

沿岸域の水理環境とウバガイの
漁場形成機構に関する研究

中 村 義 治

Studies on the Fishing Ground Formation
of Sakhalin Surf Clam and the Hydraulic
Environments in Coastal Region

by

Yoshiharu NAKAMURA

目 次

序	文	6
第 1 章	福島沿岸の海岸地形と沿岸流	7
第 1 節	常磐海域の海岸地形と海洋構造	7
第 2 節	沿岸域の流速変動特性	8
2. 1	観 測	10
2. 2	データ処理	10
2. 3	解析結果	10
	沿岸流の平均値と標準偏差の大きさ	10
	流れの主方向と流跡	14
	流速変動の相互相関係数	16
	流速変動の卓越周期	18
2. 4	考 察	21
	陸棚波について	21
	陸棚波の伝播特性	21
2. 5	要 約	25
第 3 節	沿岸流の流速分布	26
3. 1	浮標追跡実験（防波堤周辺の沿岸流の構造）	26
3. 2	流 速 分 布	27
	対数境界層	27
	防波堤後流域の流速分布	27
3. 3	考 察	30
	対数境界層における運動量方程式の構成	30
	物理パラメータと時空間スケール	33
第 4 節	沿岸流境界層の構造と機能	34
4. 1	観測資料と処理方法	34
4. 2	観測結果と考察	34
	沿岸流のシアー構造	34
	拡散特性	39
第 2 章	沿岸域における底面環境特性	42
第 1 節	電導度砂面計による海底面の時系列変動と基質構造	42
1. 1	観測方法と底質の分析方法	42
1. 2	結果と考察	42
第 2 節	底質と漂砂変動の岸沖分布	47
2. 1	解析資料	47
2. 2	結果と考察	47
	平均水深・水深変動幅・シルト含有率の岸沖分布	47
	岸沖漂砂の時間変化	52

第 3 章	沿岸域におけるウバガイの初期生活史	57
第 1 節	ウバガイの資源変動性と漁場環境特性	57
1. 1	解析資料と測定方法	57
1. 2	結果と考察	59
	漁獲量と資源発生量の年次変化	59
	再生産関係と初期減耗の安定時期	61
	漁場の地理的条件と漁場生産性	64
	稚貝の形状と潜砂深度及び沈降速度	66
	底質環境と稚貝の生残率	68
	漁場形成についての仮説	68
第 2 節	大量発生の水理学的条件	73
2. 1	材料と方法	73
2. 2	結 果	74
	浮遊幼生期における流速変動特性	74
	発生稚貝密度と平均流速値の関係	82
	磯部漁場での浮遊幼生分布	82
2. 3	考 察	85
第 3 節	波による二枚貝の輸送モデルと漁場形成機構	89
3. 1	漂砂機構の概要	89
3. 2	二枚貝の資源動態方程式	94
3. 3	稚貝の岸沖輸送量のモデル化	95
3. 4	福島沿岸における計算	102
	計算の対象と条件	102
	計算結果の考察	104
3. 5	モデルの応用	109
3. 6	要 約	110
第 4 章	結 語	111
第 1 節	要 旨	111
第 2 節	今後の問題点	112
謝 辞	114
参考文献	115

Studies on the Fishing Ground Formation of Sakhalin Surf Clam and the Hydraulic Environments in Coastal Region

Yoshiharu Nakamura

Abstract

1. INTRODUCTION

The objectives of the present study are to examine the characteristics of hydraulic environments and life cycle of Sakhalin Surf Clam *Spisula sachalinensis* on the Fukushima Coast, and to determine predominant factors and mechanism controlling the annual production and fishing ground formation of this species.

2. TEMPORAL VARIATION OF COASTAL CURRENT FIELD

The following characteristics are obtained for the current field in the coastal region within 15 km from the shore through analyzing field measurement data. (1) Oscillatory currents with periods of 3 to 4 days occur generally except in summer, the power of which is greater than that of tidal currents. (2) The principal direction of the currents is alongshore, i.e. parallel to contour lines: barotropic oscillatory currents propagate at a speed of less than 10 km/hour looking at the shore on their right-hand side. (3) A high correlation was found between current records obtained simultaneously at points separated largely in the long-shore direction. The wave length of this oscillation is over 100km. (4) This large scale oscillation is considered to be a continental shelf wave.

3. STRUCTURE AND FUNCTION OF COASTAL CURRENTS

A tendency of logarithmic decrease was observed in the cross-shore distribution of the current velocity within 1 km from the shore. A two-dimensional float experiment also indicated the importance of the bottom friction. It was suggested that diffusion was suppressed and alongshore dispersion was enhanced owing to the shear effect of the longshore current developed in a coastal boundary layer, i.e. the velocity decrease region.

4. BOTTOM ENVIRONMENT IN COASTAL REGION

Since the outer margin of the coastal boundary layer corresponds to the region where critical water depth for sediment initial movement exists, it is expected that the sediment transport plays an important role to the distribution of the surf clam. Field observation revealed the following facts. (1) Observations by a wave gauge and a conductivity sediment meter at a point with 10 m water depth showed that sea bed was eroded by about 6 cm by wave-induced resuspension of sediments when the significant wave height became larger than 1 m, and that it recovered by deposition as the waves became small. Mixing layers were also found to form in the surface layer of the bed owing to sediment transport. (2) An analysis was made for data of topographic surveys on three different sites along the Fukushima Coast. It revealed that the regions with active sediment transport were confirmed up to 400m from the shore and to the water depth of 4 to 6m. Bottom height variation reaches 90 cm in maximum. The variation gradually decreases offshore

beyond this point. (3) There was a negative correlation between the bottom height variation and silt contents.

5. FISHERY RESOURCES AND ECOLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE SURF CLAM

The following results were obtained on the fishery resources and ecological characteristics through field observations and laboratory experiments. (1) Annual production of the surf clam varies irregularly, and occurrences of dominant year class support its fishery. (2) Reproduction relation between densities of spawning adult stock and juvenile shells is uncertain. (3) Since the variation of normalized annual catch is similar among different fishing grounds, it is supposed that the production is affected by a large-scale coastal environment rather than the conditions of each fishing ground. (4) The mortality decreases as the shell length becomes over 1 cm, and the amount of resource of this class can give a good basis to estimate future additional catch. (5) Fishing grounds for the surf clam extend in sandy beaches of 5 to 10 m water depth. A condition of a good fishing ground is considerably gentle slope. (6) Silt content is suggested to be an important controlling factor for mortality and growth of juvenile shells. (7) A hypothesis was proposed for fishing ground formation, on the basis of differences in mortality according to water depth and the above considerations of (5) and (6).

6. HYDRAULIC CONDITIONS FOR ABUNDANT PRODUCTION

Variations of coastal currents were analyzed for the period of planktonic larva on the Isohe Coast. This analysis showed that the amount of juvenile shell production had a close correlation with the residual component of the oscillatory currents. A transport model for the planktonic larvae was constructed, then this model was applied to determine the hydraulic condition necessary for an abundant production; the condition is that the residual component is small, so that the planktonic larvae are not transported far out of a fishing ground.

7. MECHANISM OF FISHING GROUND FORMATION

A resource evolution model was proposed on the basis of the above considerations, which takes into account shell growth, cross-shore transport of juvenile shells by waves, and natural mortality caused by bottom sediment conditions. Temporal variations of juvenile shell distribution were simulated for actual fishing grounds by using observed shell growth, bottom sediment conditions, and incident waves. This proved the condition for good fishing grounds; i.e. the mortality decreased as the bottom slope became gentler for the region of 5 to 10 m water depth.

8. SUMMARY AND APPLICATION FOR FISHERY ENGINEERING

This study analyzed the mechanism of mortality in the planktonic larva and juvenile stages of the Sakhalin Surf Clam, which caused the variation and uncertainty of the resource. It also suggested a hydraulic conditions for an abundant production and good fishing ground.

A resource evolution model was presented to examine the fishing ground condition numerically. Applying this model to beaches where no production takes place naturally, appropriate conditions for release of artificial juveniles can be given to convert them to new fishing grounds.

序 文

福島沿岸は常磐海域と呼ばれ、複雑な海洋構造に影響され水産資源にめぐまれた豊饒な海域として、昔から知られている。また、福島沿岸は外海に直接面した典型的な開放性海岸である。

しかし、福島沿岸のような外海性海岸においても近年、大規模企業立地や港湾拡張、護岸工事、ヨットハーバ建設等によって、自然海岸としての形態が徐々に変化する傾向にある。

このような、ウオータフロント開発によって影響の受けやすい浅海域は海岸工学上の砕波帯及び沖浜帯にあたり、波による漂砂現象の顕著な場であり、底質分布やそこに出現する Benthos 類の多様性と変動性が沖合に比べて大きく、漁業生産性の非常に高い重要な海域といえる。

その一方、200海里時代が定着し、沿岸漁業に対する依存度が大きくなり、その結果、沿岸重要種の資源管理が不可欠な研究課題として位置づけられている。沿岸重要資源のなかでも砂浜性二枚貝のような定着性資源は魚類に比べ漁業管理のしやすさから、資源管理適性種として注目をあびている。

しかし、一般的に砂浜性二枚貝の資源変動は甚だ大きく、このため資源の安定化に向け様々な施策が構じられている。例えば、①漁業管理による自然の再生産力を利用する資源の増大、②海岸構造物による浮遊幼生のトラップ効果や稚貝育成場の造成、③人工種苗の放流による資源添加等である。

ただし、本種の資源発生量の不安定性は初期生活期の急激な減耗過程に由来するもので、親子関係のような生物学的な再生産関係に依存したものでないことから、産卵資源の資源量維持を目的とした漁業管理は資源発生量の制御には直接的な効果は期待されない。

初期生活期における急激な減耗過程は浮遊幼生期と着底後の稚貝期における水理環境条件に大きく左右されていて、資源変動の機構解明にとって、この時期の環境計測が重要であることについては、既に多くの研究報告で指摘されている通りである（例えば、千葉・吉田・今井、1953；秋元・五十嵐、1980；加藤、1980；佐々木、1987）。しかし、初期生活期の資源生態特性を、この時期の水理環境特性をもとに解析され、それらの相互関係について言及されている例は一部の研究（中村、1983）を除き殆ど見あたらない。

このような事情を反映して、現状の事業効果の予測は海岸構造物の設置にとまらぬ、海浜流セル構造や海底地形変化等の主に海岸工学的視点に立った予測に留まっており、添加される資源量の予測に至っていない。

有用二枚貝の生産増大を目的とした一連の海洋環境改変事業が大型プロジェクトとして企画され、対象種の生態的知見や漁場環境特性についての把握が必要になっている。そして、事業に対する投資拡大の要望の大きい今日、天然漁場における砂浜性二枚貝の生産機構の一端を解明し、海洋環境の維持と資源の安定化に対する人為的関与のあり方を基本的に考え直す必要があるように思われる。

そこで、本論文では外海砂浜域に棲む有用二枚貝であるウバガイ *Spisula sachalinensis* を研究対象として、本種の不安定な資源変動性の特徴と原因について資源生態学的及び環境工学的双方の立場から解析し、次に示す課題の検証を行なった。

1. 浮遊幼生の沿岸輸送のモデル化と大量発生の水理学的条件の推定

2. 稚貝の波による岸沖輸送のモデル化と漁場形成機構の推定

第1章 福島沿岸の海岸地形と沿岸流

第1節 常磐海域の海岸地形と海洋構造

福島沿岸の海岸線は勿来から相馬にかけて約130kmの延長距離を有しており、沿岸形状は単調である (Fig. 1-1)。福島県沿岸のはぼ中央に位置する大熊海岸を代表地先を選び大局的な陸棚形状を Fig. 1-2 に示した。これによると離岸130kmまでは1/130程の一定勾配をもつ海底であり、その先は急勾配の陸棚斜面が水深8,000mの大洋底まで続いている。また、離岸10kmまでの海底勾配を同図からみると水深10mまでは約1/100で、更に沖の水深10m~30m付近までは1/200と緩勾配傾斜を有している。一番岸に近い砕波帯における海底形状は、おおむね1/50の勾配をもっている (中村、1990)。

砕波帯の幅は波浪状態によって変わるが、普通50m~100mの範囲にある。

福島沖の海底形状は巨視的にみると、陸棚域、陸棚斜面、大洋底の三つの部分から構成されているが、このうち沿岸漁業にとって重要な陸棚域は出現する流況構造から、更に三つの領域に別けられる。離岸数10km以上 (水深100m以深) に広がる沖合域では、親潮の第1、第2分枝等の海流系 (Fig. 1-3) が存在し複雑な流況が存在している。

次に、その岸側に当たる沿岸域では、沖合の海流系とは異なる時空間スケールを持つ沿岸流が存在している。また、沿岸域の内、離岸1km~2kmまでの範囲は流速分布に大きなシア構造が存在し、分散 (dispersion) 効果の強調される沿岸流境界層と呼ばれる小領域を形成している (中村・藤縄・中田・久保田・稲垣、1982)。

更に、岸に接続する砕波帯では、沖合から進行してくる波浪が砕波して、海浜流系を形成する領域である。大熊海岸における砕波帯での観測によると、沖波成分以外にも沖から岸に向かうサーフ・ピートや岸に平行方向に進行するエッジ波などによる流速変動の存在が確認されている (中村・堀川・佐々木・藤縄、1978)。

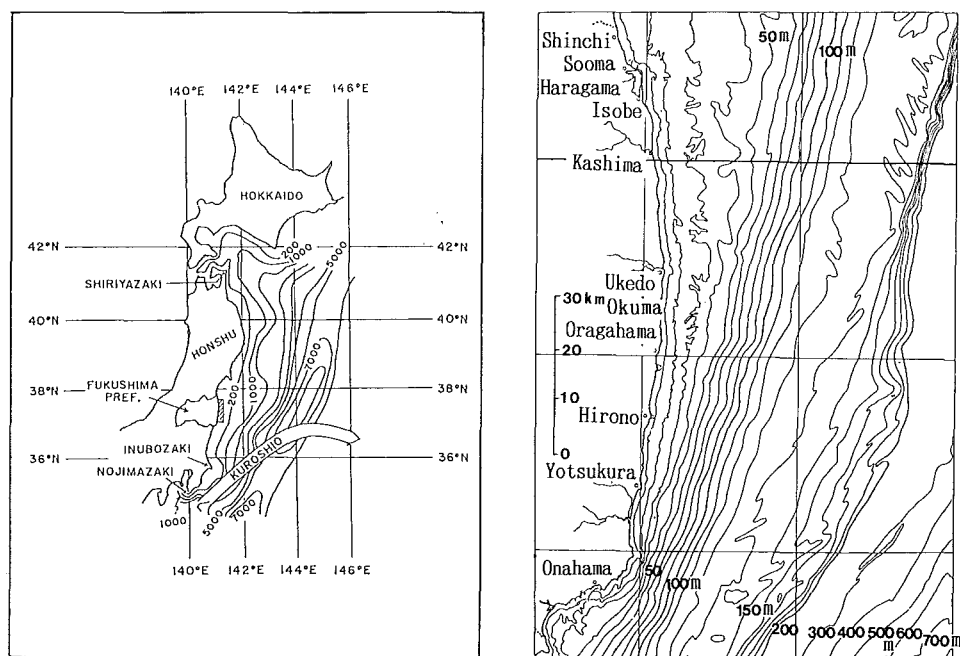


Fig. 1-1 Schematic view of the Pacific coast of northern Japan. The shaded region indicates the observation area. Right figure is profile of Fukushima coastal line.

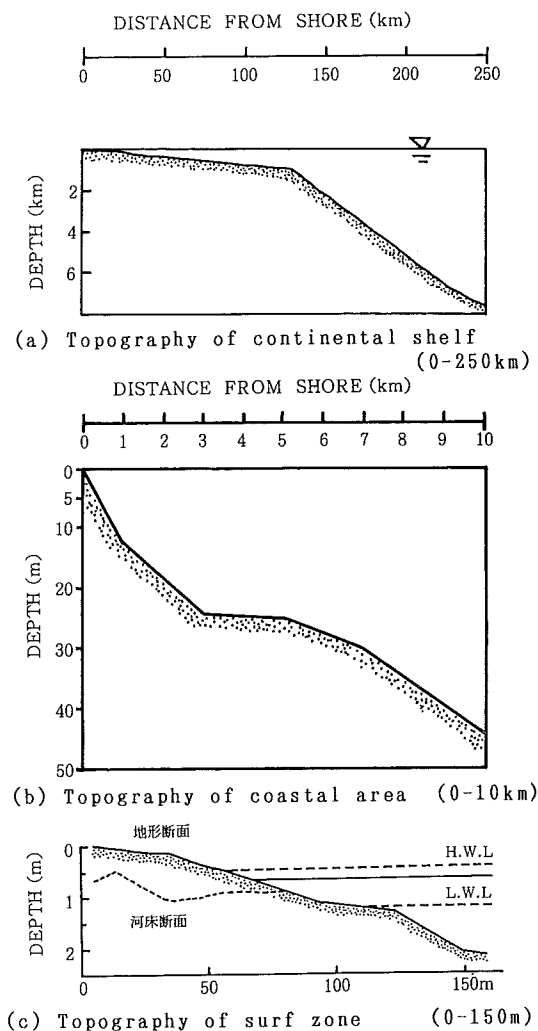


Fig. 1-2 Bottom topography off Okuma coast.

第2節 沿岸域の流速変動特性

外海に直接面した沿岸域での流れを長期にわたって連続測定することは、殆ど行われなかった。係留技術の進歩と流速計の改良により、1970年頃からアメリカを中心にして外洋域での流速観測が行われるようになってきた。福島沿岸では1976年にはじめて数点の沖合観測点を設けて連続観測が実施され、外海域における沿岸流動特性の一端が明らかにされた(中村, 1977)。

この観測は外洋に面した沿岸での日本における最初の観測のひとつであろう。観測は冬季(2月~3月)にFig. 1-4(a)に示す6点で行った。

その結果、流速記録には潮汐流等と共に、約3日周期の変動が存在し、この変動が流れの場でも最も支配的であった。沿岸流動環境にとって、この数日周期変動の果たす役割は極めて大きいと判断し、時間変動の特性、空間的な規模、岸沖方向の変化などを明らかにすることを試みた。1976年以降、数多くの観測を積み重ねてきたが、それらのデータ解析を通して、現在までに明らかになった点を以下に示す。

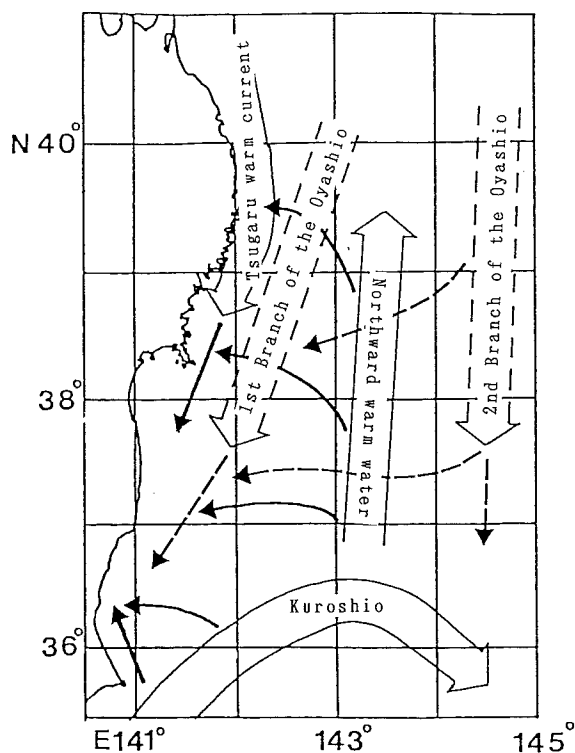


Fig. 1-3 Schematic view of the oceanographic condition off Tohoku area(after Yokota, 1989).

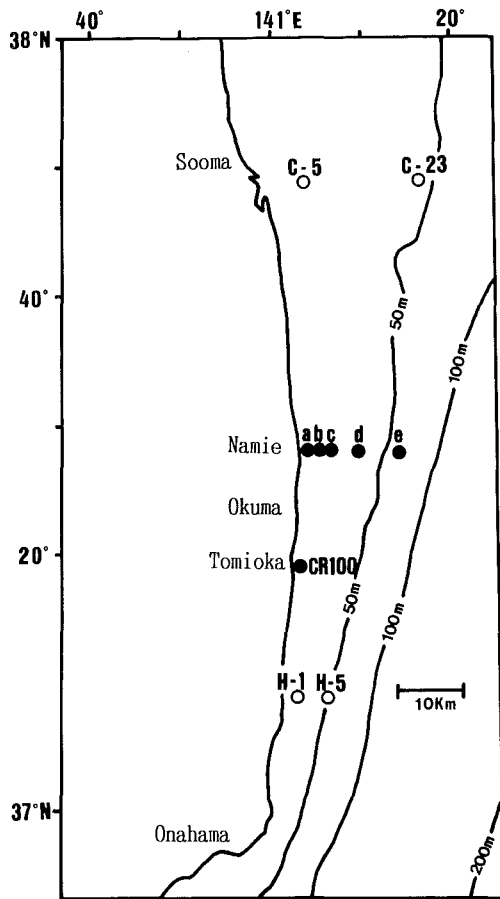


Fig. 1 - 4 (a) Locations of current meter arrays.

●: Observation in 1976
○: Observation in 1978

Observed St.No.off Namie and Tomioka (1976)
(Tohoku Electric Power Company)

a : CR10(0.5, -2, 5), b : CR20(1, -2, 13),
c : CR30(5, -2, 24), CR31(5, -10, 24),
CR32(5, -15, 24), d : CR40(10, -2, 34),
CR41(10, -10, 34), CR42(10, -15, 34)
e : CR50(15, -2, 62), CR51(15, -10, 62),
CR52(15, -15, 62), CR100(1.6, -3, 12)

Observed St.No.off Sooma and Hisanohama (1978)

C-5(5, -5, 10)* C-23(23, -5, 48)*
H-1(1, -6, 15), H-5up(5, -10, 45), H-5low(5, -20, 45)
Numbers in () indicated distance from shore (km),
observed layer under surface(m), water depth(m)
respectively.

*(Industrial Location and Environmental
Protection Bureau)

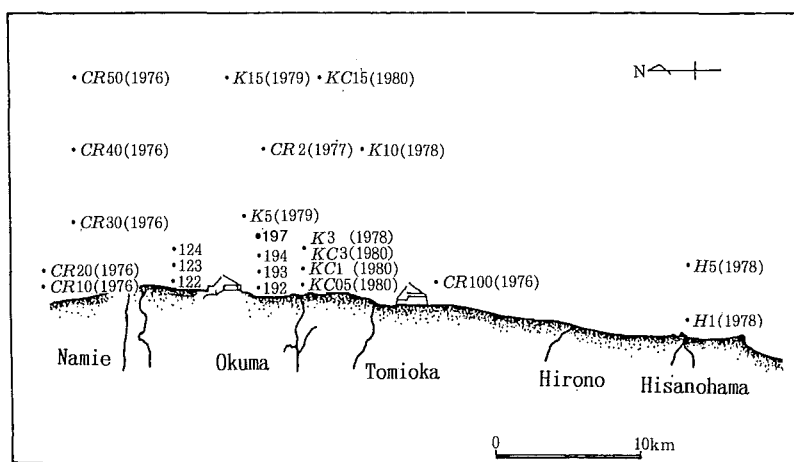


Fig. 1 - 4 (b) Locations of current meter arrays around the Okuma coast.

2. 1 観 測

沿岸流観測の観測地点や観測年次については、Fig. 1-4(a)及び(b)に示したとおりである。これまでに実施された福島沿岸における流速観測例は、電力会社が実施したものを含めると、かなりの数になる。しかし、それらの大半は離岸距離1.5kmまでの範囲に限られており、離岸距離5km以上の観測例は、相馬沖観測(1978)、浪江沖観測(1976)、大熊沖観測(1978、1979、1980)及び久ノ浜観測(1978)等の数例にすぎない。従って、ここで取り上げられる流速変動についての記述は、離岸距離3km以内で観測されているものが主体となる。

福島沖の流速観測では、主にアンデラー-RCM4型流速計を使用した。サンプリング間隔は10分～15分で観測期間は1ヶ月間を原則にしている。得られた流速データは1時間の移動平均処理がされた後各種の時系列的な統計解析を行った。

2. 2 データ処理

平均流速 \bar{u} 、流れの標準偏差 u_{sd} ：

ある地点 x で得られた流速変動 $u(x, t)$ について次に示す処理をして、平均流速 $\overline{u(x)}$ 、及び標準偏差 $u_{sd}(x, t)$ を求めた。

$$u(x, t) = \overline{u(x)} + u'(x, t)$$
$$\overline{u'} = 0, \quad u_{sd} = [\overline{u'^2}]^{1/2}$$

ここで、 $\bar{\quad}$ は流速変動の時間的(観測期間)平均を示している。

流れの相互相関係数 R ：

$$R_{i,j}(\tau) = \frac{\int_0^T (u_i(t) - \overline{u_i(t)}) (u_j - \overline{u_j(t)}) dt}{T \cdot u_{i\ sd} \cdot u_{j\ sd}}$$

ただし、 T は観測期間で、 $u_i(t)$ 、 $u_j(t)$ は i 、 j 地点における流速変動であり、 \bar{u} 、 u_{sd} は流れの時間平均値、標準偏差である。また、 τ はタイムラグである。

2. 3 解析結果

観測結果の一例として、流速記録に25時間の移動平均を施して、潮汐変動以下の短周期変動を除去した流速ベクトル時系列をFig. 1-5(a)、(b)に示す。両図とも2地点の変化及び深さ方向の変化も同時にみられるように並べてある。非常に顕著な周期変動がみられ、周期は3日～4日である。これらの図と類似したものはほとんどの場合にみられた。そこで、統計的な方法でデータ処理し、その特徴を捉えることとする。

沿岸流の平均値と標準偏差の大きさ

大熊海岸を中心として、1972年から1981年までの10年間に実施された流速観測の結果から、主に30m以浅の浅海域における流れの平均値及び標準偏差の大きさを明らかにした。調査範囲は、離岸距離3kmまでの浅海域に限られているが、調査時期は四季にまたがっており、延べ観測地点数は90を越えている。

以下に流れの平均値及び標準偏差の分布を示す。Fig. 1-6は、岸沖方向(横軸)と沿岸方向(縦軸)の標準偏差の相関関係を表わしたものである。また、図中の記号はTable 1-1に示した通りであり、以下の図の記号も同様である。Fig. 1-6によると流れの標準偏差は季節による違いは少なく、沿岸方向は岸沖方向より約1.5倍程大きい。各成分の標準偏差の頻度分布(Fig. 1-7)によると、沿岸方向では16cm/sec～24cm/secの範囲に広く分布し、一方、岸沖方向は12cm/sec～14cm/secと幾分沿岸方向よりは、狭い範囲に集中している。

次に流れの平均値の分布をFig. 1-8に示した。横軸は岸沖方向の平均流（東方向を正にとる）、縦軸は沿岸方向の平均流（北方向を正にとる）を表わしている。同図から沿岸における平均流の分布をみると、岸沖方向では若干岸向きの平均流が多くみられ、Fig. 1-9の頻度分布では-1 cm/secを中心にして-4 cm/sec~2 cm/secの範囲に集中して分布している。一方、沿岸方向の平均流は約70%が南流であり、この傾向は季節に関係しない。

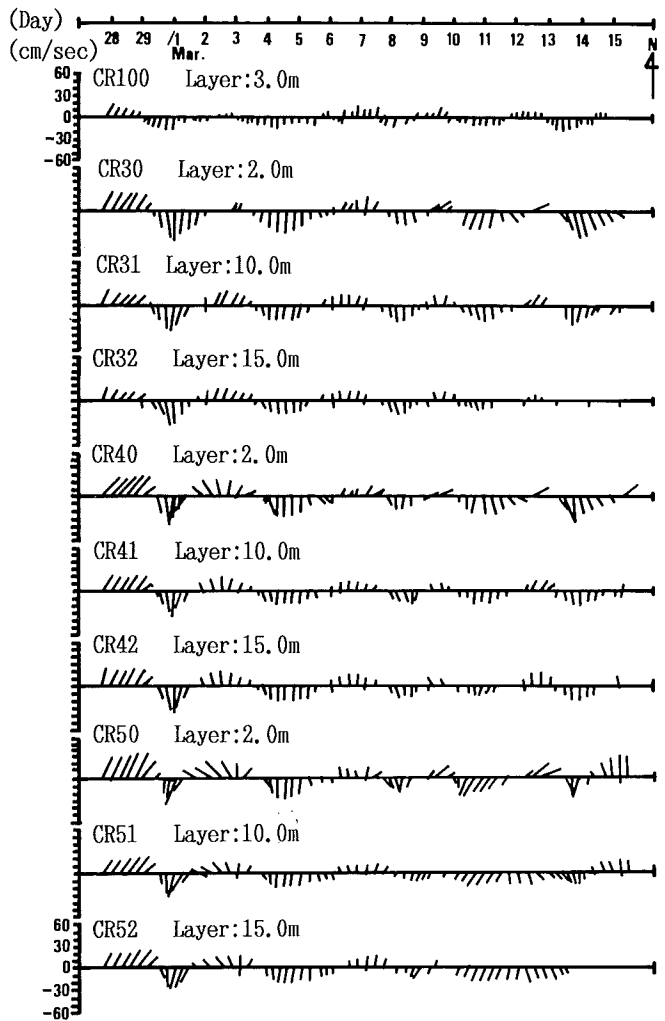


Fig. 1-5(a) Time series of 25-hourly low passed current vectors.
(Observation off Namie and Tomioka in 1976)

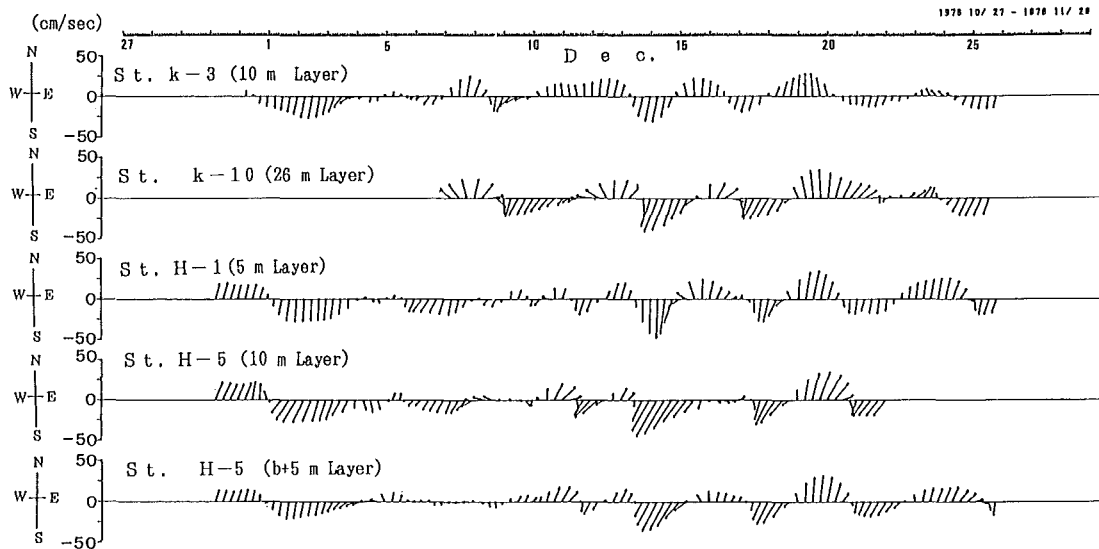


Fig. 1 - 5 (b) Time series of 25-hourly low passed current vectors.
(Observation off Okuma and Hisanohama in 1978)

Table 1 - 1 Illustrate of indicated symbol.

Season	Month	Symbol
Spring	Mar., Apr., May	○
Summer	Jun , Jul., Aug.	□
Autumn	Sep., Oct., Nov.	△
Winter	Dec., Jan., Feb.	◇

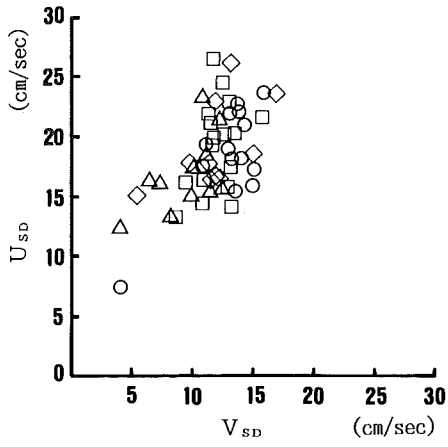


Fig. 1 - 6 Distribution of standard deviation of current. (1971~1981)
 Symbols in the figure indicated seasons. See Table 1-1

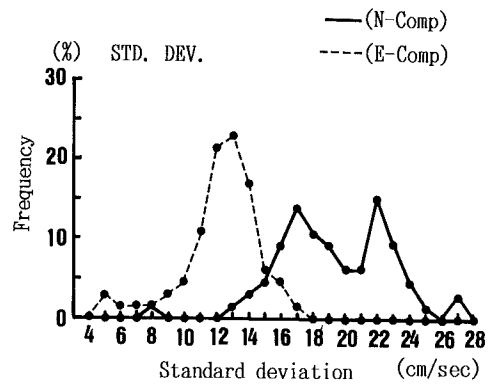


Fig. 1 - 7 Frequency distributions of standard deviation of current. (1971~1981)

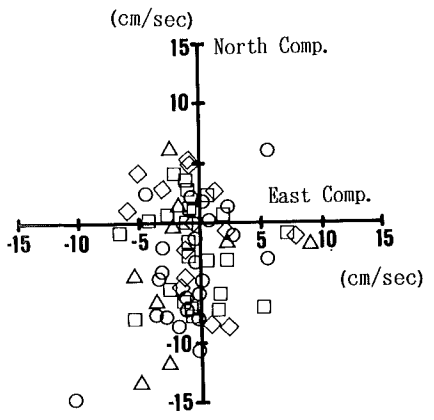


Fig. 1 - 8 Distribution of mean of current .(1971~1981)
 Symbols in the figure indicated seasons. See Table 1-1

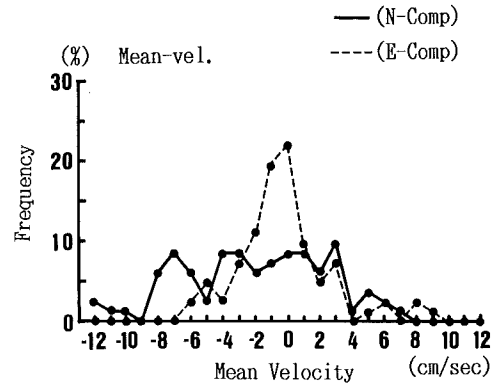


Fig. 1 - 9 Frequency distribution of mean of current. (1971~1981)

流れの主方向と流跡

1978年の大熊沖と久ノ浜沖の流速観測を代表例にして、流れの分散図をFig. 1-10に示した。これによると転流が急激であること、及び分布の主方向が場の等深線に強く依存している現象 (Topographic Steering) がみられる。同じ流速データ (Fig. 1-5 (b)) を使い、往復流の主方向が等深線に沿っている様子を流向の生起確率として示したのがFig. 1-11である。往復流の主方向が等深線に沿っているため、福島沿岸では南流の時、流れが少し (10~20Deg) 岸に向かうことになり、一方北流の時は逆に沖へ向かうことになる。福島県沿岸で現われた Topographic Steering 現象は Oregon 沖の CUE 観測 (Coastal Upwelling Experiments) でも確かめられている (Kundu and Allen, 1976)。

また、流れの流跡図 (Fig. 1-12) には、時間の経過とともに南に延びる平均流と、1日から数日の軌道周期を持つ時計まわりのループ (長周期流速成分) から構成されている。

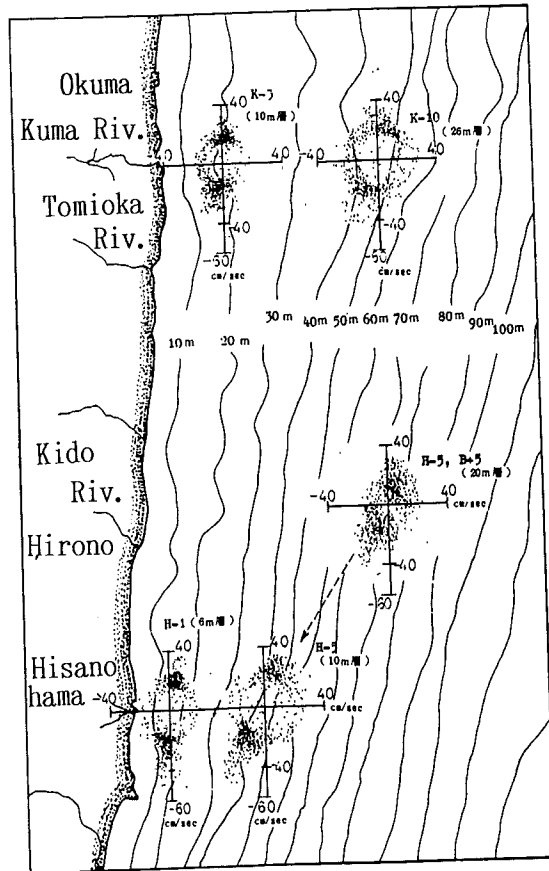


Fig. 1-10 Scatter diagrams of the current fluctuations at different stations during 1978 observation, superimposed on a bathymetric contour map.

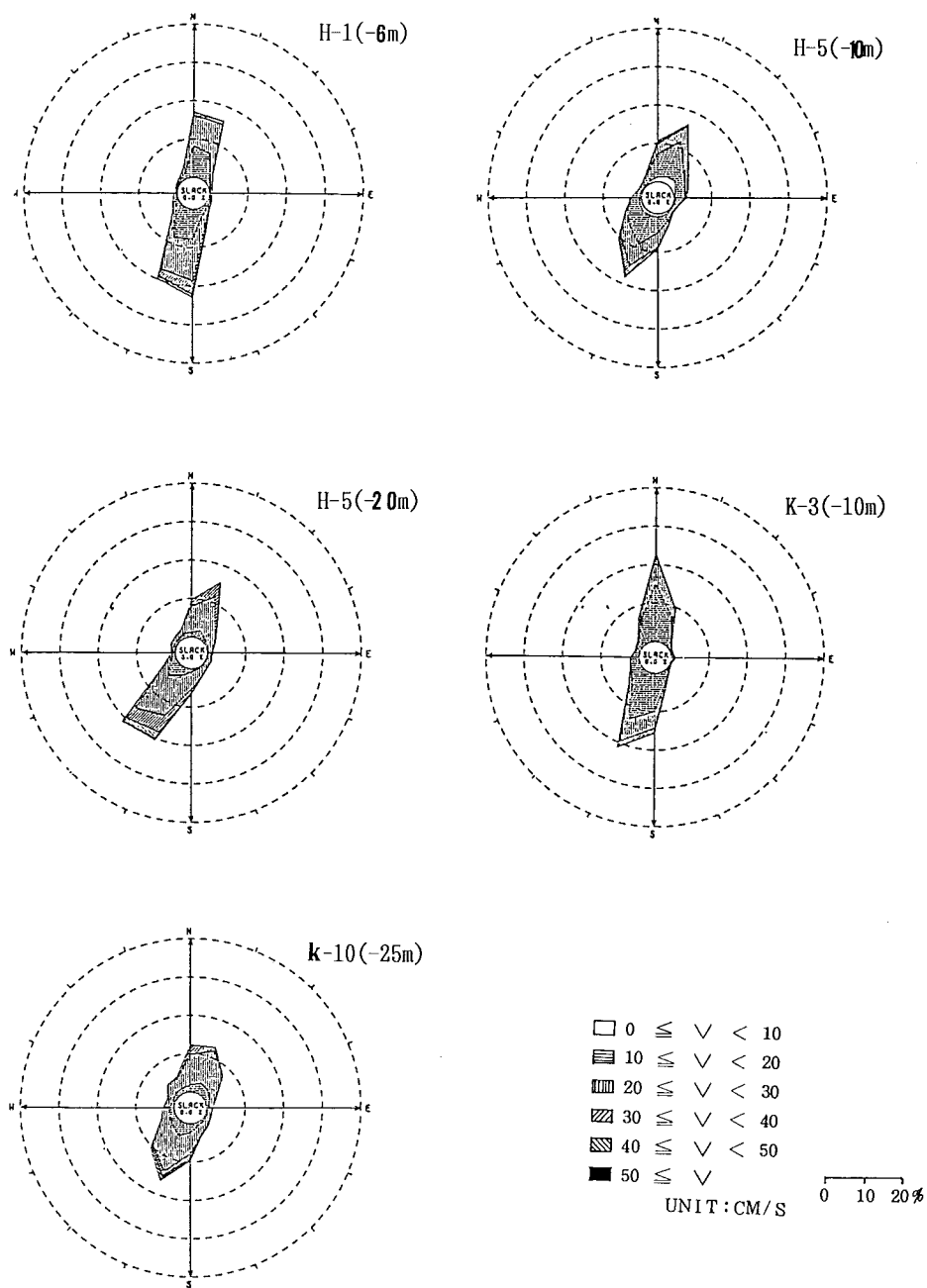


Fig. 1 - 11 Occurrence frequency distribution of current speed per each current directions.

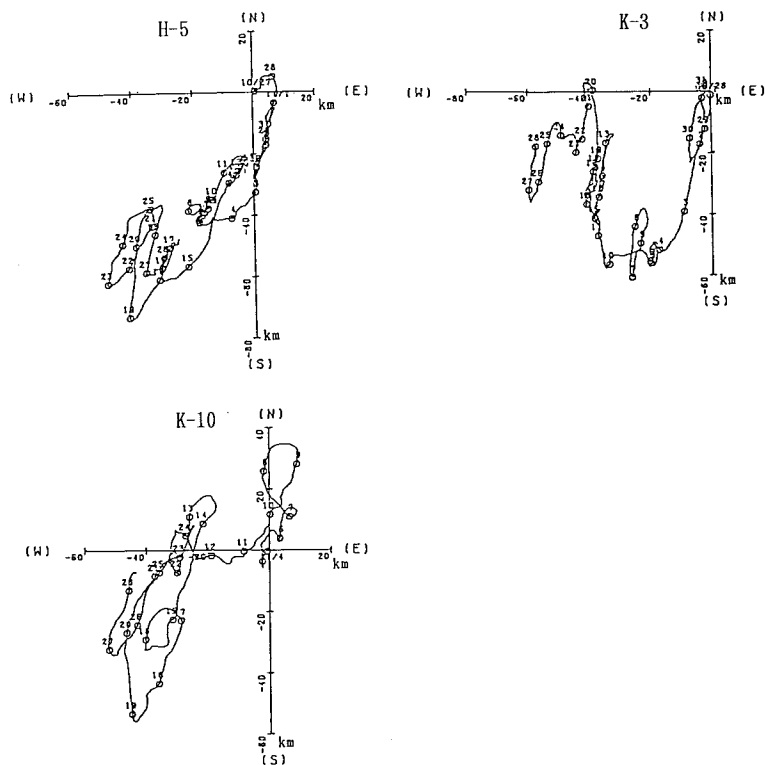


Fig. 1-12 Progressive vector diagrams of the current fluctuations at different stations during 1978 observation.

