

リーフの筋目模様から予見された流れの数値計算による検証

谷本 修志*・宇多 高明**・高木 利光***

1. まえがき

熱帯・亜熱帯の島々ではサンゴ礁の発達が見られ、自然の持つ防波堤として有効な機能を発揮している。近年、このようなサンゴ礁を模倣した人工リーフが各地で計画、施工されるようになったが、天然のサンゴ礁の持つ種々の特性を良く理解することは、人工リーフの設計に役立つと思われる。このような見地より、筆者らは沖縄本島の沖泊地区に発達するリーフ周辺において波、流れの観測を実施した(谷本ら, 1988)。観測には種々の方法を用いたが、その中で空間的に広い範囲におけるリーフ上の流れの観測に空中写真の利用が有効なことを明らかにした。すなわち、リーフを撮影した通常空中写真において、リーフ端より岸側に向け細長い筋目模様が見られる場合があり、その模様がリーフ上での流れの流線を示す可能性が大きいことが空中写真と流速計等を用いた現地観測データとの比較により明らかになった。この手法を応用することは、リーフ上での流況観測を手軽に行えるという実用上の利点を有している。なぜならば、新たに空中写真撮影を行わずとも、既存の空中写真を利用することによりリーフ上の流況観察が容易に行えるからである。

一方、この筋目模様に関しては、リーフ上の流れの流線を示すことが指摘されたものの、その形成機構自体は理論的に明らかにされた訳ではなかった。本研究では、リーフ上の平均流速がリーフへの入射波高の変動と高い相関を有すること(谷本ら, 1988)から、この流れは波浪に起因する流れである海浜流と考え、海浜流の数値モデルを用いて検討を行った。検討に際しては、リーフ上の筋目模様が顕著に見られることから、種々の潮位、波浪条件の下でも恒常的にこの流れが発生しやすいのではないかと推論を立て、種々のケースで計算を行った。

2. 仲泊地区における現地観測概要

海浜流の数値計算について述べる前に、検証データを得た現地観測について触れる。現地観測は図-1に示す沖縄県本島中部に位置する仲泊地区において、1987年2月21日～3月11日の19日間に実施した。観測項目は、海底地形測量、定点における波高、水位および流速測定、フロートによる平面流況観測である。計器設置位置は図-1にN1～N6で示す6地点である。次に当研究の発想の元となった筋目模様を示す空中写真を図-2に示す。この写真は1977年11月24日に国土地理院により撮影された。その特徴の詳細については既に前報で述べたので省略するが、写真によればリーフ端よりリーフの切れ目に向かって筋目が何本も走っており、しかもリーフの端に近いほど筋目の濃淡が明瞭であり、汀線近傍では不明瞭となっている。この筋目模様に関し前報では、定点で行われた流速測定の結果との比較において、それがリーフ上の流れの流線に対応すると推定した。さらに、この流れの流速がリーフへの入射波高の変動と相関が高いことが示された。図-1に示すN1～N6における流速と水位上昇量を考慮した水深から、図中に示す流速分布を仮定してリーフ上の流量を算出し、その流量から求めた単位流量と入射波高(N1地点)との関係を図-3に示した。この図からもリーフ上の流れの流量とリーフへの入射波高との相関が高いことがわかる。本研究ではこの推定を海浜流の数値計算により確認した。

