

# サンゴ礁造園モデル海域の海水流動特性 —その2. サンゴ礁造園モデル海域内における計測調査—

河野 健<sup>\*1</sup> 工藤 君明<sup>\*1</sup>

沖縄本島南部のサンゴ礁造園モデル海域は知念半島の東に位置し、北部は中城湾、東部南部には島嶼及びバリアリーフが存在する。ここでは、サンゴの移植実験が行われており、この海域の海水交換がどのように行われているのかを明らかにすることは、非常に重要である。

そこで、この海域内において、流れの様子を把握し、今後の計測方針を立てるための観測調査を行ったので報告する。

また、水路やリーフ上で流速を計測したデータおよびサンゴ礁造園モデル海域の底質についても紹介する。

キーワード：サンゴ礁造園，海水交換，観測調査

## The Characteristics of the Flow at the Model Area of the “Coral Reef Project” —PART II. Observation in the Model Area—

Takeshi KAWANO<sup>\*2</sup> Kimiaki KUDO<sup>\*2</sup>

The model area for the sea test of the “Coral Reef Project” is located at the southern Okinawa Island, east of Chinen Peninsula and faces Nakagusuku Bay on the north. The southern and eastern parts of this area are surrounded by a several reefs. We are making an experiment of coral transplantation and estimating the environments for corals, it is necessary to understand how the water exchanges there.

We observed the outline of the flow pattern for future detailed investigations.

In this paper, results of these observations are given and discussed. Measurements of flows in the pass between reefs and on the reef, and the characteristics of the sea bottom sediment are also described.

**Key Word** : Coral Reef Project, water exchange, observation

---

\*1 海洋開発研究部

\*2 Marine Research and Technology Department

## 1 はじめに

沖縄本島南部のサンゴ礁造園モデル海域は、知念半島の東に位置し、北部は中城湾、東部は久高島に接し、南部にはバリアリーフが発達している。ここには、減少したサンゴ礁の回復を人為的に促進する技術を研究開発するため、人工ノルが設置され、近隣のサンゴ礁から採捕されたサンゴ破片の移植実験が行われている。<sup>1)2)3)</sup> この人工ノルを中心とする海域の海水交換がどのように行われているかを明らかにすることは、移植したサンゴの成長にとって非常に重要である。

そこで、サンゴ礁造園モデル海域内の流れの概略を把握するとともに、今後の計測の方針を決定することを目的とした流向・流速を主とした総合的な観測を行った。

また、このサンゴ礁造園モデル海域では、北側の中城湾からの海水の流出入のほかに、東側、南側に存在するバリアリーフを越えての流出入およびバリアリーフ間、リーフと島嶼間の水路からの流出入が考えられ、この海域の海水交換の形態の特徴となっている。

そこで、これらの水路、リーフ上、中城湾との

境界において流向・流速を計測し、その海水流動特性を調査した。また、人工ノルを中心とする海域において底質の調査を行った。

## 2 モデル海域の海水流動特性調査

サンゴ礁造園モデル海域内において、海底地形等から判断して人工ノルへの海水の流入出口として特徴的と思われる点を人工ノルを中心に6点配置し、それぞれの測点において流向・流速を主とする計測を行った。図1のB1～B6に測点を示す。B1～B3は、いずれもいわゆる水路には該当しないが、地形上、水路の延長とみなせるような点である。特に、B2はコマカ島南側水路の延長上に位置し、またB3はヒラビシ水路の延長上に位置する。B4は久高口とよばれる水路で、B5、B6はサンゴ礁造園モデル海域と中城湾との境界に配置されている。

1989年11月3日より29日までの期間、各測点において計測機器を係留して計測を行った。係留系を図2に示す。流向・流速の他に場所によっては濁度、塩分濃度、水深も同時に計測した。本計測の主目的は先に述べたようにサンゴ礁造園モ

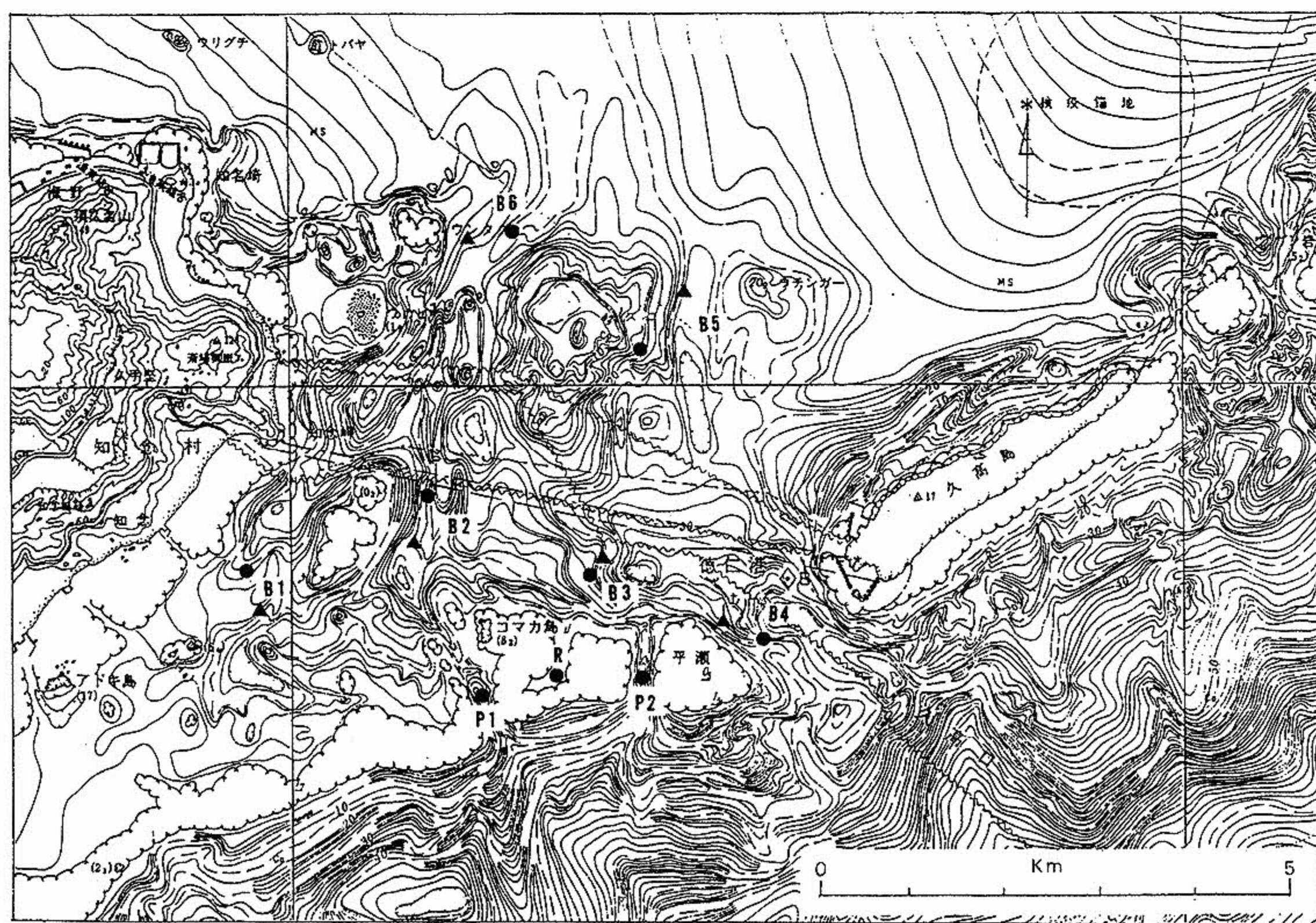


図1 計測地点

Fig.1 Measurement points

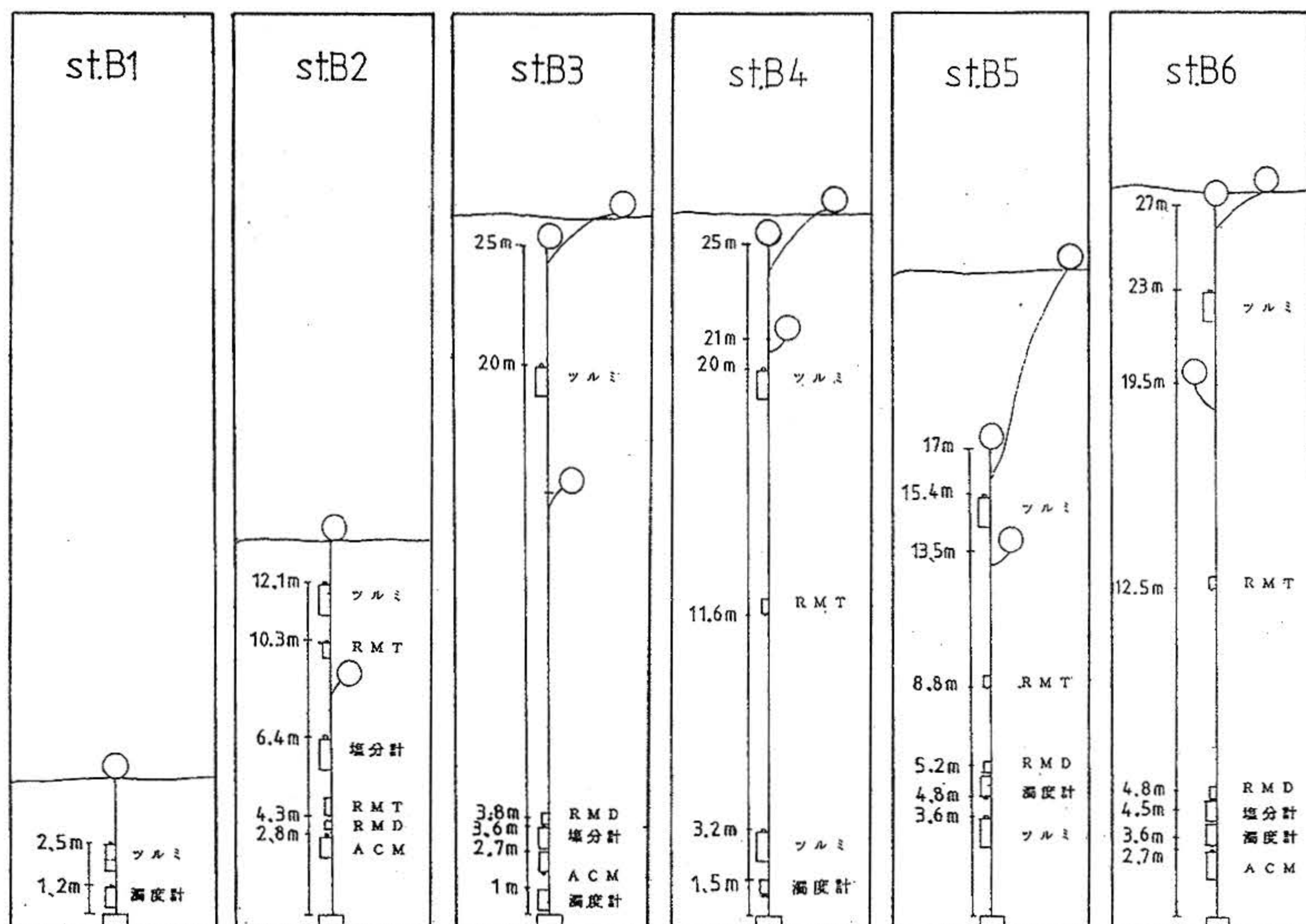


図2 B1~B6における係留系

Fig.2 Description of the Mooring at B1~B6

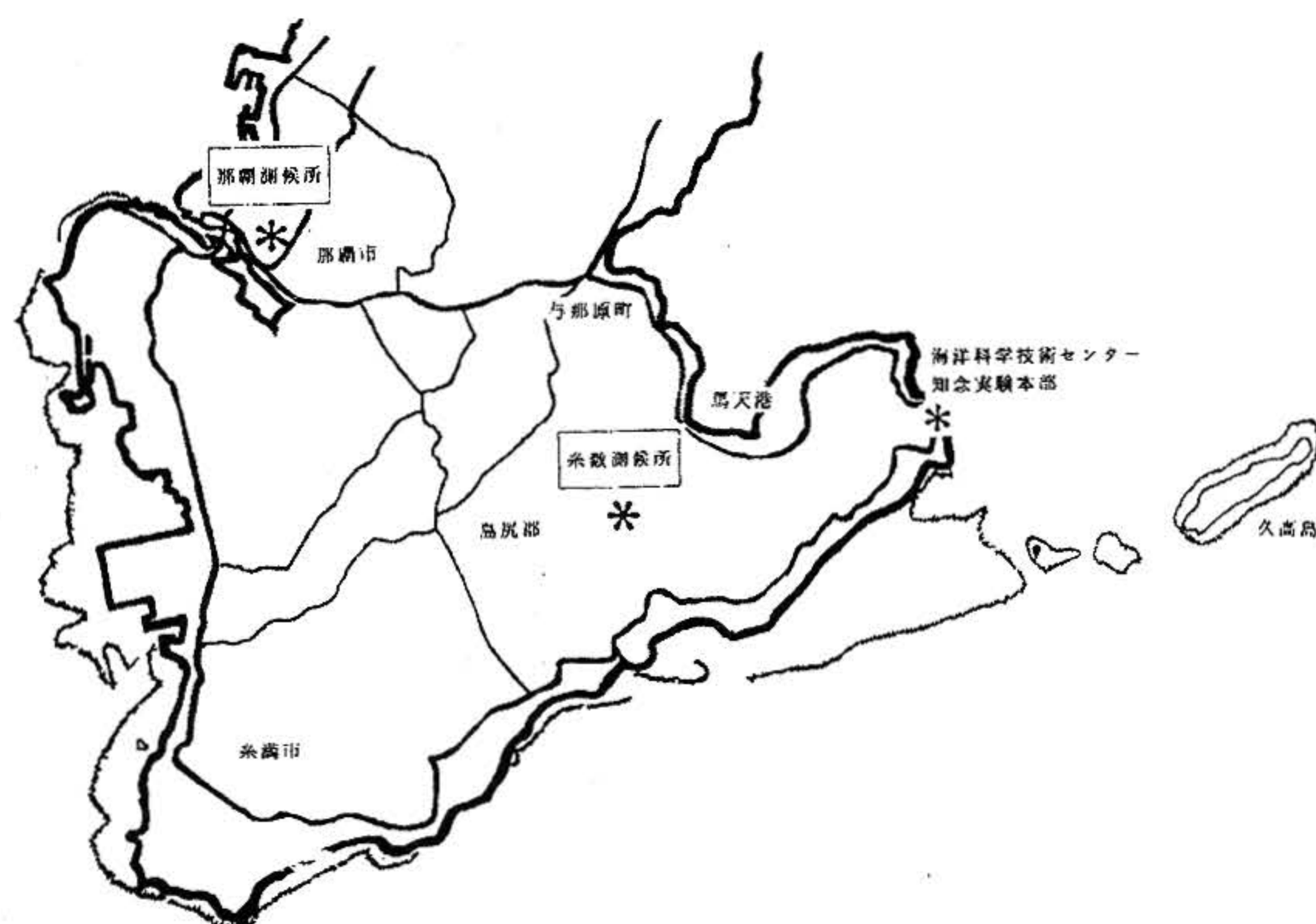


図3 気象観測点

Fig.3 Measurement points for Climate

デル海域内の流れの概略の特徴を調査し、今後の計測の指針の決定に資することであるので、計測期間をあまり長くとおらず、この海域内における恒流等を算出するには至っていないが、いく

つかの重要なポイントが指摘できる。

## 2.1 測定結果

### 2.1.1 背景 (気象状況)

図3に示す那覇および糸数の両測候所における

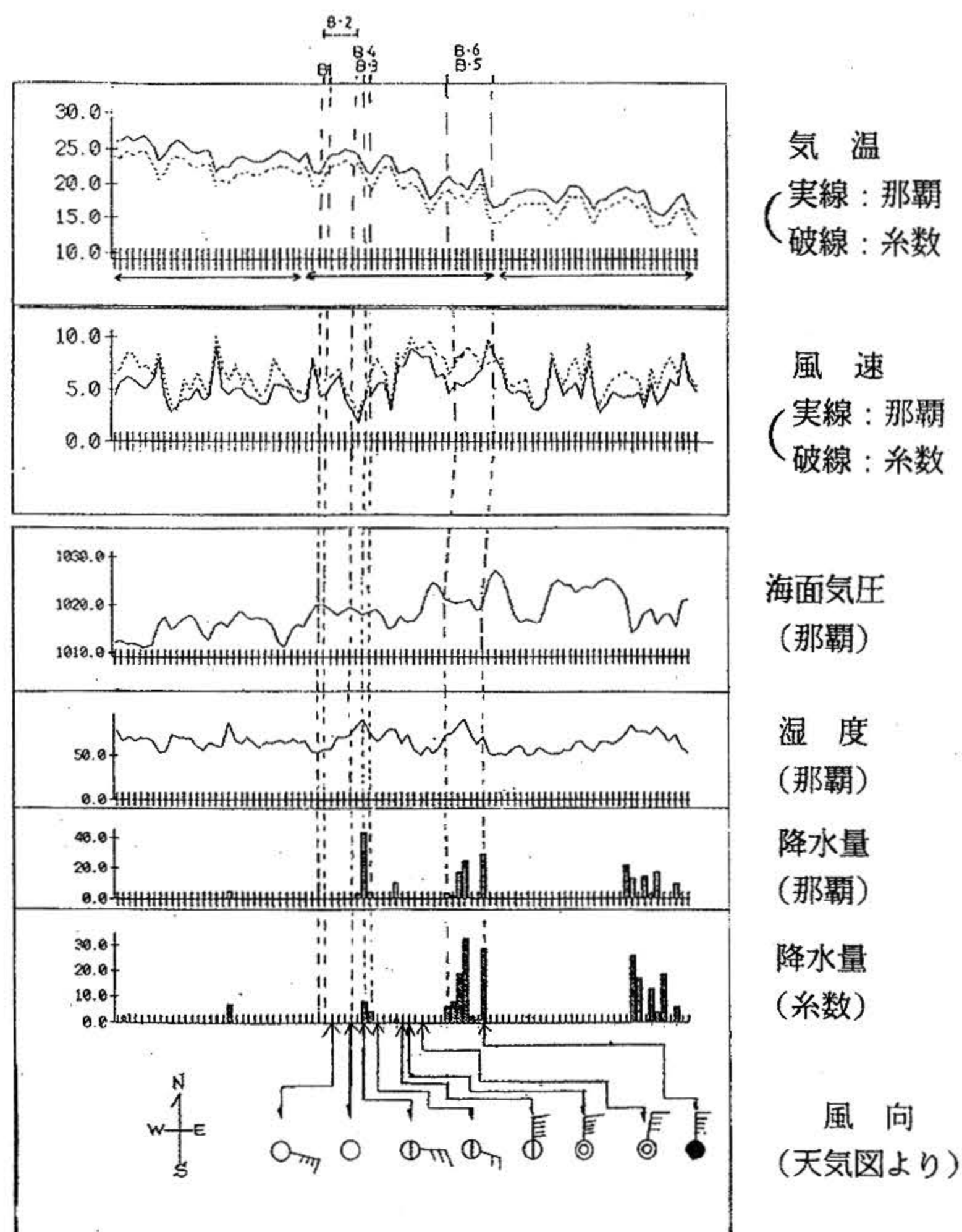


図4 1989年10月～12月の気象

Fig.4 Climate from October to December, 1989

1989年9月から12月の3ヵ月間の気温、風速、海面気圧、降水量の日平均のデータを図4に示す。図4の上部に各測点での計測期間が示してある。これによると、B1～B4の計測時には東風が吹き、また、B5、B6点の計測時には北風が卓越し、顕著な降雨が認められる。これは11月後半よりルソン島を横断した台風30号の影響で、この時期には海も比較的荒れていた。これは、知念実験本部で計測されたデータとも一致している。<sup>3)</sup>

