

2次元リーフによる波の変形と平均水位変化

津 嘉 山 正 光*・ 仲 座 栄 三**

1. 緒 言

リーフによる波の変形問題は、現場の設計等の必要性からも早急な解明が急がれるのであるが、現象の複雑さもあってまだ十分に解決されたとは言えない状況にある。筆者らもこの状況に鑑み、2次元および3次元リーフモデルを用いて実験的・解析的研究を続けている^{1)~3)}。これまでの研究によって定性的な変形特性についてはある程度把握されたと考えているが、実際のリーフ礁原は水深がかなり浅く、襲来波は殆んどすべてリーフ先端付近で砕波するので、このような場合のリーフ上の波高分布特性を定量的に明らかにする必要がある。現場設計では高山らによる実験式いわゆる高山式が実用化されているが、式中の係数のとり方等についてはさらに検討の必要なことが指摘されている⁴⁾。さらに、最近台風時の漁港内の異常な水位上昇による災害が問題となっており、リーフ内のいわゆる wave setup の特性を明らかにする必要があると考えられる。

以上のことを踏まえ、本研究では図-1に示すステップ型および前面スロープをもつ2次元リーフを用いて実験を行ない、波高分布特性と平均水位変化について検討するとともに、従来用いられているポテンシャル接続法の適用限界に関する検討も行なった。

2. 実験装置および実験方法

(1) 実験装置

実験には琉球大学土木工学科の2次元造波水槽(0.8 mW×1.0 mD×22 mL, flap-type 造波機付)を用いた。実験装置の概要を図-1に示したが、リーフモデルは鋼アングルと木材で製作した。なおスロープ型モデルの前面勾配は、現地リーフの形状をも考慮して1/10とした。波の計測には電気容量式波高計(図-1の④、⑤)を用い、ペン書きレコーダによって波形記録をとったが、同時に増幅器からの出力をADコンバータを介してパーソナルコンピュータに入力して処理し、digitalの波高データが得られるようにした。波高計④は図示の位置に

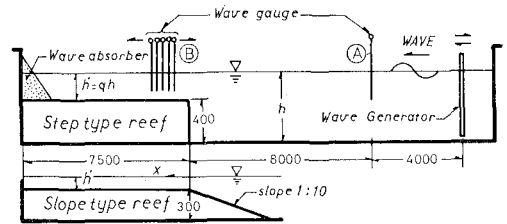


図-1 実験装置概要図

固定して入射波計測用としたが、波高計⑤は移動式計測台車に5本の波高計をとりつけ、逐次移動してリーフおよびリーフ前面水域における波高分布計測が効率よくできるようにした。

(2) 実験方法と実験ケース

実験方法は、各入射波周期に対し入射波高を約1 cm 刻みにかえて波送りをし、図-1の波高計⑤によってx軸(原点はリーフ・フラット先端)上の波計分布と平均水位分布を測定するものである。測定範囲は、リーフ前面水域ではリーフ・フラット先端から入射波長の2~3倍の範囲とし、リーフ・フラット上は先端から5 m 以内の範囲とした。測定点間隔Δxは、砕波帯内では5 cm としそれ以外の水域では10 cm とした。

各実験ケースでのリーフモデルと実験波の諸元は表-1に示す通りであるが、入射波高はリーフ上の波が非砕波の場合から砕波する場合までをカバーする範囲の約10種類を用いた。

表-1 実験ケースと実験諸元

Case No.	q	T(sec)	Hl(cm)	kh	Hl/h	H'/H	h'(cm)
St-1-(1-11)	0.1	0.78	1.42~10.34	3.32	0.015~0.109	0.48~3.52	50.0
St-2-(1-9)	0.2		1.78~9.99	3.73	0.019~0.105	1.15~6.35	56.3
St-3-(1-8)	0.3		2.65~10.39	4.26	0.028~0.110	1.86~7.28	64.3
St-4-(1-10)	0.1	1.20	1.08~10.14	1.54	0.005~0.050	0.49~4.63	50.0
St-5-(1-13)	0.2		2.12~16.09	1.69	0.010~0.077	0.70~5.33	56.3
St-6-(1-11)	0.3		2.70~19.26	1.88	0.013~0.090	1.00~7.15	64.3
Sl-1-(1-12)	0.1	1.20	1.20~12.69	1.14	0.007~0.069	0.26~2.75	33.3
Sl-2-(1-12)	0.2		1.90~14.19	1.24	0.010~0.075	0.55~3.95	37.5
Sl-3-(1-9)	0.3		2.92~17.50	1.37	0.015~0.089	0.74~4.42	42.9
Sl-4-(1-6)	0.1	1.60	5.00~12.48	0.79	0.019~0.047	0.26~0.66	33.3

