	294	0.9~1.6	$X/X_b=0, 0.15, 0.32,$ $0.45, 0.64,$ 0.8
	1/2-2	SD2-1 $\frac{1}{7}$	1/10	0.15	3.44	11.8	48.0	0.0065	0.0013	0.026	179	7.2	$X/X_b=-0.17, 0,$ $0.15, 0.45,$ $0.8, 1.1, 2.5$
	1/6	SD3-1 $\frac{1}{7}$		0.09	2.08	4.3	17.7	0.0065	0.0021	0.026	64	9.3	$X/X_b= " "$ $" "$

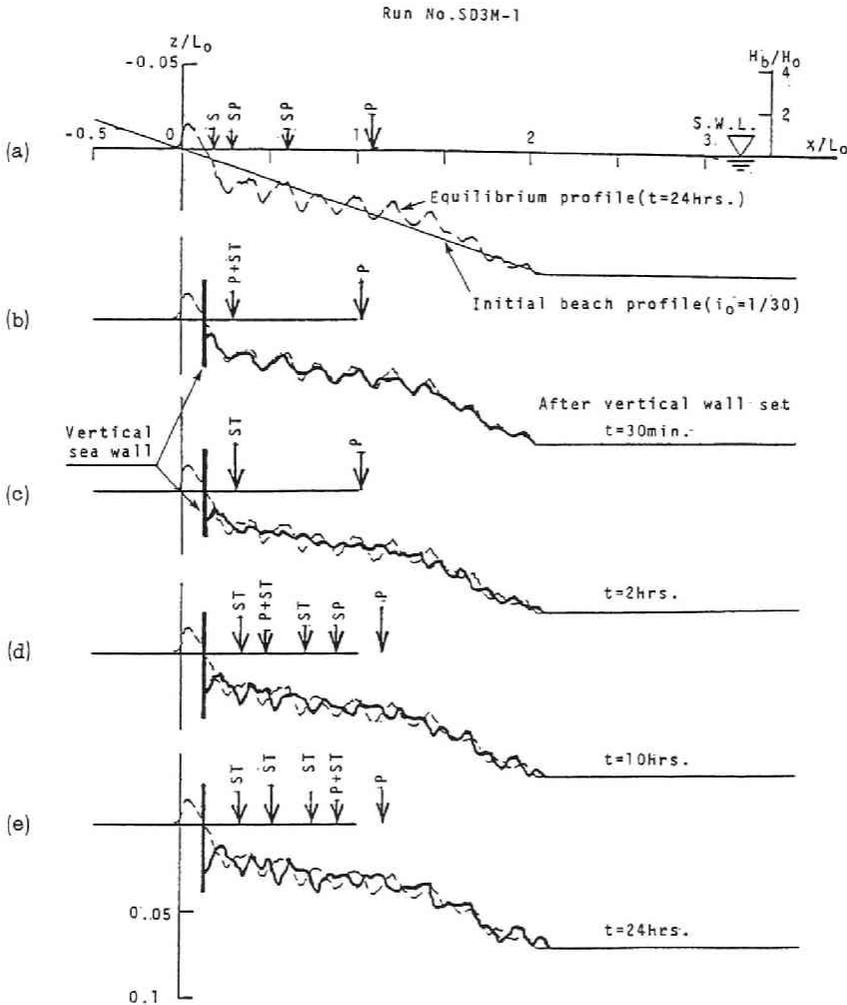


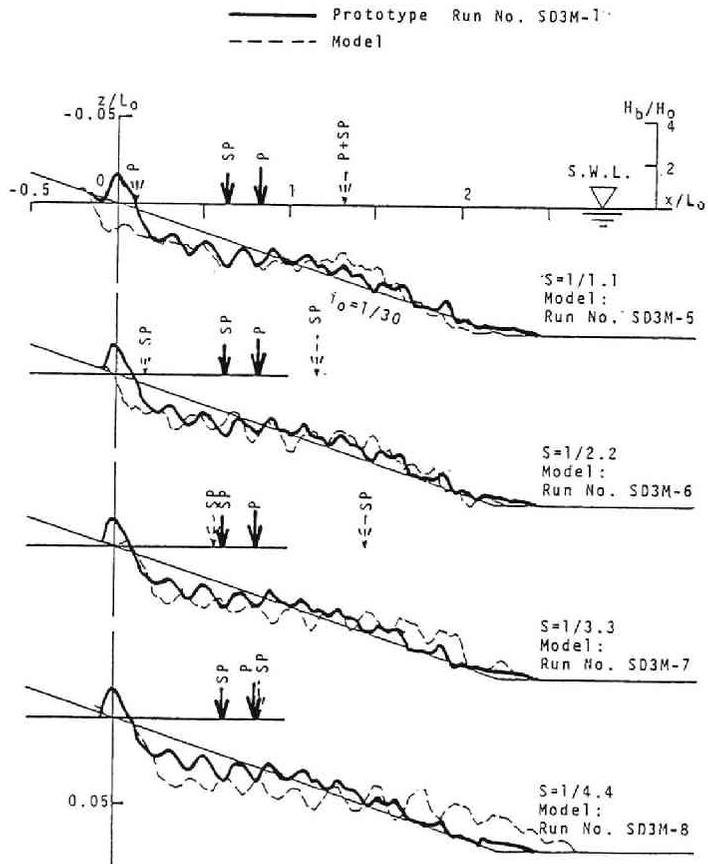
図-4.4 海岸堤防設置による堤防前面の局所海浜変形

(1) 実験方法

原型と模型では、いずれも水平および鉛直方向の縮尺は同一にする。底質としては、原型と同程度の比重を有する珪砂を用いて、一様な初期浜勾配を造り、まず所定の実験波を24時間程度作用させて、ほぼ平衡な海浜を形成させる。次に、この海浜に海岸堤防として、鉛直壁を取付けた後、堤防前面における局所海浜変形がほとんど定常になるまで、再度同じ特性の波を作用させた。この間における海浜の断面形状を詳細に測定することにした。

Series I の実験は、原型と模型の粒径縮尺を一定にして、波の特性および水深などの実験縮尺を造波水槽の規模と機能から定まる最大から最小まで Froude 則に従って段階的に変化させた。この実験は、2種類の底質粒径を用いて 1/30 の初期浜勾配を造り、海浜堤防としては、平衡海浜の汀線に鉛直壁の模型堤防を設置した。したがって、スケールの大きな実験結果を原型とし、スケールの小さい方を模型にすれば、結果的には両者の間で実験縮尺は Froude 則に従うことになり、堤防の設置位置は幾何学的に相似となっているが、粒径縮尺は Froude 則と関係なく定めたことになる。

次に、Series II の実験として、佐藤ら⁶⁾は、大型造波水槽（長さ：100 m、高さ 2.5 m、幅 3 m）に $d_{50} = 0.21 \text{ mm}$ の底質砂で 1/10 の勾配をもつ初期浜を造り、波を作用させて海浜断面がほとんど平衡になった後、鉛直堤防を設置して再度同じ特性の波を 6～8 時間作用させ、堤防前面における局所海浜変形を詳しく測定した。このような方法で堤防の設置位置を碎波点との関係で相対的に変化させた実験を行っている。本研究では、このような佐藤らの実験を Run No. STI として取扱う。一方、この模型は、表-4.3 に示した Run No. SD2-1～SD2-7（実験縮尺 1/2.2）および Run No. SD3-1～SD3-7（実験縮尺 1/6）としたが、海岸堤防の設置位置は原型と相似になるようにした。これらの模型実験における縮尺や粒



(a) 海岸堤防設置前の海浜形状

図-4.5 原型と模型の海浜変形

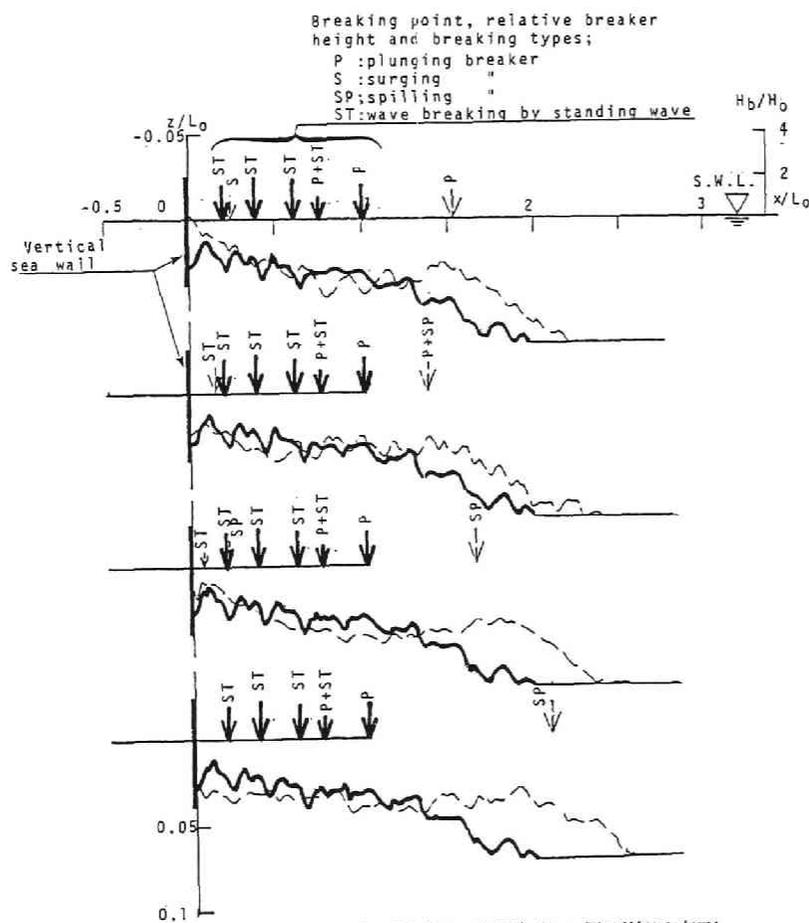
径縮尺の関係は、図-3.6によれば Run No SD2は擬相似、Run No SD3は相似ということになる。模型実験は、対象とした原型の場合と同様に、まず平衡海浜を形成させた後、所定の位置に鉛直堤防を設置して、再び同じ特性の波を5時間作用させた。

(2) 実験装置

実験は、図-2.1に示した造波水槽を使用し、Series Iの実験では写真-4.3に示した片側式仕切板法を使用し、ガラス側の水路で実験を行った。また、Series IIのRun No SD 2-1~SD 2-7では、Series Iと同じ実験装置と多重再反射軽減法を用いた。Run No SD3-1~SD3-7では、写真-4.2に示した両側仕切板と水平係留式可撓性フィルター法を組合せた方法を使用し、中央部の小水路で実験を行った。これらいずれの実験も、波の多重再反射の軽減効果は非常に良好であった。

(3) Series I における堤防前面の局所海浜変形

a) 実験結果



(b) 海岸堤防設置 (24時間) 後の局所海浜変形

および堤防前面の局所海浜変形の相似性

1例として、Run No SD3 M-1における実験結果を図-4.4に整理して示す。図-4.4(a)には、1/30初期海浜勾配に波を24時間作用させ、ほとんど平衡になった海浜形状と、砕波点および相対砕波高 H_b/H_0 が示してある。この平衡海浜の汀線に海岸堤防として鉛直壁を入れた後、再度同じ特性の波を継続して作用させ、平衡形状からの波の作用 $t = 0.5, 2, 10, 24$ 時間後の堤防前面における局所海浜変形および砕波特性の変化を図-4.4(b)~(e)に示す。

b) 相似性の比較

堤防を設置し、波の作用24時間後の堤防前面における局所海浜形状について、スケールの大き

い実験条件による実験結果を原型として、模型との相似性を比較照合する。例えば、図-4.5(a)では、Run No. SD3M-1を原型、Run No. SD3M-5 ($S = 1/1.1$)~Run No. SD3M-8 ($S = 1/4.4$)を模型として、堤防設置前の海浜形状が比較してある。この図から、Run No. SD3M-6および、SD3M-7は原型と相似であるが、これら以外は擬相似になっている。さらに、図-4.5(a)と左右対応している図-4.5(b)には、堤防の設置後、24時間波を作用させた後の局所海浜変形について、相似性を比較してある。この図から、Run No. SD3M-6およびSD3M-7は、堤防前

面の局所海浜変形がほとんど相似となっていることがわかる。このように、図-4.5(a)と(b)から、原型と模型で平衡海浜形状が相似になっている場合、海岸堤防の設置後も、堤防前面の局所海浜変形における洗掘深および洗掘形状に注目して、原型と模型の相似性を検討する。洗掘深は、図-4.6のように堤防設置による変化を Δz とし、洗掘形状つまり洗掘孔については、佐藤ら⁶⁾はその形状について分類を行っているが、本研究では次の3種類に大別する。

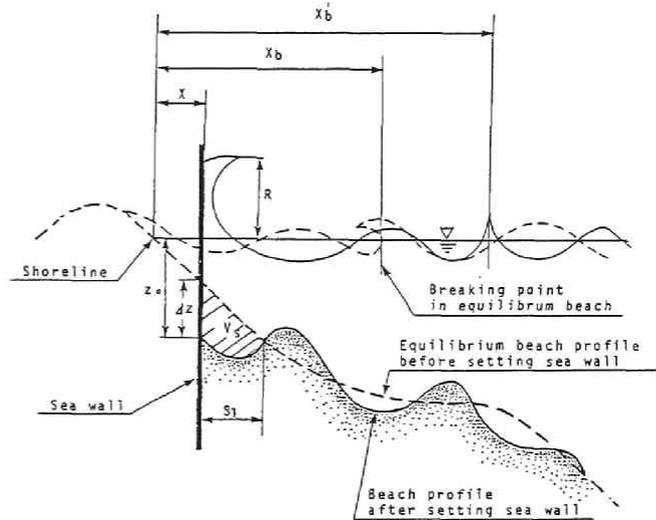


図-4.6 海岸堤防設置による各種特性の変化に関する定義図

タイプ①：堤防前面が鋭く掘られるV型洗掘。

タイプ②：堤防よりわずかに沖側で深く掘られているU型洗掘。

タイプ③：堤防より沖に向かって徐々に深くなる斜面、あるいは比較的広い一様水深部が存在する洗掘。さらに、タイプ①および②以外の洗掘もこれに含める。

Series Iの実験について、Run No. SD3M-1を原型、Run No. SD3M-5~SD3M-8を模型として、式(3.62)の海浜変形の時間縮尺に従って、横軸に作用させた波数 $t/T = (t/T)_p = (t/T)_m$ を取り、相対洗掘深 $\Delta z/H_0$ の変化が洗掘のタイプ①~③を区別して、図-4.7に整理してある。この図から、Run No. SD3M-1の原型に対して、Run No. SD3M-6、SD3M-7、およびSD3M-8の模型は、洗掘深の経時変化が相似になっている。また、洗掘のタイプについてもかなり良好な相似性がみられる。このように原型と模型の堤防前面の海浜変形および洗掘深の相似性について、実験誤差を考慮して照合判定した結果の1例を表-4.4に示す。特に、この表から、堤防設置前の平衡海浜形状が原型と模型で相似となる場合、堤防設置後の海浜形状および洗掘深も相似になることは極めて興味深い。