流速変動の相互相関係数

1976年に実施した浪江沖観測結果及び1978年の大熊沖と久ノ浜沖の観測結果を代表例にして、流速変動の相互相関係数Rを計算し、福島沿岸における流動の伝播特性を考察した。なお、ここに示された観測地点についてはFig. 1-4 (a)、(b)を参照。

① 流れの沿岸成分と岸沖成分についての位相関係：

1978年11月に実施した大熊沖と久ノ浜沖における観測より流れの沿岸成分（南北成分）と岸沖成分（東西成分）の相互相関係数をFig. 1-13に示し、その位相差をTable 1-2に示した。これによると流れの沿岸成分と岸沖成分の間には、4時間から8時間の位相のズレがみられ、いずれの場合も沿岸成分が岸沖成分より位相が早い。このことは転流の回転方向が時計廻りであることを意味している。

② 沿岸方向に離れた地点間における流速変動の位相関係：

大熊沖と久ノ浜沖における観測より沿岸方向の流れの位相差をみるために、測点K-3とH-1、K-10とH-5（上層）、K-10とH-1の3ケースについて、それぞれの沿岸流速成分の相互相関係数をFig. 1-14示し、その位相差をTable 1-2に示した。K-3とH-1及びK-10とH-5（上層）の間では1～3時間程の位相差があり、熊川沖の流れは、久ノ浜沖の流れより位相が早い。熊川と久ノ浜の沿岸距離は約27kmであり、流速変動の南進速度は、岸に近いK-3とH-1で約9.9km/hour。また、より沖合に位置するK-10とH-5（上層）で23.9km/hourとなる。

つまり、流速変動が岸を右にみて南へ伝播していることと、その速度が離岸距離によって、異なることを示している。

③岸沖方向に離れた地点間における流速変動の位相関係：

1976年に実施した浪江沖の流速観測結果より沿岸流速成分の沖合方向の相互相関係数をFig. 1-15に示した。沿岸流速成分の沖合方向の相関係数はCR20とCR30の間で低下しているが、これはCR20が岸に近く種々のノイズに乱されているためで、沖合3地点（CR30, CR40, CR50）間の相関は高いと推定される。

④鉛直方向に離れた地点間における流速変動の位相関係：

浪江沖の3地点において海面下2mを起点として、水深方向にそれぞれ相互相関係数を計算した結果（Fig. 1-16）によると、海面下2mと海面下10mで相関の低下がみられるが、大局的には表層から底層まで一体とした順圧的（barotropic）な流況の顕著であることが示された。

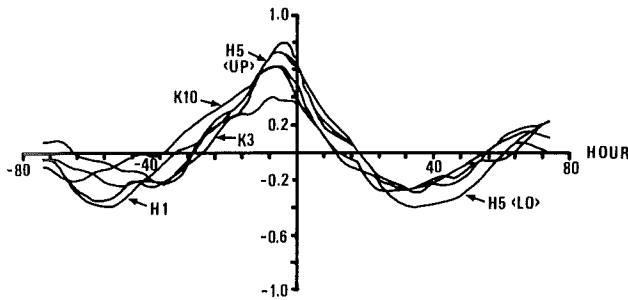


Fig. 1-13 Cross correlation functions of longshore component v and offshore component u at different stations. (1978)

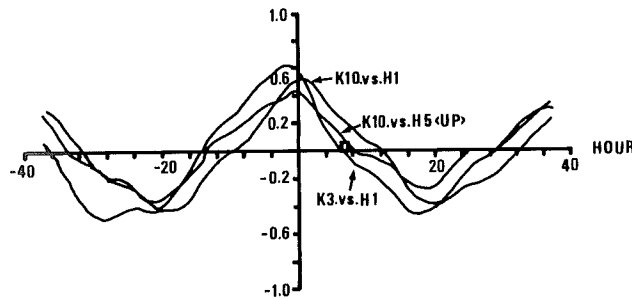


Fig. 1-14 Cross correlation functions of longshore component v at the separated stations along the shore. (1978)

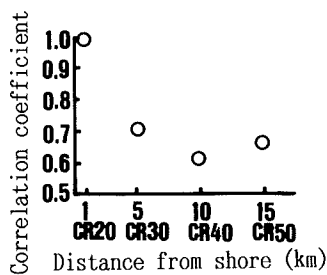


Fig. 1-15 Cross correlation coefficients of longshore component v at separated stations of offshore direction (off Namie). (1976)

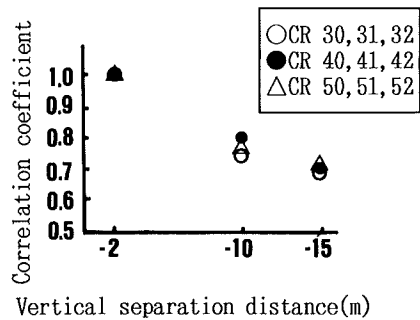


Fig. 1-16 Cross correlation coefficients of longshore component v at CR30, CR40, CR50 of vertical separations. (1976)

流速変動の卓越周期

観測された流速変動のベクトル (Fig. 1-5 (a), (b))には期間中3日前後及び、4日周期を持つ流速変動の存在していることが、流速変動のスペクトル密度でも確認される (Fig. 1-17)。このような長周期変動の出現は同じ海岸特性を持つ茨城沿岸でも報告されており (草野、1983)、福島沿岸に固有に現われる現象ではない。

また、富岡地先にある電力会社の所有する流速モニタリングポストは離岸1.5km (水深15m) の地点に設置されており、海面下2mの所で周年流速変動を観測している。同記録による、1983年の4月から1984年の3月末までの1ケ年間における流速変動 (Fig. 1-18)の様子 は次のようである。

4月上旬から5月中旬にかけて明確な4日周期変動が10波程続き、その後は変動周期が少し長くなる傾向がみられる。そして、水温躍層が形成され、水温の日較差 (Fig. 1-19) が顕著になる7月以降の夏場に入ると明確な周期性が崩れ、1週間以上持続する南流が卓越している。成層がくずれ、日較差が小さくなる10月に入ると、多少、周期性が回復し、10月から12月にかけての期間では3日から4日の周期変動が間欠的に現われている。

年があけて冬場になると、また3日周期の変動が1月上旬から2月下旬まで現われている。この連続観測記録からわかるように、大熊海岸での流速変動には3つのタイプが存在している。第1は3日~4日の周期変動が比較的安定し存在しているタイプで、出現時期としては冬から春に多くみられる。第2は周期変動の出現が間欠的であり、変動周期が変調しやすいタイプで、初夏と秋によく出現する。第3のタイプは夏期にみられるような、南方向の流れが長期間持続する流況である。

福島沿岸で長周期流速変動が最初に確認されたのは1976年の浪江沖での観測である (中村、1977)。1976年以降福島沿岸の全域でおこなわれてきた流速観測のデータを集め、その流速データのMEM (Maximum Entropy Method) によるスペクトル解析の結果から、流れの変動周期を推定し、月別にプロットしたのがFig.1-20である。同図によると、8月、9月の夏期を除いて、流速変動の周期は3日から4日に集中していることがわかる。

なお、夏期において3日~4日の周期変動が消え、南流が強調される原因については、納得できる証明はなされていない。

Table 1-2 The estimated time lag from the cross correlation function for each pair of the current components. (1978)

St.	Component	Time lag(τ)
K3	North-East	456
K10	North-East	390
H1	North-East	380
H5(up)	North-East	250
H5(low)	North-East	240
K3-H1	North	170
K10-H5(up)	North	70

τ : minute

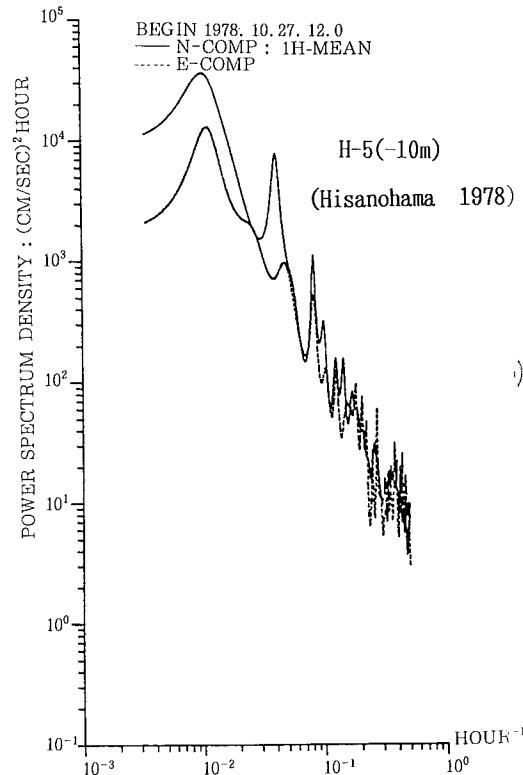


Fig. 1-17 Autospectra of the current fluctuations. (1978)

(St. 354.5 Layer -2.5m)

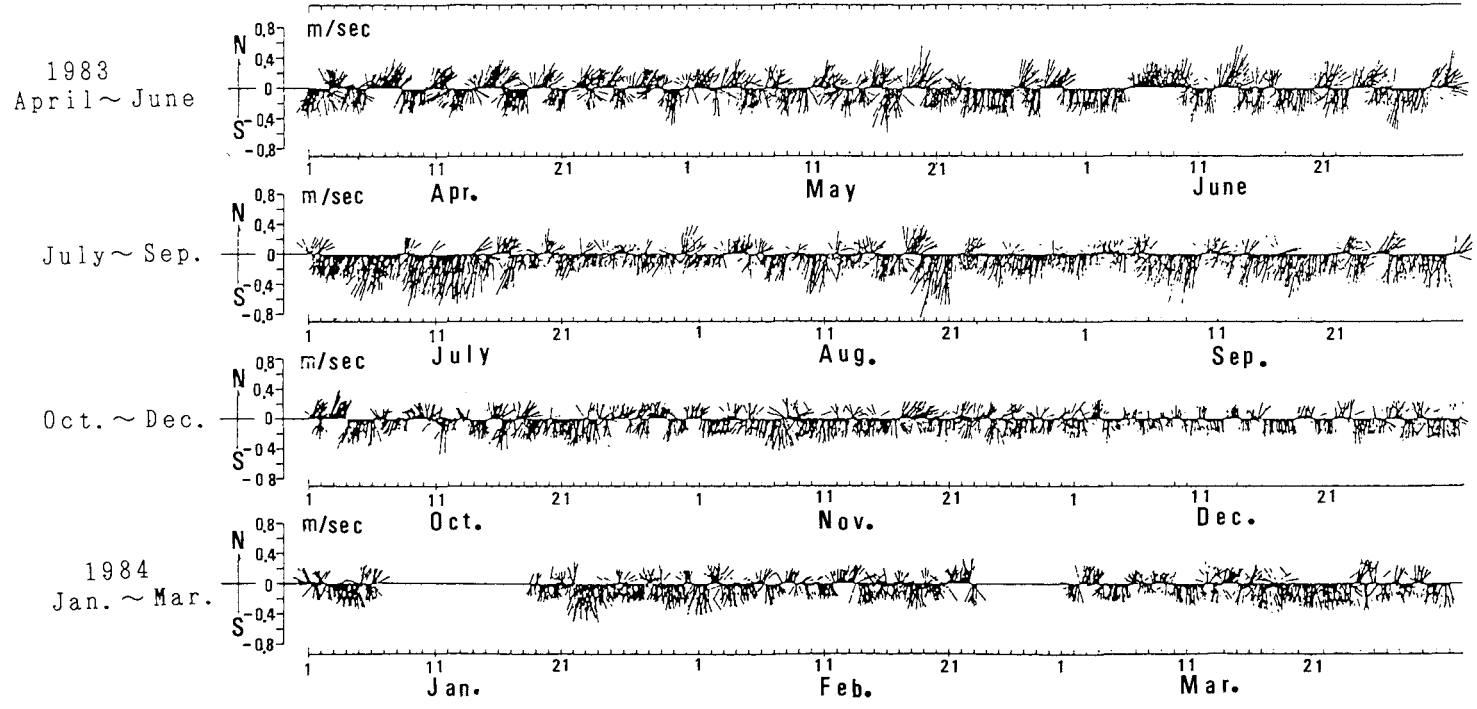


Fig. 1-18 Time series of 1-hourly low passed current vectors at Tomioka monitoring station. (1983)

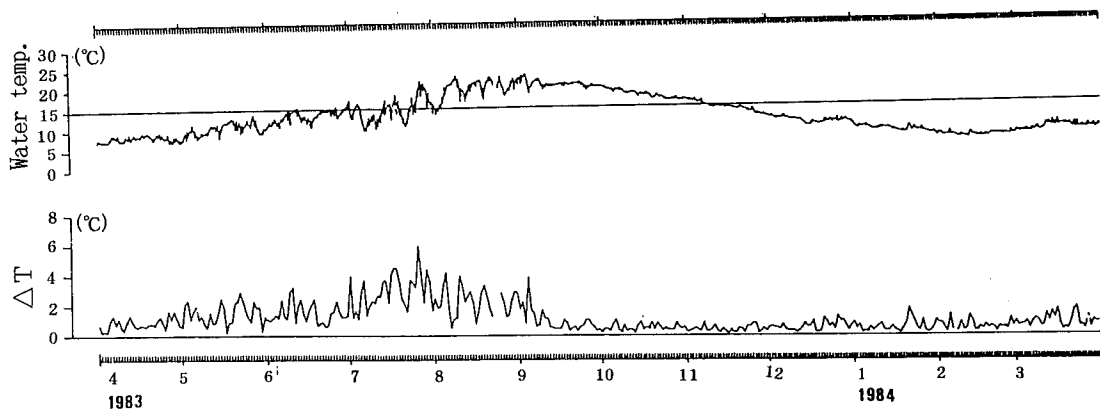


Fig. 1-19 Temporal variations of water temperature and its gap between daily maxi. water temp. and daily mini. water temp.

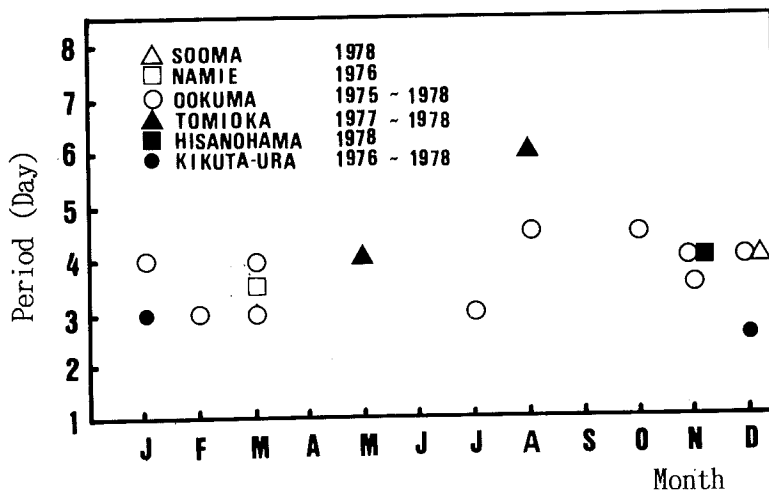


Fig. 1-20 Dominant period for energy peaks of the current fluctuations in Fukushima Prefectural coast. (1975~1979)

2. 4 考 察

陸棚波について

前節において、流れの長周期変動が夏期を除き、3日～4日の周期を持っていることと、流速変動が南へ伝播している事実を明らかにした。

1976年の浪江沖流速観測を契機として、福島沿岸にみられる長周期変動を陸棚波と考えて、流速観測の結果から陸棚波の伝播特性について検討した(中村, 1977; 中田・久保田・中村, 1979)。

陸棚波の研究は、オーストラリア沿岸を反時計廻りに進行する長周期波を検出した Hamon (1962) から始まったと云われており、Robinson (1964) による理論的研究へと進み、1970年代に入ると Oregon 州立大学のグループを中心として、精力的な観測活動が続けられた。その代表例が CUE (Coastal Upwelling Experiments) 観測である (Cutchin and Smith, 1973; Kundu et al., 1976; Kundu and Allen, 1976)。Robinson以前の理論的研究としては、Reid (1958) が発表した edge wave の論文の中で quasi-geostrophic wave と名付けた波が陸棚波に相当している。

国内における陸棚波の研究は、潮位記録をもとに Shoji (1961) と Isozaki (1968, 1969) が日本沿岸を時計廻りに進行する長周期波の存在について発表している。

陸棚波における研究は、主に理論的側面についての進歩は著しいが、現象を把握するうえで基礎になる流速観測が組織的に行われた例は少なく、国外では1972年の CUE 観測、常磐沿岸では1976年の浪江沖観測が最初である。

陸棚波の伝播特性

福島沿岸における陸棚波の伝播特性について、分散関係を中心に考察した。

陸棚波の自由進行波としての特性(分散関係及び流速分布等)を Buchwald and Adams (1968) は指数関数的に変化する陸棚地形の場合について、解析的に取り扱っている。しかし、現実の海岸においては海底形状が指数関数的に取り扱えない場合や沿岸方向に変化していることも考えられる。福島沿岸における沿岸方向の地形変化は比較的単調であるが、沖合い方向の海底形状は陸棚域が発達しているため指数関数的に取り扱えない (Fig. 1-21)。そこで、実際の浪江地点(北緯 $37^{\circ}32'$ N)の海底形状を基に、陸棚波の分散関係を数値計算により求めた。

数値計算の方法は、“rigid lid”を仮定して、流線関数を使っているが、基本的には Caldwell and Cutchin (1972) の行った “numerical shooting method” と同じである。

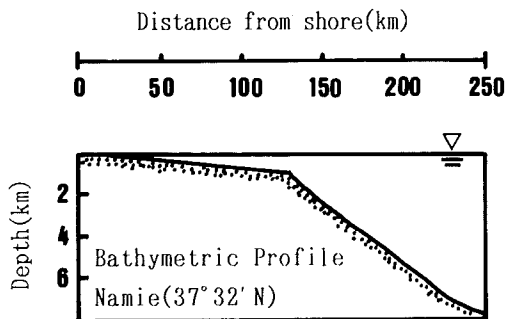


Fig. 1-21 Bathymetric profile extending offshore from Namie coast.

a) 基礎方程式

原点を岸にとる座標系 (Fig. 1-22) において、コリオリのパラメータ f を一定とした均一な海での陸棚波の運動方程式及び連続方程式は式(1)、式(2)、式(3)で表される。

$$\frac{\partial u}{\partial t} - f v = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + f u = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} \quad (2)$$

$$\frac{\partial h u}{\partial x} + \frac{\partial h v}{\partial y} + \frac{\partial \zeta}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

この方程式では、既に次の仮定がなされている。

- ① 静水圧近似
- ② 線型化
- ③ 非粘性
- ④ f = 一定

ここで、 f : コリオリのパラメータ ($2 \Omega \sin \theta$)、 Ω : 地球の回転角速度 ($7.29 \cdot 10^{-5}$ / sec)、 θ : 緯度、 h : 水深、 ζ : 陸棚波による水位上昇量、 u : x (沖向き) 方向の流速、 v : y (沿岸) 方向の流速、 g : 重力の加速度

境界条件は、次のように設定した。

- ① 岸 ($x=0$) では $u=0$
- ② $x \rightarrow \infty$ で $u, v, \zeta \rightarrow 0$
- ③ 陸棚域 ($0 \leq x \leq L$) と外洋域 ($x \geq L$) との境界で u, v, ζ が連続する。

次に式(3)の各変数を無次元化する。

$$x^* = x/L, \quad y^* = y/L, \quad h^* = h/L, \quad \zeta^* = \zeta/h_0, \quad u^* = u/\sqrt{g h_0}$$

$$v^* = v/\sqrt{g h_0}, \quad t^* = t/f^{-1}$$

ここで、 L は陸棚域の幅をとり、 h_0 は外洋域での平均水深をとった。無次元化された方程式は次のようになる。

$$\frac{\partial h^* u^*}{\partial x^*} + \frac{\partial h^* v^*}{\partial y^*} + \frac{L \cdot f}{\sqrt{g h_0}} \frac{\partial \zeta^*}{\partial t^*} = 0 \quad (4)$$

式(4)の第3項の係数のオーダーを見積ると次のようになる。

$$\epsilon = \frac{L^2 \cdot f^2}{g h_0} \approx 0.776 \cdot 10^{-2} \ll 1 \quad (\text{Divergent parameter})$$

ここで、 L : 240km, f : $7.29 \cdot 10^{-5}$ / sec, h_0 : 7000m

以上の結果から(4)式で表面の発散項 $\partial \zeta / \partial t$ が省略され、流線関数 ψ が定義される。

$$u = h^{-1} \frac{\partial \psi}{\partial y} \quad v = -h^{-1} \frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (5)$$

式(1)、式(2)を交差微分して圧力項を消去して式(5)で定義された流線関数 ϕ を導入すると、式(6)を得る。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial D}{\partial x} \frac{\partial \phi}{\partial x} + D \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + D \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \right) - f \frac{\partial D}{\partial x} \frac{\partial \phi}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

ここで、 $D = h^{-1}$ 、 ϕ に関しては時間 t と y 方向について波動解を仮定する。

$$\phi(x, y, t) = \phi(x) \exp(i(Ky - \omega t)) \quad (7)$$

ここで、 k : 陸棚波の y 方向の波数、 ω : 陸棚波の角周波数である。式(7)を式(6)に代入して $\phi(x)$ について整理すると、線型 2 階の同時常微分方程式を得る。

$$\phi''(x) + \frac{P}{D} \phi'(x) - \left(K^2 - \frac{fPK}{D\omega} \right) \phi(x) = 0 \quad (8)$$

整理の過程で、海岸地形の y 方向の変動は無視した。

また、 $P = \partial D / \partial x$ である。

式(8) について前に示した境界条件を満たす解を数値計算により求める。

岸では、岸に直角方向の流速を零とおく。

$$\phi_s = 0 \quad x = 0 \quad (9)$$

海底が平坦($P=0$)な外洋域での式(8)の解は次のようになる。

$$\phi_o = B \cdot e^{-|k|(x-L)} \quad x \geq L$$

ここで、 B は任意常数である。また、 $x=L$ (陸棚端) で陸棚域 (ϕ_s) と外洋域 (ϕ_o) の沿岸方向の流量が連続する条件は次のようになる。

$$\begin{aligned} \phi_s(L) &= \phi_o(L) = B \\ d\phi_s(x) / dx |_{x=L} &= -|k| \cdot B \end{aligned} \quad (10)$$

陸棚域 ($0 \leq x \leq L$) を対象として、式(9)、式(10)の境界条件を満たす式(8)の解を Newton 法により求め、福島沿岸における陸棚波の分散関係 (波数 k と周波数 ω の組) を求めた。

なお、式(8)の数値計算において、岸 ($x=0$) および、陸棚端 ($x=L$) での境界条件を満足し、岸沖方向 (x 方向) にモード解を持つためには、式(8) 第3項の係数 ($K^2 - fPK/D\omega$) が負でなくてはならない。従って、 $P < 0$ より、 K または ω が異符号でなければならない。即ち、陸棚波の位相速度 (ω/K) は負になり、式(7)に示した波動は y の負の方向 (南方向) に伝播することになる。

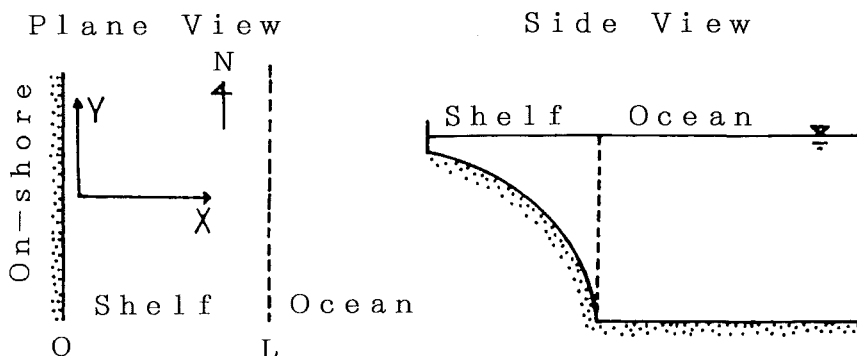


Fig. 1-22 Schematic diagram of the model and showing the coordinate system.

b) 分散関係と伝播速度

上記の方法で求めた分散関係をFig. 1-23に示した。縦軸はコリオリのパラメータ f で正規化した周波数 ω/f を表し、横軸は実際の波長を表している。

分散曲線は上から第1モード、第2モード……の順になっており、原点と分散曲線上のある点を結んだ直線の傾きが位相速度（伝播速度）であり、またその点での接線の傾きが群速度を表している。この図から陸棚波が浅い方（岸側）を右にみて伝播することや、長波長領域では位相速度が群速度と等しい非分散性の波動であるといった、陸棚波の一般的な特徴が示されている。

1976年の浪江沖観測では、76時間周期の流速変動が現われており、 $\omega/f=0.274$ にあわせ各モードの分散曲線との交点から、波長と位相速度を求め、同様に求めて1978年の相馬沖～久ノ浜沖観測で現われた100時間の周期変動（ $\omega/f=0.200$ ）の場合における結果をTable 1-3に表した。一方、それぞれの観測で検出された流速変動の位相速度及び地点間の相関係数をTable 1-4に示した。

地点間における相関係数は0.7~0.8と高いことが示されている。位相速度は1976年観測では第2モードに近く、また、1978年観測では沖合地点（C23, H5）が第2モード、岸に近い地点（C5, H1）は第3モードの陸棚波に相当している。

Table 1-3 Characteristics of propagation of continental shelf waves off Fukushima coast.

Period (hour)	Mode No.	Wave length (km)	Phase speed (km/hour)
76	1st	1700	24
76	2nd	580	7
100	1st	2512	26
100	2nd	793	8
100	3rd	250	3

Table 1-4 Spatial correlations and propagation speed.

Year	Month	St.*	Period (hour)	Phase speed (km/hour)	Correlation coefficients
1976	Mar.	CR20-CR100**	76	10.5	0.80
		CR32-CR100	76	5.7	0.78
1978	Nov.	C5-H1***	100	4.6	0.71
		C23-H5	100	7.1	0.63

* Location of each stations are indicated in Fig.1-4(a)

** Separation distance between the stations : 27 km

*** " : 80 km

2. 5 要 約

福島沿岸で観測された流速変動を解析した結果、次にしめす特性を明らかにした。

- I 1日以上の長周期波成分は、それ以下の短周期波成分に較べ常に高いパワーレベルを有し、夏期を除く期間において3日～4日の周期変動をともない普遍的に出現している。
- II 流速値の標準偏差は、沿岸方向 v_{SD} が、岸沖方向 u_{SD} にくらべて、大きい ($v_{SD} \geq u_{SD}$)。また、平均値 (\bar{u} , \bar{v}) は標準偏差にくらべて、小さい ($(u_{SD}^2 + v_{SD}^2 / \bar{u}^2 + \bar{v}^2)^{1/2} \approx 2 \sim 6$)。岸近くの地点で観測された、流速は振動流成分が平均流成分にくらべて大きく、流れの主方向は沿岸方向に沿っている。
- III 沿岸方向に離れた地点間における流速変動の同時観測によると、沿岸方向の流速成分は数10 km以上離れていても、高い相関性を持っていること。また、水深方向にも高い相関性を有していることから、空間スケールの大きい順圧的な流況であることが示唆された。
- IV 観測された長周期変動は岸を右にみながら南へ進行すること (Fig. 1-24) が確認され、その伝播速度は、数 km/hour ~ 10 km/hour である。
- V 以上示した、流速変動の特性から、福島沿岸で観測された長周期流速変動が海洋学上の地形性ロスビー波 にあたる陸棚波に由来する現象であることを示唆した。
- VI 福島沖の陸棚形状をもとに陸棚波の分散曲線を求めた。そして、伝播特性を検討した結果、1976年の浪江沖観測で検出された3日周期の変動は波長が約580 kmの第2モード波、また、1978年の大熊～久之浜沖の観測で検出された4日周期の変動は波長が約250 kmの第3モードの陸棚波であったことが推定された。

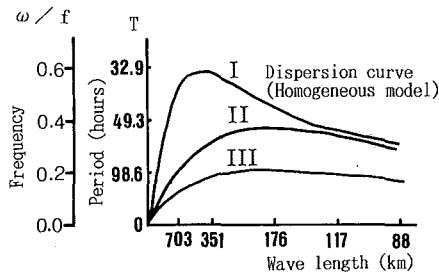


Fig. 1-23 Dispersion curves for the lower three modes of shelf waves off the Fukushima coast (for bottom topography see Fig. 1-21). ω : Frequency, f : The Coriolis parameter.

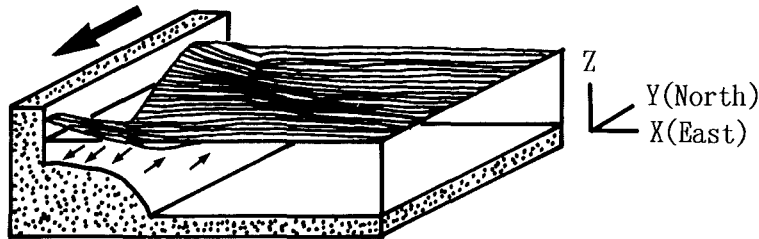


Fig. 1-24 Schematic view of the propagated continental shelf wave from north to south along the Fukushima coast.

第3節 沿岸流の流速分布

3.1 浮標追跡実験 (防波堤周辺の沿岸流の構造)

防波堤周辺の沿岸流の流速分布構造を把握するため、まだ発電が開始されていない原子力発電所の前面海域で大規模な浮標追跡実験が行なわれた(中村・藤縄・中田・久保田・稲垣、1982)。実験は1979年3月12日に実施され、この時の実験仕様は次のとおりである。

第二原子力発電所を含む沿岸5km、沖合2kmの範囲(Fig. 1-25)に約150m格子で350個の大型フロート(傘フロート、Fig. 1-26)を投入し、約2000mの高度から、3分40秒の間隔で、航空写真撮影が行なわれた。このフロート軌跡から、流速ベクトルが得られる。

実験が行なわれた3月12日の10時28分から11時35分までの気象、海象状況は次のとおりである。天候は晴れ、北北東の風、風速9.3m/secで、沿岸流速は同海域に設置されたアンデラ流速計の記録によると、安定した南流で、流速は20~25cm/sec程である。

波浪条件は、波向がN83°E、周期は9.4secのうねり、砕波波高は2.0m(砕け寄せ波)で砕波帯の幅は約90mであった。

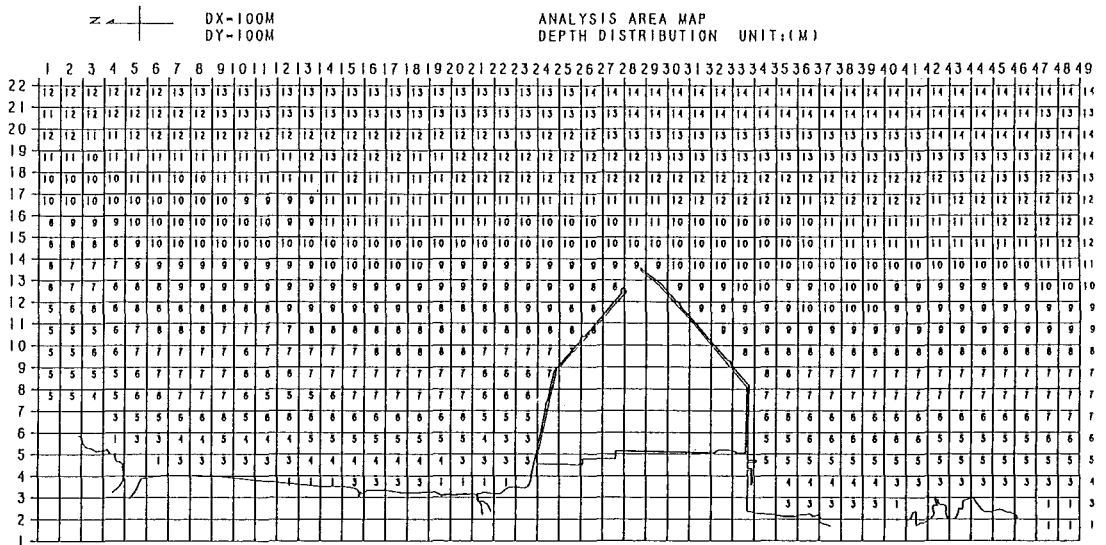


Fig. 1-25 Analysis area around the power station.
On-off shore scale : 2km, Longshore scale : 5km
The number in figure indicated water depth(m).

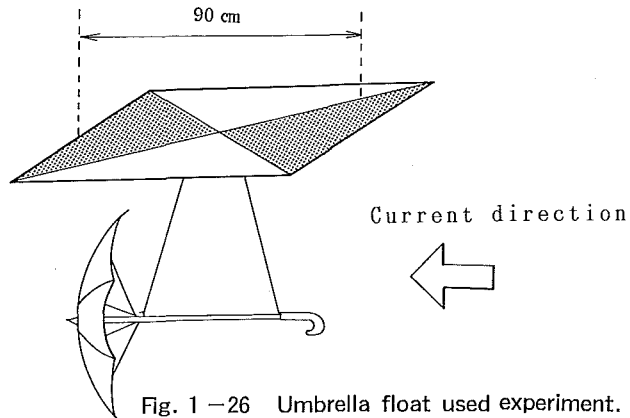


Fig. 1-26 Umbrella float used experiment.

3. 2 流速分布

浮標追跡から得られた流速ベクトルの分布をFig. 1-27に示す。得られた流速ベクトルは、数 $\text{cm}/\text{sec} \sim 35\text{cm}/\text{sec}$ 程の幅があり、防波堤の上流にあたる北側では、流向が若干岸に向っていることや、防波堤の港口部では岸に平行に向う沖の流れと、北防波堤上を沿う流れがぶつかって、強い流速域を形成している様子がみられる。また、防波堤の南側では、著しく流速値が小さい防波堤の陰の部分（後流域）と、その沖に広がる強流域に分けられる。

防波堤の上流側と下流側における流れの特徴について概要を次に示した。

対数境界層

防波堤の上流域では、流向が場の等深線形状に従い若干岸に向っている (topographic steering) ことが確認される。調査領域における代表的な測線上の流速分布をFig. 1-28に示した。

このうち、一番北側のAライン上の流速分布を考察する。Aライン上の流速分布は境界層的な形状をしており、離岸800mより岸側で漸次流速値が減少している。Aラインの流速分布を対数境界層 (logarithmic boundary layer) の流速式にあてはめたのが、Fig. 1-29である。

$$v(x) / v_* = k^{-1} \ln x / x_0$$

ここで、 $v(x)$: 沿岸方向の流速値 (m/sec)、 v_* : 摩擦速度 (friction velocity, m/sec)、 k : カルマン定数 (0.4)、 x : 離岸距離 (m)、 x_0 : 粗度長 (roughness length, m) である。

Fig. 1-29から v_* 、 x_0 を求めると $v_* = 0.034\text{m}/\text{sec}$ 、 $x_0 = 90\text{m}$ になり、粗度長はこの時の碎波帯幅に相当している。また、これらの結果から対数境界層の拡散係数 K_M (Coefficient of eddy viscosity) を求めことができる。

$$K_M = k \cdot v_* \cdot x_0 = 0.4 \cdot 0.034 \cdot 10^3 = 1.36 \cdot 10^1 \text{ m}^2/\text{sec}$$

ここで、 x_0 は境界層の幅である。

防波堤後流域の流速分布

近傍領域でも港口をはさんだ上流側（北防波堤近傍）と下流側（南防波堤近傍及び後流域）で流況が全く異なっている。上流側では北防波堤に沿った流れが、港口部付近で沖の流れとぶつかって強い流域を形成しており、その流れは慣性力によって南防波堤の陰に回り込んでいないことがわかる。

レイノルズ数が増加していく過程で、障害物周辺の流線形状が変化していく様子を水理模型実験で示したのがFig. 1-30である。これによると、レイノルズ数が小さい時 ($R_0 = 1$) には、Fig. 1-30(a)に見られるように、流線は障害物の背後に回り込み、境界層の剝離 (Separation) は見られない。流速が増し、レイノルズ数が 10^1 のオーダーになると、(c)に見られるように徐々に障害物の背後に定在的な渦 (Standing eddy) が現われ始め、さらに、(d)の状態になると渦の規模が大きくなり、2次的な渦も形成される。レイノルズ数が 10^2 のオーダーになると、後背部の渦の規模はさらに大きくなり、渦列 (vortex street) が形成され、その結果流線は下流に向かって大きく蛇行 (meander) するようになる。同時にこの下流域では乱れの成分が強くなり、非定常的で複雑な流況構造になる。

今回の実験から、防波堤周辺の流れのレイノルズ数 R_0 を、代表的な流速値 v (m/sec)、実測された拡散係数 k_M (m^2/sec)、防波堤の岸沖スケール L (m) を使って見積もると次のようになる。

$$R_0 = v L / K = 0.2 \cdot 1000 / 13.6 = 14.7$$

浮標追跡で得られた後流域の流速分布を、レイノルズ数や境界層の剝離状態を参考に水理実験の結果と見比べると(c)~(e)の状態に近いと思われる。しかし、実測された流速分布には、防

波堤の背後にはっきりした下流域や乱流域の存在が見られないことから判断して、(c)の段階に近いのではないと思われる。

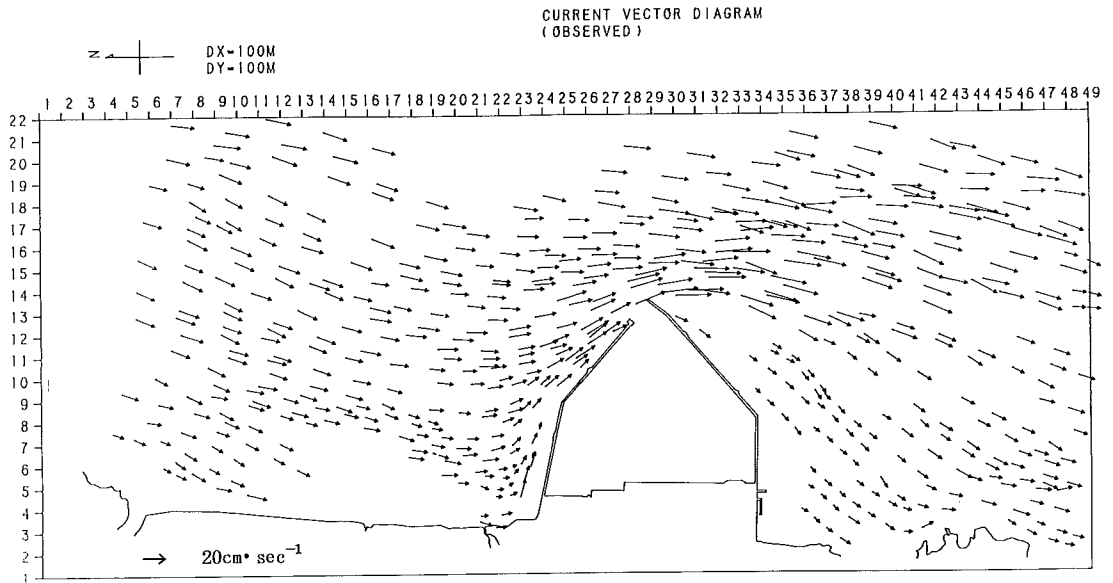


Fig. 1-27 Current distribution around the breakwater by float traced experiment. (12 March 1979)

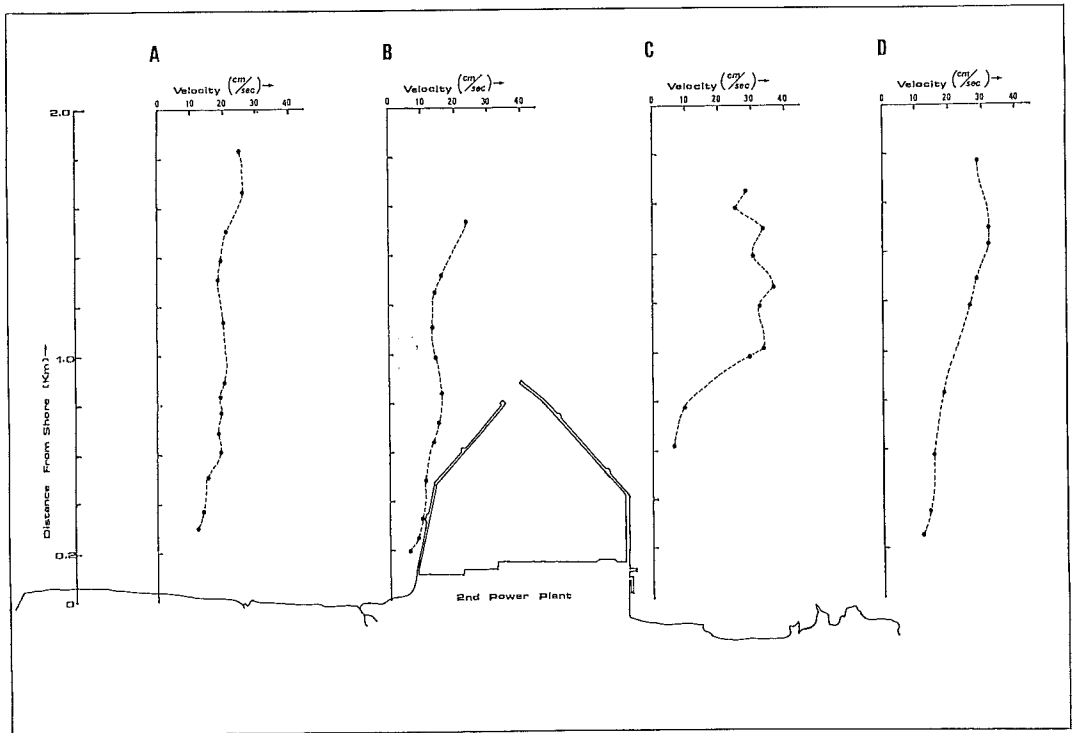


Fig. 1-28 On-offshore distributions of longshore component velocity (A, B, C, D line)

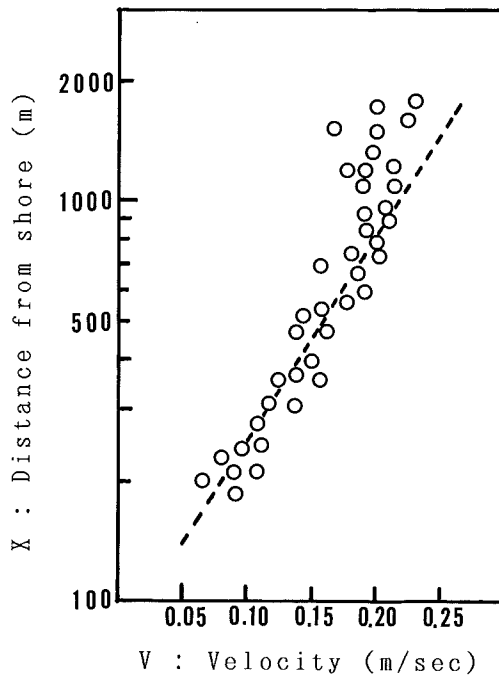


Fig. 1 -29 Velocity distributions by logarithmic expressed on A line.

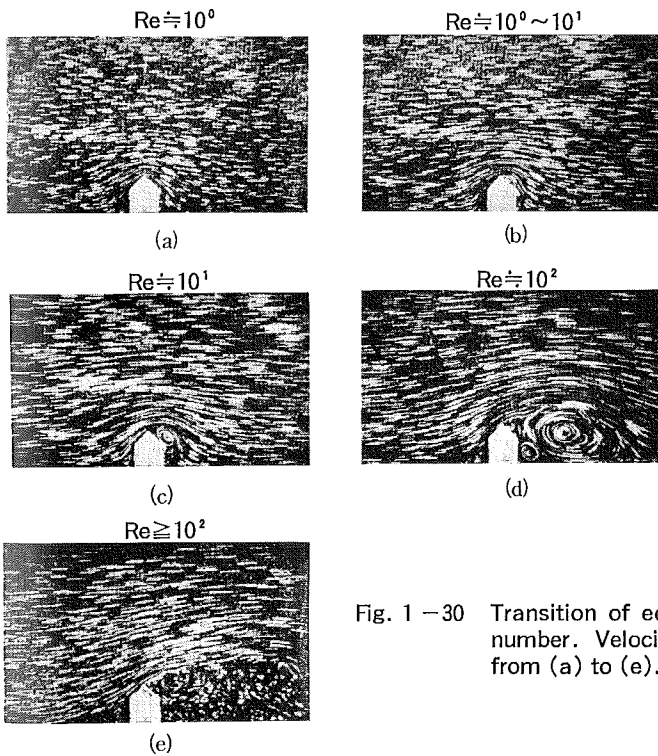


Fig. 1 -30 Transition of eddy from depend on Reynolds number. Velocity is more large according to from (a) to (e). (Batchelor, 1956)

3. 3 考 察

対数境界層における運動量方程式の構成

Fig. 1-27 の流速分布から二次元の運動量方程式における各項の大きさを計算し、防波堤周辺の沿岸流の力学バランスを推定した。計算方法はまず、領域内の流速分布 (Fig. 1-27) を spline 関数 (大西, 1975) を使って、100 m 間隔の格子点に内挿補間を行い割り付けた。そして、Table 1-5 に表した運動量方程式の各項を格子点上で差分法により計算した。このうち、沿岸方向 (y 方向) の移流項の大きさを計算した例を Fig. 1-31 に示した。これによると、沿岸方向の移流項の分布は、防波堤の港口部から南側の流速値の大きくなっている領域では最高 $1.8 \times 10^{-2} \text{ m}^2 / \text{sec}^2$ 程になるが、防波堤の後流域や上流域の境界層では $10^{-5} \sim 10^{-4} \text{ m}^2 / \text{sec}^2$ 程度であることがわかる。

このようにして求めた岸沖方向 (x 方向)、沿岸方向 (y 方向) における移流項、拡散項、海底摩擦項、及びコリオリの各項の大きさを、Fig. 1-32 に示す防波堤周辺の 4 つの領域に分けて、Table 1-5 に示した。

同表から、各領域の力学的バランスが推定される。移流項は、すべての領域で重要である。拡散項は流速値の大きい A 及び C 領域では他の項に比べて無視される。コリオリ項は、岸沖方向の成分 (x 方向) のみが重要である。一方、海底摩擦項は、沿岸方向の成分 (y 方向) が重要である。

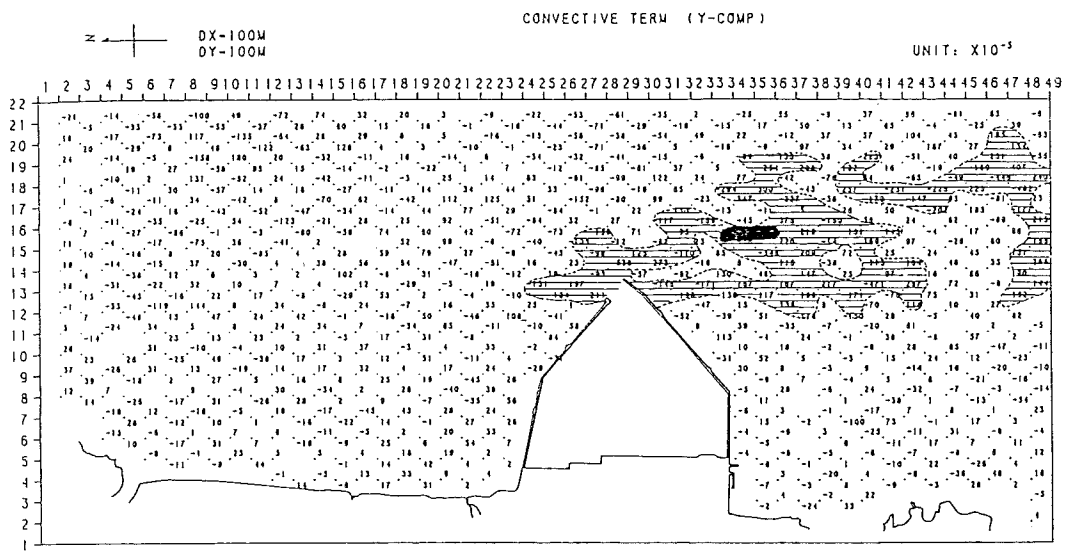
このように、離岸 2 km までの浅海域 (15 m 以浅) においては、移流項の役割が非常に重要である。従って、この領域における流れの構造として、移流項を無視した陸棚波近似 (非定常項 + コリオリ項 + 圧力項 = 0) や地衡流近似 (コリオリ項 + 圧力項 = 0) だけで、方程式を構成することには無理がある。

自然海岸における境界層 (Coastal boundary layer) は陸岸の存在に起因した水平的な境界層 (水平拡散項が強調される効果) と海底摩擦効果が強調される底面境界層 (Bottom boundary layer) の接する三次元的な構造を有しており、海洋物理学上では corner 領域と呼ばれている (吉田, 1974)。今回の解析では、自然海岸の浅海域における流速の減耗過程にとって、海底摩擦効果の重要性を示唆した結果となっているが、理論的に確定しえないパラメータ (K_x , K_y , γ_b) を包含した摩擦項のオーダー推定には、幅があることに注意しなければならない。

浮標追跡実験 (ラグランジュ系観測) からは流速値の空間微分に関した力学項のオーダー推定を行ったが、今度は同海域に設置された流速計記録 (オイラー系観測) を基に非定常項の大きさを推定する。運動量方程式の非定常項のオーダーは流速の振幅 α とその周波数 ω 及び水深 H により推定される。

$$\partial v H / \partial t \approx O(\alpha \cdot \omega \cdot H)$$

このオーダー推定式には α と ω が積の形で入っており、流れのスペクトル密度 (Fig. 1-33) から $\alpha \cdot \omega$ の値を求めると、各領域とも $10^{-6} \text{ m} / \text{sec}^2$ の範囲に入ることがわかる。そして、水深 H のオーダーが 10 m であることを考慮すると非定常項のオーダーは約 $10^{-5} \text{ m}^2 / \text{sec}^2$ になる。以上の結果、半日以上の変動現象を対象にした場合でも、B 領域や D 領域では非定常項は無視できない。



parallel line part: $|\frac{\partial Huv}{\partial x} + \frac{\partial Hv^2}{\partial y}| \geq 10^{-3} \quad \text{m}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$

black part: $|\frac{\partial Huv}{\partial x} + \frac{\partial Hv^2}{\partial y}| \geq +10^{-2} \quad \text{m}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$

Fig. 1-31 Distribution of convective term for longshore component.

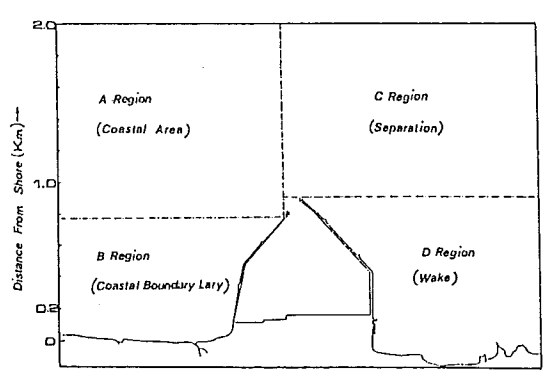


Fig. 1-32 Schematical view of 4th regions around the breakwater. (A, B, C, D region)

Table 1 - 5 Order estimation of dynamics term in the A, B, C, D region.
(unit : m^2/sec^2)

Terms	Regions		A	B	C	D
		Comp				
Convective term						
$\frac{\partial}{\partial x}(Hu^2) + \frac{\partial}{\partial y}(Huv)$	X		10^{-4}	$10^{-5} \sim 10^{-4}$	10^{-3}	10^{-5}
$\frac{\partial}{\partial x}(Huv) + \frac{\partial}{\partial y}(Hv^2)$	Y		10^{-4}	$10^{-5} \sim 10^{-4}$	10^{-3}	$10^{-5} \sim 10^{-4}$
Diffusion term						
$\frac{\partial}{\partial x}(HK_x \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(HK_y \frac{\partial u}{\partial y})$	X		10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}
$\frac{\partial}{\partial x}(HK_x \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(H \cdot K_y \cdot \frac{\partial v}{\partial y})$	Y		10^{-6}	$10^{-6} \sim 10^{-5}$	10^{-6}	$10^{-6} \sim 10^{-5}$
Coriolis term						
$-f \cdot H_v$	X		10^{-4}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-5}
$f \cdot H_u$	Y		10^{-5}	10^{-5}	10^{-5}	10^{-5}
Bottom Friction term						
$-\gamma_b^2 \sqrt{u^2 + v^2} \cdot u$	X		10^{-5}	10^{-5}	10^{-5}	10^{-5}
$-\gamma_b^2 \sqrt{u^2 + v^2} \cdot v$	Y		10^{-4}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-5}
Unsteady state term						
$\frac{\partial}{\partial t}(H \cdot u), \frac{\partial}{\partial t}(H \cdot v)$	X, Y		10^{-5}	10^{-5}	10^{-5}	10^{-5}

K_x, K_y : diffusion coefficient ($10^0 m^2/sec$), f : coriolis parameter ($7.29 \times 10^{-5} sec^{-1}$)
 γ_b^2 : coefficient of bottom friction (2.6×10^{-3})

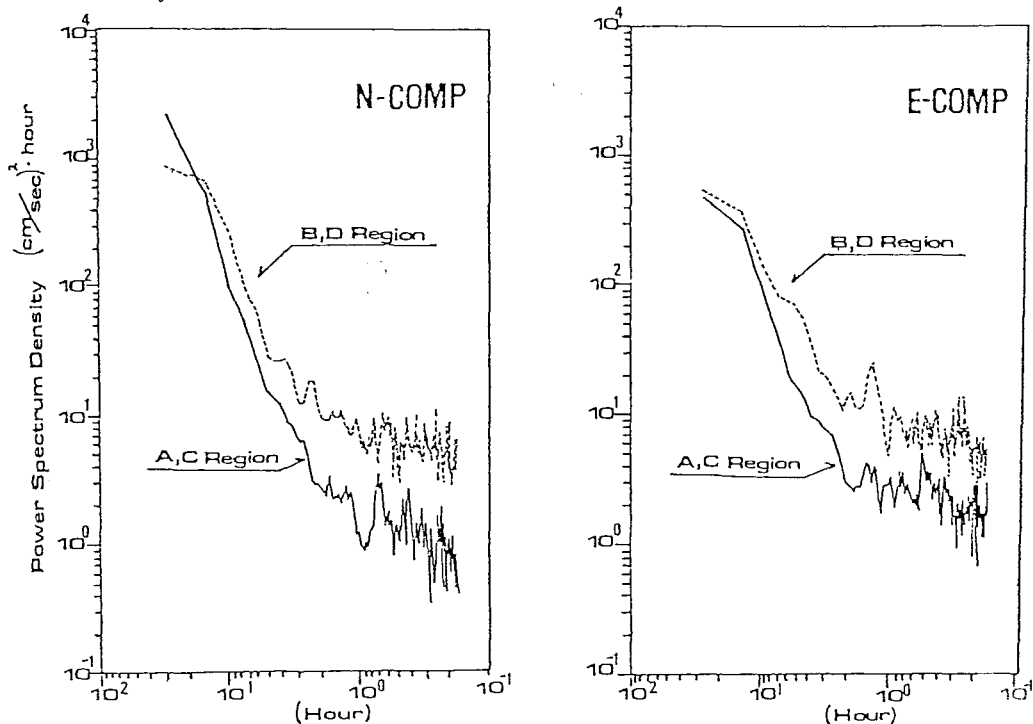


Fig. 1 - 33 Power spectrum density of each component velocity in A, B, C, D region. (9-16 March 1979)

物理パラメータと時空間スケール

Table 1-6 は Table 1-5 から推定されるストローハル数、レイノルズ数、ロスビー数、エクマン数のそれぞれの値を示したものである。さらに、この表をもとに計算される各領域の時間スケール τ 、空間スケール L 、拡散係数 K の値を Table 1-7 に示した。

これらの表によると、各領域の時間スケールは、A領域とC領域では一日以上になり、B領域とD領域では一日以下になる。次に空間スケールは上流側のB領域では境界層の幅 ($10^2 \sim 10^3$ m) に相当する。同じ空間スケールをもつ後流域 (D領域) ではその物理的意味として、防波堤の岸沖スケールに相当しているものと思われる。拡散係数は各領域で少し変化がみられるが、平均的には $10^0 \sim 10^1 \text{ m}^2/\text{sec}$ になり、前節で求めた境界層での拡散係数値と同じ大きさになる。

Table 1-6 Order estimation of dynamics term in the A, B, C, D region.

