

リーフ上の波の変形に関する研究

津嘉山正光* ・河野二夫**・仲座栄三***
大城真一****・福田孝晴*****

1. はじめに

リーフ上の波の変形に関しては、これまで水槽実験及び現地観測などを通してかなり検討されている。リーフ上伝播波の波高算定式としては、高山ら(1977)によって提案された算定式があり、実務設計において有効利用されている。しかしながら、これまでのリーフ上の波に関する研究の多くは実験的なものであり、現地データを用いた検討は十分に行われているとはいいがたい。特に、サーフビートが顕著に発生するような大波高を有する来襲波を対象とした場合、水槽実験では長周期波の水槽内多重反射が生じ、実験結果の信頼性も乏しくなる。また、これまで行われた現地観測は、2～3台程度の波高計を用いたものが多く、これらの観測結果からは長さのスケールが極端に異なる波浪と長周期波とを同時に解析することは殆ど不可能である。

上述のような状況に鑑み、本研究では、9台の水位計と流速計とを用い、リーフ内外の波浪の現地観測を行った。観測では、沖波波浪が10mを越える大波高時の波浪観測に成功した。本論文では、その観測データを基に、リーフ上の波浪の変形特性を明らかにすると共に、実務設計で用いられているリーフ上波高算定式に含まれる係数の算定を行った。

2. 現地観測方法

現地観測は、沖縄県農林水産部漁港課の委託を受け平成3年度から都合4年間に亘って行われた。本研究では、その観測の中で沖波波浪の波高が大きかった台風9313号、9416号に伴う波浪を対象に解析を行った。

観測対象とした海岸は沖縄本島南部・具志頭村港川海岸である。海岸の概要及び測定点の配置図(平成6年度)を図-1に示す。台風9313号に対する観測の波高計配置図は、仲座ら(1995)を参照されたい。図示のとおり、

水位計・流速計は、短周期波の波高変化が激しくなるリーフの先端付近では配置間隔を短くとして配置し、長周期波が卓越するリーフ奥(汀線近く)では、測定器の配置間隔を長くした。水位及び水平流速は、40分おきの20分間連続測定とし、データサンプリング周波数は2Hzとした。

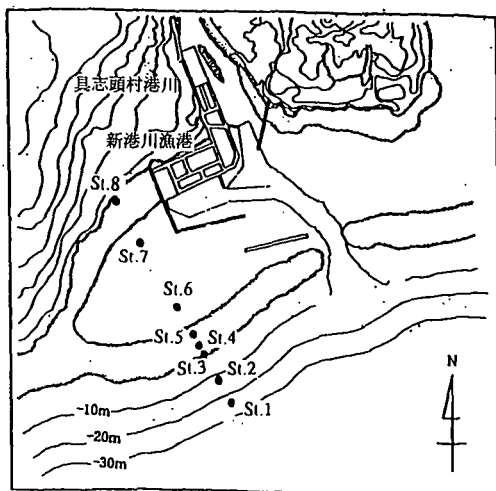


図-1 波高計設置位置

3. リーフによる来襲波浪の変形

図-2に、1993年8月31日から9月3日までの観測で得られた台風9313号に伴う水位及び有義波波高の経時変化を示す(注:以下で示す波形は全て水圧計による圧力波形である)。図示のとおり、リーフ上の波浪の有義波波高は、潮位とほぼ対応した変化を示している。来襲波浪の有義波波高が5m以上になると、潮位の他に来襲波浪の波高や水位上昇量(wave-setup)の影響が大きくなっている。

図-3に、台風9416号時の8月20日11時におけるSt.1～4の水位変動を示す。図示のとおり、St.1の沖波波形には、顕著な波群性がみられる。一方、高波高を有する波群の来襲に伴い、リーフ上の水面形には、長周期波の背に乗る形で高波高の波が存在している。生波形の

* 正会員 工博 琉球大学工学部教授 環境建設工学科
** 正会員 工博 宮崎大学工学部教授 土木工学科
*** 正会員 工博 琉球大学工学部助手 環境建設工学科
**** 正会員 工修 (有)海岸環境調査研究所 情報システム部主任研究員
***** (株)エコー

ままで見ていると、現象理解が困難なので、以下では仲座ら (1995) による wavelet filter 解析手法を用いてデータ解析を行い、リーフによる波の変形について議論して

