

運輸省港灣技術研究所

港灣技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE

MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 29 NO. 2 JUNE 1990

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第29巻 第2号 (Vol. 29, No. 2), 1990年6月 (June 1990)

目 次 (CONTENTS)

1. 斜め入斜波による混成堤マウンド被覆材の安定性に関する実験的研究
.....高橋重雄・木村克俊・谷本勝利..... 3
(Stability of Armour Units of Composite Breakwater Mound against
Oblique Waves.
.....Shigeo TAKAHASHI, Katsutoshi KIMURA
and Katsutoshi TANIMOTO)
2. 碎波帯内の底質粒度の変動特性
——波崎海洋研究施設における現地調査——
.....加藤一正・柳嶋慎一・栗山善昭・磯上知良・村上裕幸・藤田 誠.....37
(Changes of Grain Distribution of Bed Material in the Surf Zone
——Field Observation at Hazaki Oceanographical Research Facility——
.....Kazumasa KATOH, Shin-ichi YANAGISHIMA, Yoshiaki KURIYAMA,
Tomoyoshi ISOGAMI, Hiroyuki MURAKAMI and Makoto FUJITA)
3. 粘性土の水平方向圧密係数の決定法
.....小林正樹・水上純一・土田 孝.....63
(Determination of the Horizontal Coefficient of Consolidation c_h
.....Masaki KOBAYASHI, Jun-ichi MIZUKAMI and Takashi TSUCHIDA)
4. 事前混合処理工法による処理土の強度・変形特性
.....善 功企・山崎浩之・佐藤 泰.....85
(Strength and Deformation Characteristics of Cement Treated
Sands Used for Premixing Method
.....Kouki ZEN, Hiroyuki YAMAZAKI and Yasushi SATO)
5. 低置換率 SCP 工法により改良された粘性土地盤の支持力
.....寺師昌明・北詰昌樹... 119
(Bearing Capacity of Clay Ground Improved by Sand Compaction
Piles of Low Replacement Area Ratio
.....Masaaki TERASHI and Masaki KITAZUME)
6. 曲げおよびせん断を受けるハイブリッドはりの耐力特性
.....横田 弘・清宮 理... 149
(Load Carrying Capacity of Hybrid Beams Subjected to Flexure
and Shear Forces.....Hiroshi YOKOTA and Osamu KIYOMIYA)
7. ケーソンに作用する地震時土圧に関する模型振動実験とその解析
.....風間基樹・稲富隆昌・大塚幸治... 177
(Model Vibration Tests for the Seismic Earth Pressure Acting
on the Rigid Caisson Foundation and Its Analyses
.....Motoki KAZAMA, Takamasa INATOMI and Kohji OHTSUKA)

2. 砕波帯内の底質粒度の変動特性 —波崎海洋研究施設における現地調査—

加藤 一正*・柳嶋 慎一**・栗山 善昭**
磯上 知良**・村上 裕幸**・藤田 誠***

要 旨

本論文では、鹿島灘（茨城県）に面する砂浜海岸にある波崎海洋研究施設（略称 HOLF）で得られたデータをもとに、砕波帯内の底質粒度特性の変動の実態を調べ、底質の岸沖方向ふるい分けについて明らかにした。

底質採取は、1986年3月13日～1987年10月22日の間に15回にわたり棧橋先端から後浜まで500mの範囲を岸沖方向10m間隔で実施した。その間に、極大有義波高5.8m、周期9.0sの時化が来襲したときの直前、直後の底質採取を行うことができた。採取した底質（715サンプル）について、粒度分析を行った。まず、時化の前後の底質粒度の岸沖分布を比較することにより、荒天時のふるい分けを調べた。次に堆積過程の底質粒度特性の変化を、バー領域、トラフ領域、ステップ領域に分けて考察した。特に、トラフ領域においては、海底レベル変化の履歴の効果も含めて粒度分布特性を詳細に調べた。

その結果、砕波帯内の底質粒度の変動特性が以下のように明らかにされた。

(1) 底質の波による岸沖方向ふるい分けは、時化時に生じ、バー領域では中央粒径0.18mm、トラフ領域では中央粒径0.5mm、ステップ領域では中央粒径0.3mmのいずれも単峰型の粒度分布となる。

(2) 堆積過程の底質粒度特性の変化は以下のとおりである。

[バー領域]：地形変化が生じるにもかかわらず、常に小粒径砂（中央粒径0.18mm）が存在する。

[トラフ領域]：時化直後の大粒径砂に小粒径砂が加わり、粒度分布は大粒径と小粒径のところにピークが存在する双峰型粒度分布特性になる。さらに堆積が進行すると、小粒径だけの単峰型粒度分布になる。

[ステップ領域]：時化直後にステップ領域の沖側端に集中して現れる中粒径砂（中央粒径0.3mm）は徐々に岸方向に移動する。

キーワード：漂砂、岸沖漂砂、底質粒度、ふるい分け、砕波帯、現地観測、波崎海洋研究施設

* 水工部 漂砂研究室長
** 水工部 漂砂研究室
*** 前水工部 漂砂研究室（現熊本市役所）

2. Changes of Grain Distribution of Bed Material in the Surf Zone

—Field Observation at Hazaki Oceanographical Research Facility—

Kazumasa KATO*

Shin-ichi YANAGISHIMA**

Yoshiaki KURIYAMA**

Tomoyoshi ISOGAMI**

Hiroyuki MURAKAMI**

Makoto FUJITA***

Synopsis

In this paper, changes of grain distribution and the cross-shore sorting of bed materials in the surf zone are discussed based on the data obtained at the Hazaki Oceanographical Research Facility which is located at the Pacific Ocean side in Japan.

Bed materials have been sampled 15 times during the period from 13 March 1986 to 22 October 1987 along the research pier with the cross-shore interval of 10 meters. Two of them have been carried out just before and after the large storm of 5.8 meters in a significant wave height and 9.0 seconds in a period. The samples were analyzed with sieves. By comparing the cross-shore distributions of grain size composition before and after the storm, an actual condition of sorting is investigated. The changes of grain distribution in the accretionary process are separately examined in the three area, that is, bar area, trough area and step area in the surf zone. The hystereses of change of sea bottom level are taken into account in study.

The main conclusions of this paper are as follows;

- (1) The bed materials are clearly sorted during the storm, so that median diameters are 0.18 mm in the bar area, 0.5 mm in the trough area, and 0.3 mm in the step area. In these area, the grain distribution are unimodal compositions.
- (2) In the accretionary process, the grain distribution in the bar area does not change, that is unimodal composition with the median diameter of 0.18 mm. That in the trough area changes to the bimodal one with two peaks of 0.5 mm and 0.18 mm in diameters, and further to the unimodal one with the median diameter of 0.18 mm in the final stage of accretionary process. In the step area, intermediate materials of 0.3 mm in diameter are gradually moved in the onshore direction.

Key Words: Littoral drift, Cross-shore transport, Grain distribution, Sorting, Surf zone, Field survey, HORF

* Chief of the Littoral Drift Laboratory, Hydraulic Engineering Division

** Member of the Littoral Drift Laboratory, Hydraulic Engineering Division

*** Former Member of the Littoral Drift Laboratory (Kumamoto City Office)

目 次

要 旨	37
1. は じ め に	41
2. 現地調査および底質粒度分析の方法	41
2.1 調査地点の概要	41
2.2 砕波帯内の底質採取の方法	42
2.3 底質粒度分析と粒度組成の表示方法	43
3. 底質粒度特性の岸沖分布	44
3.1 底質特性の岸沖分布	44
3.2 中央粒径と底質粒度特性の関係	46
4. 底質粒度分布の分類とその空間分布特性	46
4.1 底質粒度分布のパターン	46
4.2 粒度分布パターンの空間分布	48
5. 荒天時の底質の岸沖方向ふるい分け	48
5.1 底質粒度分布の変化の実態	48
5.2 岸沖方向ふるい分け	50
6. 堆積過程の底質の均一化	53
6.1 領域区分	53
6.2 パー領域の底質特性の変動	53
6.3 トラフ領域の底質特性の変動	53
6.4 ステップ領域の底質変動特性	58
6.5 堆積過程の底質特性の変化	60
7. ま と め	61
参 考 文 献	61

1. はじめに

砂浜海岸は台風や低気圧の通過時の激浪によって急激に侵食され、時として護岸の破壊や背後の土地、家屋、人命に及ぶ社会的損失が生じる。このため、荒天時の砕波帯内の底質移動機構および海浜変形（特に侵食）機構の解明、それらを予測する技術の確立、そして防災機能を有する海岸保全の整備が重要となる。

これまでに、砕波帯にいたる波の変形、砕波、砕波後の波の変形、海浜流等が、理論や実験、現地調査によって研究されてきた。特に最近では、電磁流速計やレーザードップラ流速計を用いた流速測定技術の発達とともに、底質移動の外力である流体場が乱れの構造も含めてより詳細に明らかにされつつある。この研究の方向は、波の変形→砕波→波の砕波変形→海浜流・乱れの発生→漂砂機構というように「原因」から「漂砂機構」に向かうものであり、正統的かつ望ましいものである。

これに対して、「結果」から「漂砂機構」へ向かう逆の研究方向も有用な結論を得る、あるいは現象を理解する有効なアプローチとなる。このアプローチの方向は、Komar (1976) が引用している Leonardo da Vinci のことば

『Although nature begins with the cause and ends with the experience, we must follow the opposite course, namely, begin with the experience and by the means of it investigate the cause.』

で表現されるものである。

漂砂機構すなわち底質移動の最終結果は、海浜地形の変化である。地形変化にいたる過程で、底質は波・流れの作用を受け、その場の流体運動に対応した特性になる。これを、波・流れによる底質のふるい分け作用という。例えば、沿岸漂砂が卓越する海岸では、粒径の小さい底質ほど沿岸方向に運ばれ易いので、沿岸漂砂の卓越方向に底質粒径が小さくなる（合田・佐藤，1981）。この結果を逆に利用して、沿岸方向に底質粒径を調べることによって沿岸漂砂の卓越方向を推定することがしばしば試みられる（土木学会，1974）。

一方、海岸に直角方向（岸沖方向）にも、底質はふるい分けられる。Bascom (1951) が、アメリカの太平洋岸で岸沖方向の底質粒度分布を調べた結果によると、平均低干潮位よりわずかにレベルの低い最終砕波点で粒径が大きく、それより沖方向に徐々に小さくなる。これは、小さい粒径の底質ほど砕波帯内で浮遊状態になり易く、沖に運ばれ、そして水深の深いほど海底に作用する波の力が小さくなるから、水深の大きくなる沖方向に粒径が

小さくなるためである。しかし、この結果は比較的海象の穏やかな状況下のものであり、防災が問題となる荒天時の急激な地形変化に対応したものではない。

岸沖方向のふるい分けの実態は、さらに複雑であることは以下のように容易に推察できる。

岩垣・野田 (1961) は、造波水路内に砂で模型海浜を造り、長時間波を作用させたときの平衡海浜断面が、正常海浜と暴風海浜の2つに大別されることを示した。前者は波形勾配の小さい波が作用したとき、後者は波形勾配の大きな波が作用したときの平衡海浜断面である。さらに、正常海浜になるか暴風海浜になるかは、入射波の波形勾配だけでなく底質の粒径にも関係していることを実験的に示した。すなわち、同じ波形勾配の波が作用したときでも、底質粒径が大きいと正常海浜になり、粒径が小さいと暴風海浜になる。そうすると、入射波の波高（波形勾配）が時化の通過ともなって増大しその後減衰する過程において、海浜断面は正常海浜→暴風海浜→正常海浜と変化し、また底質は小粒径→大粒径→小粒径と変化するはずである。つまり、岸沖方向のふるい分け作用は沿岸方向のそれと異なり、入射する波の状況に応じて変化すると推察される。

本論文は「結果（底質のふるい分け）」から「漂砂機構」へのアプローチを行うための第1ステップとして、茨城県鹿島灘で実施した砕波帯内の海底断面地形測量と底質採取の結果得られたデータをもとに、海底断面変化と底質特性の変動（粒度組成の変化）の実態を解析し、底質のふるい分けについて考察したものである。

