

〔参考資料〕 佐和田浜地先の礁湖内における物理的環境

農業土木試験場 木村 晴 保

この報告書は、沖縄開発庁沖縄総合事務局からの依頼により、昭和52年12月12日～17日に現地の踏査及び資料の収集を行い、これに基づき、特に当地区の礁湖内の波浪環境についてまとめたものである。

佐和田浜の沖側には東西約2 km、南北約3 kmにわたってリーフが形成されていて、リーフ内側（礁湖）の平均水深は約3 mである。リーフの天端幅は200 mにも達していて、かつ天端水深は大潮干潮時には干上がり、大潮平均高潮位でも1.4 m程度であるため、リーフは天然の良好な防波堤といえる。

例えば、20年に1回程度しか発生しないような波高9.0 m・周期10 secの大波がリーフに入射しても、リーフの後端では波高が1.35 mと激減する。

礁湖内では、波はさらに水深や風の影響を受けて変形する。いま、波高2 m・周期8 secの波について、水深が3.0 mでの底質の移動限界粒径を試算すると0.3 mmを得る。

礁湖内の50 μm粒径をみると（アジア航測）、測点5では0.31 mmと小さいが、他の測点でのそれは0.7～1.1 mmと大きいため、砂に埋没させないように施設を敷設することはさほど困難ではないと思われる。しかし、これは限られた資料に基づき机上で推算した結果であるため、現在敷設されているエフィラ藻礁の結果を参考にして結論すべきことである。

礁湖内の海水流動は、潮汐と波によるものとが考えられる。これらを概算してみると、1潮汐当たり礁湖内の海水の1/4程度の海水が出入することになる。また、波による海水流動は波高を0.3 mとすると潮汐のそれよりも10倍以上にもなる。

I 礁湖内の最大設計波の推算

1 沖波の推算値

表1及び図1,2は、沖縄県農林水産部農林建設課が沖縄県列島の沿岸における海岸保全、海岸生産基盤開発等の諸計画、設計等に必要設計波浪の調査として、*図-3に示す沿岸（-200 m）7地点における沖波を推算した結果の一部で、これらは過去30年間（1940～1969）における年最大有義波の推算結果（表-1）と有義波の未超過確率の結果（図1,2）である。

当地区の礁湖内の波浪推算に直接関係する沖波はM2地点のもので、これらの結果から5年と20年の超過確率波をみると表-2の値を得る。

これらのことから沖波の最大設計波として表-3の値とする。

2 リーフへの入射波

1で記述した沖波の最大設計波は、水深200 mのM2地点での値で、これがリーフ外縁に達するまでにはさらに風とか海底地形の影響を受けて波高と周期は若干変ると思われるが、リーフ外縁の深淺図として図-4の精度のものしか入手できなかったこと、設計波の H_{max}/L_0 が0.10

* 沖縄県農林水産部農林建設課（昭和50年2月）「第50回沖波調査報告書（沖縄県列島設計沖波調査報告書）」

で、ほぼ充分に発達した波であることなどからリーフ直前での最大設計入射波は表-3の波で近似する。

3 設計潮位

設計潮位は通常天文潮位と異常潮位偏差の和で与える。天文潮位は潮位表もしくは潮位観測により求まる。異常潮位は長期間の観測（10年以上）もしくは異常気象による高潮推算により決定されるが、これに関する資料が入手出来なかったため、ここでは設計潮位は、大潮平均高潮位とし、表-4に示す平良港の潮位定数から、 $Y_{HWL} = 1.74 \text{ m}$ とする。

4 リーフ内縁での最大波

図-4及び伊良部村佐和田浜深淺測量図（アジア航測KK）から、リーフの断面形状を図-5の如く仮定する（基準水面が不明であるためとりあえず、平良港の基準水面とした）とし、図6-1を用いて表-3の波がリーフに入射した際、リーフ内縁での波高（ H' ）を推算すると表-5を得る。

上記の結果とアジア航測KKの結果を比較すると後者の方が入射波として小さな波をとっているにもかかわらずリーフ内縁での波高（No.1, No.2の満潮時）はCASESTUDY2のVO2の値を除きいずれも大きくなっている。これはリーフ天端水深を前者は1.4mとしているのに対し、後者は3.1mと大きい。また、後者はリーフ潜堤とみなしている。これらの点は再検討する必要がある。

II 波による礁湖内底質の移動限界粒径

いま周期8secで、波高が1.0mと2.0mの波による水深ごとの底質移動限界粒径を図7と8から検討してみると表-6の結果を得る。

上記の限界粒径は、砂粒子の比重を $\rho' = 2.65$ として得られたものである。礁湖内底質砂の比重 ρ_0 はこれより小さいと思われるため、 ρ_0 を測定したのち礁湖内底質の限界粒径 d_0 は、表-6の値を

$$d_0 = \frac{\rho' - \rho}{\rho_0 - \rho} d$$

$$= \frac{2.65 - 1.03}{\rho_0 - 1.03} d$$

$$= \frac{1.62}{\rho_0 - 1.03} d$$

で換算する必要がある。

III 礁湖内の海水流動

礁湖内の海水流動は、主に潮汐と波で誘起される水位上昇（Wave set-up）によるものが考えられる。

1. 潮 汐

当地区のリーフ外海での潮汐は、平良港の実測値で代表できる。表-7は平良港の4分潮でこ

* 沖縄開発庁沖縄総合事務局（昭和52年1月）「伊良部村佐和田浜地先および水道域の自然環境調査報告書」

これらの値から任意時刻の潮位は次式により推算することができる。

$$y = \bar{y} + C_1 (H_m + H_s) \cos (29^\circ t - Km + X_1) + C_2 (H' + H_o) \cos [14.5^\circ t - \frac{1}{2} (K' + K_o) + X_2]$$