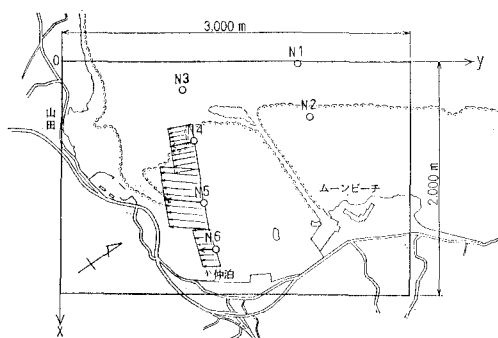


図-1 仲泊地区の位置と計算範囲

* 正会員 (前)建設省土木研究所次長

** 正会員 工博 建設省土木研究所海岸研究室長

*** 正会員 工修 (株)アイ・エス・エー新土木研究所

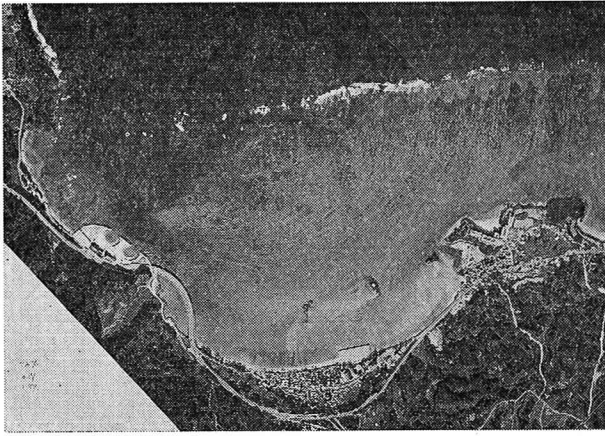


図-2 リーフ上の筋目模様を示す空中写真

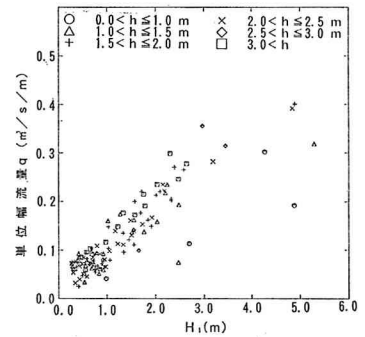


図-3 リーフ内の流量と入射波高の関係

3. 波、流れの数値計算手法

3.1 波の場の計算

波高分布および波向分布は緩勾配方程式を放物型方程式に変形し、差分法を用いて求めた。計算の座標系は図-1に示すように、岸向きに x 軸、沿岸方向に y 軸を設定した。基本式は、速度ポテンシャルを ϕ 、波の波速と群速度を C , C_g 、および角周波数を σ とすると、式(1)で与えられる。

$$\Delta \cdot (CC_g \Delta \phi) + \sigma^2 \frac{C_g}{C} \phi = 0 \quad (1)$$

式(1)において、波の進行方向 (x 軸) に逆行する波がないと仮定すると、次の放物型方程式を得る (平口・丸山, 1986)。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi}{\partial x} = & \left\{ i \left(k_x + \frac{k_y^2}{2k_x} \right) \right. \\ & - \frac{1}{2k_x CC_g} \frac{\partial}{\partial x} (k_x CC_g) \Big\} \phi \\ & + \frac{1}{2k_x CC_g} \frac{\partial}{\partial x} \left(CC_g \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) - \alpha_B \phi_B \quad (2) \end{aligned}$$

ここに、 k_x, k_y : x, y 方向の波数成分、 α_B : 碎波減衰を表す係数、 i : 虚数単位である。また、碎波減衰項 α_B は、次式によって求める。

$$\alpha_B = C_1 \frac{s}{h} \left(\frac{a}{C_2 h} - 1 \right)^{1/2} \quad (3)$$

ここに $s = \tan \beta$: 碎波点付近の海底勾配、 $a = H/2$: 波の振幅、 h : 水深、 C_1, C_2 : 係数、である。実際の数値計算では、基礎式(2)を、沖側境界に設定した境界値から岸に向けて ϕ について解いた。差分法としては、クラック・ニコルソンの陰解法を用いた。

3.2 流れの場の計算

流れの場の計算においては、波と流れの相互干渉は無視し、外力となるラディエーション・ストレスは進行波

を対象として微小振幅波理論から求めた。海底摩擦項は波と流れの共存場におけるものとして評価した。計算の基本式は以下のとおりである。

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{PQ}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ + M_x + F_x + L_x = 0 \quad (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{PQ}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} \\ + M_y + F_y + L_y = 0 \quad (5) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial D}{\partial x} + \frac{\partial D}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

ここに、 $D = h + \eta$, $P = uD$, $Q = vD$ である。さらに、 M_x, M_y はラディエーション・ストレスで次式のように表される。

$$M_x = \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right] \quad (7)$$

$$M_y = \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial S_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right] \quad (8)$$

海底摩擦項は西村 (1982) によれば次式のように表される。

$$F_x = f_{xx}P + f_{xy}Q \quad (9)$$

$$F_y = f_{yx}P + f_{yy}Q \quad (10)$$

ここに、

$$f = \begin{bmatrix} f_{xx} & f_{xy} \\ f_{yx} & f_{yy} \end{bmatrix} = F \begin{bmatrix} 1 + \cos^2 \theta & 1/2 \sin 2\theta \\ 1/2 \sin 2\theta & 1 + \sin^2 \theta \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$F = 2C_f \frac{H}{TD \sinh kD} \quad (12)$$

である。また、水平渦粘性項は次式で与えられる。

$$L_x = -\nu_H \left[\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} \right] \quad (13)$$

$$L_y = -\nu_H \left[\frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Q}{\partial y^2} \right] \quad (14)$$