2. 現地調査および底質粒度分析の方法

2.1 調査地点の概要

現地調査は、図-1 に示す鹿島港と銚子の間のほぼ中央の鹿島灘に直面する砂浜海岸にある波崎海洋研究施設

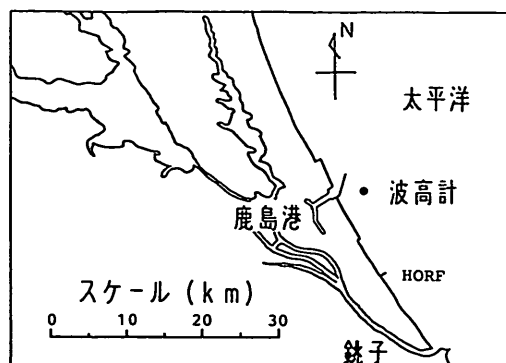


図-1 現地調査地点（波崎海洋研究施設）

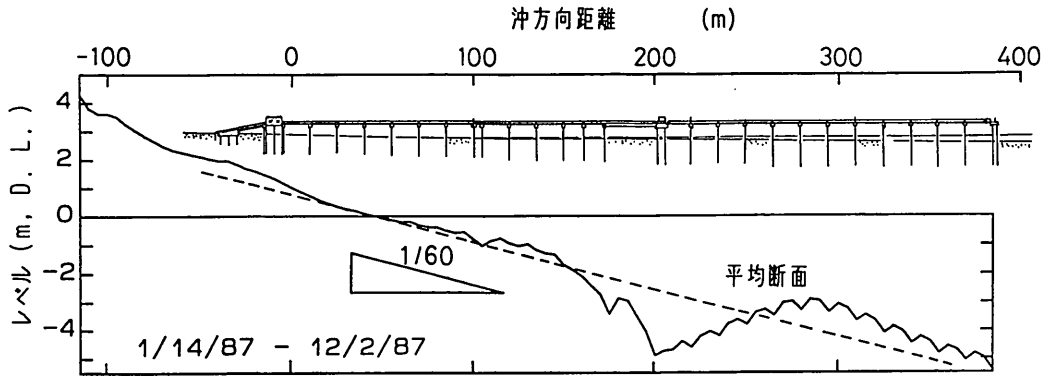


図-2 観測栈橋と平均海底断面

(略称 HOLF) で行った。HOLF は、1986年3月に完成した研究施設であり、図-2に示すような、全長427m、幅3.3mの観測栈橋が汀線に対してほぼ直角に沖方向に建設されている。栈橋には、位置を表示する固有の座標系が図-2上段に示されるように観測室のすぐ沖側を原点にし沖方向を正にとって設定されている。本報告での岸沖方向位置の表示は全てこの座標系にしたがい、例えば、沖方向距離200mの位置を表示するときにはP200mとする。

観測栈橋の下部構造は、基本的には岸沖方向15m間隔の一本の橋脚である。ただしP100m~105mの跳ね橋(橋脚3本)、P200m~205mの踊り場(橋脚4本)、P175mのスパン24m桁の陸側(橋脚2本)、栈橋先端(橋脚3本)は複数の橋脚で支えられている。

図-2の下段は、1987年1月14日~同年12月2日の間の栈橋に沿った平均海底地形をD.L.基準(D.L.=T.P.-0.69m)で示したものである。海底断面は、P300m付近にバー頂部があり、その岸側P180m~250mにトラフのある暴風海浜(合田・佐藤, 1981)となっている。そして、平均海底勾配はほぼ1/60である。なお、P200m~380mの範囲は、測点と橋脚の位置が一致するため、岸沖方向15m間隔に橋脚(1本)の局所洗掘の影響を受けた小さなくぼみが存在する。これ以外に、極大水深となるP200mは栈橋中央の踊り場を支える橋脚が4本集中しているところであり、やや陸側のくぼみのあるP175mは測点が2本の橋脚に接近しているところである。

2.2 碎波帯内の底質採取の方法

底質採取地点は、観測栈橋の南側(銚子側)に沿ってP0mを基準に岸沖方向10m間隔とし、範囲はP-100mからP380m(栈橋先端)までの地点である。表-1は、底質採取を実施した年月日、採取方法および前回の採取

表-1 底質採取日と採取方法

No.	採取年月日	採取方法	前回採取日からの経過日数
1	1986. 3. 13.	ダイバー	
2	3. 19.	ダイバー	6
3	6. 8.	S M採泥器	81
4	10. 23.	S M採泥器	137
5	11. 27.	S M採泥器	35
6	12. 23.	S M採泥器	26
7	1987. 1. 28.	S M採泥器	36
8	2. 26.	S M採泥器	29
9	4. 8.	S M採泥器	42
10	5. 20.	S M採泥器	42
11	6. 17.	S M採泥器	28
12	6. 23.	S M採泥器	6
13	8. 11.	S M採泥器	49
14	9. 24.	S M採泥器	44
15	10. 22.	S M採泥器	28

日からの経過日数を示したものである。底質の採取は、1986年3月13日~1987年10月22日の間に15回実施した。

最初の2回の底質採取では、海面下についてはダイバーが採取し、陸上部ではスコップで採取した。いずれの場合も表層面の底質を採取し、1地点における採取量は1kg~2kg程度である。ただし、1986年3月19日は、入射波が大きくダイバーによる採取がP40m~120mの範囲で不可能であったため欠測になっている。

第3回目以降の底質採取では、P0m~380mを写真-1に示すミス・マッキンタイヤ採泥器(採取面積22cm×22cm=484cm²)で採取した(写真-2)。1回の採取量は、約3kgである。海面下の採取状況は観察できなかったが、この採泥器を用いて陸上部で試行した結果に

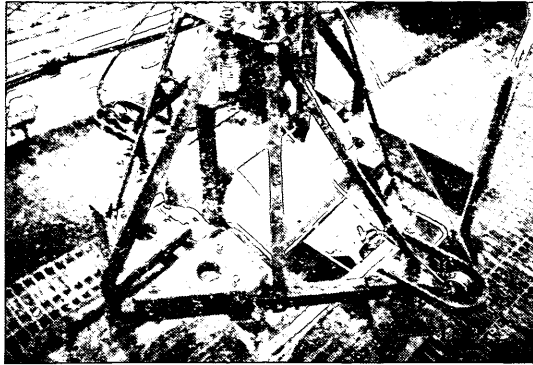


写真-1 スミス・マッキンタイヤー採泥器

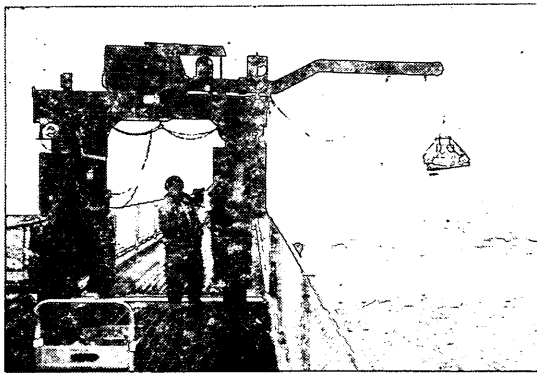


写真-2 底質採取状況

よると、最大採取深さは5 cmであった。P-100m～10m（陸上部）はスコップで採取した。

底質採取実施日の間隔は、やや長短があるものの、第4回以降はほぼ1ヶ月である。1987年6月23日の第12回目の採取は、6月20日に極大有義波高5.8m、周期9.0sの時化が来襲したため、急ぎで実施したものである。

なお、スミス・マッキンタイヤー採泥器を用いた底質採取は、水産庁水産工学研究所と共同で実施した。採取された海底砂中の二枚貝については日向野・安永（1988）が報告している。

2.3 底質粒度分析と粒度組成の表示方法

採取した底質をビニール袋に詰めて実験室内に運び、表-2に示す11種類のふるいを用いて粒度分析を行った。

粒度分析の手順は以下の通りである。すなわち

- ① 試料から約600gの砂を取り出し、塩分を除くために水洗いをする。
- ② 乾燥炉に入れて、110°Cで24時間乾燥する。
- ③ 乾燥した試料のうち約400gを取り出しその重量を測定する。
- ④ 表-2に示すふるいを用いて、ふるい振とう機によ

表-2 粒度分析に使用したふるい目

ふるい No.	ふるい目 (mm)
9	2.00
14	1.19
20	0.84
28	0.59
35	0.42
48	0.297
65	0.210
100	0.149
150	0.105
200	0.074
270	0.053

り10分間ふるい分けを行う。

- ⑤ 各ふるいに残留した砂の重量を測定する。
- ⑥ 各ふるいに残留した砂の重量の総和と、最初に測定した試料の重量の差が2g以上のときには、その試料をもとに戻し③からやり直す。
- ⑦ 結果の整理を行う。

である。

なお、採取してきた試料には、しばしば貝殻片が含まれていた。貝殻の有無が粒度分析結果にどのように影響

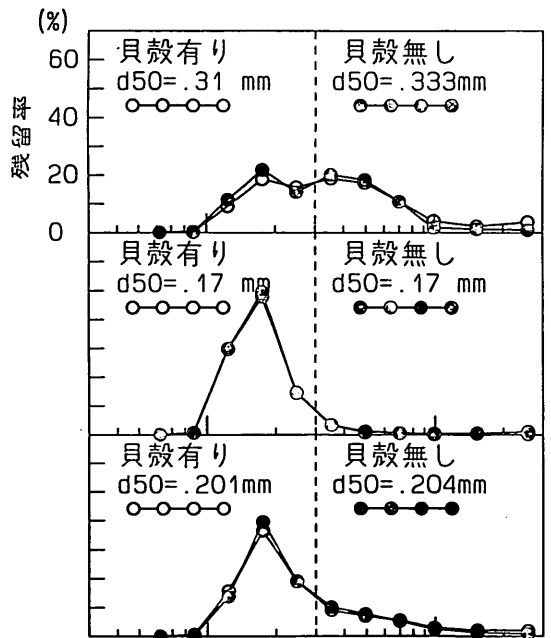


図-3 貝殻を含む場合と含まない場合の粒度分布の比較

するかを調べるために、貝殻を多く含んでいる試料について、採取してきたままの状態での粒度分析を行った結果と、塩酸で貝殻を溶かした後に粒度分析を行った結果を比較した。図-3に重ねて示した粒度分布を見ると、両者の差はほとんどないことが分かる。このことから、以降の粒度分析では、貝殻を取り除かずに行なった。

底質の粒度組成を数値で表現するために、次式で定義される Trask が提案したふるい分け係数、偏わい度(合田・佐藤, 1981; 堀川, 1973; 服部, 1987)を計算した。

$$\text{ふるい分け係数} : S_0 = \sqrt{d_{75}/d_{25}} \dots\dots\dots(1)$$

$$\text{偏わい度} : S_k = (d_{75} \times d_{25}) / (d_{50})^2 \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 d_{25} 、 d_{50} 、 d_{75} はそれぞれ、粒度加積曲線で累加百分率が25%、50%、75%に対応する粒径である(図-4 上段参照)。

S_0 は底質のふるい分けの度合いを表す指標で、その値が1に近いほどふるい分けがよく均一な粒径からなる(図-4 中段の粒度分布参照)。 S_k は中央粒径より大きいものと、小さいものとの割合を示す指標であり、その値が1より大きければ粒度分布は粒径の大きい方向へかたより、1より小さければ粒径の小さい方向へかたよった粒度組成である(図-4 下段参照)。

底質の粒度分析の外に、P-70m、P-10m、P120

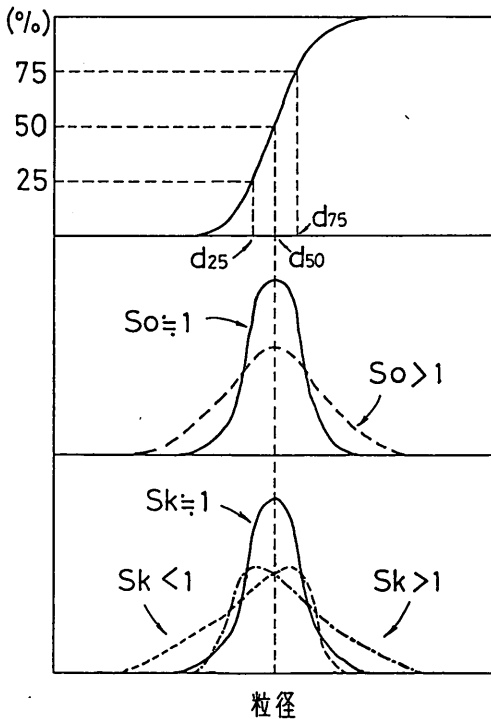


図-4 中央粒径、ふるい分け係数、偏わい度の説明図

表-3 底質の比重

採取地点	比重
P 380m	2.68
P 260m	2.65
P 120m	2.65
P-10m	2.74
P-70m	2.73
砂 鉄	5.23

m、P 260m、P 380mの各1試料について、底質の比重を調べた。その結果を表-3に示す。これによると、陸上部(P-70m、P-10m)の比重は海底部(P120m、P 260m、P 380m)のものより約0.1程度大きい。表中の砂鉄とは、陸上部で採取した試料から磁石で取り出した底質の比重を測定した結果である。つまり、陸上部の底質の比重が大きいのは砂鉄分を含んでいるためである。

