

海岸保全計画のための波浪、越波量算定モデル

— 南太平洋クック諸島を例として —

Modelling of Wave Propagation and Wave Overtopping for Coastal Protection in the Cook Islands

梅山 元彦*

Motohiko Umeyama

In many island states of the Pacific region, the coastal zone is subject to increasing demands to support rapidly growing population. As the business and residence districts are extremely limited, the pressure to accommodate urban growth and expanded economic activities inevitably results in the construction close to the shoreline. This study deals with a modelling for wave attenuation and sea level changes, and a fundamental idea for coastal protection, using a wave transmission and overtopping formulae. The study area is the Cook islands group.

Keywords : coastal protection, coral reef

1. はじめに

多くの南太平洋の諸国においては、利用可能な内陸地は極めて制限されているために、経済・商業活動を行うためのビルや店舗、観光を国の主要産業とするために必要なホテル、さらには住居、社会基盤施設の建設する場所がしだいにサイクロンや高潮の被害を受けやすい海岸線にまで迫ってきており、海岸区域の防災は政府にとって最重要課題のひとつとなっている。南太平洋諸島の典型的な海岸地域は数百から数千メートルの珊瑚礁で囲まれており、その上で波は砕けながら陸に近づく。従って、常時はこのリーフ（礁）が消波の機能を果たしてその上部では静穏な状態になるが、暴風時には砕波によって岸に向かっての質量輸送が顕著になり平均水位が上昇し、その結果海岸洪水が起き、人身や建物に大きな被害をもたらすことになる。これらの諸島における海岸防災の基本的考えは入射波に対して耐波性のある防波堤や海岸護岸を築いて陸上の施設や住居を守ろうとするものであり、洪水に対してはほとんど考慮がなされていないのが現状である。

従って、本研究では浅水リーフ上での波浪と水位の変動について予測するシミュレーションモデルとリーフから陸上への打ち上げ高および越波量を算定するためのモデルを基礎において、今までに蓄積されたリーフ上での諸現象の研究成果を取り入れた新たなモデルの開発を行う。また、将来仮にリーフ上に構造物が建設された場合も考えて、その背後で伝達波や水位上昇がどう変化するかについても検討した。対象地区としては、1987年のサイクロン"サリー"による高潮被害以来、日本から幾度か専門家チームが派遣され、海岸保全計画の必要性が提言されてきたクック諸島のラロトンガ島を選定した。

2. 珊瑚礁海岸波浪被害予測モデル

珊瑚礁海岸での波浪被害に関しては過去に幾つかの調査や研究がなされ、リーフ上での波の伝播、平均水位の変化、護岸への遡上、越波等のメカニズムはしだいに明らかになりつつある。しかしながら、これらの研究が進むにつれ、現在の海洋構造物の設計基準がそのままではリーフ地形海岸に適用できないという指摘もなされている。このような特殊海岸における波浪特性を知ることは、海岸保全政策を進めることを緊急としている熱帯や亜熱帯の群島諸国にとっては重要なことであり、災害との関連付けから明確にしていく必要がある。研究を行うにあたっては、現在までの技術的蓄積でどこまで波浪被害の予測が可能になるかモデルを組み立てて、現象の再現を試みることにした。暴風時の波浪予測のためには沖波の条件を与えることから始める。現地観測データがある場合はそれを使うことが可能であるが、さもない場合にはモデルサイクロンを想定し、波の追算を行うことにより波高、周期、波向きを求める。水位上昇についても現地観測記録があれば解析して使うことができるが、ない場合でもサイクロン通過時の潮位と大気圧変動、風向、風速によってこれを推定することが可能である。沖からの波は島斜面上を波高を増加しながら伝播し、ある点からは砕波して波高は減少、それに伴って平均水位は上昇し始める。この状況がリーフ端まで続き、そこから汀線までの間ではさらに現象が複雑になる。リーフ上での波高の減衰および水位上昇はリーフ端での波浪と水位条件を入力することによって予測計算ができる。最後に高潮時の洪水被害を示す痕跡から打ち上げ高がわかるので、護岸前面の波高を逆算してその値を用いれば越波量を求めることができる。