Regions		A	B	C	D
物理パラメータ	Comp.				
ストローハル数 移流項 / 非定常項	X	10^1	$10^0 \sim 10^1$	10^2	10^0
	Y	10^1	$10^0 \sim 10^1$	10^2	$10^0 \sim 10^1$
レイノルズ数 移流項 / 拡散項	X	10^2	$10^1 \sim 10^2$	10^3	10^2
	Y	10^2	$10^0 \sim 10^2$	10^3	$10^0 \sim 10^2$
ロスビー数 移流項 / コリオリ項	X	10^0	$10^0 \sim 10^1$	10^1	10^0
	Y	10^1	$10^0 \sim 10^1$	10^2	$10^0 \sim 10^1$
エクマン数 拡散項 / コリオリ項	X	10^{-2}	10^{-1}	10^{-2}	10^{-1}
	Y	10^{-1}	$10^0 \sim 10^{-1}$	10^{-1}	$10^{-1} \sim 10^0$

ストローハル数 (Strouhal number) : $\tau \cdot u / L$ τ : Time scale
 レイノルズ数 (Reynolds number) : $u \cdot L / K$ L : Space scale
 ロスビー数 (Rossby number) : $u / \omega \cdot L$ u : velocity
 エクマン数 (Ekman number) : $K / \omega \cdot L^2$ K : diffusion coefficient
 ω : rotation velocity of the earth ($7.2 \times 10^{-5} \text{ sec}^{-1}$)

Table 1-7 Order estimation of physical parameter.

Regions		A	B	C	D
	Comp.				
Time scale τ (sec)	X	$10^5 \sim 10^6$	$10^4 \sim 10^5$	$10^5 \sim 10^6$	$10^4 \sim 10^5$
	Y	$10^4 \sim 10^5$	$10^4 \sim 10^5$	$10^4 \sim 10^5$	$10^4 \sim 10^5$
Space scale L (m)	X	10^3	$10^2 \sim 10^3$	$10^2 \sim 10^3$	$10^2 \sim 10^3$
	Y	$10^1 \sim 10^2$	$10^2 \sim 10^3$	$10^1 \sim 10^2$	$10^2 \sim 10^3$
Diffusion coefficient K ($\text{m}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$)	X	10^0	10^0	$10^{-2} \sim 10^{-1}$	$10^{-1} \sim 10^0$
	Y	$10^{-1} \sim 10^0$	10^{-1}	$10^{-3} \sim 10^{-2}$	$10^{-1} \sim 10^2$
Velocity u ($\text{m} \cdot \text{sec}^{-1}$) *	X	10^{-1}	10^{-1}	10^{-1}	10^{-1}
	Y	2×10^{-1}	10^{-1}	3×10^{-1}	10^{-1}

* observed value

第4節 沿岸流境界層の構造と機能

第1章第3節で明らかにされた沿岸域での海底摩擦によって形成された沿岸流境界層について、この節では更に境界層内部の流速シア構造とそれに付随する沿岸拡散特性の実態を詳しく考察した。

4.1 観測資料と処理方法

流速変動の統計値

1972年以降、大熊海域を中心とする県中海域でアンデラ型流速計によって観測された流速記録から、沿岸成分（南北方向）、岸沖成分（東西方向）における各流速成分について、観測期間中の平均値と標準偏差を計算した。

温水拡散分布

1980年10月に第一原子力発電所南側海域において調査した資料を使用した（福島県水産試験場、1980）。サーミスタ水温計を海面下0.5m, 2m, 3m, 3m, 4mの計4ヶ所に取り付けた鉄パイプを観測船の舷側に固定して、所定のコースを航走し水温測定を実施した。また、広域の温排水分布を観測するため、別途実施している航空機による熱赤外線スキャンニングによる水温分布資料も利用した。

沿岸拡散実験

富岡地先の第二原子力発電所北側で東京電力株式会社によって実施された流速観測、並びにウラニンを使った染料拡散実験の結果から、流速変動のスペクトル密度と拡散係数の岸沖分布について整理した（中村・藤縄・中田・久保田・稲垣、1982）。

4.2 観測結果と考察

沿岸流のシア構造

a) 流速変動の平均値及び標準偏差の岸沖分布

沿岸方向の流速変動の標準偏差 V_{SD} や平均値 \bar{V} の岸沖方向分布は一様でなく、岸の近くで急激な変化をしている。1976年の浪江での観測と1978年の大熊沖での観測から、流れの標準偏差 V_{SD} の岸沖分布（Fig. 1-34）を見ると、岸の近く（離岸1m~1.5km）で急激な減衰がみられる。

一方、沿岸方向の平均流速 \bar{V} の分布（Fig. 1-35）は逆に岸の近くで大きくなっている。

境界層の流れの特性を表わす2つのパラメータを次のように定義した。

$$\alpha = U_{SD} / V_{SD}$$

$$\beta = [(U_{SD}^2 + V_{SD}^2) / (\bar{U}^2 + \bar{V}^2)]^{1/2}$$

α は流れの偏平度を表わし、 $\alpha \approx 0$ の場合沿岸方向の流れが卓越し、 $\alpha \gg 1$ は岸沖方向の流れが卓越する場合で、 $\alpha = 1$ 流れの場が等方向であることを意味している。

β は流れの平均値と標準偏差の比を表わしており $\beta \approx 0$ の場合は平均流成分が大きく、 $\beta \gg 1$ は振動流成分が卓越する場合である。これらの α 、 β の岸沖分布を示したFig. 1-36とFig. 1-37には岸の近くで顕著な変化がみられ、水深10m~20mの帯域にそれぞれの分布に極少点が現われている。

岸近くでの α 分布の様子をもっと詳しく調べるため、大熊海岸の地先0.5km, 1km, 1.5kmにおいて1972年から1978年までの間に実施された13ケースの流速観測の結果から流速変動の α 値を計算し、Table 1-8に示した。これによると大熊海岸の沖1.5kmまでの範囲における α の変化は

減少傾向 ($d\alpha/dx < 0$) にある。これらの結果から流れの偏平度を示す α 分布の模式図を Fig. 1-38 に示した。

ここでA領域とは離岸距離1.5km程までの範囲で、その沖にB領域が広がっている。つまり、碎波帯の沖側から離岸距離1km~1.5km付近までの範囲で流速分布が急激に変化するA領域が存在しており、その沖側のB領域では流速分布の変化は小さく、離岸距離10km~15km付近では

$$V_{SD} \doteq U_{SD} \rightarrow \alpha \doteq 1, \bar{U}, \bar{V} \doteq 0, \beta \gg 1$$

等の流れの特徴が現われている。

A、B領域はTable 1-9に示された種々の流れの特徴から区分され、A領域に示される範囲を沿岸流境界層 (coastal boundary layer) の幅と考えられる。

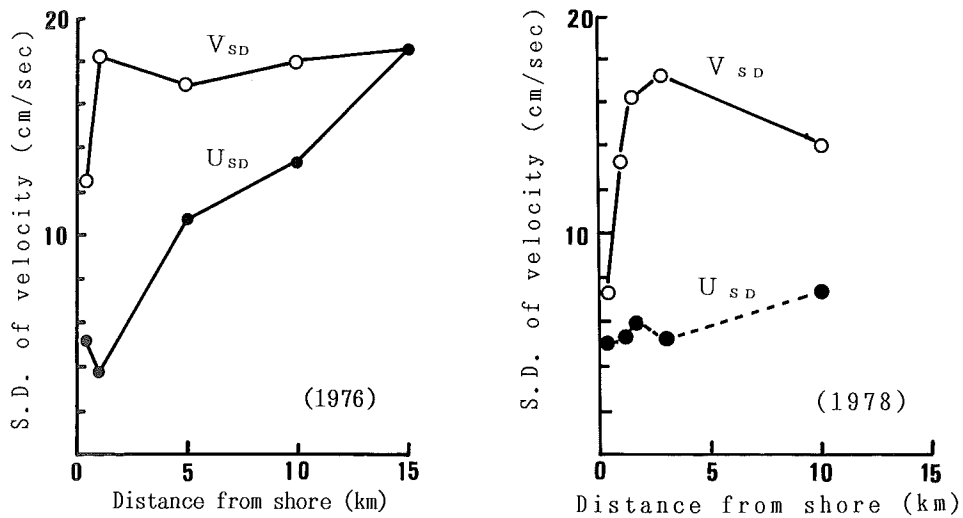


Fig. 1-34 Offshore distributions of V_{SD} , U_{SD} (standard deviation of current) off Namie coast (1976) and Okuma coast (1978).

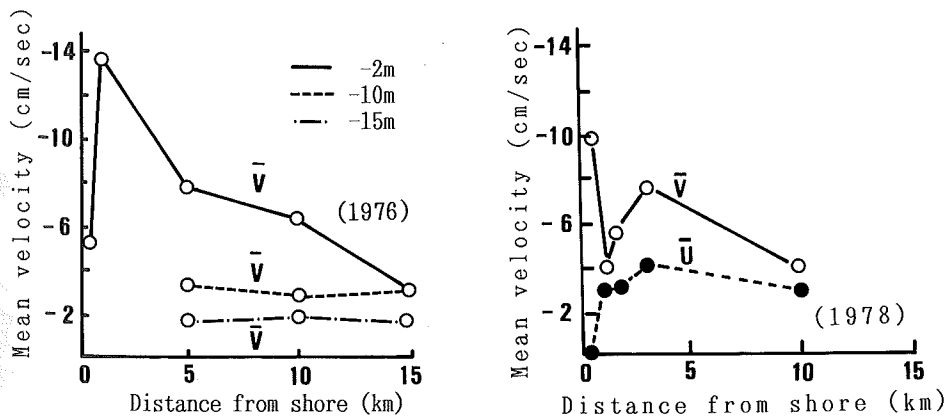


Fig. 1-35 Offshore distributions of \bar{V} , \bar{U} (mean of current) off Namie coast (1976) and Okuma coast (1978).

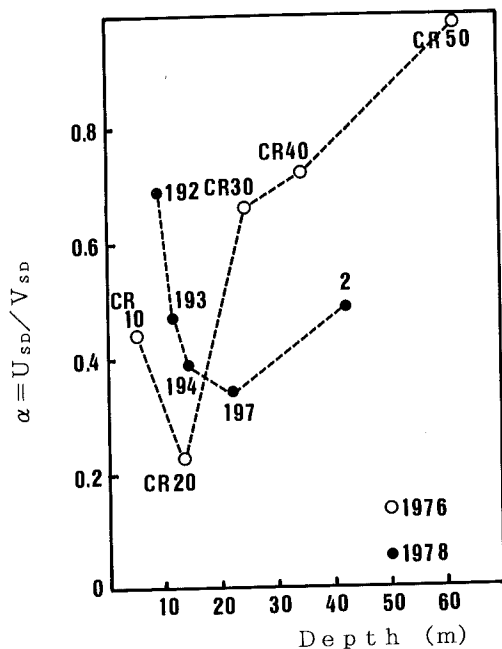


Fig. 1-36 Offshore distributions of α value.
Number in figure indicated observed station No. See in Fig. 1-4 (b).

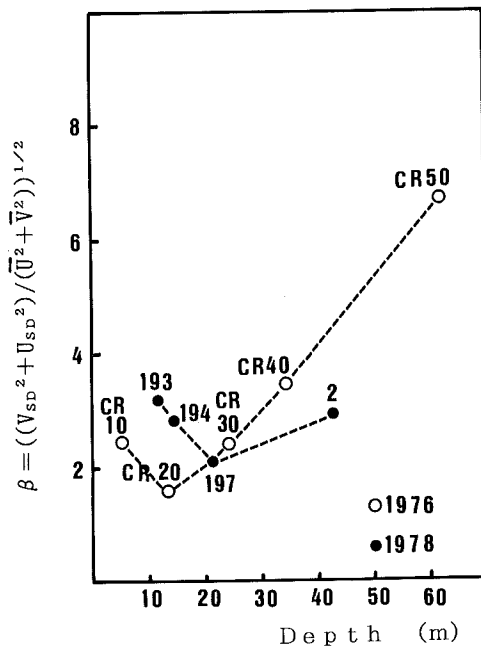


Fig. 1-37 Offshore distributions of β value.
Number in figure indicated observed station No. See in Fig. 1-4 (b).

Table 1-8 α distribution on Okuma coast.

No.	PERIOD	st	α			
1	1972 3/01-3/14	192 193 194	0.57	0.59	0.66	
2	1972 6/01-6/14	192 193 194	0.58	0.66	0.54	
3	1972 6/01-6/14	122 123 124	0.74	0.62	0.61	
4	1972 8/01-8/14	192 193 194	0.64	0.54	0.60	
5	1972 8/01-8/14	122 123 124	0.51	0.59	0.60	
6	1973 2/01-2/14	192 193 194	0.74	0.70	0.64	
7	1973 2/01-2/14	122 123 124	0.73	0.72	0.63	
8	1974 9/04-9/19	192 193 194	0.78	0.60	0.63	
9	1976 2/26-3/14	122 123 124	0.71	0.58	0.51	
10	1976 2/26-3/14	192 193 194	0.80	0.72	0.57	
11	1976 8/29-9/22	122 123 124	0.72	0.56	0.44	
12	1978 3/04-4/24	122 123 124	0.76	0.58	0.59	
13	1978 3/04-4/24	192 193 194	0.72	0.67	0.59	
		$\bar{\alpha}$	0.69	0.62	0.58	

St. 192, 193, 194: Southside of power station
St. 122, 123, 124: Northside of power station
See in Fig. 1-4 (b)

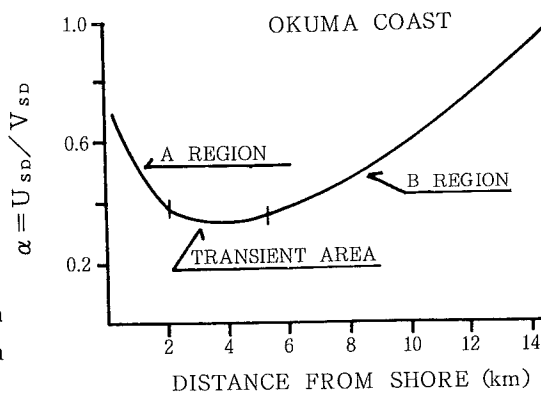


Fig. 1-38 Schematic diagram of α distribution in coastal area.

Table 1 - 9 Characteristic of current structure in the coastal area.

	Region A	Region B	Remark
Range of regions	$\delta_A \doteq 0.2 \sim 1.5 \text{ km}$	$\delta_B \doteq \delta_A \sim 15 \text{ km}$	
δ	Depth : 5~15m	Depth : 15~20m	
Shear of velocity (longshore comp.)	$\frac{d V_{SD}}{d x} > 0$	$\frac{d V_{SD}}{d x} \doteq 0$	$V_{SD}^A < V_{SD}^B$ $V_{SD} : 10 \sim 30 \text{ cm/sec}$
Shear of velocity (offshore comp.)	$\frac{d U_{SD}}{d x} \geq 0$	$\frac{d U_{SD}}{d x} \geq 0$	$U_{SD}^A < U_{SD}^B$ $U_{SD} : 5 \sim 20 \text{ cm/sec}$
$\alpha = \frac{U_{SD}}{V_{SD}}$	$\frac{d \alpha_A}{d x} < 0$	$\frac{d \alpha_B}{d x} > 0$	$\alpha_A : 0.2 \sim 0.7$ $\alpha_B : 0.2 \sim 1.0$
$\beta = \frac{(U_{SD}^2 + V_{SD}^2)^{1/2}}{(\bar{U}^2 + \bar{V}^2)^{1/2}}$	$\beta_A < \beta_B$	$\frac{d \beta_B}{d x} > 0$	$\beta \doteq 0$: mean flow $\beta \gg 1$: oscillation
Diffusion coeffic.	$d K_A / d x < 0$	$K_B \leq K_A$	$K_A : 0.1 \sim 10 \text{ m}^2/\text{sec}$

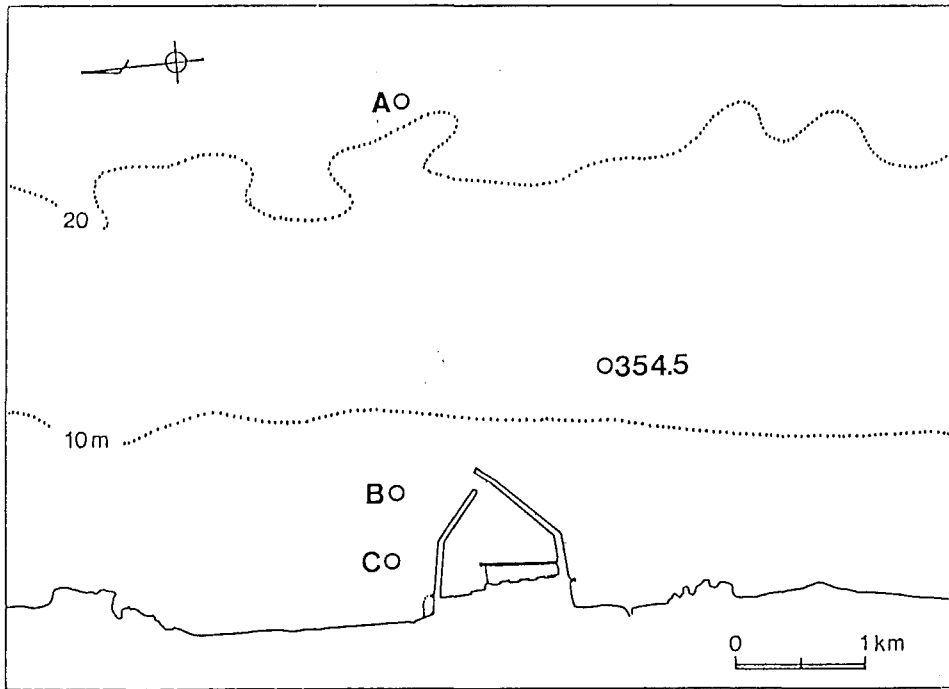


Fig. 1 - 39 Locations of current meter arrays around power station. (1979)

b) 流速スペクトル密度の構造

Fig. 1-40は第二原子力発電所北側の離岸0.5km, 1.0km, 4.0km地点 (Fig. 1-39) においてアンデラ型流速計により海面下2 mで観測された流速変動記録である。防波堤や陸岸の影響をうけているSt. B, C並びにその沖合に位置するSt. Aの流速変動には明確な違いが現われている。岸に近いSt. Cは沖合のSt. Aにくらべて、波や乱流の影響をうけて高周波流速成分が卓越しているのに対し、St. Aでは1日以上持続時間を伴う流速変動が出現している。

この傾向は、流れのスペクトル密度 (Fig. 1-41) でも確認され、半日周期を境にして低周波領域と高周波領域のパワーレベルが沖側のSt. Aと岸に近いSt. Cで逆転している状態が現われている。

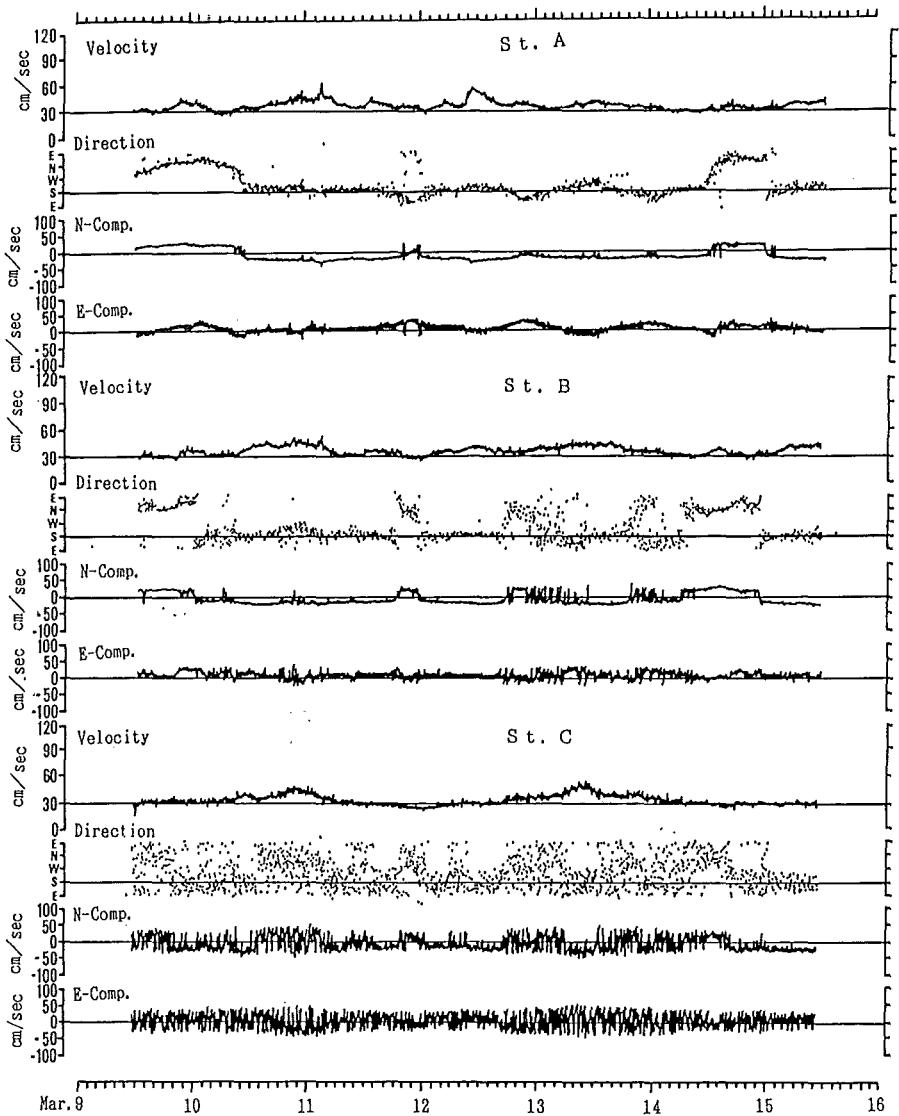


Fig. 1-40 Current records at St. A, St. B, St. C. (1979)

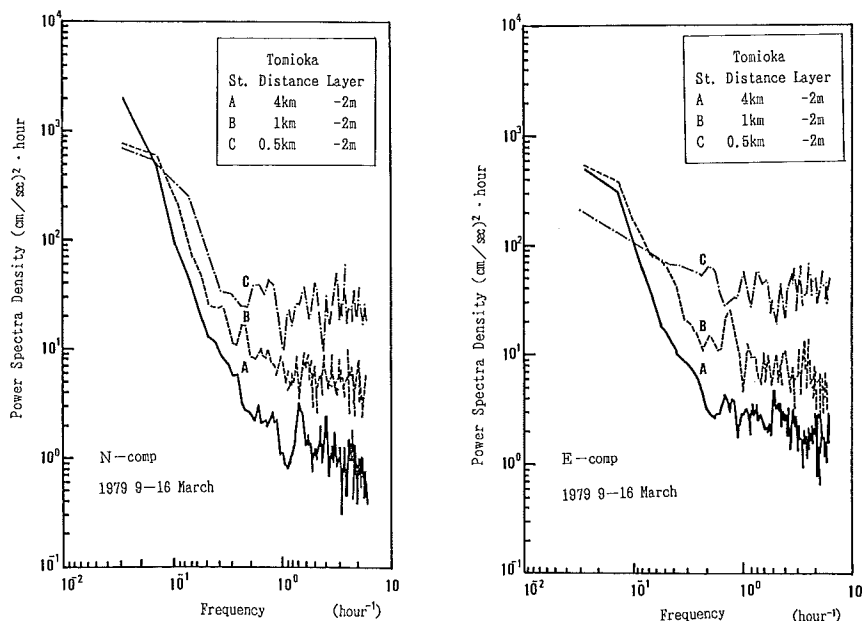


Fig. 1-41 Power spectrum density of current records at each St.

拡散特性

発電所の北側で岸から1.5km沖合までの範囲において、2～4%のウラン溶液をラインソース的に散布し、その後の染料雲の拡散状況を航空写真撮影と採水分析により追跡している。

調査結果 (Fig. 1-42) から離岸距離別の染料雲の拡散係数と移動速度について求められる。拡散係数は、Einsteinの式を次のように変形して染料拡散面積の時間推移から推定される。

$$K = 1/2 \cdot d \sigma^2 / d t$$

$$= (\sigma_{t_2}^2 - \sigma_{t_1}^2) / 2 \cdot (t_2 - t_1)$$

ここで、 σ_{t_1} 、 σ_{t_2} はそれぞれ時間 t_1 、 t_2 における染料雲の濃度分布の標準偏差である。拡散濃度分布が Gauss 型分布であると仮定すると、染料雲の幅 (ここでは沿岸方向の幅) W は 4σ に等しいので拡散係数 K は次式で求まる。

$$K = (W_{t_2}^2 - W_{t_1}^2) / 32 (t_2 - t_1)$$

境界層内における染料拡散実験で得られた拡散係数は、岸沖方向に一樣でなく、染料雲の移動速度の分布とは逆になっている (Fig. 1-43)。実験結果では離岸距離600m付近を境にして染料雲の移動速度は沖側で大きく、一方染料の拡散係数は岸側で大きくなっている。この領域の拡散現象は沿岸流の急激な変化に伴う分散 (dispersion) による効果が大きいと考えられる。

沿岸流境界層の拡散特性を確かめる最適のトレーサが発電所からの温水拡散分布である。Fig. 1-44は熱赤外線スキャンによる温水拡散分布である。南側の汀線から放出された温水は岸にそって6km以上伸びているが、岸沖方向には1km～1.5kmの範囲に留まってフロントを形成している様子が観測されている。また、温水拡散分布の岸沖断面図 (Fig. 1-45) によると、もっと明確にこのフロント構造を捉えられており、いわゆる沿岸エントラップ現象 (林, 1978) が観測されている。

ここに示された沿岸流境界層の物理機構は水産生物にとって重要な意味をもっており、福島沿岸のような開放性海岸でも岸近くに存在する魚卵稚仔・プランクトン、浮遊幼生等が沖へ拡散することを防止する役目をはたしている。

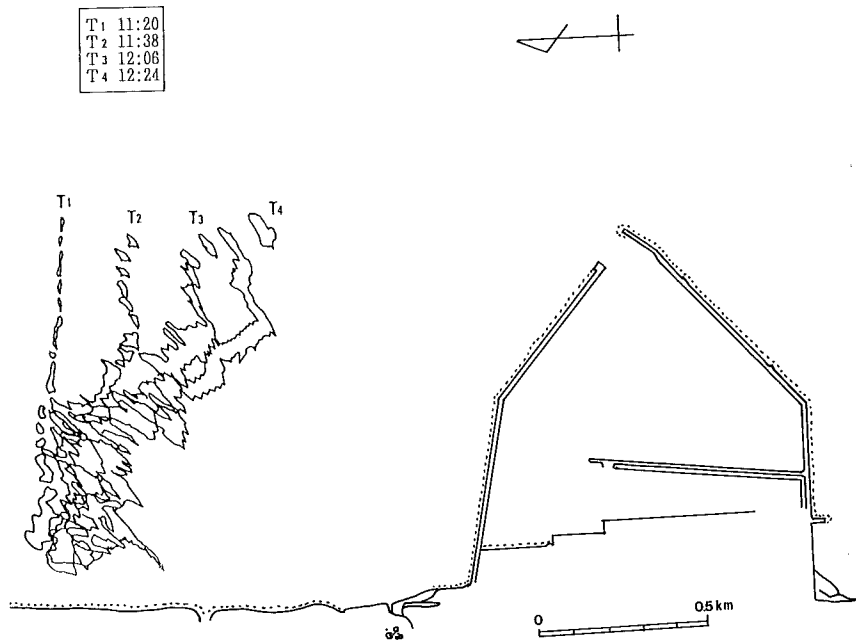


Fig. 1 - 42 Time changed of dye diffusion on line source.

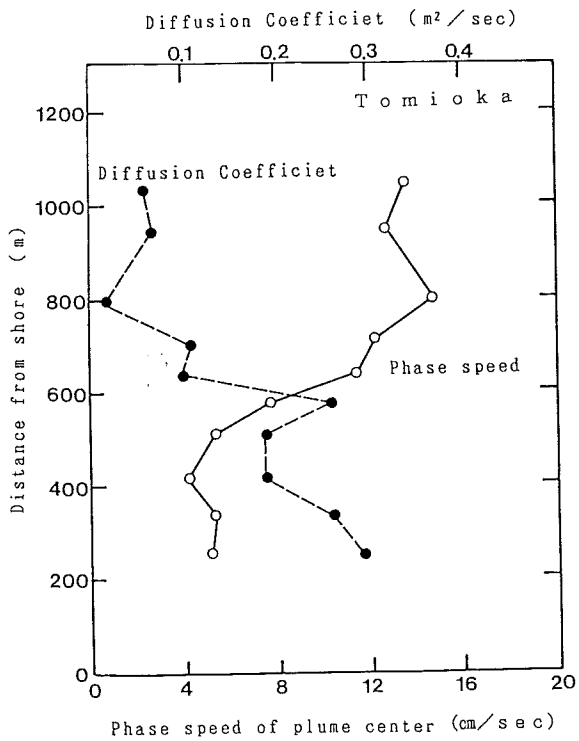


Fig. 1 - 43 Offshore distributions of diffusion coefficient and phase speed for dye cloud.

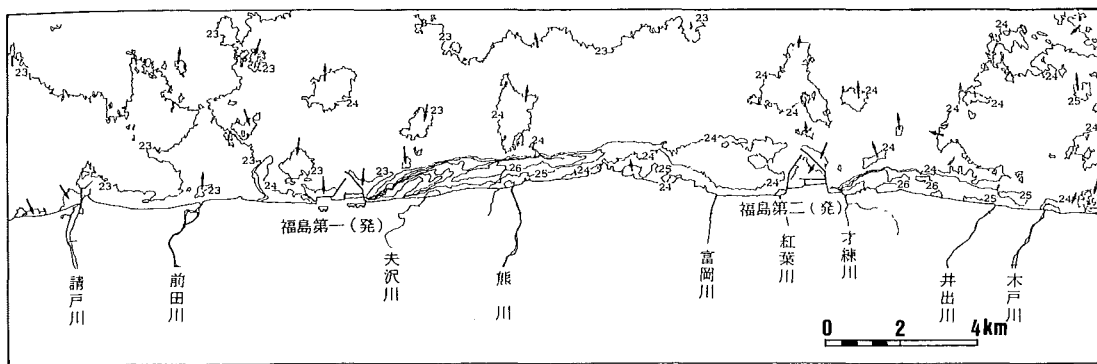


Fig. 1-44 The spreading surface temperatures in a discharged cooling water from power station.
(by Infrared photograph Aug. 1983)

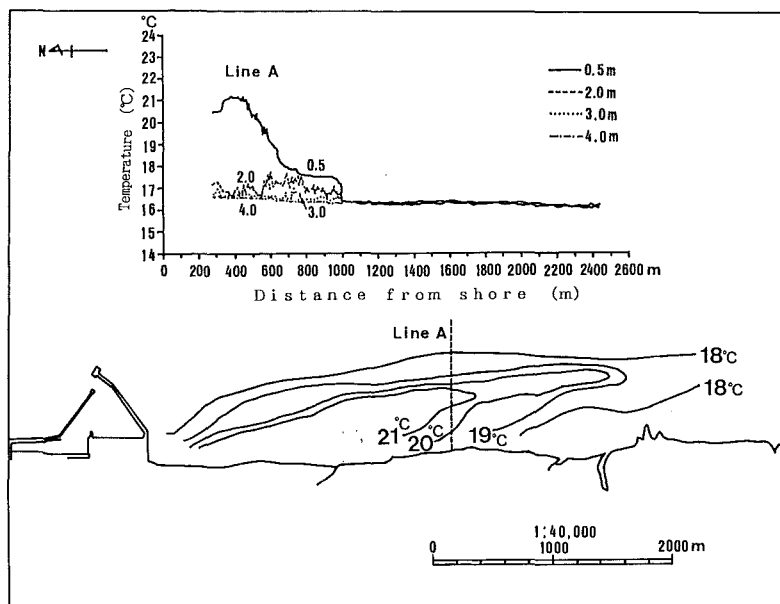


Fig. 1-45 The spreading surface temperatures and offshore distributions of four-layers water temperatures.
(by survey vessel Oct. 1980)

第2章 沿岸域における底面環境特性

これまでの議論で明らかにされた沿岸流境界層の形成されている領域は、また波浪による漂砂現象が強調される場でもある。

波による漂砂移動の限界水深 h_c は移動形式や底面の状態(滑面、粗面)によっても変化するが、福島沿岸における出現波浪統計(Table 2-1)から、平均有義波高($H_{1/3}$: 1.0m)と平均有義波周期($T_{1/3}$: 9.0sec)を参考にして全面移動水深 h_c を見積もると約15mになる。

漂砂による海底地形の変化は、そこに生息するベントスにとって重要な環境要因であるが、これに関連した研究例は極めて少ないといえる。

この章では主に、沿岸流境界層にあたる砂浜海底面上での漂砂変動と底質分布の関係について、以下の項目を検討した。

- 1) 大熊海岸で実施した波高計と電導度砂面計の同時観測結果から、巻き上げ開始時の有義波高の大きさ、有義波高の変化に伴う海底面位置の変動及び、コアサンプル上にみられる漂砂現象の履歴等について明らかにした。
- 2) 第3章で議論されるウバガイの初期減耗過程に関連して、代表的な三つの海岸を選び、それぞれの海岸における漂砂特性と漁場底質のシルト含有率の関係から、平均水深-水深変動幅、平均水深-シルト含有率、水深変動幅-シルト含有率等について明らかにした。
なお、海岸選定の理由は次のとおりである。磯部海岸はウバガイの優良漁場、新舞子海岸、勿来海岸はウバガイの発生が殆ど無いか、再生産力が非常に不安定な海岸である。

第1節 電導度砂面計による海底面の時系列変動と基質構造

1.1 観測方法と底質の分析方法

砂層内と水中での電気電導度の違いを利用して、海底面の位置を計測できる電導度砂面計を第一原子力発電所南側の離岸1km(水深10m、Fig. 2-1)の海底面に設置(Fig. 2-2)して、海底面変動を観測した。同時に、付近にある波高モニターから波高記録を入手して、波高変化と海底面変動の関係を検討した。また、砂面計を設置した海底面において、10cm径の潜水式コアサンプラー(Fig. 2-3)による底質の柱状採泥を実施した。サンプルはベントス用と底質用に2本採取され、回収後ただちに水をぬき4cmピッチにスライスし各層別サンプルについて、ベントスの出現状況と底質項目(酸化還元電位差、泥温分布、中央粒径、強熱減量)の各分析を行なった。

1.2 結果と考察

中村・秋元(1988)は水深10mの海底で波高計と電導度砂面計を使った海底面の変動を観測し次に示す結果を得た。有義波高が1mを越えると浮遊砂による海底浸食が始まり、1.5mの有義波高で約10cmの浸食が記録され、静穏状態にもどる過程で浮遊砂の沈降によって元の地盤高に回復する漂砂現象が観測された(Fig. 2-4)。大熊海岸における年間波高出現表(Table 2-1)によると、1.5m以上の有義波の出現する頻度は16%程で、福島沿岸の砂浜海底では浮遊漂砂による浸食と堆積が年間58日以上、繰り返されている。

同時に採集されたコアサンプルについて各種の分析から基質内構造を調べると、波浪による巻き上げ現象によって表面から20cm~30cmの範囲で底質の均一化がみられる。

一方、ベントスの出現は表層に集中した分布パターンであり(Fig. 2-5)、これは巻き上げられた砂粒やベントス類の落下速度の違いや生物固有の摂餌行動によってもたらされると考えられ

る。

つまり、漂砂現象によって一種の benthic boundary layer (Richard et al., 1976) が形成されているといえる。

Table 2-1 Appearance frequency of wave height and period off Okuma coast.

(Feb. 1965-Mar. 1985)

Wave hight(m)	0.00	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	4.00	5.00	Total
Period (sec)	0.49	0.99	1.49	1.99	2.49	2.99	3.49	3.99	over	
0.0	235	1795	602	67	6	1				2706
	0.34	2.59	0.87	0.10	0.01	0.00				3.90
6.5	370	3151	1391	351	58	16	3			5320
	0.53	4.55	2.01	0.48	0.08	0.02	0.00			7.68
7.5	1143	5282	2753	731	218	60	31	2		10220
	1.65	7.62	3.97	1.05	0.31	0.09	0.04	0.00		14.75
8.5	2729	7582	3751	1413	449	162	71	8		16165
	3.94	10.94	5.41	2.04	0.65	0.23	0.10	0.01		23.32
9.5	3265	6950	3291	1398	630	224	169	27	8	15962
	4.71	10.03	4.75	2.02	0.91	0.32	0.24	0.04	0.01	23.03
10.5	1945	32373	2024	995	533	223	186	44	15	9692
	2.81	5.38	2.92	1.44	0.77	0.32	0.27	0.06	0.02	13.98
11.5	949	1754	1040	639	364	197	177	67	33	5220
	1.37	2.53	1.50	0.92	0.53	0.28	0.26	0.10	0.05	7.53
12.5	359	846	517	376	236	104	101	42	18	2599
	0.52	1.22	0.75	0.54	0.34	0.15	0.15	0.06	0.03	3.75
13.5	80	335	204	137	75	48	51	17	9	956
	0.12	0.48	0.29	0.20	0.11	0.07	0.07	0.02	0.01	1.38
14.5	25	89	65	40	41	26	41	13	10	350
	0.04	0.13	0.09	0.06	0.06	0.04	0.06	0.02	0.01	0.51
15.5	6	25	24	10	13	15	16	3	2	114
over	0.01	0.04	0.03	0.01	0.02	0.02	0.02	0.00	0.00	0.16
Total	11106	31536	15662	6137	2623	1076	846	223	95	60304
	16.03	45.50	22.60	8.86	3.78	1.55	1.22	0.32	0.14	100.00

Upper : Number of appearance

Under : Rate of appearance (%)

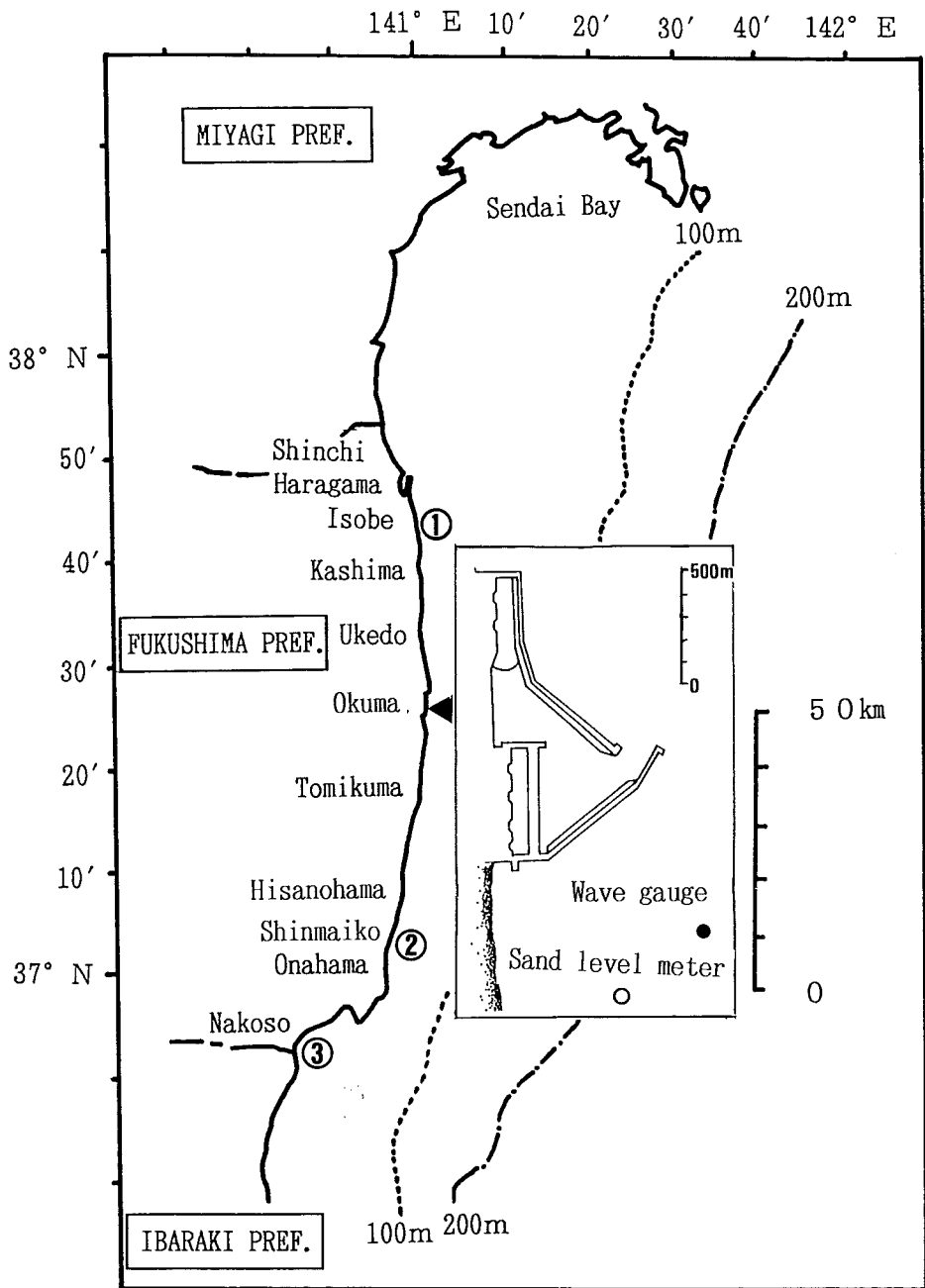


Fig. 2 - 1 Schematic illustration of the Fukushima coastal line and locations of analysis areas for depth change.
 ①Isobe coast, ②Shinmaiko coast, ③Nakoso coast
 (Depth variations in long term)
 Okuma coast (Depth variation in short time).

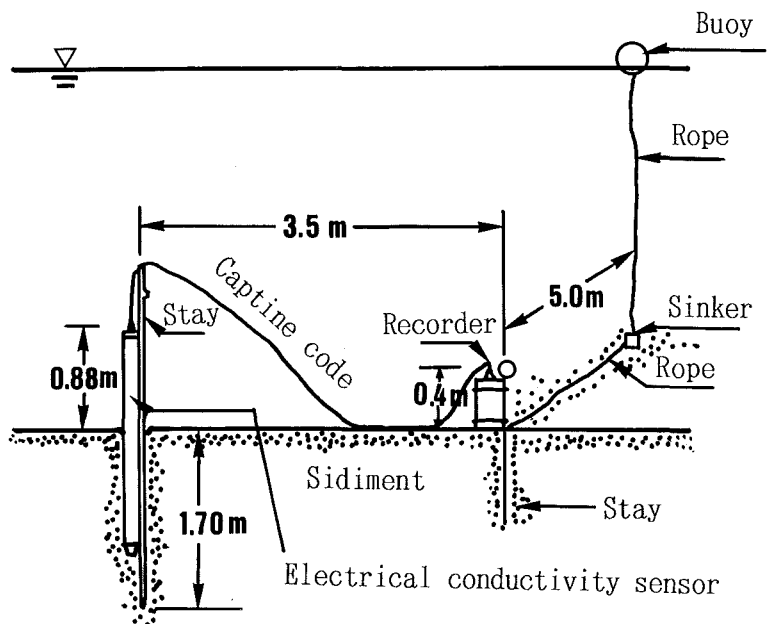


Fig. 2 - 2 View of electrical conductivity sensor and its recorder on the sea bottom.

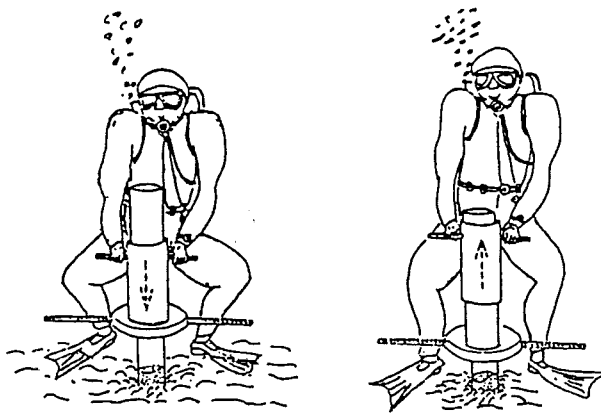


Fig. 2 - 3 Schematic illustration of the core-sampling.

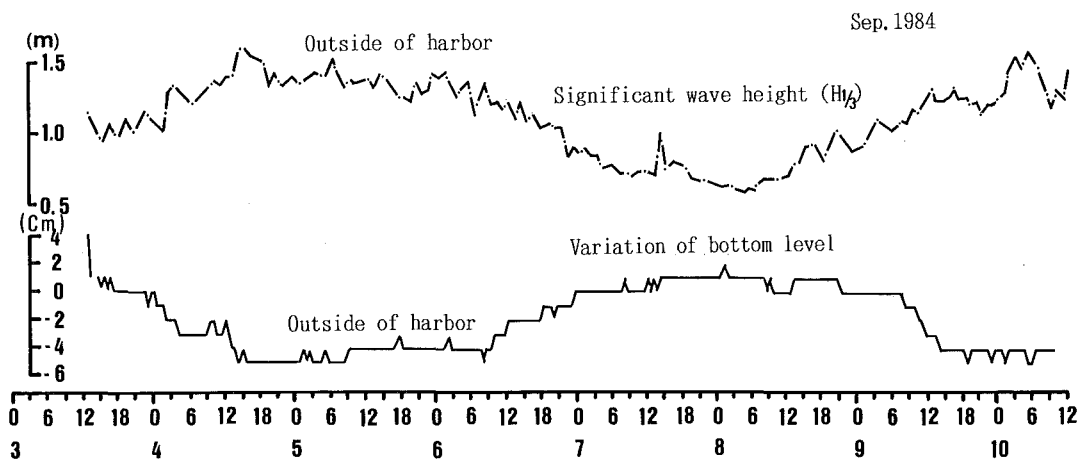


Fig. 2 - 4 Variations of the sea bottom level and the significant wave height.

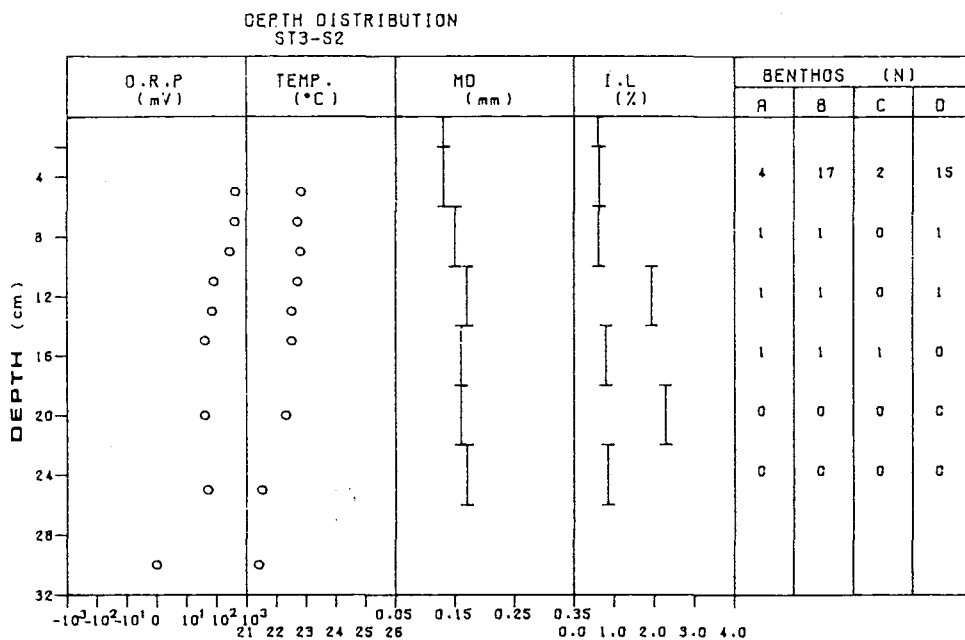


Fig. 2 - 5 Depth profiles of O.R.P, sand temp., median grain size, ignition loss, and Number of benthos:
 A: Total species number, B: Total individual number,
 C: Individual number of not selected suspension feeder,
 D: Individual number of other benthos.