3. 底質粒度特性の岸沖分布

3.1 底質特性の岸沖分布

図-5は、底質採取(全15回)時の海底断面とともに、全データについて、中央粒径、ふるい分け係数(S_0)、偏わい度(S_k)を示したものである。

図-5の上段の海底断面表示は、D.L.(=T.P.-0.68m)基準とした。P-100m~60mの後浜はほとんど変化していない。P-60m~100mの断面は、約1.5mのレベル差以内で全体が上下方向に平行的に変化した。P 180mより沖側は、ほぼP 270mを節とする重複波のようなモードの海底地形変化が認められる。すなわち、P 270mより岸側が堆積しているときには沖側が侵食し、逆に岸側が侵食されたときは沖側が堆積してバー・トラフ地形が形成される。

図-5の二段目は、中央粒径(d_{50})の岸沖分布である。中央粒径のほとんどは、0.5mm~0.2mmの間にある。これらを最頻出現中央粒径と呼ぶことにする。最初に最頻出中央粒径に注目すると、海底レベルがほぼD.L. 0.0mである(上段の断面地形参照) P 20m~70mの粒径がやや大きく、0.18mm~0.19mmである。中央粒径は、沖方向に徐々に小さくなり、P 300mより沖側では0.15mm~0.16mmとなる。また後浜方向にも小さくなっていることが認められる。この結果は、平均低干潮位よりわずかにレベルの低い最終砕波点で粒径が大きくなり、それより沖方向および岸方向へ小さくなるという従来の知見(Bascom, 1951; 水理公式集, 1971)と傾向が一致す

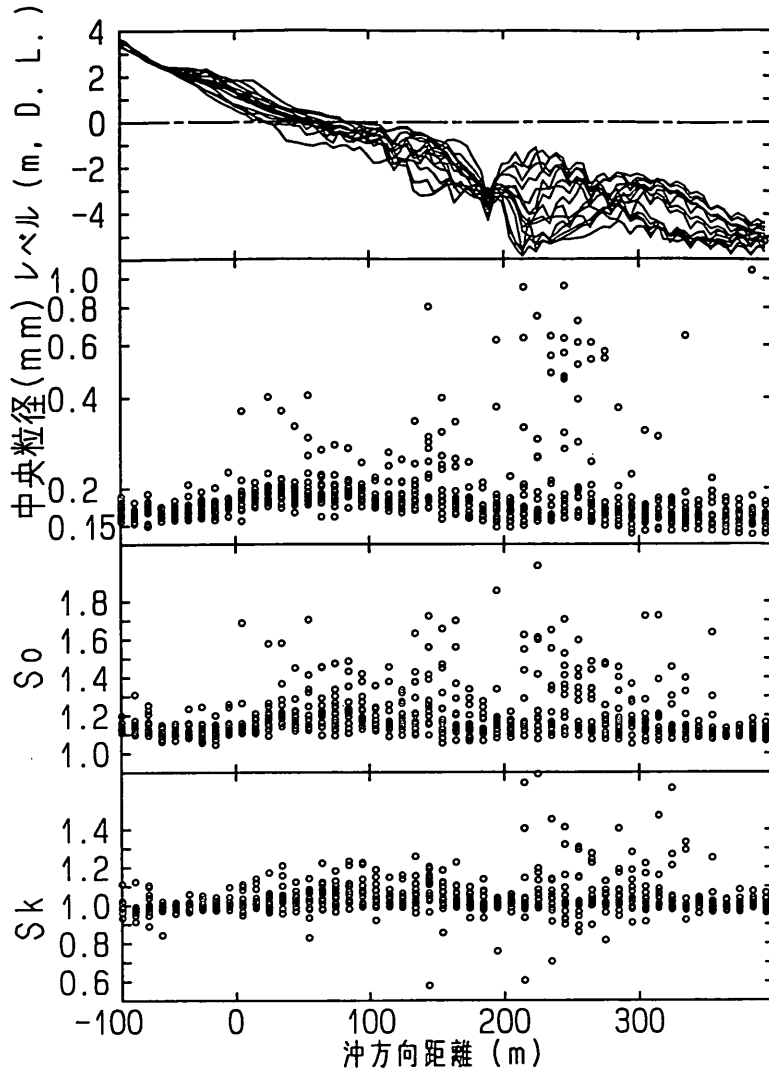


図-5 海底断面および中央粒径，ふるい分け係数，偏わい度の岸沖分布

る。しかし，図-5によると，頻度は少ないものの大きな粒径の砂が現われることがある。特にP180m~280mで大きな粒径が出現する。これは同一海岸を時化直後も含めて繰り返し調査をしたために得られた知見であり，中央粒径が必ずしも一定してなくて変動していることを示唆する。いかなる状況で変動しているかについては章を改めて考察する。

図-5の三段目は，ふるい分け係数 (S_0) の岸沖分布である。最頻出現ふるい分け係数は1.1~1.2の範囲にある。 $S_0=1.25$ 程度になると底質のふるい分けが良好であると判断される(水理公式集, 1971)ので，調査海岸の状況はふるい分けが極めて良好であると言える。しか

し，P-10mより沖側では，しばしばの大きな底質が現れ，ふるい分け係数も変化する。

図-5の最下段は，偏わい度 (S_k) の岸沖分布である。最頻出現偏わい度は，ほぼ1.0である(左右対称型の粒度分布)。しかし，偏わい度についても時として $S_k=1.0$ から大きくずれたものが現われる。 $S_k>1.0$ の出現が $S_k<1.0$ より頻度が高い。特に190mより沖側では， S_k が大きくなる傾向が強い。

以上概略を述べたように，底質の最頻出現特性は，中央粒径が0.16mm~0.19mm程度であり，ふるい分け度は極めて良好，偏わい度はほぼ1.0である。しかし，これらの特性は一定しておらず変化する。

3.2 中央粒径と底質粒度特性の関係

図-6 は、中央粒径 (d_{50}) とふるい分け係数 (S_0) の関係を全データについてプロットしたものである。ほとんどのデータは中央粒径 $0.15 \sim 0.19 \text{ mm}$ 、ふるい分け係数 $1.17 \sim 1.18$ の間にある (最頻出現特性)。しかし、図-5 で述べたように、中央粒径が 0.2 mm 以上になることがあり、これに対応してふるい分け係数も変化する。すなわち、データにバラつきがあるものの図中に一点鎖線でおおまかな傾向を示したように、中央粒径が $0.2 \text{ mm} \sim 0.3 \text{ mm}$ の範囲では、粒径が大きくなるにつれてふるい分け係数も大きくなり、 $d_{50} = 0.3 \text{ mm}$ 付近で $S_0 = 1.6$ 前後になる。これに対して、中央粒径が 0.3 mm 以上の範囲では、逆に粒径が大きくなるにつれてふるい分け係数は小さくなる。この中央粒径とふるい分け係数の関係を、以下では二次曲線関係と称する。

図-7 は、中央粒径 (d_{50}) と偏わい度 (S_k) の関係を全データについてプロットしたものである。ほとんどのデータは、中央粒径 $0.15 \text{ mm} \sim 0.19 \text{ mm}$ で偏わい度 1.0 前後にある (最頻出現特性)。これに対し、中央粒径が

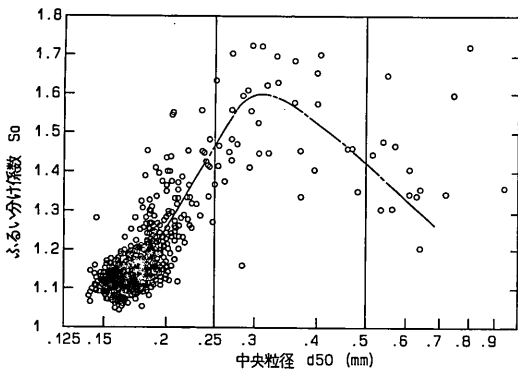


図-6 中央粒径とふるい分け係数の関係 (全データ)

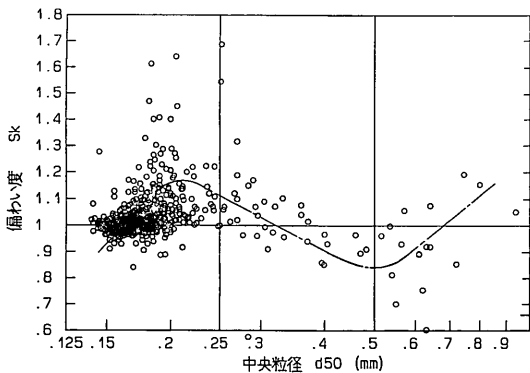


図-7 中央粒径と偏わい度の関係 (全データ)

0.2 mm 以上になると、偏わい度との間に図中一点鎖線で示した関係がある。すなわち、偏わい度は中央粒径が 0.2 mm 付近で最大となり、中央粒径が $0.2 \text{ mm} \sim 0.5 \text{ mm}$ の範囲では粒径が大きいほど小さくなる。そして、中央粒径 0.5 mm 付近で最小となり、それ以上の粒径に対して偏わい度は増加する。両者のこのような関係を以下では三次曲線の関係と呼ぶことにする。この関係より、図中の一点鎖線が偏わい度 1.0 と交わる場所の中央粒径 0.17 mm , 0.35 mm , 0.65 mm 付近の底質粒度分布は左右対称になっており、中央粒径 $0.20 \text{ mm} \sim 0.35 \text{ mm}$ の範囲の粒度分布は粒径の大きい方向に偏り、中央粒径 $0.35 \text{ mm} \sim 0.65 \text{ mm}$ の範囲では小さい方向に偏っていること等が推察できる。

中央粒径とふるい分け係数の間の二次曲線関係、中央粒径と偏わい度との間の三次曲線の関係についても、章をあらためて考察する。

4. 底質粒度分布の分類とその空間分布特性

4.1 底質粒度分布のパターン

採取した底質の全サンプル (715 サンプル) について、粒度分布を調べたところ、分布形状は6つのパターンに分類できることが分かった。図-8 は、6つのパターンの代表的な粒度加積曲線 (左側) と粒度分布 (右側) である。この図では、下段方向に中央粒径が小さくなるように並べてある。なお、各粒度分布パターンに含まれるサンプル数は、表-4 にまとめて示してある。

各粒度分布パターンの特徴を図-8 に基づいて述べると、以下のとおりである。

- ① 大粒径単峰型粒度分布：(記号▲)
粒径 0.7 mm にモードを有する単峰型の粒度分布である。左右対称の単峰型であるので、ふるい分け係数は小さく、偏わい度は 1.0 程度になる。
- ② 双峰型粒度分布 (右山大)：(記号●)
粒径 0.7 mm に大きなピークを (右山大)、粒径 0.18 mm に小さなピークを有する双峰型の粒度分布である。粒度が広い範囲に分布するので、ふるい分け係数は大きくなる。また全体の分布は左右非対称であり、偏わい度は 1.0 より小さい。
- ③ 双峰型粒度分布 (左右対称)：(記号◎)
粒径 0.7 mm と 0.18 mm に同程度のピークを有する双峰型の粒度分布である。粒度が広い範囲に分布しているので、ふるい分け係数は大きい。しかし、全体の粒度分布は左右対称型であるので偏わい度は 1.0 程度になる。
- ④ 中粒径単峰型粒度分布：(記号△)

