

ラロトンガ島における波浪観測と荒天時波浪災害予測

梅山元彦*・鈴木康正**・田中茂信***・新谷哲也****

1. まえがき

荒天時における珊瑚海岸での波浪災害に関しては、非常に限られた地域を対象にしてしか調査や研究が行われておらず、リーフ上での波の伝播、水位変化、海岸護岸への波の遡上、越波等の現象はまだ解明されなければならない点が多く残されている。しかしながら、このような特殊海岸における波浪特性については海岸保全政策の策定を緊急の課題にしている熱帯や亜熱帯の群島諸国にとっては重要な事柄であり、防災、環境、景観等の問題を互いに関連づけて問題の解明に努めていく必要がある。

今回の調査は、1987年のサイクロン被害以来、日本から幾度か専門家チームが派遣され、海岸防災計画実施の必要性を提言し続けてきた南太平洋のクック諸島で、a) 常時の波浪観測、b) 海岸防災のための荒天時波浪災害予測モデルの開発と確立波を想定しての予測計算、c) 現地政府が提案する海岸防災計画案で海岸構造物を設計した場合にそれが妥当性であるかについての検討を行った。

2. 波浪・潮流観測結果

クック諸島は西経 156°~167°、南緯 8°~23°の広い範囲に点在する 15 の島々よりなる自治国家である。気候は熱帯雨林気候に属し、11 月から 4 月の雨期と、5 月から 10 月の乾期に分けられる。南西太平洋では毎年 5~10 のサイクロンが発生するが、そのうち 1~2 程度が雨期に北ないし北西よりクック諸島を通過する。首都アバルアを抱えるラロトンガ島は周囲が 32 km、最大標高 653 m の火山島である。島は海岸線から約 100~500 m 幅の珊瑚礁で囲まれているが、水深は僅かに数十 cm であるため干潮時にはリーフが水面上に現れる。リーフ上は、ほぼ全域で岩盤が露出しているか打ち上げられた珊瑚石が散らばっており、所々にパッセージが見受けられる。北海岸ではこのパッセージを利用してアバチウ港とアバルア港が造られており、アバチウ港は商港・漁港・マリナー

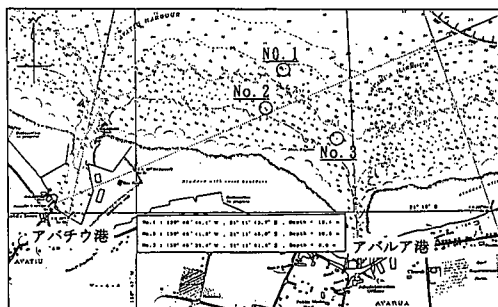


図-1 波浪・潮流の観測地点

として、アバルア港は小型船溜りとして利用されている。政治、経済の中心は、この両港湾の間に位置する海岸のすぐ背後にあり、国会議事堂や国際空港、その他の重要な施設も北海岸の東西方向に分布している。

アバチウ港とアバルア港間の海岸のリーフ幅は狭くせいぜい 100~200 m であるが、常時には沖から入射する波はリーフ端で碎波し、リーフ上で波高を減少させながら海岸線に向かって伝播する。碎波によって生じた流れは海岸線に平行な流れとなってパッセージに向かい、そこから沖へと戻る。サイクロン通過時には沖からの波はリーフ端に到達するまでに斜面上で碎波し、リーフ上では波高の減衰や風による水位上昇、長周期の振動が海岸線の方向に卓越して海岸洪水の危険性が増大する。

当初、アバチウ港とアバルア港に挟まれたリーフ上の任意断面上に機器を設置してリーフ内の波と流れを観測する予定であった。しかしながらリーフの水深が非常に浅く、日本から持参した波高・流速計を水没させることは不可能であったので、そのかわりとしてリーフ端沖側斜面上の三地点に機器を設置した。地点 1 は水深が 18.5 m、地点 2 は水深が 10.8 m、地点 3 は水深が 8.8 m である(図-1 参照)。地点 1 と 2 は、ほぼ波の主方向(NNE~NE)を結ぶ線上にあり、地点 3 はパッセージの近くにある。測定機器としては水圧式波高計と電磁流速計が一体となった DLEP (共和商工社製) を用い、観測は 1993 年 10 月 7 日から 24 日の間に行われた。観測は 2 時間毎に 20 分間づつの連続記録をとり、波と流速の測定インター