第2節 底質と漂砂変動の岸沖分布

2.1 解析資料

国土保全の一環として、建設省河川局が福島沿岸域において実施している深浅測量記録から、磯部海岸、新舞子海岸、勿来海岸を選び水深分布の長期間の変動状態を調べた。深浅測量は1978年から1987年までに延べ36回実施され、汀線から1.5kmまでの範囲について50m間隔で水深（基準面：T.P.）を計測している。測深方法は砕波帯（水深1m以浅）では、陸上からのレベル測量（測量スタッフはバイダーが持って入る）、また沖合では船による音響測深機によって測深が行われている。測定値は潮位補正と波浪補正が行われた後、T.P.上に表示される。各測点における測量データの時間的平均値及び標準偏差を計算し、測線上の平均水深と水深変動の標準偏差の岸沖分布を求めた。各海岸の深浅測量のおこなわれた領域をFig. 2-1に示した。

2.2 結果と考察

年4回行なわれている深浅測量の結果を使い、福島沿岸三ヶ所の海岸（磯部、新舞子、菊多浦）における水深分布の長周期変動を解析し、次に示す諸分布を求めた。

①平均水深分布 (Fig. 2-6)

②水深変動幅の分布（標準偏差分布） (Fig. 2-7)

磯部海岸の水深分布は北側に鶺ノ尾崎、南に茶屋ヶ崎の両岩礁が沖に張りだしており、海底勾配は南にいく程、緩勾配傾斜の傾向が現われている。水深変動の標準偏差の分布は一般的には、沖から岸に向かって、大きくなる傾向が認められるが、北側の岩礁付近や汀線沿にも微妙な変化がある。

新舞子海岸の等深線形状は沿岸方向にはほぼ平行で、0m~10m水深の海底勾配（1/63）は磯部海岸（1/130）に比べて急勾配であり、水深変動幅の分布も水深分布同様、沿岸に平行に分布している。

勿来海岸は磯部海岸同様、海岸の両端が岩礁域で囲まれた半開放性海岸である。中央部に位置するNo.6測線（Fig. 2-6）上の0m~10m水深の海底勾配は三海岸の中で、最も急勾配（1/45）である。

平均水深・水深変動幅・シルト含有率の岸沖分布

磯部海岸及び勿来海岸では両端が岩礁域であり、平均水深や水深変動幅が非常に複雑に変化している。そこで、各海岸の中央部に位置する測線を代表測線（磯部海岸：No.6、新舞子海岸：No.6、勿来海岸：No.6）にきめ、それぞれの代表測線上における水深分布、水深変動幅と別途実施している底質調査結果（ホッキガイ保護水面調査、地域特産種増殖技術開発調査等）より、水深-水深変動幅、水深変動幅-シルト含有率の関係についての岸沖分布を調べた。

Fig. 2-6及びFig. 2-7より作成した水深変動幅（標準偏差）と離岸距離の関係（Fig. 2-8）には離岸300m~400mを境にして水深変動幅の大きい領域から沖合の小さい領域へ暫時変化している様子が明確に示されている。

また、平均水深に対する水深変動幅の関係（Fig. 2-9）には、それぞれの海岸で微妙な変化がみられる。海底勾配が最も緩やかな磯部海岸では水深変動幅の最大値が他の海岸より沖に出現しており、10m水深付近における変動幅が他の海岸より大きい。

次に、水深-シルト含有率の関係、並びに水深変動幅-シルト含有率の関係について、Fig. 2-10~Fig. 2-11にそれぞれ示した。水深に対するシルト含有率の関係は大局的には正の相関関係がみられるが、海域、時期により分布形状が若干異なる。

一方、水深変動幅とシルト含有率の関係には比較的、明確な負の相関が認められ、シルト含有率

は漂砂変動の強弱に依存していると考えられる。ただし、磯部海岸では他の海岸より、水深変動幅に対するシルト含有率が低い傾向がみられ、特に、水深変動の標準偏差が0.2~0.3の範囲でシルト含有率が5%以下の地点が多く現われている。なお、シルト含有率と有機物量（強熱減量）との間には正の相関が認められることから (Fig. 2-12)、水深の増加に従い有機物量も増加することが推定される。

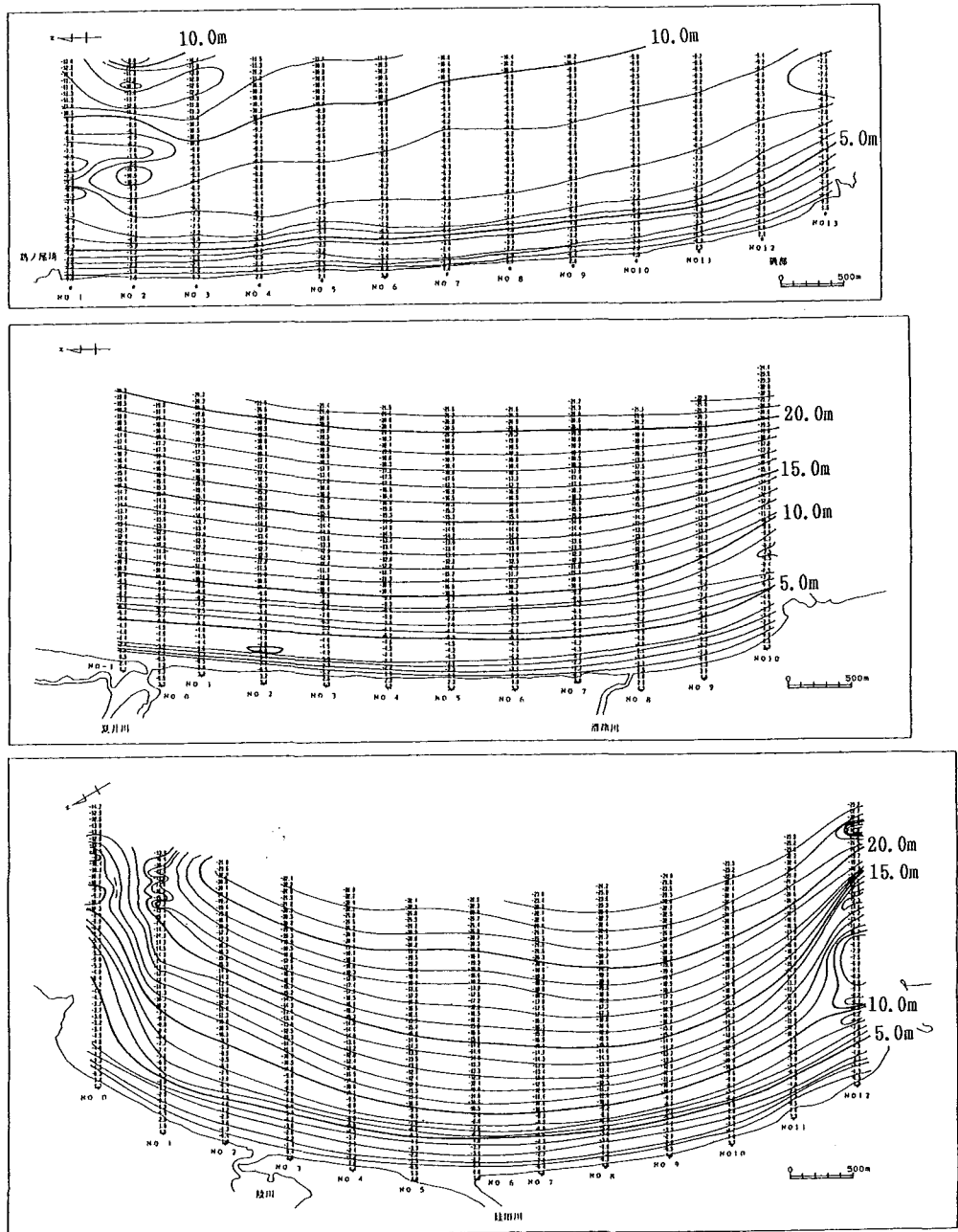


Fig. 2-6 Distributions of mean depth. (Depth in meter on the T.P)
 Upper: Isobe coast, Middle: Shinmaiko coast,
 Under: Nakoso coast.

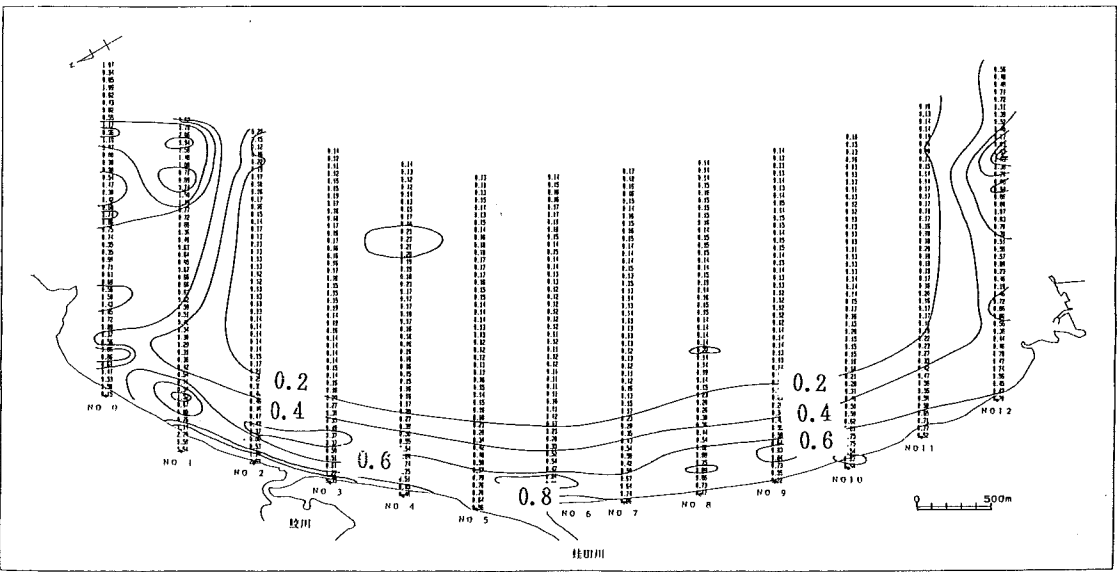
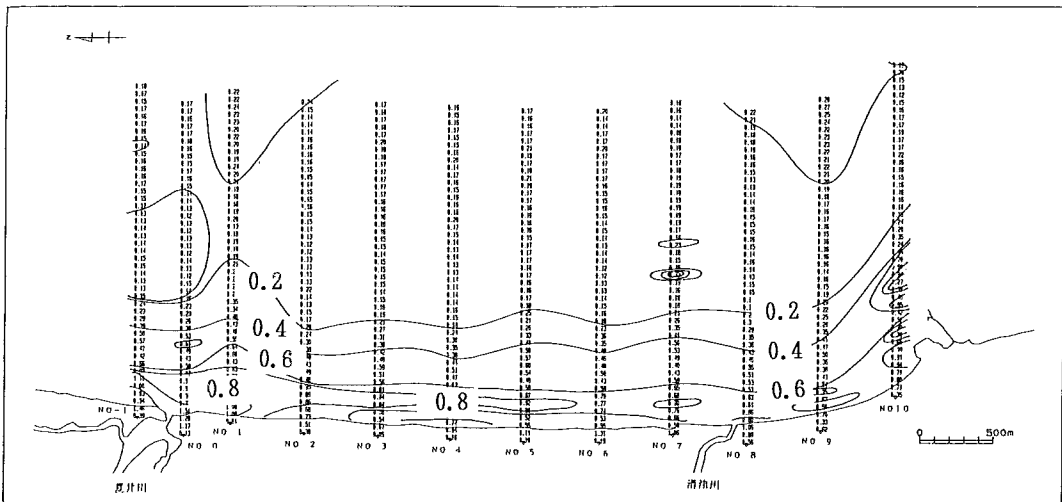
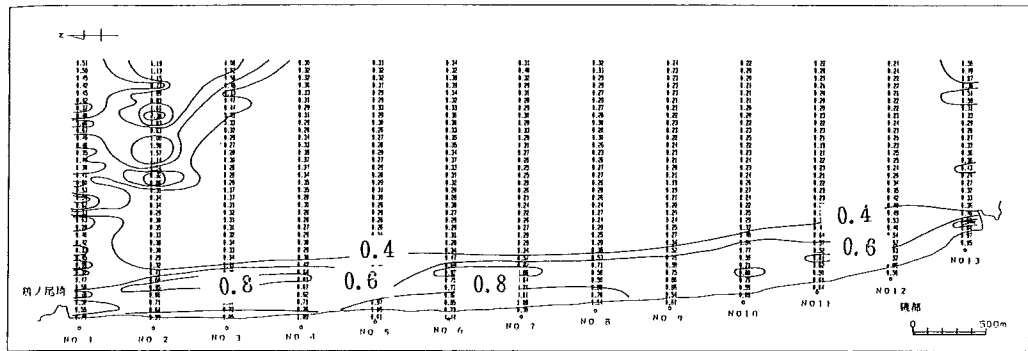


Fig. 2-7 Distributions of standard deviations in depth variations. (Unit: meter)
 Upper: Isobe coast, Middle: Shinmaiko coast, Under: Nakoso coast.

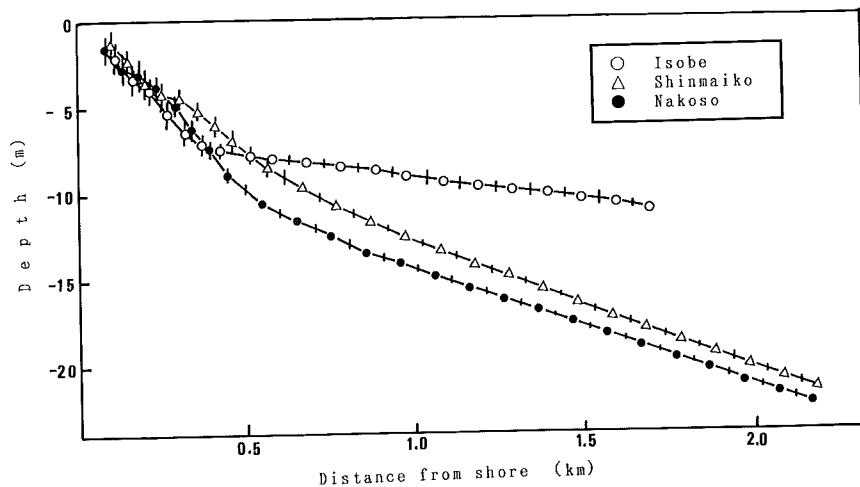


Fig. 2 - 8 Relationship between bottom topography and S.D. of depth variations. Vertical line in the figure are shown S.D of depth variations.

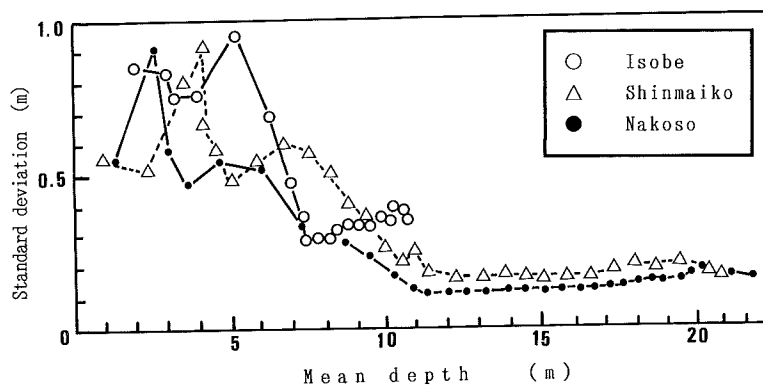


Fig. 2 - 9 Relationship between mean depth and S.D of depth variations.

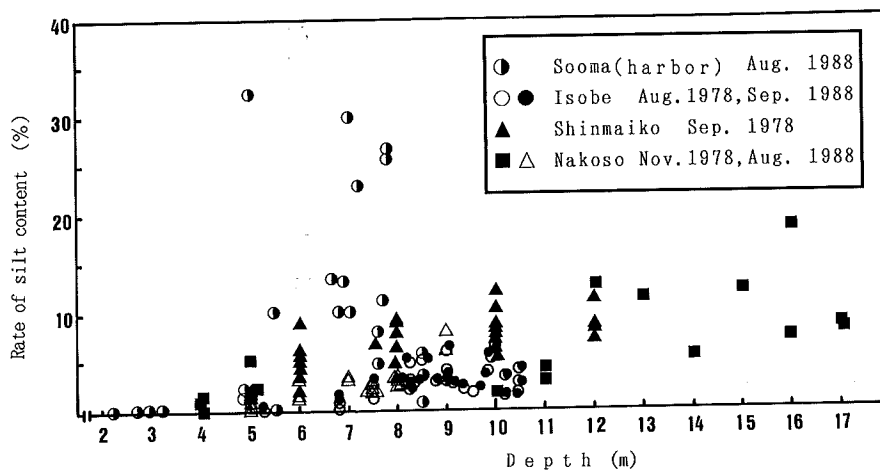


Fig. 2 - 10 Relationship between water depth and rate of silt content.

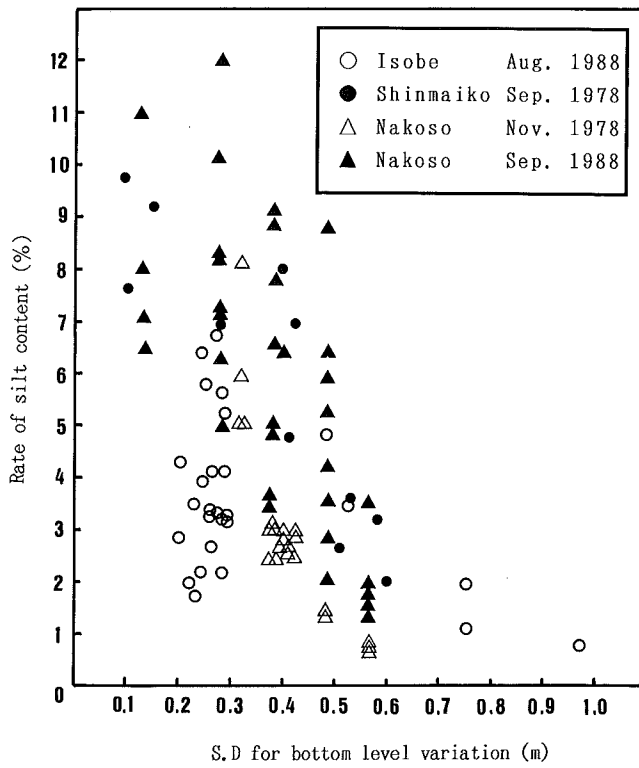


Fig. 2 - 11 Relationship between S.D of bottom level variation and rate of silt content.

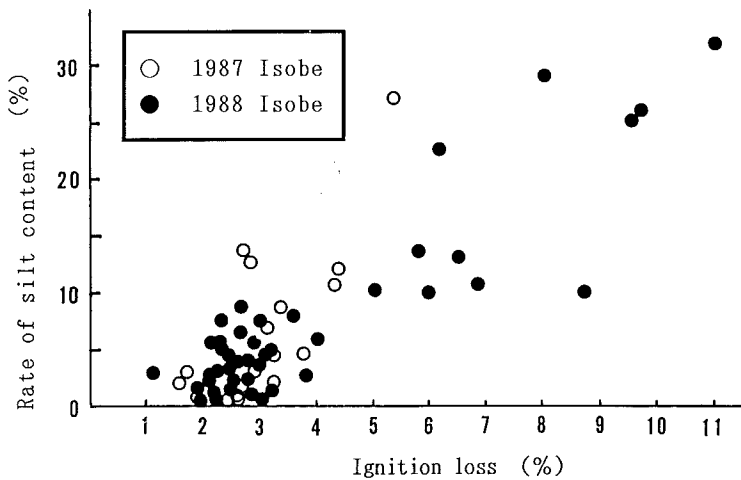


Fig. 2 - 12 Relationship between ignition loss and rate of silt content.

岸沖漂砂の時間変化

各海岸の代表測線について、離岸100m, 150m, 200m, 250m, 300m, 350m, 400m, 450m, 500m, 550m地点における、3ヶ月間隔の水深時系列変動をFig. 2-13に示した。

磯部海岸では100m地点の水深時系列変動をみると、冬期に浸食をうけ春から夏にかけて堆積傾向を示す季別変動が僅かに現われているが、離岸150m以上ではこのような明確な季別変動はみられない。そして、離岸150m~300mの範囲における水深の時間的変動は不規則で、変動の振幅は非常に大きい (Table 2-2)。水深変動幅の大きい範囲は水深分布の重ね合わせ図 (Fig. 2-14) によるとバーやトラフの出現する帯域に相当しているといえる。

最近、茨城県の波崎に建設された運輸省港湾技術研究所の碎波帯総合観測用栈橋、通称“HORF”では、汀線から沖合い400m海底地形変化と海象変動を周年観測している。波崎海岸は海底勾配 (0~5m: 1/70) や最頻度波浪諸元 (1/3有義波高: 0.5m~1.0m, 周期: 7sec~9sec) 等が、大熊海岸とよく似た海浜特性を有している。HORFで観測された海底面位置の日変化率は汀線から離岸200m以上の沖合 (通常は沖浜帯) では20cm/day程で安定して現われている。また、水深変動の標準偏差分布はトラフやバー付近で大きな変化が見られている (加藤・柳嶋・村上・末次, 1987)。

福島沿岸の各海岸や茨城県の波崎海岸における、水深4m~5m付近に現われる標準偏差の大きな範囲は、碎波現象に関係していると思われる。そして、この付近の漂砂形態は碎波帯内でのシートフロー状の漂砂形態から沖浜帯での浮遊漂砂へと変化する中間 (Transition) に位置していることが知られている (Fig. 2-15)。Fig. 2-15によると、離岸距離または、水深帯によって、水深変動の様式が異なっているように思われる。

この点を明らかにするため、各離岸距離 x 別の水深の時系列変動 $h(x, t)$ の相互相関係数 $C(x_i, x_j)$ を次式に従い計算した。

$$C(x_i, x_j) = S_{ij} / \sqrt{S_{ii} S_{jj}}$$

$$S_{ij} = \Sigma (h(x_i, t) - \overline{h(x_i)}) (h(x_j, t) - \overline{h(x_j)})$$

$$S_{ii} = \Sigma (h(x_i, t) - \overline{h(x_i)})^2 \quad S_{jj} = \Sigma (h(x_j, t) - \overline{h(x_j)})^2$$

ここで、 $\overline{h(x_i)}$ は x_i 地点での水深変動の時間的平均値である。

計算結果の相関行列をTable 2-3に示した。この相関行列から推測される水深変動モードの領域区分をFig. 2-14に対してプロットした (Fig. 2-16)。

各海岸とも水深変動の大きい領域間 (磯部海岸: ①と②、新舞子海岸: ②と③、勿来海岸: ①と②) において、負の相関関係がみられることから、岸沖方向の漂砂が確認される。

ただし、岸沖漂砂の移動幅は概ね離岸400m、水深では4m~6mまでの浅海域に限定されており、これより以深の領域では岸側での水深変動とは直接関係しない独立した変動様式が現われている。

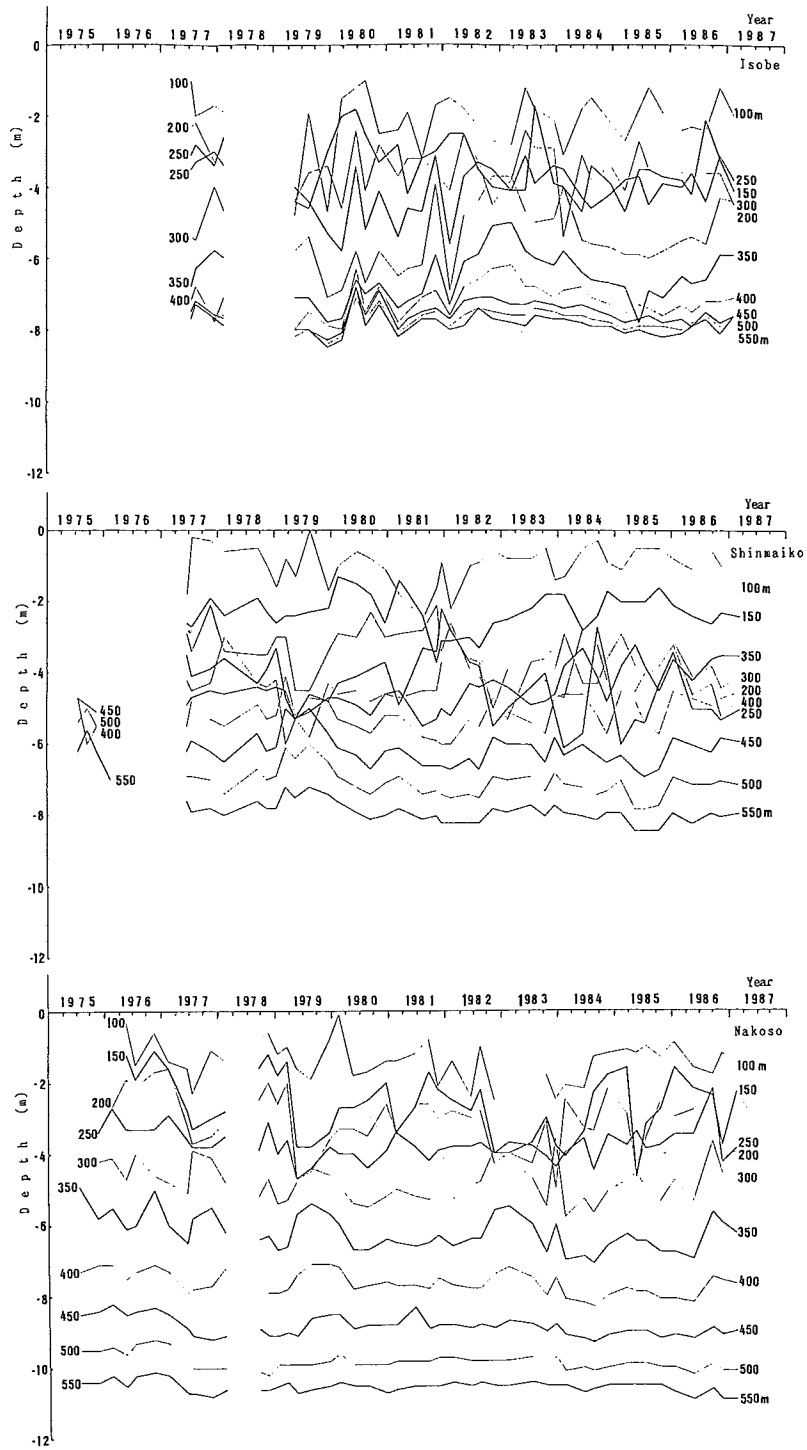


Fig. 2 -13 Time changes of depth in each distance from shore.
 (On the line No.6, See Fig.2-6.)
 Upper: Isobe coast, Middle: Shinmaiko
 Under: Nakoso coast

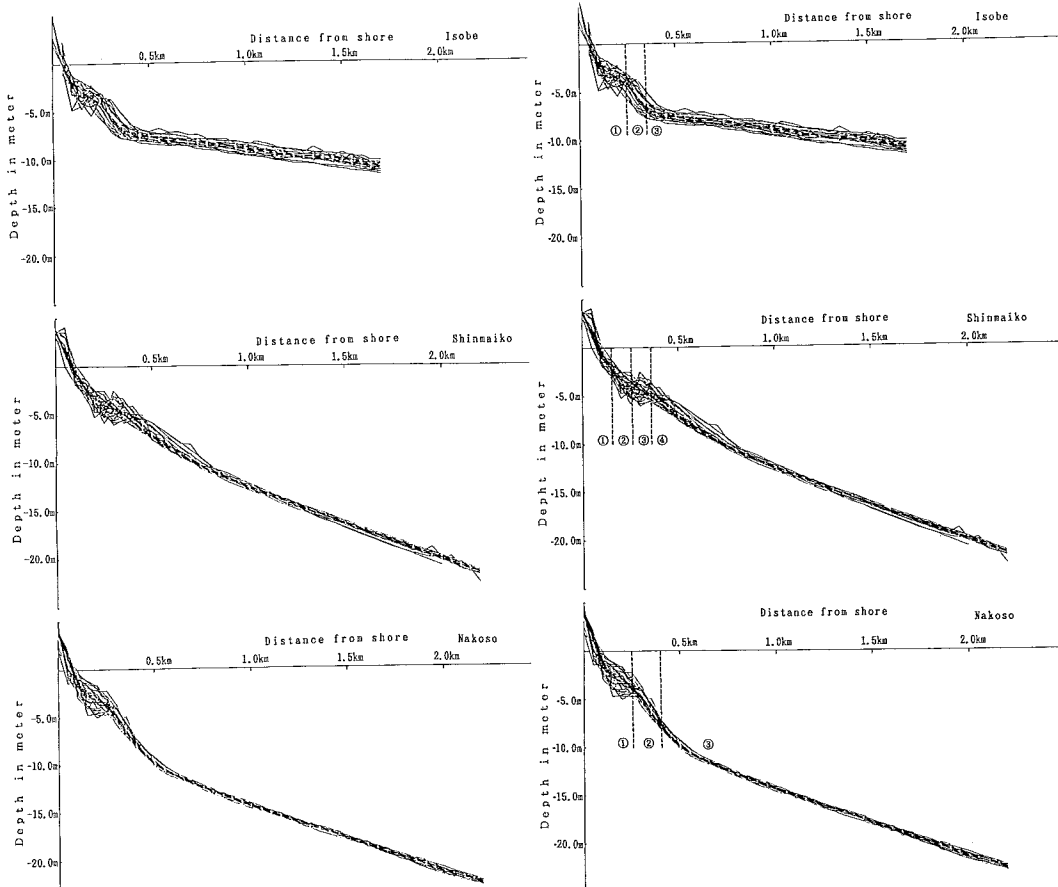


Fig. 2-14 The overlap bottom profile of offshore component. (On the line No6, See Fig.2-6.)
 Upper: Isobe coast
 Middle: Shinmaiko
 Under: Nakoso coast

Fig. 2-16 Classifications of each regions in cross-shore sediment transport areas. (On the line No6, See Fig.2-6.)
 Upper: Isobe coast
 Middle: Shinmaiko coast, Under : Nakoso coast

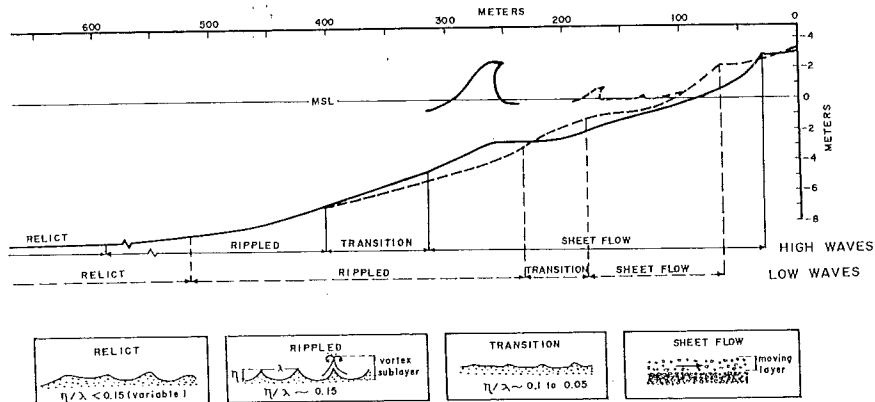


Fig. 2-15 Range in characteristic ripples under varying wave conditions in nearshore waters. (Dingler and Inman, 1976)

Table 2 - 2 Mean, standard deviation of depth variation.

	Mean (m)			S . D (m)		
	Isobe	Shinmaiko	Nakoso	Isobe	Shinmaiko	Nakoso
100m	2.17	0.97	1.48	0.88	0.55	0.61
150m	3.43	2.29	2.73	0.84	0.52	0.90
200m	3.53	3.58	3.24	0.69	0.80	0.80
250m	4.12	4.33	3.84	0.73	0.91	0.44
300m	5.44	4.27	4.93	0.94	0.66	0.51
350m	6.58	4.44	6.36	0.71	0.58	0.44
400m	7.18	5.15	7.72	0.47	0.47	0.30
450m	7.55	6.15	8.91	0.35	0.44	0.21
500m	7.74	7.08	9.90	0.29	0.39	0.14
550m	7.85	7.90	10.55	0.31	0.28	0.13

Table 2 - 3 (a) Correlation matrix of depth variations. (Isobe)

	100m	150m	200m	250m	300m	350m	400m	450m	500m	550m
100m	1.0	0.28	0.28	0.08	0.05	0.10	0.22	0.30	0.34	0.18
150m		1.0	0.16	-0.31	-0.29	-0.18	0.03	0.15	0.19	0.19
200m			1.0	0.27	-0.08	-0.07	0.26	0.35	0.33	0.25
250m				1.0	0.79	0.66	0.58	0.51	0.52	0.47
300m					1.0	0.92	0.72	0.51	0.52	0.39
350m						1.0	0.80	0.64	0.62	0.46
400m							1.0	0.89	0.85	0.74
450m								1.0	0.95	0.85
500m									1.0	0.91
550m										1.0

Table 2 - 3 (b) Correlation matrix of depth variations. (Shinmaiko)

	100m	150m	200m	250m	300m	350m	400m	450m	500m	550m
100m	1.0	0.18	-0.31	-0.14	0.10	0.29	0.21	0.12	0.00	-0.02
150m		1.0	0.10	-0.34	-0.20	0.09	0.14	0.06	0.09	0.16
200m			1.0	0.41	-0.14	-0.43	-0.37	-0.31	-0.08	0.04
250m				1.0	0.29	-0.53	-0.66	-0.33	-0.24	-0.18
300m					1.0	0.36	-0.23	-0.49	-0.60	-0.59
350m						1.0	0.64	0.01	-0.18	-0.26
400m							1.0	0.69	0.55	0.42
450m								1.0	0.94	0.84
500m									1.0	0.94
550m										1.0

Table 2 - 3 (c) Correlation matrix of depth variations. (Nakoso)

	100m	150m	200m	250m	300m	350m	400m	450m	500m	550m
100m	1.0	0.52	0.41	0.10	-0.29	-0.22	-0.13	0.01	-0.14	0.02
150m		1.0	0.76	0.24	-0.35	-0.38	-0.34	-0.17	-0.23	-0.11
200m			1.0	0.49	-0.49	-0.50	-0.45	-0.15	-0.26	0.15
250m				1.0	0.25	-0.01	-0.13	-0.04	-0.10	0.00
300m					1.0	0.81	0.62	0.30	0.33	-0.02
350m						1.0	0.90	0.50	0.41	0.04
400m							1.0	0.74	0.60	0.17
450m								1.0	0.69	0.39
500m									1.0	0.64
550m										1.0

第3章 沿岸域におけるウバガイの初期生活史

ウバガイ *Spisula sachalinensis* は北海道、東北地方では一般にホッキガイと呼ばれ浅海砂浜底に生息する寒海性の成長の早い二枚貝である。分布域は日本沿岸では北海道から本州太平洋岸の範囲で南限は茨城県の鹿島付近といわれている（佐々木、1987）。

本種の福島県沿岸における最近5ヵ年の年間平均漁獲量は約1000トンで北海道に次ぎ全国2位の漁獲実績をあげる重要水産資源である。しかし、昭和48年頃から漁業者による漁業管理が実施されてきたにもかかわらず資源変動は非常に大きく、生産の安定につながっていない。昭和50年後半以降、資源の安定化に向けて砕波帯付近を対象とした幾つかの環境改変計画が提唱されているが場所によっては、有効な事業効果をあげるにいたっていない。

困難性の背景には、産卵後約1ヶ月間における浮遊幼生の不安定な移流分散及び着底後約半年間における急激な初期減耗が存在している。

浮遊期の減耗は主に沿岸流による幼生の漁場外への分散によるもので、発生規模の大小を決定する重要な問題である。また、稚貝生活期に入っても、着底後約半年間で初期着底量の8割以上が減耗すると試算される。

第3章では、沿岸流境界層に生息する有用二枚貝資源の代表としてウバガイを選び、その生活史（Fig. 3-1）の中で資源発生量を決定すると思われる産卵後約半年間の初期生活史に焦点をあて、以下に示す事柄について解析した。

第3章第1節ではウバガイの資源変動性と漁場特性について

第3章第2節では大量発生についての沿岸水理学的条件について

第3章第3節では稚貝の輸送モデルと漁場形成機構について

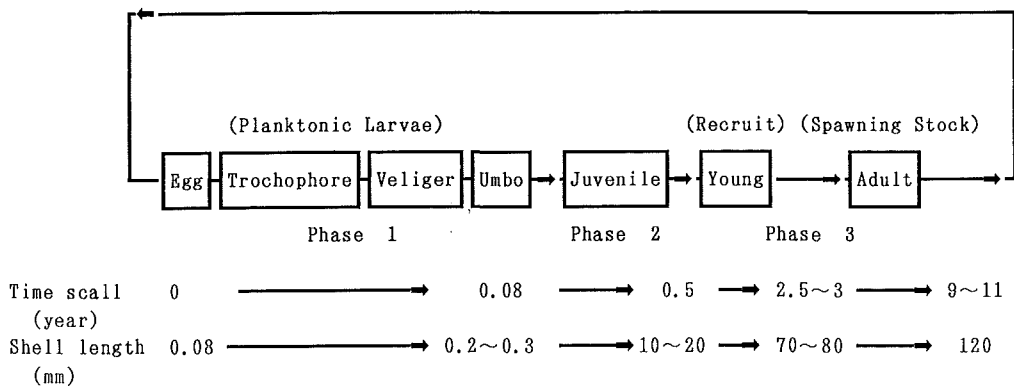


Fig. 3-1 Life cycle of the surf clam.

第1節 ウバガイの資源変動性と漁場環境特性

1.1 解析資料と測定方法

磯部漁場におけるウバガイの資源量

福島沿岸で最大の漁獲量をはこる磯部漁場（Fig. 3-2）では昭和30年代後半以降、毎年定期的（5月、11月）にウバガイの資源状態を調査している。

調査方法は、①着底後半年間に於ける当才貝（殻長が1cm未満）の出現数を把握するための、スミス・マッキンタイヤ型採泥器（採泥面積=0.1m²）による稚貝発生量調査と、②目合1.6cmの稚貝網をつけたホッキマンガによる桁曳調査である。

採集されたサンプルはウバガイとその他のベントスに選別され、ウバガイについては、殻長（Fig. 3-3）と湿重量を計測し、その殻長組成の年級分離により地点ごとの年齢別出現個体数を求めた。

スミス・マッキンタイヤ型採泥器で採取したサンプルの一部は底質分析用としてホルマリン固定せず、自然乾燥後に6段階の篩（0.063mm, 0.105mm, 0.125mm, 0.250mm, 0.5mm, 1.0mm）による粒度組成と強熱減量（水質汚濁調査指針による）を測定した。

これらの調査結果はホッキガイ保護水面調査報告書（福島県水産試験場）として、毎年発行されている。

漁協別の年間漁獲量

福島県海面漁業漁獲高統計（福島県農政部水産課）の魚種別・組合別水揚数量（ton/年）、水揚金額（円/年）を使用した。

稚貝の比重、沈降速度、潜砂深度

1.1~1.6の比重に調節した塩化亜鉛溶液を使用して、溶液中の稚貝の沈降、浮遊状態から殻長別の比重を推定した。使用した稚貝は1988年発生貝で殻長は3mm~18mmの範囲である。また、塩化亜鉛溶液の比重濃度は棒状比重計によって測定した。

また、稚貝の沈降速度は500ml用シリンダーに15℃の海水を満たし、表面からウバガイ稚貝を静かに放し底に届くまでの時間から測定した。測定した稚貝の殻長範囲は2mm~25mmである。

潜砂深度の計測は次のような方法で行なった。縦30cm×横25cm×深さ4cmのパットの中に中央粒径が0.12mmの海砂を3cmの深さに敷き、15℃の海水を注いだ状態でウバガイ稚貝（殻長範囲は10mm~37mm）を収容した。1日後に潜砂状況を確認してから静かに海水を抜き、パットの壁面に近い部分から砂を掘り1個体ずつの潜砂深度を計測した。

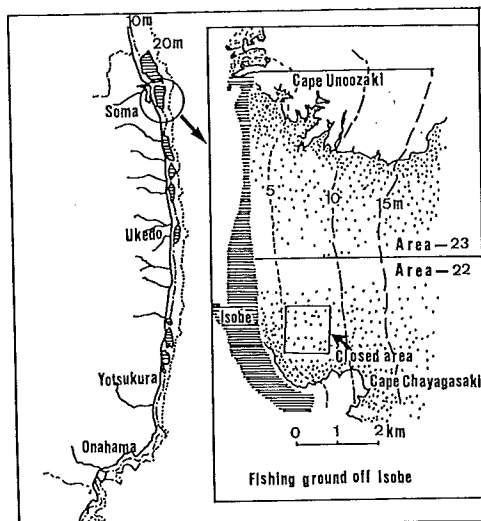


Fig. 3-2 Distribution of fishing grounds for the surf clam in Fukushima Pref. and outline of the fishing ground off Isobe.

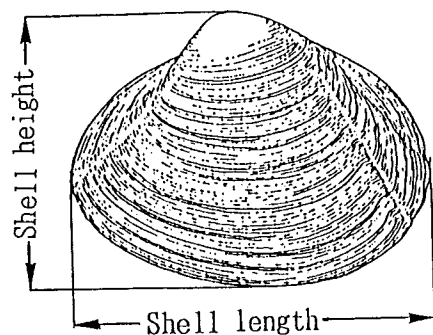


Fig. 3-3 *Spisula sachalinensis*.

1. 2 結果と考察

漁獲量と資源発生量の年次変化

海面漁業漁獲高統計（福島県農政課水産課発行）による1965年以降の県下各漁協別漁獲量の推移をTable 3-1に示した。同表及び、毎年実施しているホッキガイ保護水面調査の結果から福島沿岸における最大の漁獲実績をあげている磯部漁場の漁獲量と稚貝発生量の推移について、Fig. 3-4に示した。また、Table 3-1から、県下各漁場における漁獲量を平均値と標準偏差で正規化したものをFig. 3-5に示した。Fig. 3-4によると、ウバガイの発生量が年次別に不規則であること、及び卓越年級群の発生により発生後2、3年以降の漁業が維持されている状況が示された。

また、標準化された漁獲量変動が各漁場でよく似ていることから、発生規模の大きさが個々の漁場環境条件だけでなく、より大きい空間スケールの環境要因に支配されていること等が推定される。

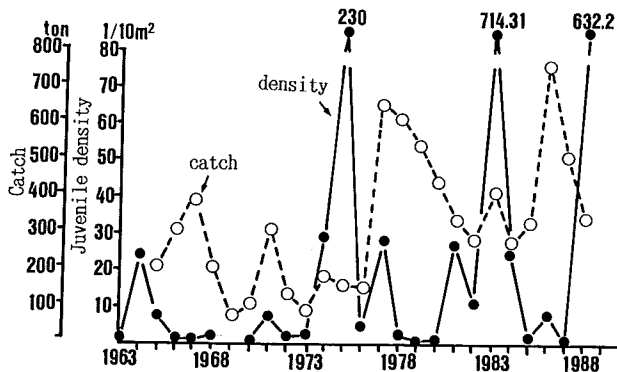


Fig. 3-4 Annual variations of total catch and occurred shell density of the surf clam in the Isobe fishing ground. (1963-1988)
○: total catch (ton/year), ●: occurred shell density (n/10m²)

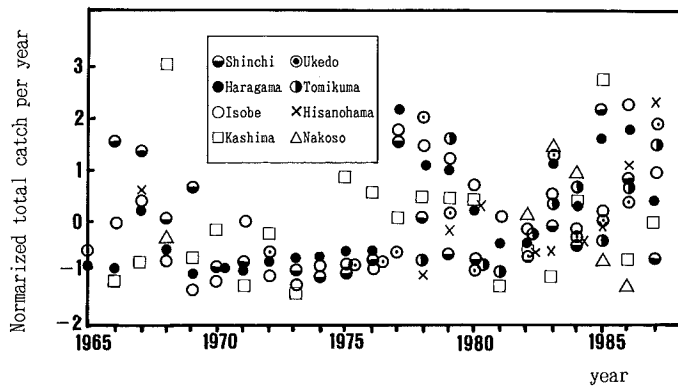


Fig. 3-5 Annual variations in normalized catch of the surf clam each fishing ground of Fukushima coast. (1965-1987)
Normalized catch: $(c_t - c_{mean}) / c_{SD}$

Table 3-1 Annual variations in catch of the surf clam landed to each Fisheries Cooperative Associations (Fisheries Statistics in Fukushima Pref.)

F.C.A* Year	Shinchi	Haragama	Isobe	kashima	Ukedo	Tomikuma	Hisanohama	Nakoso	Iwaki	Total catch	Total price
1965		6	209						7	222	34,492
1966	159	14	311	14						498	62,097
1967	150	141	398	27				17		733	88,640
1968	64	50	204	161			74		2	555	72,437
1969	101	4	74	27						206	44,613
1970	4	14	112	49						179	22,107
1971	7	7	319	10						345	53,435
1972		31	138	45	22					236	40,765
1973	4	30	96	8	0					138	53,122
1974	1	33	187	93						314	155,049
1975	1	40	165	84	1					291	166,450
1976	14	45	162	73	3					297	216,933
1977	160	355	657	56	34	0				1,262	772,957
1978	66	237	618	70	361	6	2			1,360	960,811
1979	20	234	542	68	131	32	40			1,067	898,023
1980	9	146	448	85	97	4	61			850	795,370
1981		62	347	50	0	3	0		0	462	526,214
1982		57	292	37	36	11	20	24		477	515,765
1983	61	240	419	17	267	19	22	46		1,091	824,276
1984	37	151	270	70	76	22	32	39		697	639,447
1985	192	289	335	67	107	9	43	10		1,052	575,814
1986	108	313	769	30	156	21	96	1		1,494	698,683
1987	16	164	520	53	356	31	155			1,295	745,606
Mean	61.79	115.78	330.09	54.27	109.80	14.36	49.55	22.83	3.00		
S.D	64.17	111.86	191.53	34.87	124.95	11.25	45.60	17.17	3.61		
C.V	1.04	0.97	0.58	0.64	1.14	0.78	0.92	0.75	1.20		

Unit catch:ton/year price:thousand yen

* F.C.A Fisheries Cooperative Association

再生産関係と初期減耗の安定時期

コタマガイ *Gomphina melanaegis*、チョウセンハマグリ *Meretrix lamarchii* 等の外海性二枚貝はウバガイと同様、資源変動が非常に不規則で、稀に出現する卓越年級群により漁業が支えられていることについては、既に知られている(福田、1976;小沼、1976)。産卵数は母貝密度に依存していると思われるが、産卵母貝数と稚貝発生数との間における再生産関係が不確定(Fig. 3-6)であることから、ウバガイの場合、資源発生量の規模は浮遊期と稚貝期における大きな初期減耗の程度に依存していると考えられる。発生稚貝の初期生残率の変化を海域別にみると、港内における初期の稚貝出現密度は、外海漁場に比べて大きい、その後の減耗も著しい(Fig. 3-8)。また、同一漁場内においても、水深帯によって、見かけ上の稚貝の生残率が微妙に異なる(Fig. 3-9)。

そして、底質のシルト含有率の分布(Fig. 2-10)と稚貝の生残率を比較検討すると、稚貝の生残率がシルト含有率に影響を受けていることが示唆された。

発生稚貝の初期生残率は年次別(Fig. 3-7)にも、海域別(Fig. 3-8)にも、水深別(Fig. 3-9)にも変化し複雑であるが、殻長が10mm~20mmを超えると生残率が向上(Fig. 3-10)し、稚貝分布の移動も大局的には安定してくる(Fig. 3-11)。

また、この時点で2年~3年先に漁獲対象資源へ添加する量がおおよそ予測できるようになる(Fig. 3-12)。以上の結果から、ウバガイのライフサイクル(Fig. 3-1)の中で産卵後の半年が資源学的に重要な期間であることが確認された。

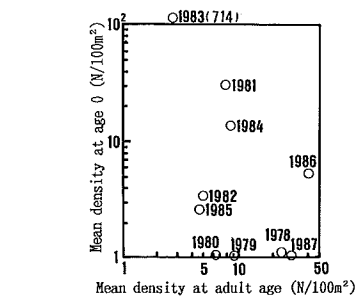
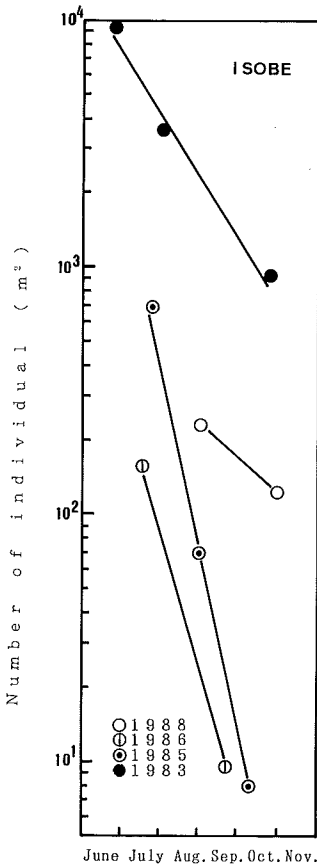


Fig. 3-6 Relationship between the mean density at over age -2 (Dec. in last year) and the mean density at age-0 (Dec. in this year).

