

川平サンゴ礁の海水流動における リーフによる流れのモデル化

中村 仁^{*1} 工藤 君明^{*1}

サンゴ礁は、特異な地形とそれに応じた物理環境をもっている。そのため、外海からの波浪や潮汐に対するサンゴ礁の地形的影響及びその周辺の流れは、物質循環や生態系に深い関係をもつ。しかも、このような海域の流れは非常に複雑であり、リーフを越えてくる流れは常にリーフ内へ流入するという特徴をもつ。

そこで、リーフを越えてくる流れ（リーフによる流れの計算条件）をモデル化するため、石垣島の川平サンゴ礁において海水流動調査を行った。得られたリーフ上の流れおよび波高のデータと伊原間観測所より入手した風況データを解析することにより、波高と風速で決まるリーフでの流量の関係式を導いた。この関係式を海水流動数値シミュレーションに応用してリーフによる流れのモデル化を試みた。その結果、従来再現の難しかったリーフ内の流れを簡略化した手法で、より現実的に表現することが可能となった。

キーワード：リーフのモデル化、サンゴ礁、海水流動、数値シミュレーション

Modeling of the Flow Induced by Reef Crest on the Water Circulation around KABIRA Reef

Hitoshi NAKAMURA^{*2} Kimiaki KUDO^{*2}

Coral reefs have a unique bottom topography with a characteristic physical environment. The influence of the shape of a coral reef regarding waves and tidal currents from reef slope are strongly related to the material circulation and ecosystems. The circulation around coral reefs is extremely complex, especially on the flow over the reef crest, a continuous inflow appears clearly.

We have carried out observations of water circulation around Kabira reef in Ishigaki Island to pick up essential field data for the modeling of the flow induced by reef crests. To compare the results of observation flow over the reef crest, the flow around the reef crest and wave height with the wind condition, the modeling of the flow induced by reef crest was performed. These results suggested an experimental equation of the flow over the reef crest to depend on the wind and wave height. To apply these results to a numerical flow simulation model has allowed us to simulate more realistic water circulation around

* 1 海域開発・利用研究部

* 2 Coastal Research Department

coral reefs.

Key Words : Modeling of the reef crest, Coral reef, Water circulation, Numerical simulation

1 はじめに

生物によって生成され、長い間自然の作用を受けてきたサンゴ礁は、特異な地形とそれに応じた物理環境をもっている。外海からの波浪や潮汐に対するサンゴ礁の応答、礁内海域の海水循環と海水交換などは、サンゴ礁海域の物質環境や生態系に深い関係を持つといわれている¹⁾。特にリーフは天然の潜堤となって外海からの波を碎波させ、その波高を減衰させる役割を果している²⁾。海域の流動場を捉える手法としては、数値シミュレーションが頻繁に用いられており、リーフが湾口部に独立して存在する場合（沖縄県中城湾など）では、リーフの効果を表現することは可能となっている³⁾。しかし、島を取り巻くようにサンゴ礁が形成される裾礁（日本のサンゴ礁の大部分はこのタイプ）では、このようなリーフの効果を

簡単に表現することは難しい。

本研究では、リーフのモデル化に必要なデータを得るため、石垣島の川平サンゴ礁において海水流動調査を実施し、リーフを越えてくる流れを表現する手法として、リーフによる流れの計算条件を設定した。まず第2章では、調査概要と結果として得られた礁嶺、礁斜面、礁池、水路、川平湾といったそれぞれの海域において見られる特徴的な流動パターンを示した。第3章では、調査結果を基にリーフ条件に必要な関係式を導き、海水流動数値シミュレーションに応用してリーフ条件のモデル化を試みた。このモデル化によって、第2章で確認されたそれぞれの海域において見られる特徴的な流動パターンを数値シミュレーションで表現することが可能となることを示した。

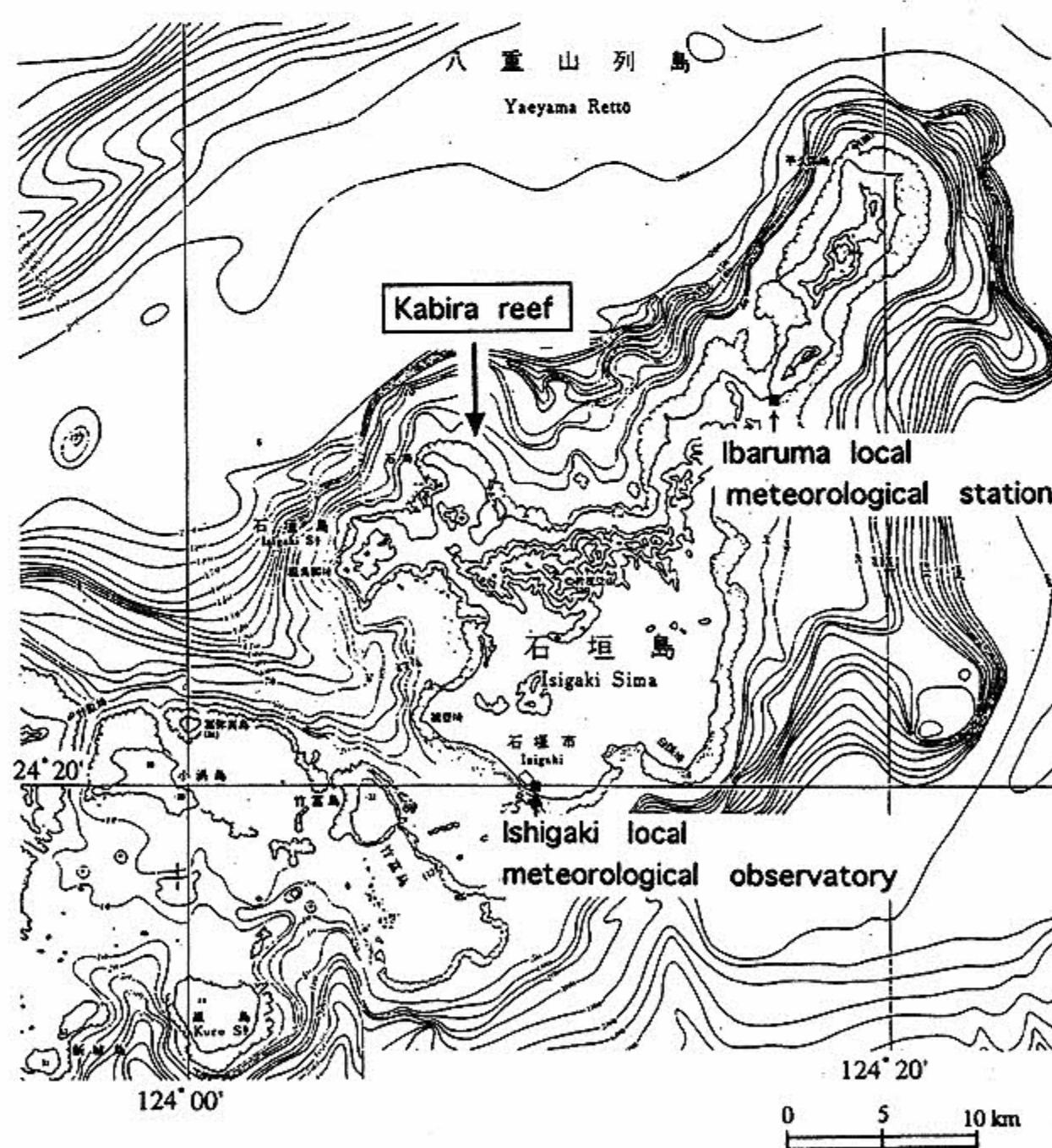


図1 調査海域（川平サンゴ礁）と石垣島の气象台、観測所

石垣地方气象台 : N24° 20' E124° 10'
伊原間観測所 : N24° 30' E124° 17'

Fig.1 Map of research field and measurement point for climate.

Ishigaki local meteorological observatory
: N24° 20' E124° 10'
Ibaruma local meteorological station
: N24° 30' E124° 17'

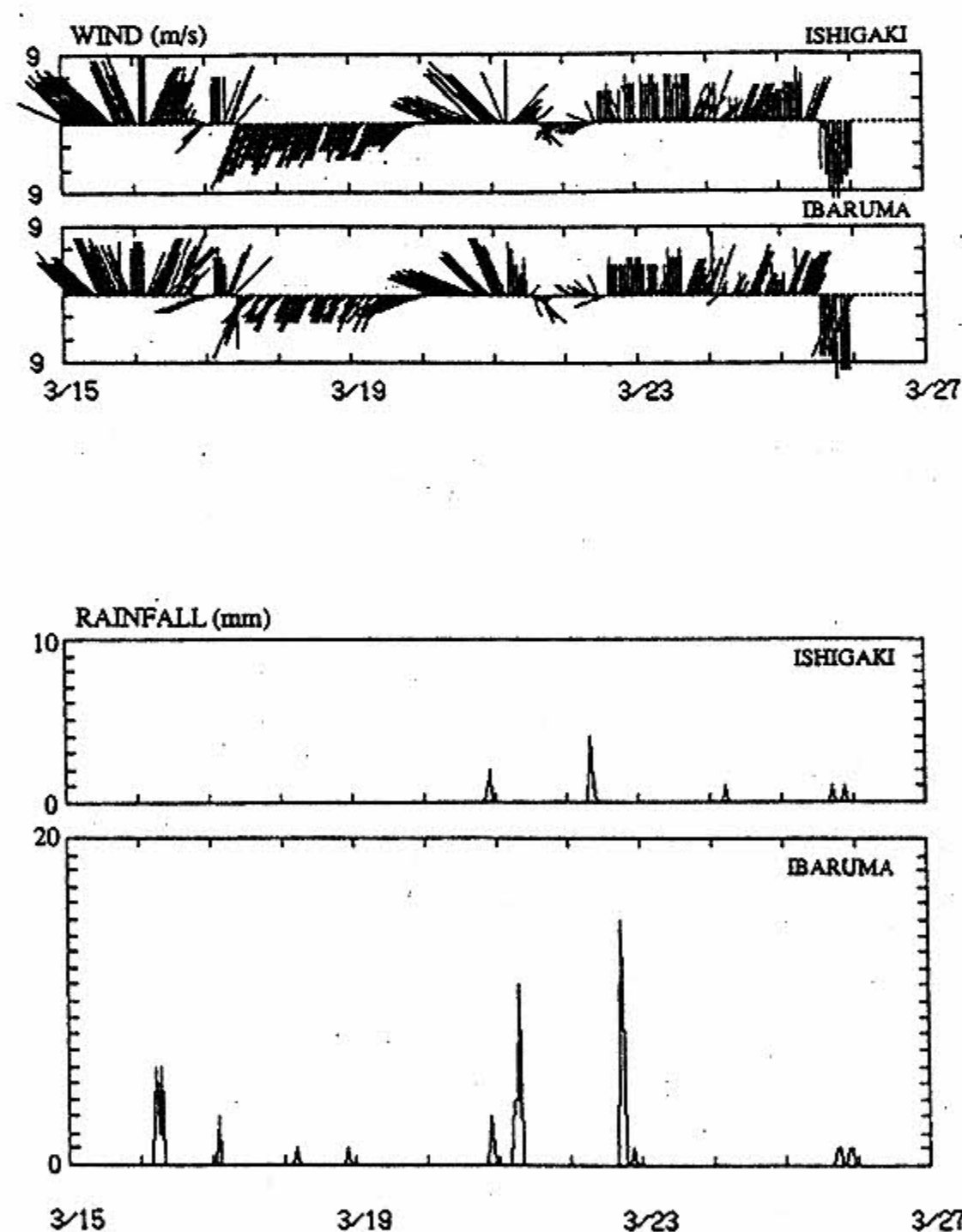


図2 観測期間中の風向風速、降水量の時間変化

Fig.2 Variation of the wind and rainfall during the observation.