ここで、 \bar{y} : 平均水面

$$C_1 = \frac{\sqrt{1 + r_1^2 + 2 r_1 \cos \phi_1}}{1 + r_1} \quad : \quad \phi_1 = 1^\circ t + Km - K_s$$

$$C_2 = \frac{\sqrt{1 + r_2^2 + 2 r_2 \cos 2 \phi_2}}{1 + r_2} \quad : \quad \phi_2 = 0.55^\circ t - \frac{1}{2} (K' - K_o)$$

$$X_1 = \tan^{-1} \left[\frac{r_1 \sin \phi_1}{1 + r_1 \cos \phi_1} \right]$$

$$X_2 = \tan^{-1} \left[\frac{1 - r_2}{1 + r_2} \tan \phi_2 \right]$$

表-4 からわかるように平良港の潮汐差は、小潮差で 0.58 m、礁湖内の平均水深はほぼ 3.0 m (アジア航測, 第4表より) であることから1潮汐当たり礁湖内の海水の約 1/5 が出入りすることになる。

2. Wave Set-up

Wave Set-up は波浪のみならず入射海域での海底形状や平面形状にも関係するため、当海域に適應できる一般式はない。通常 Wave Set-up は波高の 10 ~ 20 % 程度と考えられるので、入射波の波高を 0.3 m とすれば入射波側のリーフ縁と波陰側のリーフ縁との水位差は 3 ~ 6 cm となる。この水位差によって生ずるリーフ内の平均流速は

$$\begin{aligned} v &= \frac{1}{\pi} H^{2/3} I^{1/2} \\ &= \frac{1}{0.05} \cdot 3.0^{2/3} \cdot \left(\frac{3 \sim 6}{3.0 \times 10^5} \right)^{1/2} \\ &= 0.13 \sim 0.19 \text{ m/sec} \end{aligned}$$

となる。

いま、潮汐による礁湖内海水流動量と比較してみると

$$\begin{aligned} hw &= \frac{Q}{A} \\ &= \frac{2000 \times 3 \times (0.13 \sim 0.19) \times 12 \times 60 \times 60}{2000 \times 3000} \\ &= 5.6 \sim 7.9 \text{ m} \end{aligned}$$

となり、波による海水流量は潮汐の 10 ~ 14 倍程度となる。

IV エフィラ魚礁に働く波力

計算条件は、

$$\text{設置水深} \quad h = 3.0 \text{ m}$$

波 高 $H = 2.0 \text{ m}$
 周 期 $T = 8 \text{ sec}$
 波 長 $L = 42 \text{ m}$

とする。

$$h/L = 3.0/42 = 0.07, \quad \ell/h = 0.8/3 = 0.27$$

図9から $K_M = 0.04$, $K_D = 0.03$

$$\begin{aligned} \therefore \text{質量力 (F}_{MO}) \text{ max} &= w_0 C_M D^2 H K_M \\ &= 1.03 \times 2.19 \times 1.0^2 \times 2.0 \times 0.04 = 0.180 \text{ (ton)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{抗 力 (F}_{DO}) \text{ max} &= w_0 C_D D H^2 K_D \\ &= 1.03 \times 2.05 \times 1.00 \times 2.0^2 \times 0.03 = 0.253 \text{ (ton)} \end{aligned}$$

質量力と抗力の最大合力は、 $2(F_{DO}) \text{ max} > (F_{MO}) \text{ max}$ であるから

$$\begin{aligned} (F_H) \text{ max} &= (F_{DO}) \text{ max} + \frac{(F_{MO})^2 \text{ max}}{4 (F_{DO}) \text{ max}} \\ &= 0.253 + \frac{0.18^2}{4 \times 0.253} = 0.285 \text{ (ton)} \end{aligned}$$

魚礁の水中重量は、

$$\begin{aligned} W &= (Y_o - Y_w) V \\ &= (2.3 - 1.03) \times 0.8 \times 1.0 \times \frac{2}{3} \times 1.0 \\ &= (2.3 - 1.03) \times 0.53 = 0.67 \text{ (ton)} \end{aligned}$$