3. 結果と考察

実験で得られた波高分布特性および平均水位変化等についてリーフ形状タイプ別に以下に述べる。

* 正会員 工修 琉球大学助教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 琉球大学助手 工学部土木工学科

(1) ステップ型リーフの場合

a) リーフ上非碎波の時の波高分布

図-2 は水深波高比 h'/H_i が大きく、リーフ上の波が碎波しない場合の波高分布の一例として相対水深 $kh=1.5\sim 2.0$ で波形勾配 H_i/L_i がほぼ等しいケースにつき、リーフ上の比水深 q により分けて示したものである。図からわかるように、リーフ先端付近は水底地形の影響を受ける散乱域で波高の変動が比較的大きいが、リーフ端からの距離 x/L_i の増大とともに次第に変動は小さくなって理論値に収束していく傾向を示す。なお図中の実線はポテンシャル接続法による理論解¹⁾である。散乱域の大きさと波高変動の大きさに対しては h'/H_i の効果が最も大きく、 h'/H_i が小さいほど散乱域および H/H_i の変動共に大きい。

リーフ前面水域では、リーフからの反射波のため部分重複波の波高分布を示すが、リーフ先端に近い水域で実

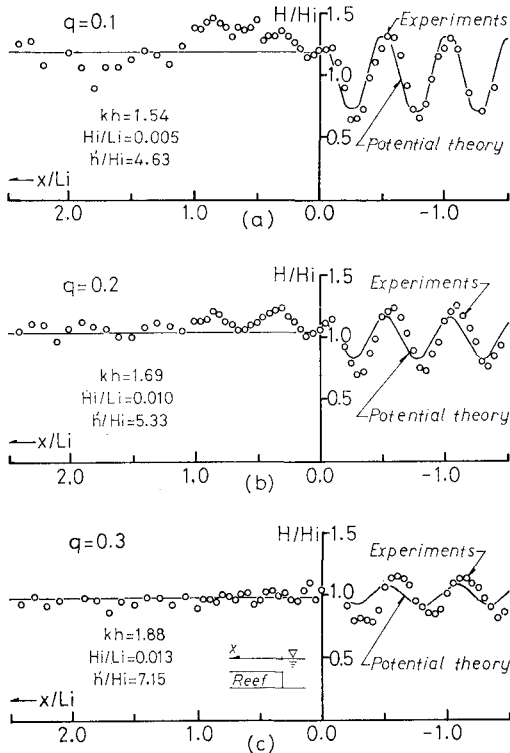


図-2 波高分布 (リーフ上非碎波)