いく。

3.1 wavelet filter を用いたデータ解析

仲座らは、wavelet 解析を利用して、不規則波データから成分波を取り出し、それを基に波の非線形・分散現象を説明する試みを行っている。図-4 に、wavelet filter 分離によって得られた、周期 13 秒に中心周波数を有する成分波の時間変動波形を示す。St. 1 及び St. 2 の水位変動は、リーフ上のその約 10 倍程度の大きさを有する。ここでは主として波形の変化に注目していることから、St. 1 及び St. 2 の水位変動の値を 1/10 倍にしてある（この操作は、この成分波のみに施してある）。図示のとおり、沖波波浪は幾つかの高波の grouping を形成しながら、極めて安定的にリーフ先端付近まで来襲している。砕波によってこの高波の grouping は崩壊させられるが、波群の核となるような波を中心とする「引き込み現象」によって再度 grouping を形成し（幾つかの安定な包絡ソリトンを形成し）ながらリーフ上を進行する。図-5 は、中心周波数が 0.25 Hz の波の波形である。図示のとおり、この

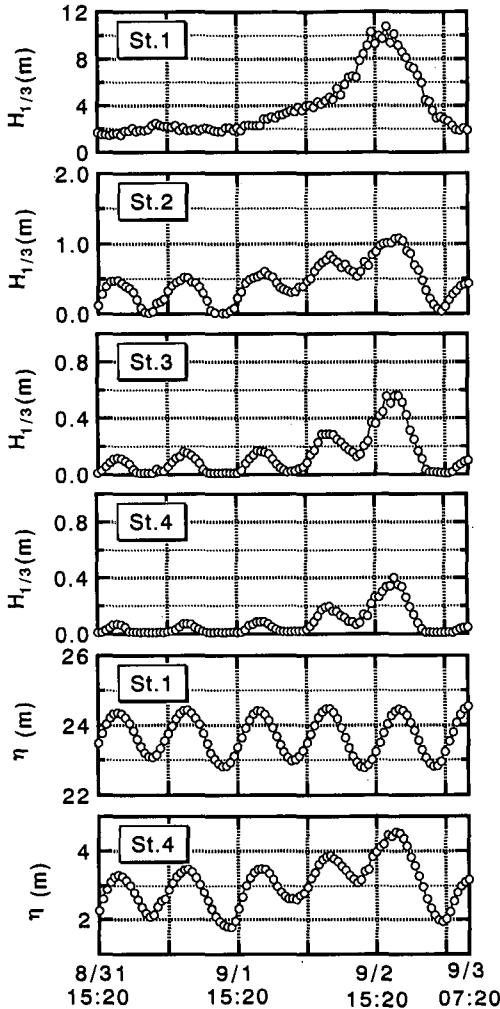


図-2 有義波高及び水位の経時変化 (T 9313)

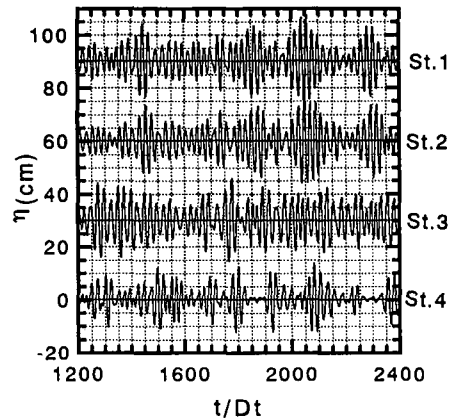


図-4 Wavelet filter 分離によって得られた成分波の波形 ($T=13$ sec)