摩擦係数を0.5として滑動についてみると、

$$\frac{1}{2} W = \frac{1}{2} \times 0.67 = 0.335 > (F_H) \text{ max} = 0.285$$

となり安定である。

転倒については、計算するまでもなく安定といえる。

V 水道内の海水流動について

図-10は水道流心の縦断図で、基準点が不明であるため、平均潮位との関係は明確でないが、この図や踏査の結果から水道内の海水流動を阻害している原因として、

- ① 水道道底の起伏が大きく、とくに佐和田浜側の出入口の道底が高い。
 - ② 一部の橋の構造がヒューム管で、通水路断面が狭小である。
- が考えられる。

今後の調査項目

1. 礁湖並びに水道内の水位と平良港潮位との関係

<目的>

礁湖内の水理環境（波浪，流れ）並びに水道内の海水流出入量を推算するため

2. 水道域の水位と水面積との関係

<目的>

水道内における海水流動の現況把握と改善策の検討資料として

3. 外海波浪（波高，周期，波向）の月別頻度

<目的>

波浪エネルギーを積極的に利用して，礁湖内と水道内の水理環境改善を行う際に必要

4. エフィラ藻礁並びに天然岩石周辺での底質の洗掘と堆砂の現況把握

<目的>

流れ，波浪による水理現象の推測と今後敷設するであろう構造物の設計資料

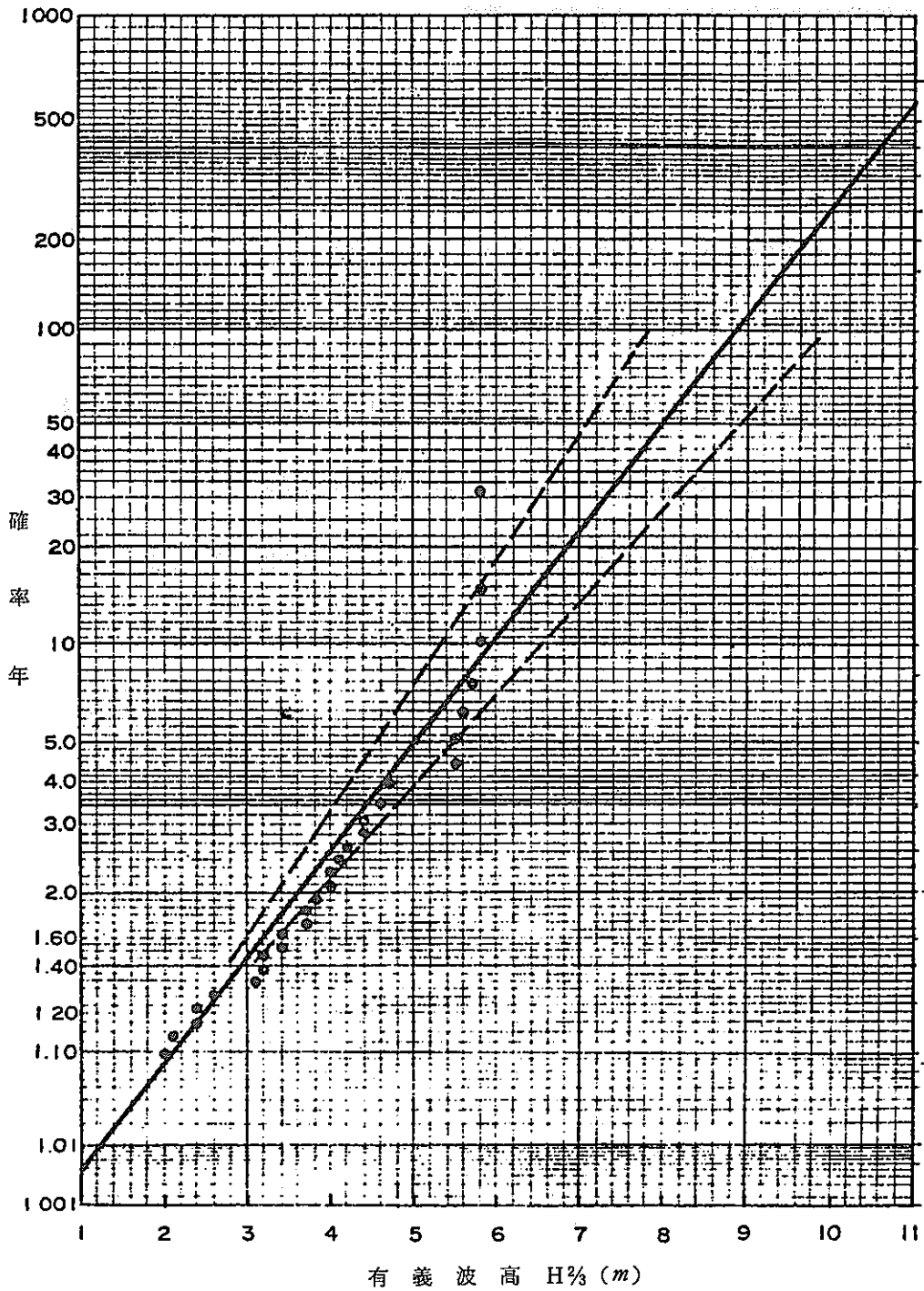


図-1 有義波高の未超過確率 (M1)

Cumbel 法による確率有義波高 (M2 地点)

