

リーフ海岸における波・サーフビートに関する研究

仲 座 栄 三*・津嘉山正光**・田 中 聡***

1. はじめに

南西諸島で見られるようなサンゴ礁（リーフ地形）海岸では、台風時に異常な水位の上昇が発生することが数多く報告されている。このような異常な水位の上昇は、リーフ地形海岸のみでなく、砕波帯内に建設された小規模の港湾・漁港や、平面的にクローズした海岸などでもよく発生しており、それによる災害等の報告例も多い。これらいずれの場合にも、来襲波群が外力となり共振現象として発生した静振やサーフビートなど、いわゆる長周期波が主な原因と思われる。従来より、こうした問題を抱える海岸では、現象解明のための現地観測が数多く行われているものの、その大半が設計波高に匹敵するような大波高を有する波浪の観測に成功していない。それ故、得られた比較的小きな来襲波に対する結果から、設計波程度の波によって引き起こされる現象を外挿・予測することになる。このことは、一般に何の疑いもなく受け入れがちであるが、時として大きな判断ミスを起こすことにもなる。このことは、Reynolds 数が小さな層流の世界から乱流の世界が予想だにできないのと軌を一にする。

リーフ上における波浪の本格的な現地観測は、1991年に始まり、1993年で3年目になる。その3年間に亘る観測でようやく、設計波程度の大波高を有する波浪の現地観測に成功した。この時の台風規模及び台風コースは、これまで沖縄県各地に災害をもたらした歴史的台風の上位3番目とほぼ同様なものであった。すなわち、以下に示す現地観測結果の殆どが設計条件としてそのまま取り入れられるものと考えられる。

本研究では、上述のような現地観測データを基に、台風接近・通過に伴う沖波波浪の波群特性の変化を明らかにすると共に、それと砕波帯内外におけるサーフビートとの関連を明らかにする。また、平面的に得られたサーフビートのデータを基に、長周期波の発生とその挙動性の解析を行う。

2. 現地観測位置及び方法

現地観測は、沖縄本島南部具志頭村港川海岸で行った。その位置を図-1に示す。図示のとおり、この海岸の法線は南東を向き、前面に沖合い約600mのサンゴ礁を有している。サンゴ礁はD.L.+1.0mのほぼ一定のレベルを有し、礁池内の平均深さは約1mである。図-2に、観測点St.1からSt.6にいたる方向の深淺図を示す。水位及び流速の測定には、2成分電磁流速計内蔵型波高計(Wave hunter, アイオーテック社製)を9台用いた。波浪の観測は、40分間隔の20分間測定とし、データサンプリング間隔は0.5秒とした。

3. 観測結果及び解析

図-3に、本研究で対象とした台風9313号と、沖縄県各地に甚大な台風災害をもたらした歴史的台風のコース

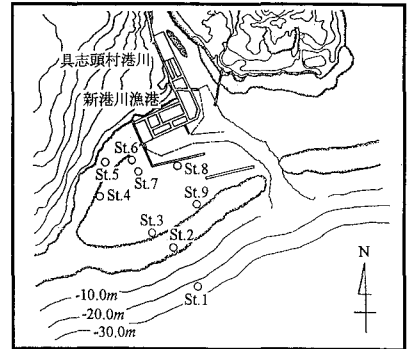


図-1 現地観測位置

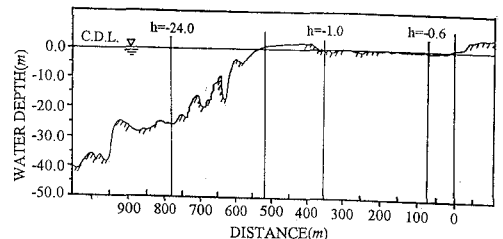


図-2 海底断面

* 正会員 工博 琉球大学助手 工学部環境建設工学科

** 正会員 工博 琉球大学教授 工学部環境建設工学科

*** 正会員 工修 (株)エコー

を示す。これらの台風は、ほぼ同様な台風コースを取っている。特に、観測位置である沖縄本島南部から見れば、殆ど一致したものと言える。図-4に、1993年8月20日から10月9日までに得られた沖波波浪の波高及び周期の経時変化を示す。図示のとおり、沖波波浪の諸元は、台風の接近・通過に伴い、大きく変動している。特に、台風9313号が接近する際には、有義波高は9mを越えている。台風コース及び波浪諸元からして、本研究で得られたデータは、設計条件に匹敵する程度のもと考えられる(沖縄県各地の海岸は外洋に直接面しており、設計波高は一般に10~15mである)。

