

# 沖縄県仲泊地区のリーフ周辺での波と流れの観測

谷本 修志\*・中野 泰雄\*\*・大月 和義\*\*\*  
宇多 高明\*\*\*\*・小 俣 篤\*\*\*\*\*

## 1. ま え が き

近年、波浪を制御するための施設として天然のリーフを模倣した人工リーフが各地で建設されるようになった。この人工リーフの機能性に関しては最近の研究<sup>1),2),3)</sup>によりかなり明らかになってきたが、まだ解決されるべき問題点が残されているのが実状である。したがって今後とも研究が必要とされるが、人工リーフの研究を進める上において、天然状態で存在するリーフの特性を調べることは重要であろう。何故ならば、天然リーフは自然の営力で形成され、長い年月の間有効な波浪制御効果を保ち続けてきていることを考えると、それ自体が絶妙な機能と安定性を有しているに違いないからである。したがって、この天然リーフの有する機能安定性を明らかにすることは、有効で安定な人工リーフを設計するためにも大いに役立つはずである。

沖縄県では周知のように島の周囲にリーフの発達が見られる。そこで、本研究では天然のリーフの形態を深浅測量や航空写真をもとに正確に把握するとともに、このリーフ上における海水流動、波浪減衰および水位変化等について現地観測により調べた。

## 2. 観 測 方 法

現地調査を実施したのは、沖縄県本島中部に位置する仲泊地区である(図-1)。仲泊地区の海岸は東シナ海に面し、沖縄海岸国定公園に位置する。したがって、この海岸への入射波は東シナ海で発達した波であって、その主な入射方向は北西である。

この海岸での種々の観測は、1987年2月21日から3月11日までの19日間で実施した。観測項目は、海底地形測量、波高、水位、流速測定と平面流況観測である(表-1)。また、種々の測定の測点配置を図-2に示す。測線はほぼ平行に2本設定し、計測器を配置した。この2本の測線を以下北測線、南測線と呼ぶこととする。北

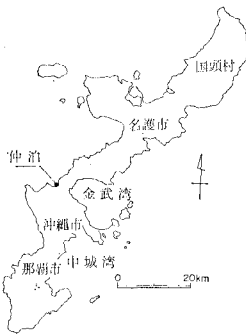


図-1 観測地点(仲泊地区)の位置図

表-1 調査項目一覧

| 調査項目               | 数 量                                |
|--------------------|------------------------------------|
| 海底地形               | 測線 27本(50~100 m間隔ENE-WSW方向)        |
| 測量                 | 範囲 沿岸 約1800 m<br>岸沖 約1300 m        |
| 波 高 観 測            | リーフ内 2点<br>リーフ外 2点                 |
| 流速(向)観測            | リーフ内 4点                            |
| 水 位 観 測            | リーフ内 2点<br>リーフ外 2点<br>リーフの切れ目1点    |
| 平面流況観測<br>(フロート追跡) | 沿岸 約1200 m<br>岸沖 約1600 m<br>(2ケース) |

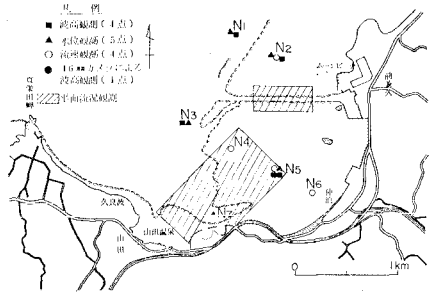


図-2 測定点の配置

測線には測点 N1, N2 が属し、南測線には N3~N6 が属する。また、リーフの切れ目には特別に測点 N7 を配置した。深浅測量は ENE-WSE 方向に延長約 1300 m の測線を配置して行った。測線の間隔は北部では 100 m、南部のリーフの切れ目付近では海底形状が複雑なため 50 m とした。測定結果によると、同海域はリーフ幅が約 1 km と広く、礁縁部が干潮時に干出する裾礁リーフであった。