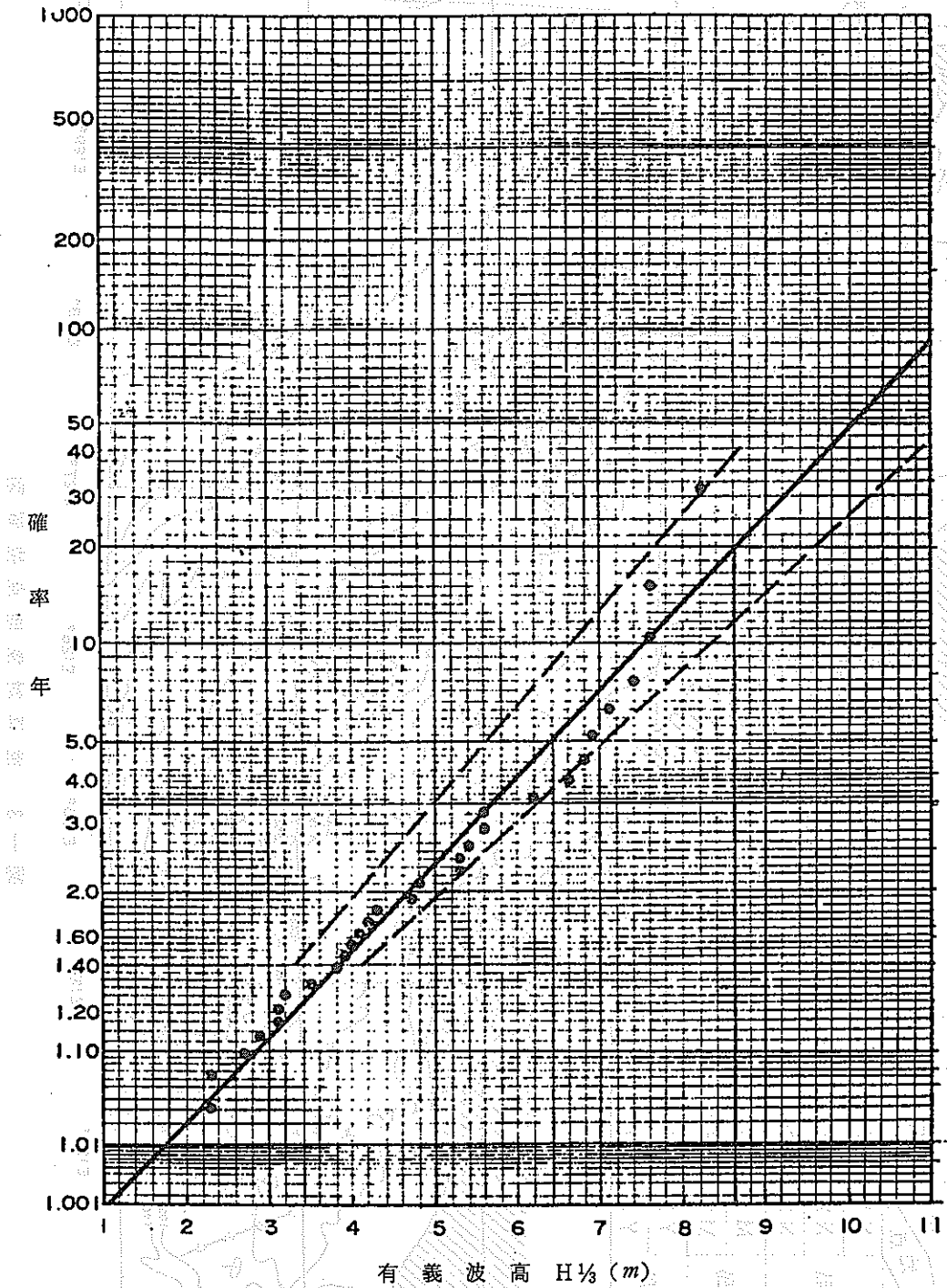
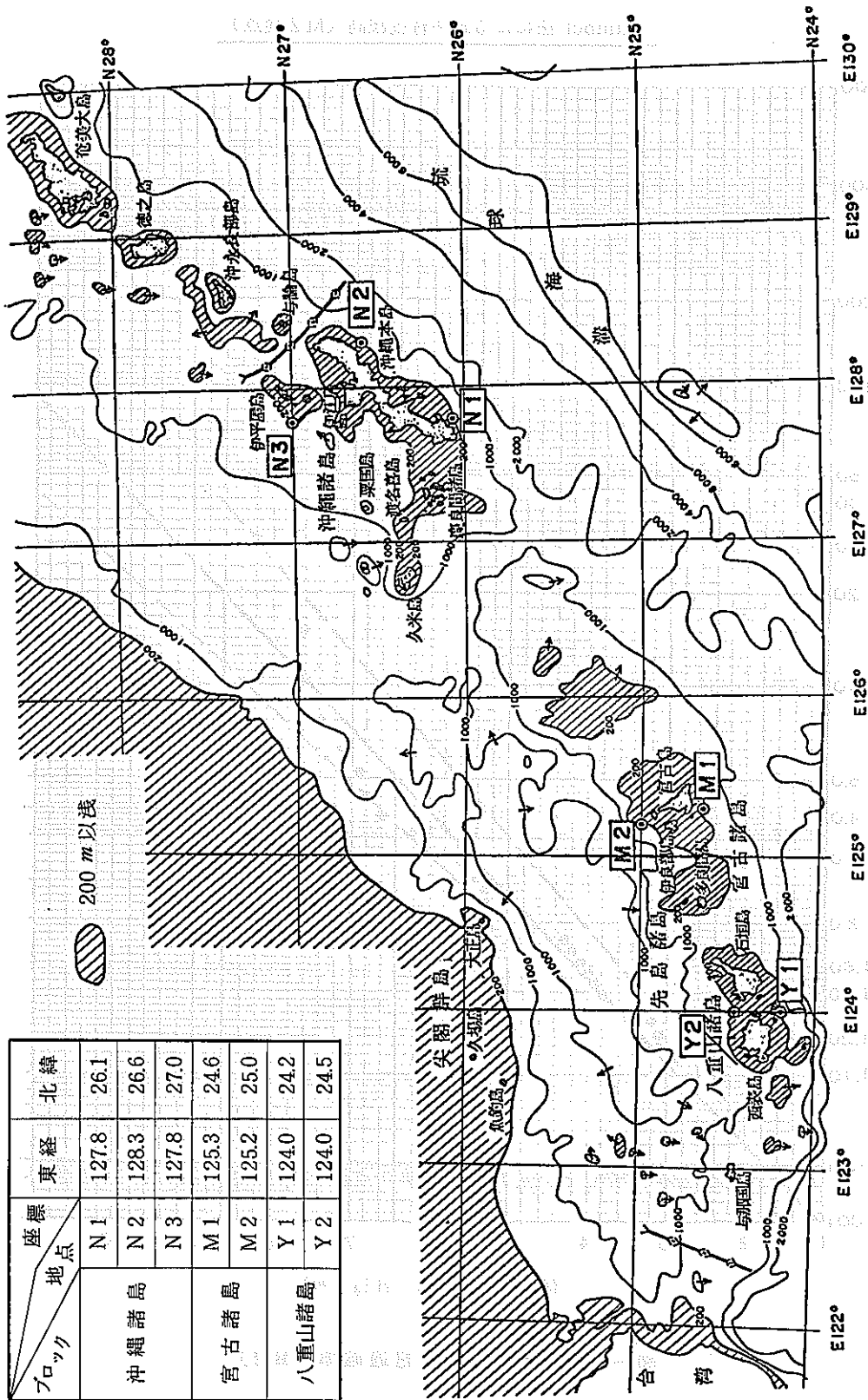
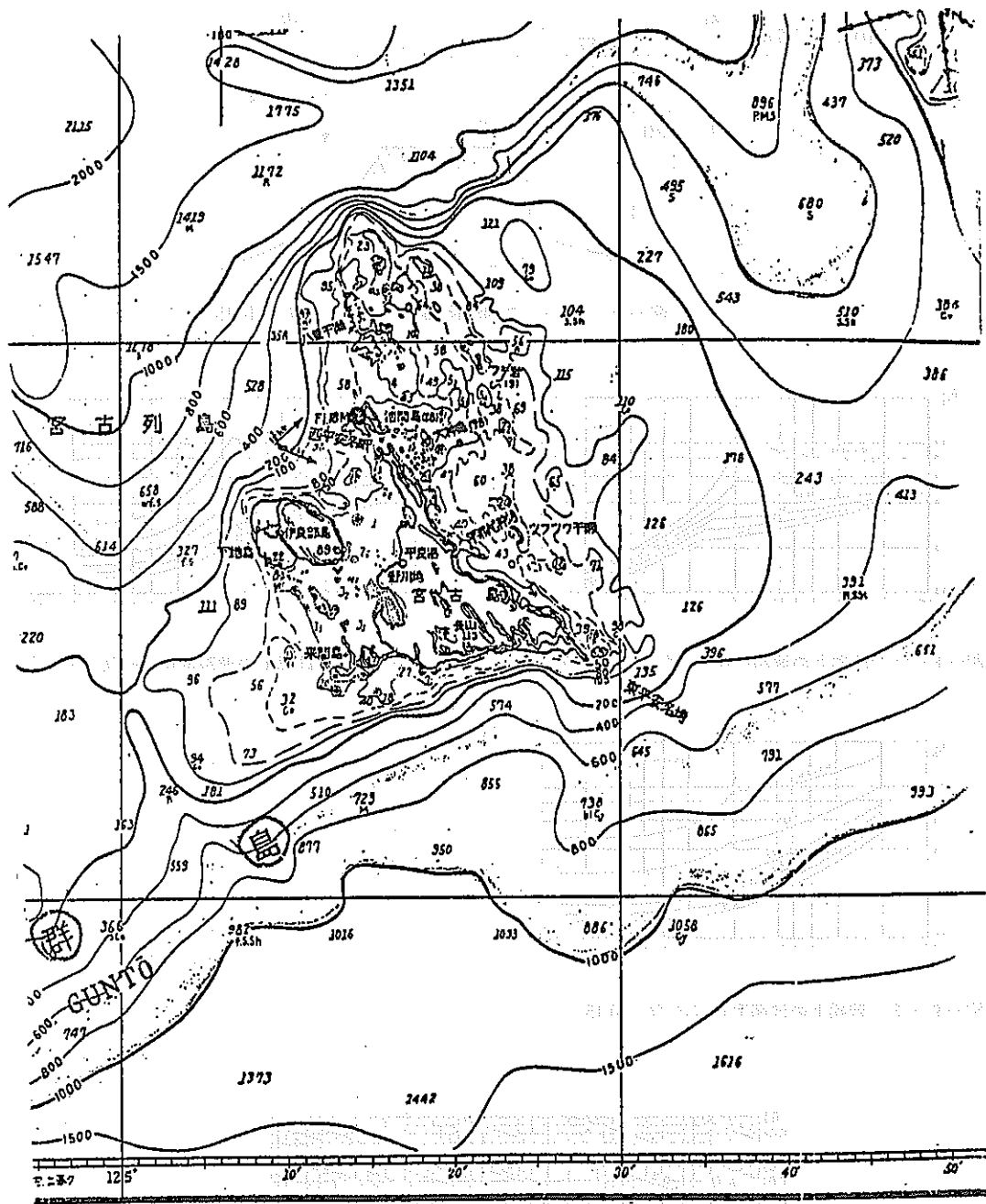