各変数の定義は次のようである。 P, Q : x, y 方向の線流量成分, η : 静水面からの水位変化量, h : 水深, H : 波高, T : 周期, θ : 波向, C_f : 海底摩擦係数, ν_H : 水平渦動粘性係数。

4. 数値計算結果と実測値との比較

検証計算ケースとしては、観測時の海象状況から高・低波浪時、満潮・干潮時を組み合わせた条件とし、全体で7ケースを設定した(表一1)。ただし、ケース2, 3は C_f または ν_H のみをケース1の条件と変えたものであり、他の条件は同一である。また、入射波高, 周期, 潮位は、リーフ沖の2地点(N1, N3)の観測値の平均とし、波浪はリーフエッジに対しほぼ直角に入射するものとした。また、 C_f は一般に砂浜海岸では0.01程度の値が適切と考えられているが、リーフではかなり大きな凹凸があることから、 $C_f=0.05$ と大きくした場合の計算も行った(ケース1, 2)。また、 ν_H については、 $10.0 \text{ m}^2/\text{s}$ と $5.0 \text{ m}^2/\text{s}$ の2通り変えて計算を行った(ケース1, 3)。入射波浪条件については、現地における波浪が不規則波であり、一方シミュレーションは規則波を対象としていることから、不規則波から求められる幾つかの代表波浪(有義波浪, 平均波浪, エネルギー平均波浪等)から海浜流計算に適した代表波浪を求める必要がある。ここでは、海浜流の外力となるラディエーション・ストレスが波浪エネルギーで表現されていることから、ラディエーション・ストレスを計算する際にエネルギー平均波高を用いることとした。その際、有義波高からエネルギー平均波高への換算は波高の出現分布をレーリー分布と仮定して、次式によった。

$$H_{rms} = H_{1/8} / 1.416 \quad \dots\dots\dots (15)$$

また、周期は便宜的に有義周期を用いた。

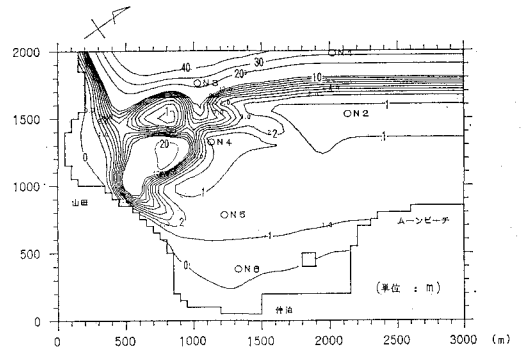
計算範囲は図一1に示すように、仲泊地区の沿岸方向に3,000m、岸沖方向に2,000mの矩形領域である。この区域を50m間隔の正方格子で分割した。計算領域の北側境界は、リーフの空中写真(図一2)から、リーフ内の流れが南北に別れ、そこを横切る流量がほぼ0と予見される位置とした。海底地形は、図一4に示すように、1987年3月測定の深浅図をもとに入力した。

満潮時に高波浪が来襲した場合($H_i=4.61 \text{ m}$, $T_i=11.3 \text{ s}$)と干潮時に高波浪が来襲した場合($H_i=2.28 \text{ m}$, $T_i=7.9 \text{ s}$)における波高分布の計算結果を図一5(ケース1)、図一6(ケース3)に各々示した。計算領域の中央より右半分ではほぼ一様にリーフが発達し、浅くなっているために、波高はリーフエッジ付近で碎波により急激に減衰し、礁原では非常に静穏となる。この特徴は特にケース1(図一5)の場合に顕著に見られる。一方、計算領域の左側半分では図一4に示したようにリーフの切れ目