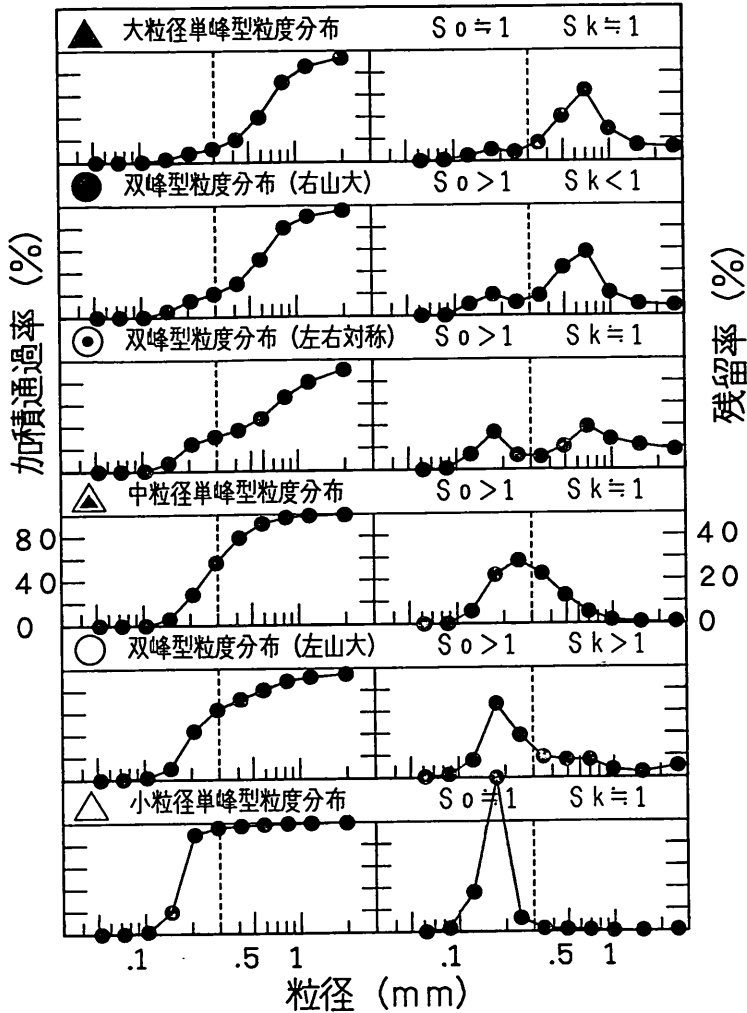


図-8 底質粒度分布のパターン分類

粒径 0.3mm 付近にモードを有する単峰型の粒度分布である。分布形状は、全体になだらかな山形になっているので、ふるい分け係数は比較的大きくなるが、左右対称の分布であるので偏り度はほぼ 1.0 になる。

⑤ 双峰型粒度分布 (左山大) : (記号○)

粒径 0.18mm に大きなピークを (左山大), 粒径 0.7mm に小さなピークを有する双峰型の粒度分布である。粒度が広い範囲に分布するので、ふるい分け係数は大きくなる。また全体の分布は左右非対称であり、粒径の大きい側に広く分布しているので偏り度は 1.0 より大きくなる。

⑥ 小粒径単峰型粒度分布 : (記号△)

粒径 0.18mm にモードを有する単峰型の粒度分布であり、全体の 82.6% のサンプルがこのパターンに含まれる。すなわち、最頻出現粒度分布である。この分布は、鋭い山形になっていて、ふるい分け係数は 1.0 に近い。また左右対称分布であることから、偏り度は 1.0 となる。

以上に述べた各粒度分布パターンのふるい分け係数 S_0 と偏り度 S_k の概略値は、図-8 に示してある。この関係を、中央粒径が連続的に大きくなる方向、つまり図-8 の下段から上段に向かって見れば、中央粒径が大きくなるにつれて、ふるい分け係数は最初 $S_0=1.0$ であったものが、 $S_0>1.0$ となり、最上段で再び $S_0=1.0$ となる。これは、図-6 に認められた両者の間の二次曲線関

表-4 粒度分布パターンに含まれるサンプル数

記号	粒度分布パターン	サンプル数(%)	小	中	大
▲	大粒径単峰型粒度分布	11 (1.5)			○
●	双峰型粒度分布 (右山大)	12 (1.7)	△		○
△	双峰型粒度分布 (左右対称)	7 (1.0)	△	△	
◎	中粒径単峰型粒度分布	17 (2.4)			○
○	双峰型粒度分布 (左山大)	77 (10.8)	○		△
△	小粒径単峰型粒度分布	591 (82.6)	○		
計		715(100.0)			

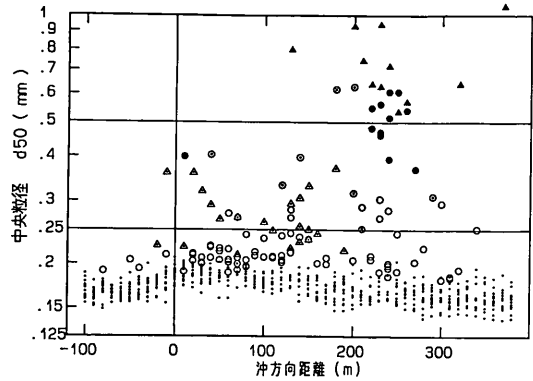


図-9 粒度分布パターンの岸沖分布

係に相当する。一方、偏わい度は、中央粒径が大きくなるにつれて、 $S_k \equiv 1.0$ から $S_k > 1.0$ となった後に $S_k \equiv 1.0$ となり、そして $S_k < 1.0$ を経て最終的に再び $S_k \equiv 1.0$ になる。この変化は、図-7 に認められた両者の間の三次曲線関係に相当する。すなわち、二次曲線、三次曲線の関係は、粒度分布が単峰型および双峰型になっているために現れたものである。

図-8 に示した6つの粒度分布パターンは、

- 小粒径単峰型粒度分布
- 中粒径単峰型粒度分布
- 大粒径単峰型粒度分布

の3種類の底質が適度に混合した結果であるともいえる。これらの基本粒度分布を有する底質の混合の程度と、各粒度分布パターンの対応について、表-4 の右覧に表示した。表中の記号は各基本粒度分布の底質が含まれる程度を表し、○印は含有が多いことを、△印は少ないことを意味し、無記入は含まれていないことを意味する。

4.2 粒度分布パターンの空間分布

図-9は、中央粒径の岸沖分布を、粒度分布パターンの略記号(図-8参照)で分類して表示したものである。ただし、小粒径単峰型粒度分布については、データ数が多く記号が重なり合うため、(・)で表示した。図によると、最頻出現粒度分布パターンである小粒径単峰型粒度分布(・)は、岸沖方向全域にわたってプロットされている。また、わずかに大粒径を含む双峰型粒度分布(左山大)(○)もほぼ全域にわたって点在する。これに対して、中粒径単峰型粒度分布(△)の出現する領域は、P-20m~190mに限られており、大粒径を多く含む大粒径単峰型粒度分布(▲)と双峰型粒度分布(右山大)(●)は特にP200m~260mに限られる。

図-10 は、底質採取日の海底断面に底質採取地点の粒

度分布パターンを略記号(図-8参照)を重ねて、調査年月日順に表示したものである。最頻出現粒度分布パターン(△)以外の粒度分布パターンが出現する領域は地形変化が大きいうである。そこで、水深と中央粒径を粒度分布パターン別に表示する。

図-11 は、横軸に各採取地点の採取時の海底レベル(D.L.基準)をとって、中央粒径を粒度分布パターン別に表示したものである。小粒径単峰型粒度分布(・)に注目すると、レベル0m付近の中央粒径が大きく0.18~0.20mmとなっており、それよりも水深が深くなるにつれて徐々に小さくなり、レベル-5mでは0.16mm程度になる。同様に、レベルの正方向(岸方向)にも小さくなる。つまり、海底レベルと中央粒径の間には図中に直線で示した関係がある。一方、他の粒度分布パターンは、ほとんどの場合レベルが負の範囲にあり、中央粒径は水深が深くなるほど大きくなる。このため、例えば-5mの海底レベルの中央粒径は0.16~0.20mm程度か0.7mm前後になる。

また、図-11によると、破線に沿って粒度分布パターンがまとまっている。つまり、レベルが低くなる(水深が深くなる)につれて、粒度分布パターンは中粒径単峰型粒度分布(△)、双峰型粒度分布(右山大)(●)、大粒径単峰型粒度分布(▲)へと変化する。

5. 荒天時の底質の岸沖方向ふるい分け

5.1 底質粒度分布の変化の実態

今回調査した15回のうち、1987年6月17日と6月23日は時化の前後のものである。図-12 は、これらの底質採取日前後の沖波有義波高および周期の経時変化である。6月17日に底質採取した前後は沖波有義波高1.0m程度であった。高波浪は6月20日に来襲しており、波は急激

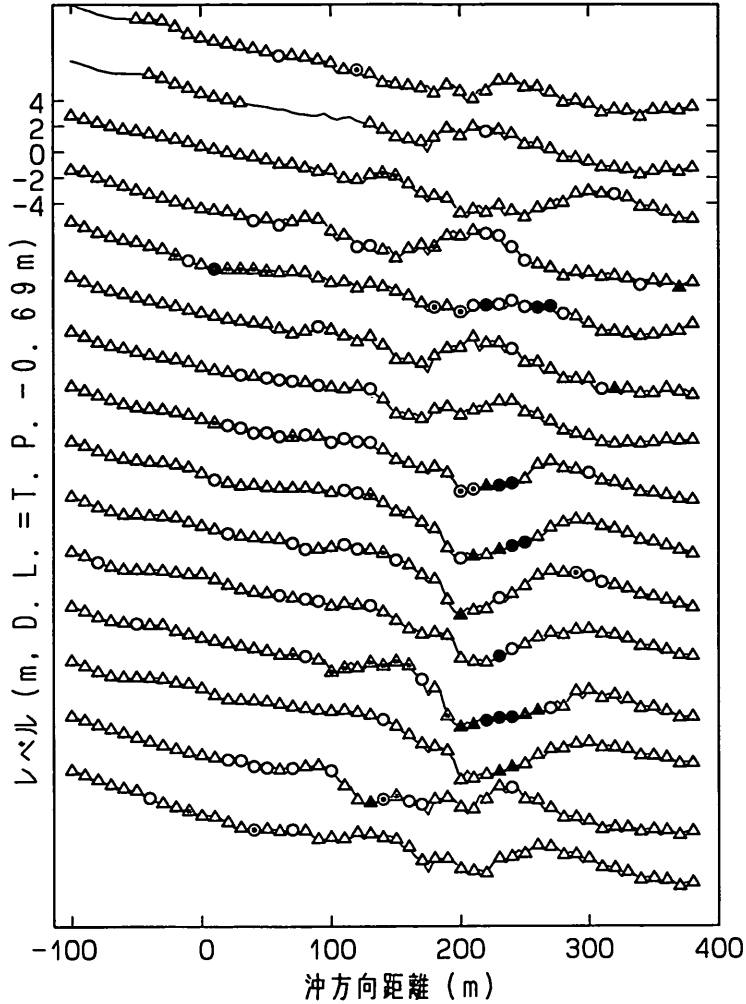


図-10 海底断面と粒度分布パターンの出現位置

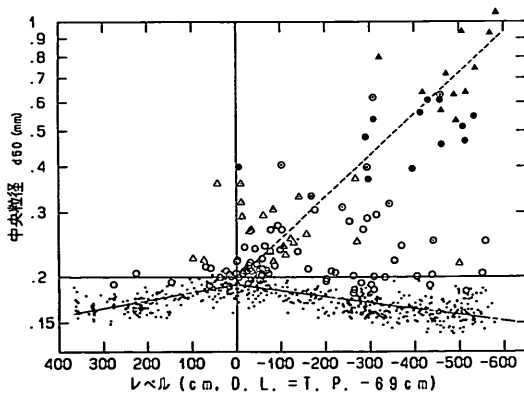


図-11 粒度分布パターンと水深の関係

に発達して同日20時には $H_{1/3}=5.8\text{m}$, $T_{1/3}=9.4\text{s}$ になった。その後波高は徐々に減少し、底質採取を実施した6月23日には約1.0mになった。

図-13は、時化直前(1987年6月17日)の海底断面に底質粒度分布パターンを重ねて示したものである。粒度分布パターンは、図-8で定義した記号に対応する。この図によると、小粒径単峰型粒度分布(Δ)が全域にわたって支配的である。その他、双峰型粒度分布(左山大)(\circ)は5地点、双峰型粒度分布(右山大)(\bullet)は1地点しかない。すなわち、時化直前には全域にわたって小粒径の底質が分布しており、底質の岸沖方向のふり分けは明瞭ではない。