(4) Series IIにおける堤防前面の局所海浜変形

佐藤ら⁶⁾が大型造波水槽を用いて1/10の初期勾配に、波を15~20時間作用させた海岸堤防設置前の海浜形状(Run No. STI)を原型とし、これに対して著者がRun No. SD2 ($S = 1/2.2$)およびSD3 ($S = 1/6$)の実験条件で、1/10の初期浜勾配に波を24時間作用させた模型の海浜形状が、初期汀線

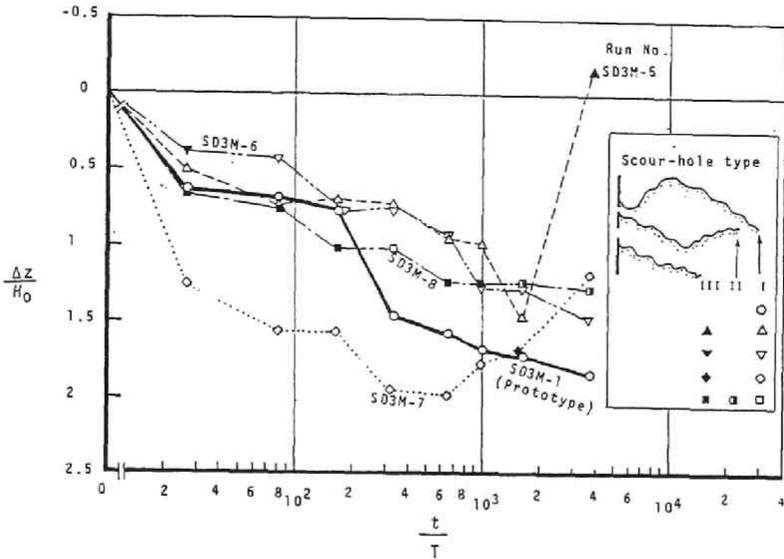


図-4.7 原型と模型の洗掘深および洗掘タイプの時間変化に関する相似性

表-4.4 堤防前面の局所海浜変形および洗掘の相似性

Series	Prototype (Run No.)	Model (Run No.)	Experimental scale 1/n	Sand grain size scale λ_d	Decision of similarity		
					Equilibrium beach profile	After set sea wall	
						Beach profile	Scour depth
I	SD3M-1	SD3M-5	1/1.1	1/2	△	◆	◆
		SD3M-6	1/2.2		○	○	○
		SD3M-7	1/3.3		○	○	○
		SD3M-8	1/4.4		○	△	○
II	[Sato et al. STI]	SD2	1/2.2	1/1.4	○	○	△
		SD3	1/6	1/2.3	△	○	○

○ : Similitude, △ : Quasi-similitude, ◆ : Dissimilitude

を原点にとって図-4.8に無次元表示し、比較してある。Run No. ST Iの実験による初期浜勾配と平衡海浜との関係がその論文中に明示されていないので、初期汀線が不明なため、著者がこれを推定して図示してある。この図から、原型とRun No. SD2の模型の海浜形状は相似、さらにRun No. SD3の模型は擬相似になっていることがわかる。さらに、Run No. SD2を原型とすれば、Run No. SD3は縮尺1/2.7模型となり、両者の海浜断面形状は相似になっている。この場合の縮尺の関係は、図-3.6の相似領域に入る。

Series IIの原型(Run No. ST I)と模型(Run No. SD2およびSD3)の堤防前面の海浜変形の比較が堤防の相対位置 $X/X_b = 0$ (汀線) および0.45の場合について、式(3.62)の海浜変形の時間縮尺を考慮して、 $(t/T)_p$ と $(t/T)_m$ の値が同程度になるものを図-4.9(a), (b)に示してある。これらの図が

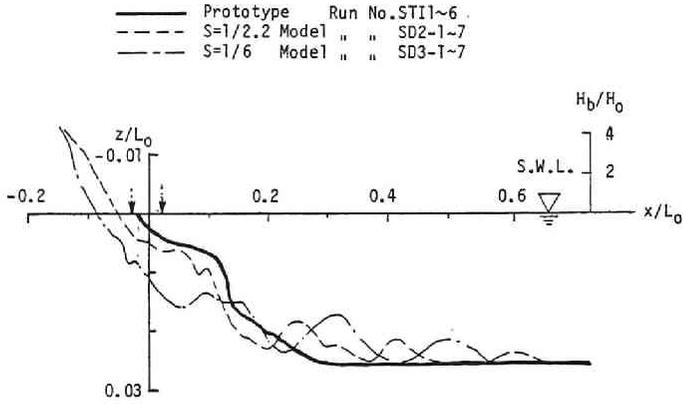


図-4.8 海岸堤防設置前の平衡海浜断面における相似性

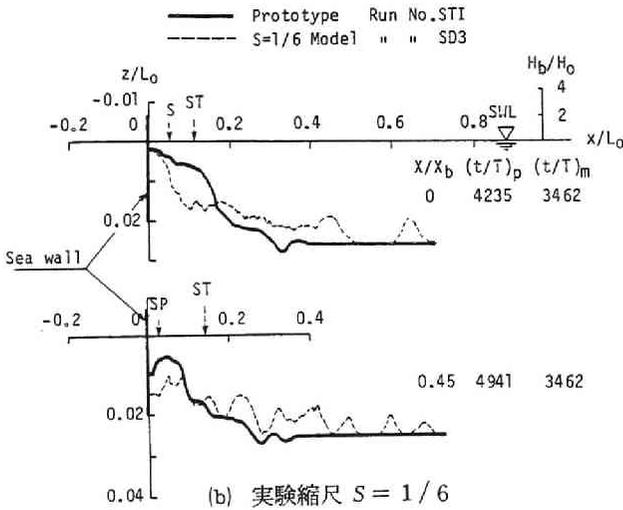
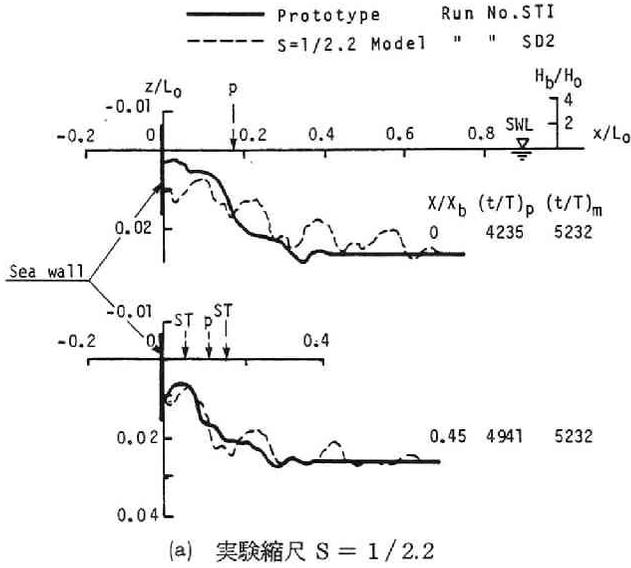


図-4.9 海岸堤防前の局所海浜変形の相似性

ら、堤防の設置位置によって多少の相違があるが、原型と模型で堤防前面の海浜変形が相似になっていることがわかる。さらに、原型と模型の洗掘深の時間的変化を図-4.10に示す。これから、特に $X/X_b = 0$ および 0.45 の場合、原型と模型 { Run No. SD2 ($S = 1/2.2$) および Run No. SD3 ($S = 1/6$) } で、洗掘深の時間的変化も相似になっていることがわかる。 $X/X_b = 0.8$ の場合には、原型に対して Run No. SD2 が擬相似、Run No. SD3 が相似になっている。定義図-4.6で示すように、堤防設置によって洗掘された単位奥行幅当りの土量 V_s と、沖波波長 L_0 との無次元土量 V_s/L_0^2 の経時変化が $X/X_b = 0.45$ の場合について整理し、相似性の比較が図-4.11に示してある。この図から、原型に対して2つの模型がだいたい相似になっていることがよくわかる。このことは、洗掘孔の時間的変化が相似になっていることを暗示するものであろう。

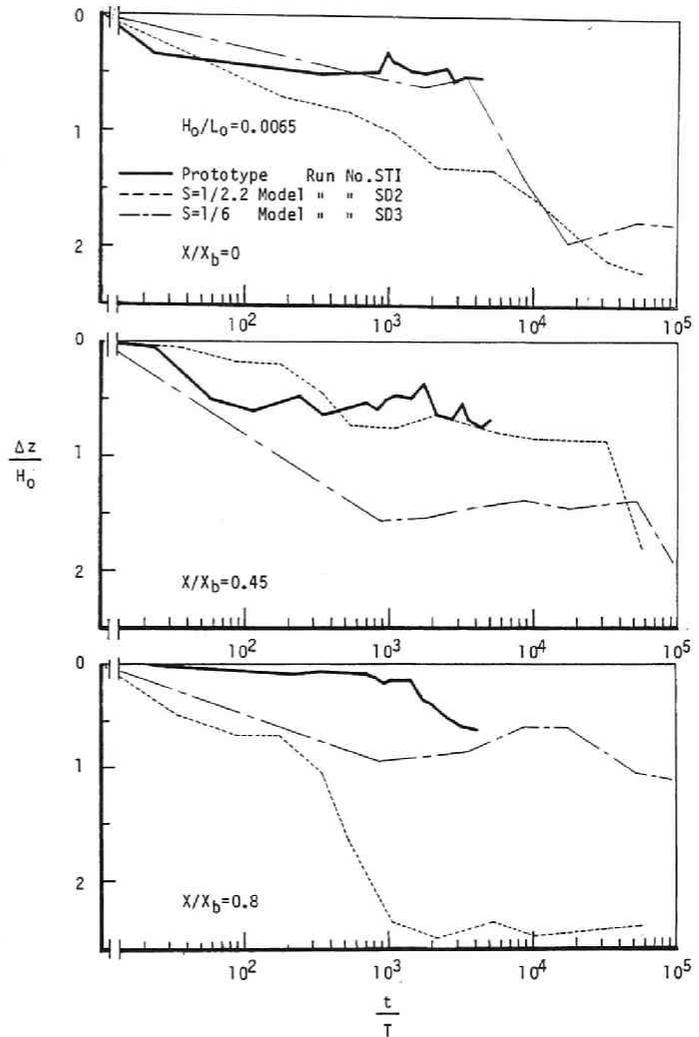


図-4.10 原型と模型の洗掘深の時間的変化における相似性

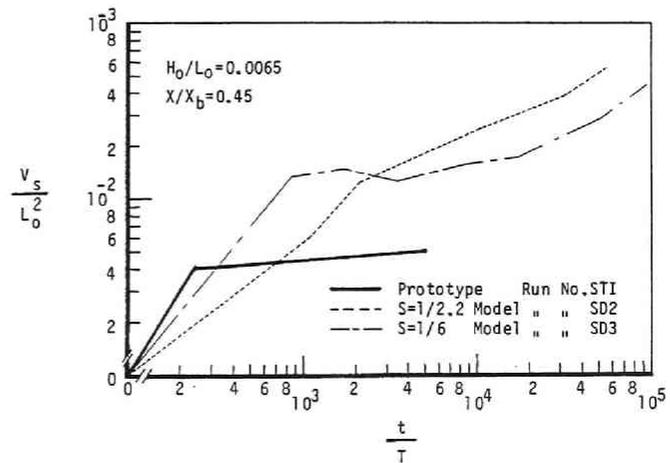


図-4.11 原型と模型の洗掘土量の時間的変化における相似性

以上、堤防設置後の局所的な海浜形状について、堤防の各位置について比較した結果がまとめて、表-4.4に示してある。この表から、原型と模型の堤防設置前の海浜形状の相似性と、堤防設置後における局所海浜変形のみならず、その洗掘深の相似性とが比較的良好に一致することは興味深い。

4.4 現地海岸堤防前面における局所海浜変形の模型実験¹⁹⁾

前節で明らかにしたように、平衡海浜に鉛直堤防を設置した場合に生じる堤防前面における局所海浜変形の相似関係は、著者らの海浜変形の相似則とよく一致する。また、堤防設置後、平衡海浜への移行過程についても Froude 則による時間縮尺が適用できることがわかった。本節では、現地の海岸堤防前面における局所海浜変形の二次元模型実験に、海浜変形の相似則および時間縮尺を適用してその検証を行うとともに、模型実験における代表波の取扱い方法を確かめる。

(1) 対象海岸の概要

図-4.12に示す遠州海岸の天竜川河口右岸側の測点 No. 146の海岸堤防前面における局所海浜変形を実験の対象にする。1978年1月～6月の間に、この地点へ来襲した波はスタジヤ式の観測記録によれば、低気圧および台風などの顕著な異常波浪はみられなく、図-4.13(a)に整理したように日有義波高 $H_{1/3}$ の99%までが1.8m以下である。参考までに翌年(1979年11月～6月)の観測結果も図中に入れてある。

また、長期間の記録によると、しけの場合は日有義波高 $H_{1/3} \approx 2 \sim 3$ m, 日有義波周期 $T_{1/3} = 8 \sim 10$ secである。また、年間を通じての卓越波は、屈折して海岸堤防に対してほとんど直角に入射しているこ