### 2.1.2 各測点における流向・流速の計測結果

各測点における流向・流速の計測結果を図5～図10に示す。水深を同時に計測した場合には、それも併せて記入してある。また、参考のため同時期的那覇、糸数の風向の割合を示している。

#### a) B1点

B1点における流向・流速の計測結果を図5に示す。スティックダイアグラム、流向頻度分布をみると、流向はほぼ北東に向いている。これは風向との関連性はなく、波浪によるとは考えにくい。

#### b) B2点

B2における流向・流速の計測結果を図6に示す。表層近くの流向は風向と関係なく一様に北北東ないし北北西である。また、満潮時に流速が大きくなる傾向が認められる。これに対し、底層においては、流速は小さいものの流向は潮汐によって変化している。即ち、干潮時に南南東流、満潮時には北北東流が卓越するようである。特に干潮時の南南東流は顕著で流向頻度分布図をみると、南南東流の方が卓越していると考えられる。なお、水深が11月5日22時前後に約0.5m深くなっているが、これは係留系を支える中立ブイが水圧でなかば潰れたためである。

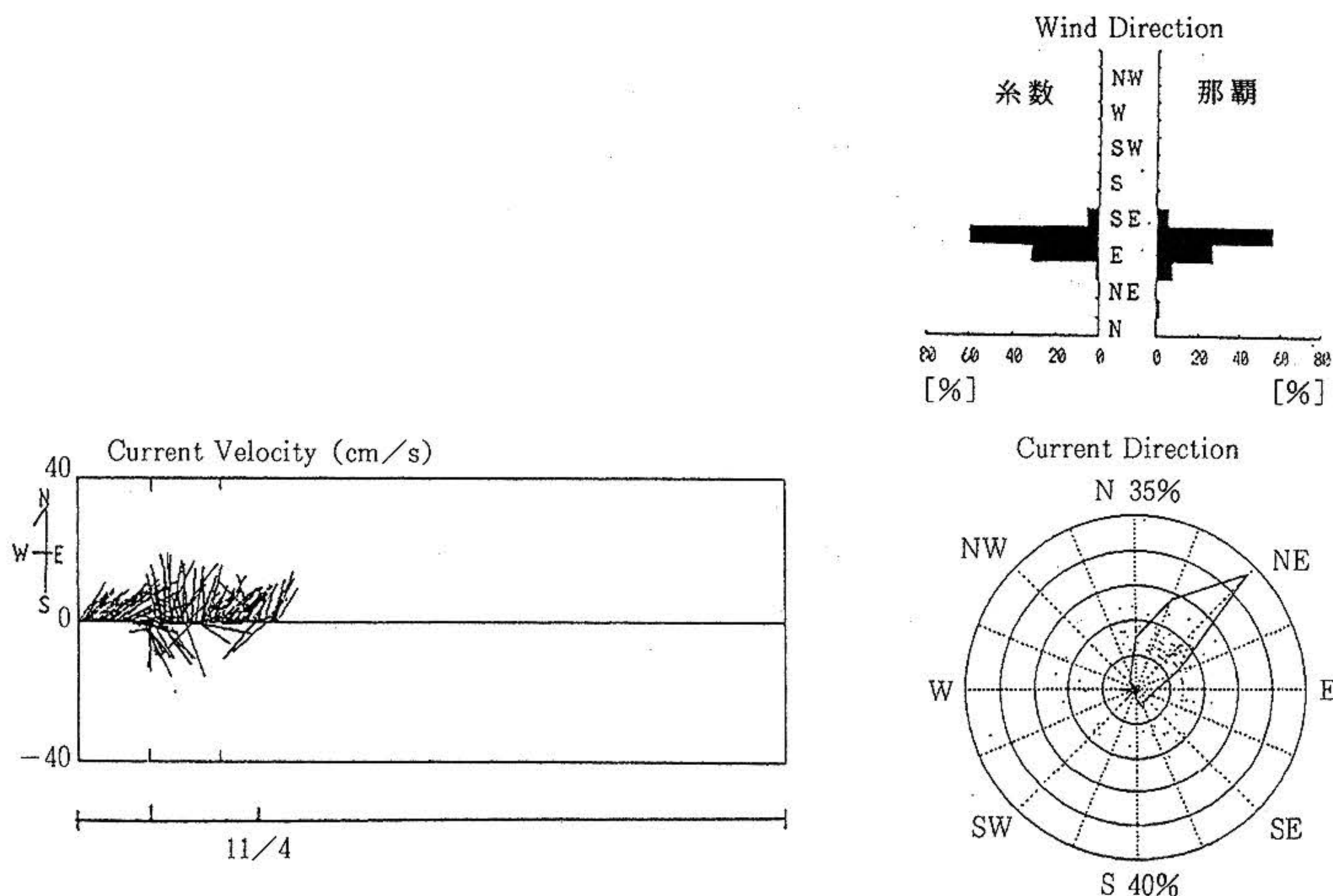


図5 B 1 点における流向・流速と風向

Fig.5 Current velocity, Current direction, and Wind direction at B 1

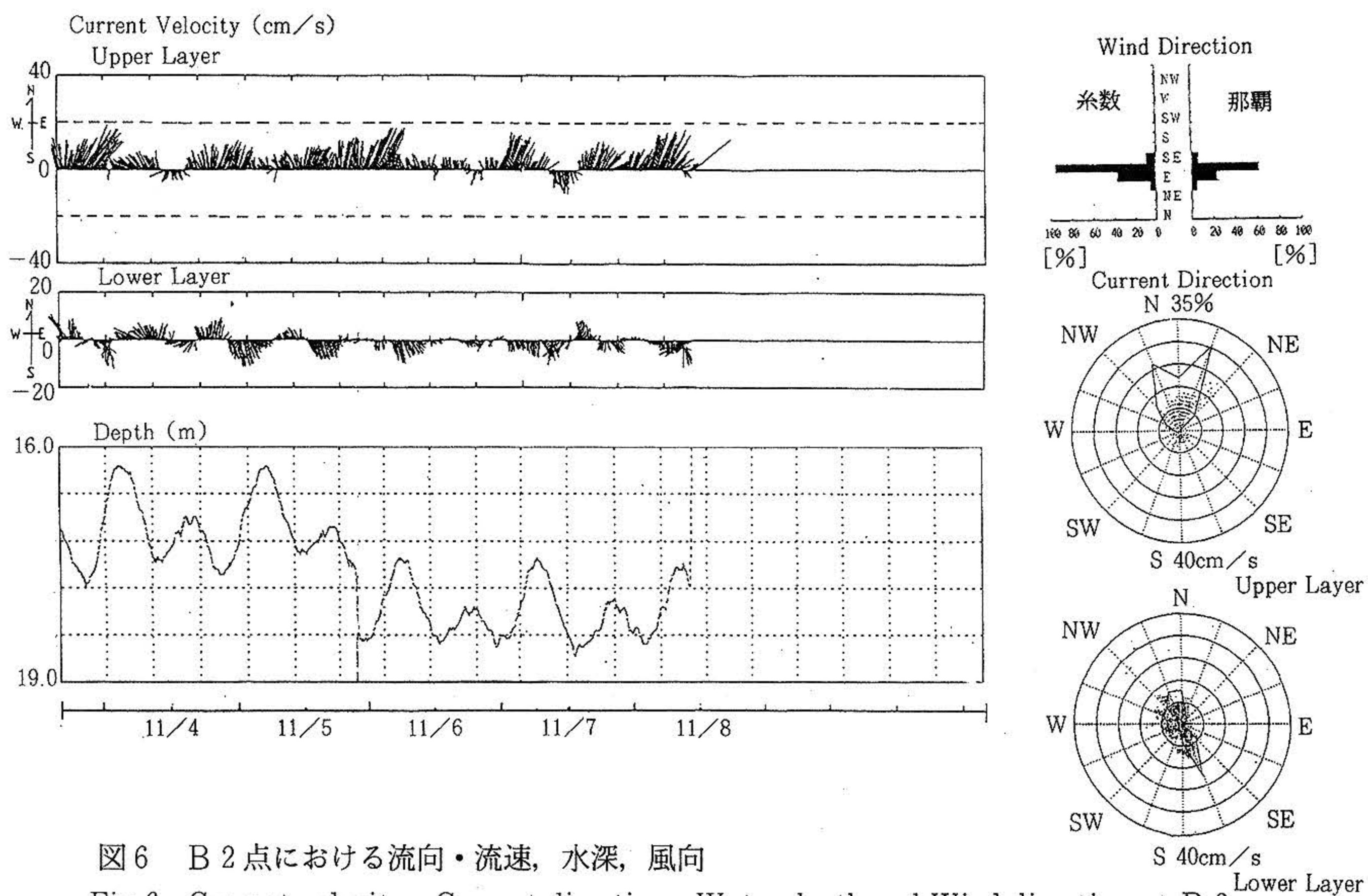


図6 B 2 点における流向・流速, 水深, 風向

Fig.6 Current velocity, Current direction, Water depth and Wind direction at B 2

### c) B 3 点

B 3 点における流向・流速の計測結果を図 7 に示す。表層近くの流速は著しく変化するものの、

強いて言えば東性であり、風向の影響がある可能性もある。底層の流速はやはり小さいが、流向については潮位変化と関連があり、B 2 点とは逆に、

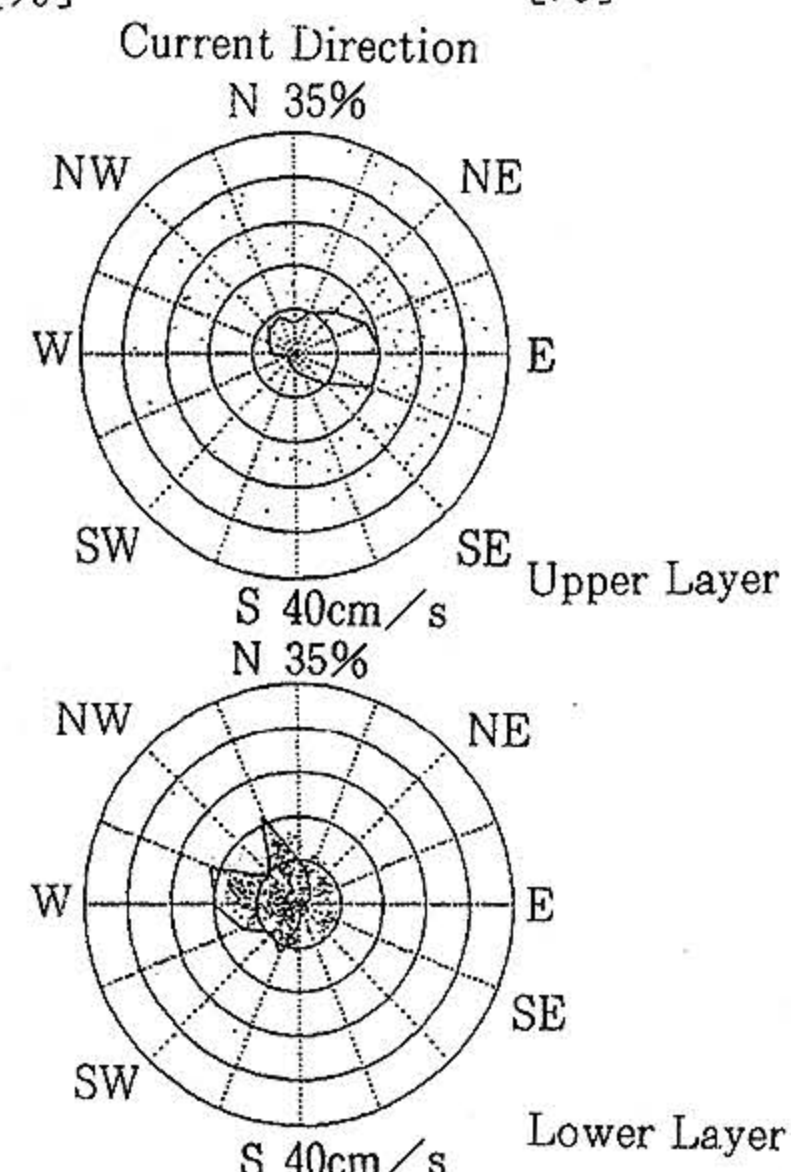
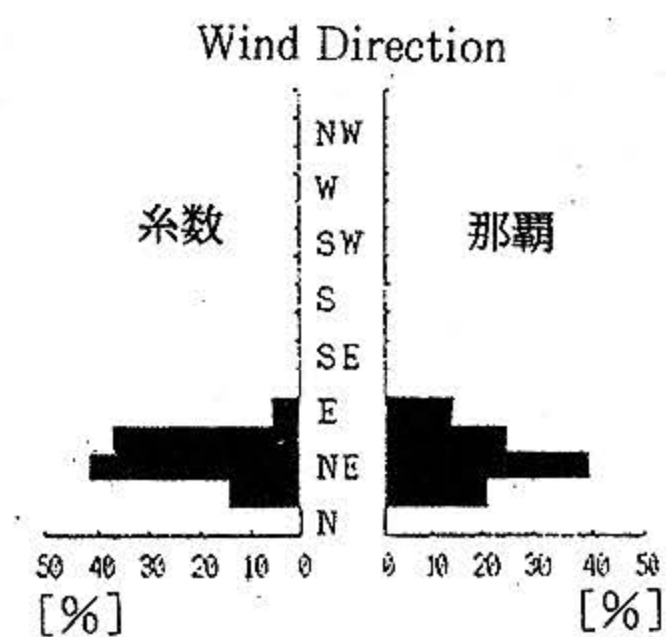
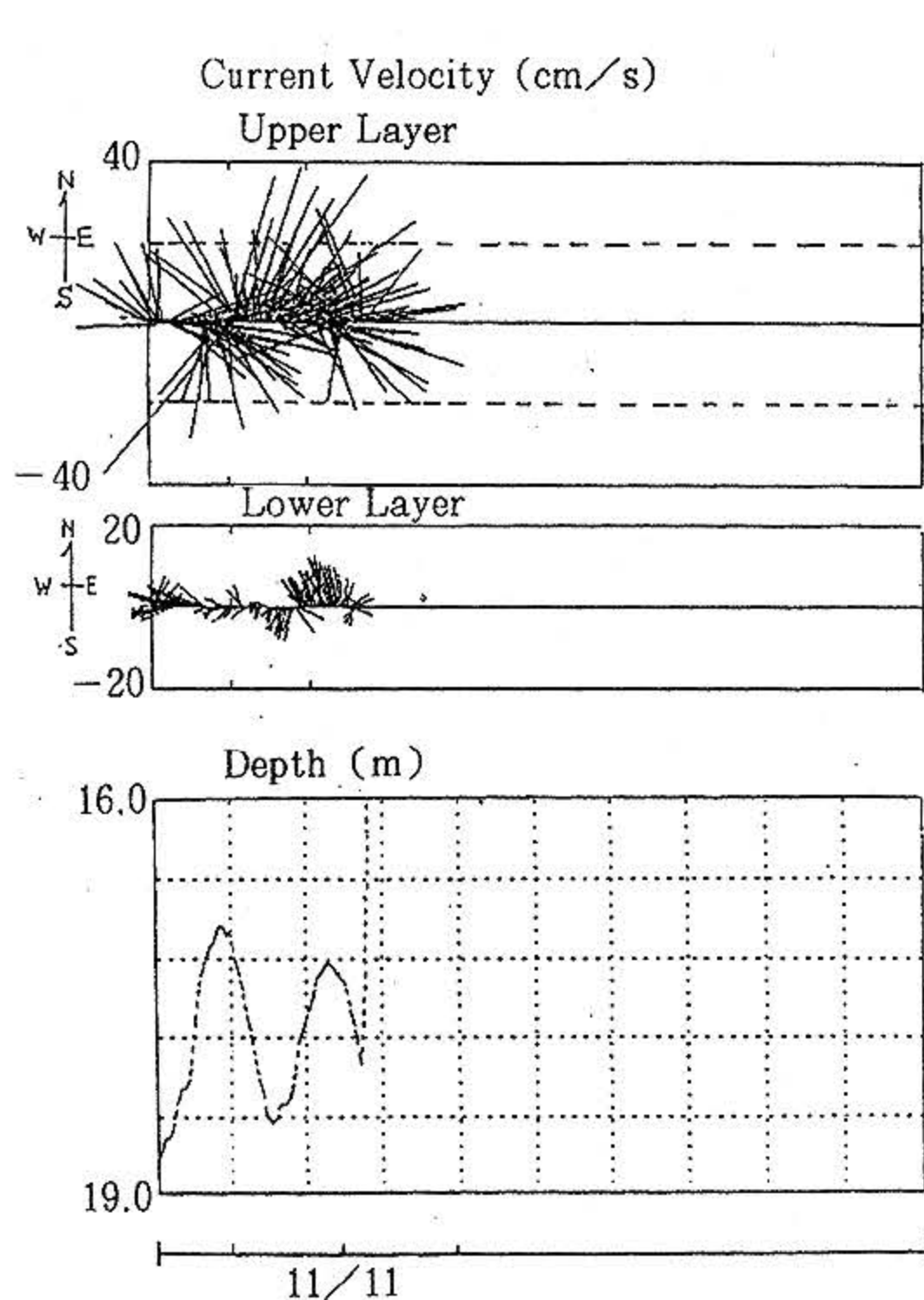