* 正会員 東京都立大学工学部土木工学科講師 (192-03 東京都八王子市南大沢 1-1)

2. 1 水 位

Bretschneider et al.¹⁾ (1994)は、高潮時の水位を、①潮位、②サイクロン通過時の大気圧の減少による変化、③風の吹き寄せ、④波のセットアップの和として表している。潮位については場所と時刻が与えられれば潮位表から簡単に読み取れるし、大気圧の減少による水位上昇は当該海域近傍の気象台等に設置された気圧の記録があれば、1 HPA 当たり約1 cmの水位上昇として計算できる。風の吹き寄せによる水位上昇については今のところ経験的にしか与えられないが、風速が強いほど、また水深が浅いほど上昇量は大きくなる。波の質量輸送による水位の変動については、砕波前は平均水位より下がり、砕波後は上がる。前者については、Longuet-Higgins and Stewart²⁾ (1964)により理論的に解が得られており、後者については研究によって異なった計算方法が示されている。ここでは、リーフ上での波のセットアップは波高の減衰に関係しているので一定値で与えるのではなく、リーフ断面の各点で波高を計算する度にモデルの中で計算するものとする。また最近では珊瑚礁海岸においては波の長周期の水位変動が顕著になるという報告がなされており、今回はさらに⑤サーフビートによる水位上昇分も考慮することにした。従って、高潮時の水位上昇量は次式で表せる。

$$S.L. = H.W.L. + 0.99(P_N - P_c) + k[U^2 \cos \alpha \ln(\frac{h_1}{h_2}) + \frac{FU^2}{h_2}] + \bar{\eta} + 0.115 H_{1/10} \sqrt{\frac{H_{1/10}}{h_1}} \quad (1)$$

ここで、S.L. = 高潮時の総水位上昇量 (m)、H.W.L. = 大潮平均高潮面 (m)、 $P_N = 1013 \text{ HPA}$ 、 P_c = サイクロン通過時の大気圧 (HPA)、 $k = 4.8 \times 10^{-7}$ 、 U = 風速 (m/s)、 α = 海底斜面角度、 h_1 = 沖水深 (m)、 h_2 = リーフの平均水深 (m)、 F = リーフ幅 (m)、 η = 波によるセットアップ (m)、 $H_{1/10} = 1/10$ 最大波高 (m)。

2. 2 波 の 伝 播 と セ ッ ト ア ッ プ

大洋底から島に続く斜面上での不規則波の浅水変形、セッダウンについては沖での条件を与えれば港湾構造物設計基準に示されている方法で計算ができるし、斜面で波が砕けた後の計算については合田³⁾(1975)による任意斜面上での不規則波変形に関する実験式と接続して計算を続行すればよい。以上の手順によってリーフ端までは浅水係数、水位上昇量、平均波高、有義波高、1/10最大波高、最大波高等が算出できる。

リーフ上での波の力学機構は非常に複雑であるため、数々の仮定を用いることによって波高の減衰やセットアップを求めるための関係式が提案されている。ここではリーフ上での波の伝播が段波で近似できるものと仮定して解析を行う。この段波のモデルは、Gerritsen⁴⁾ (1981)が開発した珊瑚礁上での波の減衰とセットアップ予測モデルを基礎にしており、質量および運動量の保存則における一波長当たりのエネルギー逸散量として、碎波による乱れと底面摩擦による損失が考慮されている。その基礎となるエネルギー平衡式を以下に示す。

$$\frac{dW}{dx} = \frac{d(E C_n)}{dx} = - \left[\frac{\zeta}{8\pi\sqrt{2}} \rho g \omega H^2 + \frac{2}{3} f_n \frac{\rho}{\pi} \left(\frac{\pi H}{T \sinh kh} \right)^2 \right] \quad (2)$$