波高観測は、対象区域のリーフの内外 4 点において水圧式波高計を用いて 2 時間毎に 10 分の観測を 15 昼夜実施した。さらに、リーフ上の水位としては、波高計に記録された水位変動より求めた平均水面の値を用いた。なお、観測期間中には 5 m を越える有義波高も測定され

\* 正会員 建設省土木研究所次長  
\*\* 正会員 沖縄総合事務局河川課長  
\*\*\* 正会員 (前)沖縄総合事務局河川課  
\*\*\*\* 正会員 工博 建設省土木研究所海岸研究室長  
\*\*\*\*\* 正会員 建設省土木研究所海岸研究室

た。流速測定は、対象区域の各測点で電磁流速計を用いて行い、5分毎の平均流速を昼夜連続で測定し、リーフ上の流れをとらえた。

平面流況観測は調査区域南部のリーフの切れ目付近および北部の漁港航路付近において行った。2台のトランシットを用いてフロート(25 cm 角, ペーン付き)追跡を3~4回行い、同海域の平面流況を測定した。測定間隔は2分または4分とした。

### 3. 観測結果

#### (1) リーフ周りの海底地形

仲泊地区において1987年3月5, 6日に実施した海底地形測量の結果を図-3に示す。図の基準面は、D.L. (E.L.  $-1.32$  m) にとっている。ここに、E.L. は沖縄の標高の基準面である。昭和62年の潮位表によると、朔望平均満潮位は E.L.  $+0.808$  m に、また朔望平均干潮位は E.L.  $-1.257$  m にある。したがって図の基準面は、朔望平均干潮位に近いものである。

この海域の地形は、測線方向(WNW-ESE)に幅約1~1.5 km, 水深約0.5~2.0 m のリーフが広がり、その沖は急激に約10~15 m の深みになる点で、典型的な裾礁海岸である。特徴としては、山田温泉前面の測線 No. 19~22 の基準点から約250 m 内外にリーフの大き

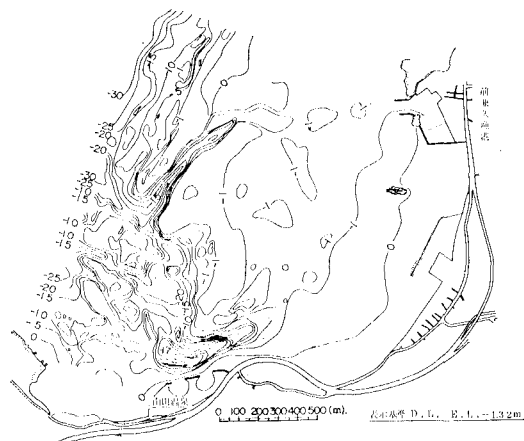


図-3 仲泊地区の深浅図

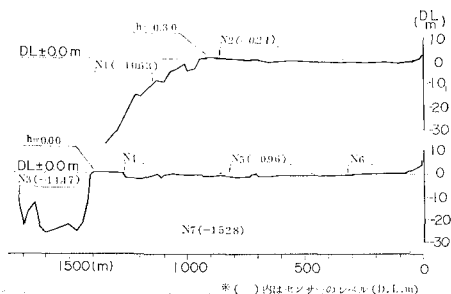


図-4 リーフの断面形状

な切れ目があり、その深まりは20 m 近くまで続いている。また前兼久漁港の前面にはリーフエッジの切れ目を利用した航路があり、位置的にはリーフを南北に分断するような形となっている。航路の北側のリーフエッジは比較的高く、大潮の干潮時には完全に干出する帯状の露岩域がある。リーフ外の地形は水深30 m 付近まで測深したが、測線ピッチが50 m 間隔である No. 10~26 の地形は複雑で、数ヶ所でパッチ状のリーフと思われる浅瀬が見られた。

図-3 に示した深浅図では、測点の正確な水深は明らかにできないので、北、南両測線に沿う断面形状を図-4 に示した。図中には水位測定点のセンサーの D.L. 上の高さとし、各断面のリーフエッジ上の高さを示した。図-4 によると、両断面ともにリーフエッジから沖は急勾配で落ち込んでいることが明らかである。また、リーフエッジはそれより岸側の区域と比較するとわずかに高くなっている。筆者の一人(宇多)は熱帯地方にあるバリ島やモルディブ諸島におけるリーフを調べる機会を持ったが、これらの場合も同様な特徴が認められた。したがってリーフエッジが岸側のリーフ高さより高い点は、天然のリーフのかなり一般的特徴と考えられる。