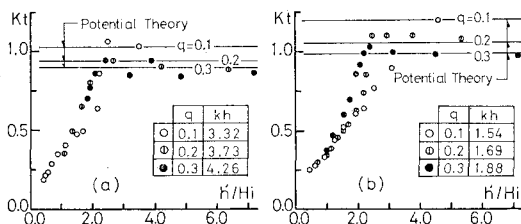


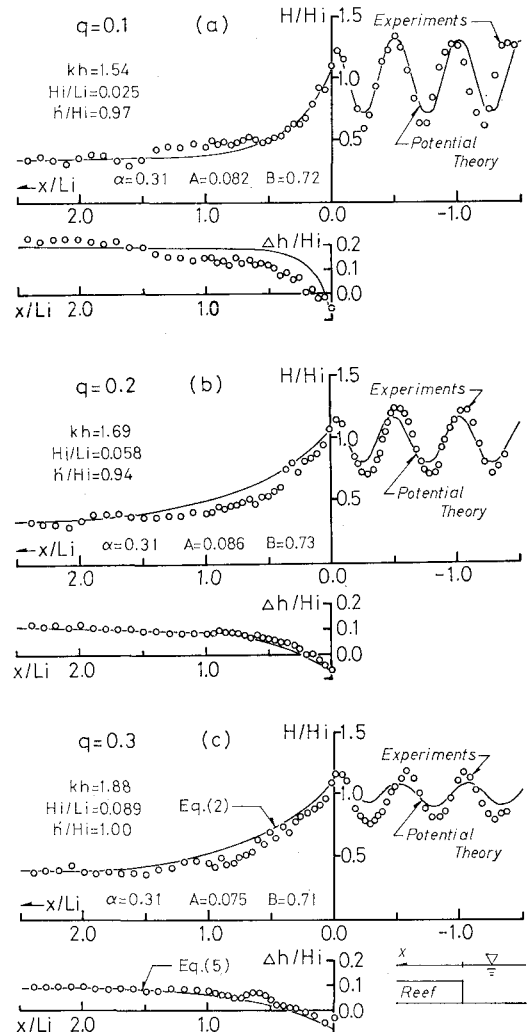
図-3 ポテンシャル理論の適用性

験値のバラつきが見られるものの、理論値とかなりよく合っている。以上のことから、 h'/H_i が大きい場合はリーフ先端付近を除く水域の波高分布はポテンシャル理論によって算定できると考えられる。

b) ポテンシャル理論の適用限界

入射波高が大きくなって h'/H_i の値が小さくなるとリーフ上の波は碎波するようになり、ポテンシャル理論は適合しなくなる。リーフ伝達波の変形に最も大きく影響するのは水深波高比 h'/H_i と考えられるが、このようなモデルに対するポテンシャル理論の適用限界についてはまだ十分検討されていないと思われ、実験結果からこの点について調べてみた。

図-3 はリーフ通過波の通過率 K_t の実験値とポテンシャル接続法による理論値を比較し、両者の適合性について検討したものである。図より、ポテンシャル理論の適用限界はほぼ $h'/H_i=2.4$ と考えられる。

図-4 波高分布と $\Delta h/H_i$ の分布 (リーフ上碎波)

c) リーフ上碎波の時の波高分布

図-4 は h'/H_i が小でリーフ上の波が碎波する場合の波高分布とリーフ上の平均水位変化量 $\Delta h/H_i$ の分布を示したものである。この場合、入射波はリーフ先端で碎波して $0 < x/L_i < 1.0$ の範囲で急激に波高が減衰し、リーフ上の波高分布は図のように指数曲線状となる。分布特性については h'/H_i の効果が最も大きく、 h'/H_i が小さいほどリーフ先端付近の波高減衰が急激でかつ通過波高も小さくなる。相対水深 kh の効果は通過波高変化については大きくないようである。波形勾配 H_i/L_i はリーフ先端付近での波高減衰の度合に影響し、 H_i/L_i が大きいほどリーフ先端に近いところで急激に碎波減衰して散乱域が小さくなり、通過波の波高変動も小さくなる。これは波形勾配の大きい波ほど碎波後の流れへの変換の度合が大きく、波動成分が小さくなることによるものと考えられる。

d) 波高分布の実験式

リーフ上の波高分布に関し、高山ら是不規則波を用いた実験に基づいて次の高山式を提案している⁵⁾。

$$\frac{H_{1/3}}{H_0} = B \exp \left\{ -A \left(\frac{x}{H_0} \right) \right\} + \alpha \frac{(h_0 + \bar{\eta}_\infty)}{H_0} \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中 H_0 は沖波の有義波高、 $H_{1/3}$ はリーフ上の任意点の有義波高、 h_0 はリーフ上の静水深、 η_∞ は $x=\infty$ での平均水位上昇量、 α , A は $A=0.05$, $\alpha=0.33$ の定数、係数 B はリーフ端での $H_{1/3}$ と $\bar{\eta}_\infty$ を合田の碎波帯内の算定図より求め、算定するとした。

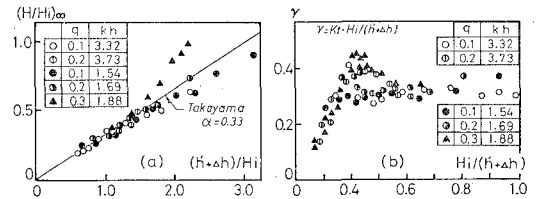
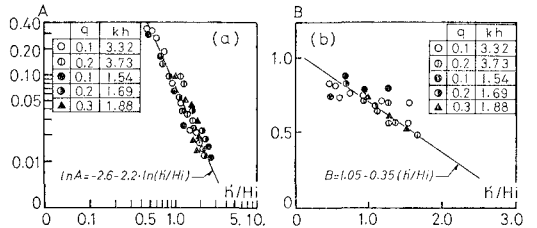
本実験は高山らとは異って規則波によるものであるが図-4 からわかるように波高分布は明らかに指数曲線分布を示すので、高山式にならって次式の適用を試みた。