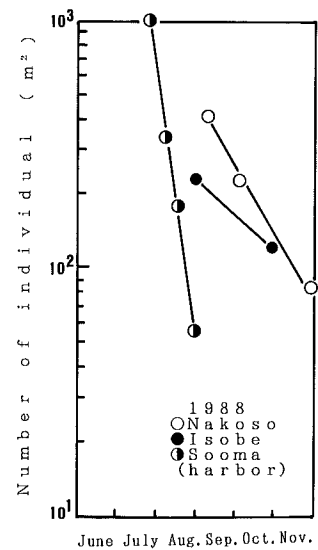


Fig. 3-8 Decreasing trend of the mean density for the three coastal areas during the July-Nov. 1988.

Sampling was made at a station with a 0.1m² Smith-Mcintyre bottom sampler.

Fig. 3-7 Decreasing trend of the each year classes in the Isobe fishing ground during their first year.

Sampling was made at a station with a 0.1m² Smith-Mcintyre bottom sampler.

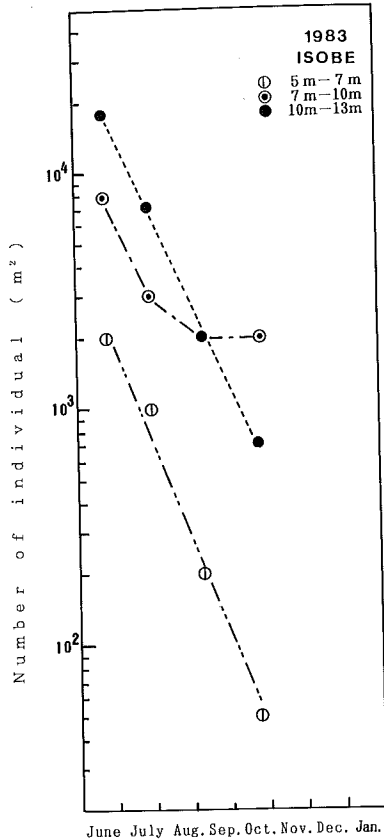


Fig. 3 - 9 (a) Decreasing trend of the mean density each depth zone in the Isope fishing ground during June-Nov. (1983)
Sampling was made at a station with a 0.1m² Smith-Mcintyre bottom sampler. (after Sasaki, 1988)

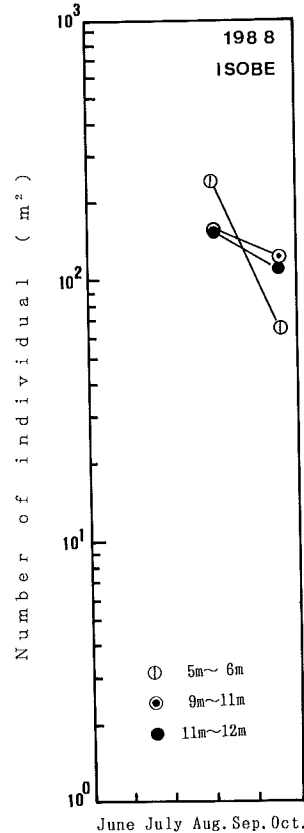


Fig. 3 - 9 (b) Decreasing trend of the mean density each depth zone in the Isope fishing ground during Aug. -Oct. (1988)
Sampling was made at a station with a 0.1m² Smith-Mcintyre bottom sampler.

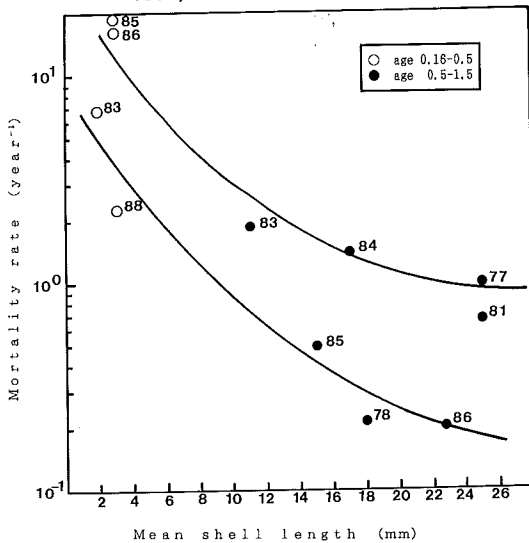


Fig. 3 - 10 Relationship between mean shell length at age 0.16(Aug.), 0.5 (Dec.) and their mortality rate.

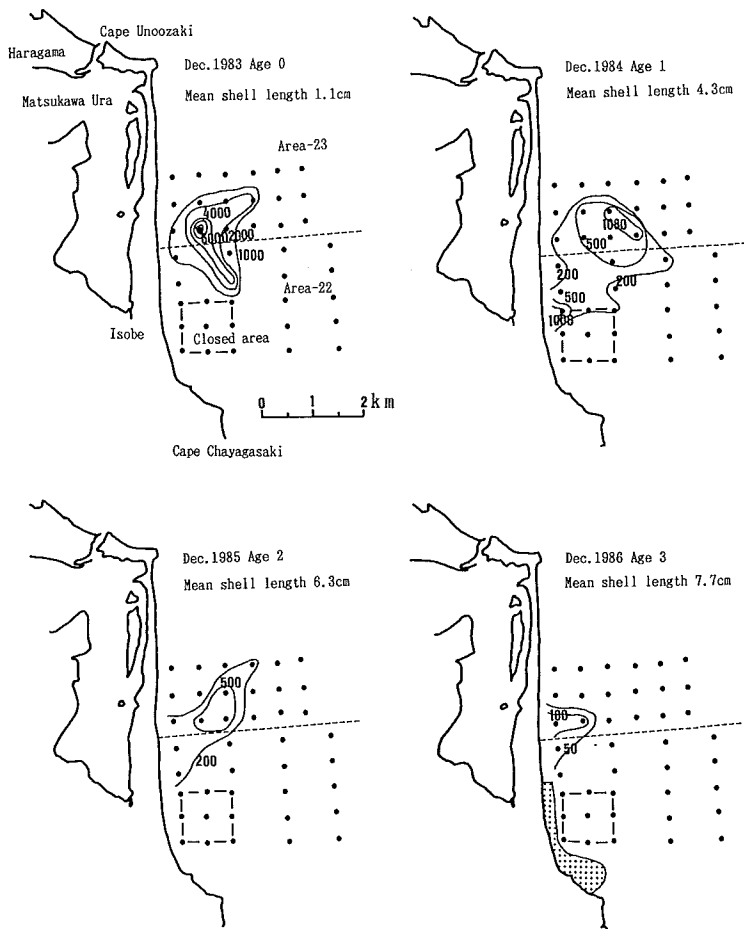


Fig. 3-11 Temporal variations of shell density distributions of 1983 year class in Isobe fishing ground. ($n/10m^2$ 1983-1986)

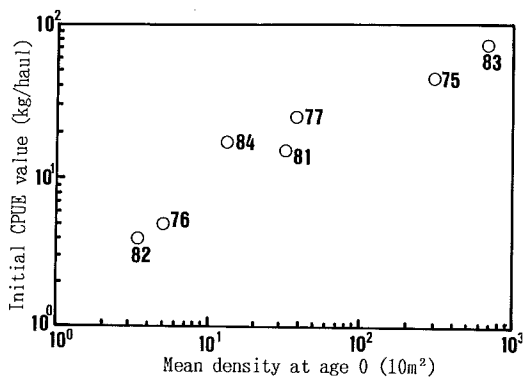


Fig. 3-12 Relationship between mean density at age 0.5 and CPUE at first capture of each year classes.

漁場の地理的条件と漁場生産性

福島県沿岸におけるウバガイの漁場は水深が5m~10mの浅い砂浜域に形成されている (Fig. 3-13)。但し、同図に示されるどの砂浜海岸でも好漁場が成立しているわけではなく、主に県内以北の比較的緩勾配の海岸が漁場としての利用価値が高い。県内の砂浜海岸 (Fig. 1-14) における5m~10m水深帯の海底勾配、面積及びウバガイ漁獲量等を整理 (Table 3-2) し、海底勾配と漁場生産性 (単位面積当りの年間平均漁獲量: ton/ha) の関係を (Fig. 3-15) に示した。同図には比較のため、北海道の漁場例 (北海道栽培漁業振興公社, 1985) も併せてプロットした。北海道に比べて福島沿岸の漁場での生産性が全般的に高いことと、両海域とも緩勾配海岸ほど高い生産性をあげていることが認められる。

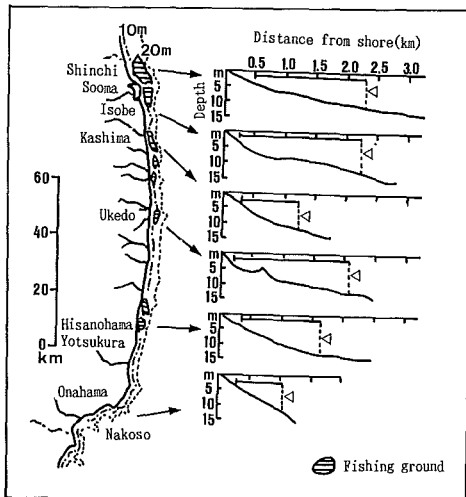


Fig. 3-13 Outline of Fukushima coast and bottom topography off each surf clam fishing ground. \triangle : limit depth of the surf clam fishing ground.

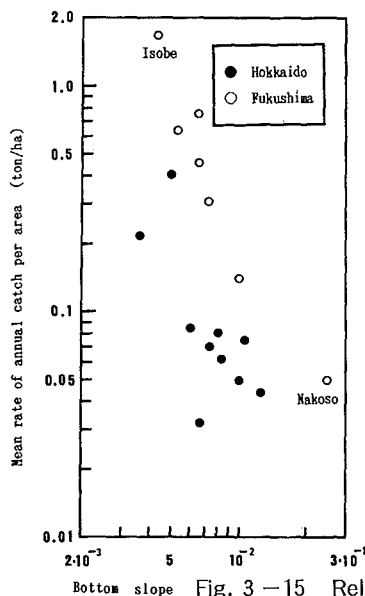


Fig. 3-15 Relationship between bottom slope in 5m-10m depth zone and mean rate of annual catch per area (ton/ha).

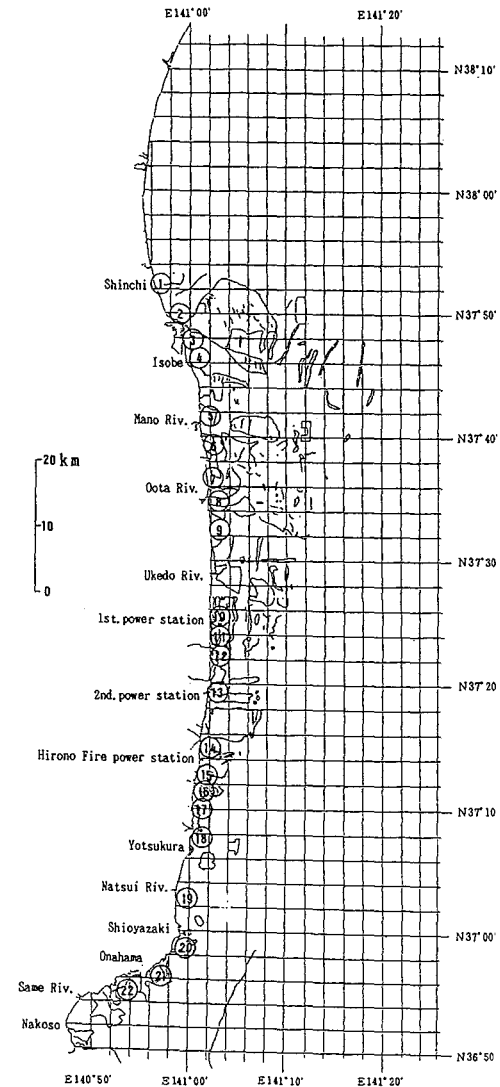


Fig. 3-14 Locations of sandy beaches in Fukushima coast. Number in figure indicated beach No. (See table 3-2)

Table 3-2 Characteristics of the surf clam fishind ground in Fukushima coast.

No.*	No. of fishery right	Location	Area (h a) Depth zone 5m~10m	Bottom slope			Normal direction of coastal line	Several years* mean of catch t o n / year	Production of* fishing ground t o n / ha · year
				0 ~ 5 m	5 ~ 10 m	0 ~ 10 m			
1	2 6	Shinchi	1 1 0	1 / 40	1 / 185	1 / 110	ENE	3 0 . 6	0 . 3 0
2	2 4	Haragama	8 3	1 / 53	1 / 152	1 / 114	ENE	3 7 . 0	0 . 4 6
3	2 3	Haragama~Isobe	2 0 7	1 / 44	1 / 188	1 / 115	E	3 4 . 6	0 . 6 5
4	2 2	Isobe	3 1 5 (Closed area 100ha)	1 / 60	1 / 230	1 / 150	E	3 6 2 . 8	1 . 6 9
5	2 1	Minamiebi~Mano Rive	8 0	1 / 100	1 / 100	1 / 100	E	Total 3 9 . 6 (No.5~No.8)	0 . 1 4
6	2 1	Kitaizumi	6 5	1 / 100	1 / 100	1 / 100	E		
7	2 1	Sidoke	1 0 0	1 / 100	1 / 100	1 / 100	E		
8	2 1	Obama	3 0	1 / 100	1 / 100	1 / 100	E		
9	1 9	Murakami~Uraziri	2 1 2	1 / 60	1 / 150	1 / 110	E	1 5 8 . 6	0 . 7 5
10	Specific area	North side of F1	7 5	1 / 60	1 / 100	1 / 80	E	****	
11	1 7	South side of F1	4 0	1 / 60	1 / 90	1 / 70	E	Total 2 0 . 6 (No.11~No.13)	*****
12	1 7	Kuma River	3 0	1 / 80	1 / 120	1 / 100	E		
13	1 7	North side of F2	5 6	1 / 60	1 / 200	1 / 130	E		
14	1 5	North side of H(Kido)	5 0	1 / 80	1 / 140	1 / 100	E	Total 7 8 . 8 (No.14~No.18)	*****
15	1 5	Asami River	5 4	1 / 80	1 / 140	1 / 100	E		
16	1 5	Oriki	4 8	1 / 80	1 / 140	1 / 100	E		
17	1 5	Suetsugu	9 9	1 / 80	1 / 140	1 / 100	E		
18	1 5	Hisanohama	1 1 0	1 / 40	1 / 100	1 / 60	E		
19	1 1 , 1 3	Shinmaiko	4 1 7	1 / 70	1 / 70	1 / 70	ESE	-	-
20	9	Toyoma	9 9	1 / 90	1 / 120	1 / 95	ESE	-	-
21	8	Nagasaki	1 0 7	1 / 65	1 / 100	1 / 90	SE	-	-
22	1	Nakoso	1 4 2	1 / 60	1 / 40	1 / 50	SE	7 . 8	0 . 0 5

* Beaches No. are shown in Fig. 3-14 .

** Five years mean catch (ton/year) / Fishing ground area (ha) .

*** Vanished area of fishery right .

F1 Fukushima Daiichi Nuclear Power Station

H Hirono Fire Power Station

** Five year mean catch (1984~1988) .

***** Rotational fishery system .

F2 Fukushima Daini Nuclear Power Station

稚貝の形状と潜砂深度及び沈降速度

福島沿岸ではウバガイは毎年4月から5月にかけて産卵することが報告されており(天神・鈴木、1987)、約1ヶ月間の浮遊幼生期間をえて、 $260\mu\text{m}\sim 280\mu\text{m}$ の大きさで稚貝として着底する。

以後、底生生活期に入り着底後半年で殻長は10mmから20mmの大きさに成長する(Fig. 3-16)。

この期間中の殻長の変化はFig. 3-16に示したように年度及び地域によっても異なる。なお、殻長変化に伴い湿重量は増加する(Fig. 3-17)が、稚長の比重は1.6から1.3へ一時減少する傾向がみられた(Fig. 3-18)。

また、稚貝が砂に潜っている深さ(水管の長さ)はほぼ殻長程度とみなすことができる(Fig. 3-19)。一方、波の通過により、瞬間的に浮遊可能になる砂層厚の深さはSternbergら(1984)による現地観測では、1cm~2cmの規模であることが推定され、mmサイズ貝は潜砂していても漂砂によって容易に移動させられると予想される。稚貝の海水中における沈降速度は測定結果(Fig. 3-20)によると、10mm以下の貝はほぼ一定値に近いと思われる。

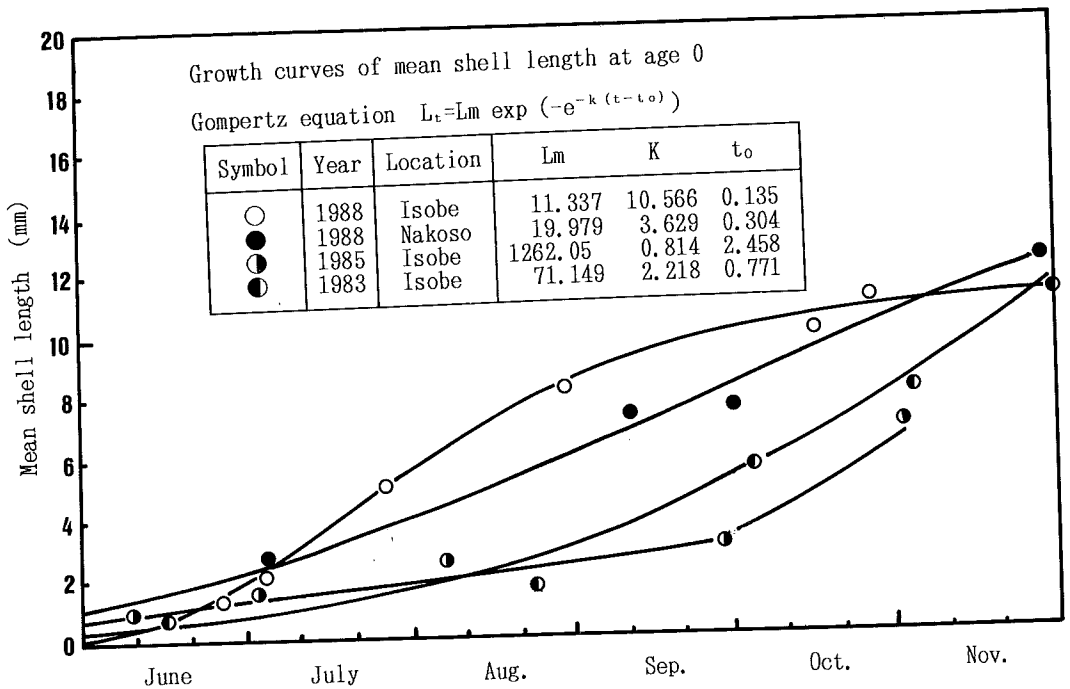


Fig. 3-16 Growth curves of the juvenile shell length(L_t)
t:day, L_t :mm

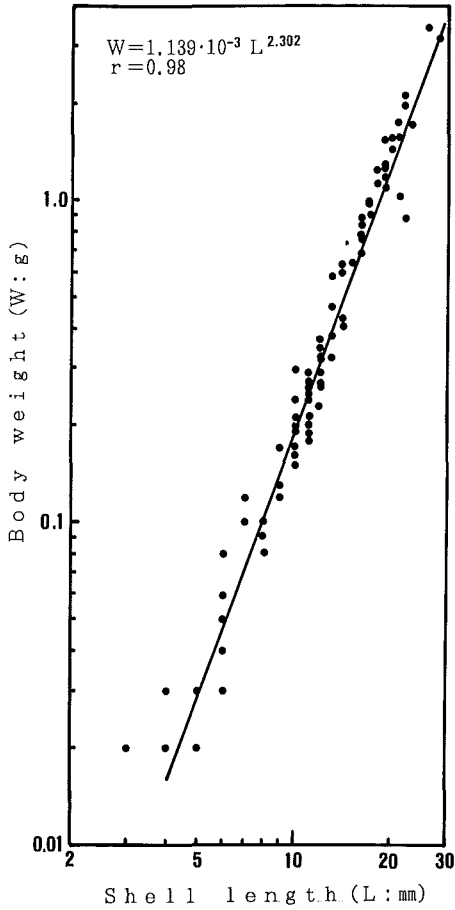


Fig. 3-17 Regression of body weight (W) on shell length (L) of the juvenile surf clam.

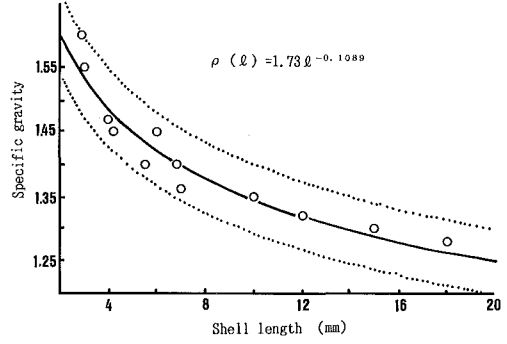


Fig. 3-18 Relationship between mean shell length of the juvenile surf clam and their specific gravity.

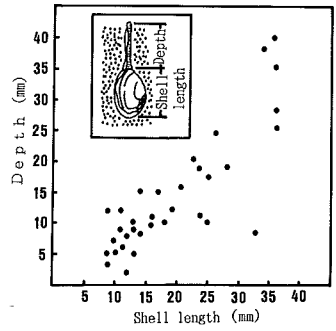


Fig. 3-19 Relationship between mean shell length of surf clam and burrowed depth in sediment.

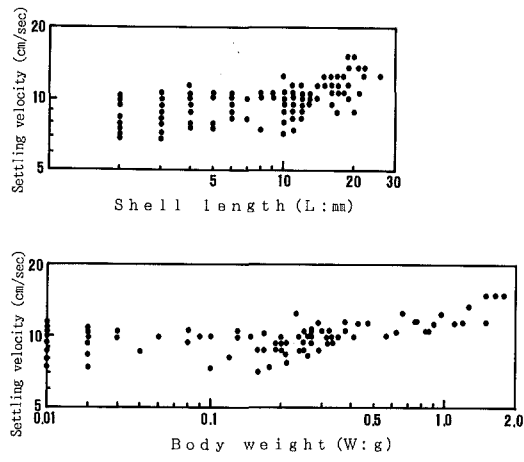


Fig. 3-20 Relationship between mean shell length of surf clam and settling velocity in the water.

底質環境と稚貝の生残率

採泥調査より得られた地点ごとのウバガイ稚貝数とシルト含有率（63 μ m以下の粒径成分の重量比）の間にはシルト含有率が7%をこえると稚貝の出現はみられず、稚貝出現の包絡線はシルト含有率に対して、負の相関を示す（Fig. 3-21）。

また、県内三海域で同時期に実施された調査結果から水深とシルト含有率の関係（Fig. 3-22）、並びに海域別・水深別の稚貝生残曲線（Fig. 3-8、3-9）を比較検討すると、稚貝の生残過程及び生息水深に関して、砂泥のシルト含有率は大きな制限要因となることが示唆された。

なお、Fig. 3-9に示された水深別の稚貝生残曲線で、7m以浅が10m以深と同じ高い減耗状態であることが確認されているが、ここでの底質のシルト含有率は沖合に比べて低いことから、別の原因を考える必要がある。例えば、波浪、漂砂等の物理力による稚貝移動による見かけ上の減耗である。

中村・秋元・奥谷（1990）はシルト含有率の高い海底面付近では高いSS濃度が出現することにより、稚貝の成長を阻害し、その結果として生残率の低下を引き起こすことについて、現場での稚貝飼育実験、底面環境測定、室内生物実験を総合し次に示す知見を得た。

- ①底質環境の異なった港内の2地点（Fig. 3-23）の海底面で、殻長が6mm~20mmのウバガイ稚貝を1ヶ月間飼育した結果、稚貝の成長率は地点間で有意な差が認められた（Fig. 3-24）。
- ②地点間の底面環境特性の内、底質では地点間で明確な違いが観察され（Table 3-3）、相対的に成長率の低い地点の粒度組成はシルト含有率の高いことがしめされた。
- ③一方、稚貝の餌料環境に関係する海底面付近のSS濃度変化やSSの成分分析結果によると、シルト含有率の高い地点では平均的なSS濃度も高いこと（Fig. 3-25）が認められたが、SSに含まれる有機懸濁量（TOC）はSS濃度に関係なく（Fig. 3-26）、時間的、空間的に低いレベルで一定している。
- ④飼育実験に使用した稚貝の濾水量について、*Chaetoceros*をトレーサとして、異なるSS濃度下で測定した結果、高懸濁状態（10⁶cells/ml）では、殻長が20mmまでの稚貝の濾水量は低い濃度（10⁵cells/ml）での条件に比べて約半分であった（Fig. 3-27）。
- ⑤POC/SS比を稚貝の餌料環境指標として考えた場合、地点間の稚貝成長量の差をもたらす要因は、主に高いSS濃度が稚貝の濾水量の低下を招いた結果であると解釈される（Fig. 3-28）。
- ⑥シルト含有率の高い海底面では波や流れによって高いSS濃度が出現し、それによる稚貝の成長阻害が引き起こされ、その結果として、生残率の低下を招くことが予想される。

漁場形成についての仮説

これまで記述したウバガイの資源生態特性から、次に示すようなウバガイ稚貝の漁場形成のメカニズムが推定できる。

a) シルト含有率の大きい海底では稚貝の減耗が大きい。

（港内や水深の大きな海域では生息できない。）

b) 漂砂量の激しい砕波帯付近では稚貝は定位できない。

（浅すぎる海域でも生息できない。）

c) 従って、稚貝の安定して生息できる水深帯が存在することになり、その生息区の広さ、いかえると海底勾配の緩やかさが漁場の評価基準になる。

これらの仮説の妥当性を検証するため、第3章第3節では、波による稚貝の岸沖輸送モデルを作成し、生物特性と対象海域の海岸工学的条件をもとに、数値解析による漁場形成機構の解明を行なった。

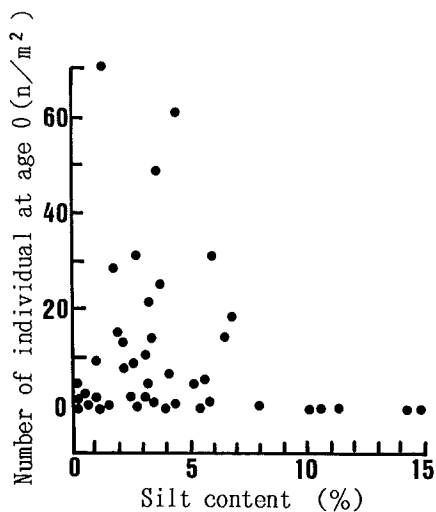


Fig. 3-21 Relationship between appearance number of juvenile surf clam and silt content in sediment. (Isobe fishing ground, 1988)

Table 3-3 Comparison between environmental bottom conditions of each St..

	St. 1	St. 2
Water depth (m)	5.5	7.5
Median grain size (mm)	0.14	0.07
Silt content (%)	10.4	42.1
Ignition loss (%)	3.0	6.0

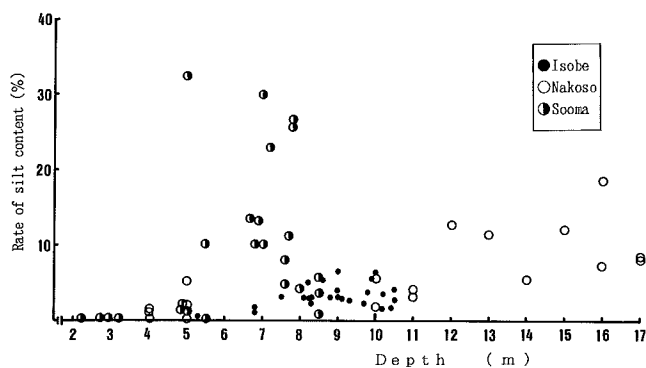


Fig. 3-22 Relationship between water depth of three coastal areas and silt content in sediment. (1988)

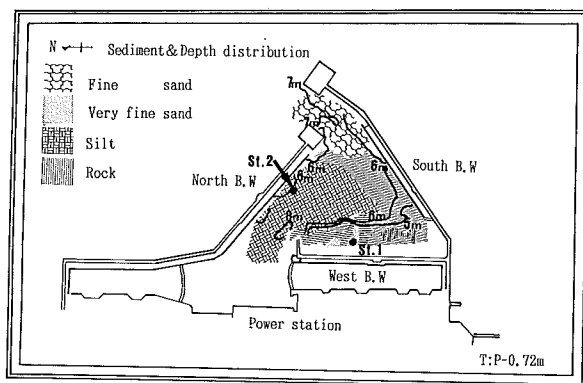


Fig. 3-23 Location of breeding St. for surf clam and sediment distribution in the port of power station.

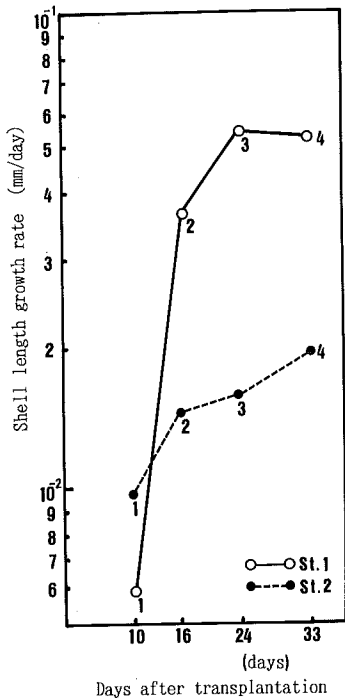


Fig. 3-24 Shell length growth rate of cage bred surf clam. Number in figure indicated No. of experiment block.

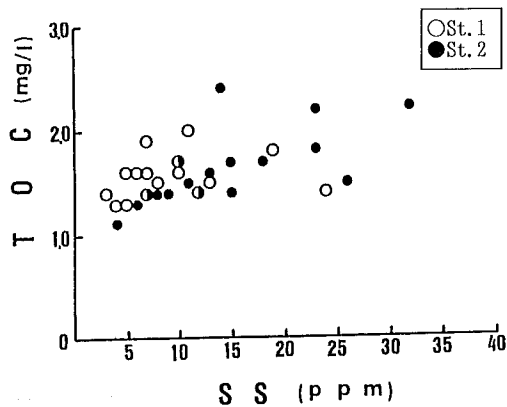


Fig. 3-26 Relationship between suspended matter and TOC at 0.5m above the bottom.

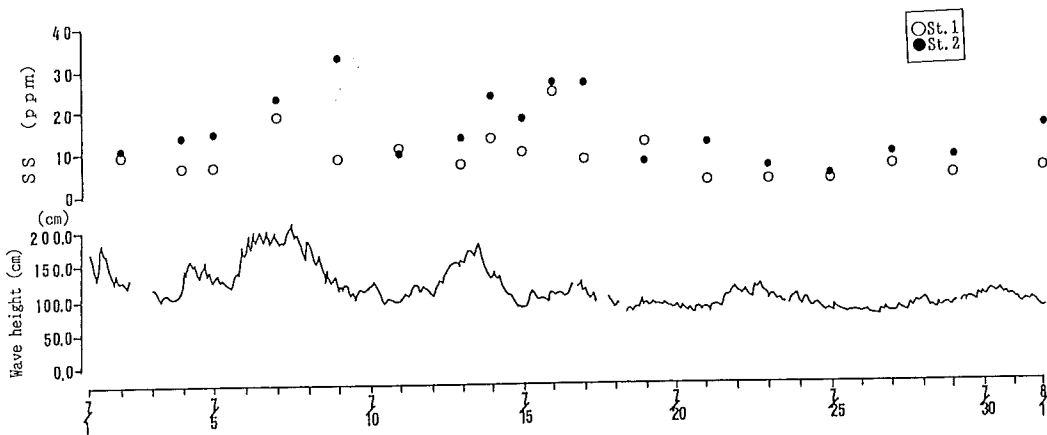


Fig. 3-25 Time changes of significant wave $H_{1/3}$ of outside port (under) and suspended matter at 0.5m above the bottom (upper).

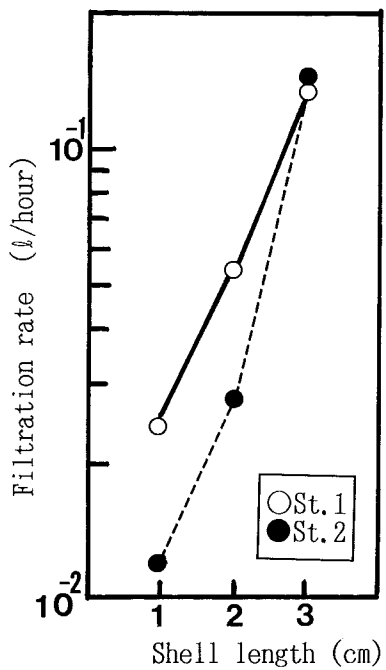
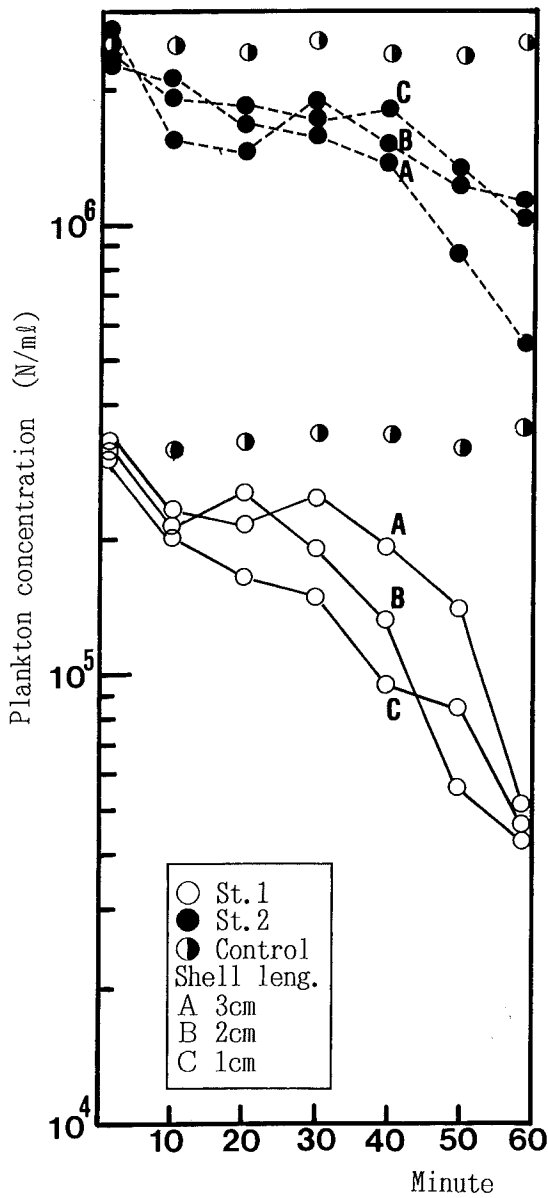


Fig. 3-27 Filtration rate of each shell length (right) estimated from decreasing trend of the *Chaetoceros* density in the experimental tanks (left).

Initial plankton concentration

St. 1 : $3 \cdot 10^5$ cells/ml

St. 2 : $2.5 \cdot 10^6$ cells/ml

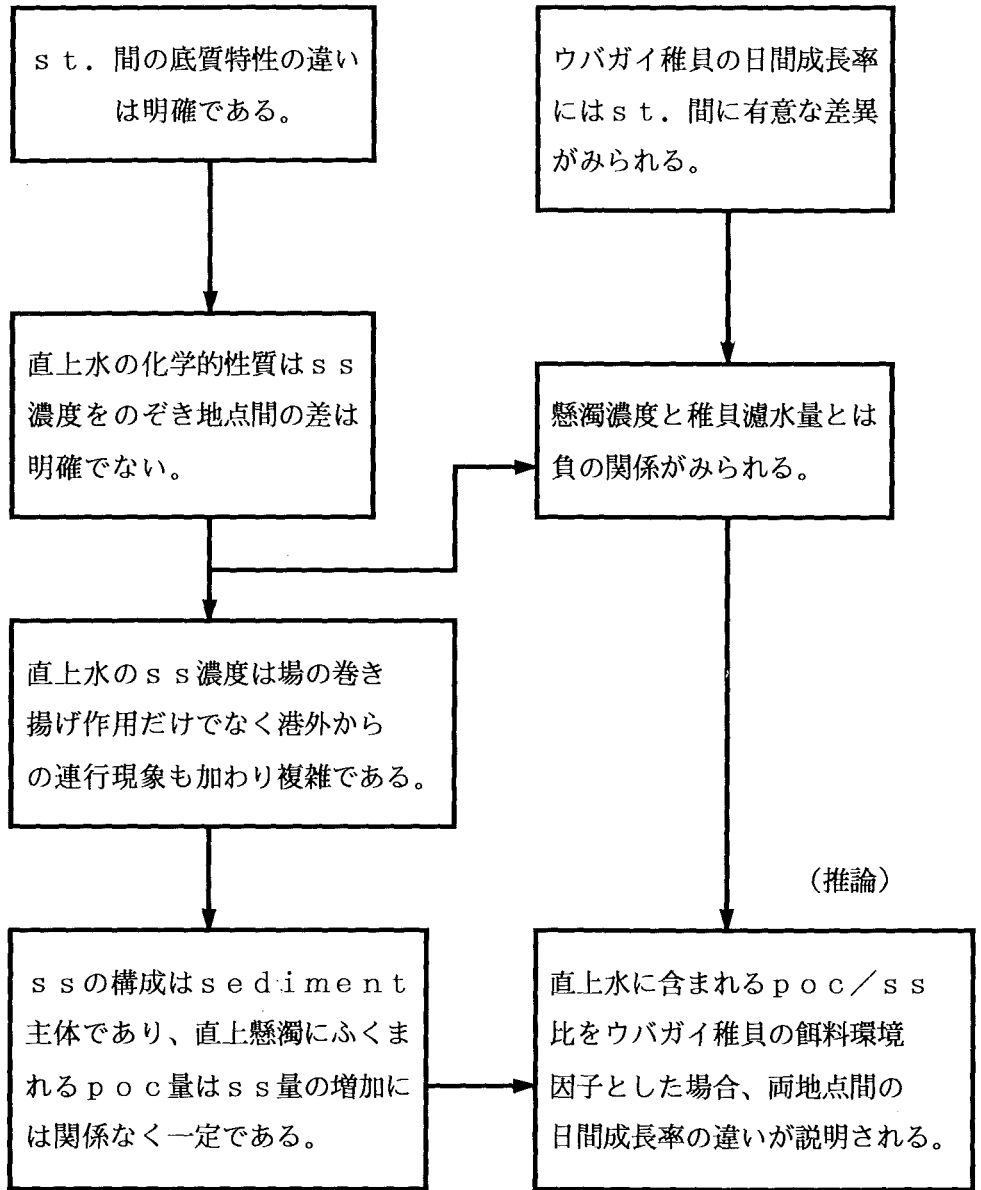


Fig. 3-28 Schematic diagram in the growth process of juvenile surf clam.

第2節 大量発生の水理学的条件

磯部漁場におけるウバガイの年次別変動が非常に不規則 (Fig. 3-4) であることと、卓越年級群の発生により漁業がささえられている状況については既に述べたとおりである。砂浜性二枚貝類にみられる大量発生について花岡・巖 (1972) は『海の生物のうち大部分を占める浮遊性卵を放出する種類は一般的に非常に多数の卵を出すから、いずれも大発生を実現する可能性を潜在的にもっている。それが希にしか実現しないのは、まったくその後における生残率の問題である。』と述べている。

二枚貝類の初期減耗を浮遊期における、流れによる幼生輸送と結びつけた研究としては次のようなものがある。

中村 (1979) はアサリを対象として、漁場を含む海域ごとのアサリの初期浮遊幼生密度、海水交換率、自然減耗率、海域の広さを条件にして、漁場内に着底する幼生の総量を推定するモデルを開発している。そして、浮遊幼生の漁場外へ輸送される程度がアサリの発生量をコントロールしている主な要因であると述べている。

また、上野・山崎 (1985) はホタテガイの浮遊幼生が陸奥湾から津軽暖流に乗って、岩手北部沿岸へ輸送されるモデルを作成し、津軽暖流の流速値と出現する浮遊幼生密度との間に正の相関性があることについて、数値解析より明らかにした。

ウバガイの場合、2歳から3歳になると産卵可能な状態になり1個体で約1億個体の抱卵数を持っていると云われている (佐々木、1987)。ウバガイの初期生活史を構成する浮遊幼生期及び稚貝期はともに異なる大きな減耗要因をかかえている。

この節では、産卵期から浮遊幼生期における沿岸流の流速変動特性ならびにそれから予測される浮遊幼生の沿岸輸送について検討し、磯部漁場の稚貝発生数とくに、ウバガイの大量発生を支配する水理学的条件を明らかにする。

2.1 材料と方法

産卵時期の推定

磯部漁場におけるウバガイの産卵盛期の推定は毎年同漁場で種苗用の産卵母貝を入手しその成熟度を調査している福島県種苗研究所の資料 (天神・鈴木、1987) から行った (Fig. 3-31)。

流速変動データと処理方法

産卵盛期から浮遊幼生期における福島沿岸の流況については富岡地先にある海象モニタリングによる連続記録 (福島県温排水調査管理委員会) を使用した。流速観測地点のSt. 354.5は発電所南側の離岸1.8kmに位置しており (Fig. 3-29)、水深は12mで表面から2.5mの層に設置されたアンデラ型流速計により、流向、流速、水温、塩分が15分間隔で計測されている。

流速変動のスペクトル密度は分解能の良いMEM (Maximum Entropy Method) 法で推定されており、岸沖方向の拡散係数 K_x の計算方法は原データについて36時間以上の成分を取り除いたものに対してTaylorの式によりもとめられている。

$$K_x = \overline{u^2} \int_0^{\infty} R_E(\tau) d\tau \cdot \beta$$

ここで、 R_E : X方向のオイラー速度の自己相関関数

$\overline{u^2}$: オイラー変動速度の2乗平均

β : オイラー・ラグランジュ変換係数 ($\beta=1$)

さらに、沿岸流境界層のシア効果を考慮した沿岸方向の分散係数 D ,については次式により推定した。(柳、1989)。

$$D_y = 1/120 \cdot \delta^4 / K_x \cdot (dv/dx)^2$$

$$\approx 1/120 \cdot \delta^4 / K_x \cdot (V_{s,D} / \delta)^2$$

ここで、 δ : 沿岸境界層の幅 (1500m)、 $V_{s,D}$: 沿岸方向の流速変動の標準偏差

浮遊幼生調査

1988年4月25日と5月18日に磯部漁場の3測線 (B, C, Dライン) において、浮遊幼生の採集を実施した (Fig. 3-30)。

各測線上の5m, 7m, 10m, 12m, 15m水深点において表面から海底までを2m間隔で採集し、同時に電気水温計による測温も行なった。

採集方法は1地点当たり定量ポンプによって10ℓ採水 (5月18日調査では40ℓ採水) し、北原式定量ネット (NXX13) で濾過した後、3%の中性ホルマリンにより固定した。採集した試料は顕微鏡下でD状幼生、アンボ幼生とみられるものについて計数するとともに、その幼生殻長を計測した。

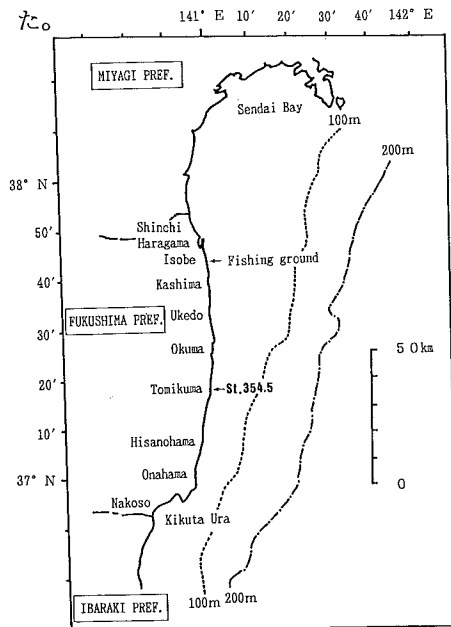


Fig. 3-29 Locations of surf clam fishing ground (Isobe) and current observation point (St. 354.5 Tomioka).