ここで、 W =エネルギーフラックス、 E =単位面積当たり平均エネルギー、 C_g =群速度、 ζ =乱れによるエネルギー逸散係数、 ρ =水の密度、 g =重力加速度、 ω =角速度、 H =波高、 f_r =リーフ上の珊瑚の径と波の粒子軌道長によって変わる海底摩擦係数、 T =周期、 k =波数。また、波のセットアップは次の運動量保存則を解くことによって求めることができる。

$$\frac{\partial S_{\text{tot}}}{\partial x} + \rho g \left(h + \frac{\eta}{\gamma} \right) \frac{\partial \eta}{\partial x} + \tau = 0 \quad (3)$$

ここで、 S_{xx} = ラディエーションストレス、 h = 水深、 τ = 流体による平均せん断力。

従って、波高の変化と平均水位の上昇は式(2)と(3)を使って数値的に求めることができる。

2. 3 波 の 打 ち 上 げ 高 と 越 波 量

リーフの幅が入射波長に比べて短い場合には仮想勾配法や改良仮想勾配法によって打ち上げ高の予測が可能であるが、今回のように幅が最低でも数百メートルある場合には護岸前面まで波の伝播を計算して、そこから波の打ち上げ高と越波量を算定する必要がある。今まで、直立護岸の波の打ち上げ高については相対水深の範囲によって有限振幅波理論から導き出されるストークスの高次近似やクノイド波が、越波量の算定については堰の越流公式が用いられ、傾斜護岸については主に有限振幅長波理論を基に斜面上の水面変動と平均流速を数値的に求め、岸側境界の流速と水深の時間変動とから越波量を算定する方法がとられてきた。

波の打ち上げ高を数値的に解くことについては問題があり、実験値との整合性もあまりよくない。そこで、ここでは高田⁵⁾ (1970)が提唱する式によって求めることにした。式は一樣水深から勾配 $\tan \alpha$ の斜面が存在するときの打ち上げ高を求めるための式であり、斜面で波が砕ける勾配 ($\alpha = \alpha_c$) より大きい小さいかで次の2式のうちのどれかを使う。

$$\frac{R}{H} = \left[\sqrt{\frac{\pi}{2\alpha}} + \left(\frac{\eta_s}{H} - 1 \right) \right] \quad \alpha > \alpha_c \quad (4)$$

$$\frac{R}{H} = \left[\sqrt{\frac{\pi}{2\alpha}} + \left(\frac{\eta_s}{H} - 1 \right) \right] \left(\frac{\cot \alpha}{\cot \alpha_c} \right)^{2/3} \quad \alpha < \alpha_c \quad (5)$$

ここで、 R =打ち上げ高さ、 η_s = 直立壁の場合の打ち上げ高さ。

越波量算定公式としては、Kikkawa et al.⁶⁾ (1968)が一周期当たりの総越波流量を求める式を提案しているが、その後、朴他⁷⁾ (1987)は人工リーフを伝播してきた波が越波することを想定した室内実験で次のような経験公式を求めた。

$$q = \frac{4\sqrt{2g}}{3T} m (0.62 H_c + 0.86 H)^{3/2} \int_{t_0}^{t_1} [F(t) - \frac{H_c}{\eta_s}]^{3/2} dt \quad (6)$$

ここで、 m =越流係数 ($0.4 < m < 1.0$)、 $F(t)$ =越波時の水面形、 H_c = 直立壁の天端高さ、 t_0, t_1 = 越波開始及び終了時間。

不規則波問題への適応を考えたとき、リーフ上での波高分布はレイリー分布からずれてくるので、それに変わる確率密度関数を考えてやる必要がある。そこで超過確率として次のような関数を仮定した。

$$P(H) = \exp \left[- \frac{\pi}{4} \left(\frac{H}{H} \right)^v \right] \quad (7)$$