図-5は、来襲波浪の浅水・砕波変形をへて、リーフ上を進行する過程におけるパワースペクトルの変化を示している。図示のとおり、0.07 Hz以上の短周期波に関しては、リーフの潜堤効果によって、成分波のエネルギーは約1/100にまで低下している。しかし、逆に0.01~0.07

Hzにおけるエネルギーは、波がリーフ上を岸向きに進行するにつれ増大している。特に、0.02~0.07 Hz帯では、波が岸向きに進行するにつれて極大値が幾つか出現している。これは、砕波後リーフ上を伝播する個々波が先行する波に追いつき・合体することによって生じた、ダイナミックな長周期波のエネルギーに対応している。このことは、reef edgeからある程度離れたリーフ上では、個々波の1波というより、2~3波程度が合体した比較的長周期の波が、かなりのエネルギーを有して存在することを示している。このような波浪成分と長周期波成分との中間程度の周期を有する波は、一般的にはサーフビート成分に含められるか、ややもすれば解析の対象外とされることもあり、この種の波の取り扱いが流体力の評価や漂砂現象の解明に対して重要となる。Swash zoneについて、Mase(1988)もこのような個々波の追いつき・合体現象の重要性について述べている。

次に、台風の接近・通過に伴う沖波の波群特性値の変化について検討する。一般に、設計波としての有義波高や周期は、過去のデータや既往台風を基にした波浪推算などから確率値として与えられる。しかしながら、高波の連長など波群化を特徴づける指標の与え方は未だ確立されていない。

図-6に、台風9313号の接近・通過に伴う沖波諸元の経時変化と長周期波及びリーフ上(St. 4)の振幅(rms値)の経時変化を示す。図示のとおり、入射波はCalm conditionからSwell, Wind Wavesとなり、さらにSwellと大きく変化している。一方、合田の定義に従う高波の平均連長 λ_1 及び平均繰り返し長さ λ_2 は、1観測毎にバラツキ(統計誤差)を示し、台風の接近・通過に伴う系統的な変化は見られない。隣り合う波間期の相関を示す相関係数 γ_{HH} は、1観測ごとのバラツキはあるものの、台風の通過後に高くなる傾向を示している。それと共に、 λ_1 及び λ_2 も