2 海水流動調査

2.1 調査海域及び項目

調査海域は、石垣島西部に位置し、東シナ海に面している。海岸の北側に幅約900mのサンゴ礁が海岸線に沿っておよそ3kmにわたって発達している(図1)。このサンゴ礁の東側には川平湾があり、湾奥からのびる水路によってくの字形にサンゴ礁が削られている。また、水路につながる川平湾の湾口には小島があるため、非常に狭く水深も浅い。しかし、湾奥部は再び深くなり最深部は15m近く水深がある。

観測期間は、計測器の設置・回収も含めて平成7年3月16日～3月23日の8日間である。定点における調査項目は、リーフ外側：礁斜面(St.1)において多層流向流速及び波高、リーフ上(St.2)、礁池(St.3)及び川平水路横の礁池(St.5)において流向流速、リーフ外側：礁斜面の川平水路近く(St.4)において波高、川平湾内(St.6)において上層3m付近の流向流速を計測した(図2)。

石垣島では、石垣地方气象台と伊原間観測所の2ヶ所で気象データ(1時間毎の風向風速、降水量)が得られた。風況はどちらもほぼ同じであるが、降水量にはかなり差が見られた(図3)。降雨状況は、伊原間の方が川

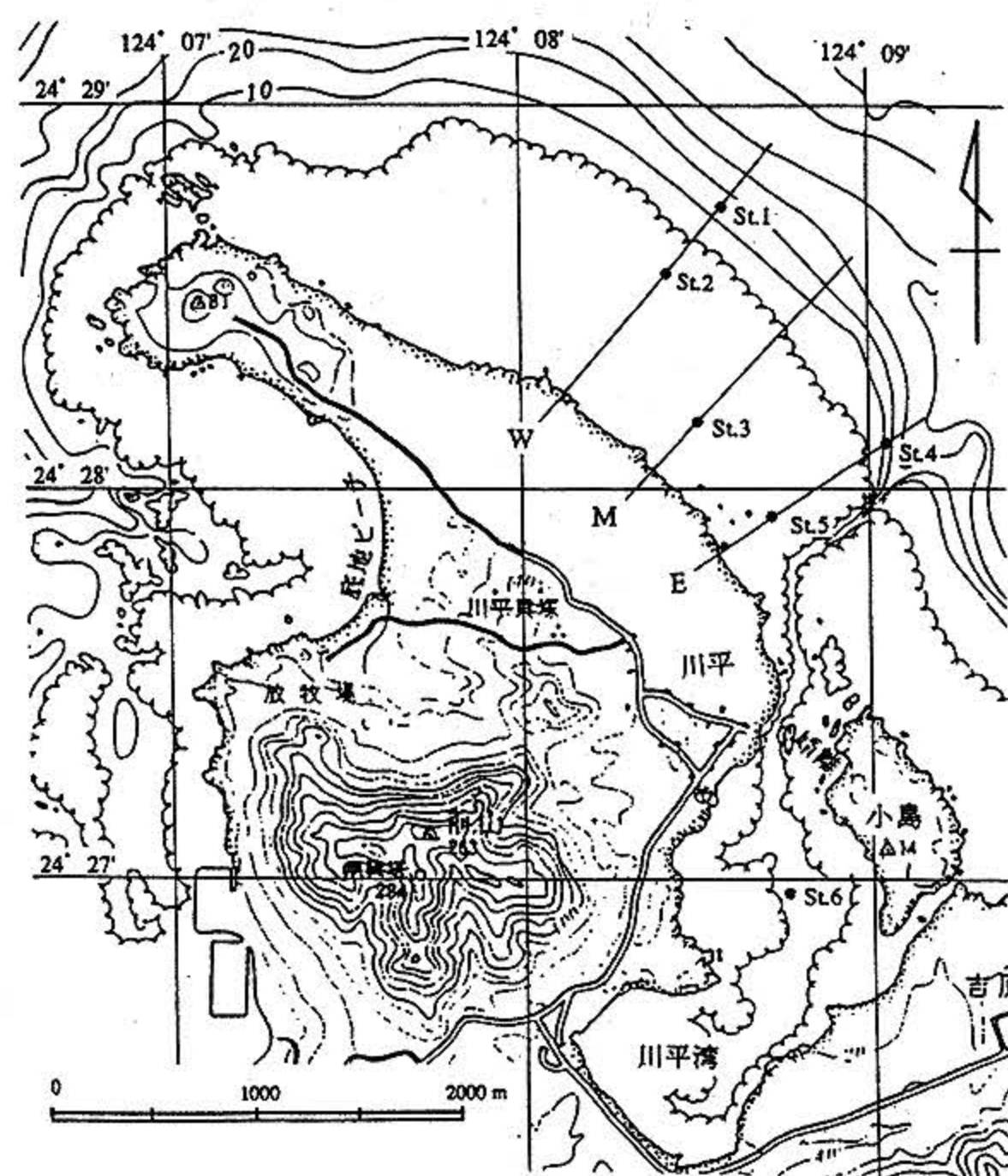


図3 海水流動調査測線及び測点

Fig.3 Measurement lines and points for the water circulation.

平と一致していたので、石垣島北東部にある伊原間観測所から調査期間中の風向風速のデータを用いた。

2.2 潮汐・波高

潮位は、礁斜面(St.1, St.4)、リーフ上(St.2)、リーフ内の川平水路横(St.5)の4地点で計測を行った。どの地点においても振幅は0.8m程度でよく一致しており、位相のずれもない。潮汐表による石垣島の潮位変化と比較してみても位相・振幅共にほぼ一致している。(図4)

リーフの内外で比較してみると、リーフ内(St.2, St.5)では満ち引きの速度が異なる。すなわち、干潮時をはさんで引き潮時は遅く、上げ潮時は速くなる。満潮時及び、リーフ外(St.1, St.4)では上げ下げ時の速度差は見られない。これは、川平サンゴ礁の礁嶺は干潮時に完全に干出するため、上げ潮時に干出部がなくなった時、一斉にリーフ内に流入が生じるためだと考えられる。

波高データはSt.1のみであるが、北風卓越時(3/17午後～3/19)はやや高くなり0.7m程度であるが、それ以降は徐々に低くなり0.2m程度で安定している(有義波高)。全体的に見て北風の吹かないときは波高は非常に低く、穏やかな海域であるといえる。

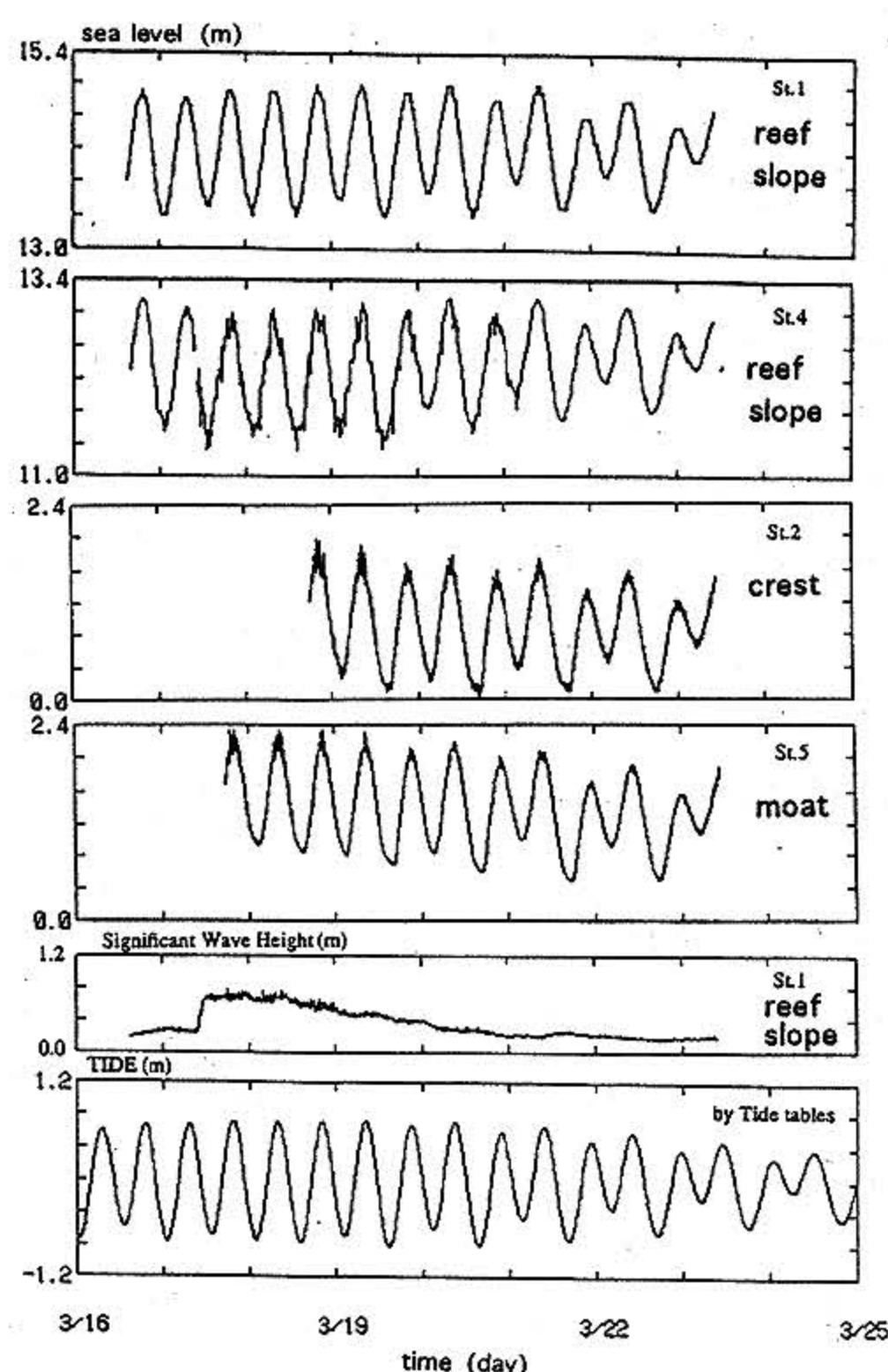


図4 礁斜面、礁嶺、水路横礁池における波高と水位変動

Fig.4 Significant wave height and sea level variations at the reef slope, at the crest and at the moat near the channel.