* 正会員 Ph.D. 東京都立大学工学部講師 土木工学科

** 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所波浪研究室長

*** 正会員 工修 建設省土木研究所海岸研究室長

**** 正会員 工修 東京都立大学工学部助手 土木工学科

バルは共に 0.5 秒とした。

波浪の解析は、ゼロアップクロス法によって、最大波、1/10 最大波、有義波、平均波の波高と周期を求めた。波浪の解析結果を図-2 に示す。地点 1, 2, 3 の波高と周期の時系列分布からわかるように、観測地点が互いに接近しているためどの地点を比べても変動のパターンは非常に良く似ている。興味深いことは、観測期間中の波高がゆっくりとその値を変化させていることである。この島のように回りに遮蔽するものがない海域においては気象のゆっくりとした変化が波に大きく影響を与えていることがわかる。地点 1 と 2 の最大波高を比較すると、その値が比較的低い期間には地点 2 の方が、高い期間には地点 1 の方がより高い波高になる傾向を示している。期間中の最大波高は、地点 1 が 2.85 m、地点 2 が 2.46 m、地点 3 が 1.74 m であった。有義波高は、地点 1 も 2 もほとんど変わらず 0.4~1.8 m の範囲の値であったが、地

点 3 では 0.4~1.3 m 程度とやや低かった。周期は、水深が浅いほどゆっくりと変化しているのがわかる。観測の前半は周期が比較的長く 9~13 秒程度であったが、後半は 6~8 秒程度に減少している。また、波向は観測期間中ほぼ全地点で一定しており、N~NNE であった。

図-3 には流れの解析結果を示してある。南北と東西方向に測定された水粒子速度の合成から流速と流向を求めた。流速と流向は地点ごとに異なった特色を持っていることがわかる。まず、地点 1 での流速は 5 ± 4 cm/sec 程度であり、ほぼ南方向に流れているのに対して、地点 2 では流速は 7 ± 3 cm/sec で、南西から西北西に向かって流れている。これは地点 1 では流れが斜面の影響を受けないのに対して、地点 2 ではその影響を受けているためであろうと想像できる。地点 3 についてはデータに欠測があるが平均流速は 2 cm/sec と比較的遅く変動も大