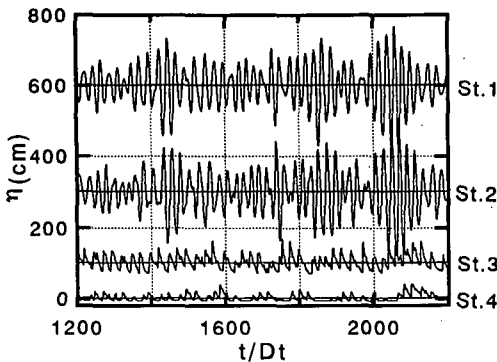


図-3 台風 9416 号来襲時の水位変動

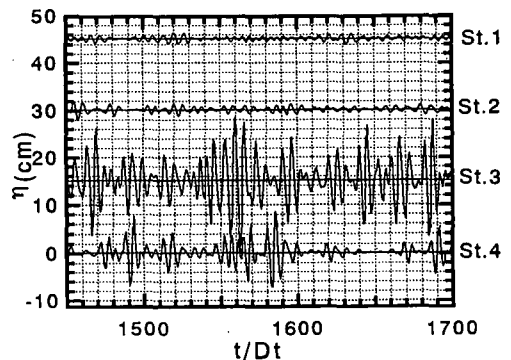
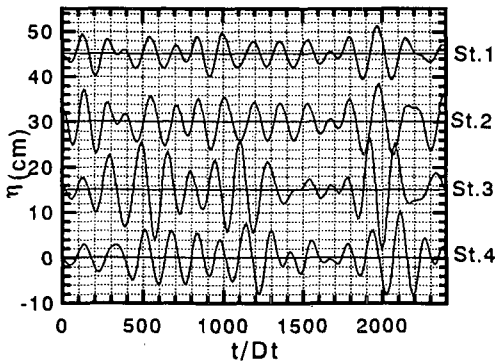


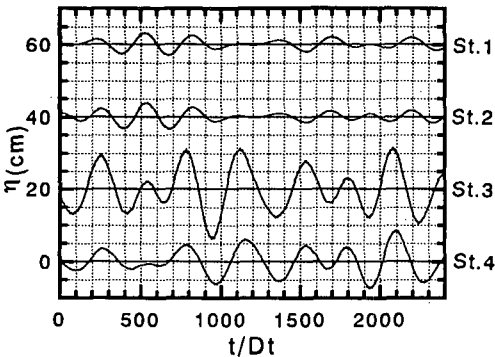
図-5 Wavelet filter 分離によって得られた成分波の波形 ($f=0.25$ Hz)

成分波は砕波点付近の St. 3 で爆発的に増加しており、このような高次の波の出現が砕波によって生じた bore の形成を特徴づけると共に、図-3 に示すようなかなり前傾化した波を作り出す。

図-6(a), (b) に、周期約 100 及び 150 秒の長周期波の波形を示す。周期 100 秒程度の長周期波はリーフ内外共に有意な振動を示している。しかし、周期 150 秒の波の波形はリーフ上のみで高くなっている。図-7 に、周期 13 秒の成分波と周期 100 秒の成分波との波形を同時に示した。St. 1 及び St. 2 において、周期 100 秒程度の長周期波は高波群の下で水位の低下を示しており、拘束波であると考えられる。次に、リーフ上の長周期波は、高波群の到達に伴い水位の上昇を示すことから、高波群の砕波に伴う局所的な wave set-up が自由波を形成させたものと考えられる。高波群の砕波に伴う急激な wave set-up は、砕波点から沖方向へもコーシーポアソン波的な水面変動をも作りだす。リーフ上の平均水深とリーフ長から判断すると、図-6(b) に示す振動は、リーフ上の 2 倍モードの固有振動に対応するものと思われる(仲座ら, 1994, 1995)。



(a) ($T=100$ sec)



(b) ($T=150$ sec)