ここで、 $P(H)$ =超過確率、 H =平均波高、 v = 任意水深において個々の波が砕けているかそうでないかをモデルによって判定した後、近似によって決まる定数。

2. 4 波 の 伝 達

波浪の被害から海岸線を守るために護岸を高くすることには制限がある場合は、やもうえずリーフ上に離岸堤等の消波構造物を建設する必要があるかもしれない。離岸堤は消波機能に優れ伝達波高を減衰させるのであるが、その反面、背後では水位の上昇が起きるので十分検討して設置するかどうかを決めなければならない。離岸堤による波の伝達率の計算はその形式やブロックのタイプによって数々の実験式が提案されているが、その中で竹田ら⁸⁾ (1983)はブロック積み傾斜堤に関して次のような伝達率を与えた。

$$K_t = \frac{H_t}{H_i} = \frac{1}{[1 + 0.32 \{ \frac{\beta_1 (1 - \gamma)}{\beta_2 d} B_s \}^{0.75} \frac{H_i}{L_i}]^2} \quad \text{斜面上で越波しない場合} \quad (8)$$

$$K_t = \frac{H_t}{H_i} = 1.80 \left(-\frac{B_s}{L_i} - 0.60 \right) \left(\frac{R}{H_i} - 0.85 \right) + 0.04 \quad \text{斜面上で越波する場合} \quad (9)$$

ここで、 H_i = 入射波高、 H_t = 伝達波高、 L_i = 入射波長、 β_1, β_2 = ブロックのタイプに依存する定数、 γ = 空隙率、 d =ブロック高、 B_s = 天端幅、 R =打ち上げ高。

3. ク ッ ク 諸 島 の 概 要

クック諸島は1773年にキャプテン・クックの2度目の航海によって発見され、その後1888年にはイギリス領となるが、1890年に一時フランスに占領され、1901年になってようやく自治権が認められ、現在はニュージーランドの自治領となっている。国家は西経156°～167°、南緯8°～23°に点在する15の島からなっており、それらは北と南のグループに分けられている。人口は約二万二千人でそのうち約半数がラロトンガに住んでいる。首都アパルアがあるラロトンガ島は、中央部に標高653mのテ・マンガ山をかかえる火山島であり、周囲32kmを100～500m幅の裾礁で囲まれている。リーフ幅は北海岸で最も狭く、東西で広いに広くなり、南海岸では最も広い。また、リーフ水深は非常に浅く、MWLから数十cm程度である。河口から沖に向かっては水路になっており、そのうち北海岸の2つは港湾として利用されている。

首都アパルアは北海岸に面し、土地は海岸から山裾の湿地まで利用されている。リーフは珊瑚の遺骸と川からの土砂による堆積が見られ、それが砂丘と背後地を形成する原因になっている。背後地は比較的低く (MSL + 2～5 m)、高潮時には大きな被害を受けることになる。北海岸では1987年のサイクロン以来、アパルア港とアパチュウ港の間の海岸補修工事が実施されており、汀線から海岸道路を隔ててはすぐ背後にシビックセンターを中心とする町作りも現在計画段階である。また、この海岸沿いには空港、国会議事堂、石油備蓄施設などがあり、海岸道路の下には電気、水道、電話ケーブルが埋設されているため、もしその部分に被害が及べば政治、経済をはじめ一般生活に打撃を与えることになる。北海岸は今までに幾度も高潮の被害を受けてきたが、どの一つをとってもさほど大きなサイクロンによるものではなく毎年必ず一度は起こる程度のものであった。このことは、島にとってはむしろ幸運と考えられているようで、近年連続してサモアを襲ったような規模のサイクロンがク