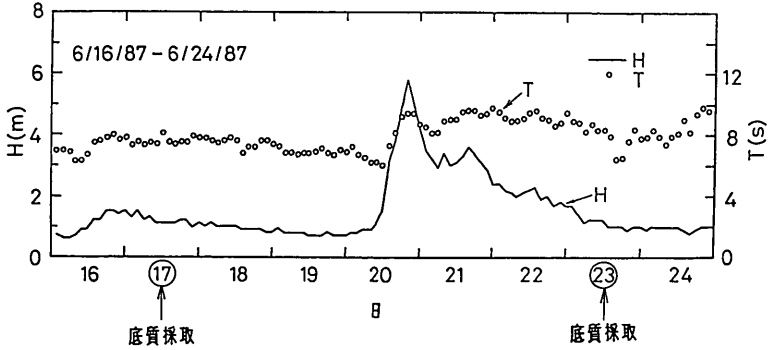


図-12 沖波有義波高, 周期の変化と底質採取日

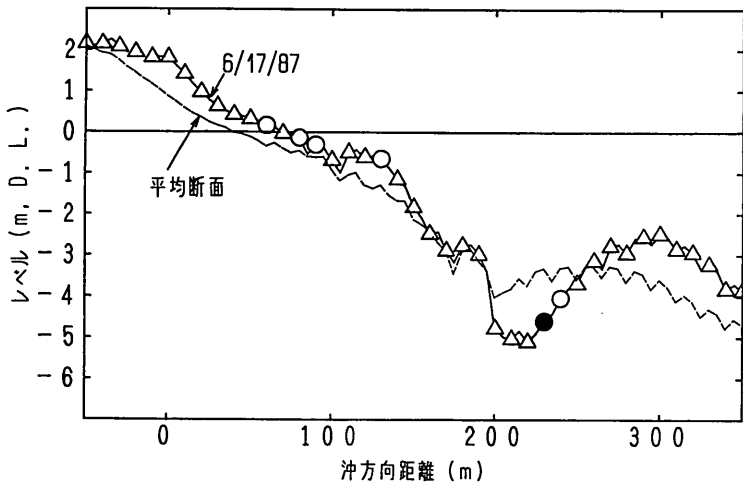


図-13 時化直前 (1987年6月17日) の底質粒度分布

図-14 は、時化直後 (1987年6月23日) の底質粒度分布を図-13 と同様に示したものである。時化直前に全域にわたって分布していた小粒径単峰型粒度分布 (Δ) は、P70m より岸側と P280m より沖側の範囲に限って残った。これに対し、図中 (A) の領域では中粒径単峰型粒度分布 (Δ)、(B) の領域では大粒径単峰型粒度分布になった。

(A) および (B)、(C) 領域の 5~7 データを平均した粒度分布をそれぞれ図-14 中の左下と右上隅に小図で示した。これらの図を相互に比較するために、小図中には粒径 $d=0.3\text{mm}$ のところに破線を描いてある。左下隅に示した (A) 領域の平均粒度分布は、 $d=0.3\text{mm}$ (中粒径) にモードを有する単峰型である。右上隅に示した (B) 領域の分布は、 $d=0.5\text{mm}$ (大粒径) にモー

ドを有する単峰型であり、そして (C) 領域の分布は $d=0.18\text{mm}$ (小粒径) にモードを有する単峰型である。つまり、いずれの領域も単峰型であり、モードとなる粒径は領域固有のものとなる。

5.2 岸沖方向ふるい分け

時化前後の断面を比較すると、(A) 領域では堆積、(B) 領域では侵食、(C) 領域ではわずかな侵食がそれぞれ生じたことが分かる。その結果、(A) 領域の中粒径砂はどこからか運ばれてきたものであり、(B) 領域の大粒径砂および (C) 領域の小粒径砂はもともとそこにあったものであることが推察される。しかし、ここで問題となるのは、(B) 領域の大粒径砂 ($d=0.5\text{mm}$ 前後) は、以下に述べるように時化時の海底面 (底質を採取した海底表面近く) にはなかったことである。

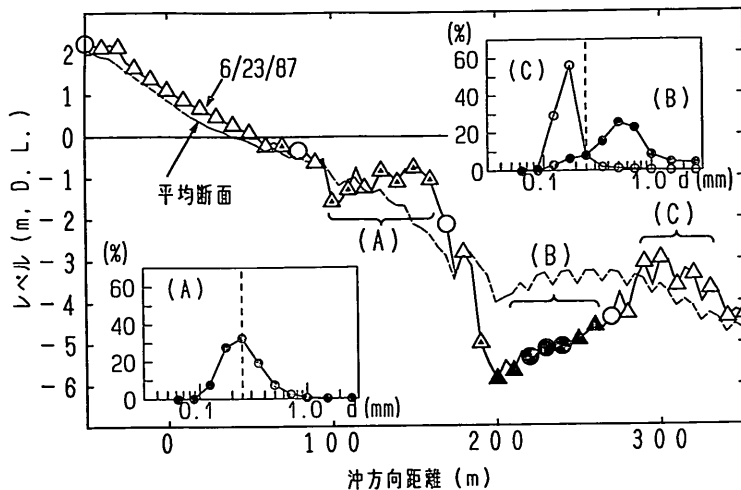


図-14、時化直後（1987年6月23日）の底質粒度分布

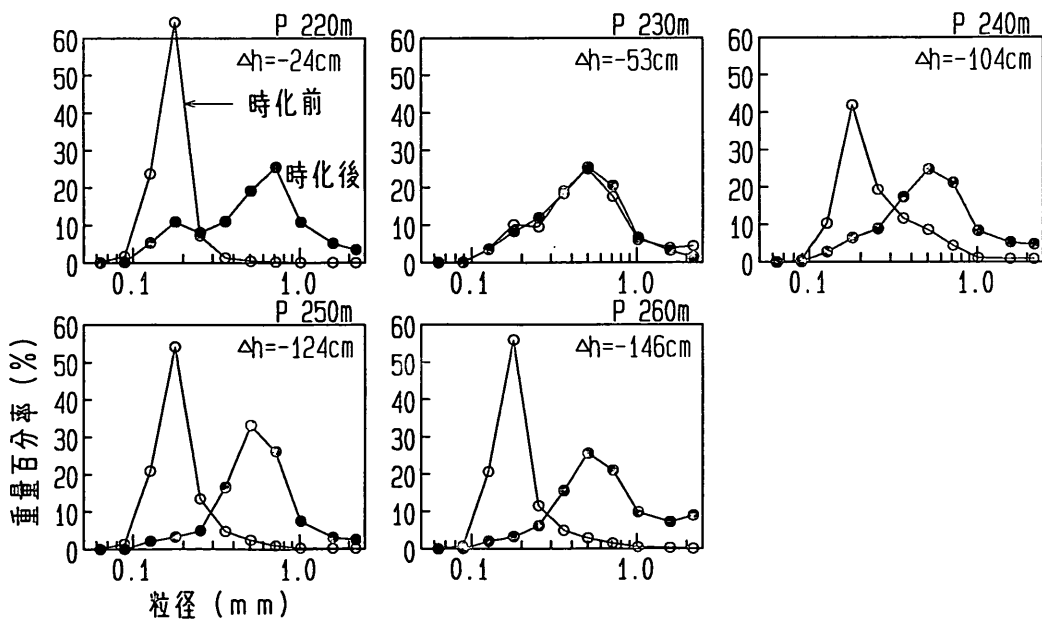


図-15 (B) 領域の時化前後の粒度分布の比較

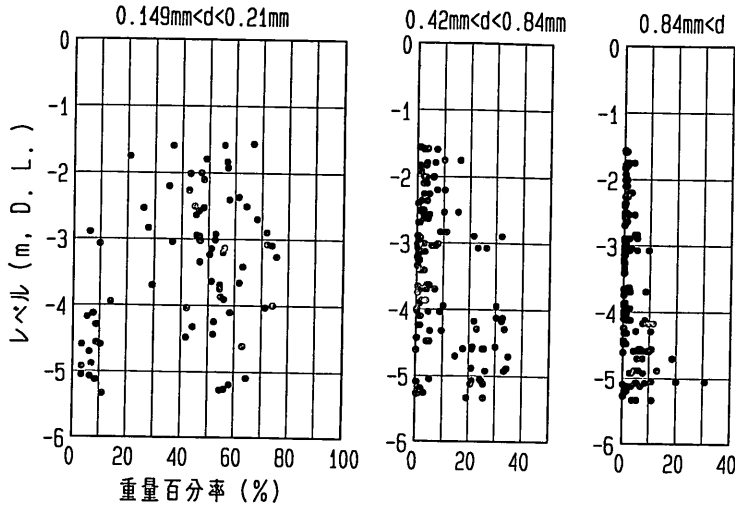


図-16 (B) 領域の海底レベルと粒径別含有率の関係

図-15は(B)領域内にあるP220m~260mの5採取地点の粒度分布を時化前後について比較したものである。各図とも、右上隅に採取地点と時化による海底レベル変化量(マイナスは侵食を意味する)を示した。P230mでは、時化前にすでに $d=0.5\text{mm}$ にモードのある粒度分布になっていて、時化後も同じ粒度分布である。しかし、これ以外の地点では時化前の小粒径($d=0.18\text{mm}$)モード分布から、時化後の大粒径($d=0.5\text{mm}$)モード分布へと変化した。時化前の粒度分布で粒径0.5mm前後の砂の割合を見ると、P240mではある程度含まれていたのに対し、P220m, P250m, P260mの3地点では、ほとんどないことが分かる。つまり、時化前の海底面には必ずしも大粒径砂があったとはいえない。

そうすると、(B)領域が侵食を受けたことによって大粒径砂にモードのある粒度分布になったことは、海底面下の底質特性の鉛直分布について、

- (1) 海底面下には粒径0.5mm前後の砂が含まれていた。侵食時に小粒径砂が取られたため、結果として海底面に大粒径砂が残された。
- (2) 海底面下は、小粒径砂層があり、その下側に大粒径砂層のある層状構造をなしている。侵食によって小粒径砂層が取り除かれ大粒径砂層が現れた。

の2つの可能性を示す。時化直前に底質のコアサンプルを採取していないので、いずれの状態にあったかは断定できない。しかし、(1)の状態にあったことが以下の考察から推察できる。

図-16は、(B)領域のP220m~260mの5採取地点

について、全15回のふるい分け試験の結果に基づき、底質採取時の海底レベルと粒径0.149~0.21mm, 0.42~0.84mm, 0.84mm以上の砂の含有率との関係を示したものである。データの上下方向のバラつきから、調査期間を通じてこの領域ではD.L.-1.5m~-5.2mの海底レベル変化があったことが分かる。しかし、時化前のP220m~260mの平均海底レベルはD.L.-4.11mであり、時化後のそれはD.L.-5.02mであったので、ここではD.L.-4m~-5mの範囲にあるデータに注目する。

この海底レベルの範囲において、小粒径砂に対応する $0.19\text{mm} < d < 0.21\text{mm}$ の砂の含有率は10%以下であるか、40~70%である。同様に、大粒径砂に対応する $0.42\text{mm} < d < 0.84\text{mm}$ の砂の含有率も10%以下であるか、20~35%である。つまり、状況によってそれぞれの含有率は異なる。しかしながら、いずれの含有率もこの海底レベルの範囲内においては鉛直方向にほぼ一様であることから、時化前の海底面下が層状構造になっていたとは考えられず、小粒径砂と大粒径砂の混合が鉛直方向に同じ割合であったと推察される。なお、図-16の右端に示した粒径0.84mm以上の砂の含有率は海底レベルが下がるほど多くなる。

結局、(B)領域の時化前から時化後への粒度分布の変化は荒天時の波の作用により、小粒径砂が取り除かれ大粒径砂が残されるというふるい分け作用によって生じたものである。

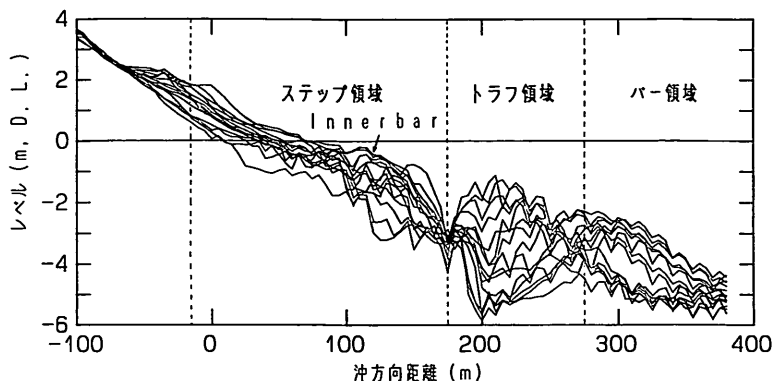


図-17 底質採取日の海底断面地形の重ね合わせおよび各領域の名称

6. 堆積過程の底質の均一化

6.1 領域区分

荒天時の波の作用を受けて、(A)、(B)、(C)領域では固有の粒度分布になることが示された。この特性がその後の波の作用によってどのように変化するかを考察する。この目的で、地形変化の特徴を考慮に入れて3つの領域に分けた。各領域の断面変化の特徴を、底質採取日の海底断面に重ねて表示した図-17に基づいて述べると以下の通りである。

ステップ領域 (P-15m~175m) : この領域の断面変化は前浜部のバームが侵食を受け、浅海部に inner bar が形成されたり、それがまた岸方向汀線付近まで移動してバームをとったりするものである (図-14 中の (A) 領域が含まれる)。