図7 B 3点における流向・流速, 水深, 風向

Fig.7 Current velocity, Current direction, Water depth and Wind direction at B 3

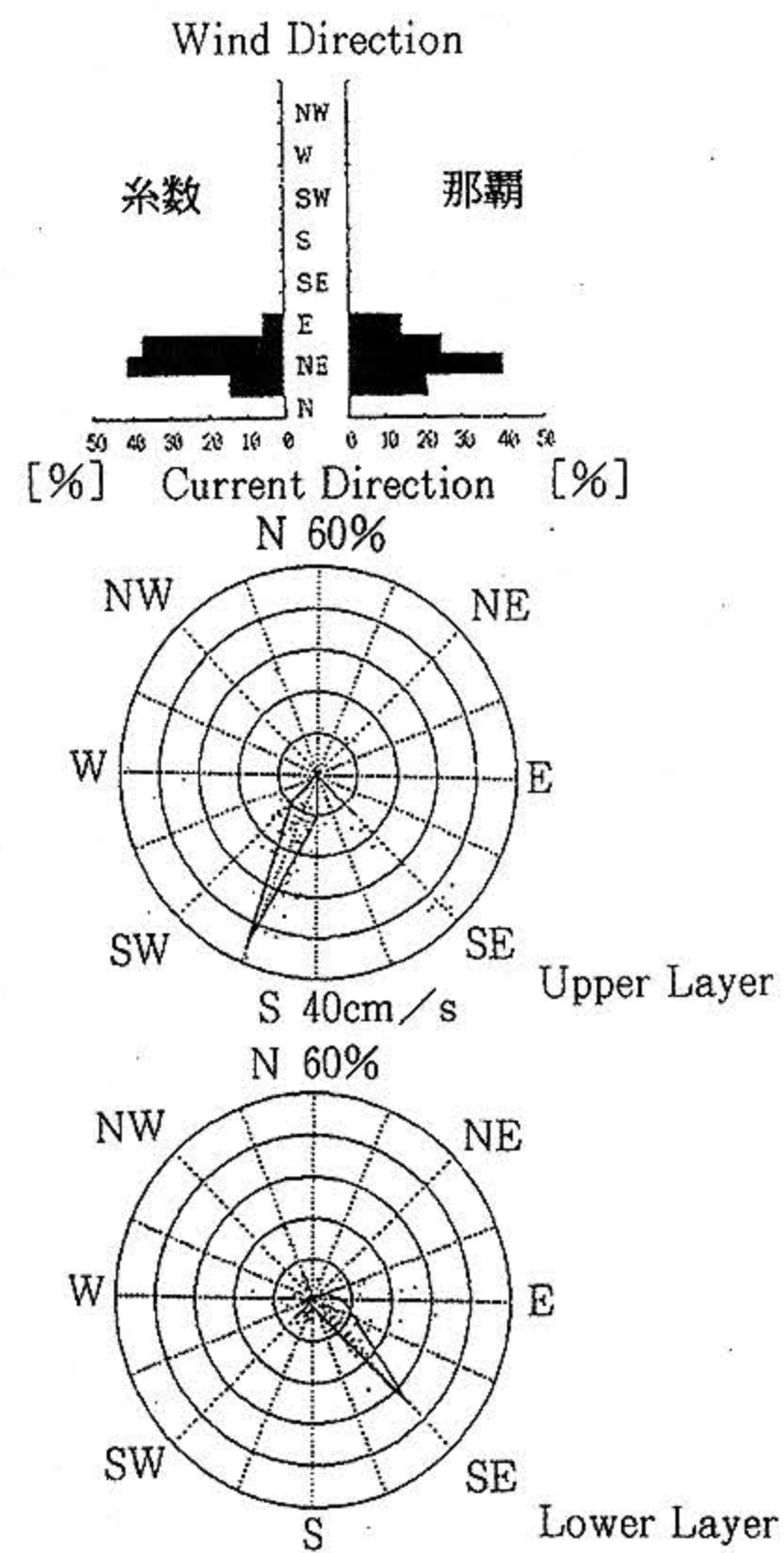
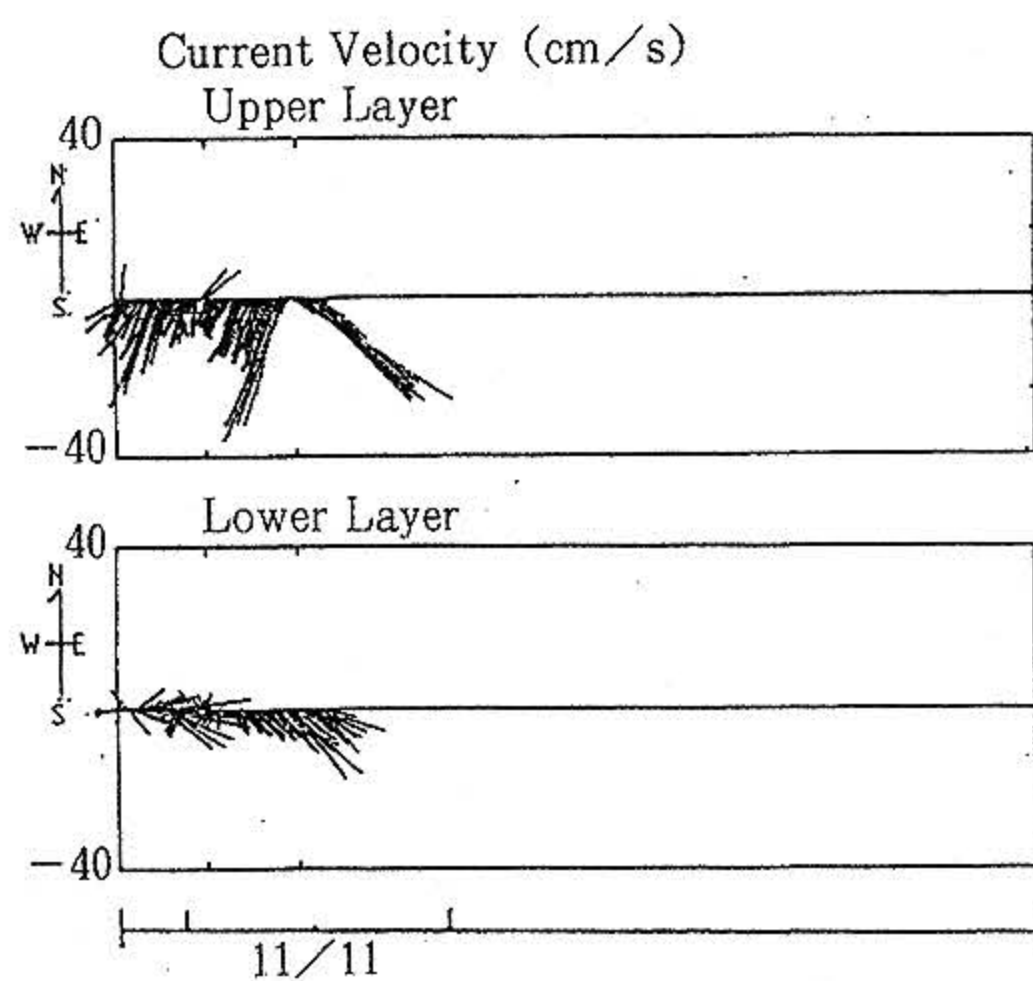


図8 B 4点における流向・流速, 風向

Fig.8 Current velocity, Current direction and Wind direction at B 4

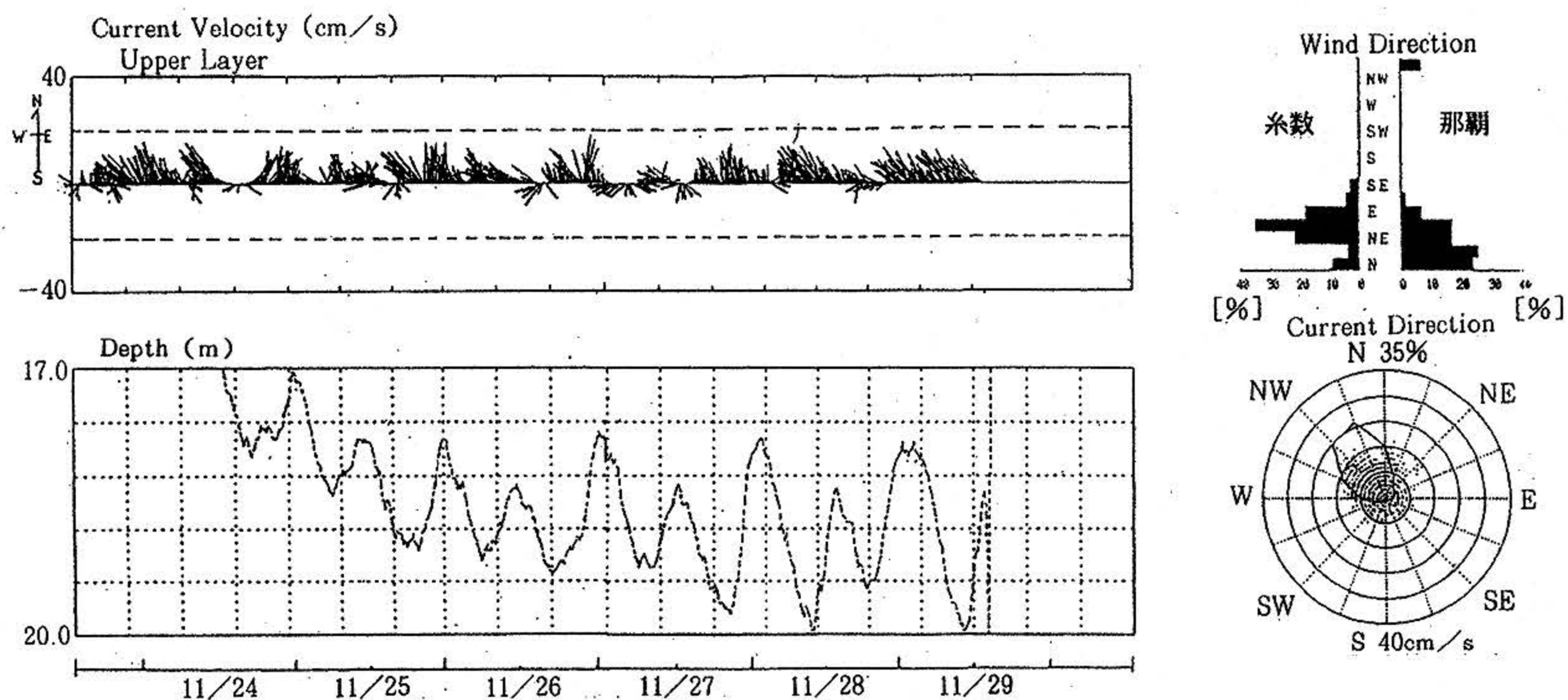


図9 B 5点における流向・流速, 水深, 風向

Fig.9 Current velocity, Current direction, Water depth and Wind direction

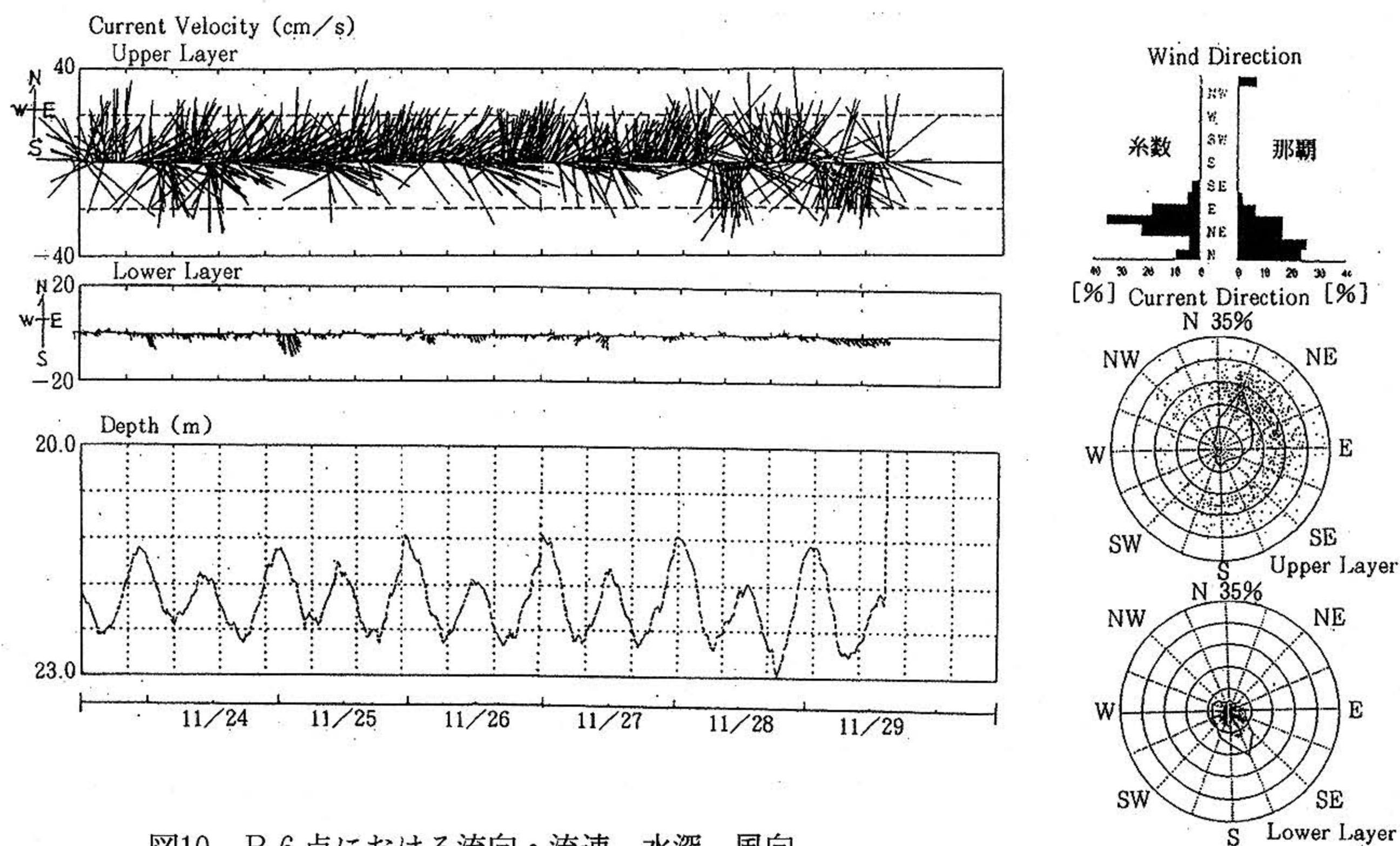


図10 B 6点における流向・流速, 水深, 風向

Fig.10 Current velocity, Current direction, Water depth and Wind direction

干潮時には北北東流となっている。

#### 1) B 4点

B 4点における流向・流速の計測結果を図8に示す。ここでは潮位の測定は行われなかったが、同期間に計測されたB 3点における測定結果を参照すると、表層、底層とも南向きの流れが卓越し、これは潮位によらない。また、風向との関連性も