$$\frac{H_x}{H_i} = B \exp \left\{ -A \left(\frac{x}{H_i} \right) \right\} + \alpha \frac{(h' + \Delta h)}{H_i} \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中の H_i は入射波高、 H_x はリーフ上の x 点の波高、 h' はリーフ上静水深 (図-1)、 Δh はリーフ上の平均水位上昇量である。

e) 係数 α , A , B の検討

(2) 式で $x=\infty$ とすれば $H_x/H_i = \alpha \cdot (h' + \Delta h)/H_i$ となり、係数は通過波高が一定となる地点での波高比 H_x/H_i と水深波高比 $(h' + \Delta h)/H_i$ の比例定数を与える。したがって、図-5 に示すように、両者の関係をプロットすれば、これより α が求まる。図中の実線は高山による $\alpha=0.33$ の直線である。 $(h' + \Delta h)/H_i=1.5$ あたりから比例係数がかわっており、これはリーフ通過波の碎波減衰と関係しているものと思われたので、図-5 (b) のように通過波高と平均水深の比 γ と波高水深比 $H_i/(h' + \Delta h)$ の関係を調べてみた。 $H_i/(h' + \Delta h)=0.4$ 程度から碎波が始まるが、5.0 付近までは測定点で碎波減衰が完了しない過度状態と考えられ、このため γ が変化して

図-5 係数 α の検討 (ステップ型リーフ)図-6 係数 A , B の検討 (ステップ型リーフ)

いるものと判断される。図-5 (a) はこのことを併せて考えれば納得できる。したがって、 $(h' + \Delta h)/H_i$ のあまり大きくない範囲では勾配は一定と見なされるので、同図より平均的な勾配をとって $\alpha=0.31$ とした。

次に係数 A は式 (2) の指数曲線の減衰度を表わすパラメータで、碎波によるエネルギー逸散と関係する。したがって、碎波のパターンによって変化すると考えられるが、実験結果から A と h'/H_i の関係をプロットすると図-6 (a) のように直線比例関係を示したので、図中の関係式 $A = \exp [-2.6 - 2.2 \ln (h'/H_i)]$ で算定することにした。

係数 B は式 (2) の指数曲線の初期値を与えるもので高山らは合田の碎波帯内の波高算定図より $H_{x=0}$ を求めて、これを用いて (1) 式で $x=0$ とおいた式より B を求めているが、ステップ型リーフではこの方式は使えない。そこで実験結果より B と h'/H_i の関係を調べたところ、図-6 (b) のように比例関係を示すことがわかったので図中の関係式 $B = 1.05 - 0.35 (h'/H_i)$ で B を算定することにした。

f) (2) 式による計算値と実験値の比較

以上の方法によって係数 α , A , B を求め、波高分布を式 (2) によって示したのが図-4 の実線であるが、実験値とかなりよく合っていると思われる。

g) 平均水位変化量

波の変形に伴う平均水位変動はいわゆる radiation stress との関係で説明され、理論的に wave setup set down が計算される。図-1 のリーフモデルに対する運動量方程式は次式となる。

$$\frac{dS_{xx}}{dx} = -\rho g(h + \eta) \frac{d\eta}{dx} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 S_{xx} は波の運動量変化に対応する radiation stress の x 方向成分、 h は静水深、 η は平均水位変化

量である。したがって S_{xx} が与えられれば上式の積分により η の分布が求められ、破波点の沖側に対しては

$$\frac{\eta}{H'_0} = -\frac{1}{8} \frac{H'_0}{k_0^3} \cdot \frac{\coth^2 kh}{2kh + \sinh 2kh} \quad \dots\dots\dots (4)$$

となる。式中の H'_0 は相等沖波波高、 k_0 は沖波波数、 kh は水深 h の点の波数を示す。また、リーフ上では $kh \ll 1$ を考慮して上式 (3) を積分することにより、

$$\frac{\eta}{H'_0} = \left[c_0 - \frac{3}{8} \left(\frac{H}{H'_0} \right)^2 \right]^{1/2} - \frac{h'}{H'_0} \quad \dots\dots\dots (5)$$

となる。式中 c_0 は積分定数で、境界条件で決まる。

図—4 には $\eta = \Delta h$ として、実験値と (5) 式による計算値の比較図を示したが、リーフ先端付近を除いて両者は比較的良好に合っている。