トラフ領域 (P 175m~275m) : この領域はトラフが形成される所である。海底レベルの変化はもっとも大きい。この領域の地形変化は沖側のバー領域の地形変化と関連が深い (図-14 中の (B) 領域に対応)。

バー領域 (P 275m~380m) : この領域は、バーが形成される場所である。バー領域とトラフ領域の地形変化は関連が強く、P 270m 付近に節のある重複モードになっていて、バーが形成されるときにトラフが形成されバーが消滅するとトラフも消滅する (図-14 中の (C) 領域に対応)。

次節以降では、最初にバー領域とトラフ領域の底質変動特性について述べ、その後ステップ領域の底質移動特性について述べる。

6.2 バー領域の底質特性の変動

図-18 は、バー、トラフ領域 (P 180m~350m) に

いて、底質採取日の海底断面に中央粒径を記号で重ねて調査年月日順に表示したものである。各断面に重ねて細い線で示した断面は、底質採取日 (15回) の平均断面である。平均断面より海底レベルが高いところを斜線で、逆に低いところを斑点で表示した。このパターンを見ると、海底地形変化は、P 260m~280m 付近を節とする重複モードになっていて、P 260m より岸側が堆積しているときには沖側が侵食し、逆に岸側が侵食されたときは沖側が堆積していることがよく分かる。

図-18 の各断面上の中央粒径の表示は、

- 白丸 ($d_{50} < 0.23\text{mm}$)
- 黒丸 ($0.23\text{mm} < d_{50} < 0.45\text{mm}$)
- ▲ 黒三角 ($0.45\text{mm} < d_{50}$)

の3段階に区分したものである。バー形成地域 (P 280m より沖側) では、顕著な海底レベル変化が生じているにもかかわらず、ほとんどの場合中央粒径は0.23mm 以下で変化がない。

図-19 は、バー領域の中央粒径とふるい分け係数の関係である。大多数のデータは、中央粒径0.14mm~0.19mm、ふるい分け係数1.07~1.17に集中する。また、図-20は、バー領域の中央粒径と偏り度との関係である。偏り度についても、ほとんどのデータが0.95~1.07に集中していることが分かる。すなわち、バー領域には、海底地形変化が大きいにもかかわらず底質特性の変動はほとんどないという特徴がある。

6.3 トラフ領域の底質特性の変動

図-18 によると、トラフ領域 (P 180m~260m) の中央粒径は、堆積状態のときに小さく、侵食状態のときには大きくなる傾向がある。

図-21, 22 は、それぞれトラフ領域の中央粒径 (d_{50}) とふるい分け係数 (S_0)、偏り度 (S_k) の関係である。

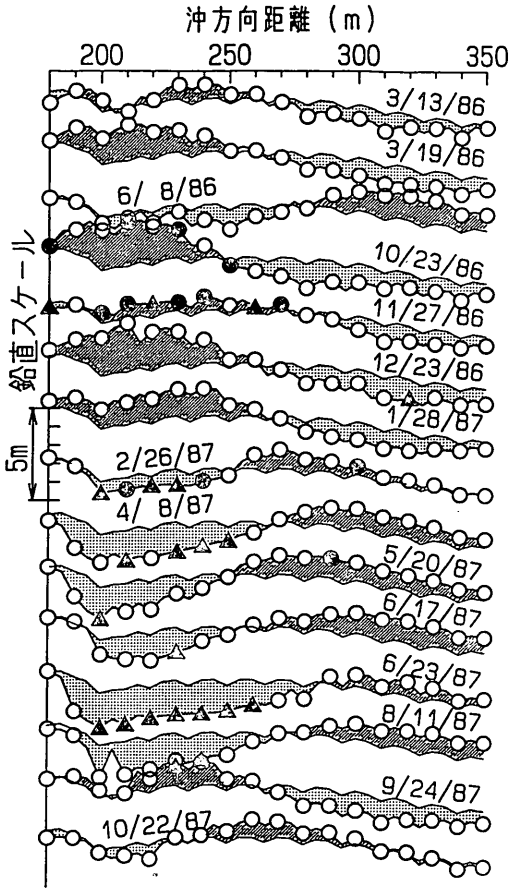


図-18 バー・トラフ領域の海底断面と中央粒径の岸沖分布

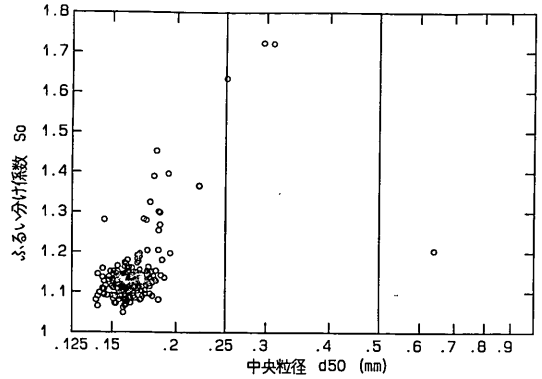


図-19 バー領域の中央粒径とふるい分け係数の関係

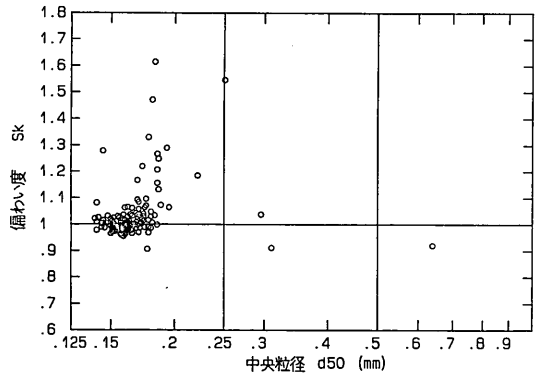


図-20 バー領域の中央粒径と偏わい度の関係

ただし、栈橋中央の隅り場の4本の橋脚近くの採取点であるP200mとP210mのデータは外した。図-21によると、中央粒径とふるい分け係数の間には図中に一点鎖線で示した $d_{50}=0.3\text{mm}$ 付近をピークとする二次曲線関係がある。また、中央粒径と偏わい度の間には、データはややバラつくものの概ね図-22に一点鎖線で示した三次曲線関係が存在する。これらのことから、図-6、7で述べた、中央粒径とふるい分け係数、偏わい度との二次曲線関係および三次曲線関係は、トラフ領域の底質変動特性であったことが分かる。

Sonu (1972), 白井・土屋 (1977), 近藤・谷野 (1978) は、現地の前浜部の底質について、中央粒径とふるい分け係数の間に図-21のような二次曲線関係があることを報告している。さらに Sonu は、中央粒径の異なる2つの粒度組成の底質の混合割合が変化するとき、図-22の

三次曲線関係になることを示した。しかし、今回のような水深の深いトラフ領域についての報告例はない。

図-23は、調査日毎にトラフ領域のP220m~260mの範囲(橋脚の影響の少ないところ)の5地点のデータを平均した平均粒度分布である。ただし、図-23の表示は、中央粒径の大きい順になっていて、調査日順にはなっていないことに留意されたい。最上段の分布は、粒径0.5mm~0.7mmにピークを有する単峰型である。下段方向に移るにつれて、このピークは徐々に小さくなり、粒径0.18mmの所にもう一つのピークが現れて双峰型の粒度分布になる。そして、最下段では小さい粒径の所にピークを有する単峰型の分布となる。ここで、中粒径の単峰型粒度分布がないことに注意されたい。したがって、いずれの分布も、ピーク粒径の異なる2つの粒度分布モード(図-23の最上段と最下段)がある割合で混合した

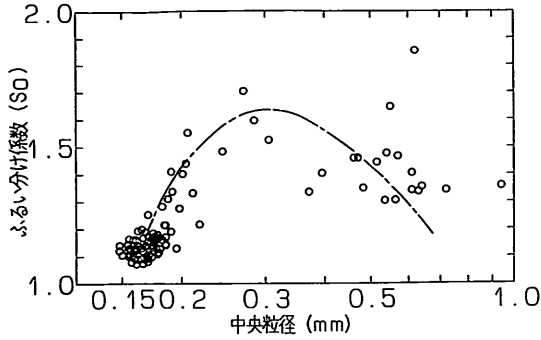


図-21 トラフ領域の中央粒径とふるい分け係数の関係

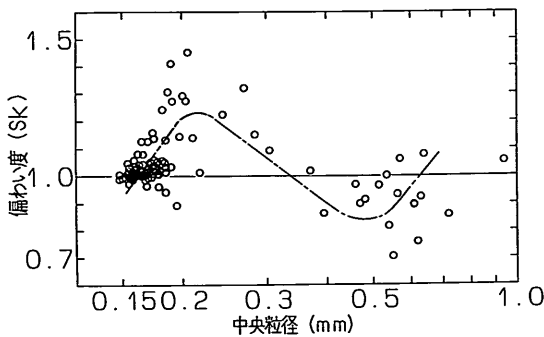


図-22 トラフ領域の中央粒径と偏り度の関係

ものであると見なすことができる。両者の混合の割合を数値的に表す方法として、ここでは各平均粒度分布（図-23）について、粒径0.3mm以下の小粒径底質が含まれる割合を計算した。その結果は、図-23中に百分率で表示してある。

さて、海底面の底質に小粒径底質が含まれる割合は、採取日の状態とともに過去の地形変化とも関係する。例えば、同じ海底レベルであっても、それが侵食を受けた後であるか堆積過程にあるかによって、底質特性が異なる。つまり、底質特性には海底レベル変化の履歴の効果も含まれる。

図-24は、代表的な4例について調査日以前20日間のトラフ領域の平均海底レベル変化を示したものである。各図とも、横軸右端が底質採取日に相当し、調査日を基準に過去に遡った日数をマイナスで表示してある。縦軸はP220m~260mの平均海底レベルである。また同図には、沖波有義波高をもとに計算した一日平均エネルギーフラックスの経時変化も参考のために併せて示した。各ケースの海底レベル変化は以下の通りである。

図-24(a)は海底レベルが徐々に低くなるケース

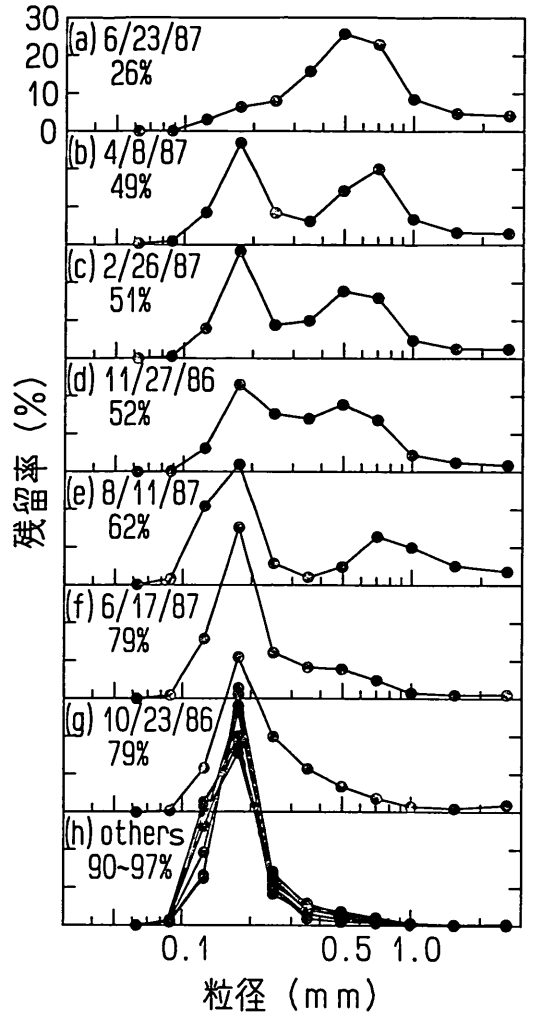


図-23 トラフ領域の平均粒度分布

(b)は海底レベルが一度低下した後、堆積が生じて海底レベルが高くなるケース

(c)は海底レベルが変化しない状態が長期間継続した後に、急激に侵食を受けたケース

(d)は長期間にわたり海底レベルが高くなるケース

である。

図-25はこのような底質採取日以前の海底レベルを模式的に示したものである。太い実線が海底レベルの変化であり、海底レベルが L_1 の状態から侵食を受けて L_2 となった後、堆積がゆっくり生じて底質採取日に L_3 になったことを示してある。最初の海底レベル低下量を h_1