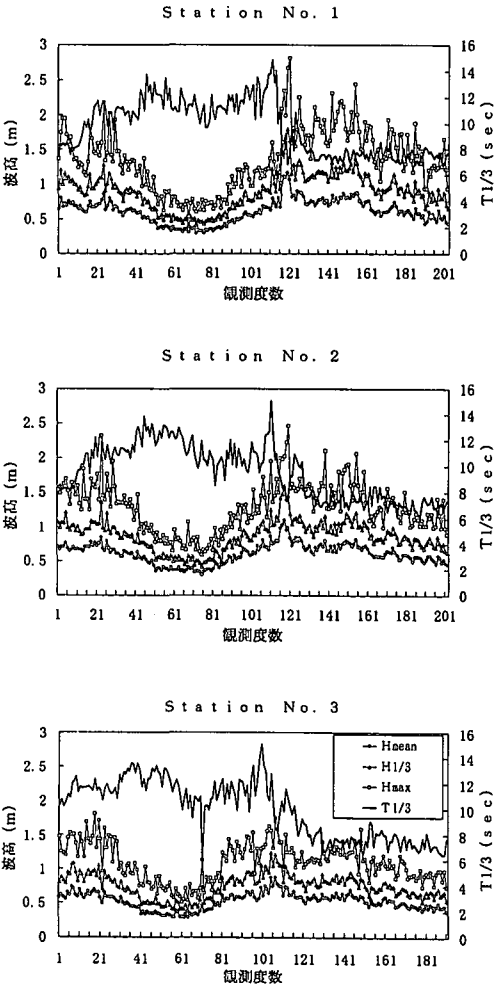


図-2 波浪観測結果

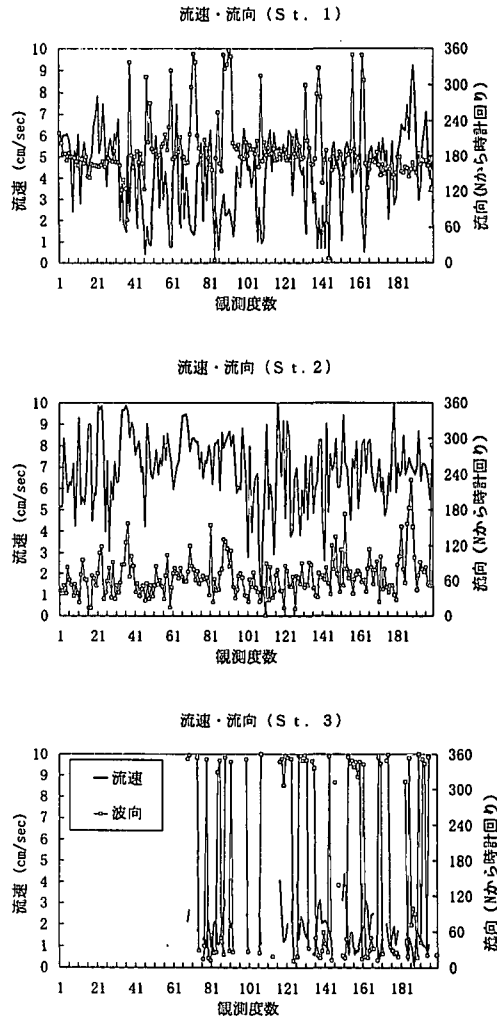


図-3 潮流観測結果

きい。残念ながらパッセージの影響がどの程度、流れに影響しているのかこの結果だけではわからない。

3. 波浪災害予測モデル

(1) 水 位

Bretschneider (1967) は、サイクロンの通過による水位の上昇について次式を示した。

$$S_T = S_A + S_P + S_X + S_Y + S_W \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 S_T は基準水位からの水位上昇、 S_A は潮汐による効果で潮位表から求めることができる量、 S_P はサイクロン通過時の大気圧の減少による効果で 1 hPa の大気圧の減少によって海面を 0.99 cm 上昇させる量である。また、 S_X は海岸線に垂直方向の風の応力による効果、 S_Y は海岸線に平行な風の応力と海底応力の釣り合い及びコリオリ力による効果で共に経験的に求まる量である。最後に、 S_W は波のセットアップによる効果であり、Longuet-Higgins and Stewart (1964) によって理論的な議論がなされているが、本研究では数値的に求めるために次式を差分化して用いる。

$$\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \rho g(h + \eta) \frac{\partial \eta}{\partial x} + \tau = 0 \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 S_{xx} はラディエーションストレス、 ρ は海水の密度、 g は重力加速度、 h は水深、 η は波の質量輸送に伴う水位の変化、 τ は海底せん断応力である。

次に、珊瑚礁海岸においては波による長周期の水面振動が顕著になるという報告がなされており、サーフビート現象としてすでに多くの数値実験、模型実験、現地観測が行われてきた。藤縄ら (1976) はサーフビートの波を現地観測より得た値によって関係づけているが、それによればその波高と周期は以下の関係で表される。

$$\frac{H^{(i)}}{H_{1/10}} = 0.23 \left(\frac{H_{1/10}}{h} \right)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (3)$$

$$T^{(i)} \approx 0.7 T_{1/10} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $H^{(i)}$ はサーフビートの波高、 $T^{(i)}$ は周期であり、 $1/10$ 最大波高 ($H_{1/10}$) と周期 ($T_{1/10}$) を用いた表現となっている。従って、サーフビートの水位上昇に及ぼす影響としては振幅 $H^{(i)}$ 、周期 $T^{(i)}$ の長周期振動として式 (1) に加えることにする。