2.3 川平サンゴ礁の流れ

2.3.1 リーフ内側の流動特性

川平サンゴ礁では、リーフを越えてくる流れの他に水路を通じて川平湾へ流入出する強い流れが存在する。そこで、リーフ上、礁池、水路横の海底及び川平湾の上層の4ヶ所に電磁流速計を設置し、流れを計測した。それぞれの海域において異なる特徴的な流動パターンが得られた。また、いずれの海域においても北風の影響を非常に強く受けることが分かった。(図5)

(1) リーフを越える流れ

リーフ上では風況や潮汐にはほとんど影響されず、絶えずリーフに対し垂直方向に沖から岸へ向かう流れが卓越している。北風卓越時は特に大きくなり、最大で69cm/sに達した。また、南風が卓越している期間でもリーフ内へ向かう(風向きに逆らう)15cm/s程度の流れが観測された。リーフ上は平均水深0.9mと非常に浅いため、干潮時にはセンサー部が干出した時間帯があり、その部分は削除して欠損データとした。

(2) リーフ内(礁池)の流れ

礁池では他の海域に比べ最も流速が小さく(平均3.3cm/s)、潮汐に伴う東西成分の流れが顕著にみられた。北風卓越時は流速が30cm/s程度まで大きくなるが、それ以外の期間ではほぼ5cm/s以下でほとんど風の影響は受けていない。しかし、流速は小さいながらも潮汐に伴う流れの振動は見られることから、礁池では、吹送流より潮流の方が卓越するようである。

(3) 川平水路横の流れ

北風卓越期間中は60cm/sを越す水路へ引き込まれる流れが潮の上げ下げにかかわらず、連続的に見られた。風向きが南に変わると、流速は10cm/s前後と小さくなり水路方向に流入出する潮汐に伴う流れとなった。

(4) 川平湾の流れ

潮汐に伴う流れの流入出が明確に現れ、風向風速による影響はほとんど見られない。湾奥への流入速度は、流出に対して非常に大きく流出速度の約3倍の30cm/s程度あった。流れを積算した進行ベクトル図を見ると、湾奥へ絶えず流入していることがわかる(図6)。この地点では、流速計の設置深度は海面から3.5m付近で水深は約10mあったので、比較的上層の流れをとらえていることになる。したがって、川平湾内では上下層で方向の異なる流れが存在する可能性があるといえる。

2.3.2 リーフ外側の流動特性

リーフ外側(礁斜面)の平均水深14m地点(St.1)の海底に超音波多層流速計(ADCP)を設置して流れの連続計測を行った。観測層は、6層で設置した水深によって自動的に決定される。今回得られたデータは、表層2mmと層厚約3.3mの5つの層(上層から各層の中心深度は1.5, 3.0, 4.5, 6.0, 7.6m)である。(図7)

表層の流れ(2mm)はほぼ風の方と一致しており、大きさは風の8.9%程度であった。第1層目(1.5m)では、流れに風の影響が強く出ていることがよくわかる。第2層目(3m)以降は、風の影響はほとんどみられなくなり、流れの傾向はよくわからない。そこで、各層の進行ベクトル図を鉛直に並べ比較した(図8)。この図を見ると、第2層目以降の流れはリーフに沿って西に向かう流れが卓越していることがよくわかる。また、流速は水深が増すにつれ小さくなっていくが、第3層目(4.5m)の流れはそれより上層の流れよりも大きくなっている。

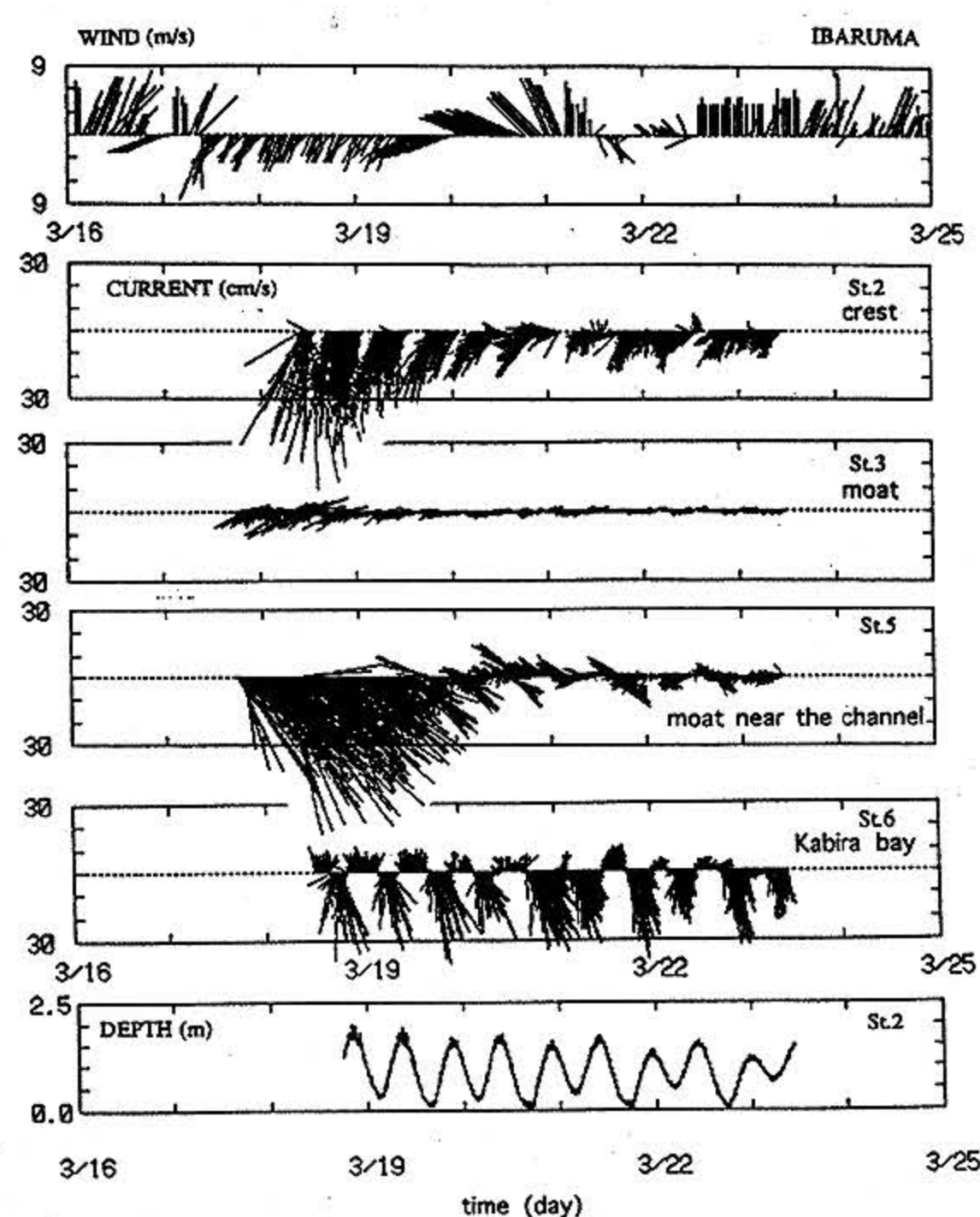


図5 礁嶺、礁池、水路横礁池、川平湾における流れの時間変動比較のために最上段に風況、最下段にリーフ上での水位変化を載せた。

Fig.5 Stick diagrams of the currents at the crest, at the moat, at the moat near the channel and at Kabira bay.

The highest and the lowest figure indicate wind vector and sea level variation on the reef crest respectively.