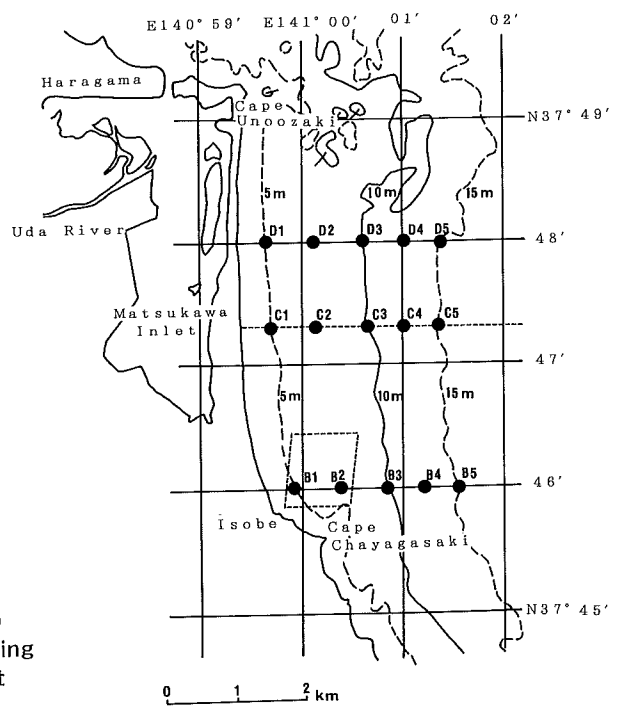


Fig. 3-30 Locations of larvae sampling point off Isobe coast. (1988)

2. 2 結 果

浮遊幼生期における流速変動特性

Fig. 3-31(a), (b)は1979年から1989年までの11年間における磯部漁場での年次別産卵盛期とそれに続く浮遊期を福島沿岸の流速変動ベクトル図にプロットしたものである。福島沿岸で検出された長周期流速変動は沿岸方向に非常に大きなスケールを持ち磯部-富岡間における流速変動の相関性は高いことが第1章第2節で実証されている。

ここで、磯部漁場の年次別稚貝発生量についてFig. 3-4を参考にして、産卵後6ヶ月時点における単位面積当りの出現密度の大きさを3段階に区分した。

大量発生年 (1983年, 1988年)は10m²当り100個以上の場合で、中規模発生年(1981年, 1982年, 1984年)は100個~10個の範囲、不良年 (1980年, 1985年, 1986年, 1989年)は10個以下の出現密

度に相当している。それぞれの区分に対応する流速変動特性を流跡図 (Fig. 3-32(a),(b),(c))、スペクトル密度 (Fig. 3-33(a),(b),(c))、平均流速出現頻度 (Fig. 3-34(a),(b),(c)) から検出した。また、各年度における流速変動の諸特性値について整理したものをTable 3-4 に示した。

第1章第2節でも述べたようにこの時期の沿岸流速は夏期とは異なり南流と北流の持続時間が比較的均衡している状態であるが、少し南流の出現頻度が高いと云える。しかし、大量発生年に当たる1983年、1988年の流況の特徴を流跡図 (Fig. 3-32(a)) からみると南北方向に3日~4日周期に交番している様子が明確に現れている。一方、不良年での流跡図には交番モードは顕著でなく、平均流による南への長く伸びた形状が特徴である。

この傾向は流速変動のスペクトル密度 (Fig. 3-33(a),(b),(c)) にも示されている。大量発生年の時には1日以上長周期領域において3日~4日程度の流速変動が卓越しており、不良年の例と比べるとその違いは明確である。

さらに、南北流の不均衡から生じる平均流の出現頻度 (Fig. 3-34(a),(b),(c)) でも大量発生年と不良年の特徴が現れている。即ち、大量発生年は沿岸流の交番現象が均衡しているため、平均流速値は1.5km/day程と小さいが、不良年では6 km/dayを超え南向きの平均流が卓越している。

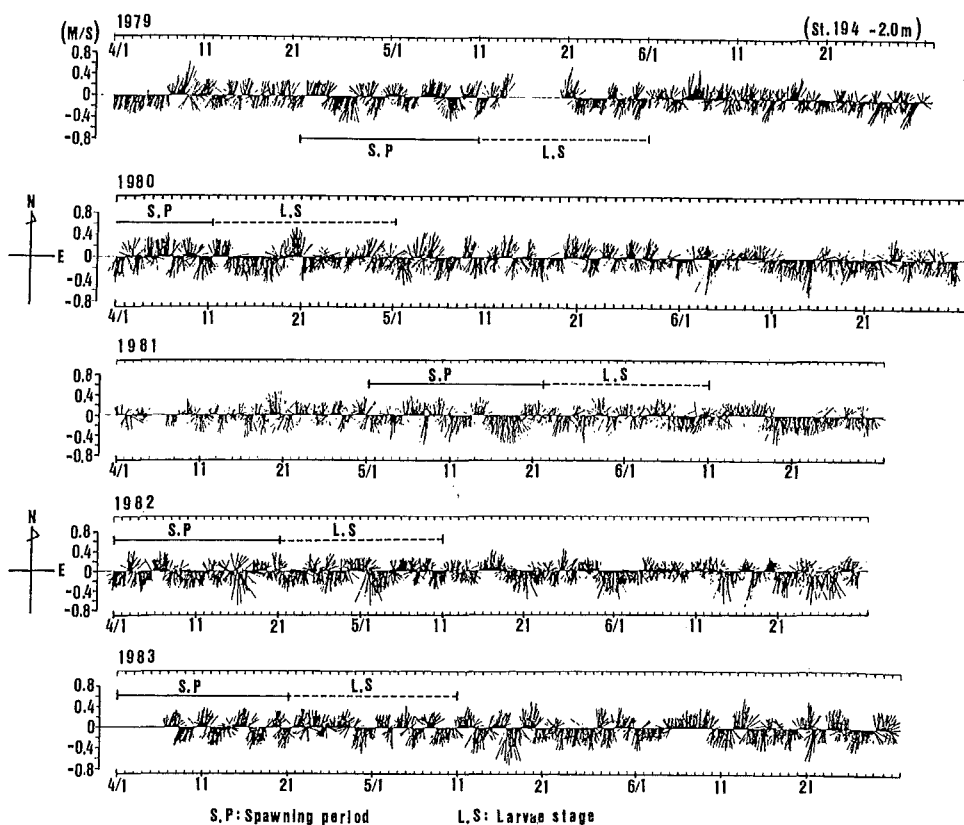
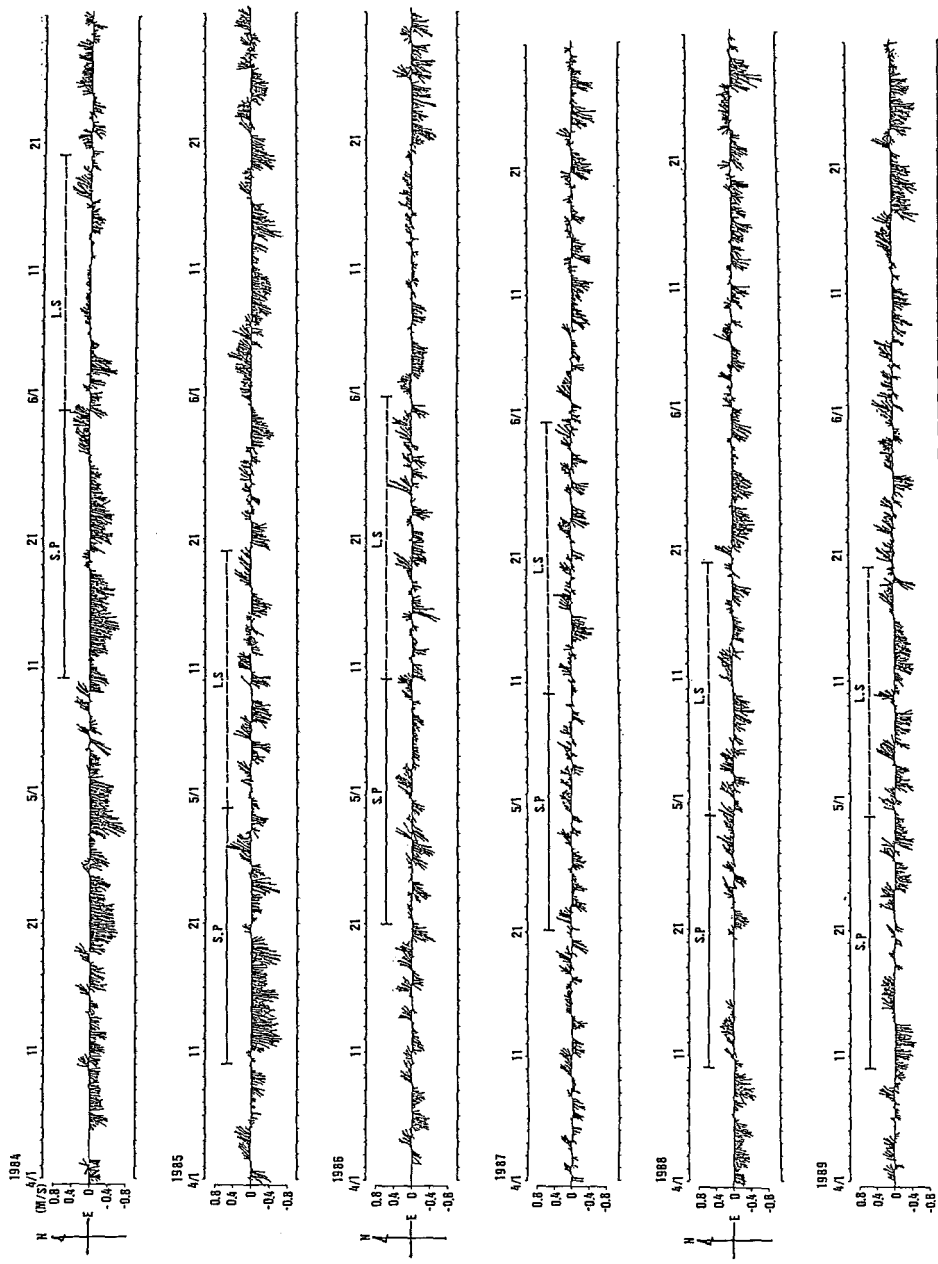


Fig. 3-31(a) Current fluctuations in the spawning and floating period of surf clam. (1979-1983)



S.P: Spawning period L.S: Larvae stage

Fig. 3 —31(b) Current fluctuations in the spawning and floating period of surf clam. (1984-1989)

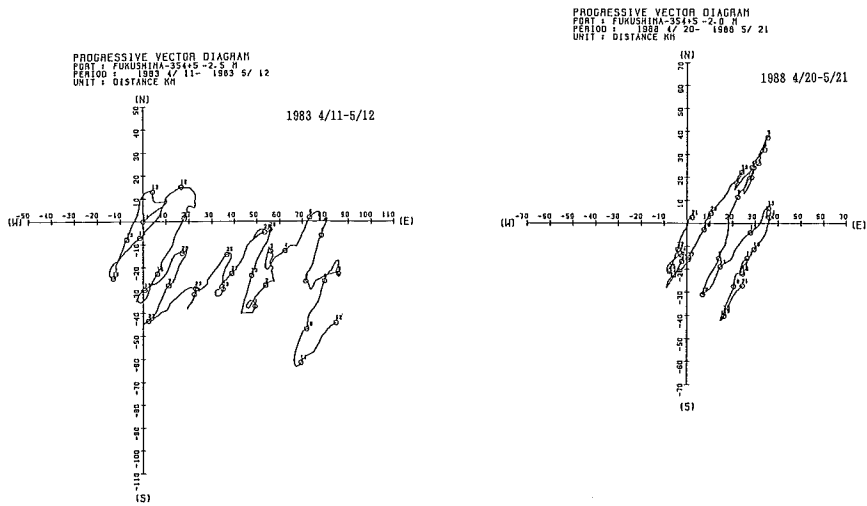


Fig. 3 -32(a) Progressive vector diagrams in the floating period of surf clam. (1983, 1988)

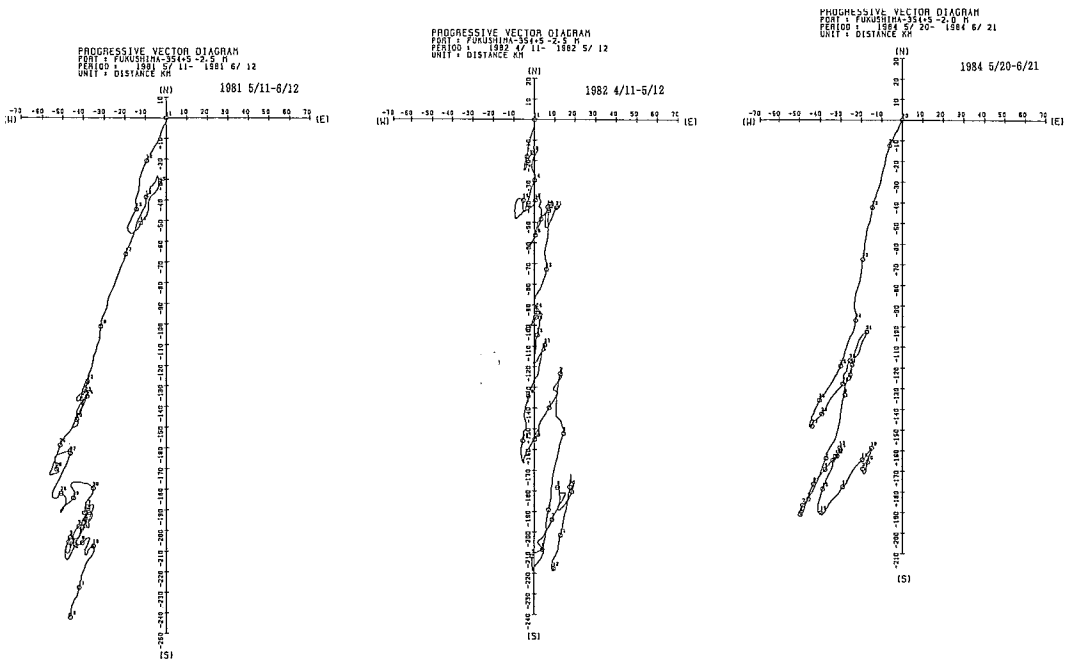


Fig. 3 -32(b) Progressive vector diagrams in the floating period of surf clam. (1981, 1982, 1984)

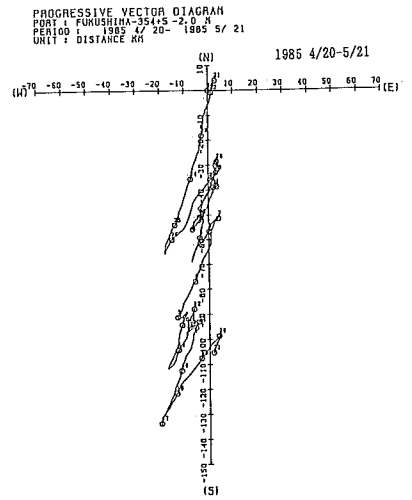
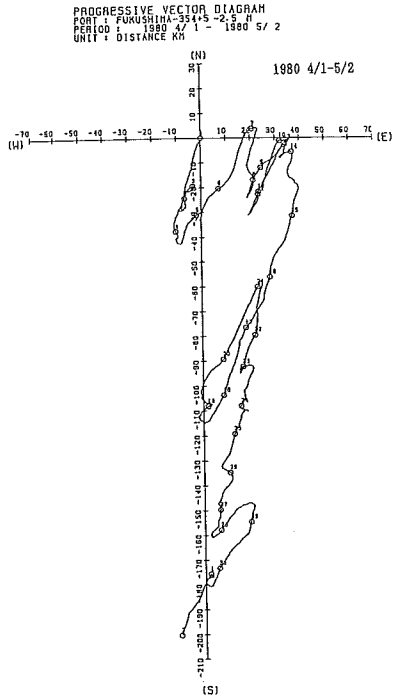


Fig. 3 -32(c1) Progressive vector diagrams in the floating period of surf clam. (1980,1985)

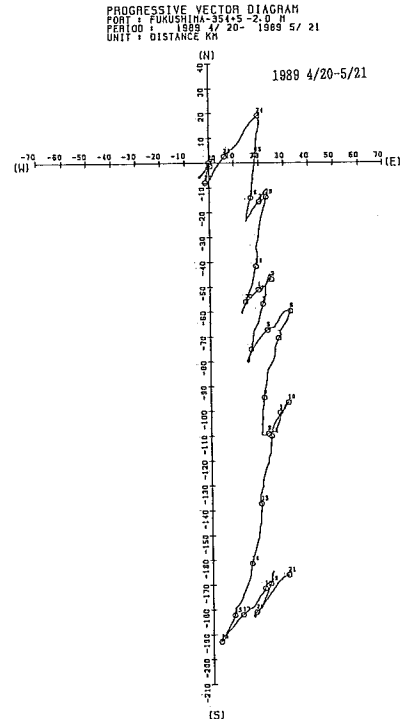
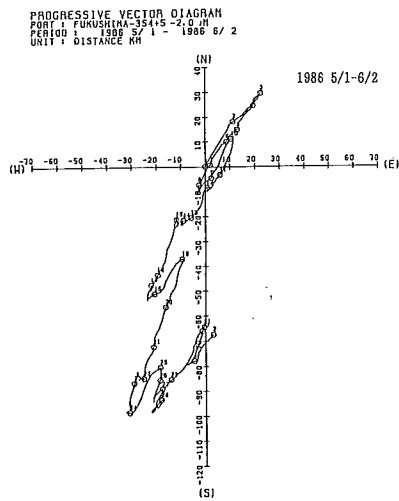


Fig. 3 -32(c2) Progressive vector diagrams in the floating period of surf clam. (1986,1989)

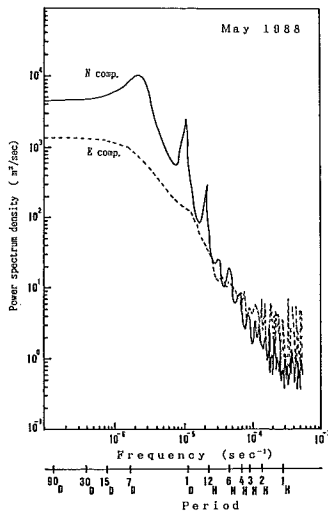
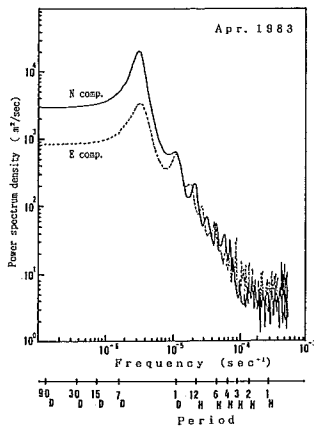


Fig. 3-33(a) Power spectrum density of current fluctuations in the floating period. (1983, 1988)

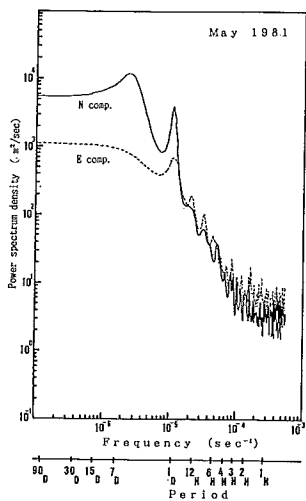


Fig. 3-33(b) Power spectrum density of current fluctuations in the floating period. (1981, 1982, 1984)

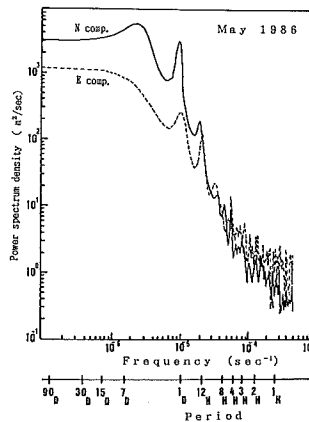
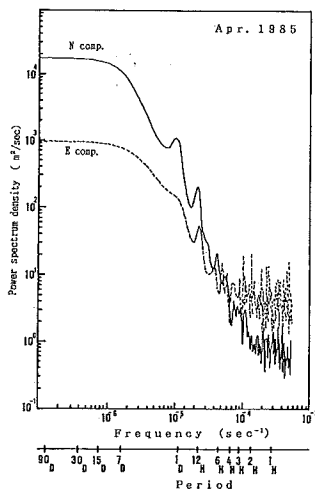
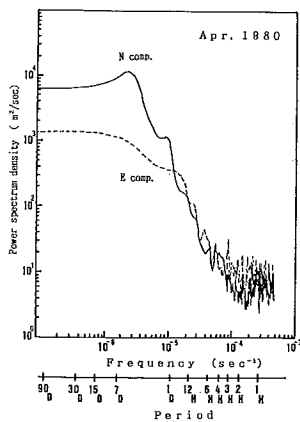
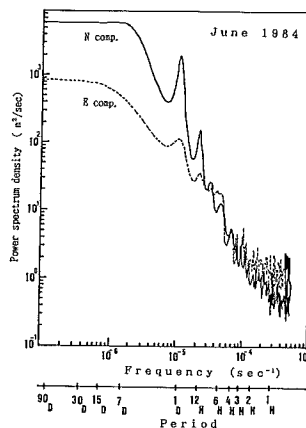
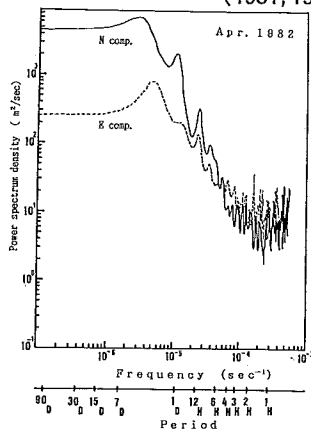


Fig. 3-33(c) Power spectrum density of current fluctuations in the floating period. (1980, 1985, 1986)

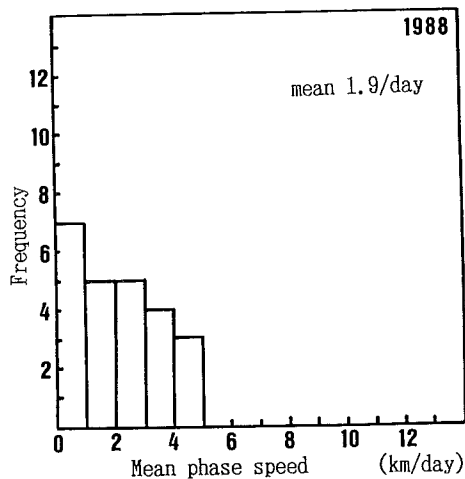
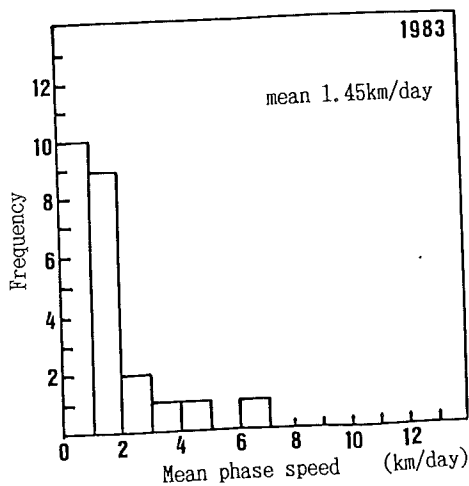


Fig. 3-34(a) Frequency distribution of 7 days running mean of current fluctuations in the floating period. (1983, 1988)

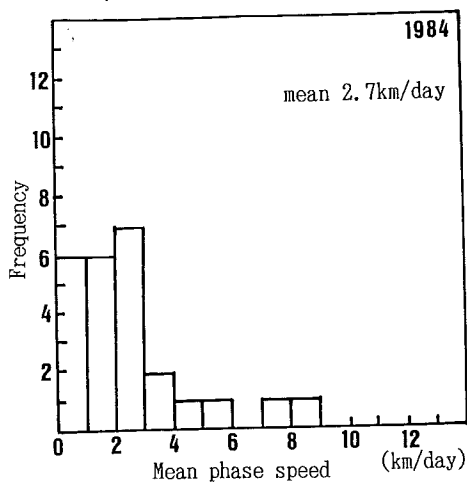
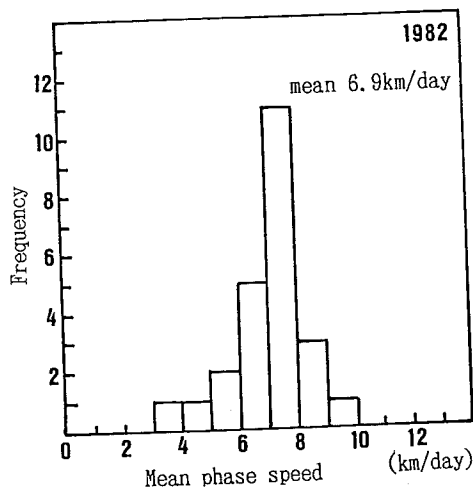
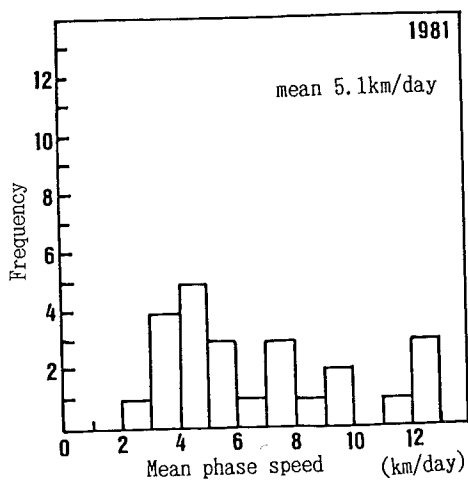


Fig. 3-34(b) Frequency distribution of 7 days running mean of current fluctuations in the floating period. (1981, 1982, 1984)

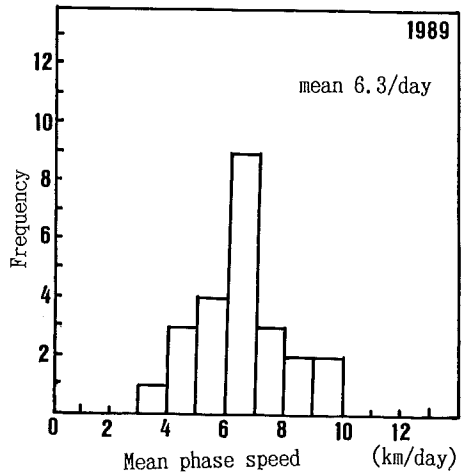
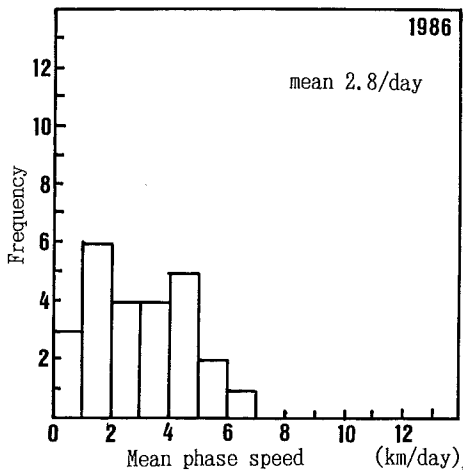
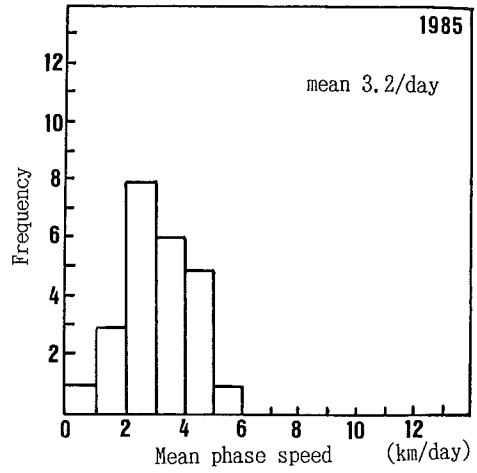
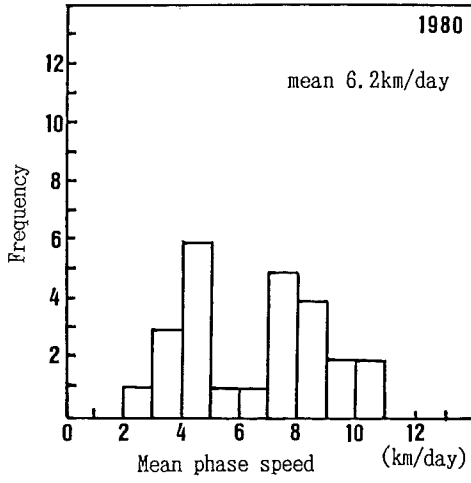


Fig. 3 - 34(c) Frequency distribution of 7 days running mean of current fluctuations in the floating period. (1980, 1985, 1986, 1989)

発生稚貝密度と平均流速値の関係

本来、浮遊期間の流速変動と発生密度の関係を検討する際には、材料としては浮遊幼生密度が着底直後の稚貝密度を使用すべきであるが、これらの時期に発生規模を定量化することについては種々の困難性が予想される。例えば、浮遊幼生の分布域が流況によって変化すること、産卵や着底の時期を正確に推測しなければならないこと、着底直後の稚貝種の同定の困難性等があげられる。

そこで、Fig. 3-35では、年次別の浮遊幼生期間中における平均流速の大きさと磯部漁場で発生した産卵約半年後における稚貝密度の関係を示したものであるが、一部を除き稚貝の発生規模は南向きの平均流速の大きさに影響を受けていると推定される。

つまり、流速変動の均衡が沿岸方向に保たれ浮遊幼生が漁場から遠く離れた海域に輸送されないことが大量発生の水理学的な必要条件であると示唆される。

磯部漁場での浮遊幼生分布

1988年は1983年につぐ大規模な発生のあった年であり、この年の産卵盛期とそれに続く浮遊期間はFig. 3-31(b)に示されるとおりである。4月調査での浮遊幼生の出現分布 (Fig. 3-36) は、各測線とも岸沖方向、および垂直方向に偏った傾向はみられず、従って幼生の分布と水温分布 (Fig. 3-37(a)) との間に有意な関係は認められない。これに対して、5月調査では殆どの幼生が各測線の沖合地点(B5, C5, D5)における10m層以下の底層に集中している。

この集中分布のみられる地点の水温は12℃以下の帯域に相当していることが水温分布図 (Fig. 3-37(b)) から推定できる。

前年同海域で実施した浮遊幼生調査 (遠藤・鈴木・中村・鈴木, 1987) でも5月調査でみられたと同様な水温-幼生出現数関係が確認されている。

4月調査及び5月調査で採集された幼生の殻長組成 (Fig. 3-38)は前者では120 μ m、後者では220 μ mの殻長にモードがあり、前者はD状幼生、後者はアンボ期幼生に相当している (photo. 3-1)。

また、殻長モードの推移から調査期間中の幼生の成長速度は約4.1 μ m/dayと推定される。

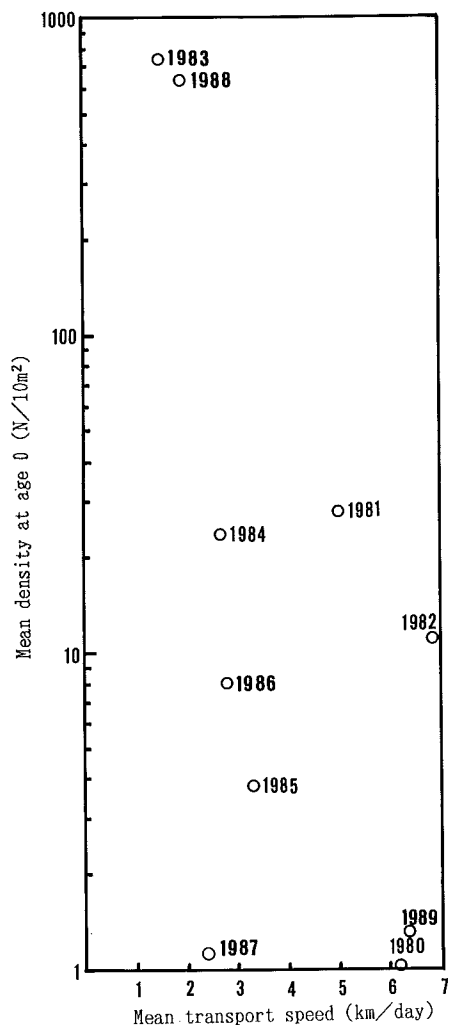
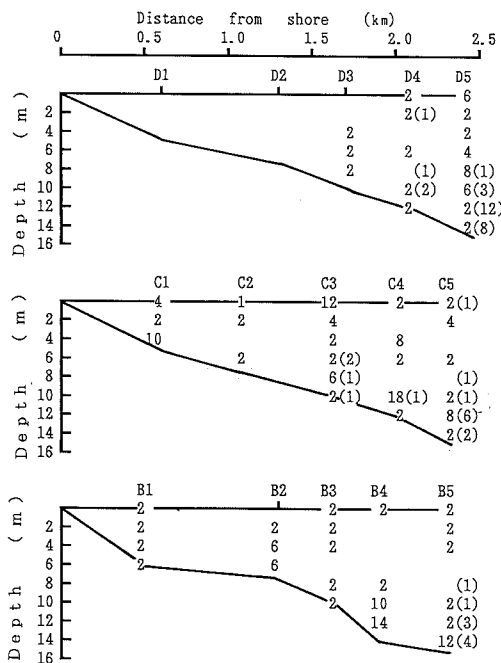
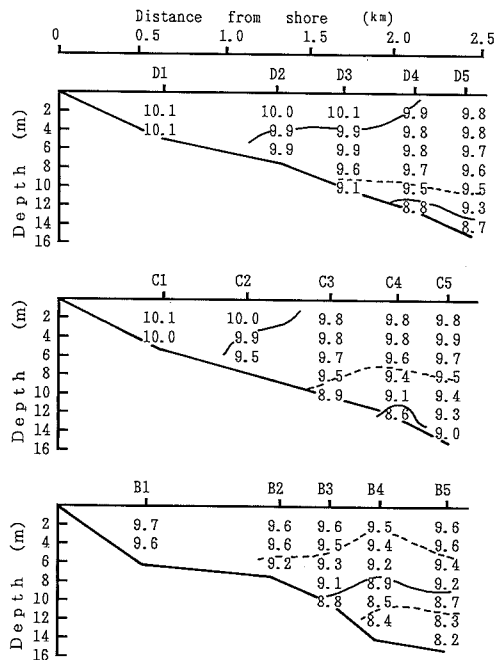


Fig. 3-35 Relationship between mean current velocity (St. 354.5) in the floating period and mean occurrence density (Isobe fishing ground) of surf clam.



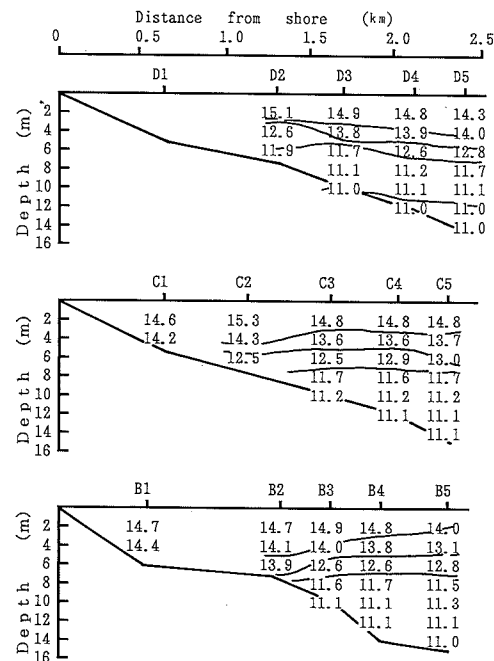
unit : N/l
 sampling date : 25 April 1988
 (18 May 1988)

Fig. 3-36 Bottom topography and larval distribution off Isobe fishing ground (B, C, D Line)



unit : C°
 observed date : 25 April 1988

Fig. 3-37(a) Bottom topography and water temperature distribution off Isobe fishing ground (B, C, D Line)



unit : C°
 observed date : 18 May 1988

Fig. 3-37(b) Bottom topography and water temperature distribution off Isobe fishing ground (B, C, D Line)

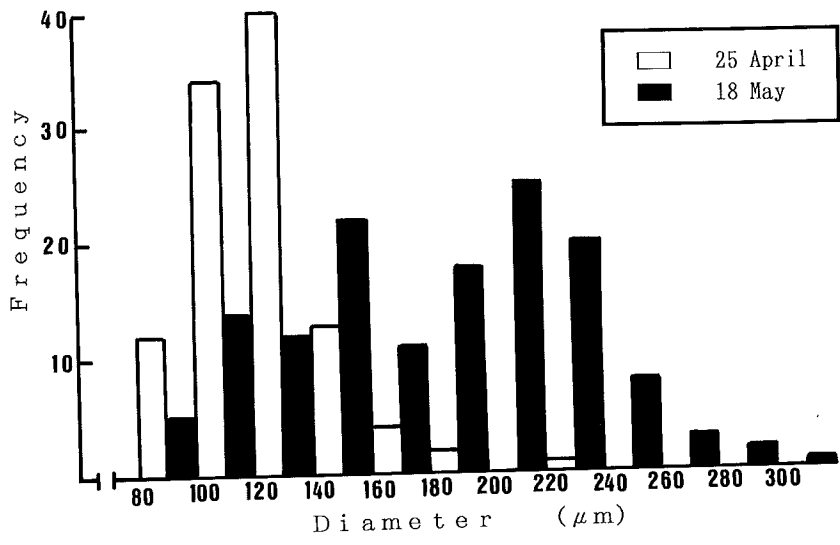


Fig. 3 - 38 Frequency distribution of larvae diameter.

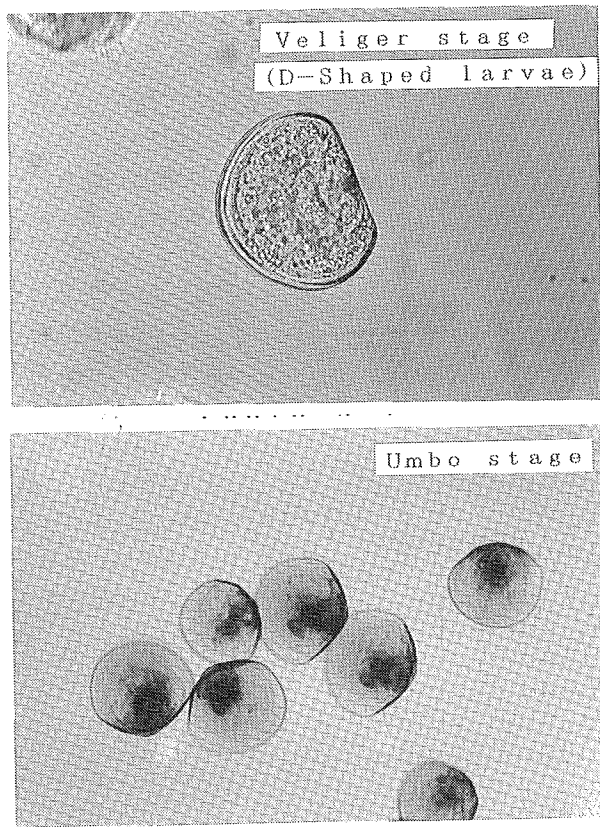


Photo. 3 - 1 D-shaped larvae and Umbo stage of surf clam.

2. 3 考 察

ウバガイの浮遊幼生期は卵分割（桑実期）からトロコファー期、ヴェリジャー期（D状幼生）、アンボ期までをさし、その期間は環境水温によって異なる（Fig. 3-39）。福島沿岸におけるウバガイの産卵盛期は4月中旬から5月末までが多く、この時の海水温は12℃～14℃の範囲で浮遊期間は約1ヶ月と推定される。

北海道における精力的な幼生調査（例えば北海道栽培漁業振興公社、1988；林、1989）にもかかわらず浮遊幼生の動態についての知見は乏しく、各成長期における分布特性（岸沖分布、垂直分布、昼夜移動等）や遊泳能力については不明な点が多い。

そこで、浮遊幼生期の大部分を占めるヴェリジャー期（D状幼生）を対象として、以下に示した幾つかの仮定のもとに大量発生年と不良年の流速変動特性を考慮した数値シミュレーションを実施し、浮遊幼生の沿岸方向の輸送状況を解析した。

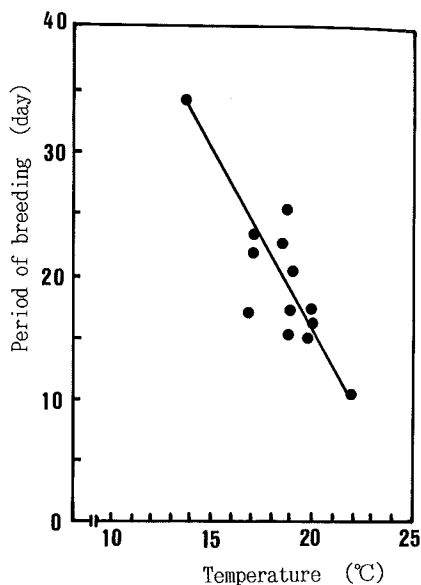


Fig. 3-39 Relationship between water temperature and floating period of surf clam larvae. (Tenzin・Suzuki, unpublsh data)

a) 仮 定

- ①計算領域は仙台湾から茨城県大洗海岸までの250kmで、このうち福島県原釜～大熊間の50kmを漁場とする。産卵はこの中だけに限定し1回のみの瞬間放出を想定した。そして、初期幼生密度分布も漁場内で一様とした。
- ②第1章第4節に述べた沿岸流境界層のシア効果（dispersion）により境界層内の浮遊幼生は沖合いへの拡散は無視される。また、第1章第2節より、計算領域内における沿岸流の長周期変動は高い相関性が保障される。
- ③浮遊期間中、幼生は沈着、昼夜移動、餌摂行動等独自の遊泳行動によって特定の層だけに集中することはなく、境界層内は一様分布とし、幼生は一定の自然死亡率で減耗する。
- ④沿岸流境界層における浮遊幼生の輸送は南向きの平均流による移流項、岸沖方向の拡散効果と流速分布のシア効果を加味した沿岸方向の分散項及び幼生の自然死亡項から構成された一次元の拡散方程式で表される。拡散方程式の数値計算は逐次過緩和法を使用した。

b) 基礎方程式

仮定に基づき浮遊幼生の沿岸輸送を一次元拡散方程式で表す。

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \bar{v} \frac{\partial S}{\partial y} + D_y \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} + \alpha S = 0$$

ここで、 $S(y, t)$ ：浮遊幼生密度、 t ：時間（day）、 y ：沿岸方向の距離(km)、 \bar{v} ：南むきの平均流速（km/day）、 D_y ：沿岸方向の分散係数（ km^2/day ）、 α ：自然死亡係数（ day^{-1} ）

c) 計算条件

- ①計算領域：亘理（宮城県）から大洗（茨城県）までの250km
- ②計算期間：30日間
- ③計算間隔： Δt （時間）＝3日、 Δy （距離）＝5 km
- ④ α ： 1 day^{-1} 、 \bar{v} 、 D_y ：Table 3-5を参照

なお、平均流速 \bar{v} 及び分散係数 D_y はTable 3-4に示した推定値の変動幅を考慮し設定した。

d) 計算結果

平均流速 X_1 、拡散係数 X_2 の組合せ (Table 3-5) による7ケースの計算を実施した。この中から、2ケースの浮遊幼生密度分布の時間変化についてFig. 3-40に示した。ケース3は大量発生年 (1988年) のパターンでケース7は不良年 (1980年) のパターンである。

この結果によると、ケース3の大量発生年では1ヶ月後の幼生密度分布の中心は初期分布領域南端から近い久之浜海岸に位置しているが、ケース7の不良年では幼生密度の中心位置は初期分布領域から200km以上も離れた大洗海岸の南側へ移動している。

各ケースにおける漁場領域内の幼生密度の減衰曲線 (Fig. 3-41) から、減耗係数 Y を計算 (Table 3-5) し平均流速 X_1 や分散係数 X_2 との間に次に示す一次回帰式を得た。

$$Y = 0.0603X_1 - 0.0263\sqrt{X_2} + 0.026 \quad (\text{day}^{-1})$$

南向きの平均流速が大きく、沿岸方向の分散係数が小さい程、漁場領域外へ流失する確率が高くなること示され、この時には稚貝としての生息環境が不適な海域へ輸送されるため有効な資源加入がみこめない。これらの結果から、浮遊期間中に幼生が優良な漁場領域内に留まる割合がウバガイの発生規模を決定している基本的条件であると推定される。ただし、Fig. 3-35にプロットされた1987年のようにこの傾向に適合しない例や、1985年、1986年のように発生資源量が予想ラインより下まわる例もみられる。磯部漁場における着底後の稚貝減耗曲線を年次別に示したFig. 3-7によると、1985年、1986年の場合初期沈着量は1988年より大きいことが推定され、その後の急激な減耗過程によって資源量水準を大幅に低下させていることが示唆される。

つまり、ここに示した水理学的条件は大量発生についての必要条件ではあるが十分条件とは云いきれない側面を持っている。

十分条件とは浮遊幼生期における餌摂環境や捕食生物の消長等の生物学的条件並びに稚貝期における減耗過程が含まれる。この内、後者についてはウバガイの漁場形成機構と密接な関係を持っていることについて、第3章第3節で詳しく論議する。

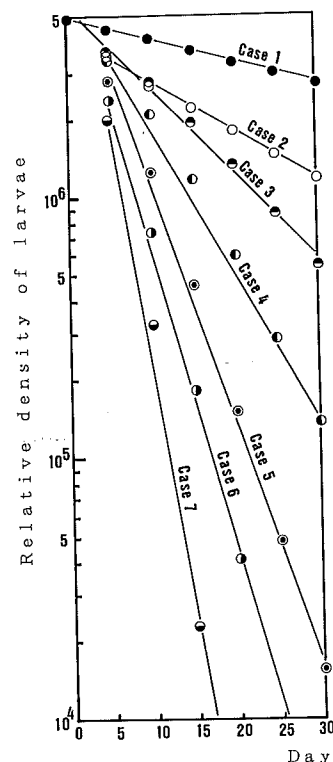


Fig. 3-41 Decreasing curves of floating larvae density in the fishing ground region of each cases. Case No. in figure is shown Table 3-5.

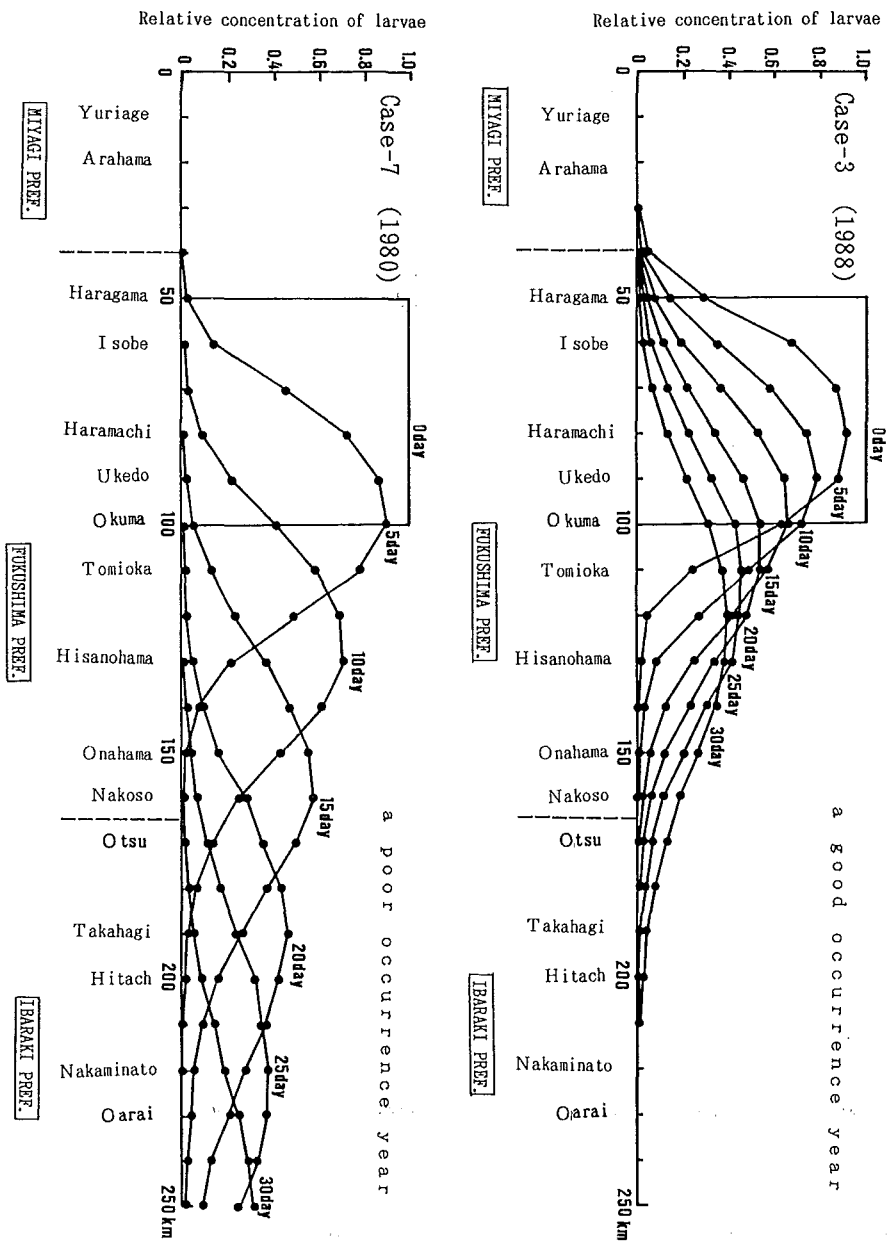


Fig. 3-40 Time change in larvae distributions of a good occurrence year (upper) and a poor occurrence year (under).

Table 3 - 4 Characteristics of coastal current fluctuations in floating larvae period.

Year	Period	\bar{V} ¹⁾ (m/sec)	V_{SD} ²⁾ (m/sec)	K_x ³⁾ (m ² /sec)	M.P ⁴⁾ (hour)	D_y ⁵⁾ (m ² /sec)
1980	1Apr. ~30Apr.	-0.075	0.226	31.0	—	30.8
1981	1May ~30May	-0.059	0.234	18.7	126.2	54.9
1982	1Apr. ~30Apr.	-0.079	0.226	12.8	—	74.8
1983	1Apr. ~30Apr.	-0.016	0.238	47.6	77.1	22.3
1984	1June~30June	-0.031	0.159	16.0	—	33.4
1985	1Apr. ~30Apr.	-0.037	0.222	23.5	—	39.3
1986	1May ~31May	-0.032	0.185	26.1	92.6	24.5
1987	1May ~31May	-0.029	0.172	15.7	92.6	35.3
1988	1May ~31May	-0.022	0.197	31.9	111.1	22.8

- 1) Mean (measured from north)
- 2) Standard deviation (longshore component)
- 3) Diffusion coefficient of on-offshore component
(36 hourly high pass filtered)
- 4) Period for energy peaks of the low frequency
current fluctuation (longshore component)
- 5) Dispersion coefficient of longshore component
by Taylor's equation (1953)

Table 3 - 5 Decrease coefficient of the larvae trapped in the fishing ground.

Case	Mean Velocity X_1 (km/day)	Dispersion Coeff. X_2 (km ² /day)	Decrease Coeff. Y (day ⁻¹)
1	0	0	0.020
2	1.98	20.0	0.043
3	1.98	2.0	0.075 1)
4	3.0	6.0	0.126
5	5.0	10.0	0.209
6	6.30	10.0	0.274
7	6.30	3.0	0.446 2)

1):1988 , 2):1980

Multiple Regression Analysis $Y = a_1 x_1 + a_2 \sqrt{x_2} + b$

a_1 : 0.06036

a_2 : -0.02631

b_3 : 0.02676

第3節 波による二枚貝の輸送モデルと漁場形成機構

第3章第1節で示したウバガイの初期生活期における重要な減耗過程のうち、ここでは着底後の問題点を取り上げる。既に第3章第1節で示唆した通り、着底後の稚貝の空間分布と減耗を支配する要因として波の作用が重要であると考えられる。そうだとすればウバガイの漁場の良否をきめる要因として、沖合における入射波の条件とともに浅海域での波の変形（浅水変形、砕波）をきめる海底勾配等の海岸特性が浮かび上がってこよう。そこで、本節では波による稚貝の岸沖輸送と減耗過程のモデル化を図り、二つの典型的な漁場にこのモデルを適用することによって、ウバガイの漁場形成機構に対する海岸特性の影響を検討する。

3.1 漂砂機構の概要

本研究の基本的視点は、稚貝を受動的な底質と考え、従来波による砂の輸送理論を拡張して、稚貝の波による輸送をモデル化しようとするものである。波による砂の移動は、漂砂と呼ばれ従来、海岸工学、水産土木の分野において研究されてきた。そこで、以下ではまずこれまで明らかにされている漂砂機構の概要を紹介する。

波による漂砂移動は汀線に平行な沿岸漂砂と汀線に直角、すなわち波の進行方向の岸沖漂砂とに分けて研究されている。本節は稚貝の岸沖輸送を対象にしているため、以下の概要も岸沖漂砂に対するものである。

a) 波による砂粒子の移動限界

波が岸に近づき水深がほぼ波長の半分以下になると、海底において軌道流速は有限の大きさを持つようになり、海底の砂粒子は流体力を受けるようになる。この流体力が砂粒子の抵抗力を越えた時に砂粒子は移動を開始する (Fig. 3-42)。この限界条件は、移動限界水深や移動限界底面剪断応力の形で研究されている。

移動限界水深には海底面表層における砂の移動の程度に応じて、表層移動限界、前面移動限界、完全移動限界等異なった定義がなされている (堀川・渡辺, 1967)。

一方、より統一的な移動限界水深を決めるものとして、沖波の条件 (波高、周期) や底層の状態 (滑面、粗面; 層流、乱流) 等によって推定する簡易図 (Fig. 3-43) が作成されている。

福島沿岸における出現波浪統計 (Table 2-1) から最頻度の有義波高 ($H_{1/3}=0.8\text{m}$) 及び周期 ($T_{1/3}=8\text{sec}$) について全面移動限界水深を推定すると約15mになる。

次に砂粒子の移動し始める流体力の無次元指標として、一方向流に対して求められたのが Shields の限界基準であり、それを波動場で検討したものが Madsen・Grant (1976) によって報告されている (Fig. 3-44)。縦軸は波による海底面における剪断応力 τ_m と砂粒子に作用する重力の比で Shields 数 ϕ_m と呼ばれるパラメーターである。また、横軸は Reynolds 数である。図中の縦棒は波動実験による限界 Shields 数で、実線は一方向流による限界値である。これによると、波によって砂粒子が移動を開始する限界 Shields 数は0.05~0.1の範囲である。

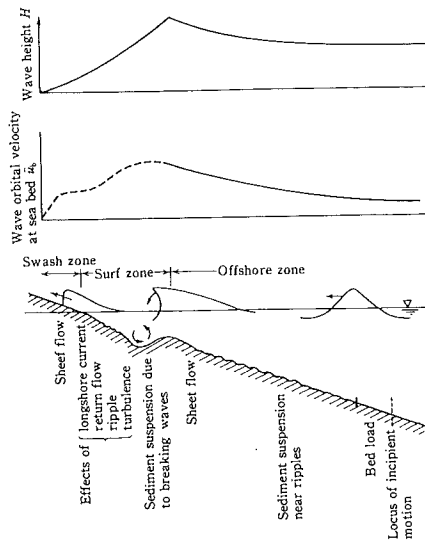


Fig. 3-42 Cross-shore variation of sediment transport modes (Horikawa, 1988).