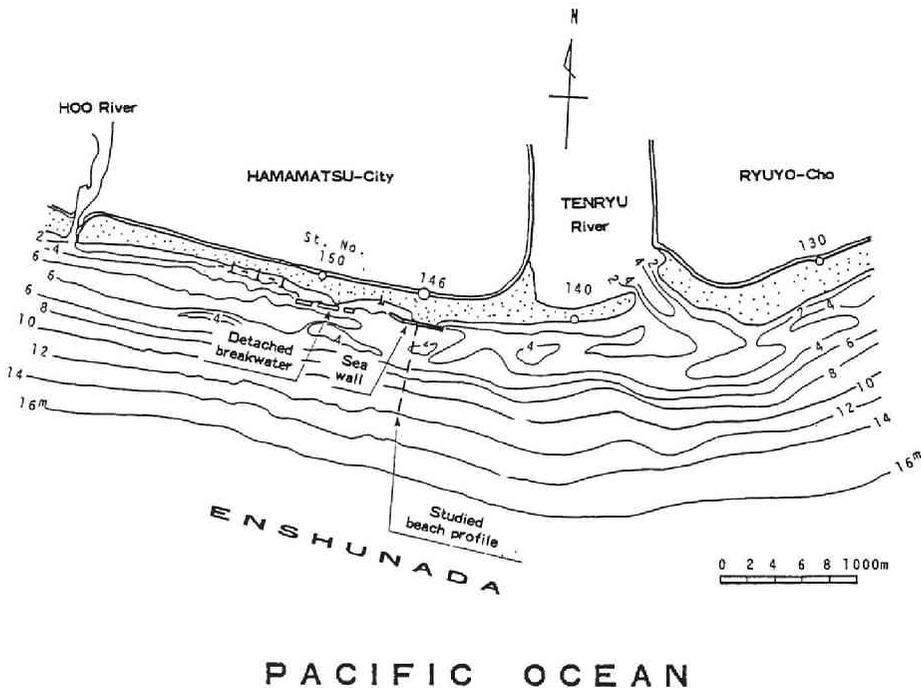


図-4.12 遠州海岸の海岸堤防の位置と実験対象地点

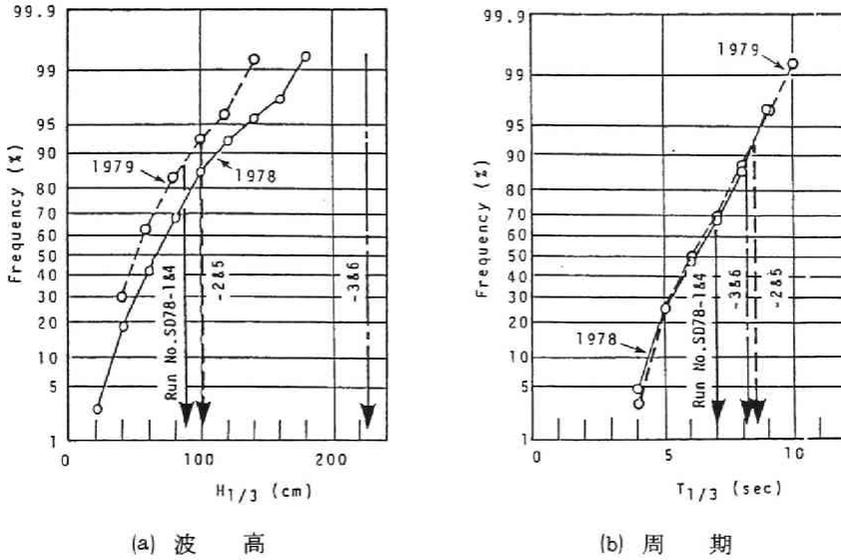


図-4.13 遠州海岸の有義波の確率分布と模型実験に使用する波との関係

とから、二次元性が比較的強い海岸堤防前面の海浜形状は平穏時の波に対応したものになっている。

(2) 実験方法

1978年7月～8月に測量した堤防前面から水深約12mまでの初期海浜断面形状を幾何学的に1/40に縮小し、二次元造波水槽内に移動床で作り、これより沖側は固定床にした。現地海岸の底質は、図-3.32から粒径 $(d)_p = 0.54_{-0.3}^{+1.36}$ mmの砂である。したがって、底質の粒径縮尺は、式(3.4)の海浜変形の相似則によると、 $\lambda_d = (d)_m / (d)_p = 1/3.6$ となるので移動床に用いる粒径は $(d)_m = 0.15_{-0.08}^{+0.38}$ mmとなる。結局、模型の底質として、 $(d_{50})_m = 0.15$ mmと $(d_{50})_m = 0.3$ mmの2種類の珪砂を用いることにした。実験の対象波としては、深浅測量実施前の6ヶ月間における入射波(日有義波)の確率分布図-4.13から、平穏時としけ時に相当する3種類の波を選出し、Froude則で1/40に縮小した。図-4.13には実験波(規則波)が現地波に換算して比較してある。なお、現地波の経年変化は図-3.35に示してある。海岸堤防の模型については、現地海岸堤防と同じ法面勾配(1/2勾配)とし、汀線に設置する。

以上のように定めた模型実験条件を一括して表-4.5に示す。以下では、これをSeries IIIの実験と称することにする。実験装置としては、図-2.1に示した造波水槽の中で、ガラス側の部分を使い、図-4.2に示した(f)の波の多重再反射軽減装置を設置した。

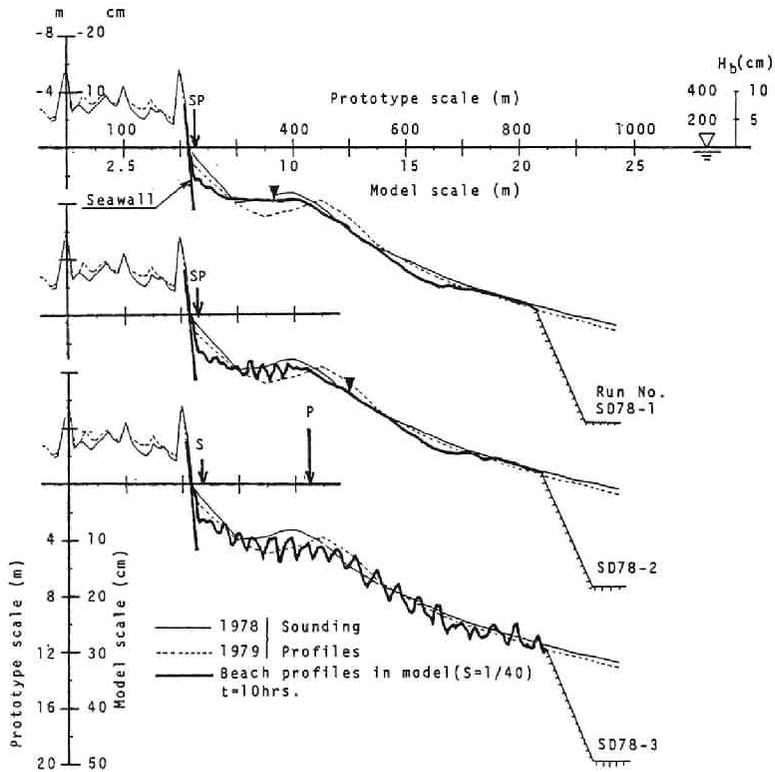
(3) 堤防前面における局所海浜変形の再現性

1978年の現地海浜形状を細い実線で、さらに翌年(1979年)のものを破線で示し、一方、模型の海浜形状を太い実線で示し、模型の底質粒径ごとに図-4.14(a)と(b)に分けて再現性の比較がしてある。模型実験において、沖側で初期形状からの変形が顕著になり始める位置が“▼”で図中に示してある。さらに、図中には、模型実験における碎波点の位置、碎波高、および碎波形式が示してある。この比較図から、底

表-4.5 遠州海岸堤防前面における局所海浜変形の模型実験条件 (Series III)

Scale	Run No.	d_{50} (mm)		H_0 (cm)		T (sec)		H_0 / L_0	h (cm)	Decision of similarity		
		Proto.	Model	Proto.	Model	Proto.	Model			Beach profile	Scour	
1/40	SD78 - 1		0.3	88	2.2	7.0	1.1	0.012	49	◆	◆	
	2		0.3	100	2.5	8.5	1.34	0.009		△	◆	
	3	+1.36	0.3	228	5.7	8.2	1.3	0.022		△	◆	
	4	0.54	-0.3	0.15	88	2.2	7.0	1.1		0.012	○	△
	5		0.15	100	2.5	8.5	1.34	0.009		○	○	
	6		0.15	228	5.7	8.2	1.3	0.022		◆	△	

○ : Similitude, △ : Qasi-similitude, ◆ : Dissimilitude



(a) Run No. SD78-1~3

図-4.14 遠州海岸堤防前面の局所海浜変形に関する模型実験の再現性 (つづく)

質が全体に移動するが初期形状からの変動が少い Run No. SD78-4 および SD78-5 は現地の再現性が良い（相似）といえる。一方、初期形状からの変形がほとんど無い（Run No. SD78-1 および SD78-2）か、反対に極端に著しい変形がある場合は、非相似とする。この模型実験は平穏時における現地海岸堤防前面の海浜形状を対象にしているので、Run No. SD78-3 および SD78-6 のようなしけ時の波を作用させると、初期形状から変動が著しくなることは当然であろう。

堤防前面における局所海浜変形、特に洗掘深 d_z の経時変化が、式 (3.62) の時間縮尺を考慮して図-4.15 に示してある。この図には、現地との比較ができるように、現地海岸堤防の堤脚水深、いわゆる洗掘水深が図中に一点鎖線で併示してある。なお、この Series III の実験では、汀線に堤防を設置したので、定義図-4.6 の洗掘深 d_z と洗掘水深 z_0 とは同じになる。図-4.15 からは、特に Run No. SD78-5 の（ほとんど定常状態になった）洗掘深は現地海岸の洗掘深をかなりよく再現していることがわかる。しかし、 $(d_{50})_m = 0.3 \text{ mm}$ の底質粒径を使用した Run No. SD78-1 ~ SD78-1 ~ SD78-3 の場合には、わずかであるが堆積の傾向を示し、再現性はあまり良くない。

以上、堤防前面における局所海浜変形について、模型実験で再現した結果を表-4.5 に一括して示す。

(4) 海浜変形の相似則との比較

前節で、Series I および II の実験のように、模型の縮尺範囲が比較的狭い $S = 1 \sim 1/6$ の場合、堤防

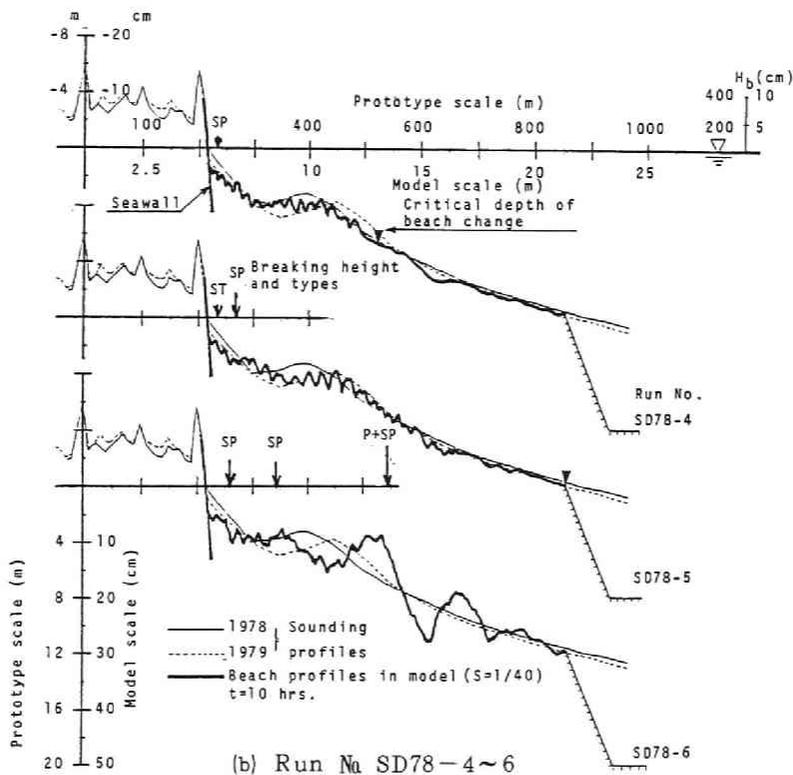


図-4.14 遠州海岸堤防前面の局所海浜変形に関する模型実験の再現性

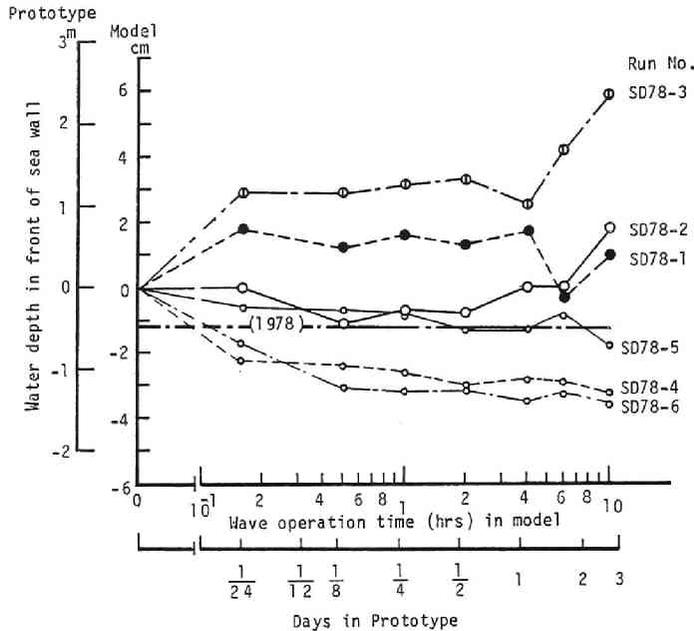


図-4.15 模型実験による堤防前面の洗掘水深の再現性。図中の一点鎖線は現地海岸における洗掘水深を表わす

前面における局所海浜変形の相似関係が図-3.6の海浜変形の相似則、式(3.4)および時間縮尺、式(3.62)とよく一致することが明らかになった。この結果を参考に、Series IIIの実験では現地海岸堤防前面における局所海浜変形を対象にした縮尺1/40の模型実験を行った。これらの堤防前面の海浜変形に関する一連の模型実験の再現結果の1部が堤防前面における局所海浜変形とその洗掘深に分けて、表-4.5に整理してある。図-3.6の海浜変形の相似則と、堤防前面における局所海浜変形および洗掘深の相似性とを比較をそれぞれ図-4.16(a)および(b)に示す。これらの図から、海浜変形の相似則が成立する領域では、海岸堤防設置に伴う局所海浜変形のみならず、その洗掘深の相似性が極めて良いことがわかる。したがって、海浜変形の相似則は堤防設置によるその前面における局所海浜変形のみならず、洗掘深の推定に関する模型実験にも十分適用できるであろう。

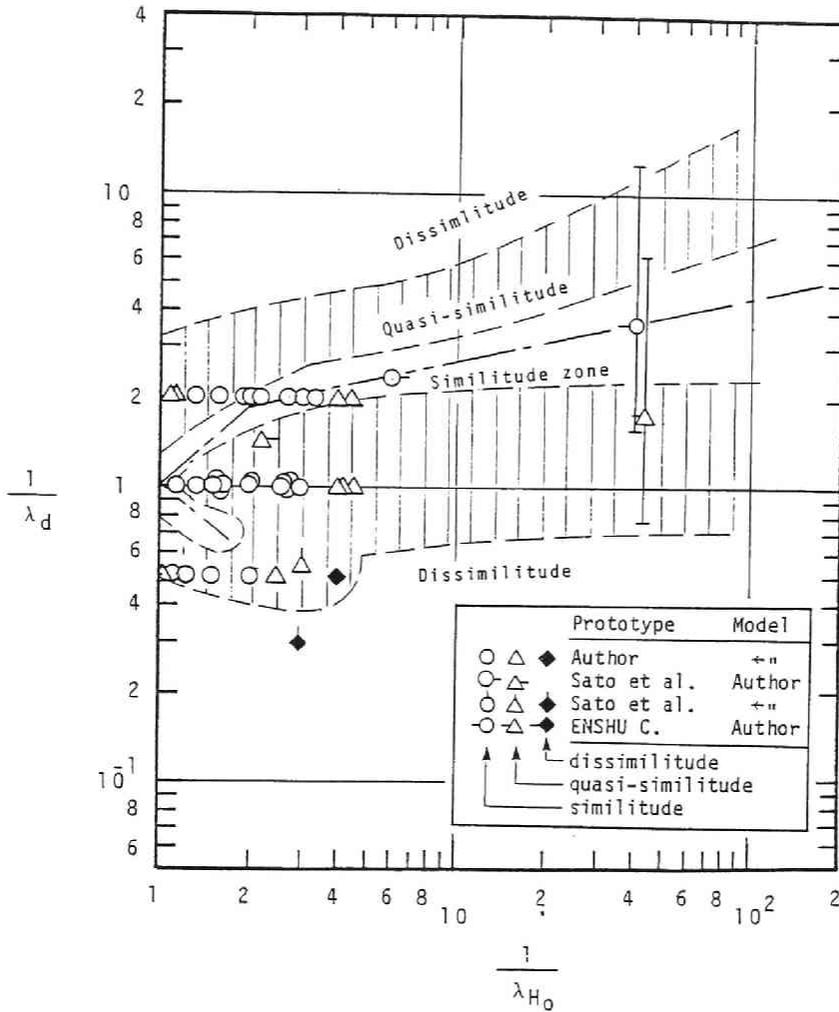
(5) 平面実験例

海岸堤防前面における局所海浜変形に関する模型実験に著者らの海浜変形の相似則および時間縮尺が十分適用できることを二次元実験で確かめたので、ここではさらに離岸堤およびヘッドランドなどの構造物による海浜変形の平面実験に、著者らの海浜変形の相似則および時間縮尺を準用して好結果を得た土屋・芝野・山下²⁰⁾(1982)および土屋ら²¹⁾(1985)の実験結果を簡単に紹介しておこう。

a) 片男波海岸の養浜工に関する実験的研究²⁰⁾

和歌山県・和歌川河口の片男波海岸の侵食防止のために設置された既設離岸堤の効果および隣接海域に計画されている各種の侵食対策工法を移動床水理実験に基づいて検討している。