#### (2) 有義波高、水位、流向、流速の経時変化

最初に、観測の結果得られた有義波高と水位の経時変化を図-5に示す。この結果は、2時間に10分の間隔で測定した波高計データを統計処理して求めたものである。波高に関しては、リーフ外の N1 と N3 において2月27日~28日にかけて観測期間中最大の有義波高約5 m の波が記録されており、2月24日~26日、3月7日~8日にも有義波高2~3 m の波の記録が見られ、両地点で大変良い相関を示している。これらに比べ、リーフ内側に位置する N2 および N5 では、リーフ外の波高が高い時に若干波高が大きくなっているものの、全般にほぼ0.5 m 程度である。この変動形態は同地点の水位変動と大変相関が高く、リーフ上の波高は潮汐による水位変化の影響が大きいことが確認される。周期につい

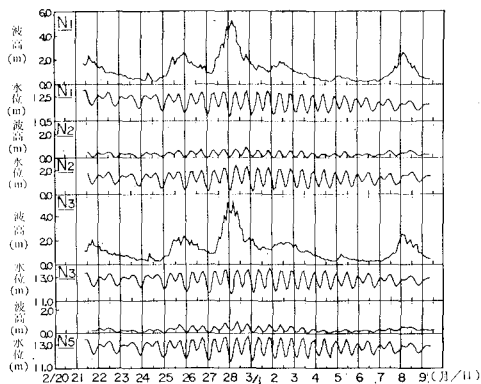
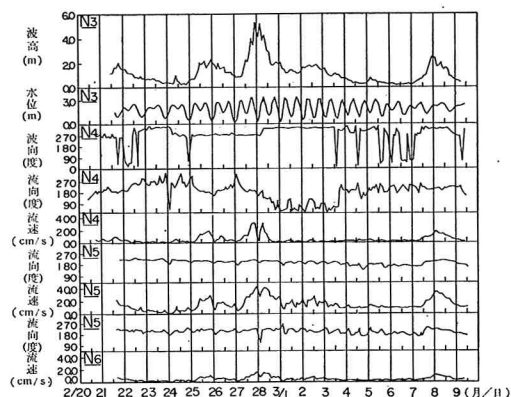


図-5 N1, N2, N3, N5 地点の波高と水位の経時変化



図—6 N3～N6 地点の波高、波向、流速の経時変化

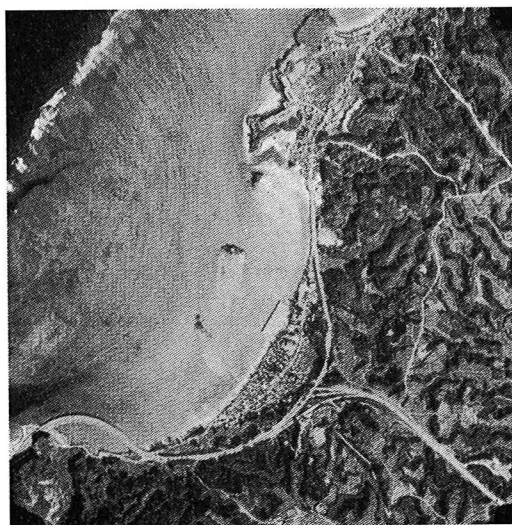
ては図示を省略したが、リーフ外の地点では5～10秒の波が多かった。波高が高いと周期も長くなる傾向を示すが、リーフ内では波の分散あるいはリーフ上での風波の発達のため、5秒前後の短い周期がほとんどであった。このように、波高の変動がリーフの内外で大きく異なったのに対して、水位の変動は全点において潮汐変動が卓越している。碎波による水位上昇は、波高の大きな2月27日～28日にも潮位変動に比較して著しいものではない。