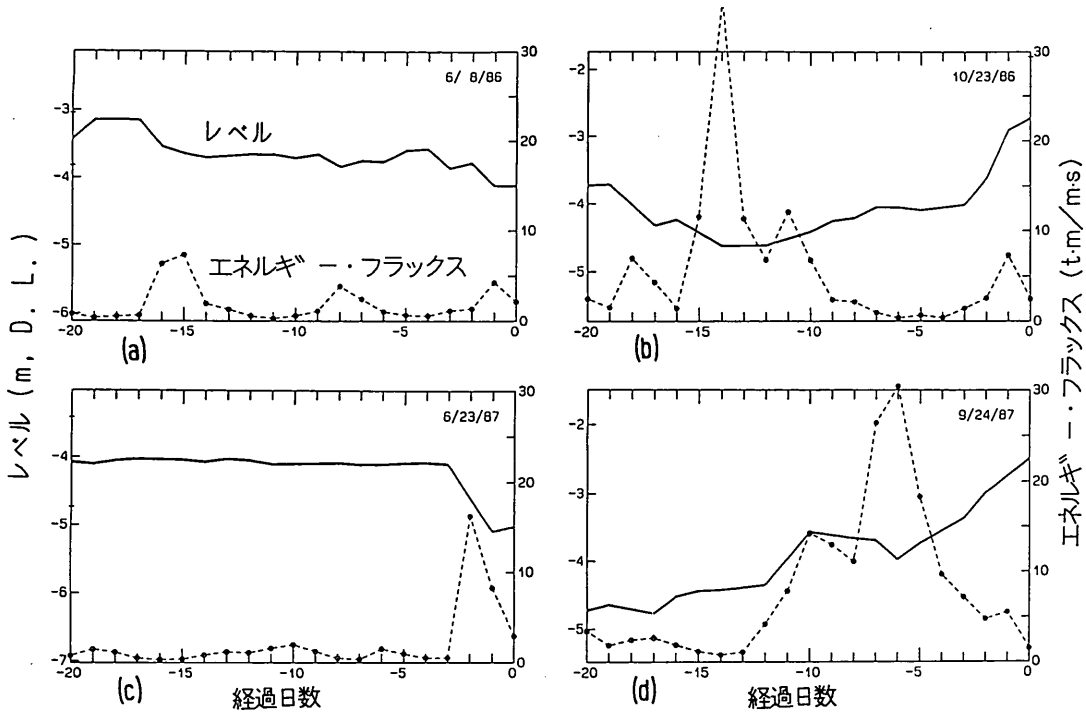


図-24 底質採取日以前のトラフ領域平均海底レベル変化の例

表-5 海底レベル変化の履歴および底質の小粒径重量百分率

調査年月日	調査日海底レベル L_3 (m)	小粒径重量百分率 (%)	堆積海底レベル L_1 (m)	t_1 (日)	侵食海底レベル L_2 (m)	t_2 (日)	侵食量 $h_1 = L_1 - L_2$ (m)	堆積量 $h_2 = L_3 - L_2$ (m)	図-26の記号
'86. 3.13.	-2.82	90.8	—	—	—	—	—	—	○
3.19.	-2.62	91.2	—	—	-3.08	7	—	0.46	○
6. 8.	-4.12	96.8	-3.15	17	—	—	—	—	□
10.23.	-2.73	79.0	-3.71	19	-4.62	14	0.91	1.89	●
11.27.	-2.86	52.1	-2.29	26	-3.02	16	0.73	0.16	●
12.23.	-2.23	92.2	-2.29	52	-3.02	42	0.73	0.79	●
'87. 1.28.	-2.33	91.8	-2.32	7	-2.51	4	0.19	0.18	△
2.26.	-3.72	50.9	-2.13	24	-3.85	19	1.72	0.13	●
4. 8.	-4.57	48.8	-3.08	28	-4.82	15	1.74	0.25	●
5.20.	-3.90	90.1	-3.79	25	-4.45	23	0.66	0.55	●
6.17.	-4.11	78.8	-3.87	23	—	—	—	—	□
6.23.	-5.03	25.7	-4.10	3	-5.10	1	1.00	0.07	●
8.11.	-4.67	61.9	-4.10	52	-5.10	50	1.00	0.43	●
9.24.	-2.49	94.2	—	—	-4.77	17	—	2.28	○
10.22.	-3.14	95.0	-2.47	10	-3.39	5	0.92	0.25	●

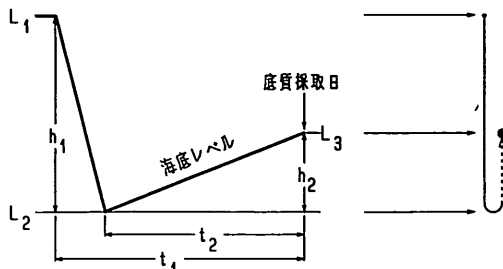


図-25 リラフ領域の平均海底レベル変化の様式図と物理量の定義

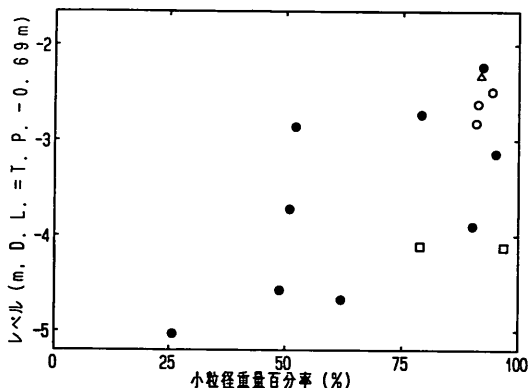


図-26 海底レベル変化の履歴を考慮した海底レベル変化と小粒径重量百分率の関係

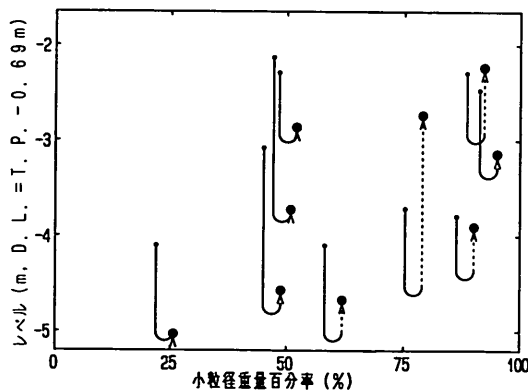


図-27 トラフ領域の海底レベル変化の履歴と小粒径重量百分率の関係

とし、この間の日数を t_1 とする。その後海底レベルが上昇した量を h_2 とし、その間の日数を t_2 とする。このように定義すると、図-24(a)~(d)の海底レベル変化の概略を数値に置き換えられる。

表-5は、図-25に定義した諸元を各底質採取日以前の海底レベル変化について調べた結果である。表-5の最後の列には、過去の海底レベルの変化を分類して記号で表現した。すなわち、

- 印：徐々に海底レベルが低下したケース
- △印：過去にわずかに海底レベル低下があったものの、その量が他に較べて小さいケース
- 印：66~170cmの海底レベル低下があった後に、レベル上昇があったケース
- 印：単調に海底レベルの上昇があったケース（ただし、海底断面の測定は1986年3月13日から開始しており、この日以前の海底レベルは不明である。また、同年3月19日の底質採取に対しては3月13日まで（7日間）しか遡って調べることが出来ない。これら2つのケースを含める。）

である。

図-26は、トラフ領域の平均海底レベルと小粒径重量百分率の関係を、表-5右端の列に示した記号で区別して示したものである。おおまかな傾向としては、平均海底レベルが低い（侵食を受けてトラフが形成された状態）ほど、小粒径重量百分率は小さく、海底レベルが高い（堆積している）ほど小粒径重量百分率が大きくなる。さらに過去の海底レベルの変化を区分した記号の種類に注目すると以下のことが分かる。○印と□印のケースは、図中の右寄りにプロットされている。すなわち、底質採取前のある程度以上の侵食（海底レベルの低下）が生じていないときには、小粒径重量百分率が大きい。侵食が生じていた場合でも、それが長期に渡って徐々に進行した場合（□印）には、海底レベルが相対的に低くても、底質の粒度特性に小粒径の含まれている割合が多い。一方、66cm以上の海底レベル低下が生じた後に、海底レベルが上昇したときの底質（●印）は、小粒径重量百分率が25~95%の間に広く分布する。

図-27は、●印のデータについて過去の海底レベルの変化をグラフ上に表示するために、図-25の右側に表示したようにの L_1 レベルを小さな白丸で、海底レベルが低下して L_2 のレベルになるまでを実線で、そしてその後の堆積を上向き矢印の破線でそれぞれ表示したものである。この図によると、小粒径重量百分率が75%以下の場合には、侵食後の堆積量が少ない。一方、75%以上の場合には、3つのケースにおいて侵食の堆積が多く、底質採取時の海底レベルは侵食前のレベルまであるいはそれ以上の高さまで上昇した。つまり、海底レベルの大きな低下（侵食）が生じた後の堆積量が少ないほど、小粒径重量百分率の割合が少ない。

表-6 小粒径重量百分率と堆積経過日数の関係

調査年月日	調査日海底レベル L_3 (m)	小粒径重量百分率 (%)	t_1 (日)	t_2 (日)	侵食量 $h_1 = L_1 - L_2$ (m)	堆積量 $h_2 = L_3 - L_2$ (m)
'87. 6. 23.	-5.03	25.7	3	1	1.00	0.07
'87. 4. 8.	-4.57	48.8	28	15	1.74	0.25
'87. 2. 26.	-3.72	50.9	24	19	1.72	0.18
'86. 11. 27.	-2.86	52.1	26	16	0.73	0.16
'87. 8. 11.	-4.67	61.9	52	50	1.00	0.43

の小さい順に示した。表-6で興味あることは、小粒径重量百分率が大きくなるほど、海底レベルの上昇が継続した日数 t_2 が長くなることである。試みに、小粒径重量百分率と平均海底レベルの上昇継続日数の関係をプロットすると、図-28 のように、両者の間には図中に破線で示した関係がある。

また、表-6に示した順番は、中央粒径の大きい順に粒度分布を表示した図-23 と同じ順番になっている。したがって、底質採取は定期的に行われたものであるけれども、図-23 のようにならべた結果は、トラフ領域が大きな侵食を受けてからの経過日数順になっていると見なすことができる。この観点にたつと、トラフ領域の中央粒径とふるい分け係数、中央粒径と偏わい度の関係の時間変化は、図-29、30 に示したようになる。つまり、トラフ領域では大きな時化が来襲して海底が侵食を受けたとき、図-29 に示すように大きな粒径でふるい分け係数が1.0に近い底質特性になる。その後の堆積過程では時間の経過とともに一点鎖線で示した二次曲線に沿って中央粒径の小さい方に変化する。一方、偏わい度については、図-30 に示すように時化直後に大粒径で偏わい度≒1.0の状態になり、その後一点鎖線で示した三次曲線に沿って徐々にもとの小粒径底質にもどる。