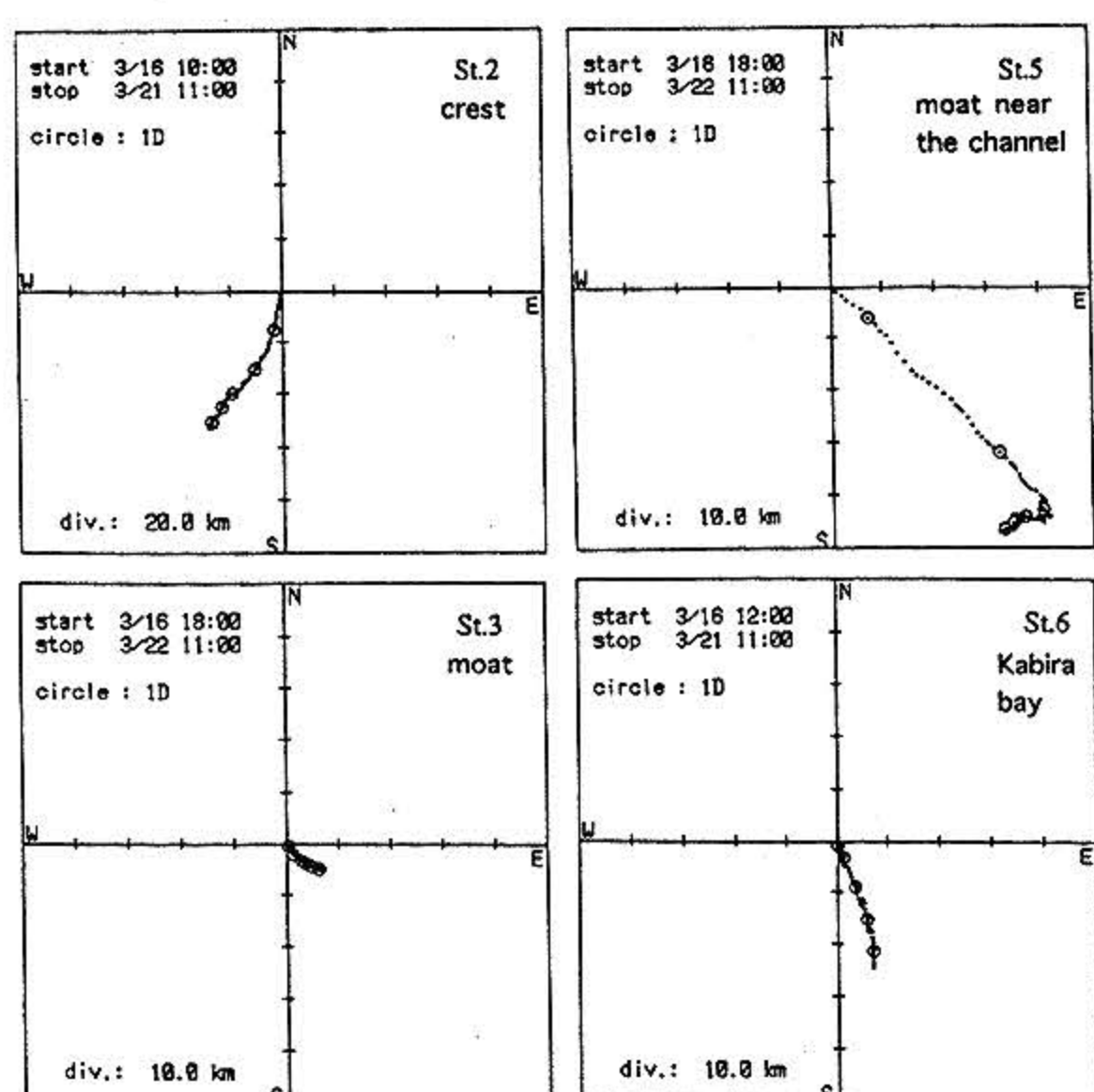


図6 礁嶺、礁池、水路際礁池、川平湾における流れの進行ベクトル図
○印は、1時間毎の位置。

Fig. 6 Progressive vector of the currents at the crest, at the moat, at the moat near the channel and at Kabira bay.
Circles indicate the position at every one day.

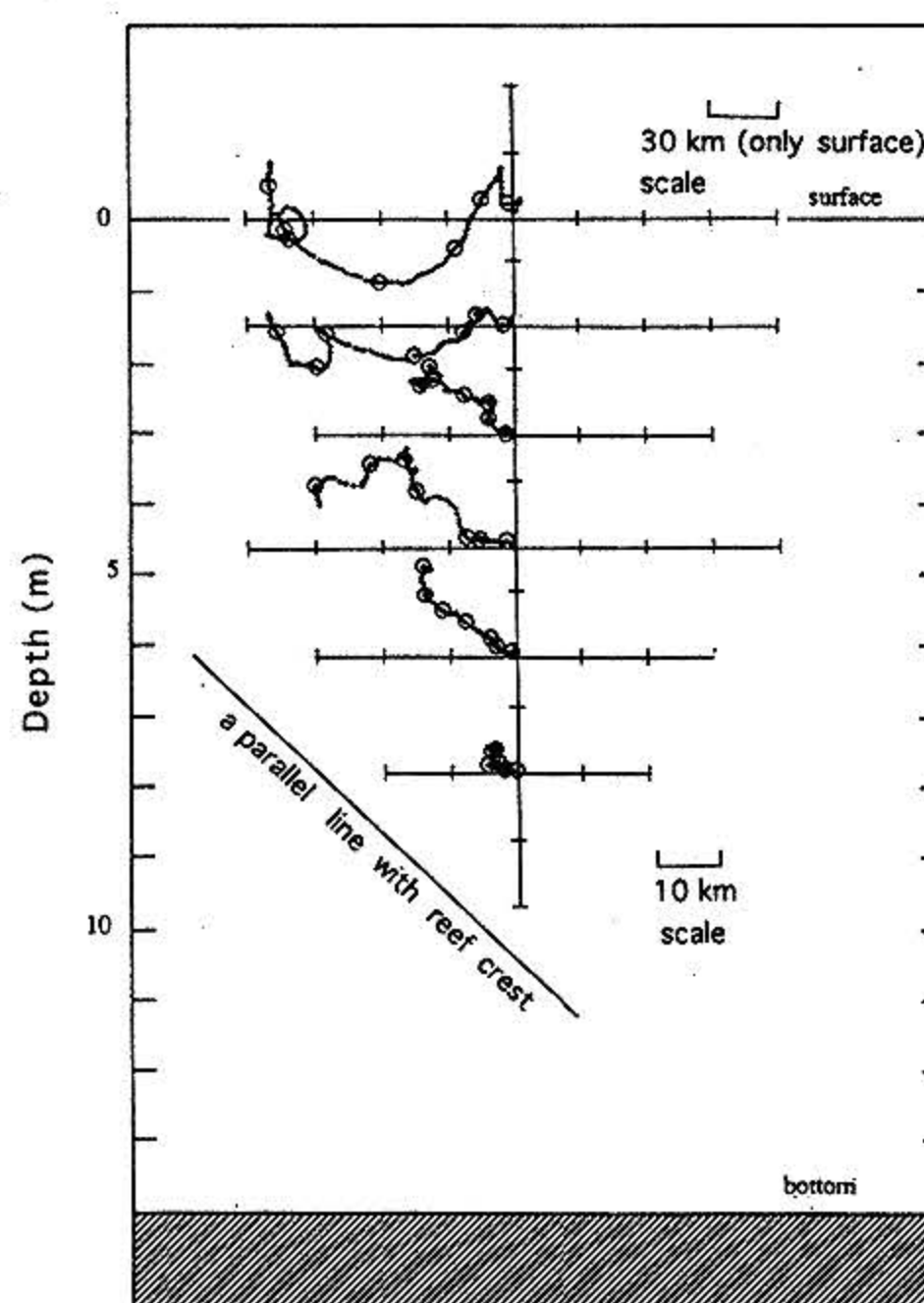


図8 礁斜面における深度毎の流れの進行ベクトル図
○印は、1時間毎の位置。

Fig. 8 Progressive vector of the currents on the each vertical layer at the reef slope.
Circles indicate the position at every one day.

3 リーフ条件のモデル化

3.1 波高・リーフ上の流量・風の関係

リーフによって引き起こされる流れと波高、風速との関係を調べるために、リーフ斜面 (St.1) に設置した ADCP による波高データとリーフ上 (St.2) に設置した電磁流速計による流れのデータ及び風速データを解析した。この2地点において水位変動は振幅・位相共にほぼ同じであった。有義波高は北風の強かった3月18日をピークに徐々に減衰していて、リーフ上の流速の変化とよく一致している。また、リーフ上の流れはほぼ一様にリーフに垂直な方向に流れており、北風の時は大きくなるが、それ以外の風向に対してはあまり影響されない (図9)。そこで風に対しては、リーフ上の流れと平行になる風、すなわちリーフに垂直に吹く風の成分 (V_w) に着目し、これと有義波高 ($H_{1/3}$) 及びリーフ上の流量 (F_r) についての相互関係を調べた。なお、風速のリーフに垂直な成分については外洋からリーフに向かう方向を正とした。

まず有義波高とリーフ上の流量の関係をプロットした (図10 a))。有義波高の増加と共にリーフ上の流速も増加する傾向が見られた。そこで、最小自乗法により近似直線を引いてみると、

$$F_r = 0.7174 H_{1/3} - 0.0628 \quad (1)$$

という関係式 (相関0.79) が得られた。

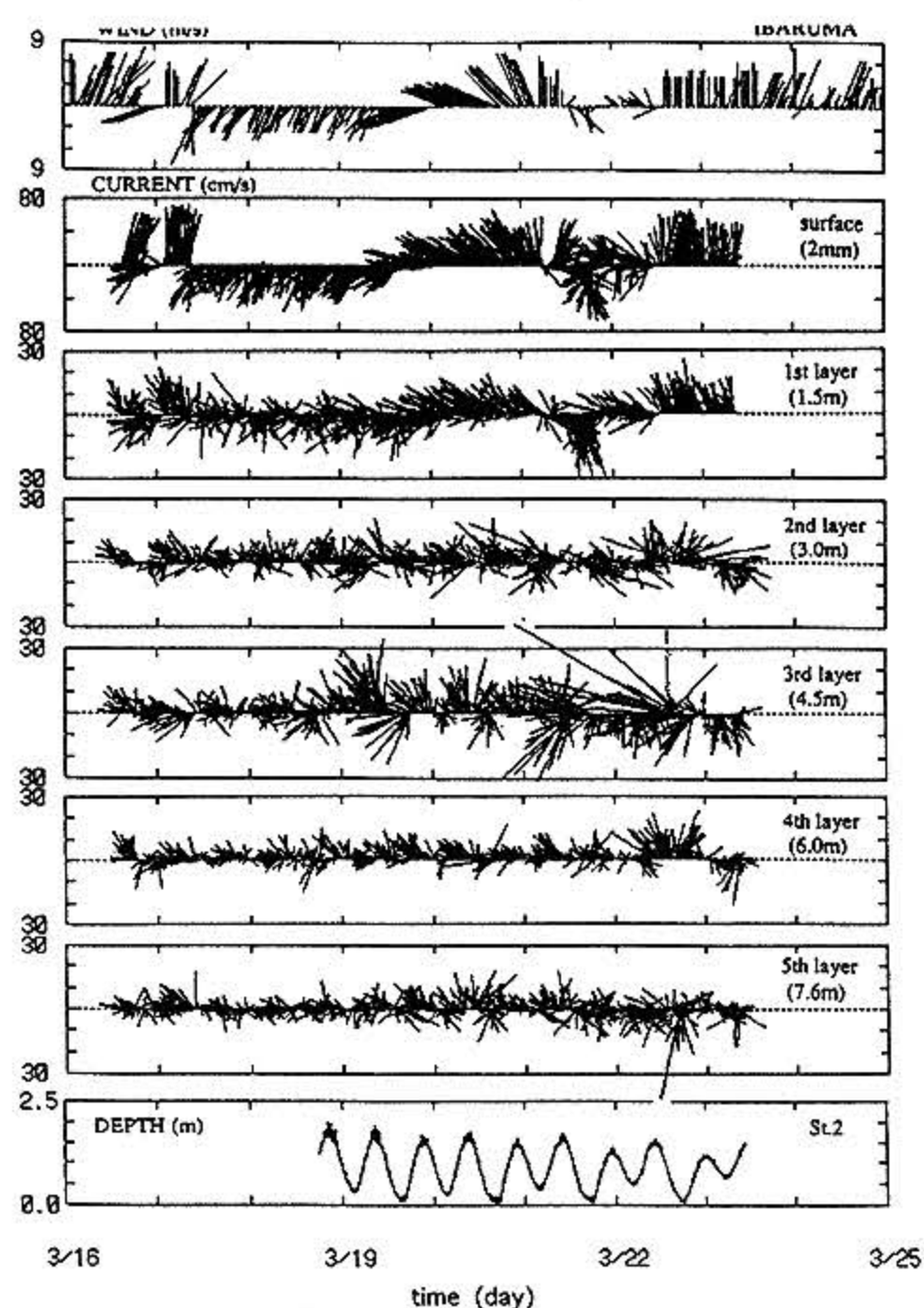


図7 礁斜面における深度毎の流れの時間変動
比較のために最上段に風況、最下段にリーフ上での水位変化を載せた。

Fig. 7 Stick diagrams of the currents on the each vertical layer at the reef slope.
The highest and the lowest figure indicate wind vector and sea level variation on the reef crest respectively.