図-2 有義波高の未超過確率 (M2)



座標 地点	東經	北緯	
			座標
沖繩諸島	N1	127.8	26.1
	N2	128.3	26.6
	N3	127.8	27.0
宮古諸島	M1	125.3	24.6
	M2	125.2	25.0
八重山諸島	Y1	124.0	24.2
	Y2	124.0	24.5

图一3 推算对象地点位置图



圖—4 深淺圖

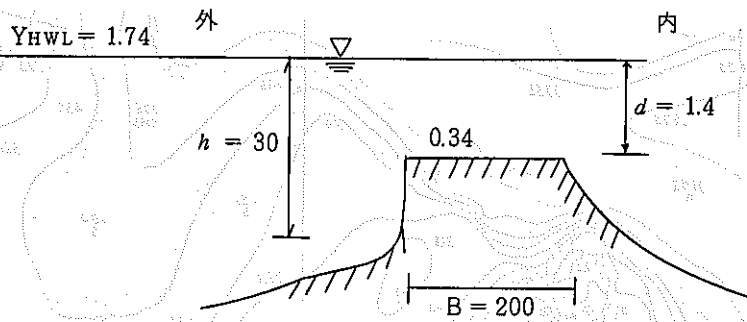


図-5 リーフ断面図 $d/h = 0.05$

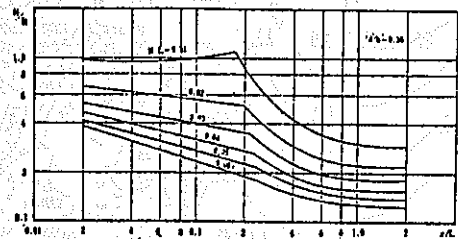
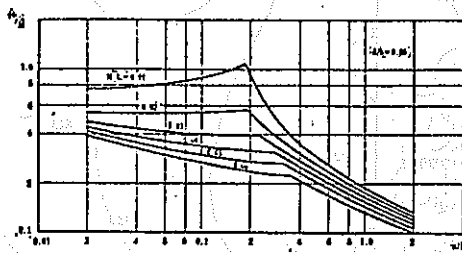