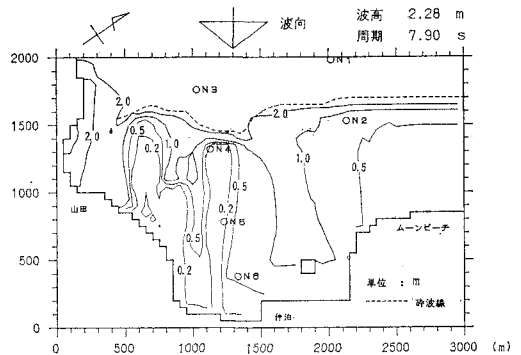
表一1 計算ケース一覧

ケース No.	観測日 時	波条 浪件	潮位 基準D.L.*	パラメータ	
				C_f	ν_H (m^2/s)
1	2/28 8:00	$H_i = 4.61 \text{ m}$ $T = 11.3 \text{ s}$	D.L.+2.14m (満潮)	0.01	10.0
2	"	"	"	0.05	10.0
3	"	"	"	0.01	5.0
4	2/27 12:00	$H_i = 2.28 \text{ m}$ $T = 7.9 \text{ s}$	D.L.+0.94m (干潮)	0.01	10.0
5	3/6 10:00	$H_i = 0.26 \text{ m}$ $T = 6.0 \text{ s}$	D.L.+1.86m (満潮)	"	"
6	3/6 16:00	$H_i = 0.36 \text{ m}$ $T = 7.1 \text{ s}$	D.L.+0.49m (干潮)	"	"
7	3/3 10:00	$H_i = 0.98 \text{ m}$ $T = 7.8 \text{ s}$	D.L.+2.08m (満潮)	"	"

* D.L.: 基本水準面(N.P.-0.1205m, N.P.は那覇港中等潮位)



図一4 計算に用いたリーフ周辺の海底地形



図一5 波高分布(ケース1, $H_i=4.61 \text{ m}$)

があり急深となっているために、そこからの侵入波浪により北側より高波高であり、またリーフの端部での海底形状が複雑なために回折・屈折効果により波高分布が複

雑で変化が大きい。

次に 図-5, 6 の波浪場における海浜流の流況をそれぞれ 図-7, 8 に示す。いずれの場合もリーフエッジ付近で岸向き流れが生じ、リーフ内では全体として南下する方向に流れ、リーフの切れ目から強い沖向き流れとなっており流出していることが明らかである。また、全体的な流れのパターンは潮位条件によりあまり変化しないが、流速はリーフに入射する波浪の大きさに比例して大きくなっている。一方、潮位が高かったり(ケース6)、または入射波高が 0.5 m 以下と小さい条件(ケース4, 5)では、リーフエッジで碎波が生じなく、図-7, 8 で示したような流況パターンは生じなくなり、また流速の絶対値も非常に小さくなった。

表-2 にケース1の波高、流速および平均水位の実測値と計算値を示した。N2の波高およびN4の流速は計算の方がいずれも大きめになっているが、その他は両者はほぼ一致しており、特に水位上昇量はかなり良く一致している。

次に、数値計算によって得られた流況と、図-2 に示したリーフの空中写真とを比較すると、空中写真に表れた筋目模様は、図-7 または図-8 の流速ベクトルを滑らかに連ねた線と非常に良く対応する。さらに、前報の観測データのうち 1987 年 3 月 3 日の 10 時と 14 時における流速測定結果と計算結果を比較した。図-9, 10 に電磁流速計による観測結果とフロート追跡による観測結果の両者を示した。観測結果は、礁原からリーフの切れ目に向かう緩い流れと、リーフの切れ目における強い流出流の存在を示している。これらの流況は計算から得られた流速分布(図-7, 8)と良く一致することがわかる。これらのことより、前報で推定された筋目模様とリーフ

上の流れが対応するのではないかと推論は、数値計算により確認されたことになる。

流れのメカニズムを推定すると、計算ではリーフエッジ付近で碎波することで急激に波高が減衰し、これによりリーフ内へのラディエーション・ストレス勾配が生じその外力勾配でリーフ内への流入が起こっていると考えられる。流れ込んだ流量は、ラディエーション・ストレス勾配のより小さい箇所当たる碎波が生じていないリーフの切れ目から沖へ流出している。実際の現象もほぼ

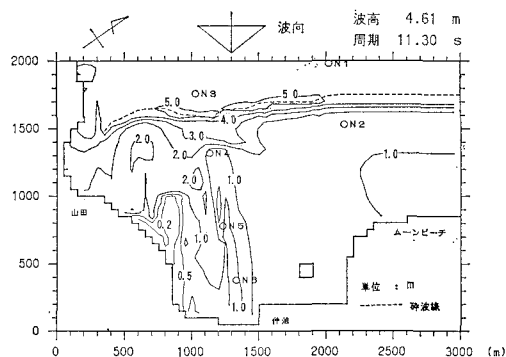


図-6 波高分布 (ケース4, $H_t=2.28$ m)

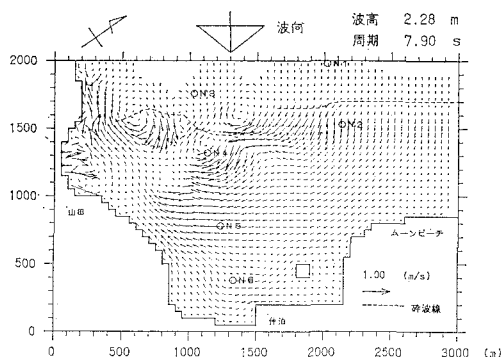


図-7 海浜流の流況 (ケース1, $H_t=4.61$ m)