つぎに、風向風速分布をリーフに垂直な成分に分解し、それをリーフ上の流速に対してプロットした。風速の増大に伴い、リーフ上の流速も大きくなるがバラツキが大きく風速が小さくなくても流速の方はかなり大きい。また逆向きの風速が大きくなってもリーフ上の流速は大きくなる傾向にあり、関係式を当てはめるのは難しい(図10b)。

一方、この風速に対し有義波高をプロットしてみると、風速がある程度小さいとき(負の値の場合も含む)には、波高はほぼ一定の値を保ち、それ以上になると風速の増大と共に波高も大きくなる傾向がはっきりとわかる。そこで、風速が1.3m/sよりも小さい場合は、波高は一定とみなし平均をとり、それ以上の場合、風速1.3m/sで波高の一定の時の平均値を通る直線で近似した。すなわち、

$$H_{1/3} = 0.221 \quad (V_w < 1.3) \quad (2)$$

$$H_{1/3} = 0.1892 V_w + 0.0545 \quad (V_w \geq 1.3) \quad (3)$$

という関係式を当てはめてみた。これらの式を(1)式に代入すると、

$$V_r = 9.856 \quad (V_w < 1.3) \quad (4)$$

$$V_r = 9.429 V_w + 2.716 \quad (V_w \geq 1.3) \quad (5)$$

となり、リーフ上の流量と風速の関係が求められた。

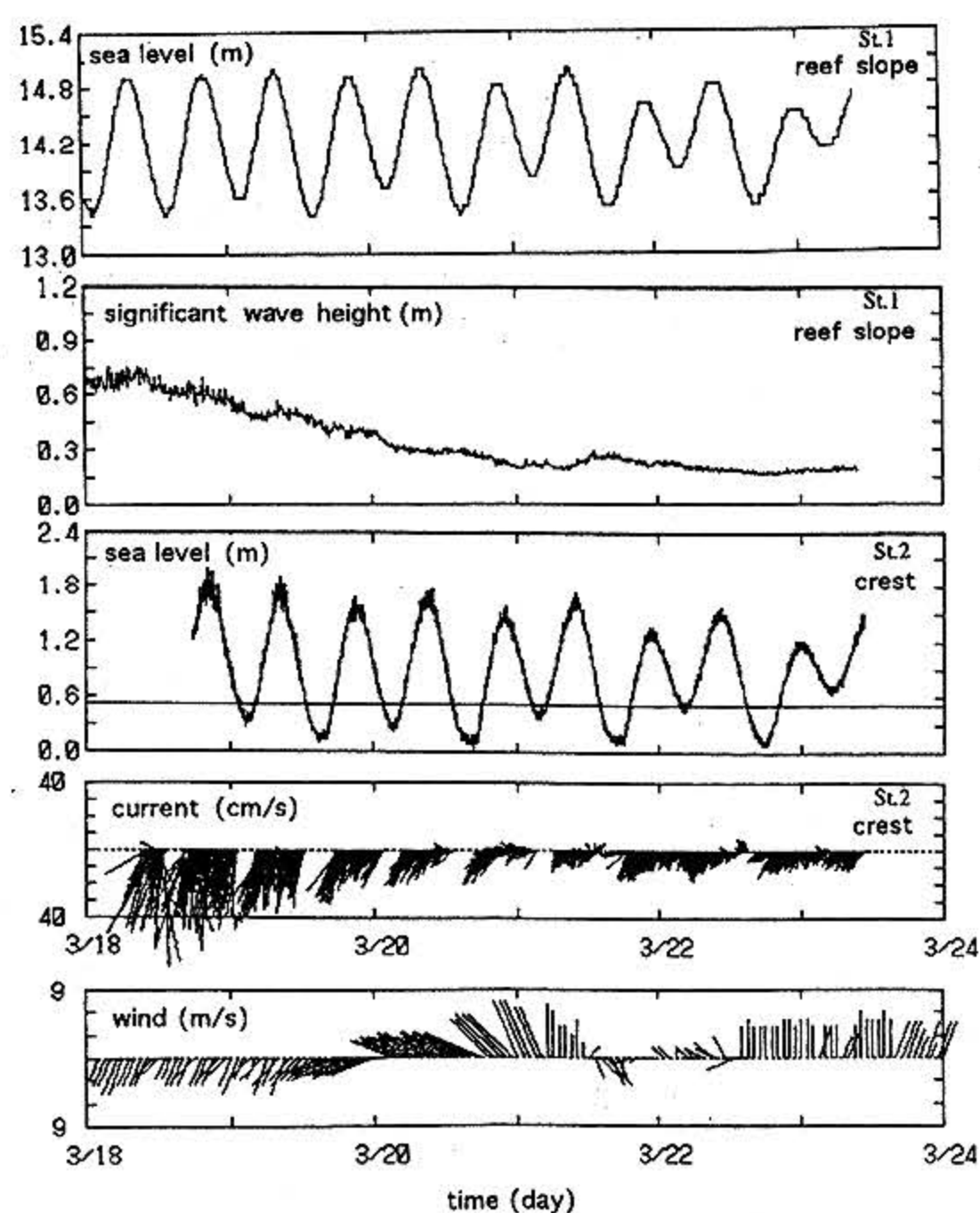


図9 リーフ外からの波高(St.1)とリーフ上の流れ(St.2)と風況の比較
St.2の水位変動に引かれている直線は流速センサー部の水深を示す。

Fig.9 A comparison of the wave height out of the reef crest with the flow over the reef crest and wind condition.
A line with the sea level variation at St.2 indicates the depth of current meter sensor.