ない。この測点は久高島と平瀬の間に位置し、中城湾内の海水がこの時期にはもっぱら湾外へ流出していることを示していると考えられる。

#### e) B 5点

B 5点における流向・流速の計測結果を図9に示す。流向流速は表層というよりは中層に近い場所で計測されたが、流速は小さく、流向は干潮時

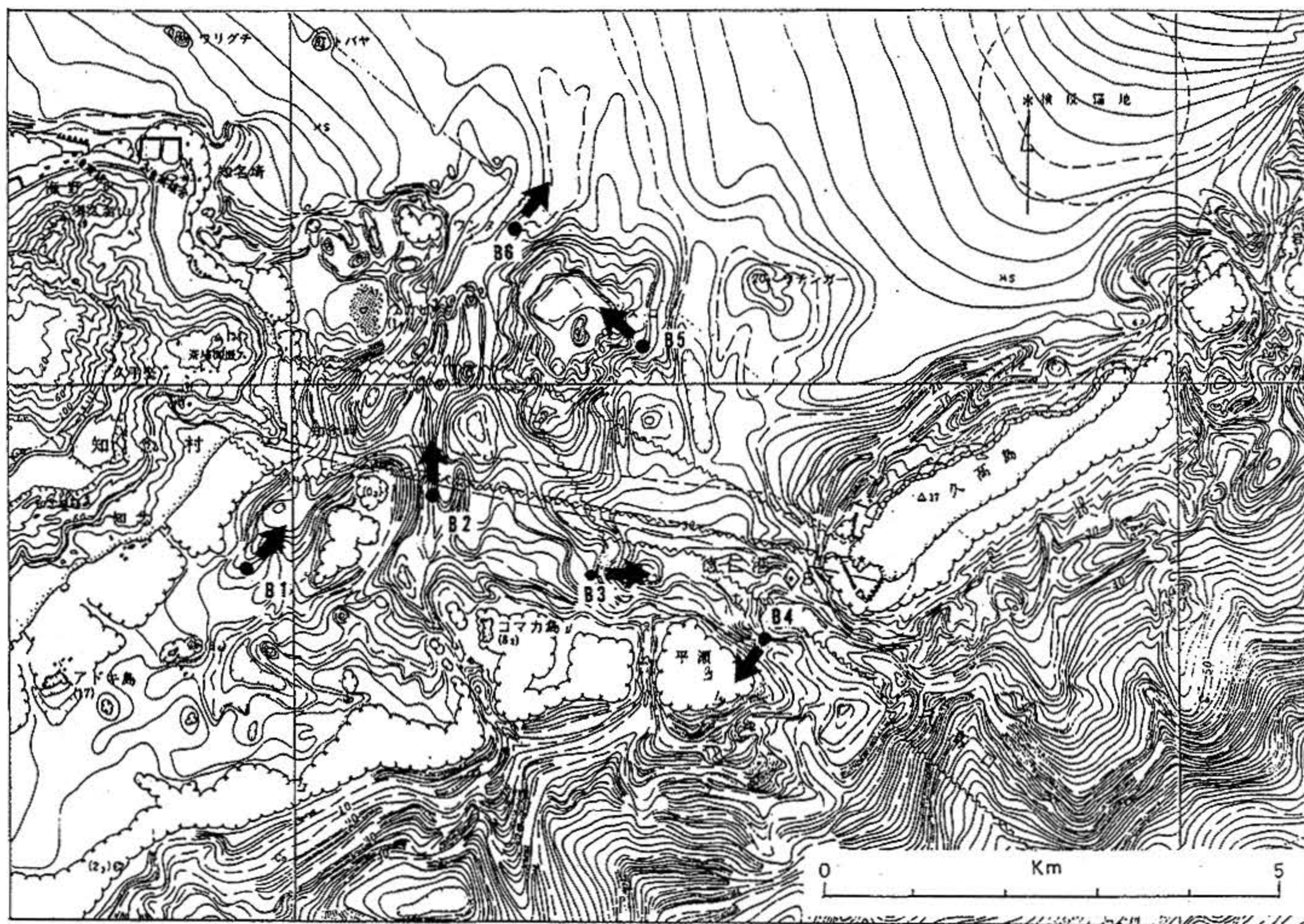


図11 上層における流向

Fig.11 Current direction of Upper layer

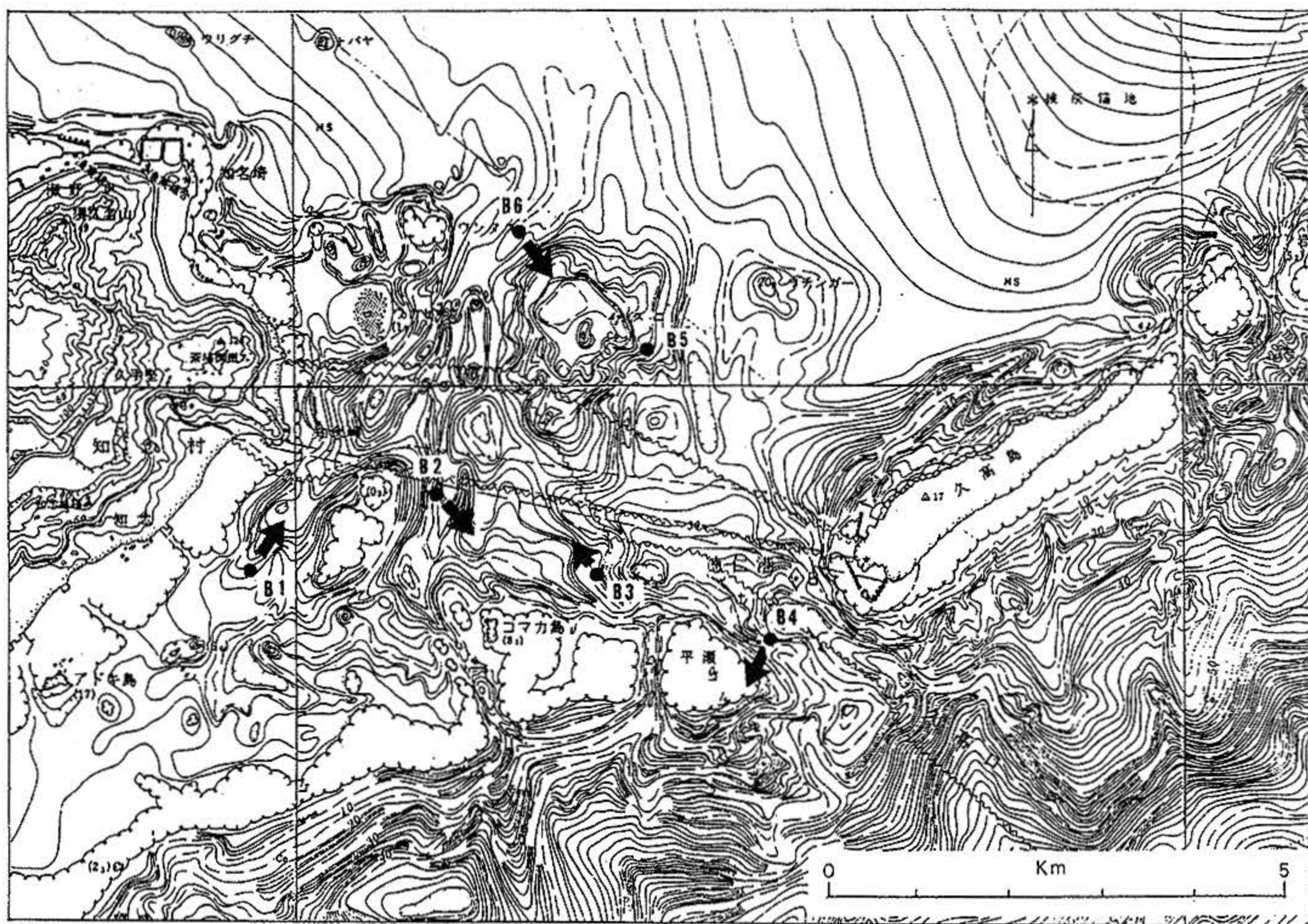


図12 底層における流向

Fig.12 Current direction of Lower layer

に北北西ないし北西性を示し、満潮時には流れが停止する傾向がみられる。設置時より序々に水深が増大しているが、これは、天候の悪化のため係

留系が深い方へ移動させられたためであると考えられる。

f) B 6 点

B 6 点における流向・流速の計測結果を図 10 に示す。表層近くの流速の変化は著しいが、北北東性の傾向をみることが出来る。これは、風向との関連も考えられる。底層においては、流向流速とも変化が微弱で傾向を求めることは難しいが、あえて言えば南東性である。また、表層、底層とも潮位との関連を考えることは難しいが、底層において、満潮時に南南東流が卓越するように見える。

## 2.2 モデル海域内の流向に関する考察

### 2.2.1 表層における流向

図 5 ～ 図 10 に示された流向の頻度分布図をみると、B 1 点では北東性、B 2 点では北北西から北北東性、B 3 点では強いて言うならば東性、B 4 点では南西性、B 5 点では北西性、B 6 点では

北東性の流れが卓越しているという傾向がみられる。これを図示すると図 11 のようになる。この図をみると表層では海水はモデル海域の南側から知念半島に沿うような形で進入し、一つはコマカ島北東方向から久高口へ向かって流出する流れ、もう一つはそのまま北東方向に進み中城湾の中心部へと進む流れの二つに分岐するように思われる。

### 2.2.2 底層における流向

2.2.1 と同様に図 5 ～ 図 10 に示す流向の頻度分布図をみると、B 1 点では、水深が浅いので上層と同じ方向と考えて北東性、B 2 点ではどちらかというと南東性、B 3 点では弱い北西性、B 4 点では南東性、B 5 点は不明であるが、B 6 点は南南東性である。

これを図示すると、図 12 のようになる。

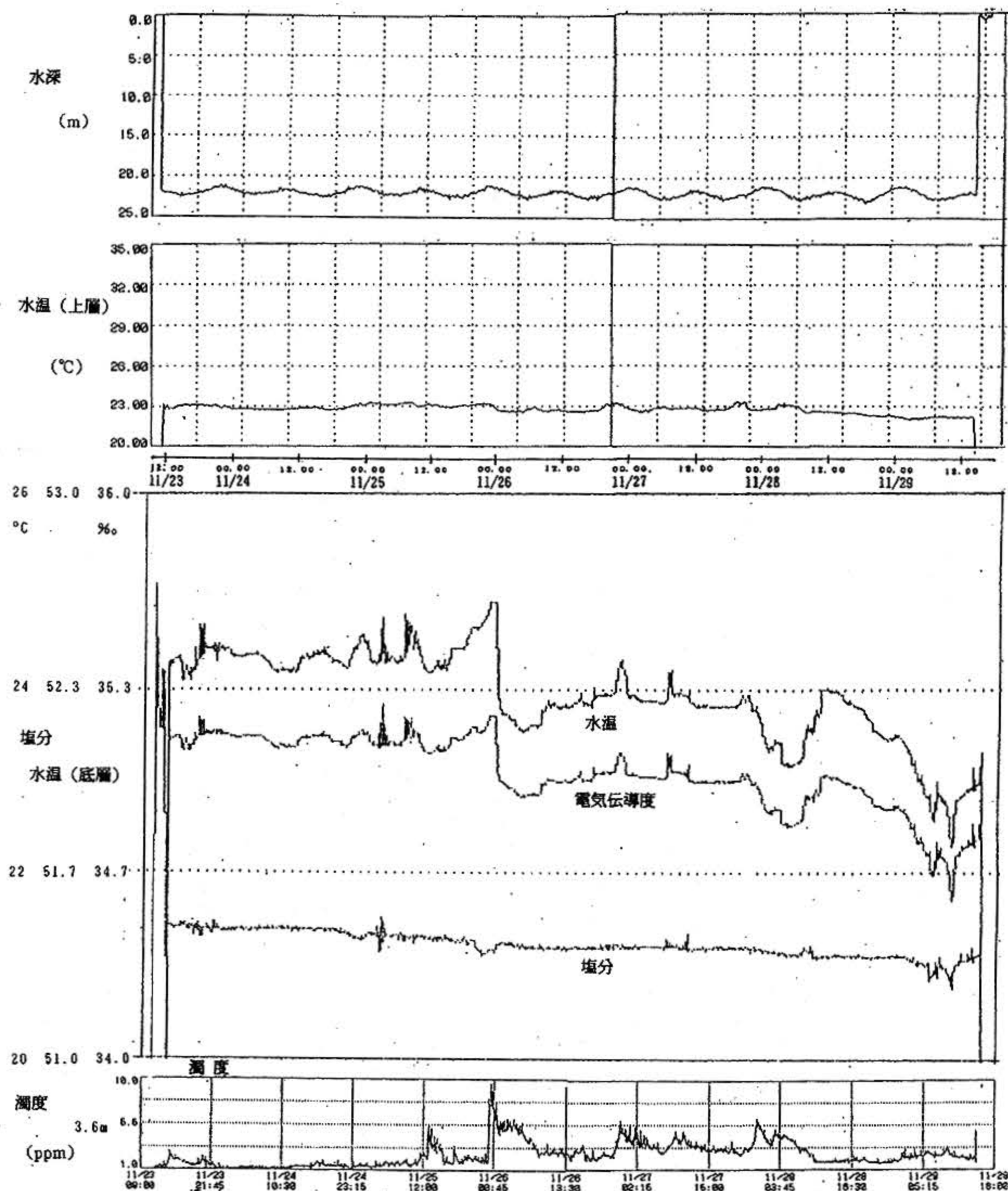


図13 B 6 点における水深、水温、塩分、濁度

Fig.13 Water depth, Water temperature, Salinity and Turbidity at B 6

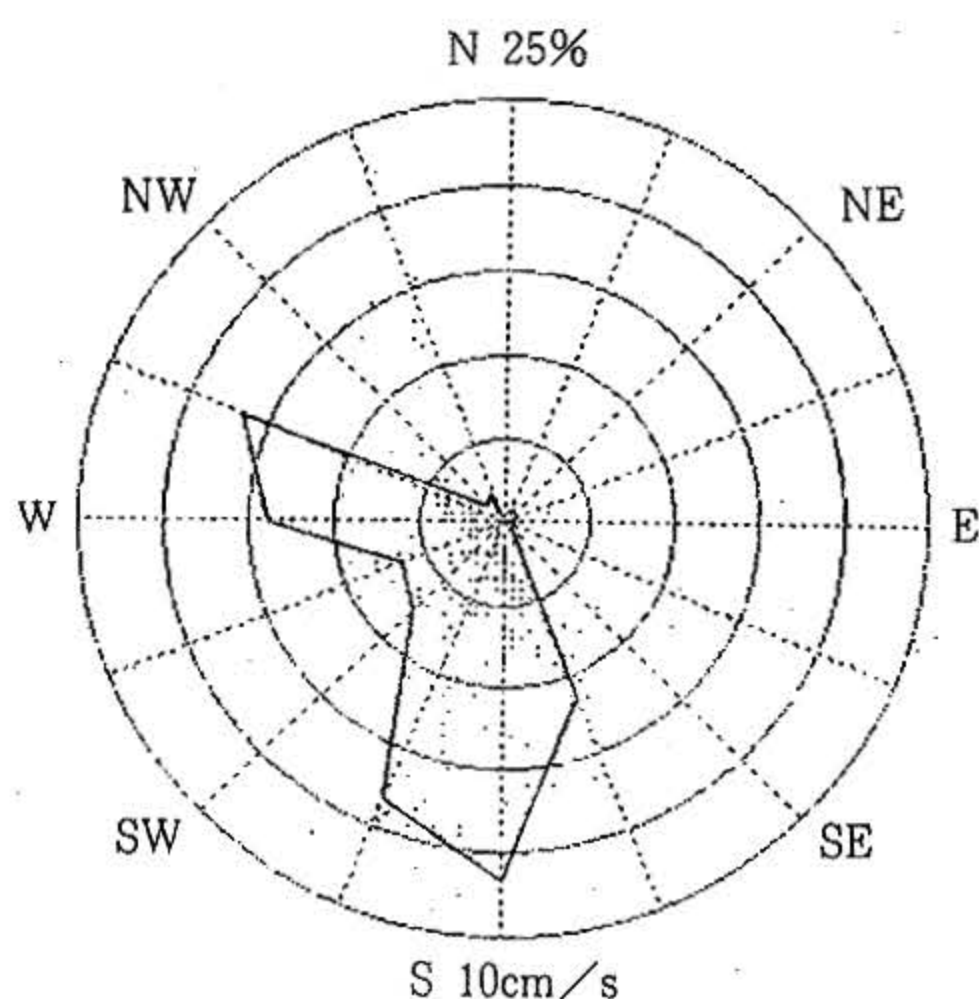
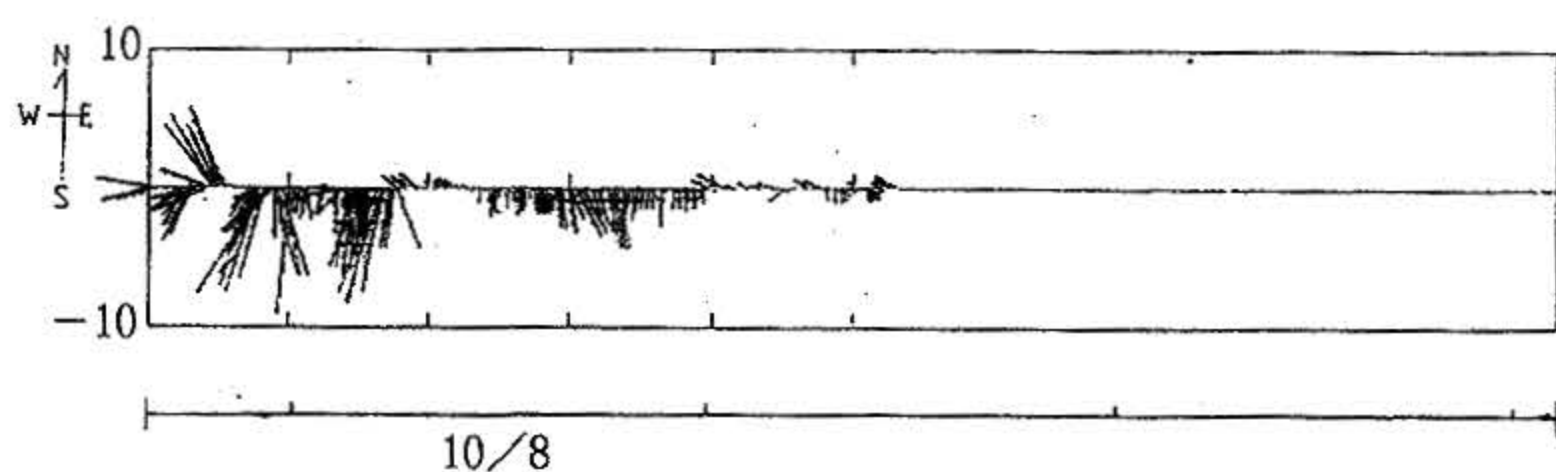