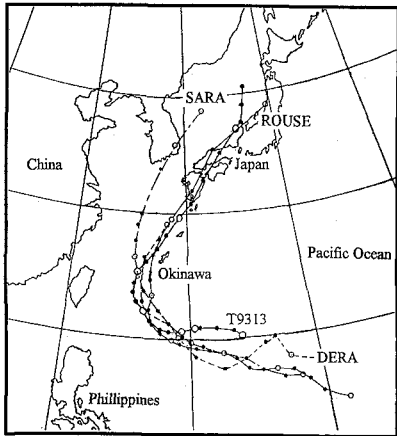


図-3 台風経路

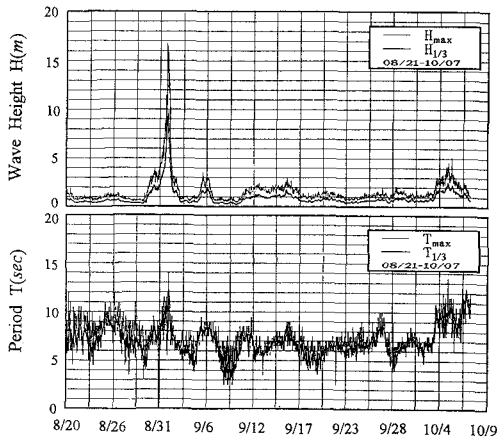


図-4 沖波の波高及び周期の経時変化

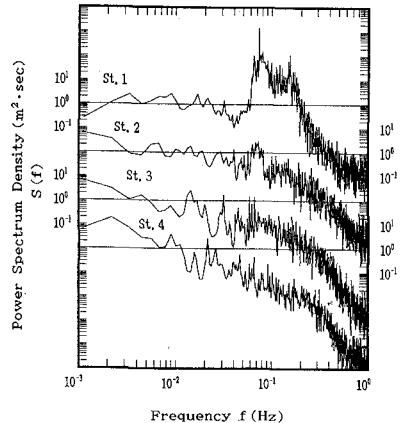


図-5 水位変動のパワースペクトルの岸沖変化

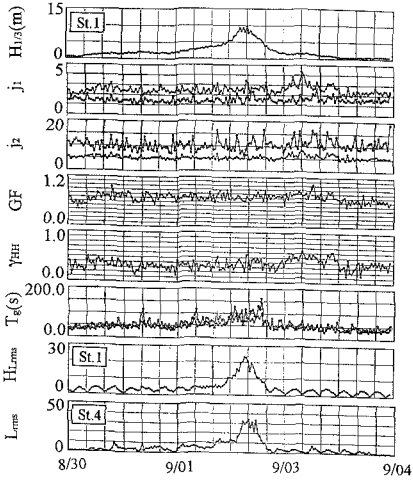


図-6 沖波波浪特性値及び長周期波波高の経時変化

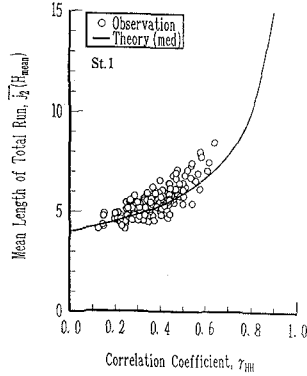


図-7 相関係数 γ_{HH} と平均繰り返し長さ \bar{L}_T の関係

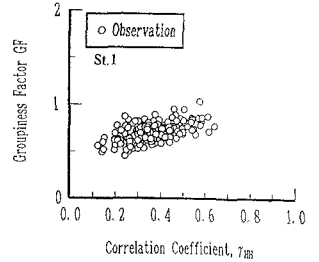


図-8 相関係数 γ_{HH} と波群係数 GF の関係

若干増加する傾向にある。また、GF の値も観測期間中の系統的な変化は示していない。一方、SIWEH から求めた波群周期は、台風接近時に最大となり、通過後に減少する傾向を示している。これは、図-3 で示したとおり、台風接近に伴い、有義波周期が増加したことに基づいている。図-7 に、 γ_{HH} と j_2 との関係を示す。図中の実線は、中央値を閾値とした理論値である (Kimura, 1980; 合田, 1985)。観測値は、閾値として平均波高を用いているが、図示のとおり、中央値を閾値とする理論値とほぼ同じ傾向を示している。図-8 に、 γ_{HH} と GF との関係を示す。図示のとおり、GF と γ_{HH} とは、ほぼ正の比例関係にある。このような入射波群の状況下で、St. 1 及びリーフ上の長周期波の振幅は、図示のとおり、全体的にはほぼ沖波波浪の有義波高の変化と同様な傾向を示している。

以上のことから判断すると、砕波帯内外の水理特性を決定づけるのは、有義波高や有義周期であり、波群化の程度を示す groupiness factor (J_1, J_2, GF, T_g など) はスペクトル形を決定した後に生じる変動値として、第2義的に考えるべきものと言える。合田 (1992) も、捨て石などの安定性や不規則波の研究展望の中で同様なことを述べている。