図-6-1 磯棚上の波高変化 ($d/h = 0.05$) [中村他3名]

図-6-2 磯棚上の波高変化 ($d/h = 0.10$)

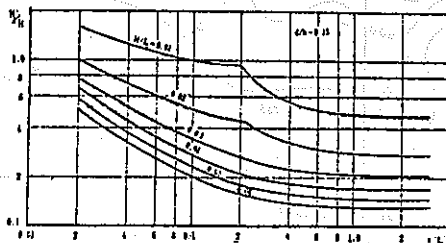


図-6-3 磯棚上の波高変化 ($d/h = 0.15$)

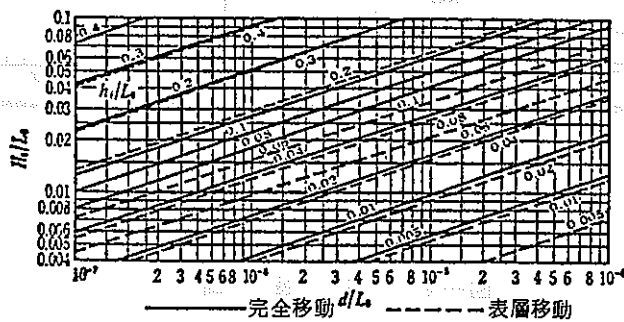


図-7 表層移動および完全移動限界水深 [佐藤昭二, 1966]

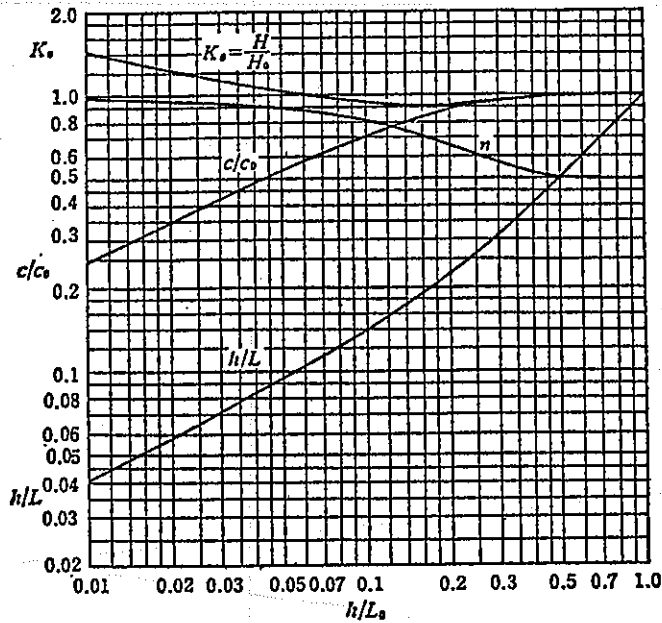


図-8 浅海域の波の性質

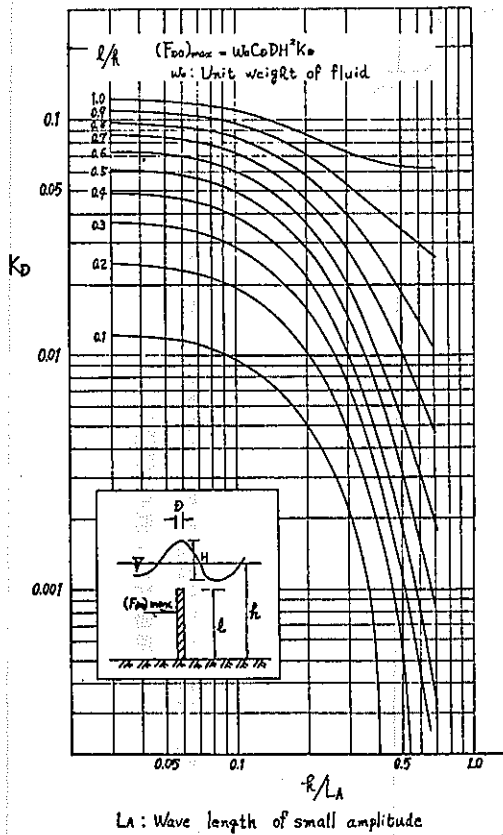


図-9-1 (51) の第1式の図化
Diagram of eq. (51)