この模型実験は、水平および鉛直縮尺を1/64の無歪とし、模型には中央粒径0.21mmの標準砂を用いて、1980年9月11日～12日に来襲した台風8013号を対象にし、潮位変化および入射波として有義



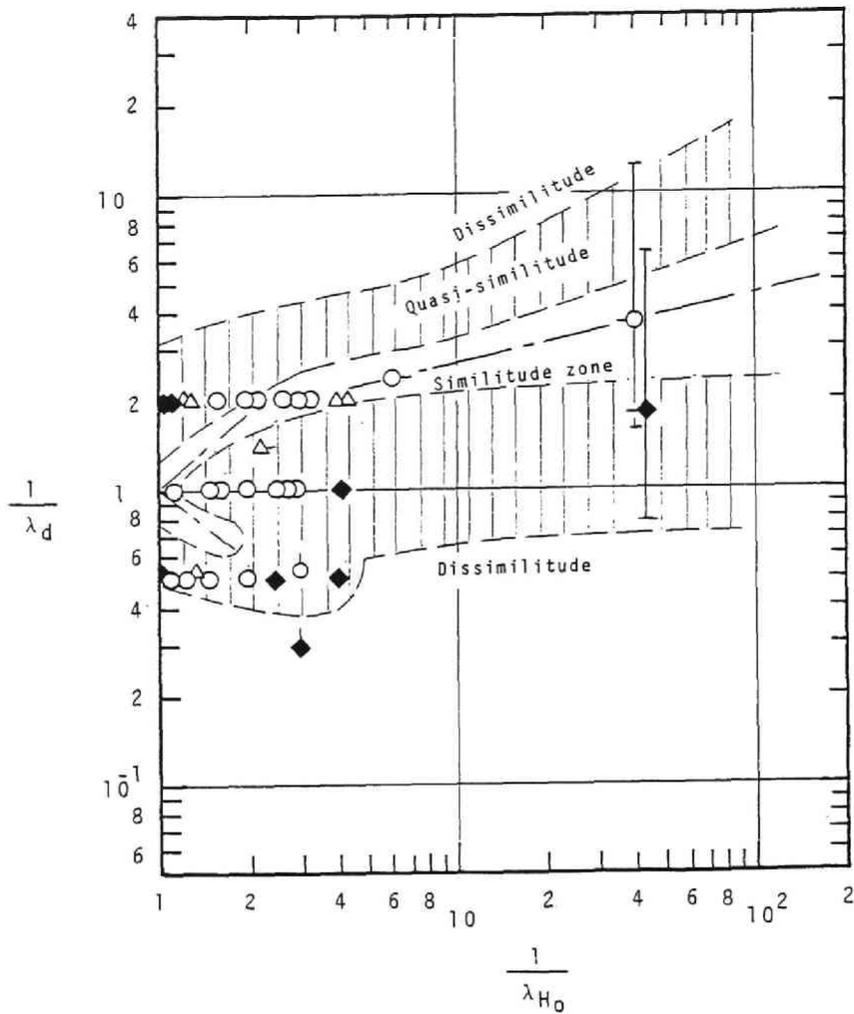
(a) 堤防前面の局所海浜変形

図-4.16 海岸堤防設置による局所海浜変形の相似性と
海浜変形の相似則との比較(つづく)

波を Froude 則に従って縮小してある。この模型実験の条件で、台風の前後における既設の離岸堤海域について、汀線、岸沖方向の海浜形状および離岸堤前面の洗掘に関する予備実験を行い、現地海岸の再現性を確かめている。このように、再現性を確認した上で、離岸堤、ヘッドランド、および養浜工について最適の組合せ工法を実験的に究明している。

b) 白良浜の海浜保全に関する実験的研究²¹⁾

観光で有名な和歌山県の白良浜は、近年背後地からの供給砂が減少して、侵食が目立ち始めてきた。その対策を土屋ら²¹⁾は水理模型実験に基づいて、白良浜の海浜過程およびその侵食制御法を検討している。



(b) 洗掘深

図-4.16 海岸堤防設置による局所海浜変形の相似性と海浜変形の相似則との比較

この模型実験は、水平および鉛直縮尺を1/64の無歪とし、現地海岸の底質粒径が0.3~0.5mmであるのに対して、横型の底質として中央粒径0.21mmの粒径が均一な豊浦標準砂を用いて、粒径縮尺 $\lambda_d = 1/1.5 \sim 1/2.5$ としている。この実験縮尺と粒径縮尺の関係を図-3.6の海浜変形の相似則と比較すると、両者は擬相似ないし相似になる。また、実験波としての波高、周期は現地海岸の有義波を対象にしてFroude則で定め、波の作用時間については式(3.62)のFroude則を用いている。実験条件については、現地の傾斜護岸工事の着工前後の海底地形の変化について、模型実験の再現性を確かめた上で、安定海浜工法と養浜工による最良の組合せおよび施工法を実験的に検討している。

以上のように、本研究で明らかにした海浜変形の相似則および時間縮尺を準用した平面実験で、海岸構造物の設置に伴う現地海浜変形の再現性が確認されたことは注目に値しよう。

4.5 海岸堤防前面における局所海浜変形、特に洗掘

堤防の設置および法面勾配が堤防前面における局所海浜変形、特に洗掘に及ぼす影響については、従来より多くの研究者によって検討されてきた。しかし、従来その相似則がほとんどわかっていなかったの

で、実験結果の現地海岸への適用においては多くの問題を残していた。前節で、海浜変形の相似則が堤防前面における局所海浜変形に対しても十分適用できることを実験的に明らかにしたので、実験結果の現地海岸への適用をある程度可能にしたと考えられる。そこで、

Series IIにおける正常海浜 ($H_0/L_0 = 0.0065$) の実験結果に、暴風海浜 ($H_0/L_0 = 0.035 \sim 0.05$) の実験を追加し、洗掘特性、海岸堤防の設置に伴う波の特性の変化、および洗掘特性と波の特性の関係について詳しく検討する。さらに、実験結果に基づいて海岸保全上の海岸堤防の設置位置、すなわち洗掘限界を定量的に表示し、現地海岸資料との対応性を調べる。

(1) 洗掘特性

a) 洗掘水深

平衡状態にある海浜に堤防を設置すると、多くの場合堤防前面は洗掘されるが、静水面から洗掘面までの深さは堤防の位置に左右される。そこで、堤防前面の平衡海浜断面形状を z/H_0 と x/X_b で無次元表示し、さらに堤防設置後の波の作用時間 ($t = 0 \sim 54$ hrs.) による相対洗掘水深 z_0/H_0 とを対応させ、両者の関連性を図-4.17 (a)および図-4.18 (a)に示す。

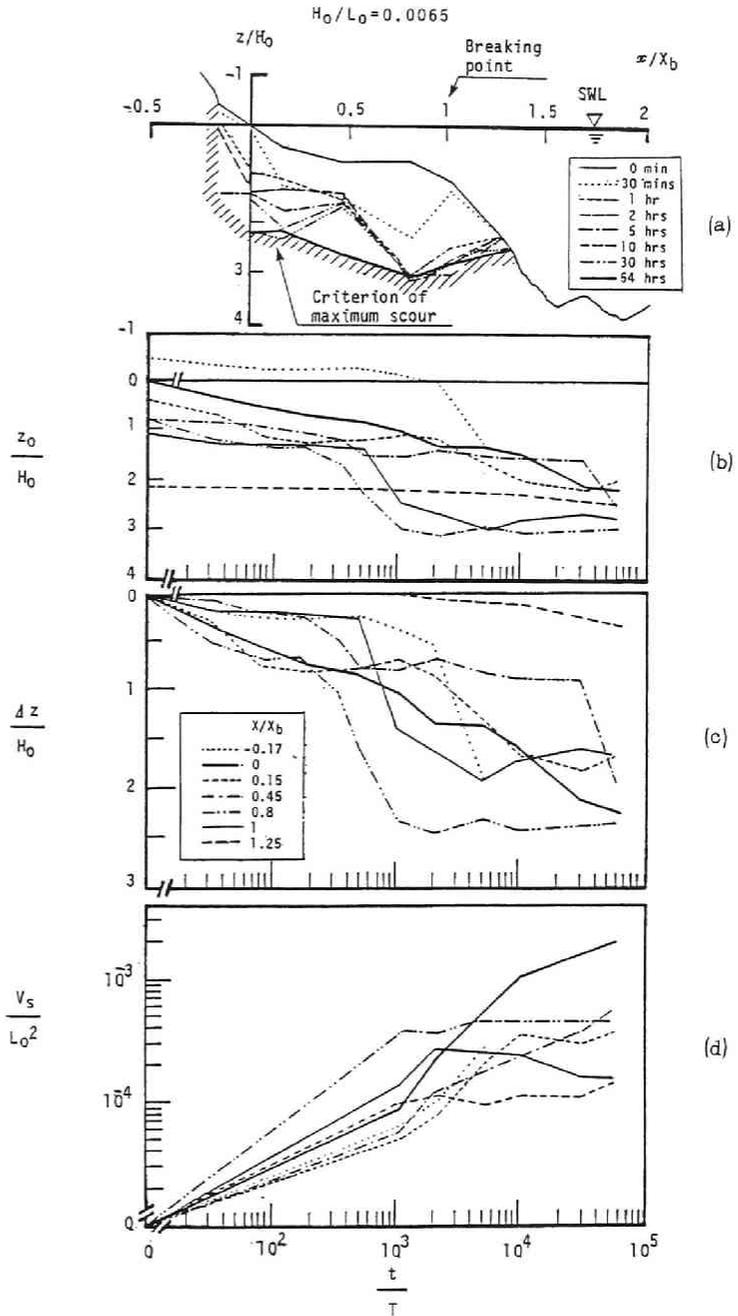


図-4.17 海岸堤防設置による諸量の変化。(a)最大洗掘水深と海浜断面との関係、(b)洗掘水深の時間的变化、(c)洗掘深の時間的变化、(d)洗掘土量の時間的变化

図-4.17(a)は、表-4.3のSeries IIのRun No. SD2-1~SD2-7の正常海浜($H_0/L_0 = 0.0065$)による実験結果である。また、図4.18(a)は、暴風海浜($H_0/L_0 = 0.033$)の実験結果である。これらの図中には、堤防設置前における平衡海浜断面形状と対応させて、堤防の設置位置を変えた場合の最大相対洗掘水深 z_{0max}/H_0 を図中の斜線で表わしてある。この斜線は、沖波波形勾配によって若干の違いがある。いま、 z_{0max}/H_0 と堤防の相対位置 X/X_b

との関係を沖波波形勾配で大別し整理すると、図-4.19のようになる。この図から、特に $H_0/L_0 = 0.0065$ のとき、堤防の位置に関係なく z_{0max}/H_0 はほとんど一定である。しかし、 $H_0/L_0 = 0.033$ では、堤防が沖方向に移動するにつれて z_{0max}/H_0 が徐々に深くなっている。このことは、

次に述べる堤防の各位置 ($X/X_b = -0.17 \sim 1.25$) における相対洗掘水深 z_0/H_0 の経時変化を表わす図-4.17(b)で示されるように、時間の経過に伴って z_0/H_0 の値が一定値に近づくことからわかる。図-4.17および4.18の(b)図は、相対洗掘水深 z_0/H_0 、(c)は相対洗掘深 $\Delta z/H_0$ 、および(d)図は無次元洗掘土量 V_s/L_0^2 の経時変化をそれぞれ表わす。相対洗掘 $\Delta z/H_0$ の経時変化は、図-4.17および4.18の(c)図から、堤防の設置位置によってかなり異なる。また、単位幅当りの洗掘土量 V_s/L_0^2 の経時変化については図-4.17および4.18の(d)図から、 $t/T \leq 1000$ ではほとんど一定の割合で洗掘土量が変化することがわかる。

b) 洗掘幅

図-4.6で示すように洗掘幅は、

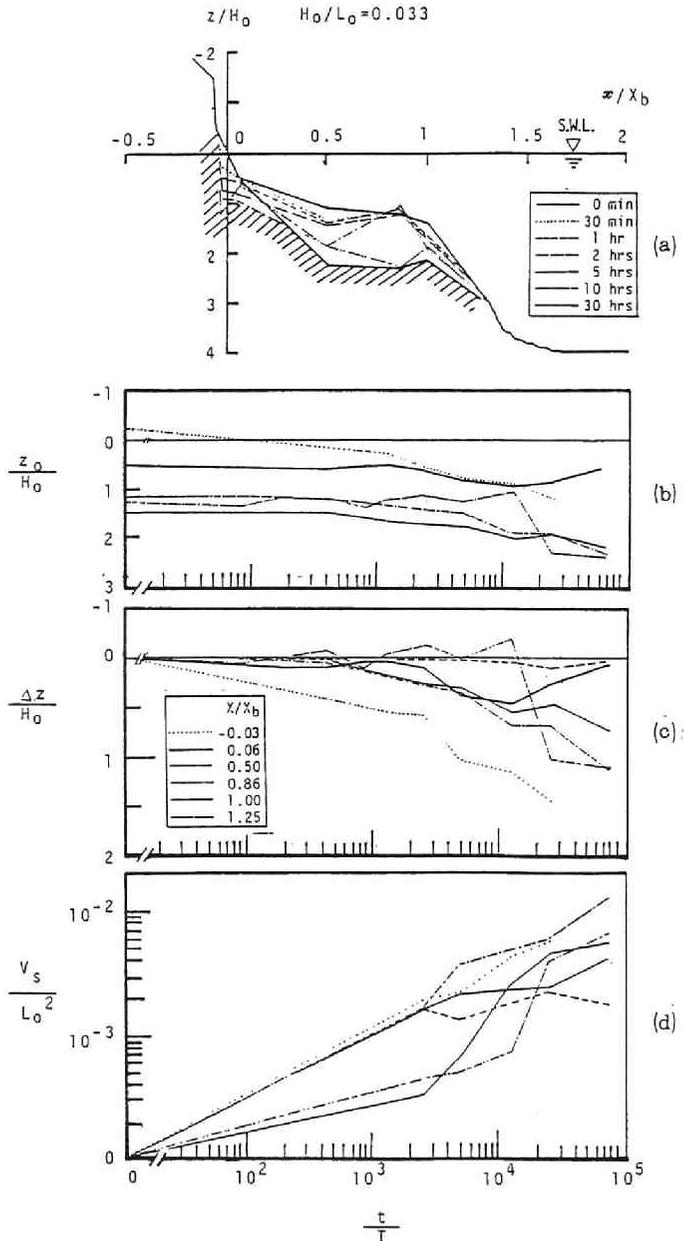


図-4.18 海岸堤防設置による諸量の変化。(a)最大洗掘水深と海浜断面との関係、(b)洗掘水深の時間的变化、(c)洗掘深の時間的变化、(d)洗掘土量の時間的变化。