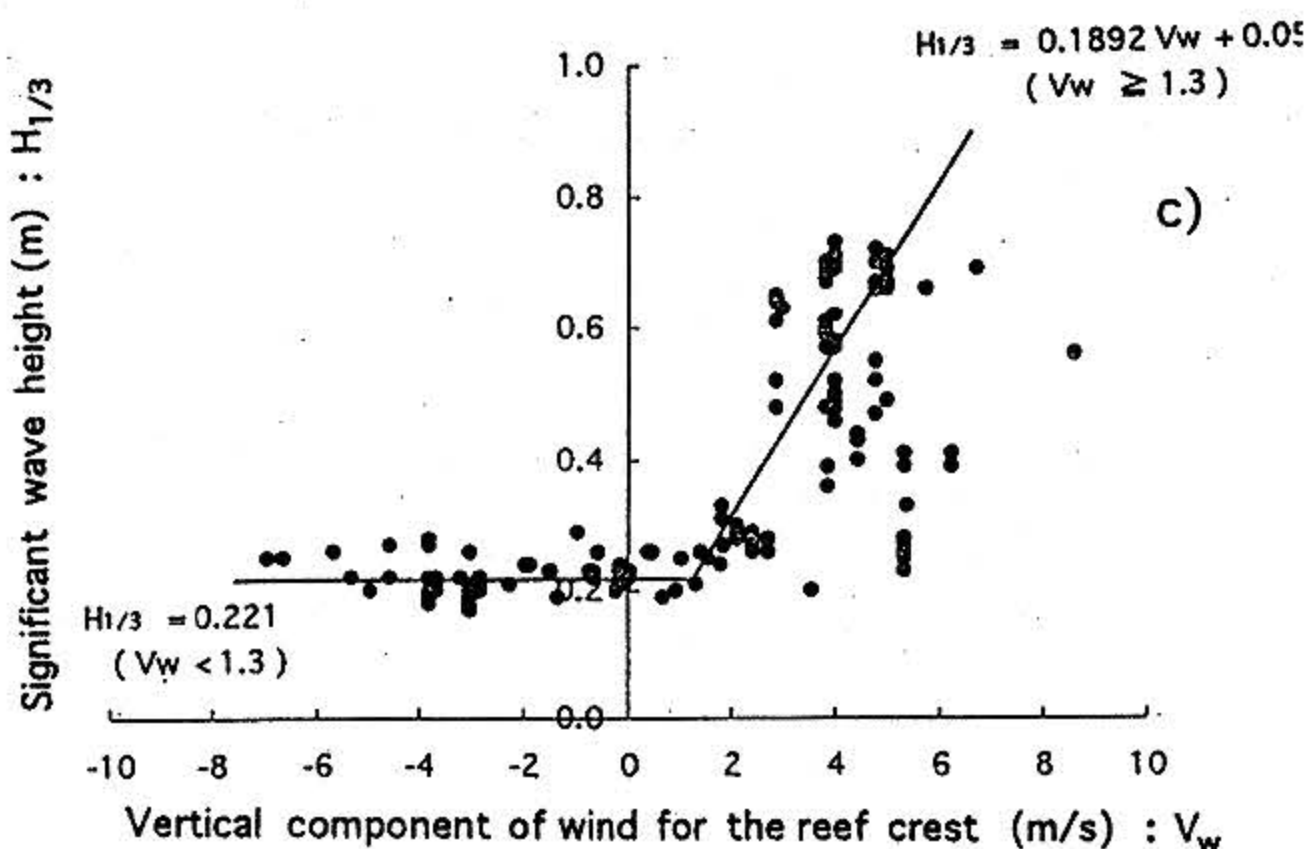
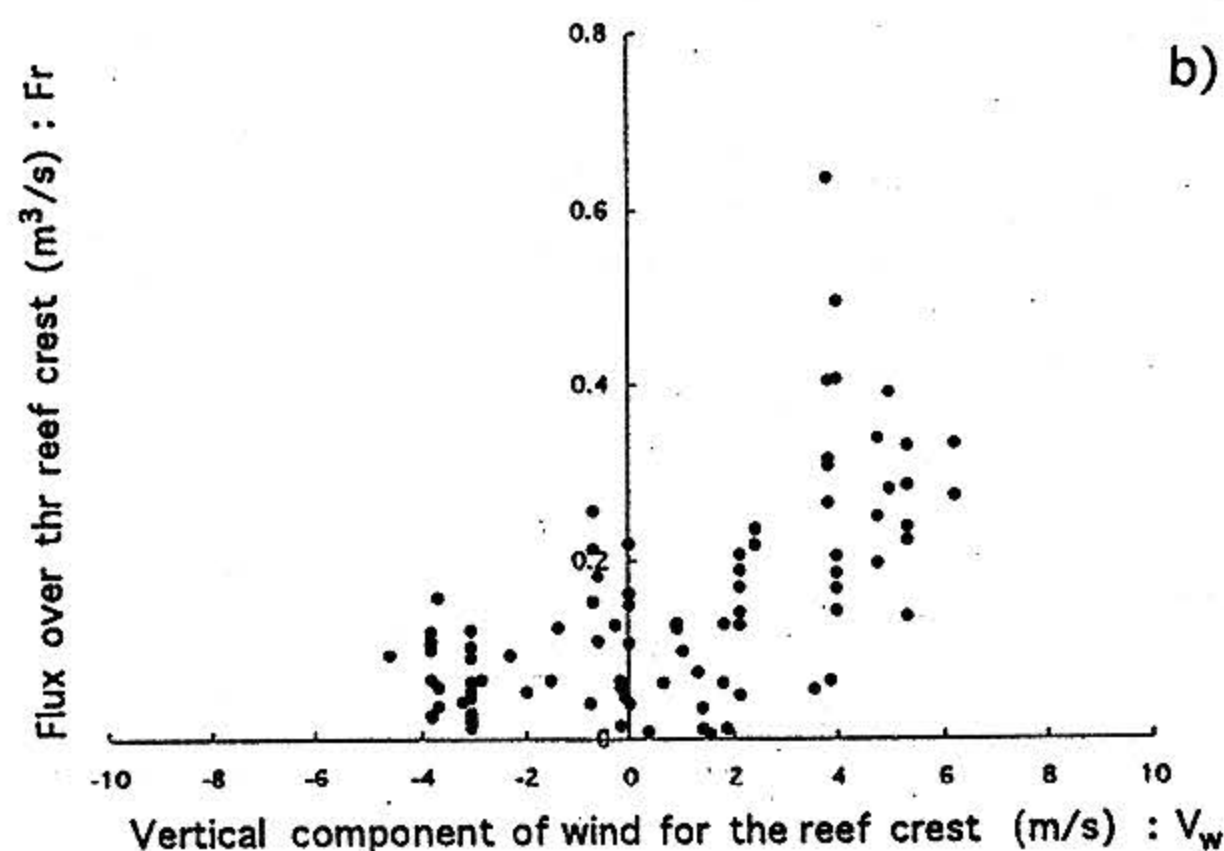
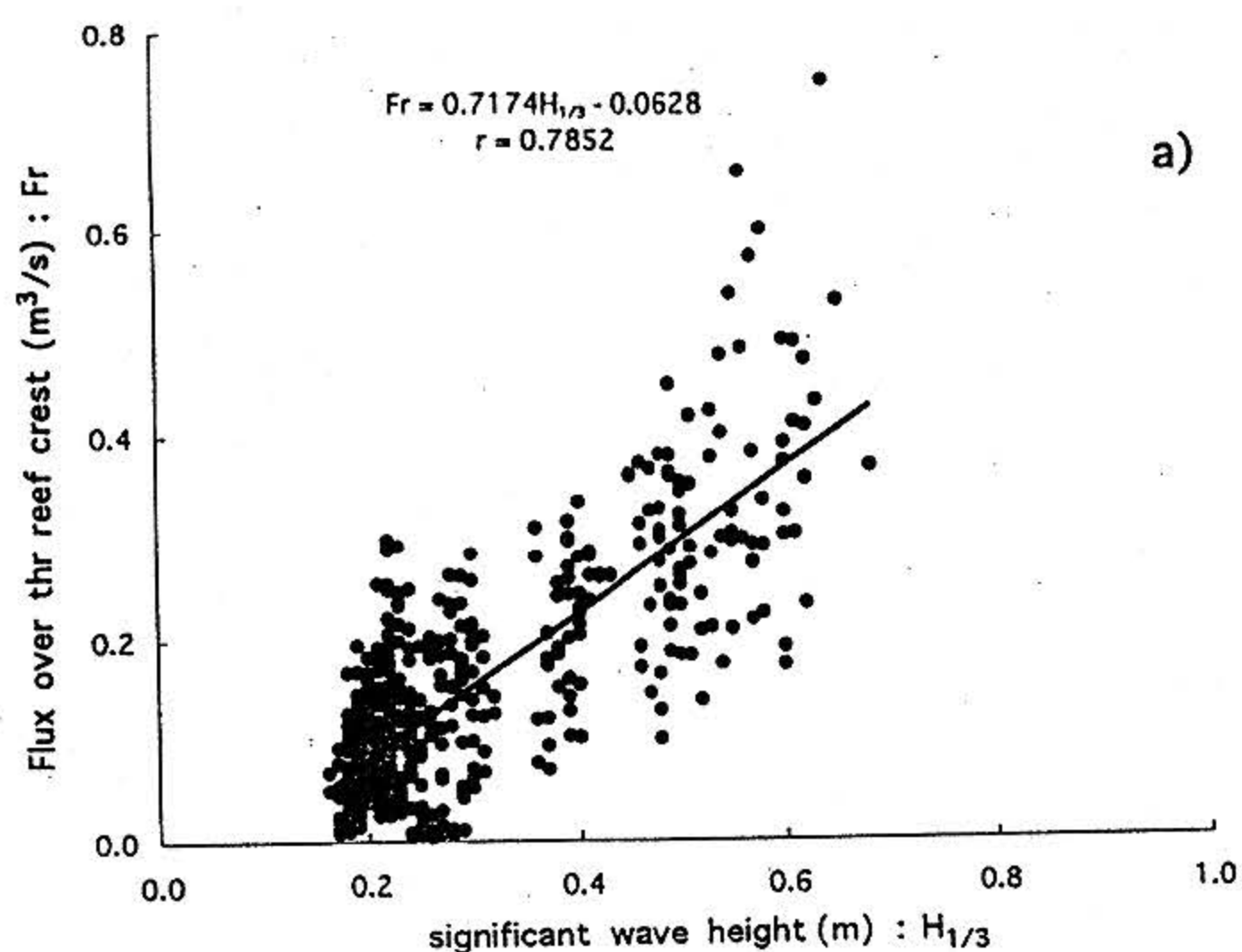


図10 リーフ上の流量(F_r)・リーフに垂直な風成分(V_w)・リーフ外側の波高($H_{1/3}$)の関係
a) $H_{1/3}$ と F_r の関係, b) V_w と F_r の関係, c) V_w と $H_{1/3}$ の関係

Fig.10 The relations of flux over the reef crest (F_r), vertical component of wind against the reef crest (V_w) and significant wave height ($H_{1/3}$).
a): relation of $H_{1/3}$ and F_r , b): relation of V_w and F_r , c): relation of V_w and $H_{1/3}$.

3.2 モデル化

(1) 海水流動モデル

流動モデルは、差分法を用いた2層レベルモデルである。計算領域は、川平湾を含む川平サンゴ礁全体が入るようにし、礁縁より外側の外洋の一部も含まれている(図11)。水平方向の格子間隔は70mとした。鉛直方向には1層目の厚さを2mとし、それ以下を2層目とした。したがって、この海域ではリーフ内はすべて1層となっている。また、以前に行った詳細な水深観測で得られたリーフ内での海底地形のデータをモデルに組み込み使用した。外力としての風は、伊原間観測所で観測された1時間毎の風向風速データをそのまま計算条件として与えた。ただし、空間的な分布は一様となっている。潮汐は、期間中の平均的な振幅を選んで1分潮で与えた(振幅80cm, 周期12時間)。海底摩擦係数については、水深が2m以浅の海域においては水深の関数とし、それ以外は一定値を用いた。その他のパラメータの設定は、沿岸海域の一般的な値を用いた。詳細は表1に示した。

(2) リーフ条件の組み込み

リーフ上の流れは、波浪に起因する流れである海浜流として扱う方法があるが、この場合波の場の計算により流れの外力となるradiation stressを計算しなければならない⁹⁾。そこで、複雑な計算を避け、簡略化した形でradiation stressの効果を表現するために次のようなリーフ条件を設定した。

基本的な考え方は、線境界を設定し(図11)、境界条件として強制的な流量を与えている。流動計算への組み込み手順は、以下の通りである。

まず、計算領域全体の各グリッドでの水位と流量が計算された後、設定した線境界の位置における流量を強制的に(4)、(5)式にしたがって得られた単位断面当たりの流量に置き換える。次に運動量が保存されるように、計算領域全体にわたって再度水位計算を行う。この時、時間ステップは進まない。この計算によって、リーフ条件のある境界線の沖側では水位が低くなり、陸側では水位が高くなる。

(3) 開境界条件の設定

本流動モデルの計算領域は、開境界によってリーフが切れている。この場合、上記のようなリーフ条件を設定すると、リーフ条件による水位の上昇は、リーフ内側の開境界では保たれず水位差が生じてしまう。そこで、リーフ内側の開境界においても水位差を生じないような開境