(2) スロープ型リーフの場合

a) リーフ上碎波の時の波高分布

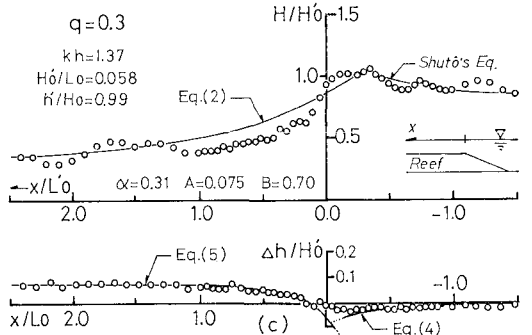
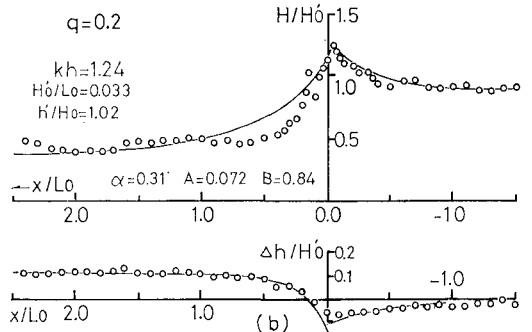
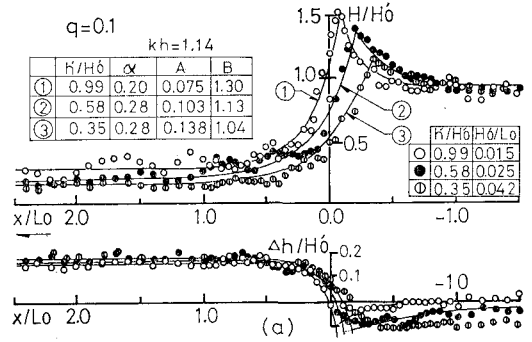
図—7 はスロープ型リーフモデルで、リーフ上で碎波する場合の波計分布と $\Delta h/H'_0$ の分布を示したものである。波高分布は前述のステップ型リーフの場合と同様に、碎波点以後は指数曲線分布となっている。相対水深 kh のリーフ上の波高分布に対する効果は、この場合もあまり大きくない (図—7 (a)~(c) の白丸印の分布の比較)。図—7 (a) は $kh=1.14$ のケースにつき h'/H'_0 の効果について比較したものである。水深波高 h'/H'_0 が小さいほど碎波点は沖側に移動し、かつ碎波後の波高減衰区間が短く、リーフ上の H/H'_0 も小さくなる。碎波点から沖側のスロープ上の波高分布は、主として浅水変形によりスロープ先端から次第に増大して最高値に達して碎波し、碎波後の指数曲線分布につながっていく。スロープ上の曲線は、合田が浅水域の波動に対する首藤の解に基づいて求めた浅水係数算定図⁹⁾によるものであるが、実験値とかなりよく合っている。

b) 実験式の係数 α , A , B の検討

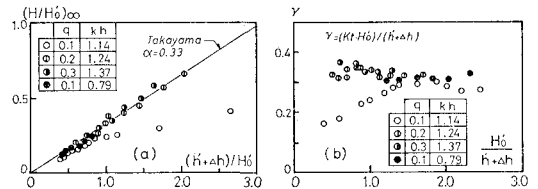
この場合も碎波後の波高分布は (2) 式の実験式が適合すると考えられるので、係数 α , A , B について実験結果に基づき以下のように検討した。

係数 α は 図—8 (a) より、前述の理由から $(H/H'_0)_\infty$ と $(h' + \Delta h)/H'_0$ の比例定数として求められる。図中比例定数が一定でないものがあるが、これは 図—8 (b) からわかるように、計測点が碎波減衰の過渡領域にあるため、測定値が $(H/H'_0)_\infty$ の条件を満たしていないことによると考えられる。 $(h' + \Delta h)/H'_0$ の小さいときの比例関係は明白であるから、上記のことを考慮に入れて、図より係数 α を求めることにした。