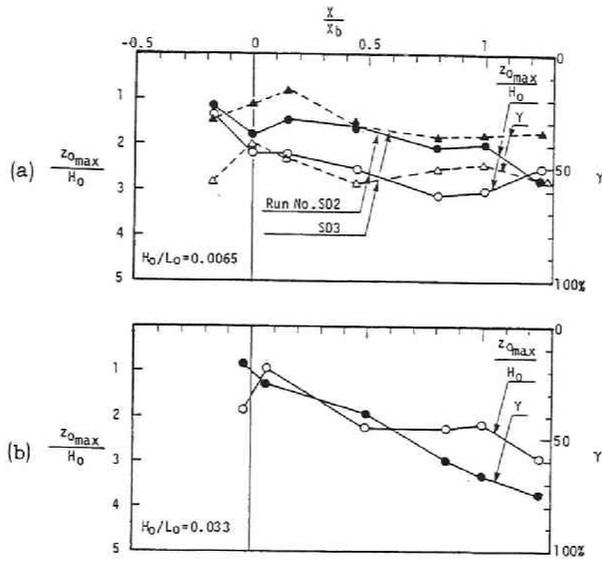
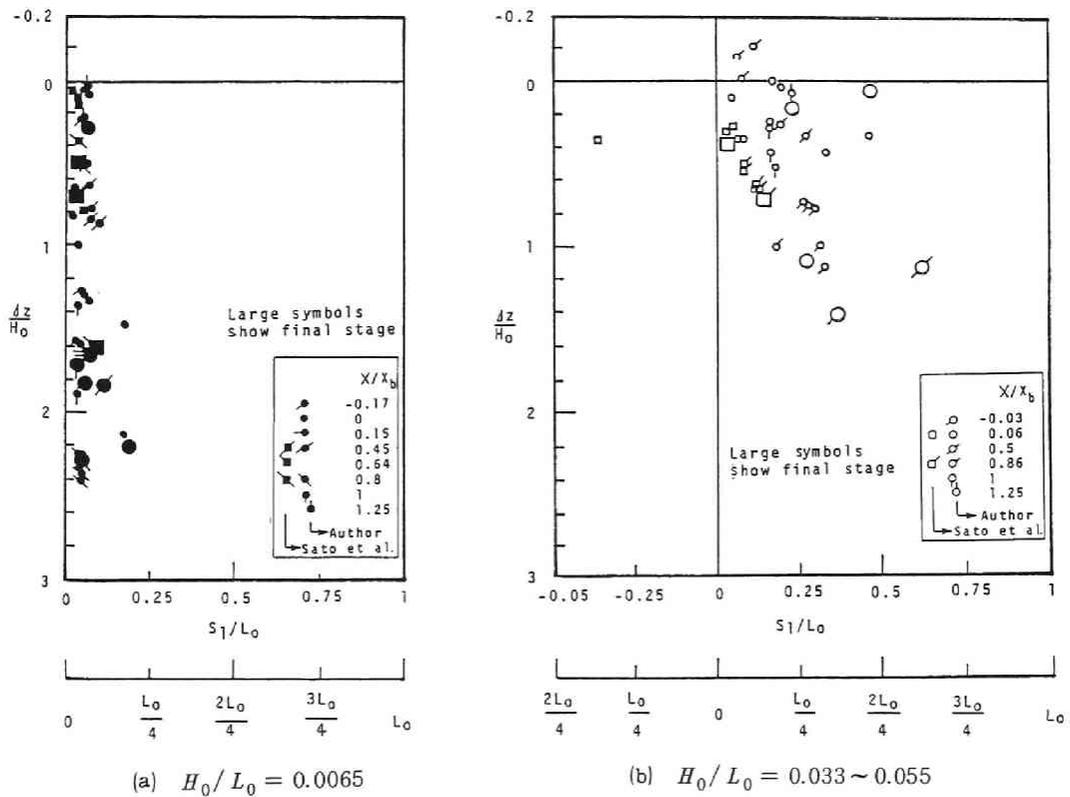


図-4.19 堤防の設置位置，最大洗掘水深および波の反射率との関係



(a) $H_0/L_0 = 0.0065$

(b) $H_0/L_0 = 0.033 \sim 0.055$

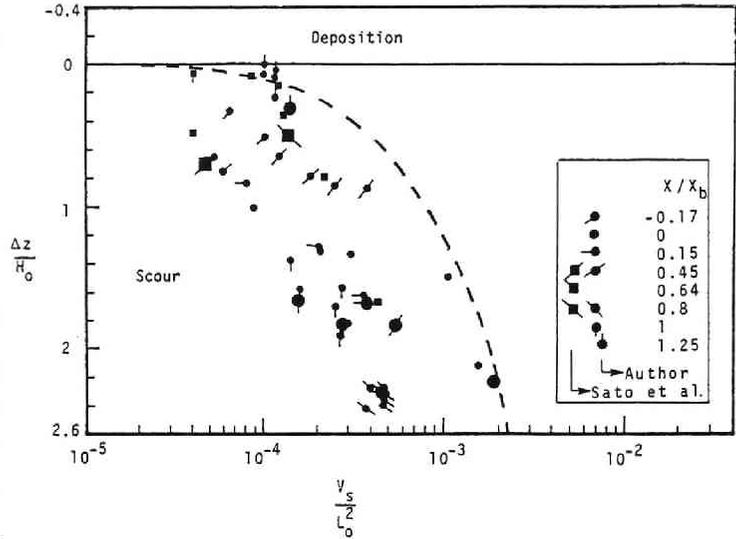
図-4.20 洗掘幅と洗掘深との関係

洗掘防止の目的で設置される根固め工の幅を検討する上で、非常に重要である。堤防の各位置における無次元洗掘幅 S_ℓ/L_0 と洗掘深 $\Delta z/H_0$ との関係を図-4.20に整理した。この図では、堤防の設置によって、その前面に堆積が生じた場合、堆積厚（負の洗掘深）を負の値とし、さらに堤防が汀線より陸側にあつて洗掘が生じて洗掘面が静水面より上にある場合、洗掘幅を負として表示し、さらに実験の最終値（ほとんど平衡状態）は印を大きくして区別できるようにしてある。これらの図から、洗掘幅は沖波波形勾配によってかなり違うことがわかる。つまり、 $H_0/L_0 = 0.0065$ の場合には、洗掘深 $\Delta z/H_0$ に関係なく洗掘幅は $S_\ell/L_0 \leq L_0/4$ であるが、 $H_0/L_0 = 0.033 \sim 0.055$ になると、洗掘幅洗掘深に伴って広くなり、 $S_\ell/L_0 \approx L_0/2$ に漸近して行くことがわかる。この原因に関する検討は省略するが、堤防洗面に沿って落下する wall jet や堤防前面に発生する部分重複波の影響が指摘されよう。

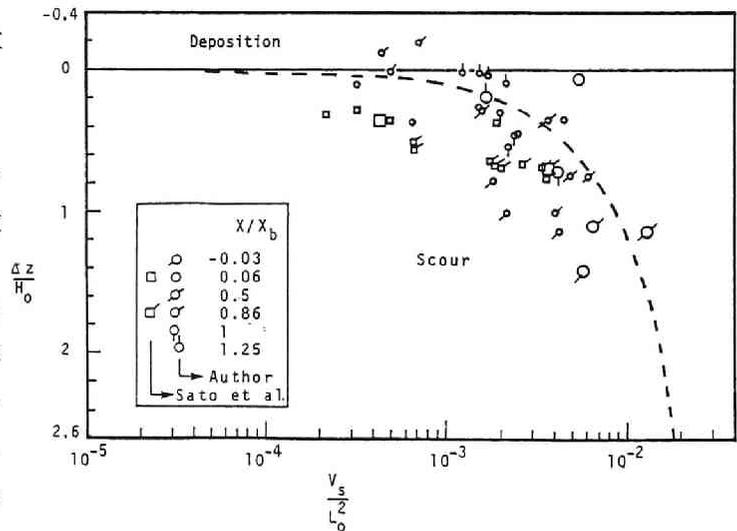
c) 洗掘土量

堤防設置により洗掘される単位幅当りの無次元洗掘土量 V_s/L_0^2 （図-4.6 参照）と相対洗掘 $\Delta z/H_0$ との関係が、最終の実験値の印を大きくして、図-4.21に沖波波形勾配で分けて整理してある。これらの図から、洗掘深とともに洗掘土量も増加し、沖波波形勾配が $H_0/L_0 = 0.033 \sim 0.055$ の場合には、 $H_0/L_0 = 0.0065$ における V_s/L_0^2 の値より 1 オーダ多くなっている。

いま、洗掘孔の断面を図-4.22のような三角形 V'_s で近似すると、



(a) $H_0/L_0 = 0.0065$



(b) $H_0/L_0 = 0.033 \sim 0.055$

図-4.21 洗掘土量と洗掘深との関係

単位幅当りの洗掘土量 V'_s は次式で表わせる。

$$V'_s = \frac{1}{2} \Delta z \cdot S_\ell \quad (4.6)$$

さらに、次式のように無次元表示される。

$$\begin{aligned} \frac{V'_s}{L_0^2} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta z}{L_0} \right) \left(\frac{S_\ell}{L_0} \right) \\ &= \frac{1}{2} \left(\frac{H_0}{L_0} \right) \left(\frac{\Delta z}{H_0} \right) \left(\frac{S_\ell}{L_0} \right) \end{aligned} \quad (4.7)$$

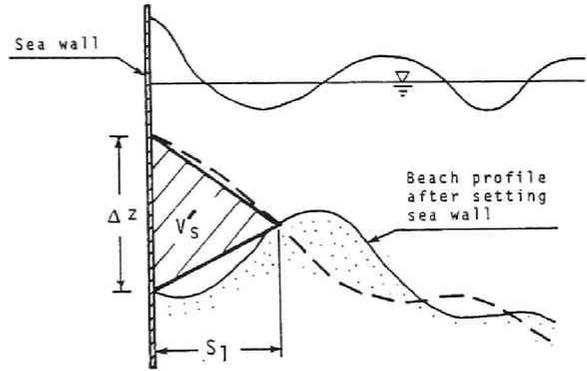


図-4.22 洗掘土量モデル

図-4.20 で示したように、洗掘幅の上限は沖波波形によって、ほとんど一定値 ($H_0/L_0 = 0.0065$)

で $S_\ell \lesssim L_0/4$ 、また $H_0/L_0 = 0.033 \sim 0.055$ では、 $S_\ell \lesssim L_0/2$ となるので、これらを式(4.7)に入れて得られる関係が図-4.21 (a)および(b)に破線で示してある。このように、洗掘土量を簡単なモデル式(4.7)で表わすと、実験結果と傾向が比較的よく一致することがわかる。

(2) 海岸堤防設置による波の特性の変化

平衡海浜の波の遡上点より海側に堤防を設置すると、堤防前面には急激な局所海浜変形が起ると同時に洗掘も生じる場合が少なくない。そのために、波の反射率、砕波点の位置、および波の打上げ高さがどのような影響を受けるかを詳しく検討する。

a) 波の反射率

堤防設置に伴う波の反射率の変化については、従来、野田ら^{22),23)}が若干の検討を加えているが、さらに本実験結果を追加して検討する。平衡海浜に堤防設置後、波を54時間作用させ、この間について Healy の方法で求めた波の反射率 r と、堤防設置前の平衡海浜の反射率 r_e との比、相対的反射率 r/r_e と堤防の位置 X/X_b との関係が図-4.23 に示してある。図中の線は、堤防設置後の波の作用時間 $t = 0 \sim 54$ hrs. の間の

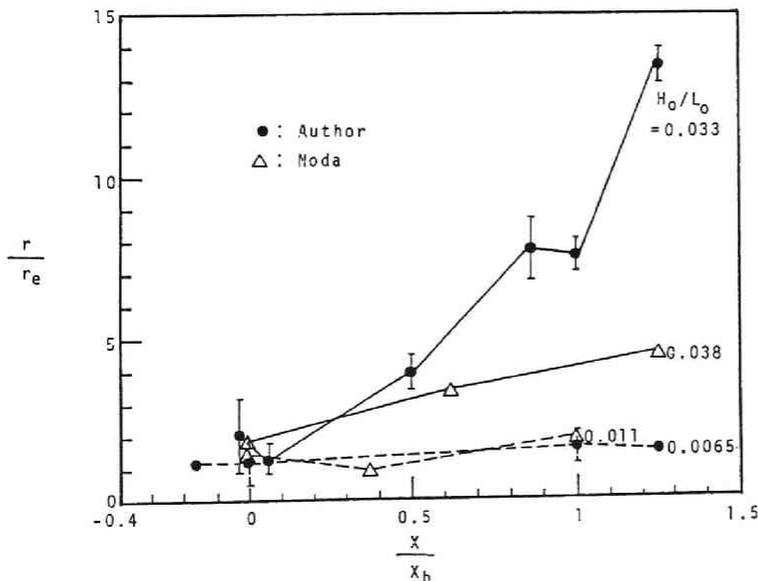


図-4.23 堤防設置位置による相対的反射率 (r/r_e) の変化。 r_e は無堤防時の平衡海浜における反射率

平均値を示している。沖波波形勾配が小さい ($H_0/L_0 = 0.0065$) 場合、堤防が岸から沖方向に移動しても r/τ_e の値はそれほど変化しないが、沖波波形勾配が大きく ($H_0/L_0 = 0.033$ および 0.038) となると、堤防の沖方向への移動に伴って反射率が大きくなっている。波の反射率と最大相対洗掘水深 z_{0max}/H_0 との関連性を調べるために、図-4.19に最大相対洗掘水深が発生したときの波の反射率と比較してある。この図から、堤防の岸から沖への移動に伴って、 $H_0/L_0 = 0.065$ の場合、 z_{0max}/H_0 および r の変化はほとんど一定であるが、 $H_0/L_0 = 0.035$ の場合には両者とも徐々に増加するといった傾向を示すことが興味深い。

b) 砕波点

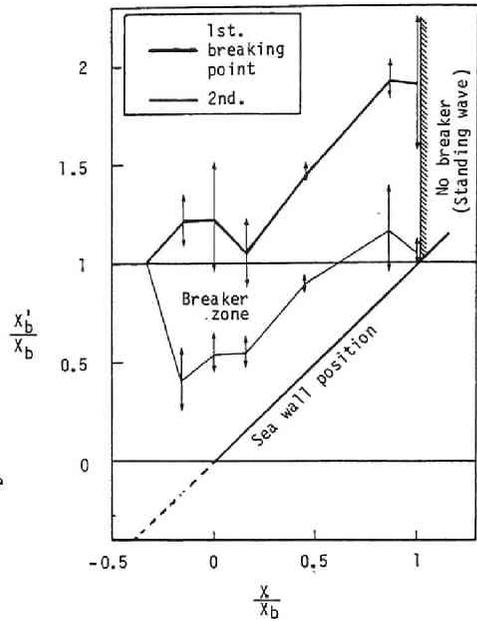
図-4.6で定義したように、堤防設置後の砕波点 X'_b と堤防を設置する前の平衡海浜における砕波点 X_b との比と、堤防の相対位置 X/X_b との関係が、図-4.24に沖波波形勾配で分けて整理してある。この図では、堤防の位置は $X'_b/X_b = X/X_b$ の関係で表わされるので、これが図中に示してある。また、沖側の第1砕波点と堤防近くの最終砕波点はばらつきの平均値で表わし、そのばらつきの幅が \uparrow 印で示してあり、第1砕波点と最終砕波点で囲まれる範囲は砕波帯を表わしている。