次に、EMCによって測定された各地点の平均流速と流向の経時変化を図—6に示す。ここに流向はN方向から時計回りの方向に測った角度で表示した。また、図にはN3地点の波高、水位と、N4地点の流速データより求めた波向も示した。図より、リーフ内の3地点(N4, N5, N6)の流速の変動形態はほぼ同じで、N3地点におけるリーフへの入射波高の変動と相関が高いことがわかる。また、各地点の流向を比較すると、リーフエッジに近いN4地点ではその変化が大きい。岸に近いN5, N6地点での流向の変化は小さい。2月22日から3月9日にかけてN5, N6地点共に $\theta=210^\circ$ から $180^\circ$ にゆっくりと変化した。この流れの方向は、図—2を参照するとN5, N6地点から岸に沿い、リーフの切れ目へ向かう方向であることがわかる。その流速は、静穏時で10～20 cm/s、暴浪時では40 cm/sに達した。以上のことより、流速は入射波高に応じて変化するが、流向はほぼ一定してリーフの切れ目方向へ向いて流れていることがわかる。N5, N6の静穏時(2月22日～2月24日, 3月3日～3月6日)の流速を見ると、潮汐の影響による半日周期の変動はみられない。このことから静穏時にみられるN5で10 cm/s, N6で5 cm/s程度の流れは恒流と考えられる。一方、高波浪時には潮汐の変動に対応した流速の変動が見られ、干潮時に流速が小さくなっている。リーフエッジでは碎波によって急激な波高低下を生じるため、碎波した波のエネルギーのかなり

の部分が流れのエネルギーに変換され、これにより強い流れが生ずると考えられる。水位が低下するとリーフエッジでの反射率が増加し、リーフ内へ輸送される波の運動量フラックスが減少する。その結果、干潮時にはリーフ内の流れの形成が弱まると考えられる。

### (3) リーフ上の平面流況

リーフ上の流況はフロートを追跡することによって測定することができるが、トランシットでフロートを追跡する方法を用いる限り、その測定可能区域を広くとれない。リーフの幅は1 km以上に達するので、広域の流況を測定するためには他の方法について検討する必要がある。広域の情報を集める点から見れば、リモートセンシング技術の応用が有効である。そこで当区域の航空写真を調べたところ、写真中に顕著な筋目が見られ、それが平均流の流向を良く表わす可能性が見出された。図—7は1977年11月24日に国土地理院により撮影された写真である。図—3に示した深浅図と比較すると、山田温泉沖と前兼久漁港沖の深みの発達状況が良く見てとれる。また航空写真によると、深浅測量では得られない種々の特徴が明らかである。まず、リーフエッジではかなり幅広い岩礁が存在し、また、リーフ上には点々と小さな岩が広がっている。このような岩礁は入射波を摩擦減衰させる上でかなり有効と考えられる。注目すべき点は、リーフ外縁部より陸側へと黒い筋目模様が広がり、仲泊地区の沖でその方向はほぼ海岸線と平行になったあと、山田温泉沖の深みへと収束している点である。また、前兼久漁港の南側にある小島ではその先端から筋目が消え、あたかも島の背後の剝離域における流線の状況と大変良く似ている。また、全域における黒白のパターンに示された方向は、図—6に示した流速の測定結果と良い一致を示す。また、この流向は有義波高約1.2 m



図—7 リーフの空中写真

の比較的波高の低い時に観測されたフロート追跡の結果とも一致した。これらのことから、図-7に示す筋目模様は、リーフ上の平均流によって形成されたものであって、その線は流線を表わすと考えられる。また、筋目の黒白の強度は沖合部で明確であり、岸近くでは明瞭でなくなっている。このことは筋目の明瞭さが定性的意味において流速に対応している可能性を示している。

図-7に示した写真は特別な方法によって撮影されたものではなく、通常の空中写真である。それにもかかわらず、上述の結果が得られた点は、今後他の地区のリーフ上の流向を知る上で大変有効な手段となり得ると考えられる。また、このような筋目の形成原因としては、リーフエッジ付近のサンゴ礁が破壊され、小片が形成された後、上述の平均流れにより運ばれたものと推定される。