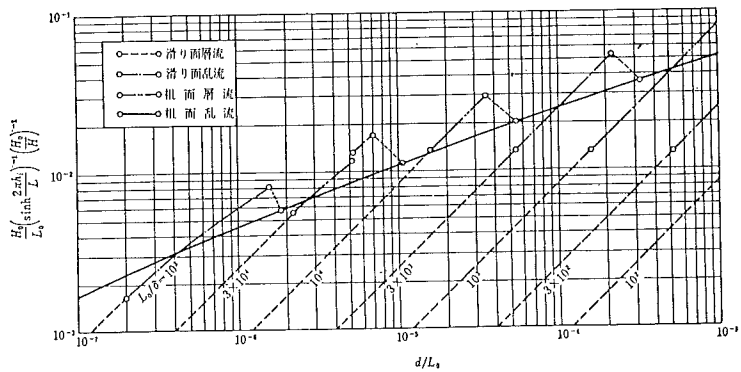
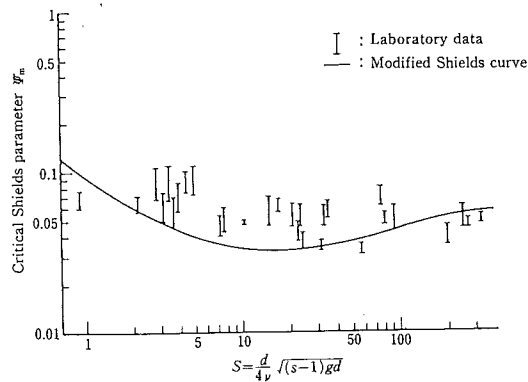


Fig. 3-43 Diagram to determine the critical water depth for general movement (Horikawa and Watanabe, 1967).



Critical condition for the initiation of sediment movement (Madsen and Grant, 1976).

Fig. 3-44 Critical condition for the initiation of sediment movement (Madsen and Grant, 1976).

b) 漂砂の移動形態

金子 (1980) や柴山・堀川ら (1982) による水理実験により底質移動形態の分類が報告されている。正弦振動流について柴山・堀川ら (1982) は波動水路、振動流水槽、現地海浜での観測結果に基づいて砂移動の形式を5つに分類 (Fig. 3-45) し、それぞれの形式について、半周期平均の底質移動式及び各移動形式の生じる条件について提案している (Fig. 3-46)。移動形式は Shields 数 ϕ_m と浮遊移動距離 (\hat{u}_b/ω_0) によって5つに分類される。ここに、 \hat{u}_b は底面軌道流速の振幅、 ω_0 は底質沈降速度である。

Shields 数 ϕ_m が0.05以下は砂の移動は無視される。0.05 \leq ϕ_m \leq 0.1の範囲では \hat{u}_b/ω_0 には関係なく、 ϕ_m だけに依存しており、0.05 \leq ϕ_m \leq 0.06の領域は岸向きの掃流砂、0.06 \leq ϕ_m \leq 0.1の領域は砂漣の形成と浮遊砂での沖向き移動形態が現われる。 $\phi_m \geq 0.1$ では移動形式は \hat{u}_b/ω_0 の大きさに関係し、 \hat{u}_b/ω_0 が5を超えると、砂漣の形成は不規則になり移動方向は岸向き主体になり、 $\hat{u}_b/\omega_0 \geq 10$ では Sheet flowの状態が出現する。

c) 沖浜帯における漂砂の移動方向

砕波帯より沖の海底は沖浜帯と呼ばれる。沖浜帯ではしばしば砂漣 (Sand ripple) が発達するが、砂漣が発達している海底では流れも砂の移動も著しく複雑になる。砂漣の存在によって、砂漣背後には顕著な渦が発達する。波の一周期間における砂の挙動をみると、砂漣の前面を掃流状態で移動してきた砂粒子は、この渦の中に取り込まれ雲状に浮遊し、流れの反転に伴って砂粒子を巻き込んだまま渦は放出され、強い乱れの場を形成する (Fig. 3-47)。

砂の移動方向は砂漣形状や粒径、波の非対称性などにより、複雑に変化し系統的な議論が困難であるが、砂村 (1982) は砂漣のある沖浜帯における漂砂の移動方向について漂砂実験を整理しダイアグラムを作成した (Fig. 3-48)。縦軸は砂粒子に作用する波の流体力 $(d_0\sigma)^2 d^2$ と重力 $(\gamma' g d^3)$ の比を示す Hallermeir の ϕ であり、横軸は波の非対称性を表す Ursell 数 U_r ($H L^2/h^3$) である。

ここに、 d_0 は波による軌道流速の振幅で $d_0 = H/\sinh(2\pi h/L)$ 、 $\sigma = 2\pi/T$ 、 $\gamma' = (\rho_s - \rho)/\rho$ である。また、 h は水深、 L は波長、 H は波高、 T は波の周期、 d は砂の粒径、 ρ_s 、 ρ は砂及び海水の密度、 g は重力の加速度である。

Fig. 3-48からわかる通り、漂砂の移動方向はこの二つの無次元パラメーターにより三つの領域に分けられる。移動限界にあたる ϕ_c は約17で、これ以下では砂は移動しない。

$\phi > 17$ の領域では $\phi = 0.048 U_r^{1.5}$ の境界線によって、岸向き方向と沖向き方向に分けられる。

これまで見てきたように、岸沖漂砂の移動方向は海底面の微地形と移動形態によって変化する。これを模式的に表わしたのが Fig. 3-49である。海底面が平滑 (Flat bed) の場合、漂砂の移動は掃流状態 (Bet load) で岸向きに限定されるのに対し、砂漣のある場合 (Ripple bed) では、掃流状態での岸向き移動と浮遊状態 (Suspended load) での沖向き移動という異なる方向の移動が生ずる。

従来の研究において、砂漣の発生・消滅に対する限界条件、砂漣の形状 (波高、波長) も Shields 数等のパラメーターと関連づける試みがなされている (佐藤ら、1989)。したがって、個々の地点における波の条件が与えられれば、これらのパラメーターを計算することによって、海底面の形状、砂の移動形態、移動方向が求められる。

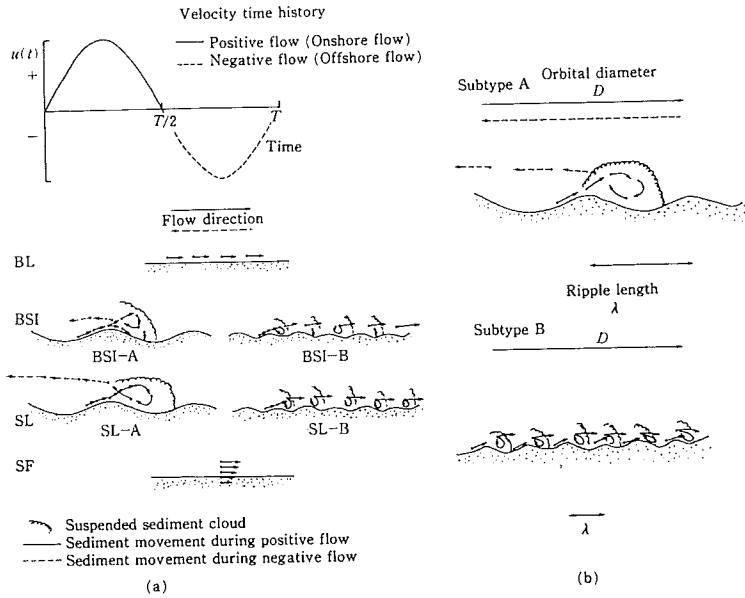


Fig. 3-45 Sediment transport types (Shibayama, 1984).
 (a) The principal sediment transport types.
 (b) The difference between Subtype A and Subtype B transport.
 BL: Bed load, BSI: Bed load-Suspended load intermediate,
 SL: Suspended load, SF: Sheet flow.

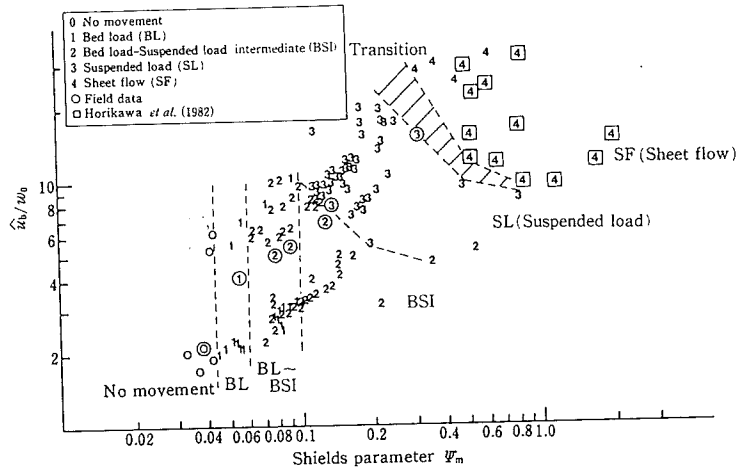


Fig. 3-46 Classification of transport modes as a function of velocity amplitude (\hat{U}_b), sediment fall velocity (W_0) and Shields parameter (ψ_m) (Shibayama and Horikawa, 1982).

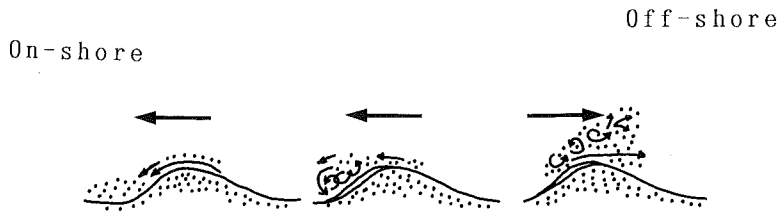


Fig. 3-47 Sand movement in the vicinity of a sand ripple (Scott, 1954).

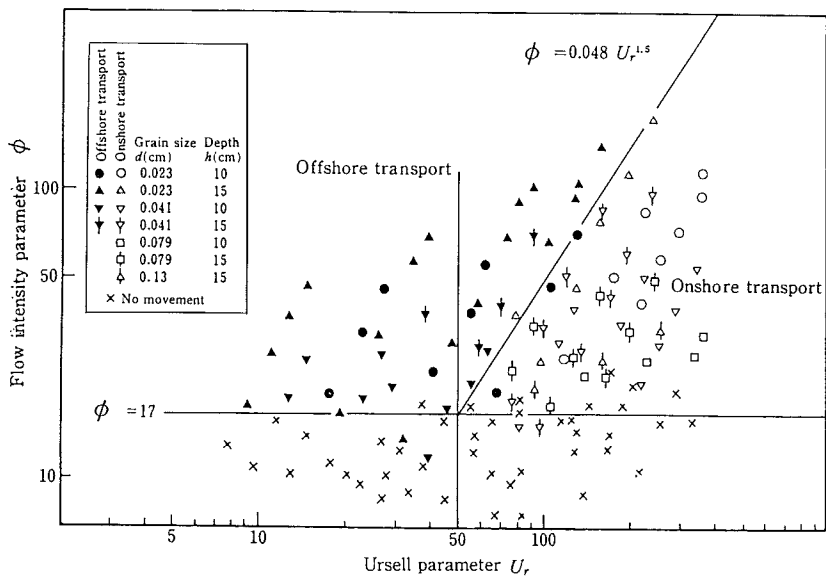


Fig. 3-48 Classification of net cross-shore transport direction (Sunamura, 1982).

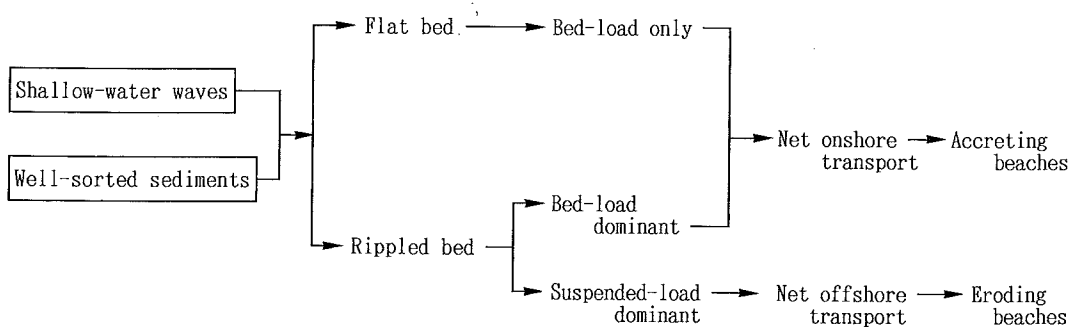


Fig. 3-49 Schematic view of sediment transport types and major transport directions.

d) 漂砂移動量

沖浜帯における、岸沖漂砂量については種々の理論式、経験式が提案されている(砂村, 1984)。単一進行波のもとでの正味の漂砂量の絶対値は、渡辺(1981)により提案された次式で評価できる。

$$\Phi = B_w (\Psi_m - \Psi_0) \Psi_m^{1/2} \quad (1)$$

ここに、 $\Phi = (1 - \lambda_v) q_w / \omega_0 d$ は無次元漂砂量、 $\Psi_m = u_*^2 / sgd$ は Shields 数、 q_w は正味の漂砂量の絶対値、 s は砂の水中比重、 λ_v は砂の空隙率、 ω_0 は沈降速度、 d は粒径、 u_* は底面摩擦速度の振幅である。 B_w は無次元係数である。また、限界 Shields 数 Ψ_0 は全面移動限界に相当するものである。

波による底面摩擦速度の振幅 u_* は底面剪断応力の振幅 τ_m によって $u_*^2 = \tau_m / \rho$ と表わされるが、 τ_m は Jonsson(1966) の方法によって与えられる。

$$\tau_m = 1/2 \cdot f_w / \rho \cdot \hat{u}_b^2 \quad (2)$$

ここで、 f_w は Jonsson の底面摩擦係数であり、 \hat{u}_b は底面軌道流速の振幅である。

3. 2 二枚貝の資源動態方程式

ウバガイの空間分布と輸送に対する波の影響をモデル化するために Fig. 3-50 のような縦断形状をもった海浜を考える。沿岸方向には現象は一樣とし、岸沖方向のウバガイの資源量の変動を対象にする。ウバガイ稚貝がこの海浜に着底した場合、水深帯毎に異なった影響を受けると考えられる。すなわち、砕波帯では激しい流体運動の結果、稚貝は安定した着定ができず減耗が激しい。

一方、充分水深の大きい沖浜帯ではウバガイの移動限界水深を越えているため稚貝は波によって動かされることはない。しかも、第2章第2節で述べた通り、この領域では底質中のシルトの含有率が高く、そのため稚貝の減耗率も大きくなると考えられる。これらの中間の領域に着底した稚貝は波によって輸送され、ある岸沖分布を形成しながら成長していくと考えられる。

こうしたウバガイの資源量の時空間変動は、海浜縦断面の微小区間における個体数の保存を考えることによって、成長を考慮した中村ら(1988)のモデルを拡張した式(3)であたえられる。

$$\frac{\partial N(\ell, x, t)}{\partial t} + \frac{\partial U(\ell, t) \cdot N(\ell, x, t)}{\partial \ell} + \frac{\partial q_{wn}(\ell, x, t)}{\partial x} = -M(x) \cdot N(\ell, x, t) \quad (3)$$

ここで、 $N(\ell, X, t,)$ は貝の殻長 $\ell(t)$ 、岸からの距離 x 、時間 t に依存した単位面積当りの稚貝個体数、 $U(\ell, t)$ は貝殻長の成長速度で成長式の時間微分 ($d\ell/dt$) で表される。また、 q_{wn} は岸沖方向の稚貝輸送量、 $M(x)$ は稚貝の自然死亡係数である。

式(3)の左辺第2項は成長にともなって変化する殻長組成の変化、同第3項は波の作用による岸沖方向の稚貝フラックスの変化、さらに右辺は貝の死亡による減耗項である。

なお、以下の検討では単純化のため稚貝の殻長組成を単一殻長に仮定し、式(3)の左辺第2項は省略される。ただし、時間の経過にともなって全ての稚貝の殻長 $\ell(t)$ が一樣に成長するとし、その成長曲線は Fig. 3-16 に示す Gompertz の式 (Beverton and Holt, 1959) で与えられる。

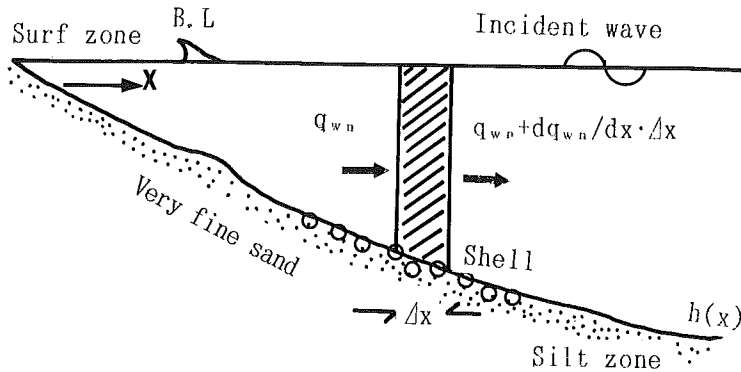


Fig. 3-50 Illustration of model.

Characters are as follow.

q_{wn} : Offshore comp. of shell flux at x

$q_{wn} + dq_{wn}/dx \cdot \Delta x$: Offshore comp. of shell flux at $x + \Delta x$

B.L.: Breaking line, $h(x)$: Bottom profile

3.3 稚貝の岸沖輸送量のモデル化

資源動態方程式(3)において、従来全く検討されていないのは波による稚貝の移動量である。それによる左辺第3項を評価するため、漂砂量理論を応用して稚貝の漂貝量 q_{wn} を導く。

そのためには、砂と稚貝との差異を考慮し次に示す幾つかの項目を漂砂量式の中に取り込む必要がある。

- ① 稚貝は砂のように底面に隙間なく分布していることはなく、底質内の極く表層に生息し、出現密度分布は不均一である。
- ② 稚貝は砂と異なり、形状、重量、比重等が成長により、時間経過とともに変化する。
- ③ 漂貝量の次元を、体積から、個体数ベースに変換する必要がある。

a) 漂砂量式の変形・拡張

3.1で述べたように砂に対する岸沖漂砂量は渡辺の式(1)でよく与えられる。これを有次元にもどし、体積ベースの漂砂量式にもどすと次のようになる。

$$q_w = \frac{B_w \cdot \omega_0}{(1 - \lambda_r) s g \sqrt{s g d}} (u_*^2 - u_{*c}^2) u_* \quad (4)$$

この、式(4)を底面軌道流速を含んだ形で書きなおす

$$\begin{aligned} q_w &= \frac{B_w \cdot \omega_0}{(1 - \lambda_r) s \sqrt{s g d}} \frac{(u_*^2 - u_{*c}^2)}{g} \left(\frac{f_w}{2} \right)^{1/2} \hat{u}_b \\ &= \left(A_{w1} \frac{(u_*^2 - u_{*c}^2)}{g} \right) (A_{w2} \hat{u}_b) \\ &= Q_w (A_{w2} \hat{u}_b) \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 Q_w は波の作用によって移動状態に入る砂の量、 $(A_{w2} \hat{u}_b)$ はその砂が輸送される速さと解釈でき、式(5)は渡辺の式をフラックス型の輸送モデルに書き直したものになっている。この式では移動状態に入る砂の量は波による余剰剪断力 $(u_*^2 - u_{*c}^2)$ に比例 (A_{w1} 倍)し、

輸送速度は軌道流速の振幅 \hat{u}_b に比例 (A_{w2} 倍) すると表されている。ここで、 A_{w1} 、 A_{w2} は個々には定まらない係数で、

$$A_w = A_{w1} \cdot A_{w2} = \frac{B_w \omega_0}{(1 - \lambda_r) s \sqrt{s g d}} \left(\frac{1}{2} f_w \right)^{1/2} \quad (6)$$

という関係を満たしている。

さて、式(5)のように漂砂量をフラックス型に書き直すことによって上に述べた砂と稚貝との間の差異を取り込むことが可能になる。

b) 稚貝分布の有限性と浮遊量 Q_w

式(5)の Q_w は無限に砂の供給がある場合に移動状態に入る底質の量を表すが、稚貝の場合には、海底面が全て貝で構成されていることはない。従って、同じ余剰剪断応力 ($u_*^2 - u_{*c}^2$) が作用しても潜在的な移動量 Q_w 全てが、移動状態に入る訳でなく、その瞬間における砂層表面に分布する貝の表面積による。稚貝の移動量は、単位面積当りに分布する貝の表面積に比例すると考えられるので、それを用いて補正する (Fig. 3-51)。

具体的には殻長 l の貝が単位面積当りに重複しないで分布できる最大個体数を $R(l)$ とすると、補正係数はある時点における稚貝出現密度 $N(l, t)$ との比で与えられる。

$R(l)$ は稚貝の断面形状から次のように推定した。

$$R(l) = 200 / l^2 \quad (n/cm^2)$$

この R を使って、砂層表面に単位面積当りに N 個の稚貝が分布している場合の移動状態に入る稚貝の量 \tilde{Q}_w を定式化すると次式をえる。

$$\tilde{Q}_w = N / R \cdot Q_w$$

$$Q_w = A_{w1} (u_*^2 - u_{*c}^2) / g$$

さらに、体積ベースの \tilde{Q}_w を稚貝一個体の体積 V で除して個体数ベースの Q_{wn} を求めると式(7)になる。

$$Q_{wn} = V^{-1} \cdot (N/R) \cdot A_{w1} (u_*^2 - u_{*c}^2) / g \quad (7)$$

c) 稚貝の輸送速度

次に、漂砂量式(5)の中の輸送速度について検討する。海浜断面の中で、稚貝の波による輸送の効果が卓越するのは沖浜帯においてである。この領域では既に述べたように砂漣が形成されていることが多く、その存在によって、沖向き漂砂が発生すると考えられる。現地の波浪条件を用いた試算では、おおむね沖浜帯は砂漣の形成される領域に入っており、このモードによる稚貝の輸送が卓越すると考えられる。そこで、Fig. 3-47に示したような砂漣背後の浮遊砂雲による沖向き輸送が稚貝に対してはどのように異なって現われるかを考える。

1回の波の作用で、砂と貝が巻き上げられ、1周期間に各々 L_1 、 L_2 だけ沖に移動したとする。このとき、1周期平均の沖向き移動速度は、式(8)になる。

$$\text{砂} : L_1 / T = A_{w2} \hat{u}_b$$

$$\text{貝} : L_2 / T = \tilde{A}_{w2} \hat{u}_b = L_2 / L_1 \cdot A_{w2} \hat{u}_b \quad (8)$$

つまり、貝の場合沈降速度が砂より大きいため、短時間で着底し、輸送速度が L_2 / L_1 だけ小さくなる (Fig. 3-52)。

波による1周期間の稚貝輸送速度を評価するためには L_2 / L_1 を見積もる必要がある。佐藤ら (1989) にならって、軌道流速が岸向きの期間に浮遊した砂と貝は砂漣の高さ η の1.5倍の位置

(h.) に集中するとする。砂と貝は、底面流速の反転時に沈降を始め、 1.5η の高さを落ちることになる。そうすると、 L_1 、 L_2 は各々次のように与えられる。

$$L_1 = \int_{t_0}^{t_1} u_b dt \quad L_2 = \int_{t_0}^{t_2} u_b dt \quad (9)$$

ここに、 t_0 、 t_1 、 t_2 は流向反転の時刻及び砂、稚貝の着底する時刻である。

$$t_1 = 1.5\eta / \omega_1 \quad t_2 = 1.5\eta / \omega_2 \quad (10)$$

砂の沈降速度 ω_1 はルビーの式(昭和46年度水理公式集)より求められるが、粒径0.1mm、比重2.65の砂に対して2.5cm/secである。一方、 ω_2 は稚貝の沈降速度で、実測値(Fig. 3-20)より求められ、殻長2mm~10mmの範囲で9cm/secである。

$u_b(t) = \hat{u}_b \cdot \cos \sigma t$ とおけるので、 $t_0 = 0$ にとり、式(9)に代入すると式(11)になる。

$$L_2 / L_1 = \sin(\sigma t_2) / \sin(\sigma t_1) \quad (11)$$

水深、沖波条件、砂及び稚貝の大きさと沈降速度を数種類設定し、 η については、佐藤ら(1989)の式より計算した。これらの準備をもとに、式(11)によって L_2/L_1 を計算し、 L_2/L_1 と稚貝の Shields 数 ϕ との関係をもとめた(Fig. 3-53)。次項で明らかにされる稚貝の移動限界 Shields 数($\phi_m \doteq 0.07$)以上の領域では L_2/L_1 は大体0.3付近に落ち着いた。この値は両者の沈降速度比($\omega_2/\omega_1 = 0.27$)とも近い。

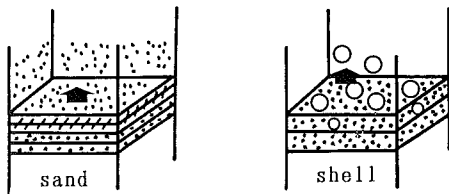


Fig. 3-51 Comparison of sediment suspended mode and bivalve suspended mode.

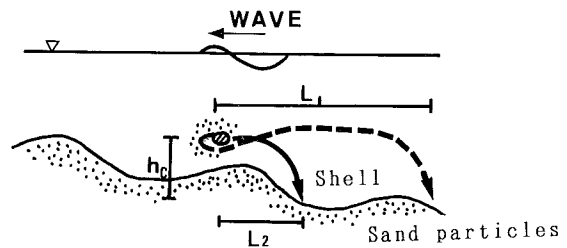


Fig. 3-52 Schematic diagram for bivalve transport.
 L_1, L_2 : Transport distance of sediment and bivalve during a wave pass.
 h_c : Suspended height $\doteq 1.5\eta$ (η : Ripple height).

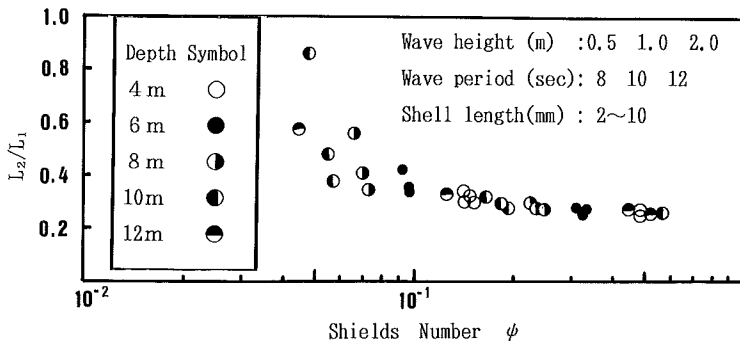


Fig. 3-53 Relationship between Shields number of bivalve ϕ and ratio of transport distance L_2/L_1 .

d) 稚貝の輸送方向

以上の検討によって稚貝の移動量すなわち漂貝量について定式化した。波による底質の輸送をモデル化する上でのもう一つの問題は移動方向の判定である。沖浜帯における砂の場合の移動方向がFig. 3-48に示した砂村のダイヤグラムで与えられることは、既に示した通りである。しかし、二枚貝に対しては従来こうしたアプローチは皆無である。そこで、渡辺 (1982) の実験結果を整理して、稚貝に対する同様なダイヤグラムを求めることを試みた。

渡辺 (1982) は採捕後ただちに5%濃度のホルマリンで固定したウバガイを実験材料にして、二次元水路で波による貝の岸沖輸送について測定した。実験方法と条件についてはFig. 3-54、Table 3-6に示した。ここでは、移動床と平坦床における稚貝の移動実験から、殻長が1cmサイズ貝のものをとり出し、稚貝の移動限界と移動方向を砂村 (1982) と同様な無次元パラメータ (ϕ , u_r) を使って整理した。その結果を Fig. 3-55、57に示す。

移動床実験の結果 (Fig. 3-55)

移動限界条件は砂の場合より小さく $\phi_c = 10$ である。 $\phi \geq 10$ 以上の範囲では砂と同様に冲向き輸送と岸向き輸送の領域に別れる。稚貝の冲向き輸送は、実験において海底面上に砂漣が形成されている状態の下で生じており、漂砂量の定式化における砂漣背後の浮遊砂雲の中に取り込まれることによる稚貝の冲向き輸送という仮定の妥当性を裏付けている。

実験波の諸元と水深及び稚貝の殻長、比重等から稚貝に作用する剪断応力について、2種類の無次元パラメータ (ϕ , ψ) を計算し両者の関係を回帰式 ($\phi = 385.22 \psi^{1.36}$) にして求めた (Fig. 3-56)。これによって、 ϕ_c に対応する限界 Shields 数 ψ_c は0.069くらいになることが推定される。

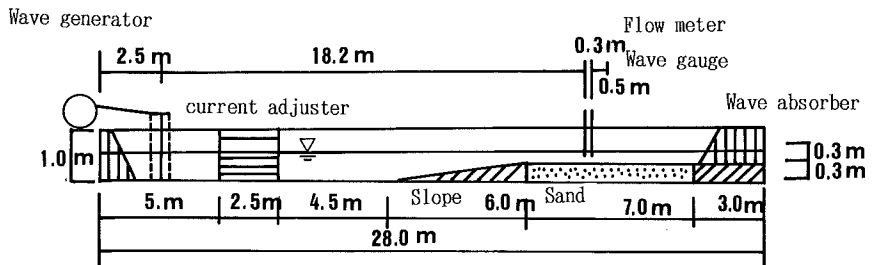


Fig. 3-54 Experimental apparatus for bivalves transport (Watanabe, 1982).

Table 3-6 characteristics on bivalves transport experiments. (after Watanabe, 1982)

Bed type	Rippled bed	Flat bed
Wave height (cm)	8 10 12.5	15 18
Wave period (sec)	1.5 2.0	2.5
Grain size (mm)	0.42	
Specific gravity	2.78	
Shell length (cm)	1.14 1.47	
Sand ripple (cm)	height:1.0~3.0	length:10.0~15.0
Water depth (cm)	30	

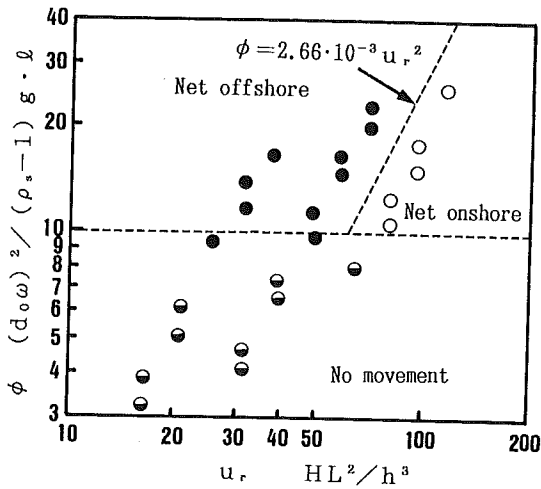


Fig. 3-55 Threshold and direction of bivalve transport by rippled bed experiment (modified after Watanabe, 1982).

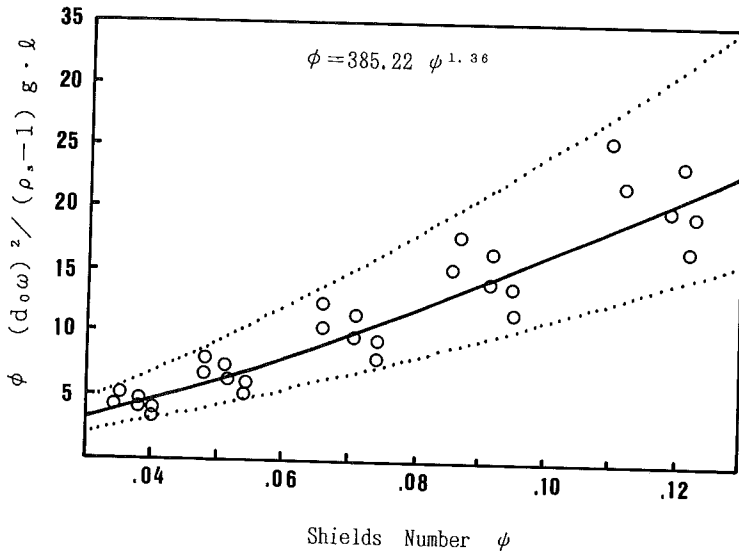


Fig. 3-56 Relationship between Shields number of bivalve ϕ and flow intensity parameter ϕ .

固定床実験の結果 (Fig. 3-57)
 固定床では移動床と違い、岸向き輸送のみが現われており、移動限界を示す境界線は波の非対称性の指標である Ursell 数 u_r だけに依存しており、 $u_r \approx 30 \sim 40$ あたりが移動限界である。

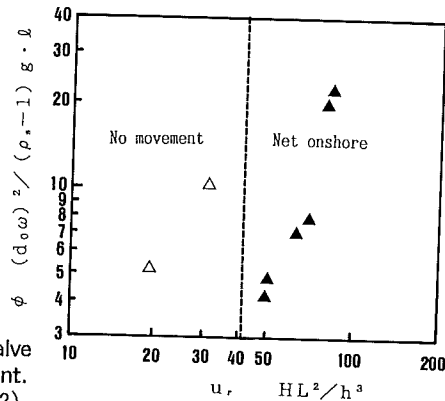


Fig. 3-57 Threshold and direction of bivalve transport by flat bed experiment. (modified after Watanabe, 1982).

e) 漂貝量 q_{wn} の定式化

これまでの考察から、個体数ベースの稚貝の輸送量 q_{wn} について、整理すると次のようになる。

$$q_{wn} = F_D \cdot Q_{wn} \cdot (L_2/L_1) \cdot A_{w2} \hat{u}_b \quad (12)$$

$$= F_D \cdot V^{-1} \cdot g^{-1} (N/R) (L_2/L_1) [A_w (u_*^2 - u_{*c}^2) \hat{u}_b]$$

ここに、 F_D は貝の輸送方向の判別指標で沖向きの際は+、岸向きの際は-になる。また、 $A_w = A_{w1} \cdot A_{w2}$ で、上式右辺の [] 内を Jonsson (1966) の方法による剪断摩擦応力と限界 Shields 数で書き替えると式 (13) をえる。

$$q_{wn} = F_D \cdot E_w \cdot [0.5 f_w \hat{u}_b^2 - \phi_c (\rho_s - 1) g \ell] \hat{u}_b \quad (13)$$

$$E_w = (A_w/V) (N/R) (L_2/L_1) \cdot g^{-1}$$

海浜縦断面のある地点において、漂貝量を算定する上での考えかたを Fig. 3-58 に示す。与えられた波浪と水深の条件下でまず移動の有無と砂漣の有無といった底面の状態が判断される。

その限界値は各々に対する限界 Shields 数 ϕ_1 、 ϕ_2 で与えられる。ついで、砂漣が存在する条件下では Fig. 3-55 に示したダイアグラムに基づいて移動方向 (F_D) が判定される。その上で式 (13) を用いて稚貝の輸送量 q_{wn} が算定される。

こうした計算を海浜縦断面に沿ってくり返せば対象とした海浜における漂貝量の分布を求めることができる。

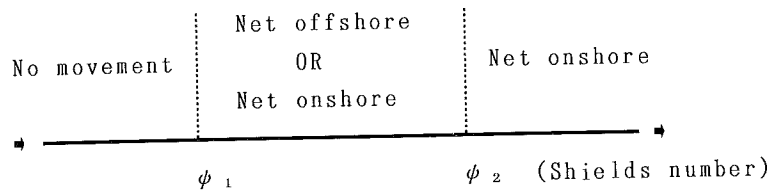


Fig. 3-58 Relationship between direction of shell transport and shields number.

ϕ_1 : 0.069 (Critical shields number of shell)

ϕ_2 : 0.6 (Shields number of sand at sand ripple vanished)

$\phi_{shell} / \phi_{sand} = 0.568 \ell^{-0.311}$

(ℓ : 2 mm ~ 10 mm, d : 0.014 cm, T : 8 sec, h : 4 m ~ 10 m,

H : 0.5 m ~ 2.0 m)

f) 岸向き輸送量と碎波帯の取り扱い

波の条件によっては沖浜帯で岸向き輸送が現われる。式 (13) は砂漣の存在下における沖向き輸送に対して求められた漂貝量であり、掃流形式で運ばれる岸向き輸送に適用できる保証はない。

しかし、利穂ら (1981) は岸向き、沖向きの漂砂量がメカニズムの違いにもかかわらず、ほぼ同じ表現で与えられるとしている。ここでは利穂らに従い、岸向き漂貝量も式 (13) で与えられるとした。

一方、碎波帯内では急激な転動による激しい減耗 (ベロ噛み、破損等) を考え、通常より大きな自然死亡係数 M を与えた。さらに、碎波帯を越える稚貝の移動はないものと仮定し、碎波帯内の稚貝分布は均一化されるとした。

g) 漂貝量パラメータ A_w について

$$A_w = A_{w1} \cdot A_{w2} \\ = [B_w / (1 - \lambda_v)] [\omega / s \sqrt{s g d}] [0.5 f_w]^{1/2}$$

上式の右辺第2カッコは稚貝の成長段階ごとに変化する諸値、 ω (9 cm/sec)、 s (0.3~0.6)、 d (3 mm~12 mm) から決定される。また、第3カッコは砂の粒径 ($M_d: 0.17$ mm) や水深、波高、周期によって、逐次変化する。ただし、第1カッコは稚貝の形状、重さ密度、潜砂能力等の生物特性によって支配され、実験による定量化も困難な係数である。そこで、渡辺 (1985) の資料から推測される漂砂量に対する値 ($B_w / (1 - \lambda_v) \approx 30$) の 1/100 を定数として与えた。

h) 稚貝の諸特性

以上の稚貝輸送のモデルの中には、殻長をはじめ稚貝の特性値が含まれている。これらは、一般的に回帰式の形にして表している。

次に、実測によって得られた稚貝形状の諸元を示す。

$$\text{稚貝殻長 } l(t) = 11.33 e^{(-e \times p (-10.56 (t - 0.135)))} \quad (\text{mm}) \quad (\text{Fig. 3-16})$$

(磯部海岸)

$$l(t) = 19.97 e^{(-e \times p (-3.62 (t - 0.304)))} \quad (\text{mm}) \quad (\text{Fig. 3-16})$$

(勿来海岸)

$$(3 \text{ mm} \leq l \leq 12 \text{ mm})$$

$$\text{稚貝重量 } W = 1.139 \cdot 10^{-3} l^{2.302} (\text{cm}^3)$$

(Fig. 3-17)

$$\text{稚貝比重 } \rho_s = 1.73 l^{-0.108}$$

(Fig. 3-18)

$$\text{沈降速度 } \omega_s = 9 \quad (\text{cm/sec})$$

(Fig. 3-20)

$$\text{稚貝体積 } V = 6.58 \cdot 10^{-4} l^{2.41} (\text{cm}^3)$$

i) 漂貝量分布の計算手順

稚貝輸送モデルに稚貝の諸特性を組み合わせることにより、各地点における波の条件、水深、底質の構成が与えられれば、漂貝量が算定できる。この計算フローチャートを Fig. 3-59 に示す。

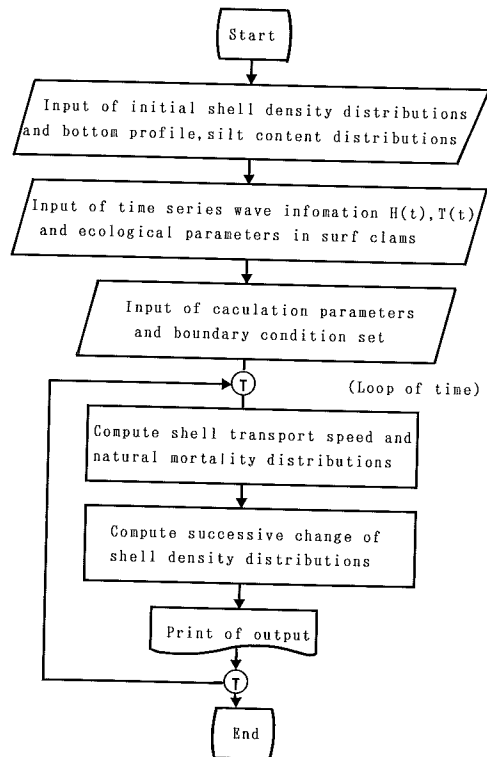


Fig. 3-59 Flowchart of calculation method for the wave-induced shell transport on sandy beaches.

3. 4 福島沿岸における計算

計算の対象と条件

本モデルを福島沿岸の二つの漁場、優良漁場である磯部海岸（海底勾配：1/230）と生産性の低い勿来海岸（海底勾配：1/40）とに適用し、ウバガイ稚貝の資源変動をシミュレーションした。

①計算期間は1988年8月1日より100日間で、計算時間間隔 Δt は1日である。

②計算の対象は5mm~12mmの稚貝で稚貝の成長はGompertzの式（Fig. 3-16）に従うとした。

③自然死亡係数 M は次のように与えた。

$$M(x) = \begin{cases} 10M_0 & (\text{砕波帯内}) \\ M_0 & (\text{シルト含有率} \leq 7\%) \\ M_0 + \alpha (\text{シルト含有率} - 7\%) & (\text{シルト含有率} > 7\%) \end{cases}$$

ここで $M_0 : 5 \cdot 10^{-3} (\text{day}^{-1})$ 、 $\alpha : 3 \cdot 10^{-3} (\text{day}^{-1})$

シルト含有率は両海岸の実測値（Fig. 3-22）をあたえた。与えた自然死亡係数の岸沖分布をFig. 3-60に示す。

④入射波の条件は、相馬港（磯部海岸）、小名浜港（勿来海岸）での有義波実測値（Fig. 3-61 (a), (b)）を時系列データとして与えた。各地点での底面軌道流速は微小振幅波理論、底面剪断応力はJonssonの方法によって計算した。

⑤初期稚貝分布はFig. 3-66に示すように、磯部海岸は沖合1500mまで、勿来海岸は沖合1000mまでを一様密度に設定し、岸側の境界では稚貝の補給は考えなかった。

⑥式(3)の数値計算には逐次過緩和法（SOR法）を用いた。

計算領域は離岸200m~1500mの範囲で格子間隔は $\Delta x = 40\text{m}$ とした。

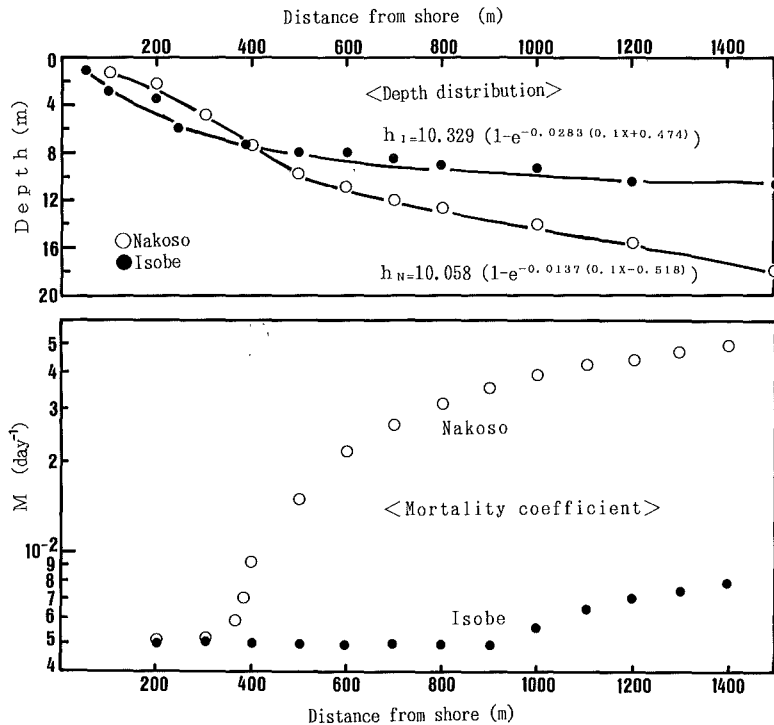


Fig. 3-60 Cross-shore distributions of water depth (upper) and natural mortality coefficient M (under) at each coast.

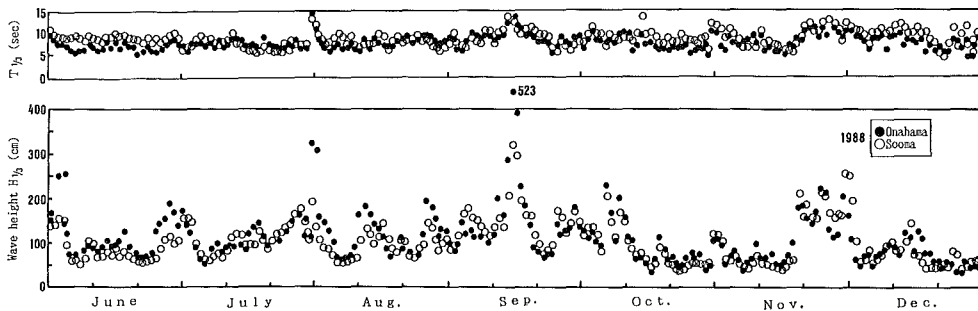


Fig. 3 -61(a) Time change of significant wave period $T_{1/3}$ and wave height $H_{1/3}$ off Onahama port, Sooma port.

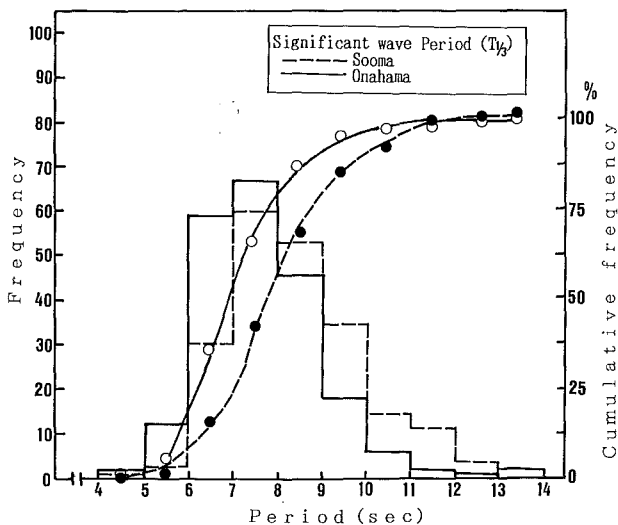
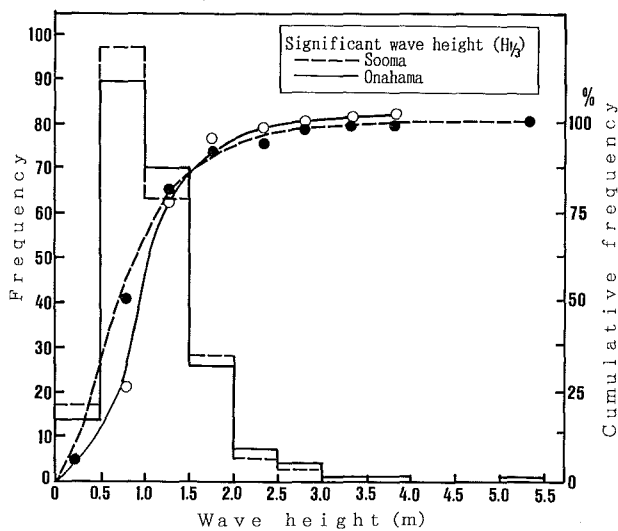


Fig. 3 -61(b) Frequency distributions of wave height and wave period off Onahama port, Sooma port.