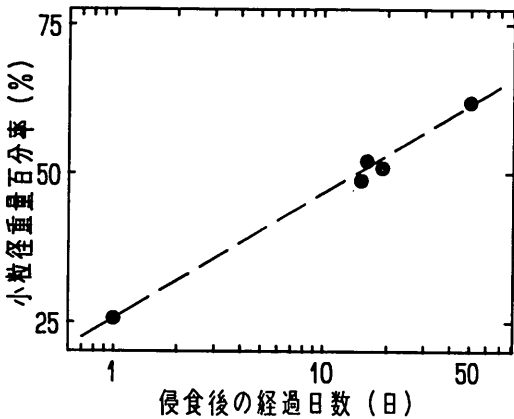


図-28 小粒径重量百分率と海底レベル上昇の継続日数

表-6に、図-27に示したデータのうち、小粒径重量百分率が75%以下の5ケースについて、小粒径重量百分率

6.4 ステップ領域の底質変動特性

時化直後には、ステップ領域内の沖側寄りに中粒径単峰型粒度分布 (Δ) が現れる (図-14)。この粒度分布は、バー領域、トラフ領域には一度もなかった。

図-31 は、中粒径単峰型粒度分布となる位置を Δ 印で示したものである。ただし、この表示においては、図-

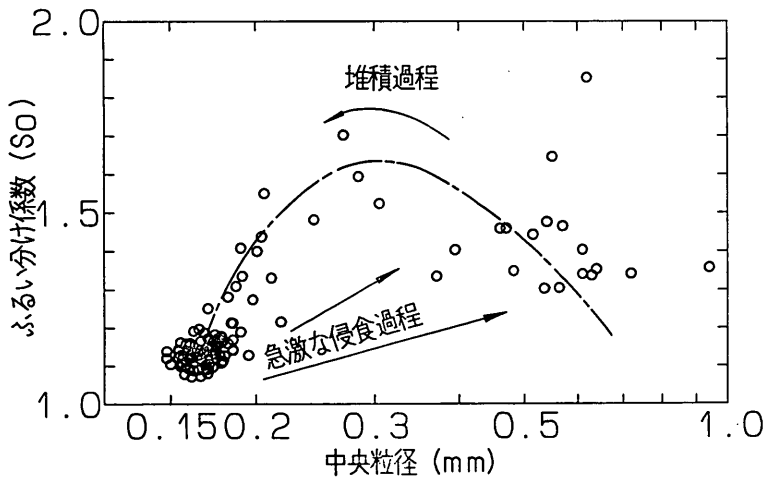


図-29 トラフ領域の中央粒径とふるい分け係数の関係の履歴

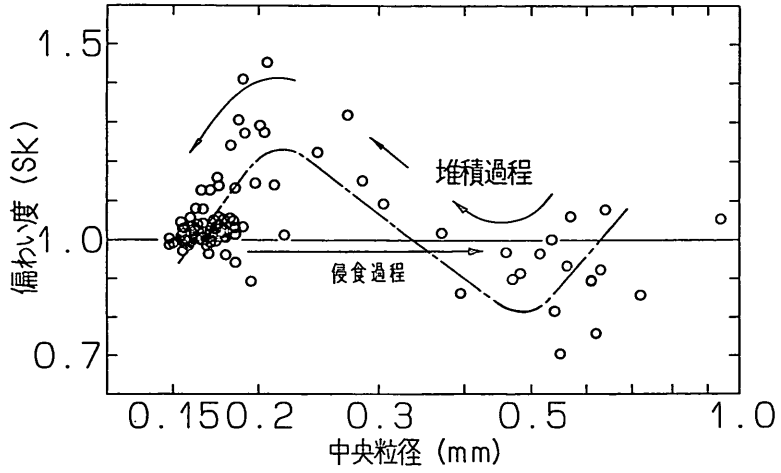


図-30 トラフ領域の中央粒径と偏わい度の関係の履歴

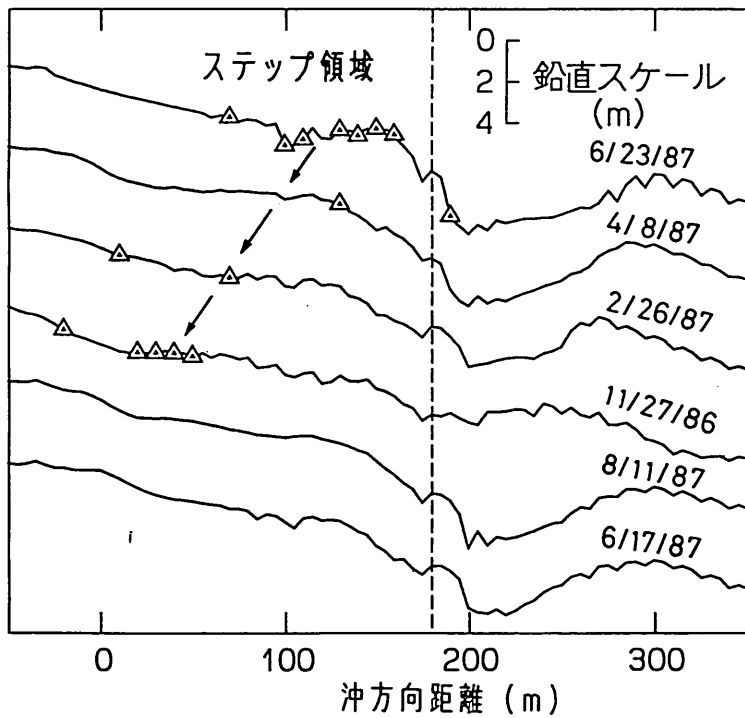


図-31 中粒径単峰型粒度分布の存在地点

23 の上段から6段目までに対応した順番（つまり，トラフ領域で大きな海底レベル低下があった後の経過日数順）で表示してある。このことを念頭において図-31を見ると，次のようなことが分かる。時化直後である最上段では，中粒径の底質がステップ領域の沖側端に集中して存在する。その後，時間の経過とともに中粒径の底質は徐々に岸方向に移動し，最終的には明確な中粒径単峰型粒度分布となる地点はなくなる。

極浅海域であるステップ領域において，荒天時に中粒径底質が沖方向に移動し，その後穏やかな海象条件下で岸方向に移動することは，すでに Sonu (1972) が現地データに基づいて報告している底質の移動特性と一致する。Sonu は，前浜部の中粒径の底質は，荒天時に沖に運ばれ inner bar を形成し，その後 inner bar は穏やかな入射波のもとで徐々に岸方向に移動して最後に前浜に乗り上げバームを形成すると説明した。

6.5 堆積過程の底質特性の変化

本章での以上の考察から推察される碎波帯内の底質特性の変化をまとめると，図-32 のようになる。図中の小粒径および中粒径，大粒径とはそれぞれ 0.18mm, 0.3mm, 0.5mm 程度の底質に対応する。

図-32 には，上段に時化直後の底質状態を示し，下段方向にその後の穏やかな波の入射が継続したときの堆積過程での海底断面および底質特性の変化を示してある。すなわち，底質特性の変化は以下の通りである。

[ステップ領域]：ステップ領域では，中粒径砂が現れる位置が岸沖方向に移動することが特徴的であ

る。中粒径砂は時化直後にステップ領域の沖側端に集中して現れ，その後の堆積過程に徐々に岸方向に移動する。最後にはその場に支配的な小粒径底質と混合し，検出ができなくなる。中粒径砂をモードとする粒度分布はステップ領域内に限られており，その沖側のトラフ領域・バー領域にはない。

[トラフ領域]：トラフ領域では，大粒径砂と小粒径砂の混合割合が変化するという特徴がある。時化直後のトラフ底は，大粒径砂だけの底質特性になる。その後の堆積過程では，海底レベルが上昇するにつれて徐々に小粒径砂が加わり，粒度分布は大粒径と小粒径のところにピークのある双峰型粒度分布特性になる。さらに堆積が進行すると，小粒径だけの単峰型粒度分布になる。トラフ地形と沖側のバー地形の形成・消滅の地形変化は重複モードになっているので，トラフ領域への小粒径砂の移動はバー領域からであると考えられる。

[バー領域]：バー領域の特徴は，地形変化（海底レベル変化）が生じて，常に小粒径砂が存在することである。時化直後にバーが形成されたときの小粒径砂の堆積は，トラフ領域から移動して来たものであると考えられる。バーを構成していた小粒径砂はその後の堆積過程にトラフ領域に移動する。

結局，時化によって岸沖方向にふるい分けられた底質

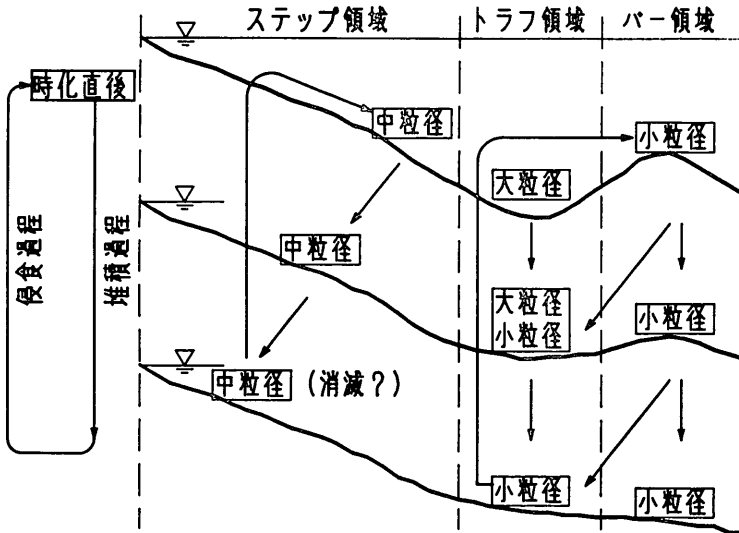


図-32 碎波帯内の底質粒径別移動特性の概略

は、その後の波の作用によって時間とともに全域において小粒径になる（底質特性の均質化）。

7. ま と め

砕波帯内の底質粒径は一定ではなく、変動する。その特性は以下のとおりである。

- (1) 砕波帯内の底質の波による岸沖方向ふるい分けは、時化時に生じる。その結果、沖のバーが形成される領域では粒径 0.18mm, トラフ領域では粒径 0.5mm, そして極浅海部のステップ領域ではその沖よりにおいて粒径 0.3mm にモードを有するいずれも単峰型の粒度分布となる。
- (2) 時化時の波でふるい分けられた底質は、その後の穏やかな波の作用によっていずれの領域においても粒径 0.18mm にモードを有する単峰型粒度分布へと徐々に変化する。
- (3) 時化後の各領域の底質粒度の細粒化への過程は以下の通りである。
 - [バー領域]：バー領域では、大きな地形変化が生じるにもかかわらず、常に小粒径砂（中央粒径 0.18mm）が存在する。ここにある小粒径砂はその後の堆積過程にトラフ領域に移動する。
 - [トラフ領域]：時化直後に大粒径砂（粒径 0.5mm）であったものが、その後の堆積過程では海底レベルが上昇するにつれて徐々に小粒径砂が加わり、粒度分布は大粒径と小粒径のところにピークのある双峰型粒度分布になる。さらに堆積が進行すると、小粒径だけの単峰型粒度分布になる。
 - [ステップ領域]：時化直後に、ステップ領域の沖側寄りの底質粒度は中粒径砂（粒径 0.3mm）をモードとする単峰型粒度分布である。この粒度分布となる位置はその後の堆積過程に徐々に岸方向に移動する。最後にはその場に支配的な小粒径底質と混合し、検出できなくなる。中粒径単峰型粒度分布はステップ領域内に限られて出現し、トラフ領域・バー領域にはない。

最後に、底質採取には水産庁水産工学研究所環境分析研究室日向野純也研究官が参加したこと、および図面の

整理で漂砂研究室中村聰志研究官の手をわずらわせたことをここに記し謝意を表する。

(1990年3月31日受付)

参 考 文 献

- 1) 加藤一正・柳嶋慎一・村上裕幸・末次広児 (1987)：汀線位置の短期変動特性とそのモデル化の試み、港湾技術研究所報告、第26巻、第2号、pp.63-96.
- 2) 合田良実・佐藤昭二 (1981)：(新訂版)海岸・港湾、わかり易い土木講座17、土木学会編、彰国社、396p.
- 3) 近藤叔郎・谷野賢二 (1978)：イタンキ海岸の海浜変形過程、第25回海岸工学講演会論文集、pp.260-263.
- 4) 白井 亨・土屋義人 (1977)：大潟海岸における海浜地形と底質特性の関連について、第24回海岸工学講演会論文集、pp.206-210.
- 5) 水理公式集 (1971)：昭和46年度改訂版、土木学会編、616p.
- 6) 高山知司・平石哲也・高山 優 (1988)：多方向不規則波の斜面上における砕波特性、第35回海岸工学講演会論文集、pp.182-186.
- 7) 土木学会編 (1974)：土木工学ハンドブック下巻(海岸)、技報堂、p.2250.
- 8) 服部昌太郎 (1987)：海岸工学、土木系大学講義シリーズ18、コロナ社、230p.
- 9) 日向野純也・安永義暢 (1988)：解放性砂浜域における海底地形変化と二枚貝の分布性状について、第35回海岸工学講演会論文集、pp.767-771.
- 10) 堀川清司 (1973)：海岸工学、海洋工学への序説、東京大学出版会、317p.
- 11) Bascom, W. N. (1951)：The relationship between sand size and beach-face slope, *Transactions of A. G. U.*, Vol. 32, No. 6.
- 12) Bowen, A. J. (1980)：Simple models of nearshore sedimentation; beach profiles and longshore bars. in *The Coastline of Canada, Geological Survey of Canada*, pp.1-11.
- 13) Coastal Engineering Research Center (1977)：*Shore protection manual*, Vol. 1, pp.4-81 to 4-84.
- 14) Komar, P. D. (1976)：Coastal Process and sedimentation, *Prentice-Hill*, 429p.
- 15) Richmond, B. M. and A. H. Sallenger (1984)：Cross-shore transport of bimodal sands, *Proc. of 19th ICCE*, pp.1997-2007.
- 16) Sonu, C. J. (1972)：Bimodal composition and cycle characteristics of beach sediment in continuously changing profiles, *Jour. of Sedimentary Petrology*, Vol. 42, No. 4, pp.852-857.