ック島を直撃した場合について、島では対策の必要性が叫ばれている。

4. 波 浪 の 追 算

サイクロン通過時に珊瑚礁海岸ではどのような波浪状況になり大被害をもたらすのか、このことについて十分理解するに足る観測データを見つけだすことは非常に難しい。しかしながら、前にも述べてあるように沖での実測記録またはモデルサイクロンによる波浪推算と陸上の痕跡から波浪の追算は可能である。クック島の高潮被害については、1987年のサイクロン"サリー"通過時に水深40mの沖のブイで記録された波浪のデータが存在し、その直後にJICAの調査団によって調査された洪水の痕跡の調査記録が残っている。それらは全て北海岸の地区であり、場所は図-1に示すように、①空港の滑走路端の海岸道路、②気象台、③石油タンク、④厚生省である。このうち①は1987年1月1日にサイクロンが北西約300kmに位置した時に撮られた現場写真が残っており、その時のブイの記録は、 $H_{max}=8.2m$ 、 $T=12.5sec$ 、写真から打ち上げ高を+4.50m MSLと推定することができる。②～④は沖での波が最大、($H_{max}=12.2m$ 、 $T=12.5sec$)の時の打ち上げ高の想定痕跡であり、②+5.00m MSL、③+6.00m MSL、④+6.21m MSLであった。よって波浪の追算はこの4地点で行った。水深-40mでの最大波高と周期を入力し、波高と水位の変化を順次追っていく。リーフ上では水深と珊瑚骸の径によって海底摩擦係数が変化するので現地調査によってその大きさを決めなければならなかった。さて、式(2)における係数を適当に与えて汀線まで計算してやり、そこでの波高と水位上昇の値とから打ち上げ高を計算する。そして、その高さがサイクロンの通過時に残された痕跡と一致するまでその値を変えて計算を実行する。図-2にはおのののリーフ断面での波高の減衰とセットアップの状況が示されている。次にサイクロン"サリー"通過時、北海岸の主要な地点での越波量を計算した結果を表-1に記す。地点は図-1に示すとおりであり、リーフ断面形は図-3に描いてある。