図-6 長周期波の波形

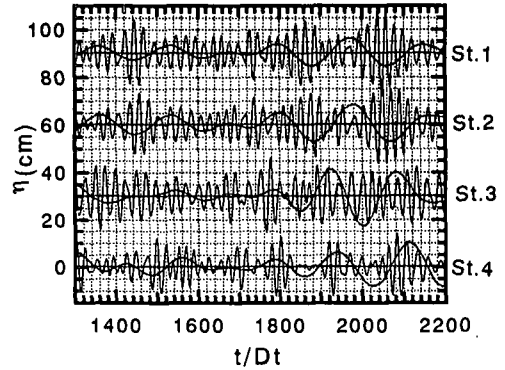


図-7 周期 13 s 及び 100 s の成分波の波形

4. 現地データに基づいた波高算定式の検討

高山ら (1977) が実験データを基に与えたりーフ上の波高算定に対する経験式は、次式で示される。

$$\left. \begin{aligned} \frac{H}{H_0} &= B \exp\left[-A \frac{x}{H_0}\right] + \frac{\alpha(h+\eta_s)}{H_0} \\ B &= \frac{H_{x=0}}{H_0} - \frac{\alpha(h+\eta_s)}{H_0} \\ \frac{\alpha(h+\eta_s)}{H_0} &= \sqrt{\frac{C_0}{1 + \frac{3}{8}\beta\alpha^2}} \\ \frac{\eta}{H_0} &= \left[C_0 - \frac{3}{8}\beta\left(\frac{H}{H_0}\right)^2 \right] - \frac{h}{H_0} \\ C_0 &= \left(\frac{\eta_{x=0} + h}{H_0} \right)^2 + \frac{3}{8}\beta\left(\frac{H_{x=0}}{H_0}\right)^2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 H :リーフ上の波高、 h :リーフ上の水深、 $H_{x=0}$:リーフ奥での波高、 η_{∞} : $x=\infty$ での平均水位上昇量、 η :リーフ上の平均水位上昇量、 x :リーフ先端からの距離である。

式 (1) で水位の上昇量は、水位 (圧力) 勾配と波の radiation stress とが釣り合うとする運動量保存の式から理論的に導かれたものである。式 (1) は、入射波の諸元と、リーフ形状を与え、砕波帯内の波高算定に対する合田の図表や近似式を基に、原点での波高比 H/H_0 と水位上昇量 h_0 を求め、係数 A 及び α に適当な値を用いて計算される。

係数 A については、高山らが実験値のパラツキを認めながらも一定値である 0.05 を提案している。また、係数 α については、0.33 としている。

図-8 に、係数 A の値について観測データを基に算出した結果を示す。図中には、参考のために江頭ら (1985) が現値観測データを基に提案した経験式 (点線) と高山らの値 (破線) をも表示してある。係数 A は、波形勾配の影響をあまり受けず、相対水深 h/H_0 によって変化している。図中の実線は近似曲線であるがデータはこの曲線の周りに分布しており、係数 A の値は、ほぼこの近似式

で与えられる。

江頭らによって係数 A の値が提示されて以来、高山らが提案した $A=0.05$ よりも遙かに大きくなった係数に対して、リーフ先端付近の防波堤などの設計にこの値を適用しようとする、従来の計算値と倍程度の違いを生じることとなり、現場技術者らは係数 A の適用に際し、相当な推敲を余儀なくされてきた。図-8に示すとおり、筆者らの観測値は高山らが示した0.05を中心として、相対水深で変化している。すなわち、実験結果から予測される範囲に入っている。江頭らの与えた係数値が大きくなった理由は明らかでないが、彼らがリーフ上のただ1点の測定値のみを用いてこの係数を求めたのに対し、本研究では、波浪の波高変化が最も著しいリーフ先端付近に波高測定点を密に配置し、さらに観測点を大幅に増やしたことで精度の良い値を求められたことにあると考えられる。

次に、リーフ先端での波高とリーフ上再生波との差を表す係数 B について示す。図示のとおり、係数 B も相対水深で比較的良好に整理されるようである。しかし、この係数 B については、従来より合田(1975)の砕波帯内の波高算定図あるいは近似式を基に、式(1)の第2式で算出されている。このように計算された算定値と観測値との比較を図-10に示す。図示のとおり、両者の間の対応は比較的良好と判断される。図-9との比較で考えると、相対水深が大きくなるにつれて、若干合田式による計算値の方が大きくなり、観測値の1.2倍程度大きくなる傾向にある。また、相対水深が小さくなる場所でも若干のズレが生じている。

図-11に、リーフ上再生波の波高と相対水深との関係を示す。図中には、江頭ら(1985)及び高山ら(1977)の提案値も示してある。図示のとおり、観測値は、従来の値よりも小さい。また、再生波の波高は、リーフ奥の実水深($h+dh$)と入射波高 H_0 とによる相対水深によって2つの変化形態を有している。この傾向は江頭らの観測値の傾向と一致するが、係数の値はかなり異なっている。