#### (4) 暴浪による wave set-up

波高が低く、潮位の高い場合にはリーフ上で波が碎波しないため波による水位変化は生じないと仮定し、水準測量を行った N2, N5 の地盤高と 3 月 4 日 4 時の水位との関係より各波高計に記録されたデータの絶対水位 (D.L. 基準) を求めた。2 月 27~28 日の暴浪時に生じた水位変化を明確にするため、N3 の水位が外洋の水位と等しいとおき、N3 と N2, N5, N7 の水位差を計算し、N3 での波高、水位の変化とともに図-8に示した。水位差の変化状況を見ると、外洋 (N3 地点) の波高変

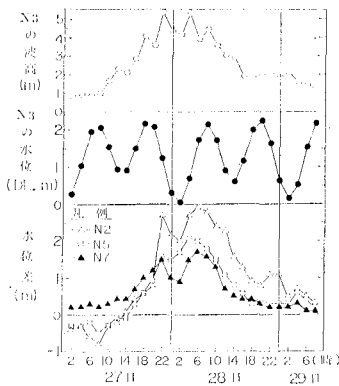


図-8 Wave set-up の観測結果

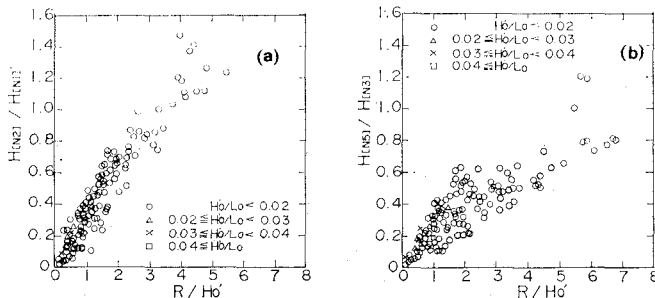


図-9 波高伝達率と  $R/H_0$  の関係

化と水位差の変化は良く対応し顕著な wave set-up が生じたことがわかる。その量は来襲波高の 5~7% 値を有する。また、地点ごとに見ると時化時の 27 日 22 時~28 日 16 時の間では、N2, N5, N7 の順に wave set-up 量が低下している。この水位分布によれば、N2 から N5 さらに N7 へと低下する水面勾配を生じ、その方向に平均流れが生ずると考えられる。この流れの方向は、図-6に示した流速測定の結果および図-7から推定される流れの向きとも良く一致する。

#### (5) 有義波高の伝達率

波浪観測ではリーフ内外の波高が 2 測線に沿って測定されている。そこで、これら 2 測線上ではほぼ 1 次元的に波が変形しているとして、有義波高の伝達率と有義波周期の変化率を調べた。最初に有義波高の伝達率を図-9に示す。縦軸はリーフ外の N1 または N3 地点の波高に対する N2, N5 地点の波高比であり、横軸には  $R/H_0$  をとった。ここに  $R$  はリーフ上の水深、 $H_0$  は換算沖波波高である。図の (a) は N1 を通る北測線の伝達率であり、(b) は N3 を通る南測線の伝達率を示す。両者はほぼ右上がりの直線関係を示しており、 $R/H_0$  が大きいほど波高伝達率も大きい。北測線 (a) と南測線 (b) を比較すると、南測線上の N5 地点の波高は北測線上の N2 地点に比較して波高の低下割合が大きく、データのばらつきも大きい。これはリーフエッジから測点までの距離の差に起因する。すなわち、N5 はリーフの中央付近にありリーフ外縁からの距離が長い (図-4 参照)、碎波減衰または摩擦減衰がより著しい。また、屈折などの 2 次元的な変形の影響を受け易いため、データのばらつきが大きいと考えられる。

同様に各地点の有義波周期の変化率を図-10に示す。縦軸には N3 地点の値を基準とした N5 地点の周期の変化率をとった。周期は全体に短周期側へシフトしており、特に  $R/H_0 \leq 1.5$  において周期が短くなる傾向がある。リーフ内で周期が短くなる主要因として、碎波した波がほぼ水平なサンゴ礁上を進行するのに伴う波の分散が挙げられる。また、全体として波形勾配が小さいほど短周期化する傾向がある。