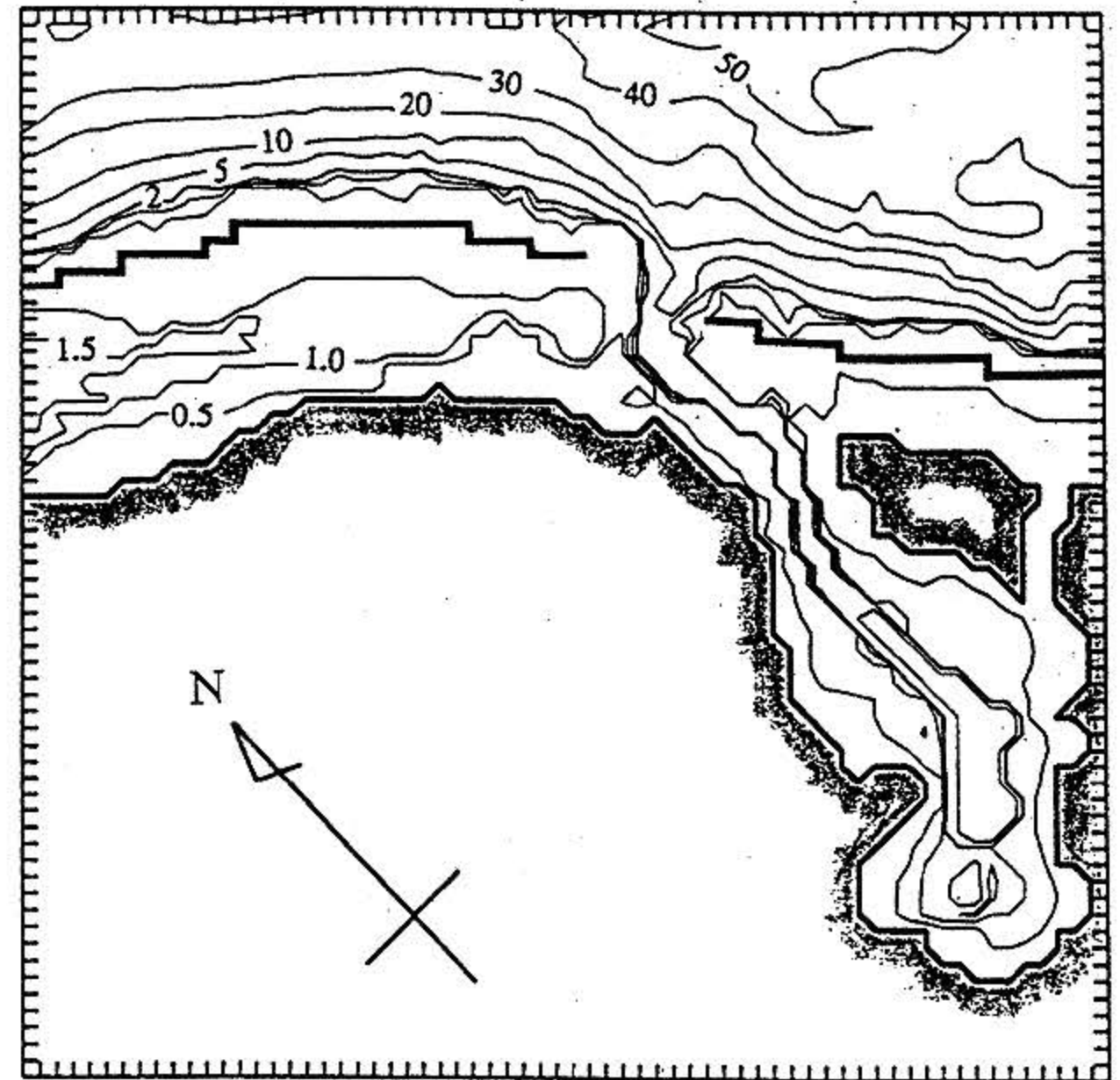


図11 海水流動モデルの海底地形と線境界によるリーフ条件の設定位置

Fig.11 Bottom topography on the numerical flow model and position of reef crest condition by line boundaries.

表1 流動計算初期条件

Table 1 Initial values of parameters on the flow calculation

Parameter	Value
Time step: Δt	2 sec
Horizontal mesh scale : $\Delta x, \Delta y$	70m
Drag coefficient : C_d	0.0013
Horizontal eddy viscosity : K_h	$10 \text{ m}^2/\text{s}$
Vertical eddy viscosity : K_z	$0.01 \text{ m}^2/\text{s}$
Coriolis parameter : $f = 2 \Omega \sin \phi$	$6.0 \times 10^{-5} / \text{s}$
Thickness of upper level : h_l	2 m
Bottom friction coefficient : γb^2	$0.0026 \quad (h \geq 2 \text{ m})$ $g / (\zeta + h) C^2 \quad (h < 2 \text{ m})^*$
Tidal condition	
Period : T	12hour (S2)
Amplitude : a	0.8m

* g : gravitational acceleration (9.8 m/s^2)

ζ : sea level (m)

h : depth (m)

$C = 1/n \cdot h^{1/6}$ ($n = 0.026$: Manning roughness coefficient)

境条件が必要となる。水位に対する開境界条件をなにも与えない場合のy方向の水位の断面は、左右どちらの開境界においても開境界へ近づくにつれ低下する(図12)。そこで、左右の開境界においてそれぞれに水位差を最小限にするような強制水位を与えるという開境界条件を設定した。水位の与え方は、リーフ内側で水位が最も高くなる点をモニタ点として水路を隔てた左右のリーフに置き、その点の水位の何%かを開境界での強制水位として与えるものである。左右リーフのモニタ点は、それぞれ計算グリッド上のxy座標で(32, 47), (53, 43)とした。この各モニタ点の水位を1としたときの両境界での強制水位の高さの割合をそれぞれ γ_L , γ_R というパラメータで表現した。本モデルでは、このパラメータの最適値として $\gamma_L=0.01$, $\gamma_R=0.04$ という値を用いた。これによって、満潮時でもみられたリーフ内側開境界からの極端な流出はなくなった(図13)。

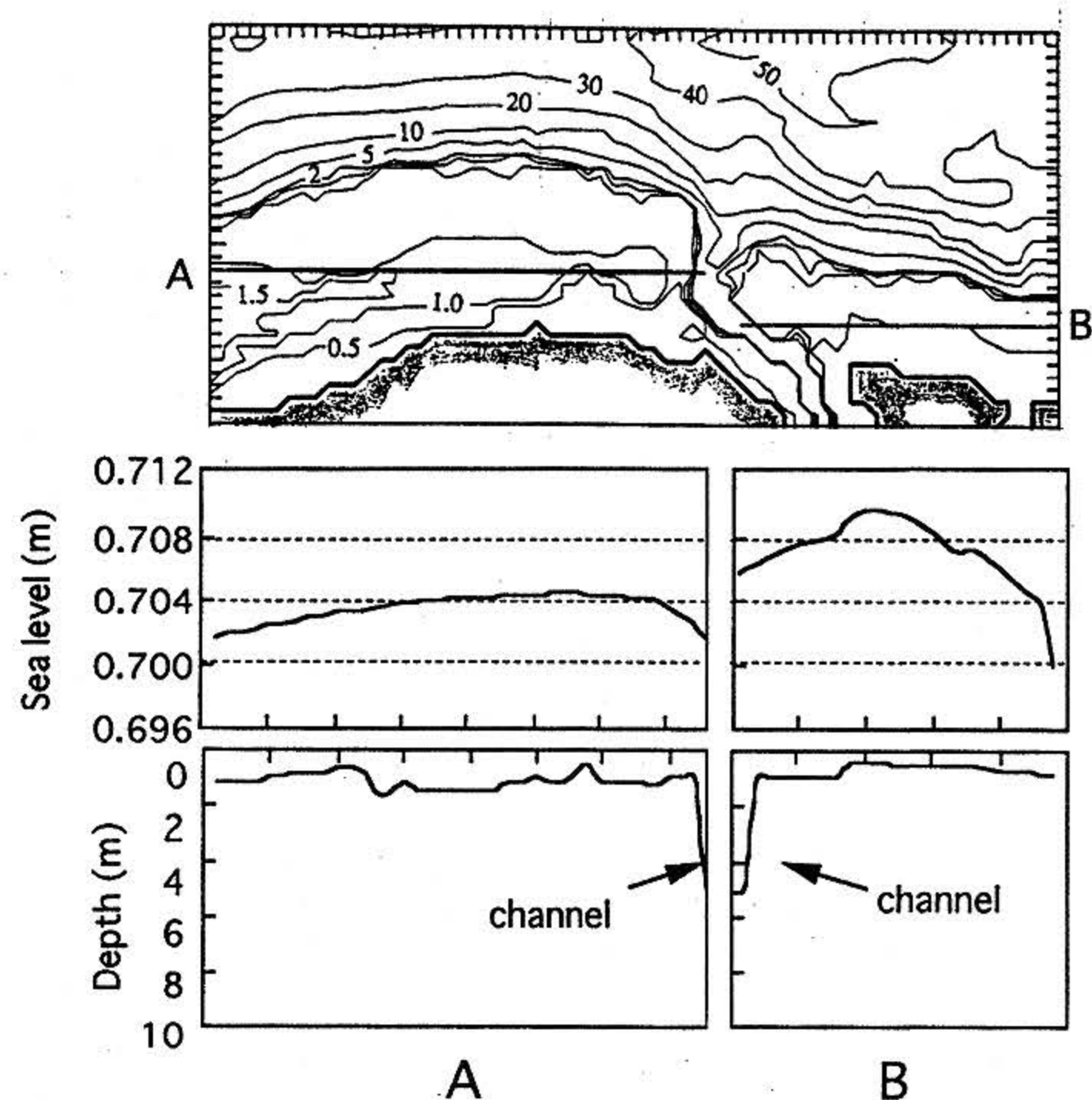


図12 y方向の水位の断面(満潮時)

Aは左リーフ, Bは右リーフ後方での断面。

Fig.12 Vertical profile of sea level along the y axis.

A: section behind the left reef crest.

B: section behind the right reef crest.