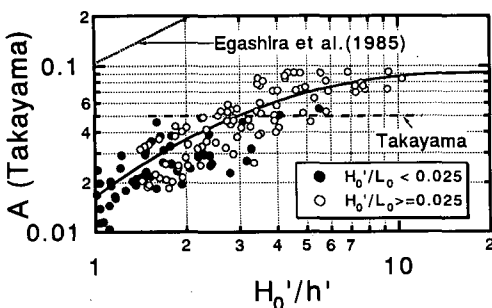


図-8 係数 A と波高水深比(H_0'/h')との関係

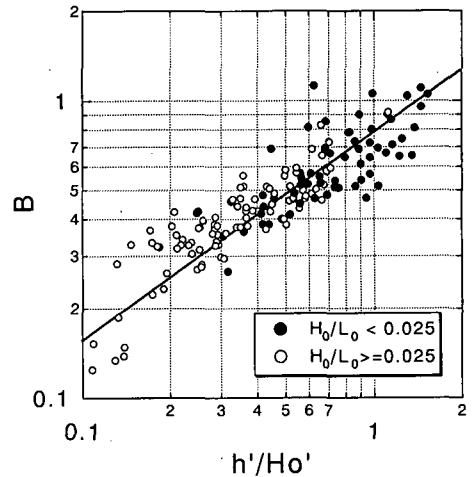


図-9 係数 B と相対水深(h'/H_0)との関係

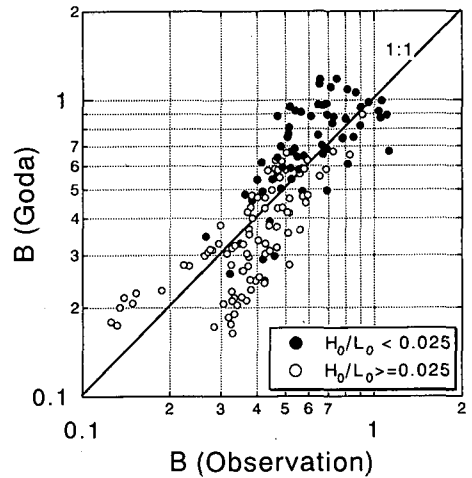


図-10 係数 B に対する計算値(合田)と観測値との比較

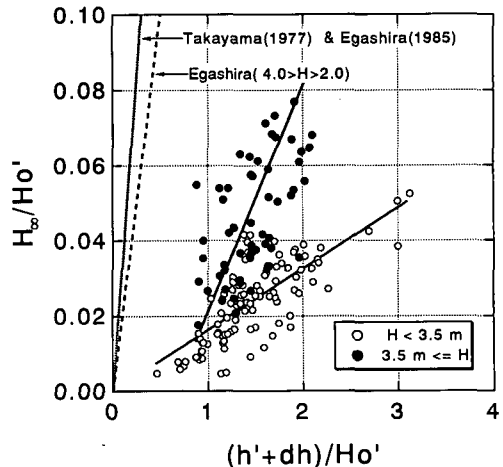


図-11 リーフ上再生波の波高と相対水深との関係

る。

5. おわりに

数年に亘って失敗を繰り返し、ようやくリーフ上の波の変形を捉える観測体制ができあがった。本研究では、こうして得られた現地観測データを基に、リーフ海岸に來襲する波浪の変形及び長周期波の発生を wavelet filter 解析をとおして議論した。さらに、実務設計で広く利用されている高山らのリーフ上の波高算定式に含まれる各係数の見直しを行った。その結果、従来かなりのバラツキで与えられていた各係数の値が、相対水深などをパラメータとして比較的統一した傾向で与えられることを示した。

最後に、本研究の一部は、沖縄県農林水産部漁港課より（財団）漁港漁村建設技術研究所を経て受託研究として行われたものである。また、文部省科学研究費（一般

研究（C）、研究代表者：津嘉山正光）の援助を受けている。ここに記し、感謝致します。

参考文献

- 江頭和彦・福田功・岸良安治・西村達郎（1985）：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.
- 合田良実（1975）：浅海域における波浪の碎波変形，港湾技術研究所報告，第14巻，第3号，pp. 59-106.
- 高山知司・神山豊・菊池治（1977）：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.
- 津嘉山正光・仲座栄三・我喜屋邦浩（1989）：リーフ上の波の変形に関する研究，海岸工学論文集，第36巻，pp. 70-74.
- 仲座栄三・大城真一・津嘉山正光・日野幹雄（1995）：wavelet 変換による波浪データの解析，海岸工学論文集，第42巻，pp. 306-310.
- 仲座栄三・津嘉山正光・田中聡（1994）：リーフ上の波・サーフビートに関する研究，海岸工学論文集，第41巻，pp. 86-90.