これから、沖波波形勾配の小さい ($H_0/L_0 = 0.0065$) の場合、堤防を設置すると、第1砕波点は沖方向へ移動するが、沖波波形勾配が大きい ($H_0/L_0 = 0.033$) 場合にはこのような移動が起らない。また、堤防直前の最終砕波点は、いずれの場合も入射波と堤防からの反射波による部分重複波で砕波するため、堤防からある一定の距離で砕波する。

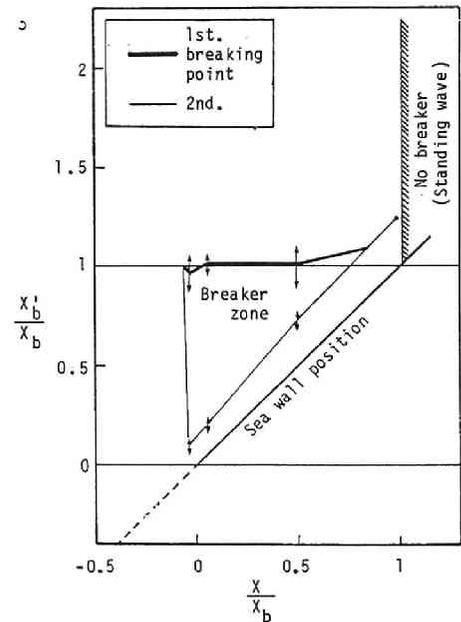
c) 波の打上げ高

波の打上げ高さについては、固定床による実験的研究が数多く行われ、いくつかの事実が明らかにされているが、移動床を用いた堤防前面の局所海浜変形および洗掘が波の打上げ高さに及ぼす影響はほとんど調べられていない。

図-4.25には、移動床の場合について、堤防設置後の各波の作用時間における相対的波の打上げ高さ R/H_0 と堤防の相対位置 X/X_b との関係が沖波波形勾配で分けて示して



(a) $H_0/L_0 = 0.0065$ (Run No SD2)



(b) $H_0/L_0 = 0.033$

図-4.24 堤防設置による砕波点の移動

ある。この図中には、波の作用時間によるばらつきの最大と最小が破線で包絡してある。図-4.25 (a)と(b)から、堤防を碎波点に置いたときに R/H_0 が最大になることがわかる。また、比較のために、高田²⁴⁾による固定床の実験値を $1/3$ 倍 ($R_0/H_0 \times 1/3$) した関係が一点鎖線で併示してある。このように、移動床の場合の波の打上げ高は堤防の位置による影響を強く受け、碎波点に堤防があると最も高くなり、この傾向は固定床による結果と類似しているが、波の打上げ高は固定床による結果の $1/3$ になっている。

(3) 洗掘特性と波の特性との関係

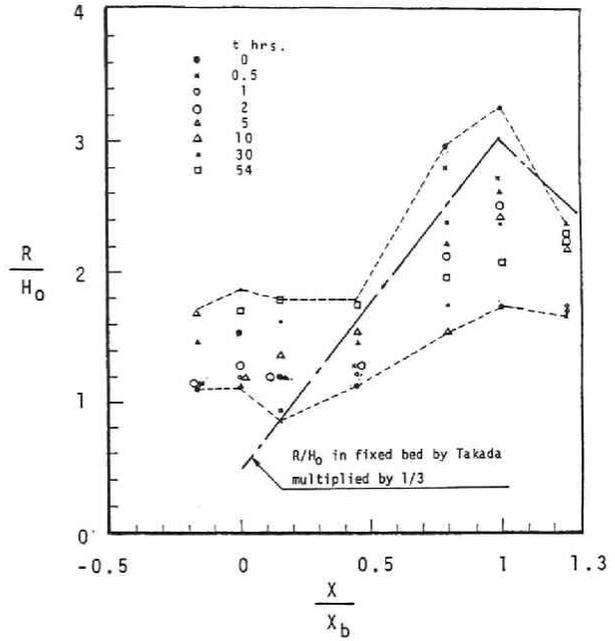
洗掘特性と波の特性との関係については、従来、佐藤ら⁶⁾が最大洗掘深と波の打上げ高さ、さらに樫木²⁵⁾が洗掘深と波の反射について考察を加えている。ここでは、洗掘特性として相対洗掘水深 z_0/H_0 を取り上げ、波の打上げ高 R/H_0 および波の反射率との関係について検討する。

a) 洗掘水深と波の打上げ高

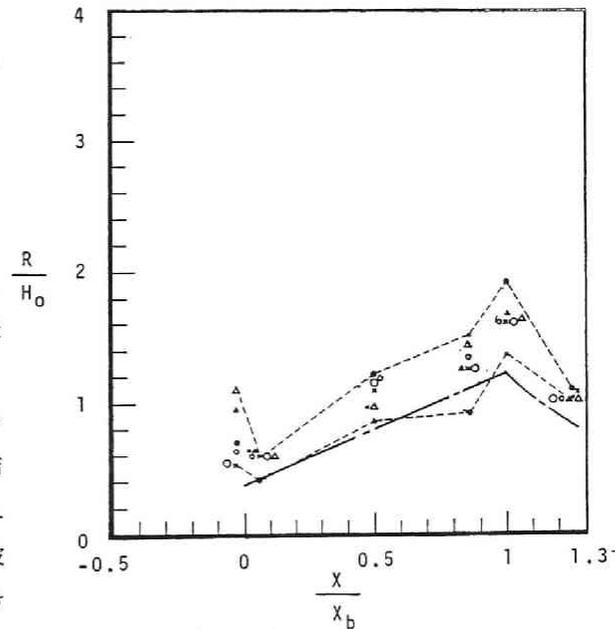
相対洗掘水深 z_0/H_0 と波の打上げ高 R/H_0 との関係が、平衡海浜に堤防を設置した直後の値を“●”印で、最終結果 ($t = 54$ hrs.) を印を大きくして、図-4.26 に整理してある。この図中には、固定床を用いた実験結果²⁶⁾を破線で示し、比較してある。図-4.26 (a)および(b)から、波の打上げ高は沖波波形勾配が大きい方が低くなり、移動床における波の打上げ高は固定床のように特定の洗掘水深(堤脚水深)でピーク値を示すことができなく、全体に平滑的になっている。

b) 洗掘水深と波の反射率

相対洗掘水深 z_0/H_0 と波の反射率 r との関係について、洗掘孔が静水面より上にある場合を負として、堤防設置直後および最終結果を区別して図

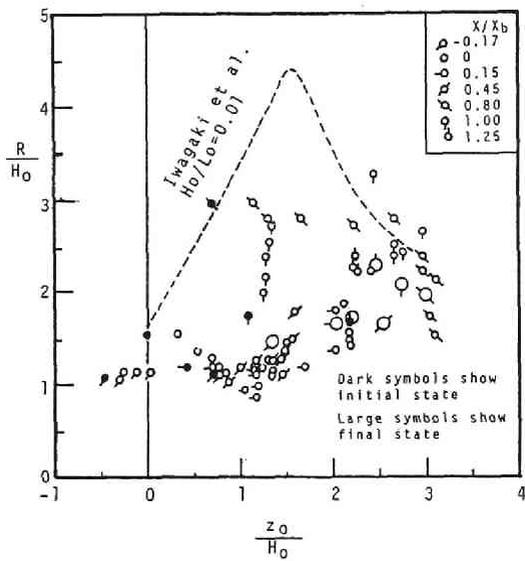


(a) $H_0/L_0 = 0.0065$

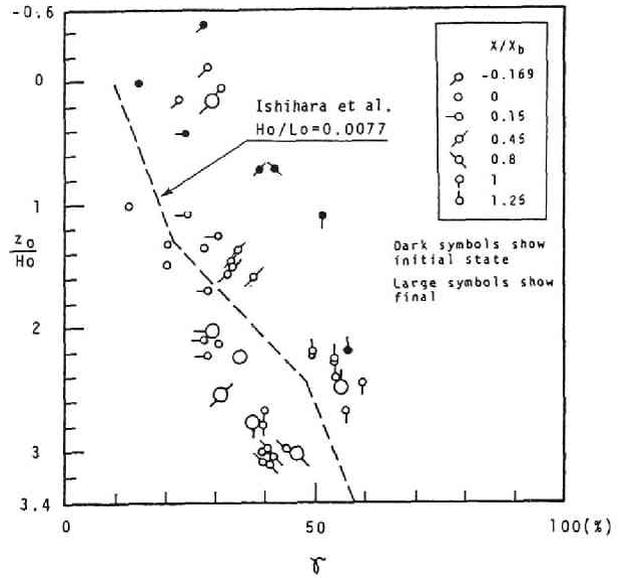


(b) $H_0/L_0 = 0.033$

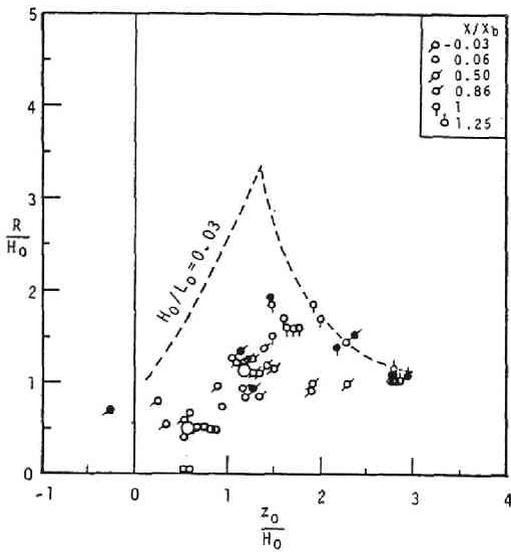
図-4.25 移動床における海岸堤防(鉛直壁)への波の打上げ高さ。図中の一点鎖線は固定床における波の打上げ高さを $1/3$ 倍してある



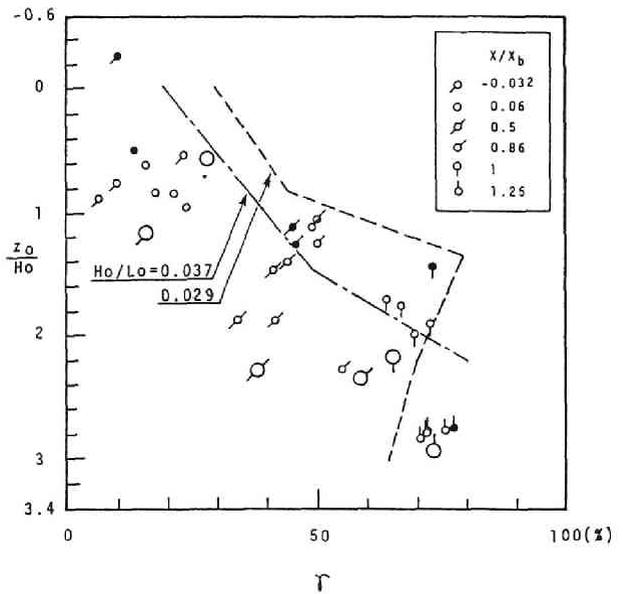
(a) $H_0/L_0 = 0.0065$



(a) $H_0/L_0 = 0.0065$



(b) $H_0/L_0 = 0.033$



(b) $H_0/L_0 = 0.033$

図-4.26 洗掘水深と波の打上げ高さの関係

図-4.27 洗掘水深と波の反射率との関係

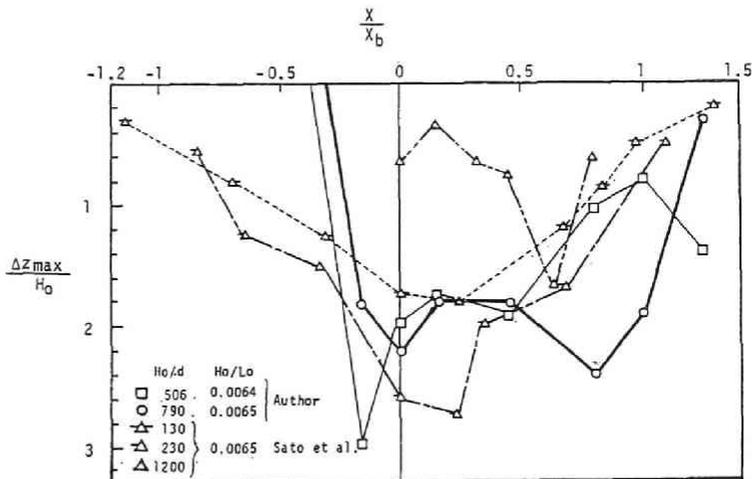
—4.27に整理してある。これから、図—4.19と同様、反射率が大きくなるにつれて洗掘水深も大きくなり、両者は比較的よく対応する。また、石原ら²⁷⁾が行った固定床の実験結果が図中に破線および一点鎖線で併し、比較してある。この図から、沖波波形勾配によって多小の違いがみられるが、洗掘水深が深くなるにつれて波の反射率も大きくなり、固定床と同じような傾向を示すことがわかる。

4.6 海岸堤防の洗掘限界²⁸⁾

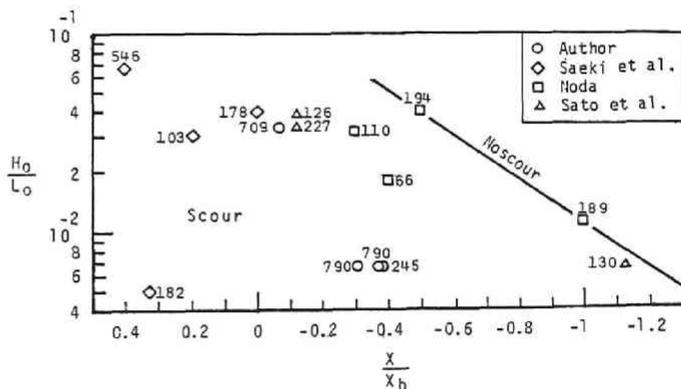
(1) 洗掘限界

佐藤ら⁶⁾、野田および佐伯ら⁸⁾は、海岸堤防を設置した場合の局所海浜変形、特に洗掘に関する実験を行い、最大相対洗掘水深 $\Delta z_{\max}/H_0$ と堤防の相対位置 X/X_b で整理し、堤防の設置位置を岸沖方向に移動させると、 $\Delta z_{\max}/H_0$ が堤防の位置によってかなり変化することを見出している。佐藤らの実験に、著者の実験結果 (Run No. SD2 および SD3) を追加し、 $\Delta z_{\max}/H_0$ (洗掘: +) と X/X_b の関係で再整理したものが、図—4.28に示してある。この図から波の遡上が堤防まで達しない位置に堤防があるときには、洗掘が生じないが、堤防が汀線に近づくにつれて洗掘が発生していることがわかる。この最大相対洗掘水深 $\Delta z_{\max}/H_0$ は、堤防を設置してから平衡状態に達するまでの間における洗掘水深の最大値である。

堤防の位置を後浜から汀線へ、さらに沖浜へ移動させた場合、最大洗掘水深 $\Delta z_{\max}/H_0 = 0 \sim 0.2$ となる堤防の位置 (X/X_b) を図—4.28 および他の実験資料から求め、汀線より陸側を負として、沖波波形勾配との関係で図—4.29に示してある。この図中の数字は H_0/d 値を表わし、従来、報告された他の研究者の実験結果も含めてある。ただし、佐伯ら⁸⁾の実験は、平衡海浜上に堤防を設置したものでなく、一様な初期勾配に堤防を設置したものである。そのため、その傾向が他の実験結果とはやや異