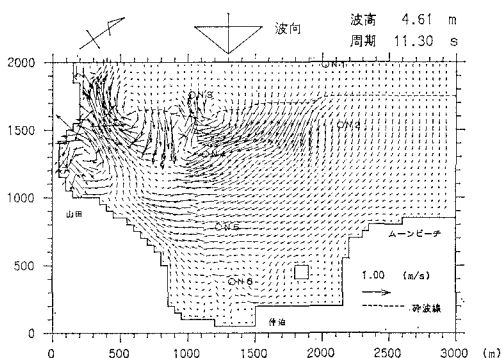


図-8 海浜流の流況 (ケース4, $H_t=2.28$ m)

表-2 現地観測結果と計算結果の比較

項目 測点No.	波 高 (m)	絶対流速 (m/s)	水位上昇量 (m)
N1	4.61	0.04	0.00
	4.79	—	—
N2	1.39	0.22	0.31
	0.76	—	0.27
N3	4.55	0.14	0.00
	4.42	—	—
N4	1.18	0.46	0.20
	—	0.18	—
N5	1.14	0.27	0.24
	0.96	0.41	0.21
N6	1.43	0.10	0.23
	—	0.15	—

注) 上段: 計算値、下段: 観測値
—: 観測値なし

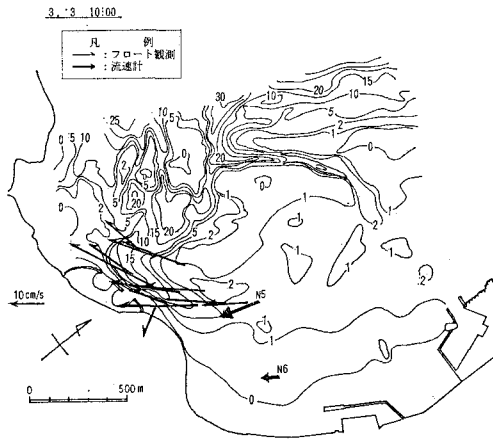


図-9 流速計およびフロートを用いた観測によって得られた流況 (1987年3月3日, 10:00 観測)

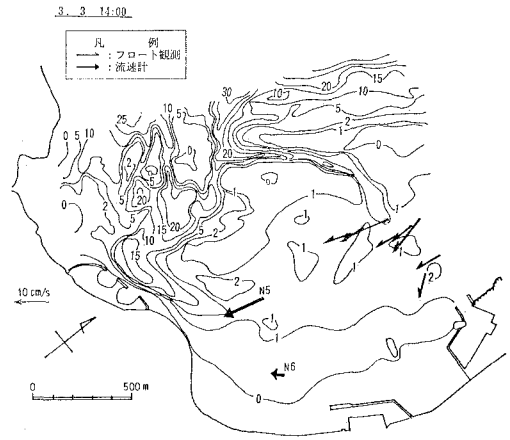


図-10 流速計およびフロートを用いて観測によって得られた流況 (1987年3月3日, 14:00 観測)

同様なメカニズムで起こっているものと推定される。

5. 結 論

本研究では、リーフの空中写真に表れた筋目模様がリーフ上に発達する海浜流の流線に対応するのではないかと推論 (谷本ら, 1988) を海浜流の数値モデルにより検証した。数値計算の結果によれば、潮位にかかわらず高波浪時にリーフエッジ付近では岸向き流れが生じ、その流れがリーフ内で沿岸方向に流れた後、リーフの切れ目より沖向きに流出した。この時の流れの流線の形は空中写真に表れた筋目模様と良い対応を示し、さらに現地観測結果とも定量的に良い一致を示した。

以上、前報に続く本研究によれば、筋目模様と海浜流

との対応関係が現地観測と数値計算の両面より明らかにされたことになる。従って、既存の空中写真を利用することにより種々の地点におけるリーフ上の基本的な流れのパターンを、現地観測を実施する以前にあらかじめ推定できる可能性があることがわかった。

参 考 文 献

- 谷本修志・中野泰雄・大月和義・宇多高明・小俣 篤 (1988): 沖縄県仲泊地区のリーフ周辺での波と流れの観測, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 207~211.
- 西村仁嗣 (1982): 海浜循環流の数値シミュレーション, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 333~337.
- 平口博丸・丸山康樹 (1986): 斜め入射波に対する放物型方程式の適用性の拡張, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 114~118.