図14 コマカ島南側水路における流向・流速

Fig.14 Current velocity and Current direction at the KOMAKA-Is. pass. (P 1)

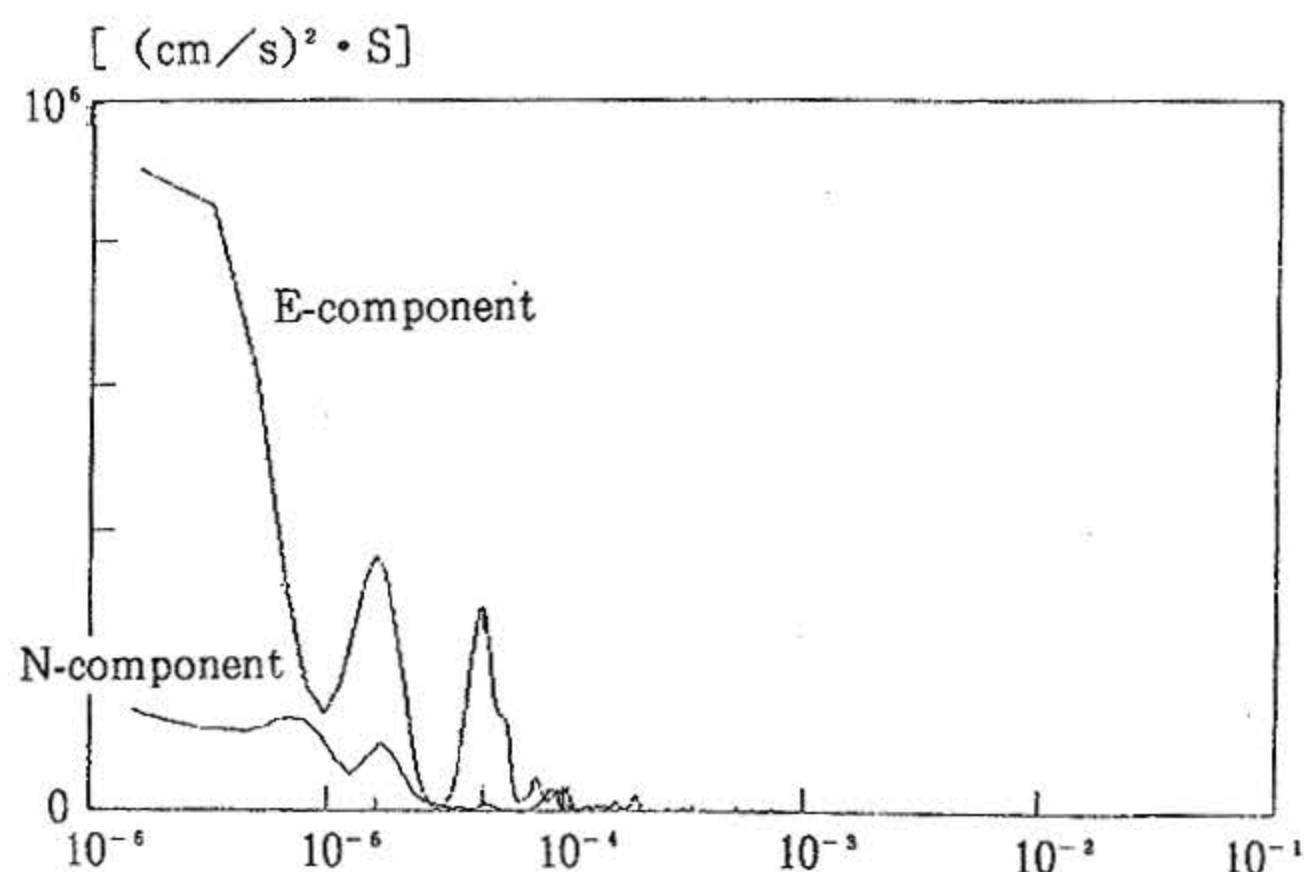


図15 流速スペクトル (コマカ島南側水路)

Fig.15 Current velocity spectra  
(KOMAKA-Is. pass)

これを見ると、流れの様相は表層と著しく異なり、北方向の中城湾中心部から流れが流入し、久高口から流出するように見える。

図13にB 6点における水深、上層の水温、底層の水温、濁度を示す。これをみると、上層にお

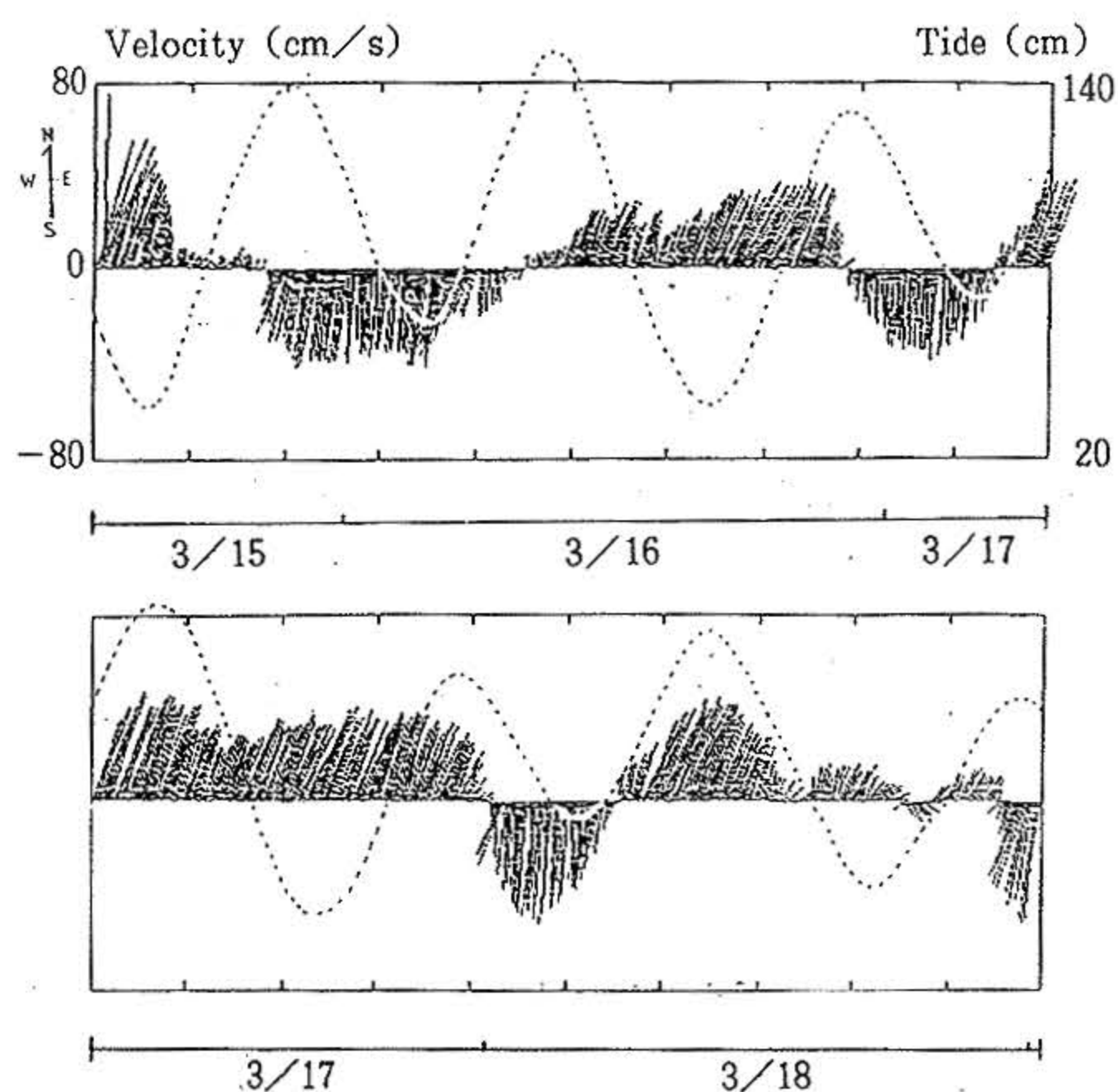


図16(a) ヒラビシ水路 (P 2) における流向・流速と潮位 (1990. 3.15～ 3.22)

Fig.16(a) Current velocity and Tide level  
(HIRABISHI pass. P 2)

いて水温が  $23^{\circ}\text{C}$  と一定であるのに対し、底層では水温に乱れがあり、特に 11 月 26 日に水温が  $15^{\circ}\text{C}$  から  $23.5^{\circ}\text{C}$  まで低下するなど、明らかに上層とは異なる水が南南東に向かって進んできていると考えられる。この時の塩分濃度の変化と考え

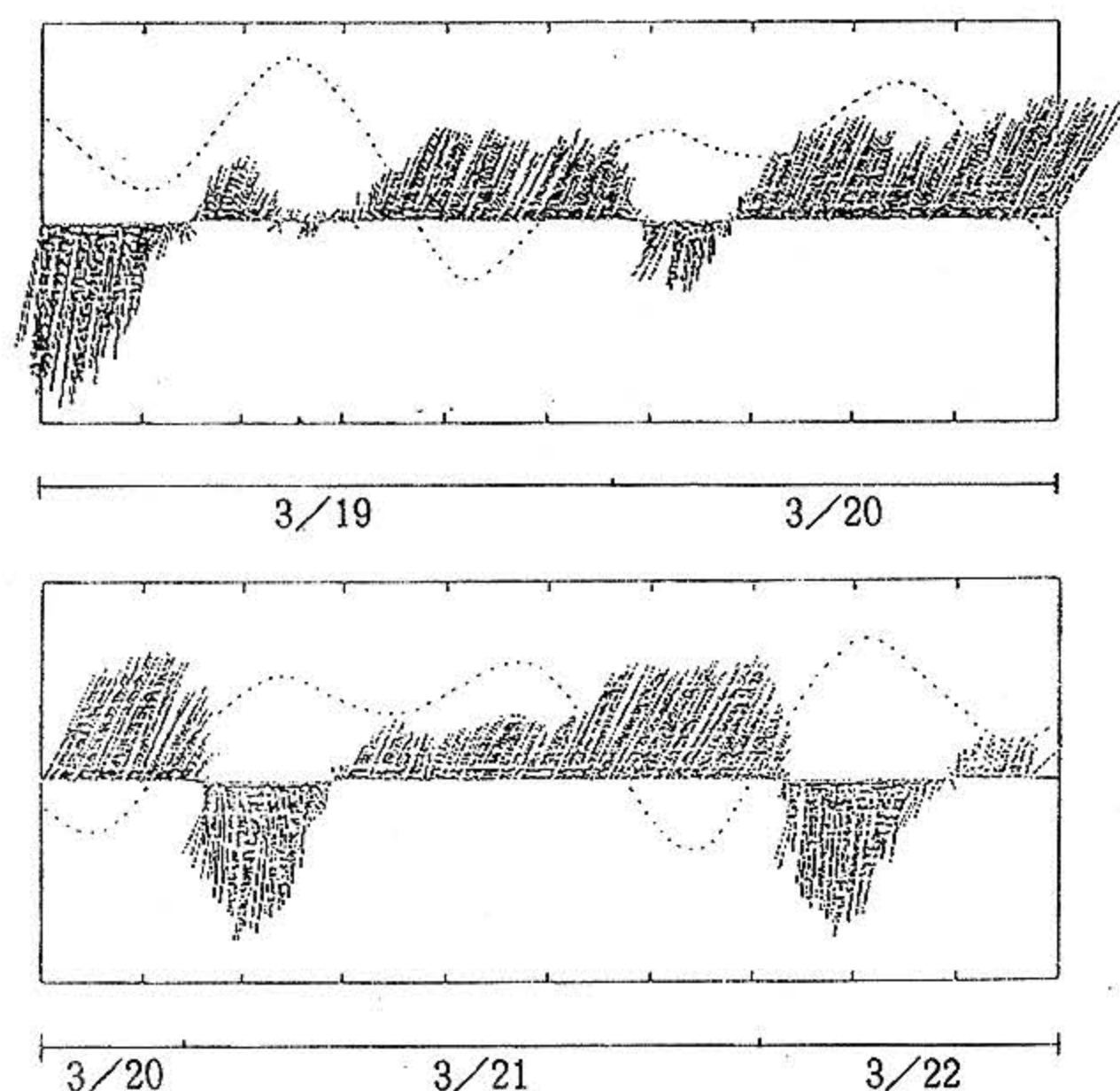


図16(b) ヒラビシ水路 (P 2) における流向・流速と潮位 (1990. 3.15 ~ 3.22)

Fig.16(b) Current velocity and Tide level (HIRABISHI pass. P 2)

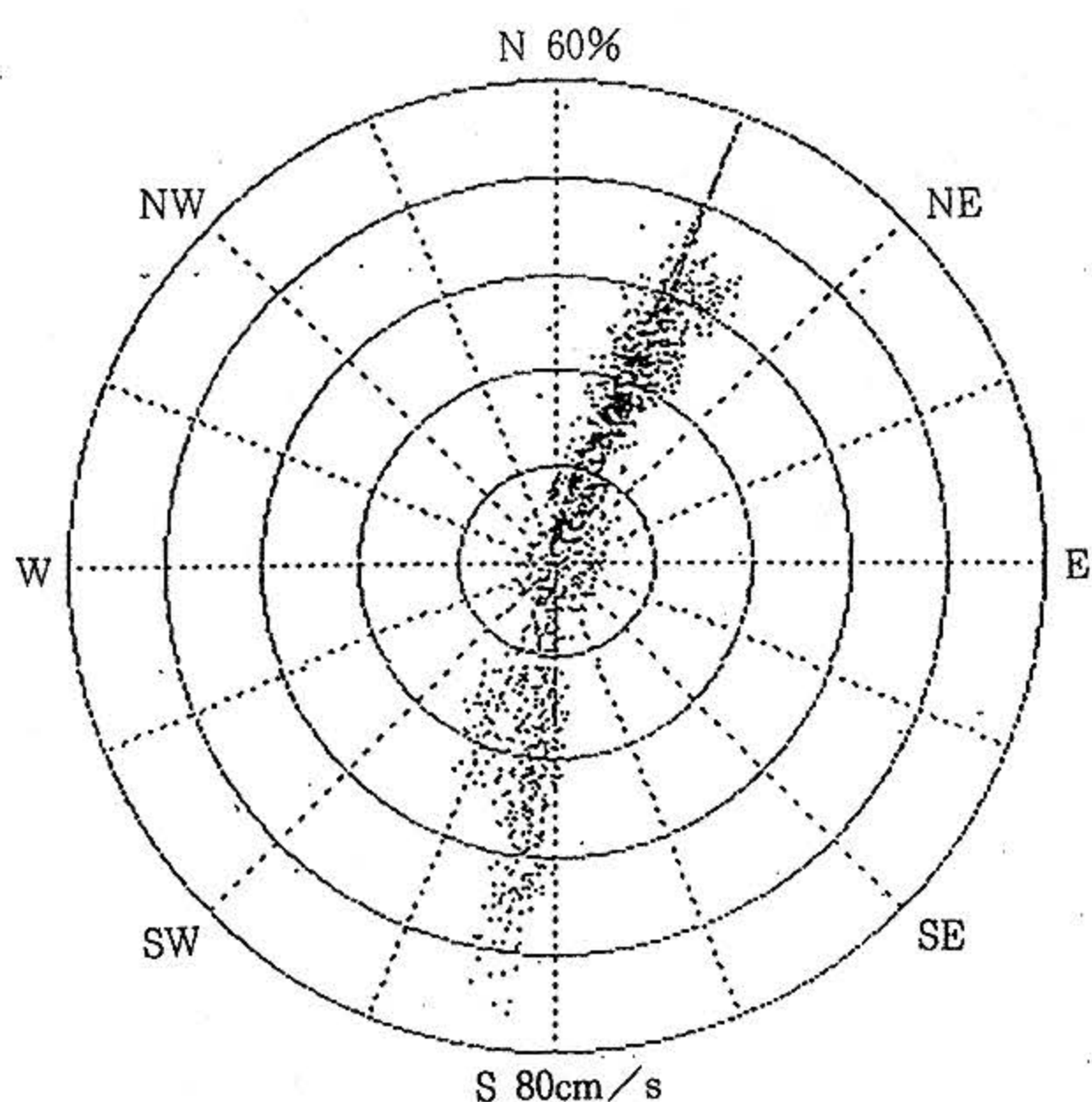


図17 流向頻度分布図  
(ヒラビシ水路 1990. 3.15 ~ 3.22)

Fig.17 Current direction frequency (HIRABISHI pass. 1990. 3.15 ~ 3.22)

合わせて、もしこれが B 6 測定時の降雨による影響と考えるならば、中城湾中心部から淡水とともに懸濁物質がモデル海域に流入してきていると類推される。

### 3 水路及びリーフ上における海水流動特性

サンゴ礁造園モデル海域における海水交換の形態の特徴とも言えるリーフ間や、リーフと島嶼間の水路、及びリーフを介しての海水の流動特性について、何点かで計測を行っているので、その結果を示す。