(2) 波の伝播

ラロトンガ島の北海岸においてリーフが水没している時、波はリーフ端で碎けて断波状となりエネルギーを減衰させながらリーフ上を伝播することは海岸からの目視によって観察できる。また、荒天時のリーフ上においても同様に波は段波形であることが現場で撮られたビデオからわかっている。波の伝播モデルとしてはボア変形モデルを使うことにした。ボア変形モデルの基礎となるエネルギー平衡式は、

$$\frac{d(EC_g)}{dx} = - \left[\frac{\zeta}{8\pi\sqrt{2}} \rho g \omega H^2 + \frac{2}{3} f_w \frac{\rho}{\pi} \left(\frac{\pi H}{T \sinh kh} \right)^3 \right] \dots\dots\dots (5)$$

である。ここで、 E は単位面積当たり平均エネルギー、 C_g は群速度、 ζ は乱れによるエネルギー逸散係数、 f_w は海底摩擦係数、 ω は角速度、 k は波数である。式 (5) の中には決めるべき係数が二つ含まれている。砕波に起因するエネルギー散逸の程度を表す無次元係数 ζ はフルード数と砕波帯相似パラメーターの関数として与えられるものであるが、Gerritsen (1981) はハワイ、アラモアナリーフ上での平常時観測から $0.3 < \zeta < 0.6$ を得た。次に、海底摩擦係数 f_w は海底付近での水粒子軌道の長軸長の半分と Nicuradse の相当粗度との比の関数として求めるものであり、Kamphuis (1975) による提案式を使って計算できる。

(3) 波の打ち上げ高と越波量

打ち上げ高については高田 (1970) が提唱する式を、越波量については朴ら (1987) が人工リーフを想定した室内実験によって得た経験式を用いる。

(4) 波の伝達

ラロトンガ島の北海岸のようにリーフ幅が比較的狭い地域では護岸だけで背後地を海岸洪水から守るには天端をかなり高くしなければならない。リーフ上で碎けた波は質量輸送の増大によって、波のセットアップが起きて海岸線方向の水位は上昇する。アパルアのように土地が低い場所ではこの影響をもろに受けてしまうのであるが、観光地区であるがために高い護岸は景観上好ましくなく、そこで代替案として仮に離岸堤をリーフ端近くに設置した場合のようになるかケース・スタディーを行ってみることにした。離岸堤による波の伝達率はその形式、ブロックタイプによっていろいろと提案されているが、ここでは竹田ら (1983) がブロック積み傾斜堤に関して与えた式を用いて、傾斜堤背後の水位上昇については式 (2) によって計算を行う。

4. 海岸波浪・洪水予測

(1) 波浪の追算

ラロトンガ島に於いて過去に波浪観測が行われたことは一度だけあり、1987 年のサイクロン “Sally” 通過時に沖で測定されたデータが残っている。幸いなことにこの後すぐに日本政府から専門家チームが派遣され、洪水の痕跡の調査が行われており、この僅かに残された記録および現地で写された写真を頼りにリーフ上での波浪予測と水位変化とを追算することにした。追算の順序としてはまず、痕跡が残されたと思われる時間に沖合のブイが観測した波高と周期をモデルに入力する。そうするとモデルは斜面からリーフを通過して海岸線までの波高と水

面高の変化を計算をする。次に、海岸線での波高と水位の値から打ち上げ高を計算して、それが痕跡と一致するかどうかを検証する。もし合わない場合にはこの値を変えて最初から計算をやり直し、一致するまでそれを繰り返す。以上の手順で行われた追算は、梅山 (1995)、Umeyama ら (1995) に示されているが、ほとんどの場所の ξ は 0.2 に近い値であった。これはサイクロン時にはリーフ上での段波の減衰が常時に比べて小さいことを意味しており、荒天時の一応の目安とすることができる。

(2) 100 年確率の水位と波浪

クック政府はすでに「海岸保全政策」の案を考えており、それによれば設計技術上の目標として 100 年確率の水位と波浪を用いることにしている。そこで、この 100 年確率条件を用いた場合どのような被害が発生し、どういった対策をとったらよいのかについて調べることにした。

ラロトンガ島の HWL は +0.4 m である。また、この地域での確率風は Kirk (1992) によれば、確率年を Y とすると次式で示される。

$$U^{1.899} = 1456.265 + 2046.05 \log Y \cdots \cdots (6)$$

従って、100 年確率風速は 48.7 m/sec と算定できる。また、100 年確率のサイクロンの中心気圧は 927 hpa とした。従って、サイクロンが真上を通過する時の海面の上昇は 0.85 m となる。