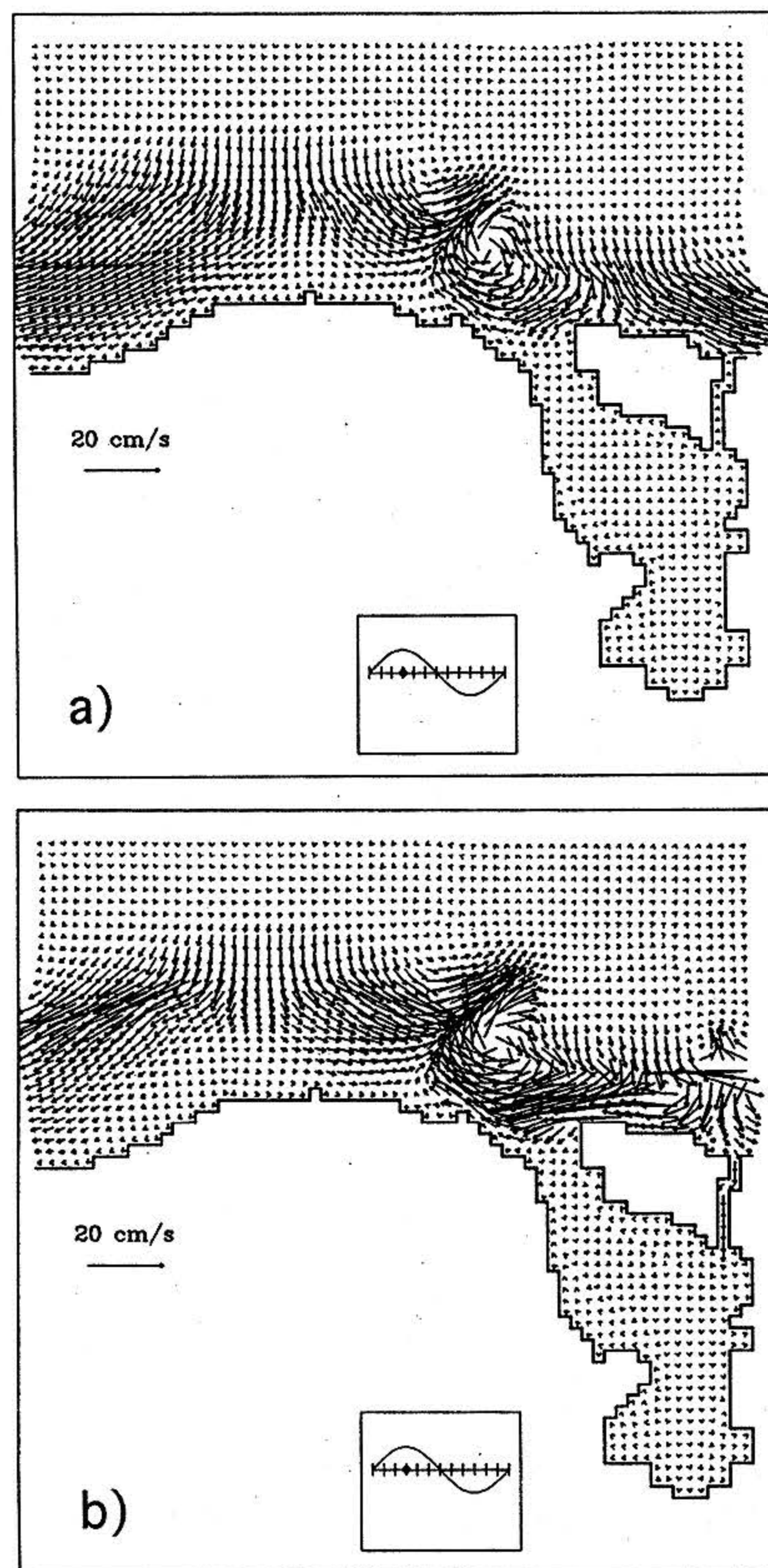


図13 水位制御による開境界条件の効果

a)は $\gamma_L=0$, $\gamma_R=0$, b)は $\gamma_L=0.01$, $\gamma_R=0.04$ 。

γ_L , γ_R は、それぞれ左右開境界における水位制御のパラメータ。

Fig.13 Effect by using the open boundary condition with the control of sea level.

a): $\gamma_L=0$, $\gamma_R=0$. b): $\gamma_L=0.01$, $\gamma_R=0.04$.

γ_L and γ_R are parameters of left and right open boundary with the control of sea level.

表2 流向流速観測点に相当するモデル上の位置

Table 2 Grid positions on the numerical model for the points of flow measurement.

Station number	Coordinates	Depth of model
St.2 (crest)	(19, 52)	0.7m
St.3 (moat)	(28, 47)	1.2m
St.5 (moat near the channel)	(36, 46)	1.0m
St.6 (Kabira bay)	(55, 25)	5.0m

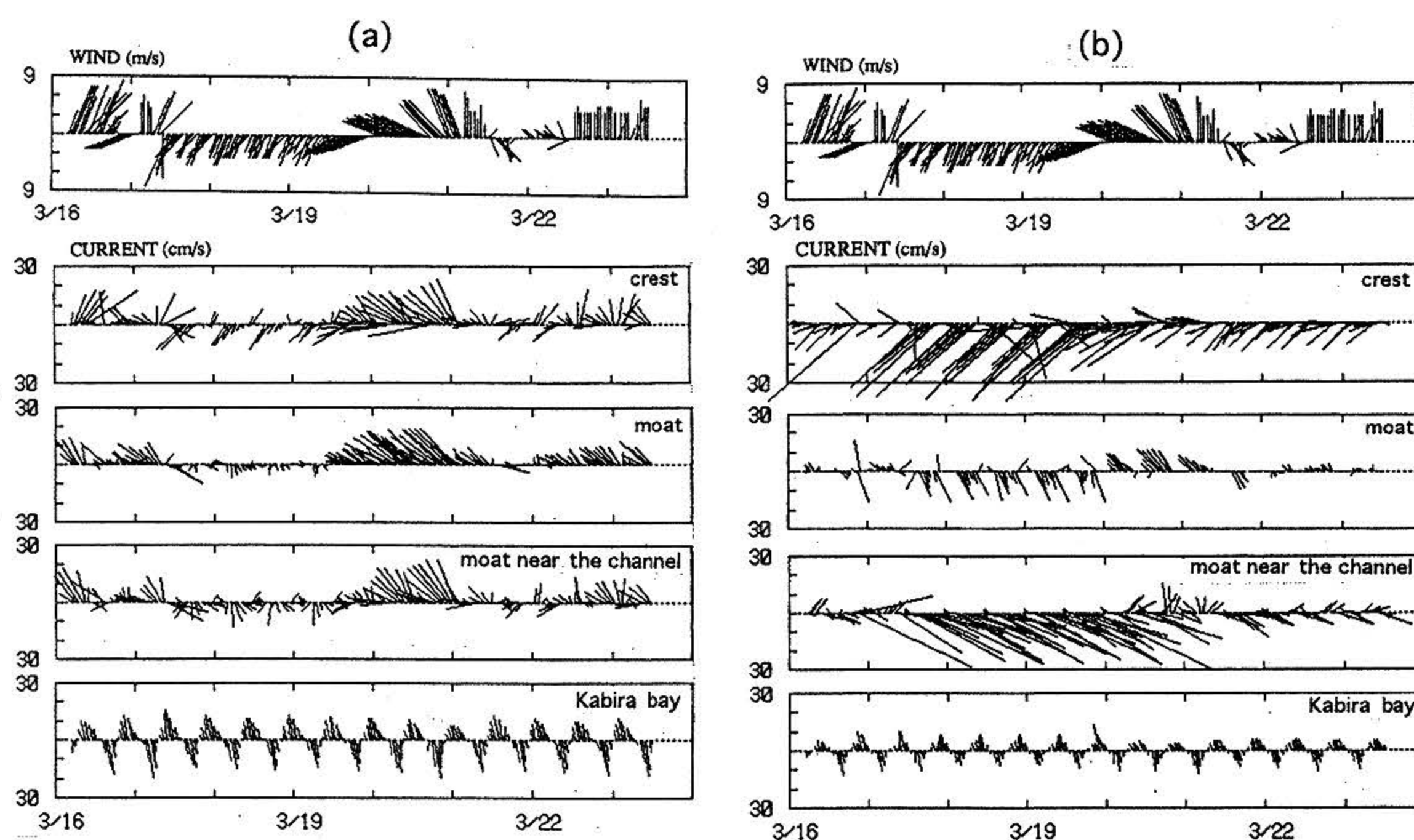


図14 リーフ条件のモデル化による流動シミュレーション結果

(a) はリーフ条件なし, (b) はあり。

Fig.14 Result of numerical flow simulation by using the reef crest condition.

(a): useless the condition, (b): use the condition.

3.3 リーフ条件の効果

上記のリーフ条件及びそれに伴う水位の開境界条件を流動モデルに用いて、今回観測した期間の海水流動シミュレーションを行った。今回の海域調査で流速計を設置した各地点（表2）において、リーフ条件の設定の有無による流れの時間変化を比較した（図14）。リーフ条件を何も与えない場合には、礁嶺、礁池、水路横の礁池では

とんど同じ流動パターンとなり差が見られない。一方、リーフ条件を与えると、観測で得られた礁嶺、礁池、水路横の礁池でのそれぞれの流動特性が非常によく表現できることがわかった。また、川平湾内の流れに関しては、特に大きな流動パターンの差は見られず、全体的に流速が小さくなる傾向が見られた。

4 おわりに

サンゴ礁海域の生態系変動や物質循環を把握する手法のひとつとして、川平サンゴ礁におけるリーフ条件のモデル化を行った。現場観測のデータに基づき、リーフ上の流量を波高の変化に伴う風速の関数で表現することによって、複雑な計算過程を伴わない非常に簡略化したリーフ条件を設定することができた。そのため、数値シミュレーションモデルに組み込む際にも、計算時間に負担をかけることはほとんどないといえる。

一方、今回モデル化のための条件として用いた現場データは、石垣島の川平サンゴ礁だけであり、この条件設定が必ずしも他の海域において適用するとは限らない。しかし、川平サンゴ礁は、典型的な裾礁であり日本のサンゴ礁の大部分はこのタイプに属するため、他のサンゴ礁海域においても十分に有効な手法だと思われる。ただし、風況と波高の関係においては、地形や他の海域との接続状況によって、その海域独特の特性が生じる可能性が高い。したがって、海域毎にリーフ条件のパラメータを変更することが望ましいだろう。

さらに、海水流動の現況の再現性については、あまり精度が良いとはいえない。これは、流動モデルそのものにまだいろいろと問題があるためである。その理由の一つは、サンゴ礁海域は他の海域に比べて非常に流動場が複雑であり、現場観測も難しいことが挙げられる。サンゴ礁は生物相が豊富であり、環境の変化に敏感な生態系をもつことから、地球環境変動のモニタ海域にもなり得る。そういう意味では、今後サンゴ礁生態系変動の研究が期待される。そのためにも、流動場を確実に把握しておくことは重要なことである。

最後に、本研究で利用した石垣島の海域調査データは、

科学技術振興調整費による「地球科学研究のためのグローバル・データセット作成研究」における「サンゴ礁の水質判別手法の開発」の一環として得られたものである。

参考文献

- 1) 宇野木：沿岸の海洋物理学，東海大学出版会，東京，672 pp. (1993)
- 2) 寺尾ほか：リーフにおける波浪変形について，第28回海岸工学講演会論文集，133-137. (1981)
- 3) 中村・工藤：サンゴ礁海域の海水流動数値シミュレーション，海洋科学技術センター試験研究報告，30，107-125. (1993)
- 4) 谷本・宇田：サンゴ礁海岸における波，流れ，地形変形に関する研究，土木研究所報告，181-3，85-182. (1990)
- 5) K.P.Black：The relative importance of local retention and inter-reef dispersal of neutrally buoyant material on coral reefs. Coral Reefs, 12, 43-53. (1993)
- 6) 細川：那覇港の水質とサンゴ礁保全に関する数値計算，港湾技術研究所技研資料，731, 1-28. (1992)
- 7) 中村・工藤：川平サンゴ礁の海水流動シミュレーション，1995年度日本海洋学会秋季大会講演要旨集，172-173. (1995)
- 8) 和達監修：海洋大事典，東京堂出版，東京，589 pp. (1987)
- 9) 本間監修：第1編集6章海浜流，海岸環境工学，東京大学出版会，東京，104-124. (1995)

(原稿受理：1995年12月28日)