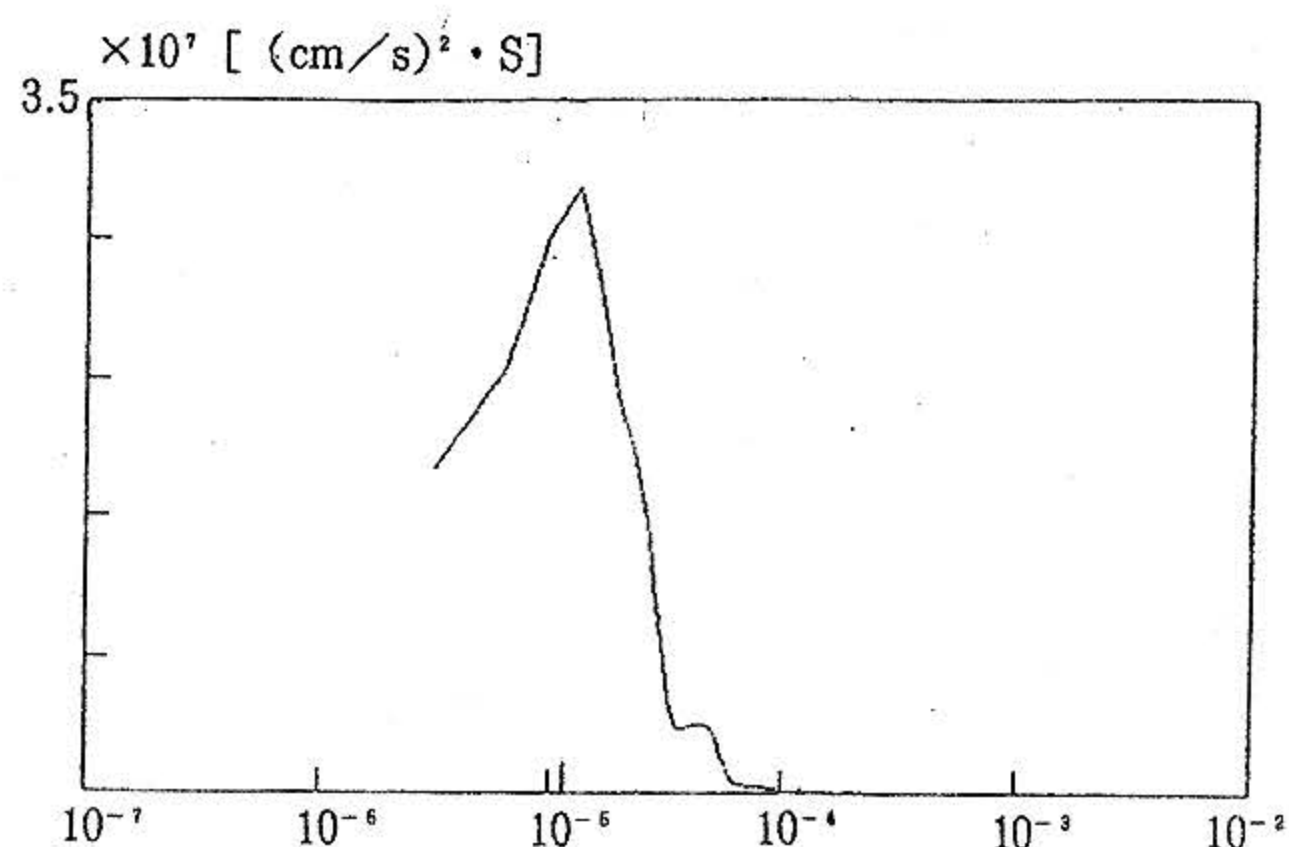


図18 流速スペクトル (N 成分)

Fig.18 Current velocity spectra (N-Component)

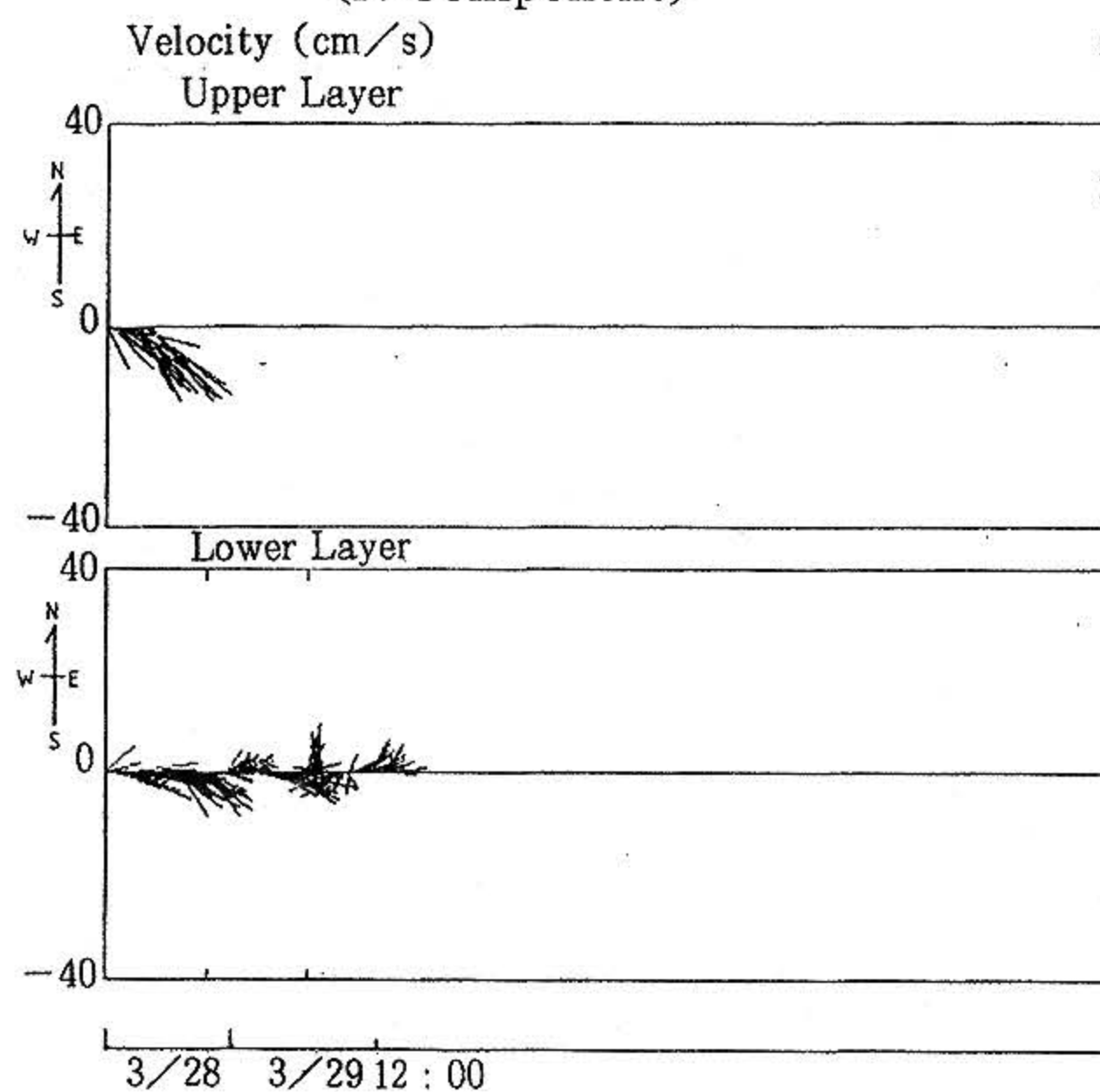


図19 久高口 (B 4) における流向・流速  
(1990. 3.28 ~ 3.29)

Fig.19 Current velocity at KUDAKA pass (B 4) (1990. 3.28 ~ 3.29)

### 3.1 水路における海水流入出

#### 3.1.1 コマカ島南側水路

1989年10月7日～1989年10月9日までの期間、コマカ島南側の水路（P1）で水深4mの点において計測した流向流速のスティックダイアグラムを図14上段に、流向の頻度分布図を図14下段に示す。これから判断すると計測期間中は海底の地形に沿った南向きの流れと北西向きの流れが存在しているが、流速の大きさを比較すると南向

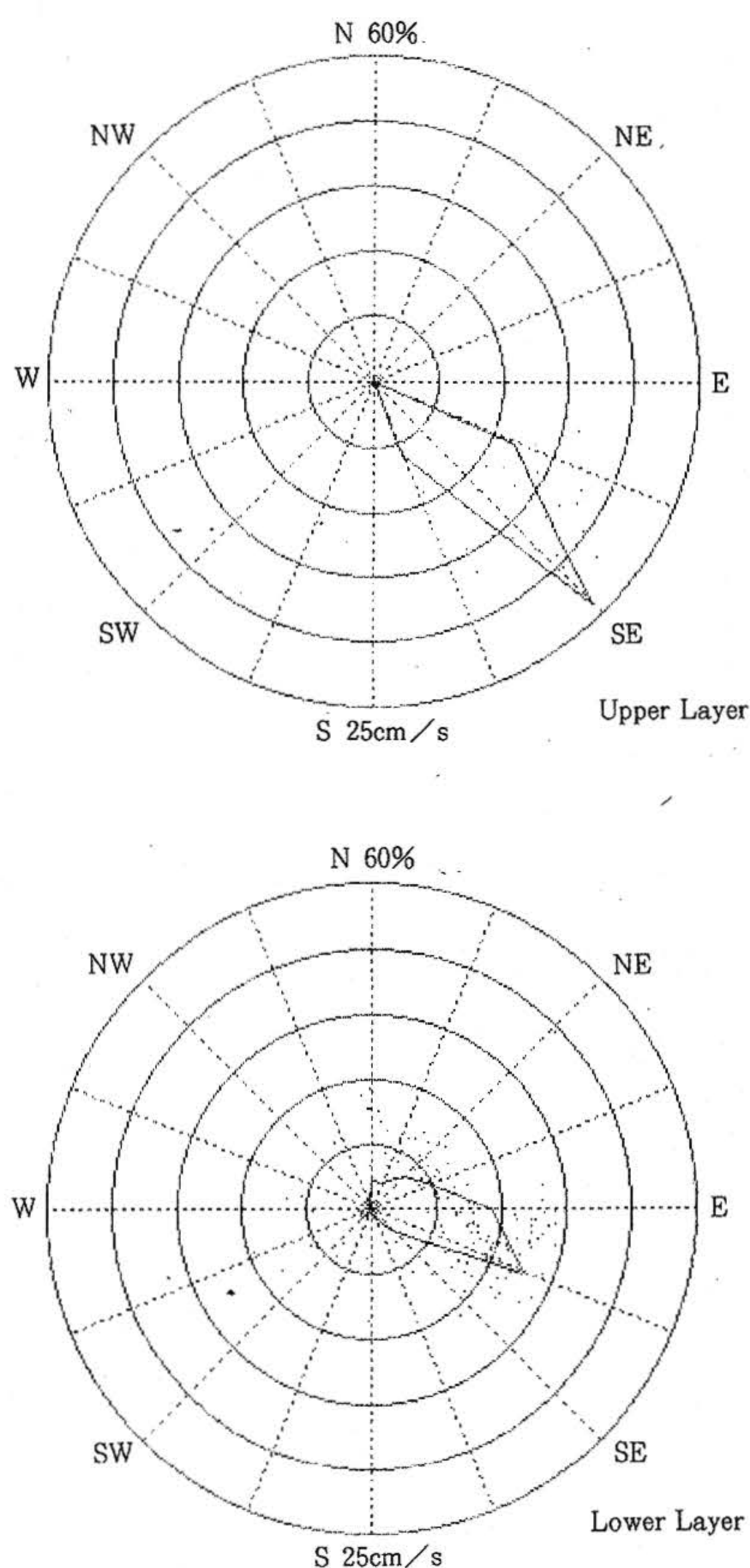


図20 流向頻度分布図（久高口）

Fig.20 Current direction frequency (KUDAKA-pass)

き（リーフからの流出方向）が卓越している。図15にスペクトル解析の結果を示す。解析の結果、約17時間および6時間の周期変動をもつことがわかった。

#### 3.1.2 ヒラビシ水路

1990年3月15日～3月22日までの期間、ヒラビシ水路の水面下約4mの点（P2）において行った計測結果を図16～図18示す。図16にはスティックダイアグラム及び潮位をあわせて示すが、この図から、流れの変化が必ずしも潮位と一致しないことがわかる。流向の頻度分布を図17に示す。これらから、水路の方向に沿った南北方向の流れがあることがわかるが、この計測期間の間は北北東の方向（流入方向）に卓越していることがわかる。スペクトル解析の結果、1日周期の変化が主であることがわかる。（図18）

この地点は、1989年6月27日から7月3日にかけて流水面下約13mの点で流速の計測がおこなわれたが、この時には南南東の方向の流れが卓越しており、今回の計測とは逆向きである。<sup>2)</sup> これは、先にも述べたように、表層の流れと底層の流れは様相が異なるので、係留した深度が異なるためと考えられる。

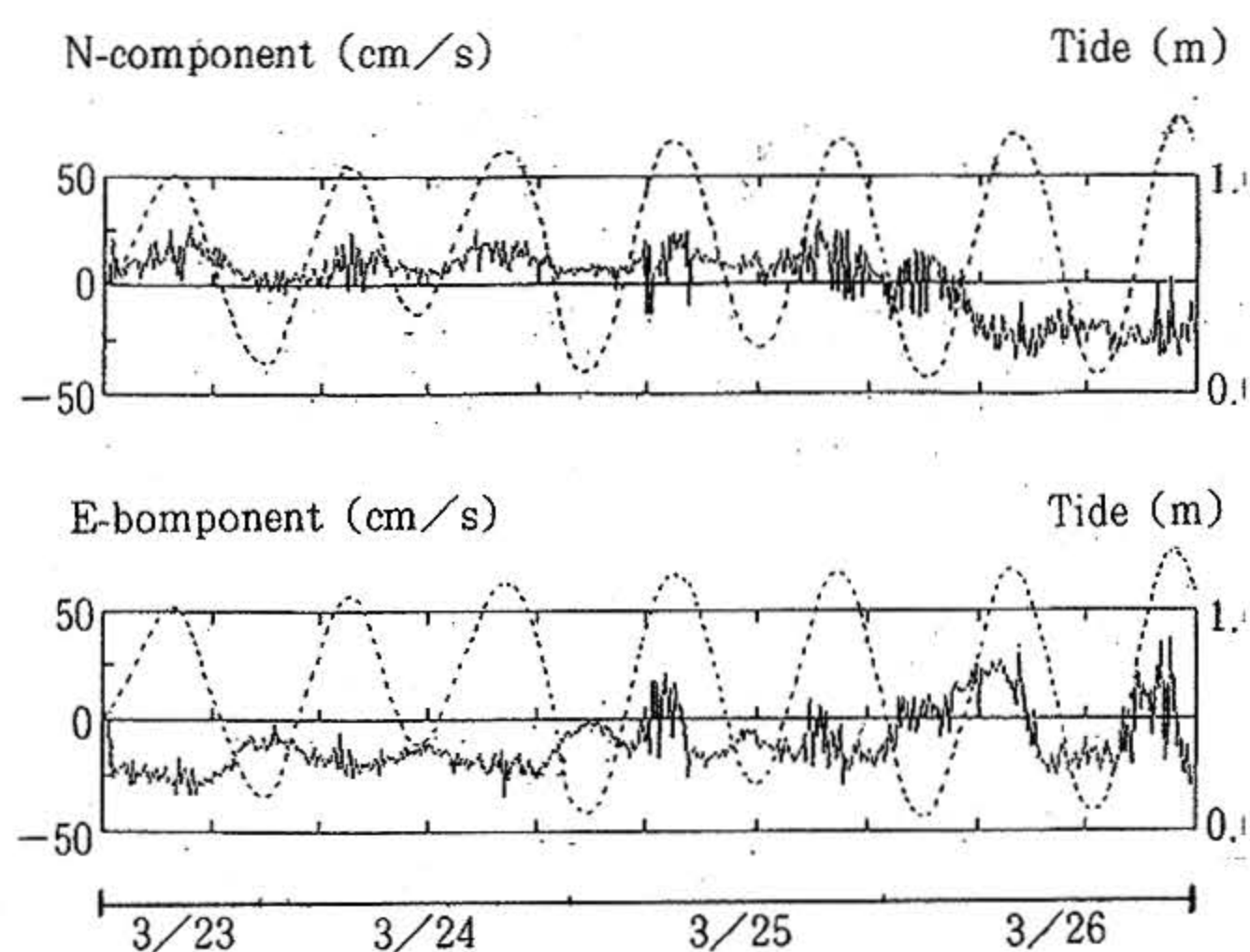


図21(a) リーフ上（R点）の流向・流速

上段：N成分

下段：E成分（1990. 3.23～ 4.25）

Fig.21(a) Current velocity at the Reef (R)

N-component (above)

E-component (below)

(1990. 3.23～ 4.25)