確率波浪については、Kirk (1992) が 1978～1992 年に北海岸に被害を与えた 7 サイクロンをワイブル分布に当てはめた結果があり、 $H_s = 12.0$ m を得たが、我々は別の方法でこの値を検討した。1992 年にサモアを襲ったサイクロン“Val”は未曾有の被害をもたらした。クック諸島からはコースが逸れたためラロトンガ島への被害は少なかったというもの、もしこのサイクロンが北海岸を直撃したとしたら大惨事になったと言われている。そこでこのモデルサイクロン（中心気圧 970 hpa、最大風速 34.17 m/sec、最大風速距離 75 km、進行速度 7.0 m/sec、進入方向 N 20°W）がラロトンガ島上を通った場合を推定してウィルソン法を用いての波浪の推算を行った結果、 $H_s = 9.7$ m、 $T_s = 13.5$ sec となった。同様な計算を Kirk も CERC モデルによって計算しており、サイクロンの最大風速点下での波浪、 $H_s = 11.21$ m、 $T_s = 12.97$ sec を得ている。以上の計算をもとに 100 年確率波を検討し、 $H_s = 12.0$ m、 $T_s = 13.5$ sec とすることにした。

(3) 波浪災害予測計算

計算の第一段階として、現場の海岸地形に 100 年確率条件の水位と波浪を当てはめた場合のリーフ上での波高の変化と水位上昇それに海岸護岸背後への越波量を計算した。第二段階として、護岸天端を徐々に上げていき許容越波量以下になるまで計算を実行した。そして、第三

表-1 許容越波量に対応する護岸天端高

地点番号	St.1-9	St.2-1	St.2-2	St.3-6	St.4-3	St.5-4
リーフ幅(m)	150	120	210	110	510	120
前面水深(m)	0.30	0.58	0.28	0.34	0.41	0.40
地盤高(m+MWL)	3.81	2.83	3.40	3.47	3.32	3.90
被覆ブロックなし (m+MWL)						
離岸堤なし	4.51	4.53	4.20	4.47	3.92	4.20
離岸堤天端 $R=3.5$ m	4.01	4.03	3.80	3.97	3.72	3.90
$R=4.0$ m	3.81	3.83	3.80	3.77	3.82	3.90
$R=4.5$ m	3.81	3.83	3.70	3.77	3.82	3.90
$R=5.0$ m	3.81	3.83	3.80	3.77	3.92	3.90
被覆ブロックあり (m+MWL)						
離岸堤なし	3.99	3.98	3.84	3.96	3.74	***
離岸堤天端 $R=3.5$ m	3.64	3.67	3.57	3.63	3.58	***
$R=4.0$ m	***	3.58	3.60	3.54	3.67	***
$R=4.5$ m	***	3.61	3.56	3.57	3.69	***
$R=5.0$ m	***	3.63	3.64	3.59	3.78	***

段階として護岸前面に消波ブロックを置いた場合、リーフ端付近にブロック式離岸堤を設置した場合、および両方を同時に行った場合の 3 ケースについて越波量を計算して許容越波量に対する天端高の比較検討を行った。

表-1 は許容越波量を $0.05 \text{ m}^3/\text{m}/\text{sec}$ とした場合の護岸天端高さを前面にブロックによる被覆がある場合とない場合、それにリーフ端から 60 m の地点に天端高の異なる離岸堤防がある場合とない場合について検討した結