計算結果の考察

a) 稚貝の輸送速度分布

Fig. 3-62は同じ波高条件下における海岸別及び稚貝殻長別の稚貝の輸送速度分布の違いを示したものである。稚貝の輸送速度は海底勾配と稚貝の殻長に影響され、水深が浅く稚貝の殻長が小さい程輸送速度は大きい。

次に、波高別における稚貝の輸送速度分布を Fig. 3-63に示す。波高が1 m以下(①)の場合、稚貝の岸沖輸送は概ね無視される。波高が1 mを越える(②)と沖向き輸送が現われ、その程度は波高が大きい程速度が増し、影響範囲も沖合へ拡大する。

しかし、波高が2 mを越える(③)と、岸側の部分で掃流状態の岸向き輸送領域が出現する。一方、沖側では沖向きの輸送が現われるため、輸送方向が反転する領域が出現する。

この輸送方向が反転する付近では移流効果による稚貝密度の収束と発散が局部的に発生し、稚貝分布に大きな変化を与えている (Fig. 3-64)。

さらに、波高が大きくなり3 mを越える(④)と、砂漣の消滅により、稚貝の輸送方向は全ての領域で岸向きになる。

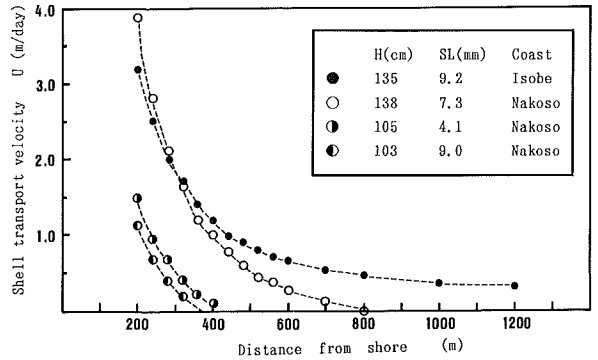


Fig. 3-62 Cross-shore distributions of shell transport velocity U by difference coast and difference shell length SL .

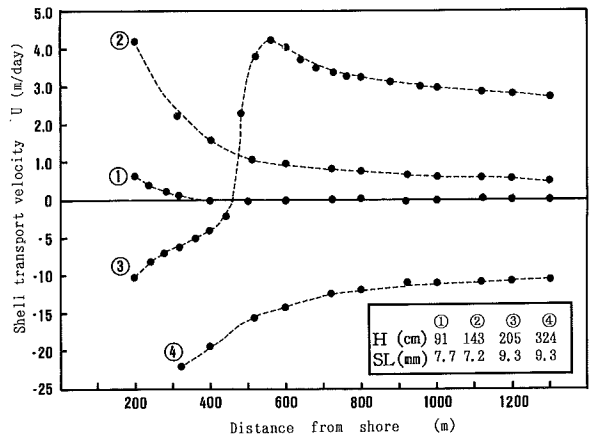


Fig. 3-63 Cross-shore distributions of shell transport velocity U by difference wave height H .

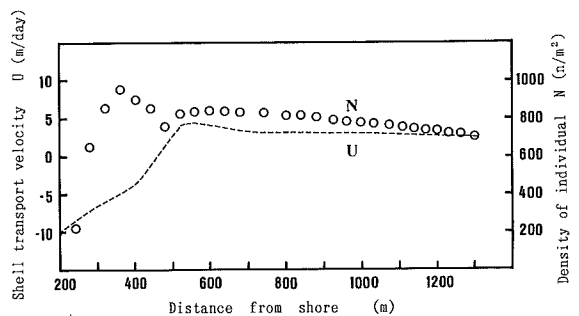


Fig. 3-64 Cross-shore distributions of shell transport velocity U and shell density N . (Isobe coast) Wave height $H=205\text{cm}$, Shell length $=9.3\text{mm}$

b) 稚貝分布の時間変化

計算期間中の波高変化及び稚貝の成長と比重の変化について Fig. 3-65 に示した。また、稚貝分布の時間変化を Fig. 3-66 に示した。稚貝分布の時間的変化は計算開始から約40日間が大きく、60日目にはほぼ安定した形状に達している。稚貝密度の減少が顕著な所は離岸200m~300mまでの岸側の部分と勿来海岸における離岸600mより沖合の部分である。そして、100日目に磯部海岸では岸から400mの地点で稚貝の集積による飽和点が現われており、その沖側は緩やかな減少傾向が続いている。

一方、勿来海岸でも同じ地点に極大点が現れているが、その沖側の減少傾向は急で離岸600mより沖側では殆ど分布していない。両海岸での稚貝分布の拡がりには大きな違いがあり、この差が漁場形成における安定性の優劣を示していると云える。稚貝密度分布の高い水深帯は5m~10mに相当し、実際の漁場水深 (Fig. 3-13) と一致している。

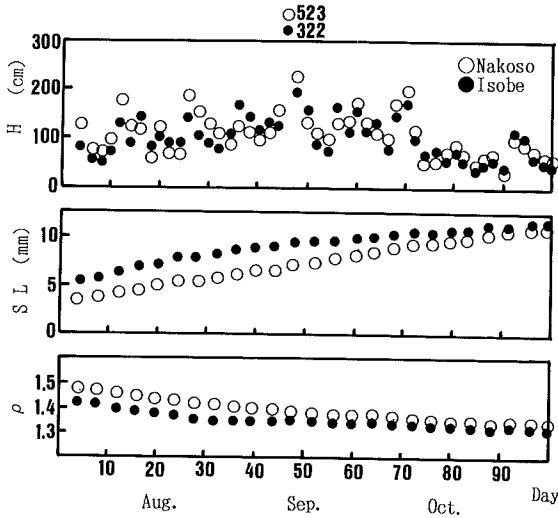


Fig. 3-65 Time change of significant wave height H , shell length SL of surf clams and specific gravity ρ during Aug. to Oct. in 1988.

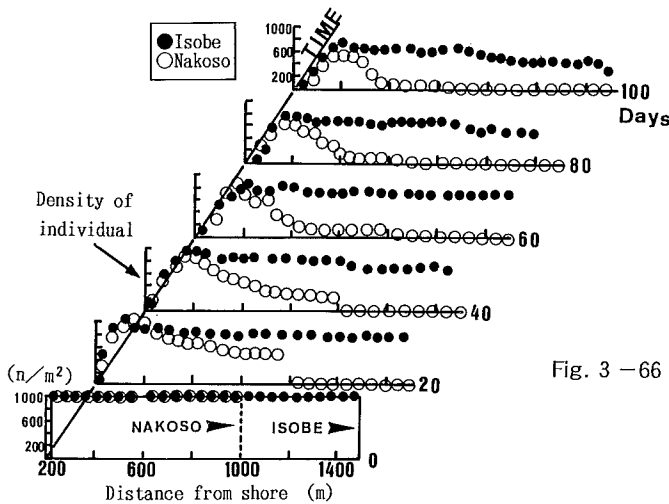


Fig. 3-66 Simulated temporal evolution of bivalve cross-shore distribution with a initial uniform distribution. Nakoso and Isobe coast are steep and gentle beaches respectively. See Fig.3-13.

c) 稚貝密度の集積機構

場所による稚貝密度の変化の様子をさらに詳しく検討するため、50日目における稚貝の岸沖輸送を例にして、資源動態方程式(式3)の各項(漂貝量の移流項、自然死亡項、稚貝密度の時間変化項)の大きさについて考察した。

この日の波高は磯部海岸が1.35m、勿来海岸で1.38mである。また、稚貝の殻長は磯部海岸は9.2mm、勿来海岸では7.3mmである。輸送方向は両海岸とも沖向きで、輸送速度は岸側で大きく沖に向かって減少している(Fig. 3-62)。

次に式(3)における移流項と自然死亡項の比(以下AM比と呼ぶ。)について、その岸沖分布を Fig. 3-67に示した。磯部海岸、勿来海岸とも離岸200m地点でAM比は10を越えているが、離岸距離とともにAM比は低下する。ただし、AM比の岸沖分布は単調減少ではなくAM比が1付近で複雑な変化がみられる。AM比が最終的に1を切る地点は磯部海岸では440m付近で、勿来海岸は480mであり、その沖側のAM比の低下は勿来海岸が磯部海岸に比べて急激である。

このAM比のもっている意味を明確に理解するため、資源動態方程式を構成する各項の大きさの岸沖分布を Fig. 3-68に示した。

自然死亡項($M \cdot N$)は離岸400mまで急激に増加した後、1000mまではほぼ一定で、その沖側はシルト含有率の増加によって、また大きくなる。漂貝量の移流項($\partial q_{wm} / \partial x$)は離岸360mを境にして、岸側は大きな発散域(プラス領域)が、沖側は400m付近に極大点をもつ小さな収束域(マイナス領域)が現われている。収束域の極大点では稚貝密度の時間変化項($\partial N / \partial t$)は僅かながらも増加傾向を示し、稚貝の集積が認められる。

そして、この極大点付近のAM比は1に近い(Fig. 3-67)。AM比 $\gg 1$ の領域は移流作用が卓越しており、離岸200m~300mの範囲では移流作用による稚貝密度の低下が強調される。

一方、AM比 $\ll 1$ の領域は移流作用より自然死亡が卓越する領域であり、AM比 ≤ 0.1 を基準にすると磯部海岸で1000m、勿来海岸は700mより沖合の部分では自然死亡による密度低下が顕著である。

AM比=1付近は稚貝の集積がみられ、漁場形成にとって重要な領域である。AM比=1の地点は稚貝の殻長、海底勾配、波高によって、変化する(Fig. 3-69)。波高が大きくなるに従ってAM比=1の地点は沖に推移するが、その程度は海底勾配により異なる。波高が1.5mの場合におけるAM比=1の地点は磯部海岸で450m、勿来海岸で400mになる。

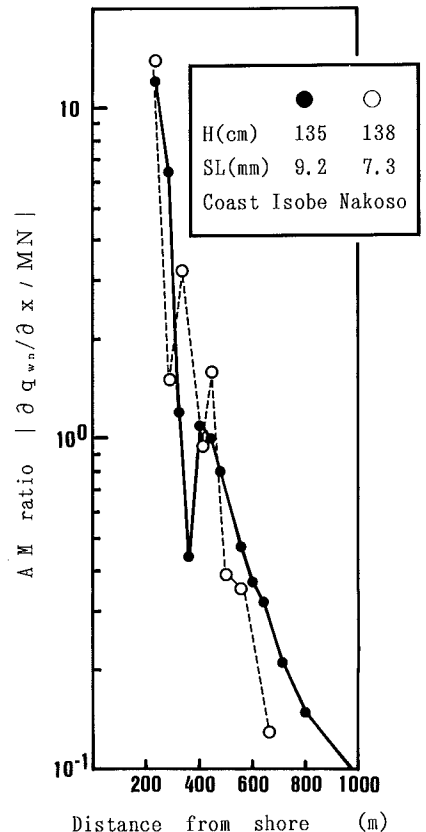


Fig. 3-67 Cross-shore distributions of AM ratio.
 $AM = \left| \frac{\text{Advection term}}{\text{Natural mortality term}} \right|$

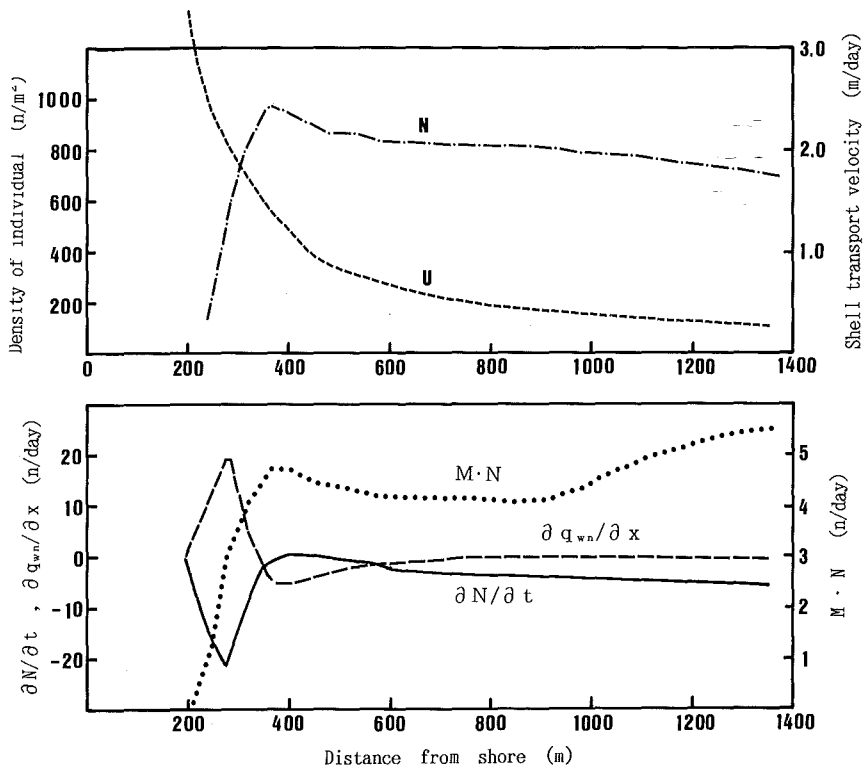


Fig. 3 - 68 Cross-shore distributions of shell density N , shell transport velocity U (upper) and natural mortality term $M \cdot N$, advection term $\partial q_{wn} / \partial x$, time variation term $\partial N / \partial t$ (under).

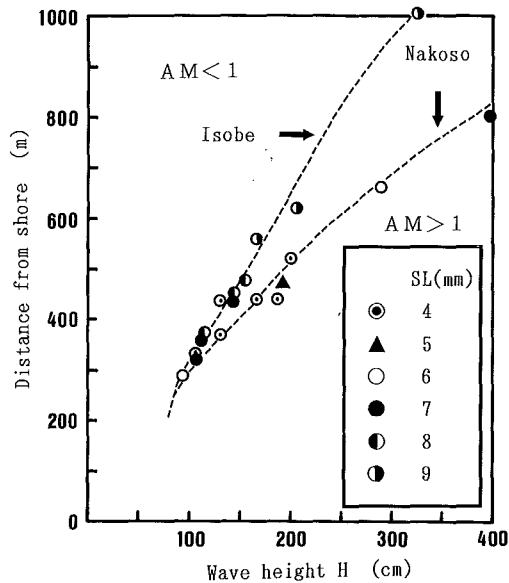


Fig. 3 - 69 Relationship between wave height H and the place at AM ratio=1.

d) 水深帯別の稚貝出現状況

両海岸における水深帯別の稚貝密度の時間変化を Fig. 3-70 に示した。両海岸ともに 8 m ~ 10 m の水深帯における稚貝密度の減少傾向は他の水深帯にくらべて小さい。

高波高時には顕著な稚貝の岸向き輸送によって、5 m ~ 6 m 水深に稚貝の集積が現われる。

一方、その沖合に位置する 8 m ~ 10 m 水深帯では波高が静穏になる過程において、沖向き輸送による岸側からの稚貝補給により、一時的な密度の上昇が認められる。

現地海岸における実際の初期稚貝分布が不明なので、計算値と実測値を比較するときには、個体数そのものではなく変化勾配を見比べることになるが、水深別の減少傾向は実測値のものとはほぼ一致している (Table 3-7)。また、全体における稚貝密度の減少傾向は磯部海岸が勿来海岸より緩やかで漁場の安定性に対する両海岸の特徴をよく反映している。

数値解析により検証された漁場の有効水深や漁場の安定性に対する海底勾配の関係等は福島沿岸だけに当てはまるのではなく、同様な傾向が北海道におけるウバガイ漁場の特性として認められている (林, 1988)。

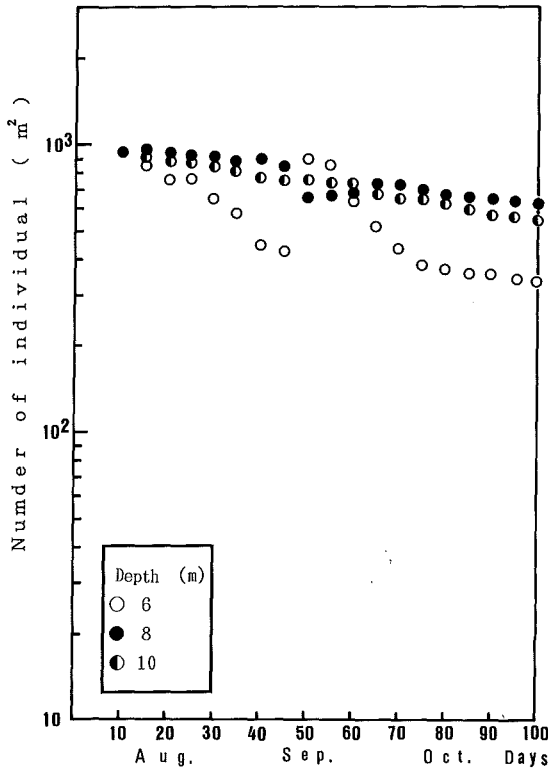


Fig. 3-70(a) Time variations of computed shell density at each depth in the Isobe coast.

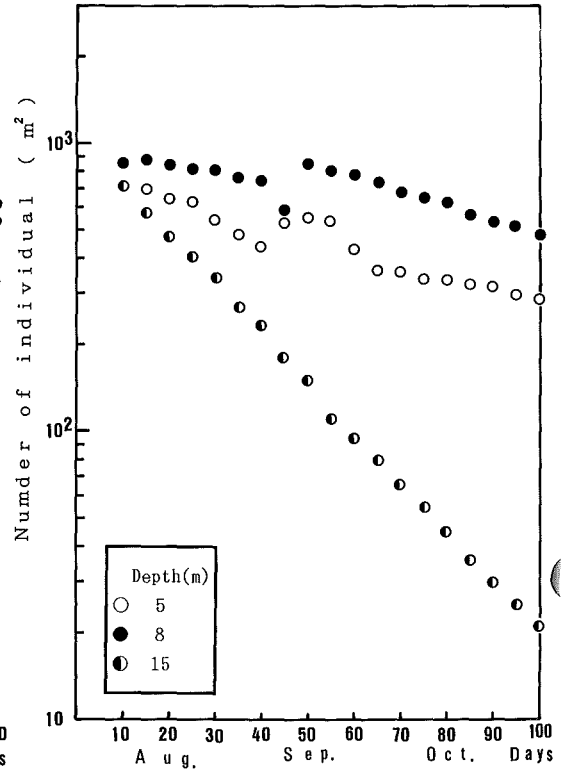


Fig. 3-70(b) Time variations of computed shell density at each depth in the Nakoso coast.

Table 3 - 7 Comparison between computed and observed decreasing rate of shell density at each depth zones.

Coast \ Depth (m)		5	8~10	12~15
Isobe	Observed ¹⁾	$2.7 \cdot 10^{-2}$	$4.5 \cdot 10^{-3}$	$6.6 \cdot 10^{-3}$
	Computed	$1.0 \cdot 10^{-2}$	$5.5 \cdot 10^{-3}$	—
Nakoso	Observed ²⁾	$2.5 \cdot 10^{-2}$	$1.6 \cdot 10^{-2}$	—
	Computed	$1.4 \cdot 10^{-2}$	$1.2 \cdot 10^{-2}$	$3.7 \cdot 10^{-2}$

1) Fukushima Pref. Fisf. Exp. Stn. 29 Aug. - 15 Oct. 1988

2) " 30 Sep. - 28 Nov. 1988

Sampling was made at a station with a $0.1m^2$ Smith-McIntyre bottom sampler.

3. 5 モデルの応用

現在、ウバガイ資源の安定化に向けて漁業管理が行なわれているが、これとは別に人工種苗放流による資源添加事業が並列して実施されている。

人工種苗についての放流技術の内、種苗生産と中間育成に関する技術的諸問題はある程度まで改善されたといえるが、放流種苗の高い生残率を達成するための放流条件（適正な放流サイズ、放流場所、時期）については科学的な裏付けが殆どなされておらず、放流種苗の資源添加量を予測するに至っていない。

本研究では新しい視点から、数値的に漁場診断を行なえる資源動態モデルを開発し、ウバガイ稚貝の資源的安定度が波による稚貝の岸沖輸送と底質分布に強く結びついていることを明らかにした。

同モデルを応用することにより、自然の状態では天然資源についての漁場形成がみられない海岸でも、海岸工学に関する実測値をもとにしたケーススタディーから、適正な人工種苗の放流条件を見つけ出すことによって、その移殖効果が期待される。

3. 6 要 約

- I 波による稚貝の岸沖輸送量について資源動態方程式を構成し、その数値シミュレーションを実施することにより、ウバガイの漁場形成機構に関する仮説の検証をおこなった。
- II 資源動態モデルの概要は次の通りである。
 浅海砂浜帯に進入してきた波は漂砂現象をもたらし底面に砂漣を形成する。そして、砂漣の存在と波浪条件、水深、稚貝の大きさにより、稚貝の沖向き、岸向き輸送量が決定される。また、同時に漂砂現象は底質に対して、ソーテング作用をもたらし粒度組成を決定する。そして、底質のシルト含有量は、ウバガイ稚貝の生残率に影響を与える。この二つの作用（波による稚貝の岸沖輸送と底質に依存した稚貝の生残過程）により、稚貝密度分布の時間的変動が逐次計算される（Fig. 3-71）。
- III ウバガイ稚貝は波による輸送によって水深が7 m～8 m付近に集積され、それ以浅は移流効果によって定位することが難しい。
- IV それに対して8 mより深い海域における稚貝の減耗過程は海底勾配の大きさとシルト含有量の分布に支配され、緩勾配海岸では稚貝の分布範囲が急勾配海岸に較べて広いことが実証された。
- V 港内域等を除き一般自然海岸ではシルト含有量も水深の関数として与えられると仮定すれば、着底稚貝の漁場形成は着底後約半年間の波浪出現状況と5 m～10 m水深の海底勾配に依存していることが類推される。

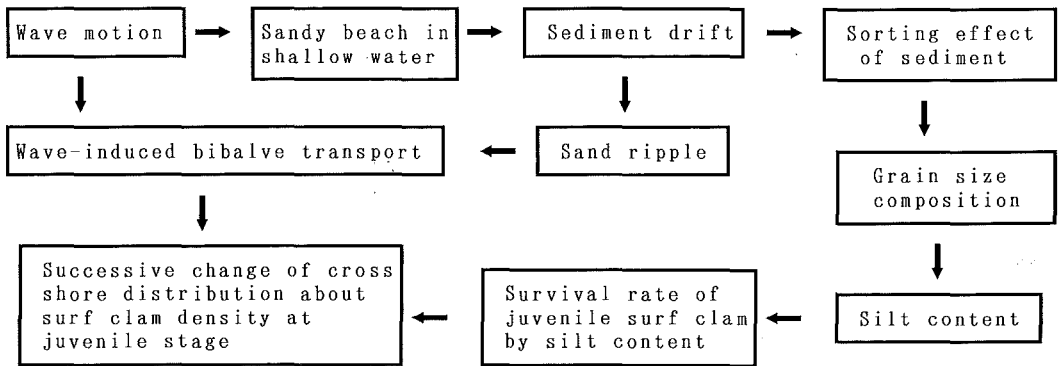


Fig. 3-71 Schematic diagram for the dynamical system of surf clam stock at juvenile stage.

第4章 結 語

第1節 要 旨

本論文では水産生物の生産の場として重要な、水深20m以浅の沿岸域を対象として、沿岸流の時間変動性と構造に関する諸特性、漂砂現象による海底地形変化と底質分布の関係、並びに浅海砂浜域に生息するウバガイの初期生活期の動態をテーマに研究を進めてきたが、ここでその主たる結論を要約する。

第1章 福島沿岸の海岸地形と沿岸流

(1) 福島沿岸の海岸線は約130kmで、ほぼ南北に延びて典型的な外海性海岸である。その沖合は親潮の分枝流や暖水の北上等により複雑な海洋構造に影響され、水産資源にめぐまれた豊饒な海域として、昔から知られている。

以下の論議は離岸約15kmまでの沿岸域に限定する。

(2) 福島沖で観測された、流速変動を解析した結果、夏期を除き3日～4日の長周期流速変動が普遍的に出現する。

流れの主方向は沿岸方向（等深線に平行）で、順圧的な振動流成分が岸を右に見ながら北から南へ伝播している。この長周期流速変動は地形性ロスビー波にあたる陸棚波（Continental shelf wave）に由来するものであることが推定された。

(3) 防波堤周辺でのフロート追跡実験から得られた離岸2kmまでの、浅海域における二次元的流速分布を解析し、沿岸流の岸沖分布構造が対数境界層式に適合することを明らかにした。また、流体力学的バランスを検討した結果、境界層内では、移流項の重要性と流速の減耗に対する海底摩擦効果の重要性が示唆された。

(4) 流速観測記録及び温水拡散分布、染料拡散実験結果から離岸1.0km～1.5kmより岸側に向かって、流速変動の標準偏差が急激に減衰することや、汀線部から放流された温排水の岸沖分布がこの範囲に留まり、縁辺部にフロントを形成する沿岸エンタラップ現象を確認した。

そして、沿岸流速値の減衰する範囲に相当する沿岸流境界層（Coastal boundary layer）では流速のシア効果により沿岸方向の分散（dispersion）が強調され、福島沿岸のような開放性海岸でも境界層内に分布する魚卵稚仔、プランクトン、浮遊幼生等が沖へ逸散することを防止する働きがある。

第2章 沿岸域における底面環境特性

(1) 電導度砂面計と波高計の短期的な同時観測を行い、水深10mの浅海底では有義波高が1mをこえると、浮遊漂砂による浸食が始まり、静穏状態にもどる過程で浮遊砂の沈降堆積作用によって、元の地盤位置に回復する漂砂現象が観測された。そして、同地点でのコアサンプルの分析により、底質の垂直分布には漂砂変動によると思われる表面から20cm～30cmの範囲で底質の均一な混合層が認められた。一方、マクロベントスの出現分布は底質とは違い、表層の数cmだけに集中している。

(2) 長期間にわたる深浅測量記録から、磯部、新舞子、勿来海岸での水深分布の時間的変化を解析し、主に岸沖方向における平均水深、水深変動幅、底質のシルト含有率についての相互関係を明らかにした。また、水深変動幅の大きい領域は離岸約400m、水深では4m～6mまでに限定され、この中でも特にバーやトラフの出現する付近が顕著であり、ここでは明確な岸沖漂砂現象が確認された。これより、沖の領域では水深変動幅は暫時小さくなり、岸側での岸沖漂砂

変動とは独立した変動様式が現われている。

第3章 沿岸域におけるウバガイの初期生活史

- (1) 沿岸流境界層の砂浜域に生息する重要水産資源の中で、ウバガイを研究対象に選び、長期にわたる資源調査結果より資源生態特性を解析し、同種の不安定な資源変動性の原因が浮遊期及び着底後の初期稚貝期の減耗過程に由来していることを明らかにした。また、ウバガイの漁場形成に関連する地理的条件及び、底質条件について、仮説を示した。さらに、稚貝成長にともなう殻長、湿重量、比重、沈降速度等の変化や稚貝の潜砂深度、成長阻害要因についても、各種の実験により求めた。
- (2) 磯部漁場における年次別の推定浮遊時期と沿岸で周年観測されている流速変動記録から、稚貝発生密度が浮遊期間における沿岸流の流速変動の均衡性に関係していることを明らかにした。そして、ウバガイ浮遊幼生の沿岸流による輸送モデルを作成した。大量発生年や不良年の流速変動特性を条件に数値シミュレーションを行い、南向きの平均流速値が小さく、浮遊幼生が産卵漁場から遠く離れた海域に輸送されないことが大量発生の水理学的な必要条件であることを示唆した。
- (3) 浮遊幼生が着底して稚貝として底棲生活に入ってから約半年間における生残過程について、稚貝の成長、波による岸沖輸送及び底質に影響される自然死亡を含んだ資源動態方程式を構成し、資源生態特性、海岸地形と底質分布並びに波浪出現状況等を計算条件にしてウバガイ稚貝分布の時間的変化を数値解析した。この結果、水深5m~10mにおける海底勾配が緩やかな程、稚貝の生残率が良好であることが証明され、第3章第1節で提起した仮説の妥当性が検証された。
- (4) ウバガイ漁場では第3章第2節で示された浮遊幼生の沿岸流による輸送過程を必要条件として、また第3章第3節で示した着底稚貝の波による岸沖輸送過程を十分条件とする外力機構(Fig. 4-1)により、その年の資源発生量が決定されるものと推定される。

第2節 今後の問題点

基礎生産力を基本にした低次の魚類生産システムについては、湖沼、内湾域を対象として、主に数値解析によるエコシステムの解明がひとつの方法論として確立しつつある。

一方、外海性砂浜域におけるベントス系の生産システムについては、同様の試みが殆ど見当たらない。

近年、外海性砂浜域における二枚貝や異体類稚魚の増殖場造成が大型プロジェクトとして企画されているが、構造物の設計や設置後の環境改変等の主にハード面に研究の重点がおかれ、増殖対象種の資源生態特性、特に初期減耗過程とそれに関連した、輸送問題等のソフト面の試験研究が立ち遅れている状況にあるといえる。

本論文では、ウバガイの資源生態特性を土台に、沿岸浅海域の流れ、漂砂、底質分布等の生息環境を背景とした、ウバガイの資源動態モデルを作成し、漁場形成機構について定性的に解明した。

今回提示したモデルをより現実的なものにするためには一般的な殻長組成を取り扱う必要があり、この時には資源動態方程式(第3章第3節、式3)の第2項(成長量)、右辺(自然死亡係数)を殻長別に考慮しなければならない。また、20mm以上の大きい貝まで解析対象とする場合には殻長別の潜砂能力(潜砂速度、砂中での支持力等)及び移動形態を把握することにより、適性な漂貝量パラメータ A_{w1} 、 A_{w2} を評価し、輸送量を算定しなければならない。

さらに、実際の海域では水深分布、波高・流速分布、底質分布、稚貝分布が沿岸方向にも変化していることから、貝の輸送方向も沿岸方向と岸沖方向を含めた二次元的な取り扱いが必要である。

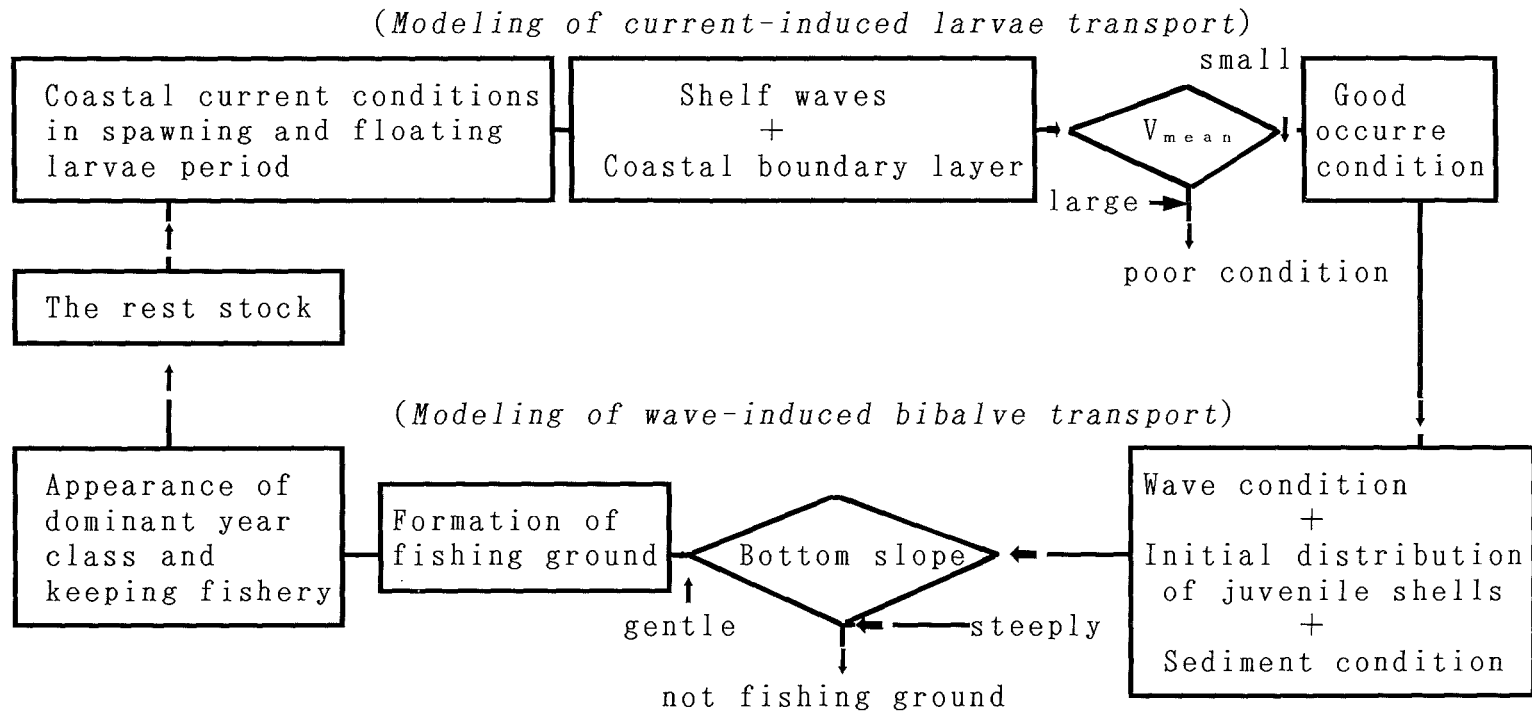


Fig. 4 - 1 Diagram for population dynamics of surf clams.

そして、これらのモデル化により、実際の資源量動態を定量的に予測する計算システムを作成することが今後の重要な課題である。

謝 辞

本論文をまとめるに当たり、東京水産大学水産学部の中村充教授、奥谷喬司教授、平山信夫教授、石野誠教授、松山優治助教授から御指導、御鞭撻並びに御校閲をいただいた。

また、論文を構成する沿岸流に関する研究では、1976年以降6ケ年にわたり、現地観測及び理論的な面で有益な御助言を賜った東京大学理学部の永田豊教授、国立防災センター第二研究部の藤縄幸雄博士、工業技術院公害資源研究所の中田喜三郎氏、東海大学海洋学部の久保田雅久博士に対し心から感謝いたします。

次に海浜流系と漂砂現象に関する研究では、当時東京大学工学部の堀川清司教授（現埼玉大学教授）並びに三村信男助教授（現茨城大学工学部助教授）、I.N.A新土木研究所の佐々木民雄博士には海岸工学の基礎的な理論的解釈から学術文献の提供にいたる全てにわたり御協力と御指導をいただいた。特に三村信男博士にはその後も波による二枚貝の輸送モデルについての共同研究者としての協力はもとより、公私にわたる常に暖かい激励をいただいた。

二枚貝の資源生態研究については、数理資源解析の面について、東京水産大学水産学部の平山信夫教授、生理生態及び種の同定について、同水産学部の奥谷喬司教授にそれぞれ御指導いただいた。

ウバガイ資源量調査では、磯部漁業協同組合並びに相馬原釜漁業協同組合の方々に協力を頂いた。

そして、福島県水産試験場の秋元義正場長には本論文を書く機会を与えて頂いただけでなく、日常の研究業務についても有益な助言を与えられた。また、論文作成に際し、同水試栽培漁業部の石井勇部長と部員並びに臨時職員の皆様には色々と配慮いただいた。

東京電力株式会社と東北電力株式会社並びに㈱三洋水路測量福島支店には現地調査の際や調査資料の提供及び使用許可について数々の便宜を図っていただいた。

以上の方々に紙面をかりて、改めて深く謝意を表する次第である。

参 考 文 献

序 文

- 千葉忠衛・吉田徹三・今井丈夫 (1953) : 福島県沿岸における北寄貝の増殖に関する研究、福島県水産課、pp. 1-14.
- 秋元義正・五十嵐敏 (1980) : ホッキガイの漁獲変動について、福島県水試研報第6号、pp. 31-48.
- 加藤泰久 (1980) : 上磯におけるウバガイ、*Spisula sachalinensis* (Schrenck) の生態学的研究、北海道大学水産学部学位論文、pp. 87-88.
- 佐々木浩一 (1987) : 仙台湾産ウバガイの資源生態学的研究、東北大学農学部学位論文、pp. 129-130.
- 中村 充 (1983) : 4. 増殖場の造成、漁場工学 (水産土木) 入門、水産の研究、緑書房、2巻3号(4)、pp. 62-67.

第 1 章

- 中村義治 (1990) : 開放性浅海域の物理環境、大熊海岸における各種境界層について、水産土木Vol. 26 No.1、pp. 45-60.
- 中村義治・堀川清司・佐々木民雄・藤縄幸雄 (1978) : 大熊海岸における碎波帯内外の流れの特性について、第25回海岸工学講演会論文集、pp. 465-469.
- 中村義治・藤縄幸雄・中田喜三郎・久保田雅久・稲垣正 (1982) : 現地観測に基づいた大熊海域の水理現象に関する研究、- F I N D project 総集編一、福水試調査研究資料No. 177、pp. 1-160.
- 横田 廣 (1989) : 常磐・鹿島灘の海況変動とマイワシ漁況、水産海洋研究集会、Vol. 54 No. 1、pp. 11-14.
- KUNDU, P. K. and J. S. ALLEN (1976) : Some three-dimensional characteristics of low frequency current fluctuations near the Oregon coast, J. Phys. Oceanogr., Vol. 6, pp. 181-199.
- 中村 義治 (1977) : 福島県沿岸の流況解析-III、低周波流速変動の特性、福水試調査研究資料No. 141、pp. 1-24.
- 草野 和之 (1983) : 沿岸と沖合一現象の時間スケールをみなおす一、水産科学、26(2)、pp. 21-35.
- 中田喜三郎・久保田雅久・中村義治 (1978) : 陸棚波に関する研究、昭和53年度通商産業省立地公害局委託報告書、93pp.
- 中村義治・八代守正・松本忠俊・柳内直一 (1981) : コタマガイの生態学的研究方法についての試案、菊多浦の研究、福水試調査研究資料No. 171、pp. 9-24.
- HAMON, B. V. (1962) : The spectrums of mean sea level at Sydney, Coff s Harbor and Lord Howe Island, J. Geophys., Res., 67, pp. 5147-5155.
- ROBINSON, A. R. (1964) : Continental shelf waves and the response of sea level to weather systems, J. Geophys. Res., 69, pp. 367-368.
- CUTCHIN, D. L. and R. L. SMITH (1973) : Continental shelf waves : low frequency variations in sea level and currents over the Oregon continental shelf, J. Phys., Oceanogr., 3(1), pp. 73-82.
- KUNDU, P. K., J. S. ALLEN and R. L. SMITH (1976) : Model decompositions of the velocity field near the Oregon coast, J. Phys. Oceanogr., 6, pp. 181-199.

- REID, R.O. (1958) : Effect of Coriolis force on edge waves. (I) Investigation of the normal modes, *J.Mar.Res.*, 16(2), pp.109-144.
- SHOJI, D. (1961) : On the variations of daily mean sea level along the Japanese Island, *J.Oceanogr.Soc.Japan*, 17(3), pp.141-152.
- ISOZAKI, I. (1968) : An investigation on the variations of sea level due to meteorological disturbance on the coast of Japanese Islands (II), *J.Oceanogr.Soc.Japan*, 24, pp.178-190.
- ISOZAKI, I. (1969) : An investigation on the variations of sea level due to meteorological disturbance on the coast of Japanese Islands (IV), *J.Oceanogr.Soc.Japan*, 25, pp.191-200.
- BUCHWALD, V.T. and J.K.ADAMS (1968) : The propagation of continental shelf waves, *Proc. Roy.Soc.London*, A305, pp.235-250.
- CALDWELL, D.L., D.L.CUTCHIN and M.S.LONGUET-HIGGINS (1972) : Some model experiments on continental shelf waves, *J.Mar.Res.*, 30, pp.39-55.
- KUBOTA, M., K.NAKATA and Y.NAKAMURA (1981) : Continental shelf waves off the Fukushima coast Part I. *Oceanogr.Soc.Japan*, 37, pp.267-278.
- 久保田雅久・中田喜三郎・中村義治 (1978) : 福島沖の低周波流速変動の特性、*海洋科学*、pp.499-508.
- 中田喜三郎・久保田雅久・中村義治 (1977) : 福島沖での低周波流速変動の特性 (II)、昭和52年度日本海洋学会秋季大会講演要旨集
- 福島県温排水管理委員会 (1983) : 昭和53年度温排水調査報告書、pp.64-67.
- BATCHELOR, G.K. (1956) : *J.Fluid Mech.* vol.1, 177.
- 大西行雄 (1975) : スプライン法を用いた2次元補間について、*日本海洋学会誌*、pp.33-37.
- 吉田 耕造 (1974) : 湧昇、*海洋物理学 I*、東京大学出版会、pp.131-155.
- 福島県温排水調査管理委員会 (1983) : 昭和58年度温排水調査報告書、pp.59.
- 福島県水産試験場 (1981) : 温水拡散域におけるエスチャリーの構造と魚群分布調査報告書、pp.46-65.
- 林 銘崇 (1978) : 砕波帯近傍における混合過程に関する研究、*東京大学工学部学位論文*、pp.125-147.

第 2 章

- 中村義治・秋元義正 (1988) : ウバガイ漁場形成に係わる予備的検討、*水産土木* Vol.24 No.2、pp.67-78.
- RICHARD, A.F., and J.M.PARKS (1976) : Marine Geotechnology, Average sediment properties, selected literature and review of consolidation, stability, and bioturbation geotechnical interactions in benthic boundary layer, *The Benthic Boundary Layer*, Plenum Press, N.Y., pp.33-56.
- 福島県水産試験場 (1988) : 昭和63年度地域特産種増殖技術開発事業報告書、pp.1-80.
- 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2号、pp.63-96.
- DINGLER, J.R. and D.L.INMAN (1976) : Wave-formed ripples in nearshore sands, *Abstracts of 15th Coastal Eng.Conf.*, pp.852-855.

第 3 章

- 佐々木浩一 (1987) : 仙台湾産ウバガイの資源生態学的研究、*東北大学農学部学位論文*、pp.1-3.

- 福島県水産試験場 (1983) : 昭和58年度ホッキガイ保護水面調査報告書 福島県におけるホッキガイ資源の増殖について 第18報、福水試調査研究資料 No.189, pp. 1-23.
- 福島県水産試験場 (1984) : 昭和59年度ホッキガイ保護水面調査報告書 福島県におけるホッキガイ資源の増殖について 第19報、福水試調査研究資料No.199, pp. 1-44.
- 福島県水産試験場 (1985) : 昭和60年度ホッキガイ保護水面調査報告書 福島県におけるホッキガイ資源の増殖について 第20報、福水試調査研究資料No.202, pp. 1-33.
- 福島県水産試験場 (1986) : 昭和61年度ホッキガイ保護水面調査報告書 福島県におけるホッキガイ資源の増殖について 第21報、福水試調査研究資料No.207, pp. 1-64.
- 福島県水産試験場 (1987) : 昭和62年度ホッキガイ保護水面調査報告書 福島県におけるホッキガイ資源の増殖について 第22報、福水試調査研究資料No.214, pp. 1-73.
- 福島県水産試験場 (1988) : 昭和63年度ホッキガイ保護水面調査報告書 福島県におけるホッキガイ資源の増殖について 第23報、福水試調査研究資料No.220, pp. 1-59.
- 福島県農政部水産課 (1965~1987) : 福島県海面漁業漁獲高統計.
- 福田英雄 (1976) : 鹿島灘チョウセンハマグリ生態について-1、茨城水試研報, pp. 9-16.
- 小沼洋司 (1976) : コタマガイの成長と大発生年、茨城水試研報, pp. 9-16.
- SASAKI, K. (1987) : Mortality of the Sakhalin surf clam in Sendai bay in the early benthic stage, Nippon Suisan Gakkaishi, pp.193-196.
- (社)北海道栽培漁業振興公社 (1988) : 特定海域沿岸魚場等開発事業推進調査報告書 (資料編)、pp.387-455.
- 天神療・鈴木信 (1987) : 貝類の資源培養技術開発研究報告書、昭和56~60年度総括報告書、福島種苗研報第2号、pp. 1-4.
- STERNBERG, R. W., N. C. SHI and J. P. DOWNING (1984) : Field investigations of suspended sediment transport in the nearshore zone, Coastal Engineering, pp.1782-1798.
- 中村義治・秋元義正・奥谷喬司 (1990) : ウバガイ稚貝の成長量実験、海底面の環境特性とウバガイ稚貝の成長に関する研究-I、水産増殖、38(3)、pp.253-257.
- 中村義治・秋元義正・奥谷喬司 (1990) : ウバガイ飼育現場の底面環境特性、海底面の環境特性とウバガイ稚貝の成長に関する研究-II、水産増殖、38(3)、pp.259-267.
- 中村義治・秋元義正・奥谷喬司 (1990) : ウバガイ稚貝の呼吸量と濾水量測定、海底面の環境特性とウバガイ稚貝の成長に関する研究-III、水産増殖、38(3)、pp.269-274.
- 花岡資・巖俊一 (1972) : 生物の異常発生、共立出版、生態学講座32、pp.85-122.
- 佐々木浩一 (1986) : 仙台湾産ウバガイの資源生態学的研究、東北大学学位論文、pp.49-59.
- 中村 充 (1979) : 第2章 生物と海の環境、水産土木学、INA 工業時事通信社、pp.244-251.
- 上野康弘・山崎幹雄 (1985) : 海流が卵稚仔を運ぶ場合の離岸距離と流速の効果、昭和60年度東北ブロック水産海洋連絡会報、pp.28-33.
- 柳哲雄 (1989) : 拡散・分散、沿岸海洋学、恒星社厚生閣、pp.99.
- (社)北海道栽培漁業振興公社 (1988) : 特定海域沿岸魚場等開発事業推進調査報告書、海岸構造物活用による浅海域開発整備事業推進調査、445pp.
- 林忠彦 (1989) : 天然漁場におけるホッキガイ稚貝の発生、分布、減耗、水産土木 Vol.24 No.2、pp.45-52.
- 遠藤克彦・鈴木 馨・中村義治・鈴木孝夫 (1987) : 浮遊幼生調査、昭和62年度福島県水産試験場事業報告書、pp.202-206.
- HORIKAWA, K. (1988) : Chapter 3 Mechanism of sediment transport, Nearshore Dynamics

- and Coastal Processes, University of Tokyo Press, pp.167-185.
- 堀川清司・渡辺晃 (1967) : 波による砂移動に関する一考察、第13回海岸工学講演会論文集、pp.126-134.
- MADSEN, O.S. and W.D. GRANT (1976) : Quantitative description of sediment transport by waves. Proc. 15th Coastal Eng. Conf., A S C E , pp.1093-1112.
- 金子新 (1980) : 振動流中で形成されるサンド・リップルの成長、第27回海岸工学講演会論文集、pp.207-210.
- 柴山知也・堀川清司・矢吹信喜・半田真一 (1982) : 二次元海浜変形予測手法の実験による検討、第29回海岸工学講演会論文集、pp.249-253.
- SCOTT, T. (1954) : Sand movement by waves, U.S. Army Corps of Engrs., Beach Erosion Board Tech. Memo, No. 48, 37pp.
- 砂村継夫 (1982) : 浅海域の岸沖漂砂量に関する実験的研究、第29回海岸工学講演会論文集、pp.239-243.
- 佐藤慎司・光信紀彦・榎本 裕 (1989) : 重合波浪場における漂砂量の評価法に関する研究、第36回海岸工学論文集、pp.294-298.
- 砂村継夫 (1984) : 岸沖漂砂量算定式、月刊海洋科学、pp.388-393.
- 渡辺晃 (1981) : 海浜流と海浜変形の数值シミュレーション、第28回海岸工学講演会論文集、pp.285-289.
- JONSSON, I.G. (1966) : Wave boundary layers and friction factor, Proc. 10th Coastal Eng. Conf. A S C E, pp.127-148.
- 中村義治・平山信夫・秋元義正 (1989) : 動的モデルによるウバガイ資源変動の解析方法、日本水産学会誌、5 (3)、pp.417-422.
- BEVERTON, R.J. and HOLT, S.J. (1959) : A review of the lifespan and mortality rates of fish in nature, and their relation to growth and other physiological characteristics, Ciba found. Symp. Lifespan Animal, pp.142-177.
- 中村義治・三村信男・秋元義正 (1990) : 波による二枚貝の輸送モデルと漁場形成機構、第37回海岸工学論文集、pp.818-822.
- 土木学会編 (1971) : 水理公式集 (昭和46年改訂版)、pp.198-199.
- 佐藤慎司・美谷邦章・渡辺 晃 (1986) : 不規則振動流下における砂漣形状と漂砂量、第33回海岸工学講演会論文集、pp.228-232.
- 渡辺栄一 (1982) : 波浪によるホッキガイの減耗に関する実験的研究、土木試験所月報、No.351、pp.3-15.
- 利穂吉彦・渡辺晃・堀川清司 (1981) : 二次元海浜変形と岸沖漂砂、第28回海岸工学講演会論文集、pp.217-221.
- 渡辺晃 (1985) : 堀川清司編 海岸環境工学、東京大学出版会、pp.274-280.