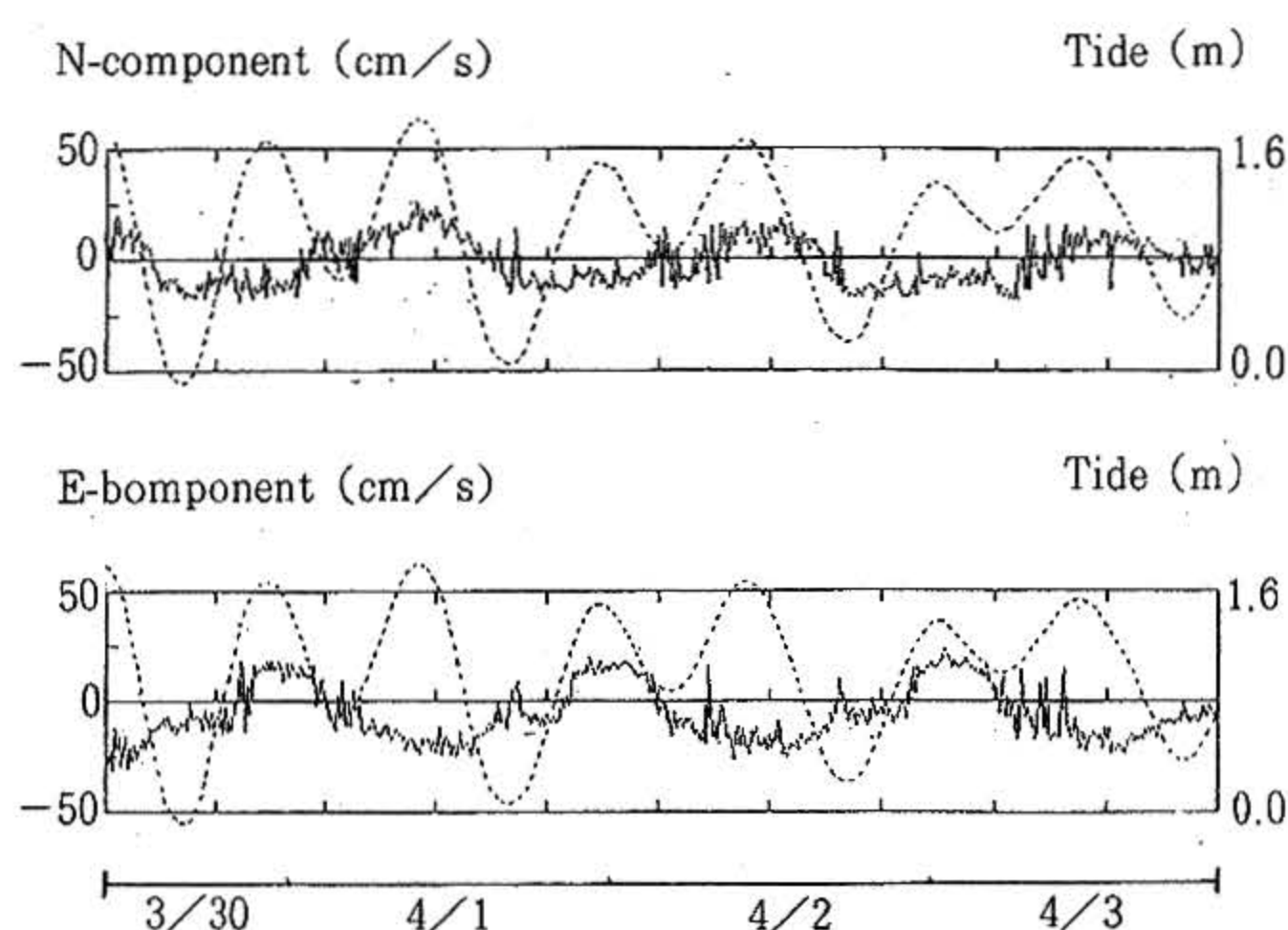


図21(b) リーフ上 (R 点) の流向・流速

上段: N 成分

下段: E 成分 (1990. 3.23 ~ 4.25)

Fig.21(b) Current velocity at the Reef (R)

N-component (above)

E-component (below)

(1990. 3.23 ~ 4.25)

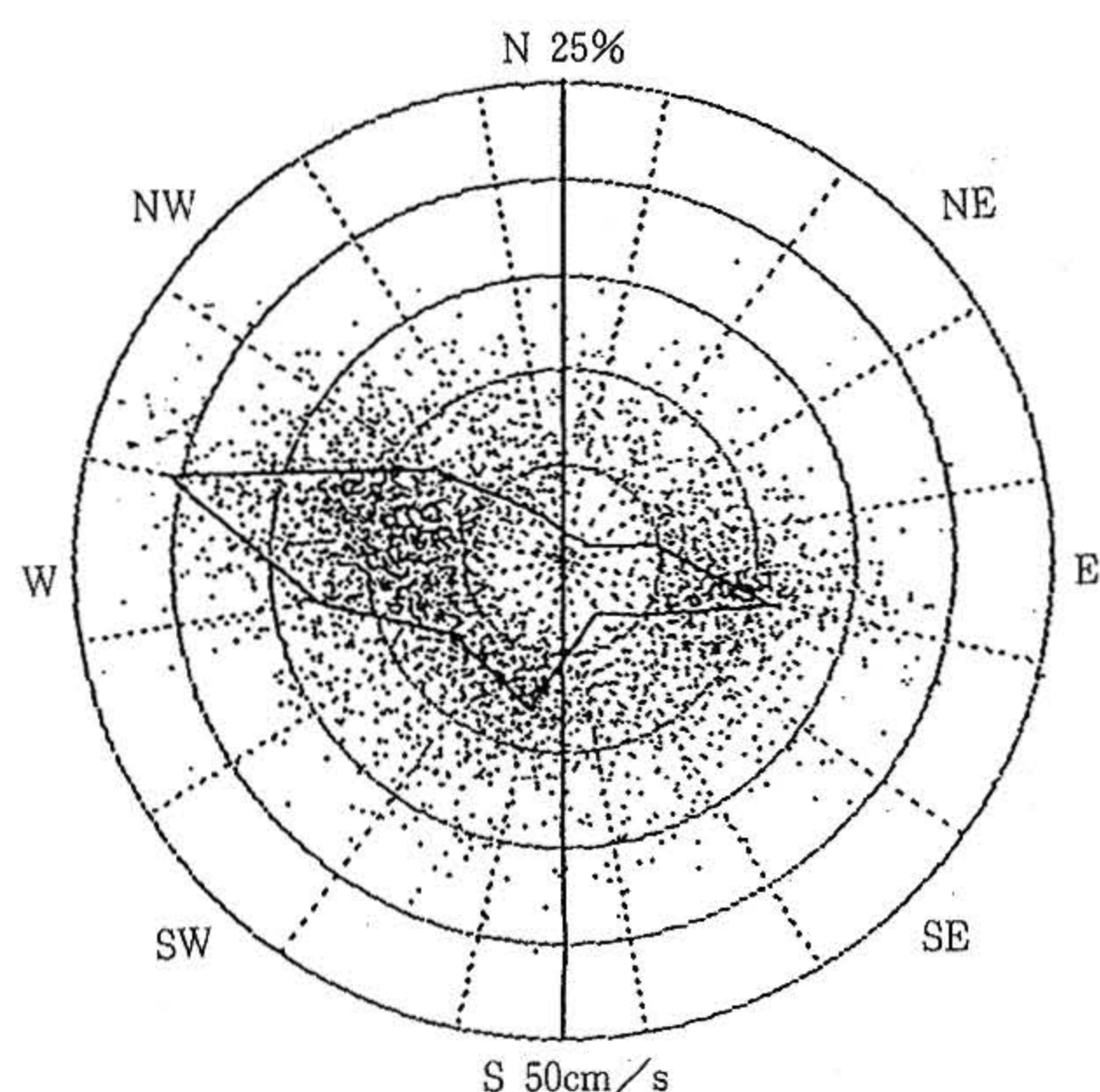


図22 流向頻度分布 (リーフ上)

Fig.22 Current direction frequency  
(on the Reef)

### 3.1.3 久高口

久高口 (B 4 点) において 1989 年 11 月 10 日にかけて、海底上 3.2 m の点 (海面下約 5 ~ 6 m 及び 22 ~ 23 m に相当する) で計測された流速が図 8 に示されている。上段が表層近く、下段が底層である。流向頻度分布図からもわかるように、

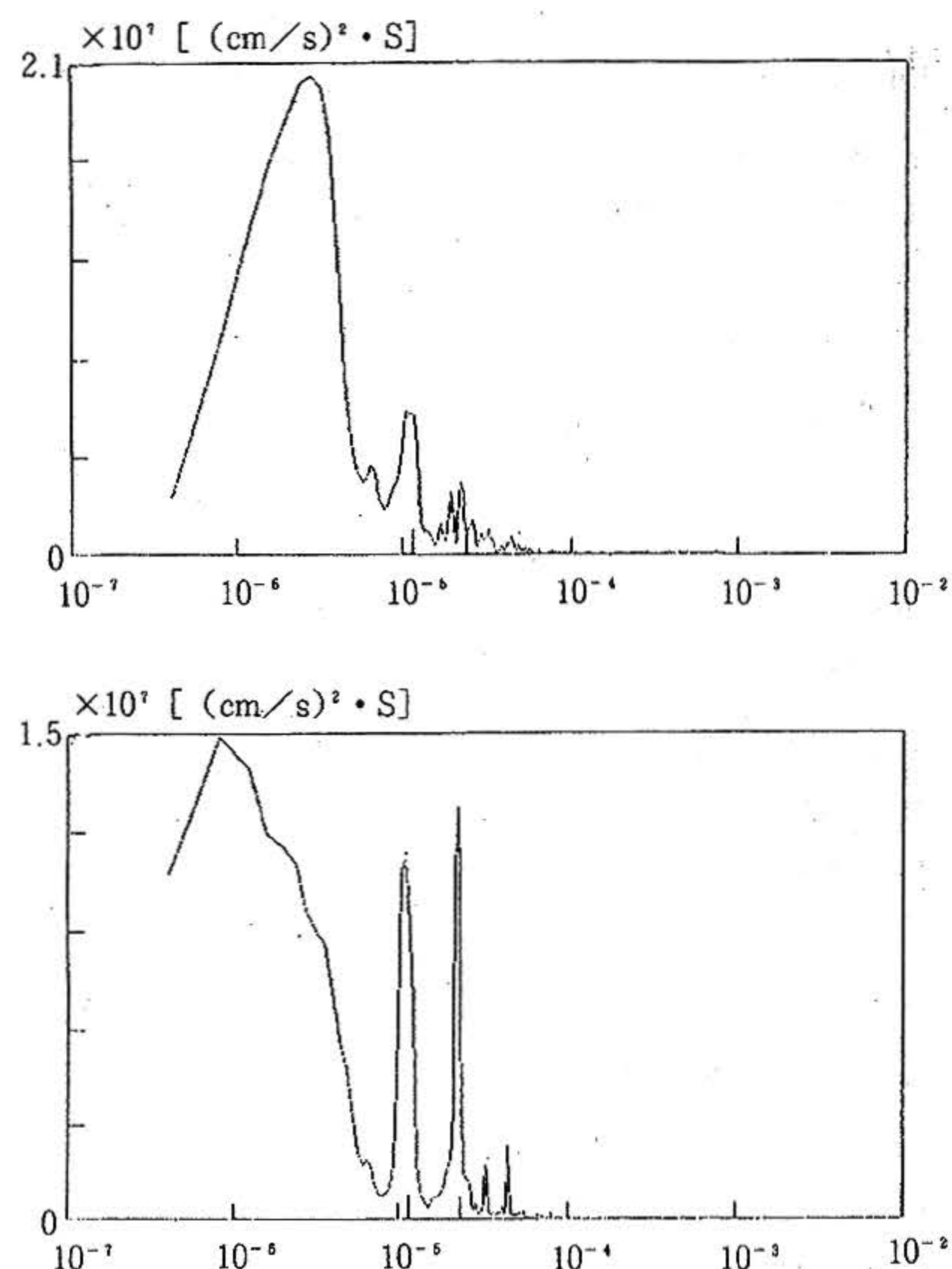


図23 流速スペクトル

上段: N 成分

下段: E 成分

Fig. 23 Current velocity spectra

N-component (above)

E-component (below)

短いけれどもこの期間は表層、底層とも南南西ないし南東方向の流れが卓越しており、これは湾内からもっぱら海水が流出していることを示している。ほぼ同じ地点において、1990 年 3 月 28 日から 3 月 29 日にかけて、海底上 2 m 及び 20 m の点で計測された流速を図 19 に、流向頻度図を図 20 に示す。特に表層については、計測期間が短かすぎ、はっきりしたことは判らないが、あえて言うならこの期間は表層、底層とも流れは南東ないし東南東で、やはり海水が流出している方向である。

以上の 2 回の計測から、11 月、3 月ともこの久高口からは海水が流出する傾向がうかがえる。

### 3.2 リーフを介しての海水の流入出

図 1 に示す測点 R の水深約 1 m の海底に流速計を固定し計測を行った。その結果を図 21 ~ 図 23 に示す。1990 年 3 月 23 日から 1990 年 4 月 25 日の約 1 ヶ月間計測を行ったが、そのなかで代表

的な期間を示す。図21は流速の南北成分と東西成分を示したものであり、潮位を同時に示してある。図22は流向の頻度分布であるが、この地点ではリーフに平行な方向（東西）方向が主な成分となっていることが分かる。図21からは潮位との関連をみることは難しいが、図23に示す流速のスペクトラムをみると、東西方向（下段）には1日周期、半日周期のところに強いピークがみられ、潮汐との関連がうかがえる。しかし、南北方向（上段）の場合、ピークは東西方向のものに比べると小さくなく、より複雑と考えられる。図21(a)の前半部は海が比較的荒れた時のものであるが、この時にはつねに北向きすなわち流入する方向に流れている点が注目される。

#### 4 底質について

図1のB1～B6の6測点において底質を採取し、その粒度組成を調べた結果を図24、図25に示す。図24は1989年11月に図1の●印の点で採取されたもので、図25は1990年3月に図1の▲印の点において採取されたものである。底質は、沈澱法（砂分についてはエメリー管法、泥分についてはピペット法による）及び篩分法によって調査した。図24、図25での沈澱法による結果には、

礫分が加算されていない。一方、篩による分別は砂サイズ未満では有効でなく、現時点では両者の方法の優劣は決め難い。図24、図25の粒度積算グラフに基づき、粒度組成に関する4つのパラメータをφスケールを用いて以下の式により計算した。

$$\phi = -\log_2 d \dots\dots\dots (1)$$

但し、d：直径（mm）  
 とすると、中央粒径  $M_z$  は

$$M_z = \frac{\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84}}{3} \dots\dots\dots (2)$$

淘汰度を  $\sigma_1$  とすると、

$$\sigma_1 = \frac{\phi_{84} - \phi_{16}}{4} + \frac{\phi_{95} - \phi_5}{6.6} \dots\dots\dots (3)$$

歪度を  $Sk_1$  とすると、

$$Sk_1 = \frac{(\phi_{84} + \phi_{16} - 2\phi_{50})}{2(\phi_{84} - \phi_{16})} + \frac{(\phi_{95} + \phi_5 - 2\phi_{50})}{2(\phi_{95} - \phi_5)} \dots\dots\dots (4)$$

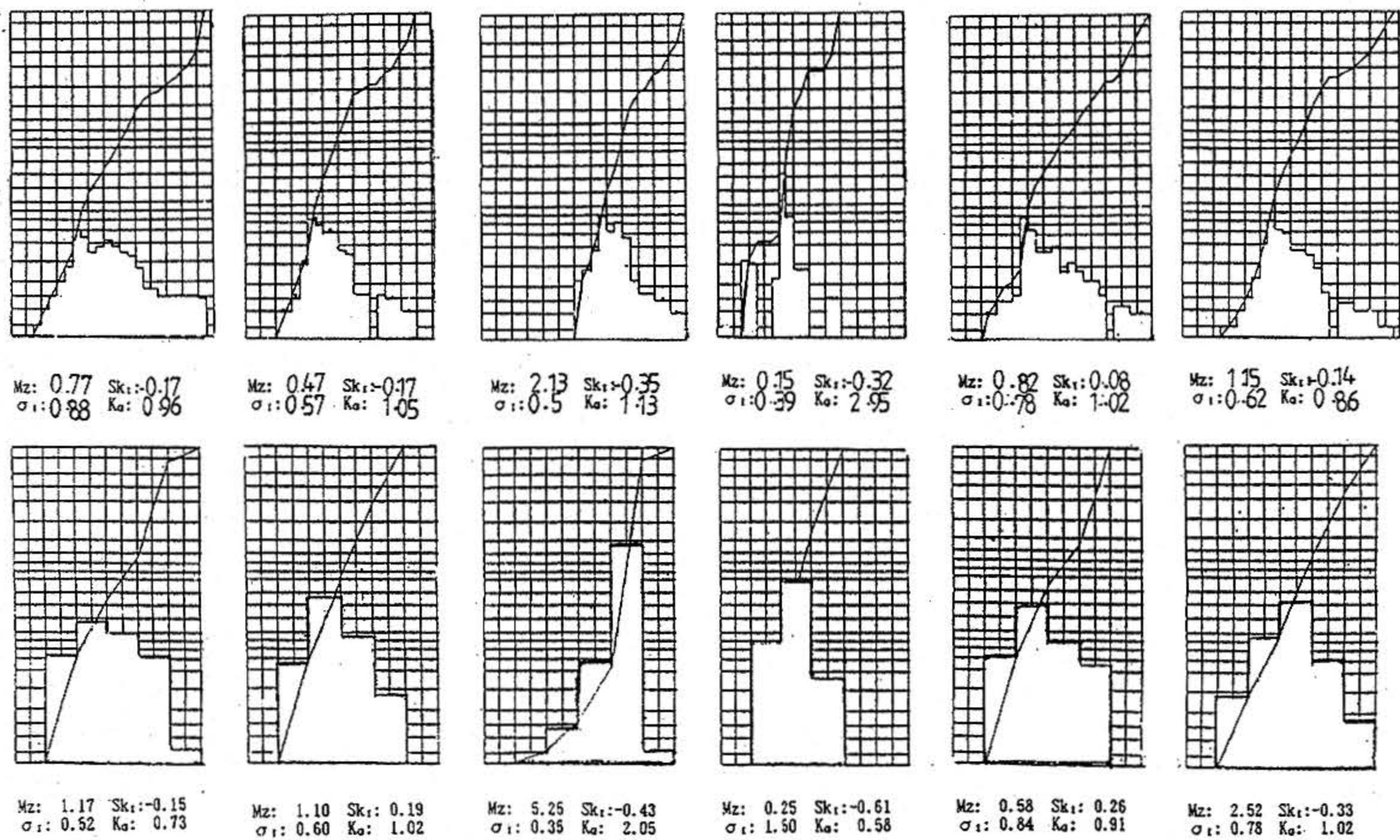


図24 底質試料の沈澱法（上段）及び篩別法（下段）による粒度結果（1989. November）  
 Fig.24 Cumulative frequency curve of the sediment at Nakagusuku Bay