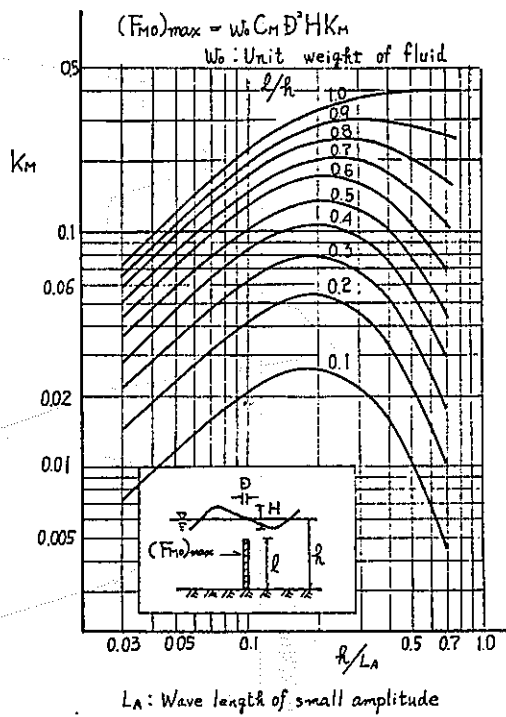
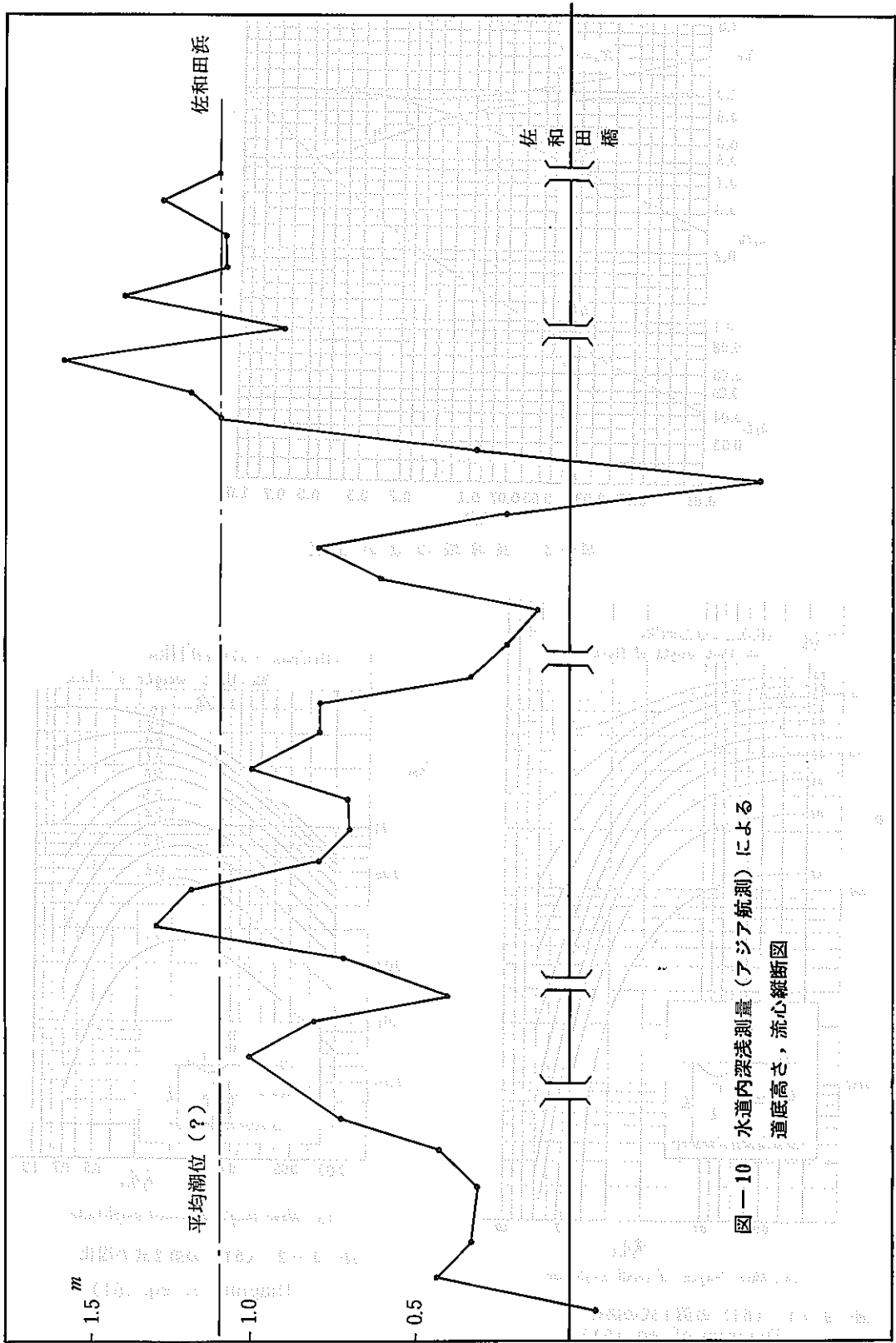


図-9-2 (51) の第2式の図化
Diagram of eq. (51)