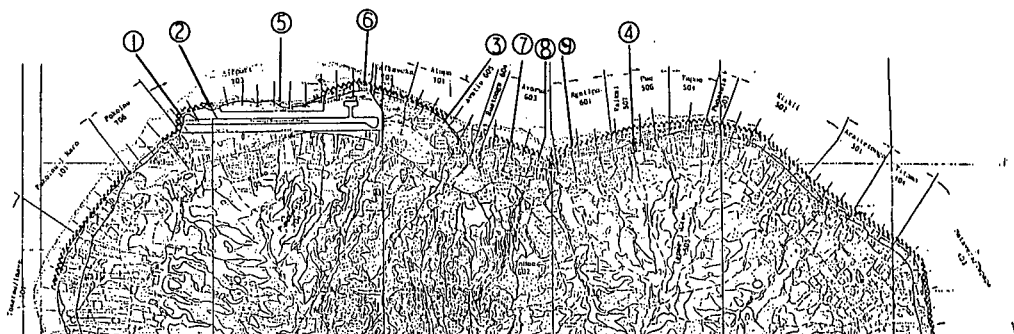


図-1 ラロトンガン島北海岸での調査地点

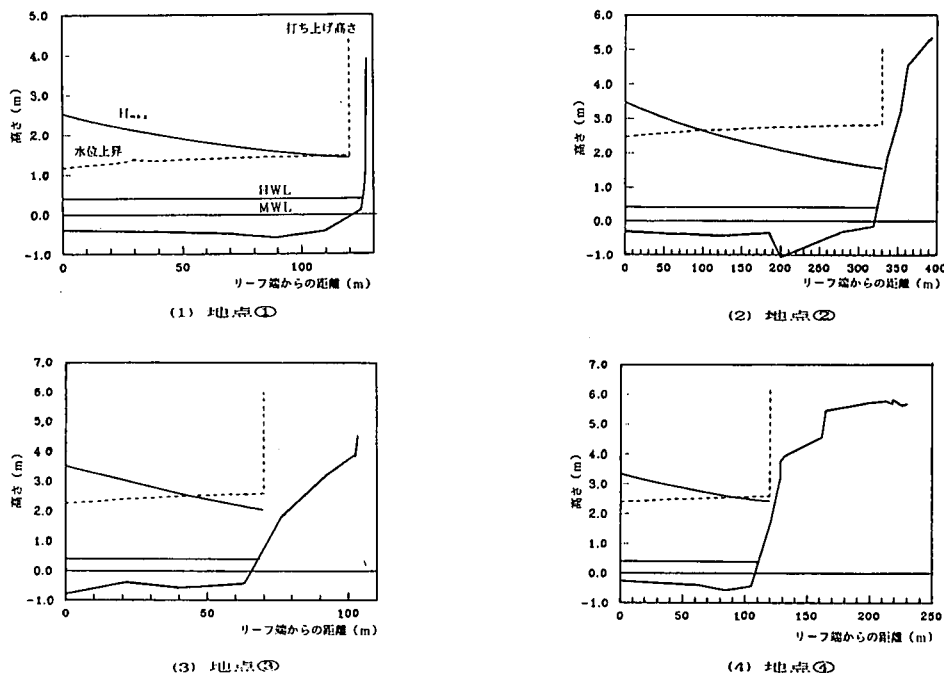


図-2 サイクロン"サリー"時における最大打ち上げ高さ

表-1 サイクロン"サリー"時における越波量の計算結果

地 点	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
リーフ幅 (m)	510	110	210	120	150
地 盤 高 (m MWL)	+3.41	+3.63	+4.34	+3.10	+4.08
水位上昇量 (m MWL)	+2.33	+2.11	+2.21	+2.08	+2.13
有義波高 (m)	0.69	1.57	1.22	1.71	1.66
越波量 ($\text{m}^3/\text{m/s}$)	0.004	0.026	0.016	0.056	0.020

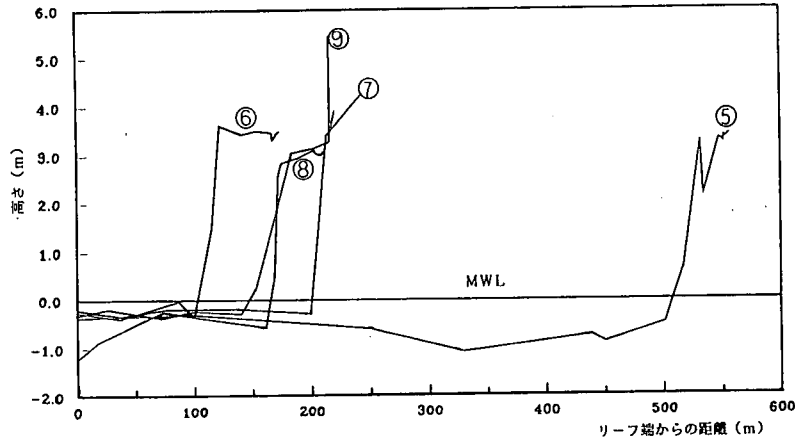


図-3 越波量計算地点の断面図

さてクック政府の海岸構造物の設計基準としては100年確率波を用いるとされており、その波浪条件からアパルバ市内を守ることは堤防の天端高を上げてその前面を被覆するだけでは不可能である。仮に珊瑚礁上に離岸堤を設置した場合、どの程度の海岸防御機能が期待できるのかを試算した結果を図-4に示す。これは、サイクロン"サリー"の波浪条件で離岸堤の背後での波高とセットアップを比較したものである。離岸堤はリーフ端から60mに設定するものとして天端高は水位上昇より若干高めに設定してある。離岸堤の背後で急激に波高が減衰し、それに伴って波のセットアップによって水位が上昇している様子がわかる。