図—4.28 堤防の設置位置と最大相対洗掘深の関係



図—4.29 堤防前面に洗掘が発生する位置と沖波波形勾配との関係。図中の値は波高粒径比 (H_0/d) を表わす

なっている。

図-4.29 から堤防の位置が汀線にある程度近づくと、洗掘 ($\Delta z_{\max}/H_0 \geq 0 \sim 0.2$) が起ることがわかる。この図からは、実験資料が十分ないので、波高粒径比 H_0/d の影響を検討することができない。この図には、実験資料のばらつきの最大傾向を包含する線が示してある。この線より堤防が沖側へ移動 (図中に示した実線より左側) すると、堤防前面に洗掘が発生することから、これを堤防の洗掘限界とする。図中の洗掘限界は、堤防の相対的位置と沖波波形勾配との関係で次のように表わされる。

$$\frac{X_D}{X_b} = 0.885 \left(\log_{10} \frac{H_0}{L_0} + 0.835 \right), \quad \frac{H_0}{L_0} \lesssim 0.05 \quad (4.8)$$

この式では、堤防の洗掘限界の位置 X_D が碎波点の位置 X_b との相対比で表わされているので、次に、沖波の特性で表わすことを考える。

米国の Shore Protection Manual²⁹⁾ で引用している Munk の孤立波理論に基づく碎波指標の関係式は、次式で表わされる。

$$\frac{H_b}{H_0} = \frac{1}{3.3 \sqrt[3]{H_0/L_0}} \quad (4.9)$$

$$\frac{h_b}{H_0} = 1.28 \quad (4.10)$$

ここに、 h_b は碎波水深である。さらに、海底が一樣な勾配 i であると仮定すれば、

$$i = \frac{h_b}{X_b} \quad (4.11)$$

であるので、式(4.9)、(4.10)および(4.11)を使って式(4.8)を書き直すと、堤防の洗掘限界 X_D は次のように表わされる。

$$\frac{X_D}{L_0} = \frac{0.343}{i} \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\log_{10} \frac{H_0}{L_0} + 0.835 \right), \quad \frac{H_0}{L_0} \lesssim 0.05 \quad (4.12)$$

この式から、海底勾配 i と沖波の特性がわかれば、堤防の洗掘限界の位置を求めることができる。図-4.30 には式(4.12)で求めた洗掘限界 X_D/L_0 が海底勾配をパラメータにとって図示してある。また、堤防前面の海底勾配が一樣であるとすれば、堤防先地盤高 (静水面より上 : 負) を h_G とすると、 h_G/X_b であるから、式(4.12)は次のようになる。

$$\frac{h_G}{H_0} = 0.343 \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{-\frac{1}{3}} \left(\log_{10} \frac{H_0}{L_0} + 0.835 \right) \quad (4.13)$$

この式には、海底勾配の影響が陽に入っていないので、この関係は図-4.31 のようになる。

以上のように、堤防が洗掘され始める洗掘限界は、汀線からの距離および静水面からの法先地盤高とし

て表示することができる。

(2) 現地海岸堤防の洗掘限界との比較

海岸堤防の洗掘限界の表示式 (4.12) および (4.13) を求める際に使用した代表的な実験資料の諸元を沖波波高勾配 ($H_0/L_0 = 0.0065$ および $0.033 \sim 0.05$) で分けて、表-4.6 に整理してある。この表から、実験に用いた沖波波高 (H_0)_m = 4.3 ~ 42.4 cm および周期 (T)_m = 1.3 ~ 5.1 sec は、現地海岸に比較してかなりスケールが小さいことがわかる。本章の 4.3 および 4.4 節において、海浜変形の相似則が海岸堤防設置による局所海浜変形のみならず洗掘に対しても十分適用できることを明らかにした。そこで、模型実験条件を海浜変形の相似則、式 (3.3) および Froude 則を用いて、後述の表-4.7 で示したように日本の代表的な海岸における ($H_{1/3}$)_{mean} および ($H_{1/3}$)_{max} の平均値に相当する沖波波高 (H_0)_p = 1 m および (H_0)_p = 7 m に換算して、周期 (H_0)_p, 沖波波高粒径比 (H_0/d)_p, 実験縮尺 $\lambda_\theta^{-1} = n$, 粒径縮尺 $\lambda_d^{-1} = (d)_p / (d)_m$, および式 (3.5b) による歪 Q などが表-4.6 に整理してある。したがって、式 (4.12) および (4.13) は、おおむね表-4.6 で示した現地換算条件に対応した海岸堤防の洗掘限界を表わしているものと解釈できよう。

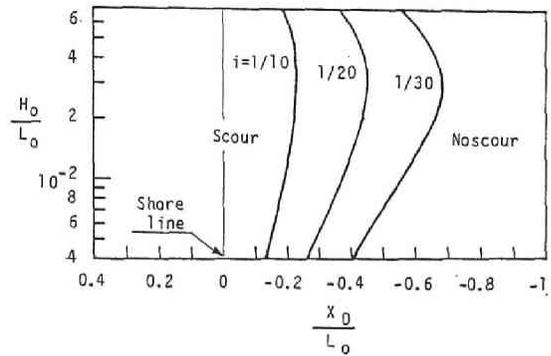


図-4.30 堤防の洗掘限界

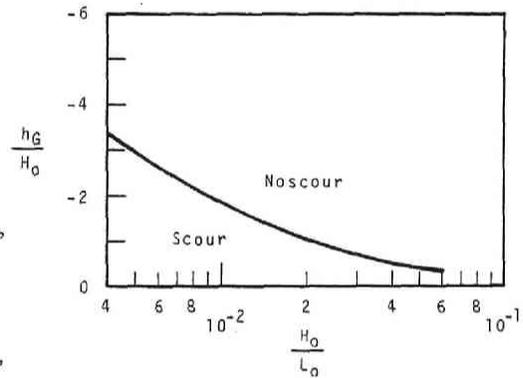


図-4.31 堤防の洗掘限界の地盤高

表-4.6 海岸堤防の洗掘限界の算定に使用した代表的な模型実験条件と、さらにこれらを現地海岸スケールに換算した条件

Experimentalist	Model experimental condition					Converted field condition						
	(H ₀) _m cm	(T) _m sec	(d) _m mm	(H ₀ /d) _m	H ₀ /L ₀	(H ₀) _p m	(T) _p sec	(d) _p mm	(H ₀ /d) _p	Ω	⁻¹ λ ₁	⁻¹ λ _d
Authors (SD3)	4.3	2.1	0.08	506	0.0064	1	10.0	0.27	3681	7.2	23.2	3.1
" (SD2)	11.8	3.4	0.14	790	0.0065		10.0	0.38	2568	3.2	8.4	2.6
Sato et al.	8.7	3.0	0.66	130	0.0065		10.2	1.85	539	4.1	11.4	2.7
"	8.7	3.0	0.37	230	0.0065		10.2	1.04	954	4.1	11.4	2.7
" (STI)	26.0	5.1	0.21	1200	0.0065		10.0	0.48	2703	1.7	3.4	2.2
Authors	11.8	1.5	0.14	790	0.033	7	11.6	0.57	12180	15.4	59.3	3.8
Sato et al.	8.7	1.3	0.66	130	0.033		11.7	2.73	2558	19.6	80.4	4.0
"	8.7	1.3	0.37	230	0.033		11.7	1.54	4526	19.6	80.4	4.0
"	42.4	2.3	0.21	2000	0.051		9.3	0.63	11090	5.5	16.5	2.9
Noda (1972)	10.1	1.3	0.31	320	0.038		10.9	1.25	5588	17.4	69.3	3.9

図-4.32には、日本各地の海岸について、堤防の施工前後における堤防前面の土砂量の変化と堤防の設置地盤高を調査した結果が示してある。この図は、堤防前面の消波工の有無が区別していないが、一般に堤防の設置地盤高が静水面上2 m以下になると、堤防前面の土砂が急激に侵食されることがわかる。図-4.32の調査結果は、調査時の海浜勾配、入射波の特性が明示されていないが、堤防前面における海浜の消失を検討する上で非常に有益である。北海道、関東、中部、および北陸地方の代表的な港湾、つまり苫小牧、鹿島、潮岬、および金沢港において1970年から1979年の10ケ年間に波浪観測された統計資料³⁰⁾を用いて、通年平均有義波 $(H_{1/3})_{\text{mean}}$ 、 $(T_{1/3})_{\text{mean}}$ および10ケ年間の最大有義波 $(H_{1/3})_{\text{max}}$ 、 $(T_{1/3})_{\text{max}}$ と、それぞれの波形勾配を求めて、表-4.7に整理してある。いま、現地海岸における代表波浪として、それぞれの平均値(mean value)と、平均的な海浜勾配として $i = 1/30$ を式(4.12)に入れて、堤防の洗掘限界 X_D を計算した結果が表中の下段に記してある。同様に、式(4.13)で計算した洗掘限界地盤高 h_G も表中に示してある。

この表-4.7から、波が弱い場合、堤防の位置は汀線近く($X_D = -47.1$ m)、堤防の設置地盤高は低く($h_G = -1.4$ m)でもよいが、波が強くなると、汀線から遠く($X_D = -166.6$ m)、高い($h_G = -5.3$ m)位置にないと、堤防前面に洗掘が発生することがわかる。この表で示す2つのケースにおける堤防の洗掘限界地盤高 h_G を図-4.32に示し、現地海岸と比較してある。この比較から、現地調査資料には根固

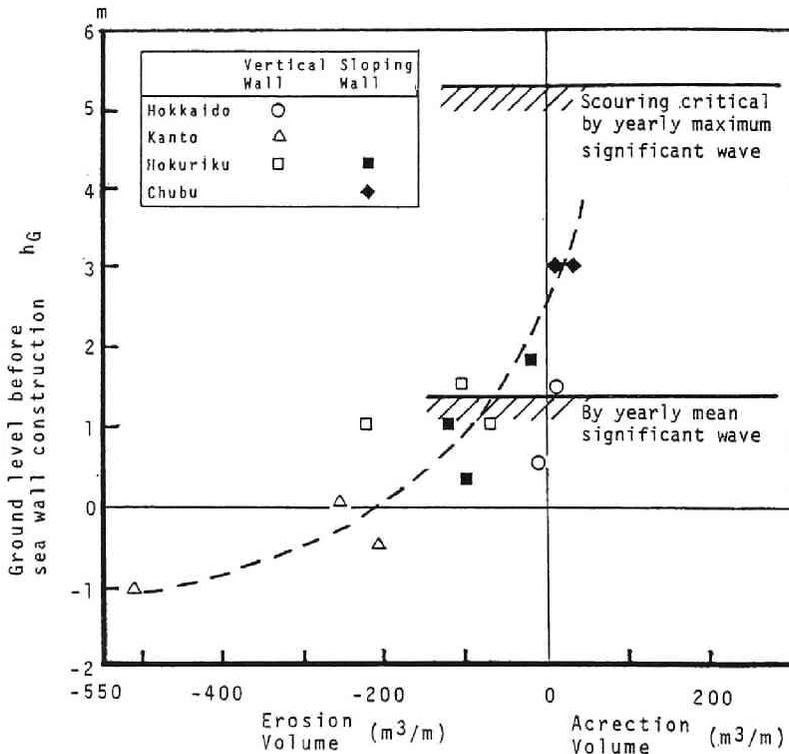


図-4.32 現地海岸調査による海岸堤防設置地盤高と前面洗掘土量との関係

表-4.7 1970年～1979年において代表地点で観測された波浪特性と、この結果を用いて得られた堤防の洗掘限界の位置および地盤高

Observed station	Mean significant wave during 10 years			Maximum significant wave during 10 years		
	$T_{1/3}$ (sec)	$H_{1/3}$ (m)	H_0/L_0	$T_{1/3}$ (sec)	$H_{1/3}$ (m)	H_0/L_0
Tomakomai	5.28	0.7	0.016	15.5	6.10	0.016
Kashima	8.04	1.38	0.014	13.2	7.09	0.027
Shionomisaki	9.17	0.55	0.004	8.99	5.83	0.046
Kanazawa	5.69	1.16	0.023	12.37	7.67	0.032
Mean value	7.04	0.94	0.014	12.52	6.67	0.030
x_D	-47.1m			-166.6m		
h_G	-1.4m			-5.3m		

め工の影響が入っていることを考慮に入れれば、洗掘限界地盤高を表わす式(4.13)は現地海岸と十分対応しているといえよう。

4.7 結 語

海岸堤防の設置による局所海浜変形に関する実験的研究を行うに当って、二次元造波水槽内に生じる波の多重再反射の軽減方法を数種類考案し、各種の波の多重再反射の軽減効果について検討した。その中で、波の多重再反射軽減効果の優れている装置を造波水槽内に取付け、堤防設置による局所海浜変形について、原型と模型の相似性ならびに現地の海岸堤防前面の海浜変形の再現性を詳細に検討し、3章で明らかにした海浜変形の相似則および時間縮尺との関連性を調べた。さらに、これらの実験結果を再整理して、堤防の設置が洗掘および波の特性に及ぼす影響や堤防の洗掘限界について検討した結果、次のことを明らかにすることができた。

(1) 二次元造波水槽において堤防に関する模型実験を行う場合には、水槽内に波の多重反射が起るので、両片式あるいは片側式の仕切板法と可撓性水平係留式フィルター法を組合せることによってその軽減を行うと、かなり有効であることを示した。

(2) 3章において海浜変形の相似則を求める際に用いた実験方法を準用して、堤防設置による局所海浜変形に関する実験を行い、原型と模型の相似性を判定・整理した結果、堤防設置前の平衡海浜形状が原型と模型で相似になる場合には、堤防設置後の局所海浜変形、および洗掘深についても相似性が良いことを示した。このことは、堤防の設置位置を岸あるいは沖に移動させた場合についても同様であった。このような堤防設置後の局所海浜変形に対する相似関係は、図-3.6の海浜変形の相似則と極めてよく一致することがわかった。

(3) 原型と模型の堤防設置後における海浜変形を式(3.62)の時間縮尺で整理すると、両者の経時変化は

十分相似になることがわかった。

(4) 現地海岸として遠州海岸の堤防前面における局所海浜変形を対象にした模型実験条件が、3章の海浜変形の相似則と一致する場合、現地海岸における局所海浜変形をかなり精度良く再現できることがわかった。なお、この場合、現地海岸の代表波として、日有義波の6ヶ月間の平均値を用いると、その再現性は非常に良くなることを確かめた。

(5) 堤防の設置位置を実験的に岸沖に移動させると、最大の無次元洗掘深は、特に沖波波形勾配が小さい場合 ($H_0/L_0 = 0.0065$)、堤防の位置に関係なくほとんど一定となるが、沖波波形勾配が大きい場合 ($H_0/L_0 = 0.033 \sim 0.055$)、堤防を沖側へ設置するにつれて徐々に深くなることを見出した。また、最大洗掘水深の岸沖方向の変化は、波の反射率の変化ともよく対応することがわかった。

(6) 無次元洗掘幅 S_ℓ/L_0 は、沖波波形勾配の影響を強く受け、波形勾配が小さい場合 $S_\ell/L_0 \lesssim L_0/4$ となり、大きい場合 $S_\ell/L_0 \lesssim L_0/2$ となる。