図一10 水道内深淺測量(アジア航測)による
道底高さ, 流心縦断面

表-1 推算による年最大有義波

年 代	ブ ロ ック 地 点 特 性	宮 古 諸 島					宮 古 諸 島				
		M 1 (南)					M 2 (北)				
		台 風 番 号	名 称	H 1/3 (m)	T 1/3 (sec)	波 向 (°)	台 風 番 号	名 称	H 1/3 (m)	T 1/3 (sec)	波 向 (°)
1940		4023		5.8	9.6	S 358	4008		3.5	7.0	WSW 290
1		4112		2.0*	10.3	E 90	4118		5.6	9.4	N 175
2		4212		4.0	7.7	SS 31	4207		5.6	8.6	N 188
3		4309		2.6	8.2	SSE 28	4311		5.3	8.8	NNE 157
4		4413		3.7	9.8	S 353	4416		3.1	11.3	NE 136
5		4518		3.1	8.6	SSE 21	4516	枕 崎	3.9	10.8	NE 130
6		4619		5.6	9.6	E 83	4619		4.0	7.8	ESE 70
7		4703	キャロル	0.9*	7.6	SW 306	4720	フローラ	2.3	5.7	ENE 110
8		4822	ジャッキー	5.8	9.2	ESE 77	4822	ジャッキー	2.3	6.4	E 89
9		4919	パトリシア	3.2	10.7	ESE 67	4919	パトリシア	4.3	11.0	ENE 106
1950		5040	クララ	3.4	6.8	SSE 25	5040	クララ	2.9	6.3	NE 225
1		5115	ルース	5.5	9.2	ESE 75	5111	マジ	7.4	10.8	NNW 208
2		5202	ダイナ	2.1	5.9	SE 40	5209	キャレン	4.8	8.4	NNE 152
3		5304	キット	4.2	11.8	SSW 347	5307	ニナ	4.2	8.0	ESE 70
4		5415	マリー (洞爺丸)	2.4	6.3	SSE 18	5415	マリー (洞爺丸)	6.6	9.3	W 280
5		5507	クララ	4.6	11.6	SE 35	5507	クララ	6.9	9.1	NNW 195
6		5606	ワンダ	4.4	13.4	E 90	5612	エマ	7.6	10.5	NNW 201
7		5707	アグネス	2.4	10.9	E 90	5707	アグネス	8.2	10.2	NE 135
8		5821	ヘレン	4.7	10.7	SE 46	5821	ヘレン	2.7	9.8	ENE 103
9		5909		5.7	11.3	E 90	5914		6.8	9.8	ENE 112
1960		6008		4.0	7.7	SE 45	6015		4.1	8.2	NNE 165
1		6120		5.8	8.9	S 3	6118	第二室戸	7.1	10.7	NNW 208
2		6217		3.2	9.8	SE 54	6209		6.2	9.5	NE 145
3		6314		3.7	11.6	ESE 71	6304		3.8	8.1	W 270
4		6405		0.9*	5.7	E 89	6405		3.1	11.5	ESE 70
5		6518		3.8	9.5	SW 320	6515		5.4	8.9	NE 131
6		6618	第二宮古島	4.4	8.2	SE 310	6618	第二宮古島	4.7	8.0	NE 126
7		6734		4.1	11.6	E 85	6734		5.3	9.1	NNE 160
8		6812		5.5	9.3	SSE 30	6816	第三宮古島	3.2	5.7	SE 50
9		6911		3.4	12.3	E 90	6911		7.6	9.9	NE 125

注) *: 波高 2.0 m 以下
風向, 波向は南より反時計回りの角度

表一 2

	H $\frac{1}{3}$ (m)	T $\frac{1}{3}$ (sec)	T $\frac{1}{3} = 3.86\sqrt{H\frac{1}{3}}$ (sec)
5年超過確率波	6.4	9.0 ~ 10.0	9.8
20 " "	8.6		11.3

表一 3 沖波の最大設計波

	波高 H _o (m)	周期 T (sec)	波長 L _o (m)	波形勾配 H _o /L _o	波形勾配 H _{max} /L _o
5年超過確率	7.0	9.0	126	0.056	0.100
20 " "	9.0	10.0	156	0.058	0.104

* H_{max} = 1.8 H $\frac{1}{3}$

表一 4 平良港の推算潮位定数

名称 地名	標準 時 (h)	標準 港	改正後		平均 高潮 間隔 (hm)	大潮 平均 高潮 面 (cm)	小潮 平均 高潮 面 (cm)	平均 水面 (cm)	小潮 平均 低潮 面 (cm)	大潮 平均 低潮 面 (cm)	大 潮 差 (cm)	小 潮 差 (cm)	備 考
			潮 時 差 (hm)	潮 高 比									
宮古島-平良	9 E	"	+0.10	0.89	6.49	174	132	103	74	32	142	58	

※註 (1) 推算潮位の算定式

潮位 = (標準港の潮位 - 標準港の平均潮位) × 潮位改正数 + その地の平均潮位。

(2) 潮時差潮高比の改正及び追加は琉球気象庁産業気象報告第5号のP.127〔沖縄本島各地と那覇港との潮汐の比較観測：官里真吉〕を参照した。

(3) 標準港は那覇港とし調和常数の改正数は那覇石垣検潮所の新観測値である。

表一 5 リーフ内縁での波

	B/L _o	H _o /L _o	H'/H _o	H' (m)	T (sec)
5年超過確率	1.59	0.056	0.15	1.05	9.0
20 " "	1.28	0.058	0.15	1.35	10.0

* 図-6-1より

表一6 礁湖内底質の移動限界粒径

水深 h (m)	h/L_0	H/H_0 *	波高 $H = 1.0$ m			波高 $H = 2.0$ m		
			H_0/L_0	$d/L_0 \times 10^6$ **	粒径 d (mm)	H_0/L_0	$d/L_0 \times 10^6$ **	粒径 d (mm)
1.0	0.010	1.40	0.0071	4.0	> 0.40			
1.5	0.015	1.30	0.0077	3.0	0.30			
2.0	0.020	1.25	0.0080	1.3	0.13	0.0160	8.5	> 0.85
2.5	0.025	1.17	0.0085			0.0170	5.5	0.55
3.0	0.030	1.15	0.0087			0.0174	3.0	0.30
4.0	0.040	1.10	0.0091	0.25	0.025	0.0182	2.5	0.25
5.0	0.050	1.05	0.0095			0.0190	1.7	0.17

* 図-8から

** 図-7 (完全移動)

表一7 平良港の調和常数

名称 地名	位置	分潮								期間
		M_2		S_2		O_1		K_1		
		Hm (cm)	Km (度)	Hs (cm)	Ks (度)	Ho (cm)	Ko (度)	H' (cm)	K' (度)	
平良 (宮古島)	125°18'E 24°48'N	50	216	21	241	15	212	17	235	2ヶ月

分潮記号

分潮の名称	分潮の記号	半潮差の記号
太陰半日周期	M_2	Hm
太陽半日周期	S_2	Hs
太陰日周期	O_1	Ho
日月合成日周期	K_1	H'