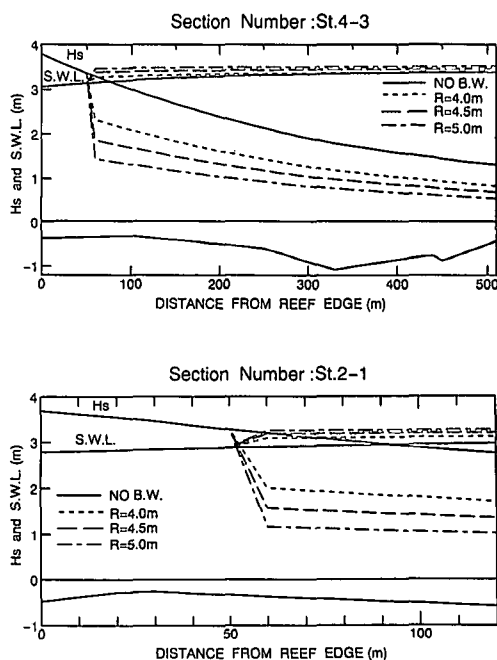


図-4 リーフ上での波高と水位の変化

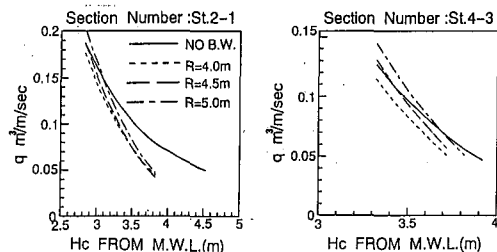


図-5 離岸堤を設置した時の護岸での越波量

果である。護岸前面にブロックを置くことは効果的であるが、この方法だけでは、許容越波量以下に抑えるためにはまだ天端を高くしなければならない。離岸堤を設置することによって護岸天端高を低減することができると考えたがさほどの効果は見られない。その上、離岸堤の天端を高くすることが護岸での越波量減少にはつながらないことも計算結果からわかる。

図-4は離岸堤がある場合とない場合のリーフ上での波高変形 (H_s) と水位上昇 (SWL) を示す。離岸堤の背後では波高が急激に減少しているが、それに伴って水位の上昇が見られる。図-5には離岸堤の天端高 (R) が、どのように護岸の天端高 (H_c) に対する越波量 (q) の変化に影響するかを示してある。この図から離岸堤の天端高を高くしていても背後の水位上昇が高くなるために護岸での越波量が必ずしも小さくならないことがわかる。

5. あとがき

今回の調査目的の一つとしては、サイクロンの度に海岸洪水の被害が起こるラロトンガ島北海岸のリーフ上での波と流れと水位変化を把握することであった。残念ながらリーフ水深がきわめて浅く、その上での観測は困難であったが、斜面上の長期観測によって興味深い結果が

得られた。

残る目的は、クック政府が案としている海岸防災計画に沿って構造物を設計した場合の考察であるが、100年確率で海岸防災施設を考えた場合、護岸での越波量を許容量以下に抑えるためには護岸天端高を高くするリーフ上に離岸堤を設置する必要があることが推算によってわかった。このことに関しては、景観の問題、確率年の決め方の問題、越波量低減のための新技術導入の問題等総合的に考えて結論をだす必要がある。

参考文献

- 海山元彦 (1995): 海岸保全計画のための波浪、越波量算定モデル, 海洋開発論文集, 第11巻, pp. 199-204.
- 高田 彰 (1970): 波の遡上、越波および反射の関連性について, 土木学会論文報告集, 182号, pp. 19-30.
- 竹田英章・及川 研・宮地陽輔・坂本洋一・上西隆広 (1983): 傾斜堤の波高伝達率に関する実験的研究, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 400-404.
- 藤縄幸雄・岡田憲司・渡部 聡 (1976): 波浪に伴う長周期波 (サーフ・ビート) の特性 (I), 防災科学技術センター報告, 15号, pp. 159-191.
- 朴 相吉・樫木 亨・出口一郎・井上康正 (1987): 面的防御工法による越波量低減効果及び越波量算定モデル, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 531-535.
- Bretschneider, C. L. (1967): Storm Surges, Advances in Hydrosience, pp. 341-418.
- Gerritsen, F. (1981): Wave attenuation and wave set-up on a coastal reef, Look Lab. Tech. Report, Univ. of Hawaii, No. 48, 416 pp.
- Kamphuis, J. W. (1975): Friction factor under oscillatory waves, Proc. of ASCE, No. WW2, pp. 135-144.
- Kirk, R. M. (1992): Unpublished Report.
- Longuet-Higgins, M. S. and Stewart, R. W. (1964): Radiation stress in water waves, a physical discussion with applications, Deep-Sea Research, Vol. 11, pp. 529-562.
- Umeyama, M., Kim, H. and Shintani T. (1995): Modelling of wave Propagation on a coral reef and coastal protection works in South Pacific islands, Proc. 26th IAHR Congress, (in press).