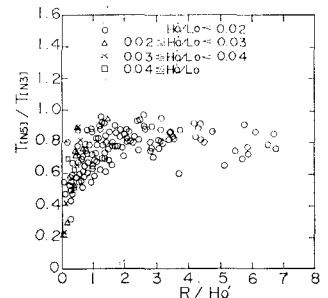


図-10 周期変化率と  $R/H_0$  の関係

#### (6) 平均流速と有義波高の関係

既に図-4に示したように、南測線上の N4~N6 地点の平均流速の変化は、リーフ外に位置する N3 地点の入射波高の変化と良い相関を有していた。このような両者の相関は、リーフ上への入射波が砕波により減衰する過程において、運動量保存の原理より波の運動量フラックスの一部が平均流や水位上昇へと変換されていくことを意味する。したがって、両者の関係を正確に記述するためには、radiation stress を含んだ海浜流の方程式を用いなければならない。しかし実際に海浜流の方程式の各項を評価するには観測データは不十分である。そこで、ここでは単純に N5 地点の平均流速と N3 地点における入射波高との関係を調べた(図-11)。パラメータの次元を考えると相関を直接調べることはやや無理があるが、図によると両者の相関は高く、波高が増加するにつれほぼ線形的に N5 地点の流速は増大することが明らかである。このことより、リーフ上の流れは明らかに波に支配されていることがわかる。

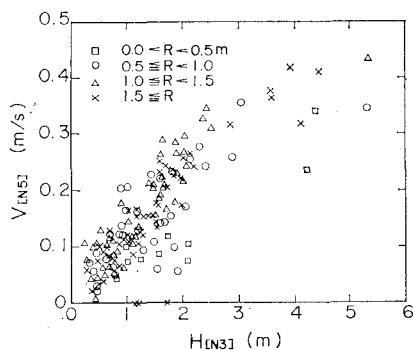


図-11 N3 地点の波高と N5 地点の流速の関係

#### 4. 結 論

沖縄県仲泊地区のリーフ周りで波、流れに関する現地

観測を実施した。最後に本研究によって得られた結論を要約すると次のようである。

- ① リーフ内外の地点で行った波浪観測によれば、リーフ上の波高には潮汐による水位変化の影響が大きく、外洋からの入射波の高低の影響は二次的である。
- ② リーフ上の平均流速は、リーフへの入射波高の変動と高い相関を有する。このことはリーフ上で砕波した入射波のエネルギーのかかなりの部分が流れのエネルギーに変換されることを意味している。また、その流向は岸近くではほぼ一定しており、リーフの切れ目へ向かう方向であった。
- ③ 航空写真によりリーフエッジよりリーフの深みへ向いた筋目模様が見出された。この筋目模様の方向は流れの観測による流向と良い対応を示し、流況パターンを通常の航空写真のみから調べることができることがわかった。
- ④ 高波浪時の水位観測結果より、リーフ外縁よりリーフ切れ目へ向かう水面勾配を生じ、その方向は ②、③で述べた流れの方向に良く対応することがわかった。
- ⑤ リーフ上への波高伝達率は  $R/H_0$  とほぼ比例関係にあり、その傾きはリーフエッジからの距離が長いほど小さくなる。また、 $R/H_0 < 1.5$  においては、伝達波の短周期化が顕著であった。

#### 参 考 文 献

- 1) 宇多高明・小俣 篤: 人工リーフの波浪減衰機能と海浜流場の形成に関する考察, 土木技術資料, Vol. 28, No. 2, pp. 32~37, 1986.
- 2) 宇多高明・小俣 篤・横山揚久: 人工リーフ周辺に生ずる海浜流と地形変化, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 41~44, 1987.
- 3) 宇多高明・小俣 篤: 人工リーフの設計法, 土木技術資料, Vol. 29, No. 12, pp. 26~31, 1987.
- 4) 例えば Shepard, F. P.: Coral Reefs, Submarine Geology, 3rd ed., Harper & Row, New York, 517 p., 1973.