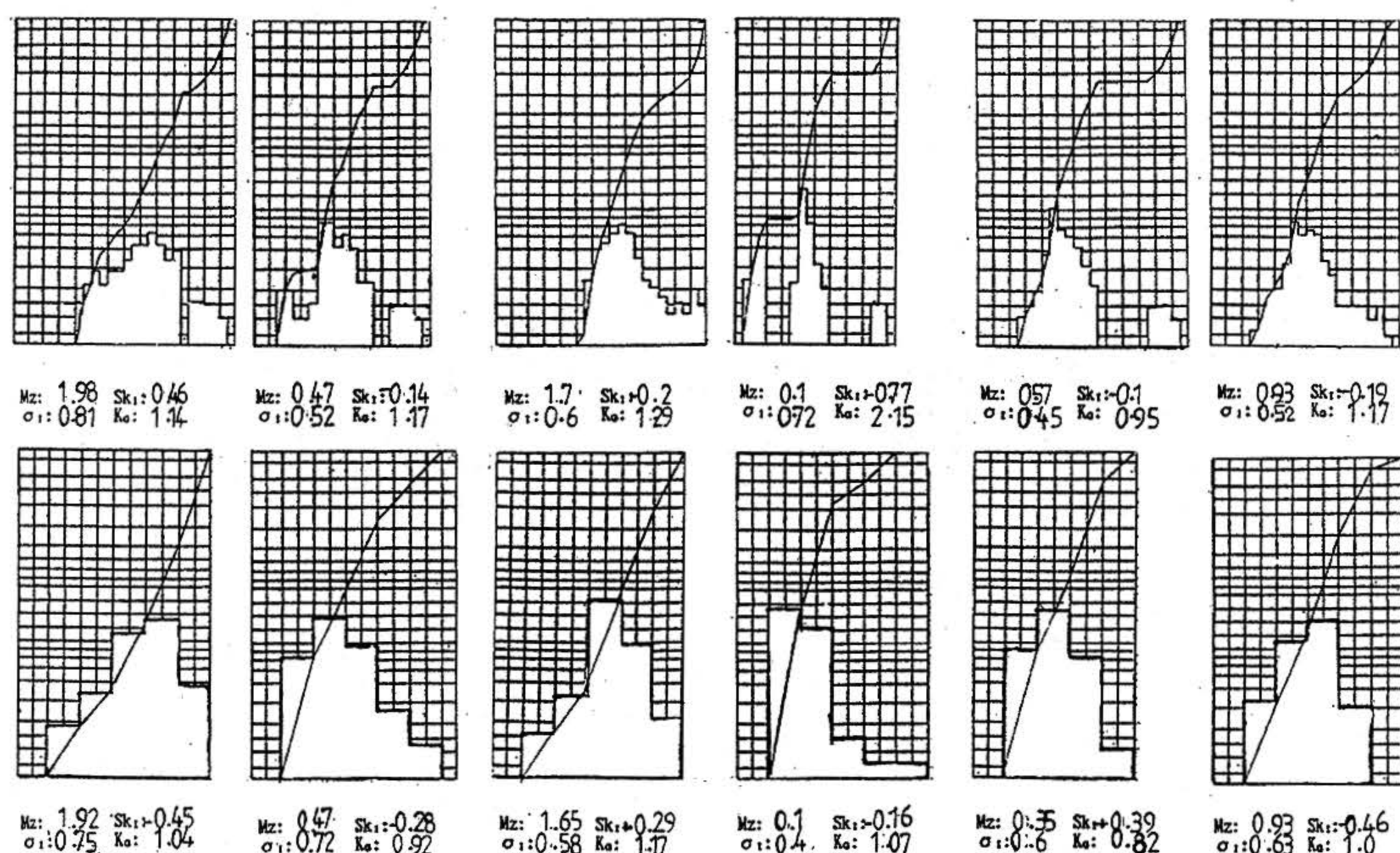


図25 底質試料の沈殿法（上段）及び篩別法（下段）による粒度結果（1990. March）

Fig.25 Cumulative frequency curve of the sediment at Nakagusuku Bay

尖度を  $K_G$  とすると、

$$K_G = \frac{(\phi_{95} - \phi_5)}{2.44 (\phi_{75} - \phi_{25})} \dots\dots\dots (5)$$

これらを4パラメータ相関図に記入したものが図26である。図中、\*で示した点が1989年11月の測定における値で、○で示された点が1990年3月における測定結果である。B1～B6の肩に'（ダッシュ）のついているものが篩分法による値でありそうでないものが沈殿法による値である。同図には、Ujiie et al<sup>4)</sup>による中城湾全域にわたる71点の底質サンプルより得た値もプロットしてあり、これらについてはA～Dの各タイプに分類してある。

Aタイプとは平均粒径が極細粒砂ないしシルトの泥質のもので、歪度がマイナスすなわち細かい泥分により富んだA1タイプと歪度がプラス（粗い成分が多い）A2タイプに分けられる。また、Bタイプとは平均粒径が中粒ないし細粒の砂で淘汰度の低い（粒揃いの）もの、Cタイプとは同じく平均粒径が中粒ないし細粒の砂で淘汰度の高い（粒が揃いの）もの、Dタイプは平均粒径が粗粒以上で淘汰度の比較的低いものである。<sup>5)</sup>

同一サンプルでも沈殿法による値と篩分法によ

る値との間には、かなりの差がしばしば認められるが、篩分法による値には著しいばらつきがあるので、ここでは沈殿法による値をもとに議論する。B3点の底質がBタイプすなわち淘汰のよい（粒揃いの）中粒砂に属する点を除くと他は全て粗粒砂の中央粒径をもつ。また、Ujiie et al<sup>4)</sup>の分類によると粗粒砂の中央粒径に相当するのはDタイプだが、これらDタイプの歪度はプラスすなわち粗い方に粒度分布が偏るのに対し、本計測では歪度がマイナスを示している点が注目される。

次にこれら5タイプの地理的分布図に以上の観測点を記入したものが図27である。

B1点、B2点、B3点、B5点はDタイプの領域とよく一致している。またDタイプの底質は近辺のサンゴ礁に棲息する生物の遺骸片によって構成されていると考えられており、観測点がリーフ周辺に位置することからも、これらの測点における底質はDタイプに属すると考えられる。しかし、歪度に関しては、これまでのDタイプの一般的性質とは逆にマイナスとなっている。これが、1980年のUjiie et al<sup>4)</sup>による測定後の10年間の海況の変化に起因すると考えると、より細粒の物質（特に泥サイズ）が漸増してきていることを示唆することとなる。

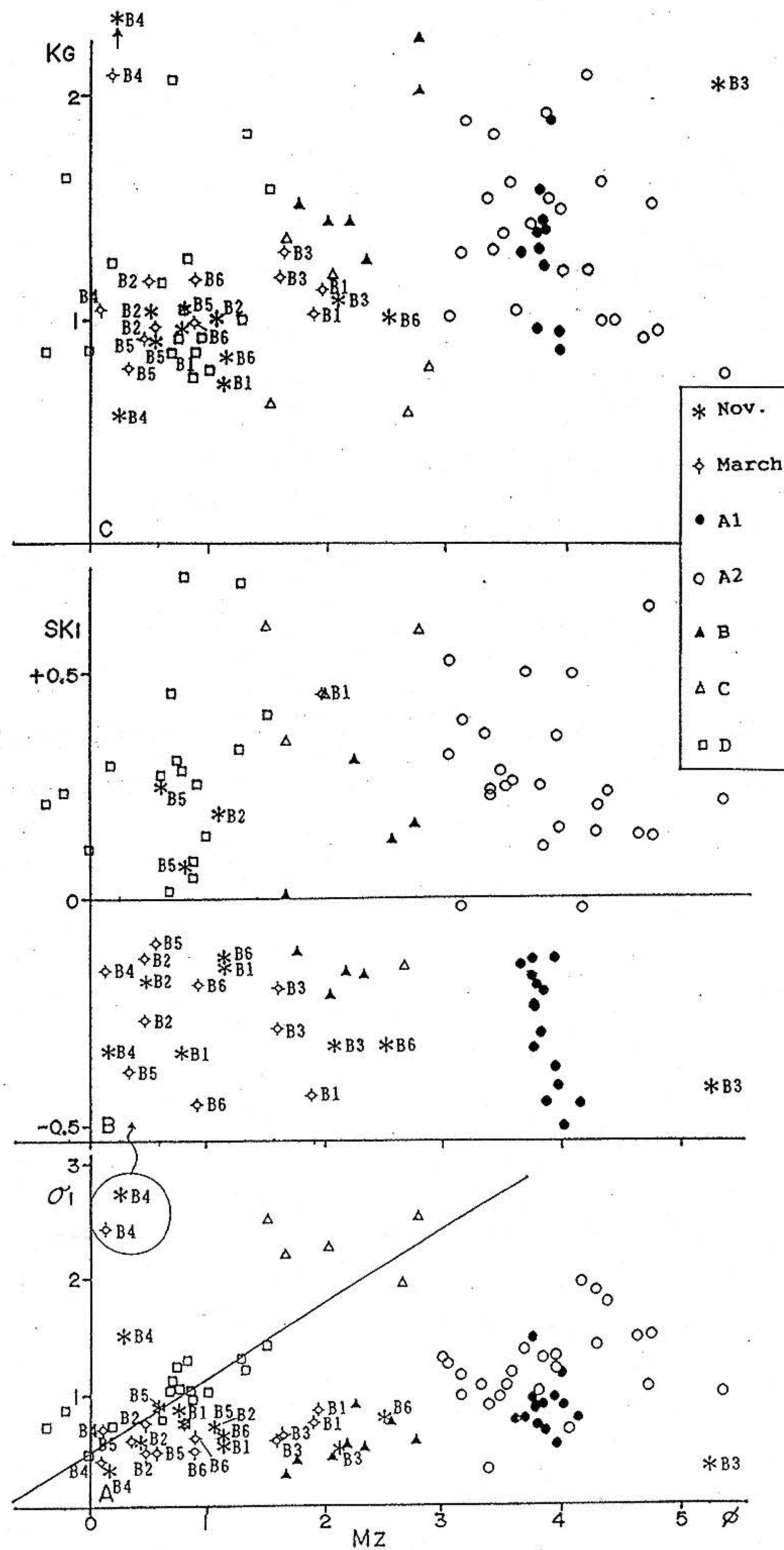


図26 中央粒径 $\phi$ に対する淘汰度( $\sigma_1$ ), 歪度 ( $SK_1$ ), 尖度 ( $K_G$ )  
 Fig.26  $\sigma_1$ ,  $SK_1$ ,  $K_G$  vs.  $\phi$

## 5 結 論

本計測調査によって次のようなことが明らかとなった。

① 表層の流れは、サンゴ礁造園モデル海域の南側から流入し、久高口及び北東の中城湾中心部

の方向へと流出している。しかし、底層の流れはこれと異なり、中城湾中心部から流入し、久高口から流出している。

② サンゴの生育にとって重要な役割を果たす要素の一つである懸濁物の挙動は、この底層の流

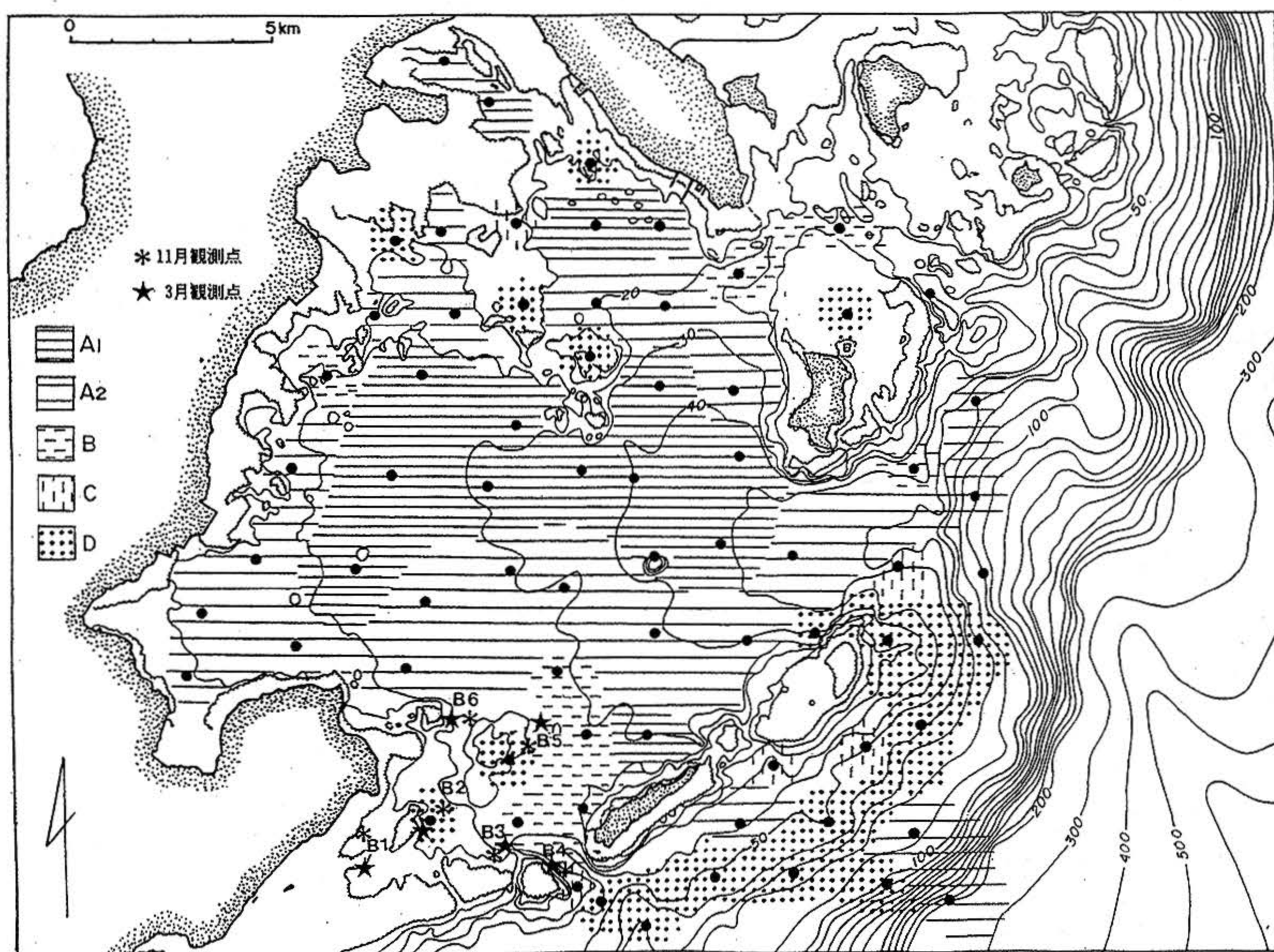


図27 推積分の分布図

Fig.27 Distribution of 5 type sediments

れによって大きな影響を受ける。特に底層に恒常流が存在する場合、懸濁物の挙動や底質の移動、特性化は、この恒常流によって一義的に決まるといっても過言ではない。従って、今後はこの恒常流の有無を確かめ、もし、存在するならこれを算出するために特に底層における流れについてさらに長期にわたる計測を行い調査する必要がある。

③ このためには、今回の計測の結果、明らかとなった底層流の流入口と考えられるB 6点及び湾外への排出口と考えられるB 4点、さらにその中間的な役割を果たすと考えられるB 2点、B 3点において比較的長期にわたる流向流速等の計測を行う必要がある。

④ このサンゴ礁造園モデル海域の特徴である南側に発達したバリアリーフを介する海水の流入出や、リーフ間、リーフと島しょの間の水路における流入出を明らかにするために、これらの点におけるデータをさらに蓄積する必要がある。

⑤ 底質について、サンゴ礁造園モデル海域の底質は、粒度分布が細かい方に偏っていて（歪度がマイナスで）粗粒砂の中央粒径をもつことがわかった。1980年に行われた Ujiie et al<sup>4)</sup>、による底質調査からは、この海域はDタイプすなわち粗粒砂の中央粒径をもち、歪度がプラス（粒が粗い方に偏っている）の底質であることが予想されたが、中央粒径については一致したものの、歪度については一致しなかった。これは、Ujiie et al<sup>4)</sup>、による調査後10年間に海況の変化等に起因すると考えると、この10年の間に泥のような細かい底質が除々に増加してきていることを示す。

## 6 謝 辞

本研究を行うに当たり、サンゴ礁造園モデル海域の海水流動特性調査を指導していただいた琉球大学理学部海洋学科氏家 宏教授、山本 聡助教授、小賀百樹助教授、小野朋典技官並びに計測に協力していただいた氏家研究室の皆さんに感謝の意を

表します。

#### 参考文献

- 1) 工藤君明, 本多牧夫: 沖縄本島周辺のサンゴ礁の現状調査, JAMSTEC R21 (1989) pp. 121 ~ pp.142
- 2) 工藤君明, 大西 毅, 本多牧夫: サンゴ移植・観測システムについて JAMSTEC R23(1990) pp.345 ~ pp.369
- 3) 本多牧夫: 移植サンゴの生育と環境条件の関係について, JAMSTEC R25 (now appear)
- 4) H. Ujiie, M. Yamamoto, M. Okitsu, and K. Nagao : Sedimentological aspect of Nakagusuku Bay, Okinawa, Subtropical Japan, Galaxea, 2, (1983) pp.95~pp.117
- 5) 氏家 宏: 琉球弧の海底—底質と地質—, 新星図書出版(株), (1986)

(原稿受理: 1990年11月6日)