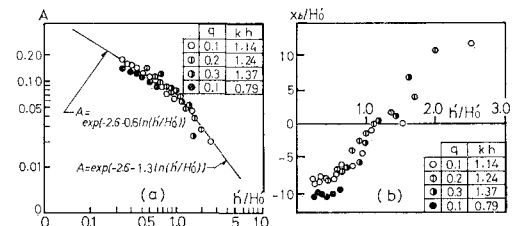
図—9 は係数 A について検討したものである。前述のステップ型モデルの場合とちがって、 $h'/H'_0 \div 1$ を境にして A と h'/H'_0 の比例関係が変化している。これは碎波点位置に関係すると思われたので、図—9 (b) のように碎波点 x_b と h'/H'_0 の関係を調べてみた。これから



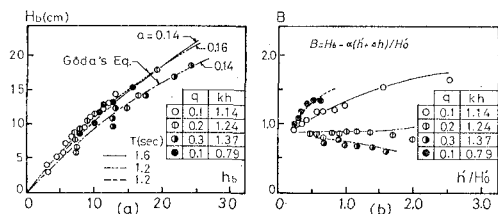
図—7 波高分布と $\Delta h/H'_0$ の分布 (スロープ型)



図—8 係数 α の検討 (スロープ型リーフ)



図—9 係数 A の検討 (スロープ型リーフ)

図-10 係数 B の検討 (スロープ型リーフ)

$h'/H_0 \cong 1$ が、砕波点がスロープ上かリーフ・フラット上かの境界となっており、図-9 (a) の関係に対応していることがわかったので、このことを考慮して同図中の算式によって係数 A を求めることにした。

係数 B は、このケースでは高山らと同じ手法により求められる。すなわち合田の砕波限界波高算定式⁶⁾より $H_{b,x=0}$ がわかれば、(2) 式より $B = (H_{b,x=0} - \alpha(h' + \Delta h))/H_0^2$ となり B が求まる。図-10 は B を求めるための図であるが、上記合田式中の係数 α については、実験値との適合を考慮して図-10 (a) に示す値を用いることにし、合田式による H_b と前述の α を用いて図-10 (b) 中の式により係数 B を求めた。

c) 式 (2) による計算値と実験値の比較

以上の方法で求めた係数 α , A , B を用いた (2) 式による波高分布の計算値と実験値の比較を図-7 に示したが、砕波による波高減衰域でややずれが見られるが、全体的には両者の適合度はよいと思われる。

d) 平均水位変化量分布

スロープ型リーフの場合の平均水位変化量 $\Delta h/H_0'$ の実験値と (4), (5) 式による計算値を図-7 に示したが、リーフ・フラット上では両者はよく合っている。

4. 結 語

本論文の主な結論は次のようになる。

(1) リーフ上の波の変形に関しては水深波高比 h'/H_0

が重要なパラメータとなり、ポテンシャル理論の適用限界はほぼ $h'/H_0 = 2.4$ と考えられる。

(2) ステップ型リーフの前面水域の波高分布はリーフ上水深の如何に拘らず部分重複波分布を示し、実験結果はポテンシャル理論と比較的よく合う。リーフ上の波高分布 (砕波時) は指数曲線的分布となり、(2) 式の実験式が適合する。

(3) スロープ型リーフ上の波高分布は、砕波点までは首藤の理論解、砕波点以浅は高山による実験式による計算値が実験値とよく適合する。

(4) 高山式中の係数 α , A は一つの定数ではなく、リーフ形状や水深波高比 h'/H_0 により変る。

(5) 平均水位変化量 $\Delta h/H_0'$ の分布は、実験値と理論値は比較的よく合い、リーフ先端付近では砕波位置と関係して変動するがリーフ奥水域では一定値となり最大 $\Delta h/H_0' = 0.2$ 程度となる。

終りに、本研究に際し実験とデータ整理等を担当された、当時卒業研究生の平良昌史・春 淳一郎の両君および実験計測等に関し協力頂いた琉球大学土木工学科の宇座俊吉技官に謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 河野二夫・津嘉山正光: リーフによる波の変形に関する研究, 土木学会論文報告集, 307号, pp. 27~38, 1981.
- 2) 津嘉山正光: 半円凹形ステップリーフによる波の変形, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 75~79, 1982.
- 3) 津嘉山正光: 半円凹型堡礁状リーフによる波の変形, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 75~79, 1985.
- 4) 江頭和彦・福田 功・岸良安治・西村達郎: リーフによる波浪変形の現地観測, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 90~94, 1986.
- 5) 高山知司・神山 豊・菊地 治: リーフ上の波の変形に関する研究, 港湾技術研究所資料, No. 278, 1977.
- 6) 合田良実: 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, p. 237, 1982.