(7) 洗掘土量は、当然洗掘深とともに増大するが、沖波波形勾配が大きい場合、小さい場合よりきわめて大きくなることを明らかにするとともに、それを簡単なモデル式で表わした。

(8) 波の打上げ高は、堤防前面の局所海浜変形の影響を受け、固定床の場合より約1/3低くなるが、堤防による反射率は移動床と固定床でほとんど変わらない。

(9) 堤防前面が洗掘され始める限界、つまり堤防の洗掘限界について、数多くの実験結果を整理して定式化し、それを図示した。この関係式に、日本の代表的な苫小牧、鹿島、潮岬、および金沢港の4ヶ所で波浪観測された10年間の資料による通年平均有義波および最大有義波を用いて求められる現地の海岸堤防の洗掘限界は、現地調査結果とも比較的よく一致することを明らかにした。

参 考 文 献

- 1) 豊島 修・斉藤 晃・小菅 晋・煙山政夫：7920 台風による駿河湾沿岸災害について、第27回海岸工学講演論文集、1980、pp. 552～556。
- 2) 上森千秋・玉井佐一・土屋義人・安田孝志：台風7617・7619・7920号による高知海岸の災害について、京都大学防災研究所年報、第24号B-2、1981、pp. 485～508。
- 3) 大河原 満・橋本 宏・斉藤雄三郎：被災事例から見た海岸堤防・護岸に関する一考察、第30回海岸工学講演会論文集、1983、pp. 264～268。
- 4) 榎木 亨・川崎芳一：海岸堤防堤脚部の洗掘について、京都大学防災研究所年報、第4号、1960、pp. 198～229。
- 5) Herbich, J. B., Murphy, H. D. and Weele, B. V.: Scour of flat sand beaches due to wave action in front of sea walls, Coastal Engineering, SANTA BARBARA Special Conference, 1965, pp. 705～726。
- 6) 佐藤昭二・田中則男・入江 功：海岸構造物の堤脚部洗掘に関する研究(第1報)、——直立壁堤脚部の波による二次元洗掘実験——、港湾技術研究所報告、第5巻11号、1966、pp. 1～33。
- 7) 玉井佐一：海岸堤防前面地形の変形特性、第31回海岸工学講演会論文集、1984、pp. 326～329。

- 8) 佐伯 浩：砂浜決壊の防止工法とその適用性に関する研究，（研究代表者 尾崎 晃）自然災害特別研究成果，No. A-59-1，1984，124 p.
- 9) 市川 武：直立防波堤の洗掘災害，第13回海岸工学講演会講演集，1966，pp. 165～171.
- 10) 玉井佐一：海岸侵食，第19回自然災害科学総合シンポジウム論文集，1982，pp. 231～234.
- 11) 伊藤政博・伊藤 誠・近藤 宏：現地および模型実験における海岸堤防前面の洗掘について，土木学会中部支部研究発表会概要集，1984，pp. 64～65.
- 12) 谷本勝利・原中祐人・富田英治：無反射造波方式の試み，第30回海岸工学講演会論文集，1983，pp. 54～58.
- 13) 伊藤政博・藤田晋也：海岸堤防の設置によって造波水路内に生じる波の多重再反射の軽減法について，土木学会中部支部研究発表会講演概要集，1984，pp. 62～63.
- 14) 合田良実：造波水路内における波浪実験の二・三の問題点について，第15回海岸工学講演会講演集，1968，pp. 50～57.
- 15) 広本文泰・阿部淑輝・須藤 茂：鉛直振動流型造波装置の設計とその造波特性について，港湾技研資料，No. 32，1967. 6，pp. 83～97.
- 16) 岩垣雄一・土屋義人・井上雅夫：風洞水槽を用いた海岸堤防の越波に関する研究(1)，——風洞水槽の特性と鉛直堤防の越波に関する二・三の実験——，第9回海岸工学講演会講演集，1962，pp. 153～158.
- 17) 伊藤政博：海岸堤防前面の洗掘深および海浜変形の相似性に関する実験的研究，名城大学工学部研究報告，第23号，1983，pp. 103～110.
- 18) 伊藤政博：海岸堤防前面の洗掘および海浜変形の再現性，土木学会第38回年次学術講演会概要集，第2部，1983，pp. 191～192.
- 19) 伊藤政博：遠州海岸堤防前面の海浜変形に関する再現実験，第2回自然災害科学学会学術講演会要旨集，1983，p. 19.
- 20) 土屋義人・芝野照夫・山下隆男・片男波海岸の養浜に関する実験的研究，防災研究協会，1982，p. 199.
- 21) 土屋義人・河田恵昭・Silvester, R.：白良浜の海浜過程とその保全(2)，京都大学防災研究所年報，第28号 B-2，1985，pp. 565～590.
- 22) 野田英明：海浜変形と海岸構造物，水工学に関する夏期研修会講義集，1980，pp. B-9-1～13.
- 23) 野田英明・岩佐敏博：海岸堤防堤脚部の洗掘に関する研究，第19回海岸工学講演会論文集，1972 pp. 53～57.
- 24) 高田 彰：規則波の打上げ高および越波量の定式化について，第22回海岸工学講演会論文集，1975，pp. 377～386.
- 25) 榎木 亨：海岸堤防基部の洗掘機構に関する研究(その1)，第14回海岸工学講演会講演集，1967，pp. 329～335.
- 26) 土屋義人：石原藤次郎編，水工水理学，丸善，1973，pp. 569～573.

- 27) 石原藤次郎・岩垣雄一・鈴木雄太：海岸堤防の設計，特にその有効高について，第2回海岸工学講演集，1955，pp. 57～70.
- 28) 伊藤政博：海岸堤防前面の洗掘について，第3回自然災害学会学術講演会要旨集，1984，p. 1.
- 29) U. S. Army, Coastal Engineering Research Center; Shore Protection Manual, Vol. 1, 1977, pp. 2-121～2-122.
- 30) 高橋智晴・広瀬宗一・菅原一晃・橋本典明：波浪に関する拠点観測10ヶ年統計（昭和45年～昭和54年），港湾技研資料，No. 401, 1981, 711 p.

第 5 章 結 論

著者は、本論文で、まず二次元海浜変形の特性とそれに及ぼす諸因子との関係を実験計画法および重回帰分析法を用いて明らかにし、さらに海浜変形の相似則とその時間縮尺に関して詳細な実験的研究を行って、相似則を提案するとともに、海岸堤防前面における局所海浜変形とくに洗掘に関する実験的研究を行い、提案した海浜変形の相似則がこのような局所的現象に対しても適用できることを明らかにした。これらの研究成果を要約して本論文の結論とする。

第 1 章では、従来の研究成果に基づいて、二次元海浜変形の特性について述べ、海浜変形の模型実験とその相似則に関する問題点を明らかにした。その中で、海浜変形を実験によって再現する場合に生じる縮尺効果 (scale effect) が問題になることから、波および漂砂の動態に立脚した普遍的な相似則の確立が重要であることを述べて、本研究の目的を示した。

第 2 章では、二次元海浜変形に関する従来の研究成果を系統的に分類整理するとともに、海浜変形の実験に付随する実験誤差が実用上かなりの大きさになり、これが現象の解明に影響を及ぼすことを指摘し、汀線の移動量、berm 頂の位置および高さ、砕波点の位置、および海浜変形限界水深の実験誤差を定量的に評価した。このような実験誤差を統計的に処理するため、実験計画から実験および実験結果の解析のプロセスを一貫して取扱うことのできる実験計画法を導入することによって、海浜変形における鉛直方向の変化量に及ぼす因子とその寄与率および要因効果の大きさを実験結果に基づいて定性的に表示した。その結果、従来より指摘されていた底質の粒径と波高比 d/H_0 、初期浜勾配 i_0 および沖波波形勾配のみならず、これらの相互作用が海浜変形に有意な影響を及ぼしているということと、さらにこれらの影響が場所的にかなり変化することを明らかにした。次に、次元解析によって得られた二次元海浜変形における汀線の移動量に影響する波および底質特性などの無次元量で構成したモデル式に重回帰分析法を適用して、汀線の移動量を表わす実験式を導いた。その結果、汀線の移動量は、 d/H_0 、 i_0 および H_0/L_0 の無次元量が一定であっても、水深波長比 h/L_0 のみならず波と底質に関する Reynolds 数 $\sqrt{gH_0} d/\nu$ によってかなり変化することを明らかにした。さらに、従来より汀線の移動量の縮尺効果に関係する無次元量として一般に指摘されていた底質粒径と沖波波高との比 d/H_0 、 i_0 および H_0/L_0 の無次元量に加えて、Reynolds 数 $\sqrt{gH_0} d/\nu$ あるいは、 $\sqrt{gH_0} H_0/\nu$ が縮尺効果に関与する非常に重要な無次元量であることを示した。

第 3 章では、まず原型と模型の海浜変形の相以性を比較照合する場合に必要な判定基準として、第 2 章で評価した実験誤差を用いて定量的判定基準と定性的判定基準を定義した。次に、原型と模型の平衡海浜断面形状を相似にするために、両者の間に存在する漂砂現象における縮尺効果の影響を底質粒径に含めて、両者が相似になる実験縮尺と底質砂の粒径縮尺の関係を実験的に見出した。つまり、定量的判定基準に基づいて、原型と模型の海浜断面形状が定量的に相似になる実験縮尺と粒径縮尺の関係は領域として表わされることを図示し、この相似則を提案した。また、両者の海浜断面形状が定性的に相似となる領域を図示し、それを示した。これらの相似則については、原型における条件が、粒径波高比 $(d/H_0)_p \leq 0.01$ および波形勾配

$(H_0/L_0)_p = 0.007 \sim 0.042$ の範囲内であれば、水深や波高および周期などの波の特性を Froude 則で、また底質砂の粒径縮尺を提示した相似則に従って模型の実験条件を定めれば、海浜断面形状とそのタイプを相似にすることができる。また、これらの相似則の適用のため原型の底質砂の粒径、波高および周期を与えて模型の実験縮尺を定めると、底質砂の粒径、波高および周期などの模型の実験条件がただちに求められる関係を図示した。

提案した海浜変形の相似則は、従来提示された汀線の移動および漂砂の移動限界水深などの各種表示式の中で、波と底質の Reynolds 数、底質の Reynolds 数、底質の沈降速度および境界層の影響を考慮している式から求まる相似関係とも比較的良好に一致することを明らかにした。

提案した海浜変形の相似則を満足する場合、初期海浜形状から平衡状態への移行過程で、時間縮尺をどのように定めれば、海浜断面形状が相似になるかを実験的に検討し、海浜変形の時間縮尺が成立する範囲を見出した。この範囲の平均的傾向は、Froude 則による時間縮尺と大体一致することがわかった。また、この時間縮尺は、提案した海浜変形の相似則と連続式、および岸沖漂砂量公式から求めた時間縮尺ともある程度一致することがわかった。

新潟県大潟海岸および静岡県遠州海岸の海浜変形過程について、提案した相似則と時間縮尺を適用した模型実験を行ない、両海岸における海浜変形の再現性を検討し、相似則の適用性を調べた。その結果、比較的短期間に入射波浪が急変する季節風の通過によって生じた海浜変形を対象とする場合には、現地波浪の時間平均波を、また6ヶ月から1年間程度の比較的長期間の場合には、日有義波の平均波を実験における代表波に選べば、海浜変形、特に海岸断面形状、汀線移動のみならず、海浜変形に伴う侵食・堆積土量の変化なども十分再現できることを見出した。

第4章では、二次元造波水槽を用いて海岸構造物などの実験を行う場合、堤防などの設置構造物と造波板との間に発生する波の多重再反射が問題となるので、その発生防止または減少させる方法として、仕切板法、フィルター法および水流循環法など、各種の装置を考案し、それらの特性を調べた。この結果に基づいて、波の多重再反射に対して最も防止効果の良い方法を用いて、鉛直堤防の前面における局所海浜変形および洗掘に関する実験を行い、前章で提案した相似則の適用性を調べた。その結果、このような局所的な海浜変形においてもこの相似則や時間縮尺は十分な適用性を持つてることがわかった。さらに、遠州海岸における堤防前面の局所海浜変形および洗掘についても、実験条件を変えて実験を行った結果、提案した海浜変形の相似則と一致する条件では、現地海岸におけるその再現性が非常に良好であった。

また、堤防前面における局所海浜変形および洗掘の特性について、従来の実験結果に加えて本実験結果を整理した結果、最大の洗掘水深および波の反射率は、沖波波形勾配が小さい場合には、堤防の設置位置に関係なくほとんど一定となり、無次元洗掘幅は1/4波長以下であることがわかった。これに対して、沖波波形勾配が大きい場合には、最大の洗掘水深および波の反射率は、堤防設置位置が沖側に移るに従って大きくなり、このときの無次元洗掘幅は若干広く、1/2波長以下であることがわかった。また、移動床における波の打上げ高さは固定床の場合に比べて1/3程度低くなるが、波の反射率は固定床の場合と同程度であることを示した。

なお、堤防前面に局所的な洗掘が起る限界，すなわち堤防の洗掘限界について数多くの実験結果を整理し，その表示式を示したが，これは現地の海岸における調査結果ともよく一致することを明らかにした。

以上，海浜変形の相似則を中心として研究した本研究の主要な成果を要約したが，都市化に伴う著しい開発利用により沿岸海域も急速な変貌を余儀なくされ，各種シミュレーション手法による海浜変形の定量的予測が要求される今日，本研究で著者が提案した相似則のみならず，それを用いて明らかにした海浜変形の基本的特性は，広域のおよび局所的な海浜変形の究明に寄与するものであると信じているが，これがわが国の海岸保全にいささかでも役立てば著者の本望である。

謝 辞

前岐阜大学・現名城大学増田重臣客員教授のご指導によって、統計的手法を用いて海浜変形の特徴を見出す研究を始めたのが本研究の端緒である。昭和45年に名城大学へ奉職してからは、故名城大学青木保雄教授のご配慮によって研究を続けてきた。その後、名城大学に着任された故矢野勝正教授からは、高い次元からの研究の推進に関するご忠告を、さらに京都大学防災研究所土屋義人教授の指導で研究を進展させるべくご配慮いただいた。その結果、財団法人私学研修福祉会の国内研修制度により昭和52年10月から6ヶ月間、防災研究所に滞在して、土屋教授の本格的なご指導と仰ぐことになった。ここに、その研究の全容をとりまとめることができたのは、同教授のご指導とご鞭撻によるものであり、研究を通じてうけた数多くの教示に対して、深甚なる感謝の意を表明する。

また、本研究を進めるに当って、格別のご配慮をしていただいた名城大学増田重臣客員教授に厚く感謝する次第である。前名城大学角田敏雄教授からは常に激励のお言葉をいただき、また岐阜大学工学部長河村三郎教授ならびに同大学安田孝志助教授からは親切なご声援をいただいた。さらに、本研究の実験の実施に当っては、京都大学防災研究所海岸災害部門および同宇治川水理実験所の方がたに大変ご厄介になった。地道な実験とデータ整理は、名城大学理工学部土木工学科河海工学部門の大学院生および卒業研究の学生諸氏の熱心な協力を得た。

さらに、推測統計的方法による海浜変形過程の基礎研究で昭和48年度松永科学振興財団から研究助成金を受けた。本研究の一部はこの研究費による研究成果である。

以上、本研究の経緯を述べ、ご指導およびご協力いただいた前述の方がたに対して、厚く謝意を表明する。