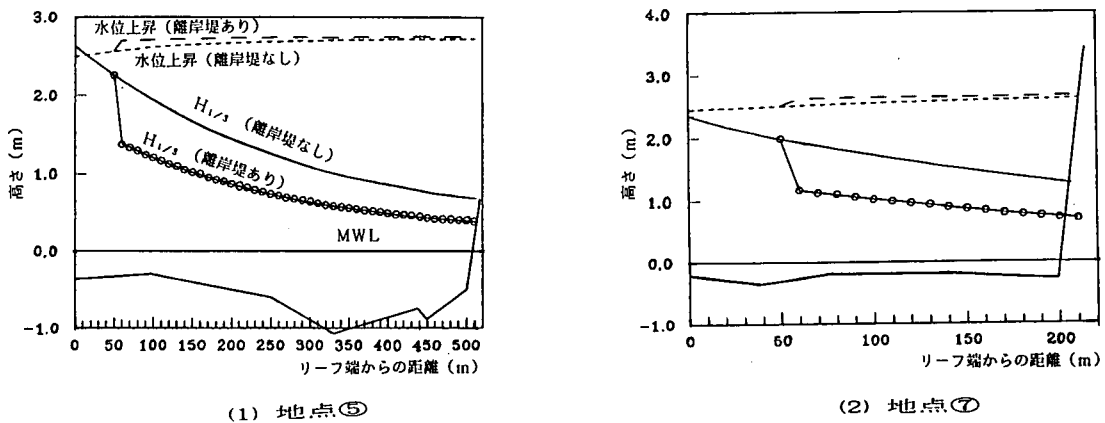


図-4 離岸堤を設置した場合の波の減衰と水位上昇

5. お わ り に

暴風時の珊瑚礁海岸での波浪と水位上昇を推算し、護岸への打ち上げ高と越波量を算定するモデルの開発を行った。このモデルは高潮後の痕跡調査から波浪を追算し、現地の洪水による波浪の特性量を推測することを目的とするものであるが、不規則波のリーフ変形やサーフビートの効果まで取り入れて計算することが可能である。さらに将来の海岸防災計画に対応するために、リーフ上に離岸堤などの消波構造物が設置された場合でも背後の伝達波と水位上昇が推算できるようになっている。現在まで明らかとなっている研究の結果は取り入れ、そうでないものについては仮定がなされているが、将来現象が解明されていくにつれてこのモデルでの予測の信頼性は

高まっていくなさである。

参 考 文 献

- 1) Bretschneider, C. L., Agrawal, J. D., Carmella, N. C., and Wohlmuth, K. A. : Hurricane Iniki, a hindcast, winds, windwaves, swells, storm surge and wave run-up, Hurricane of 1992, ASCE, pp. 772-781, 1994.
- 2) Longuet-Higgins, M. S., and Stewart, R. W. : Radiation stress in water waves, a physical discussion with applications, Deep-Sea Research, Vol. 11, pp. 529-562, 1964.
- 3) 合田良実 : 浅海域における波浪の砕波変形, 港湾技術研究所報告, 第 14 巻, 第 3 号, pp. 59-106, 1975.
- 4) Gerritsen, F. : Wave attenuation and wave set-up on a coastal reef, Look Lab. Tech. Report, University of Hawaii, No. 48, 416pp., 1981.
- 5) 高田彰 : 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, 第 182 号, pp. 19-30, 1970.
- 6) Kikkawa, H., Shiigai, H., and Kono, T. : Fundamental study of wave overtopping on levees, Coastal Engineering Conference, ASCE, Vol. 11, pp. 107-114, 1968.
- 7) 朴 相吉・榎木 亨・出口一郎・井上泰正 : 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, 土木学会, pp. 531-535, 1987.
- 8) 竹田英章・及川 研・宮地陽輔・坂本洋一・上西隆広 : 傾斜堤の波高伝達率算定法に関する実験的研究, 第 30 回海岸工学講演会論文集, 土木学会, pp. 400-404, 1983.