図-9 に、個々波の振幅 (rms 値) 及び長周期波の振幅の岸沖変化を示す。図示のとおり、個々波の振幅は reef edge から岸に行くにつれて減衰している。しかし、長周期波の振幅は、逆に大きくなっている。また、一樣に増加するのではなく、わずかに St. 3 が小さくなっている。図-10 に、St. 5 における長周期波のパワースペクトルを示す。スペクトルには幾つかの極大値が見られ、リーフ上に共振現象が生じている可能性を示唆している (実験的には、Nakaza・Hino (1991) がすでに指摘している)。リーフ上の水塊の運動を岸沖方向のみで考えると、固有

振動数として、0.023, 0.0068, 0.0113, 0.0158, ……が求まる。図-10 に示すスペクトルは、ほぼこれらの振動数の位置でピーク値をとっており、リーフ上のサーフピート現象が共振現象として発生していることを示している。また、パワーの強さは基本モードと二次モードの振動に対応するものがほぼ等しく存在しており、リーフ上にはそれらのモードの振動が混在しているものと判断される。St. 3 の位置は、二次モードの振動に対してほぼ節の位置にあり、図-9 でこの位置の長周期波の振幅が幾分低くなるのが説明される。

図-11 及び 12 に、砕波帯外に位置する St. 1 と汀線近傍の St. 5 とにおける長周期波の波高と入射波の有義波高との関係を示す。砕波帯外の長周期波の波高は、Longuet-Higgins・Stewart (1962) が理論的に予測したとおり、入射波の波高とほぼ二次曲線の関係にある。また、汀線近傍の長周期波の波高に関しても、バラツキは大きいものの同様な関係が存在する。

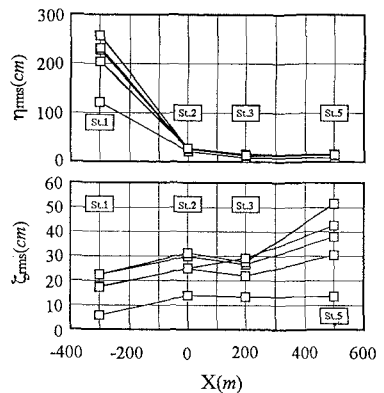


図-9 個々波及び長周期波の振幅 (rms) 値の岸沖方向分布

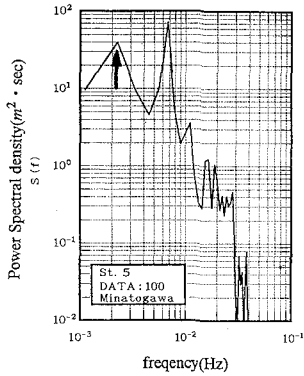


図-10 St. 5における長周期波のパワースペクトル

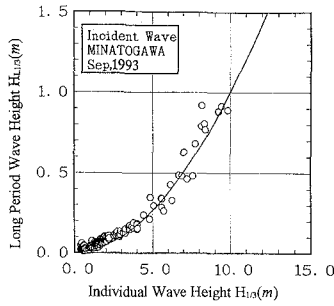


図-11 St. 1における有義波高と長周期波の波高との関係

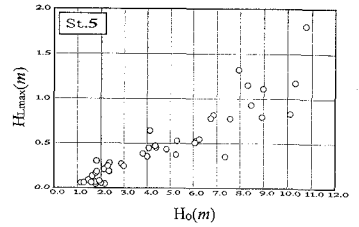


図-12 St. 5における有義波高と長周期波の波高との関係

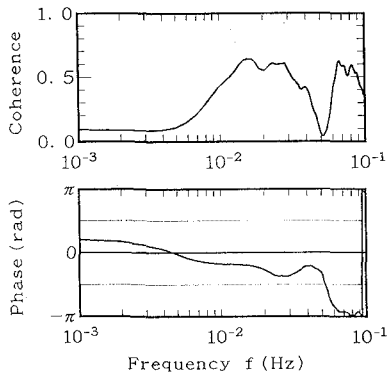


図-13 長周期水位変動の観測値と計算値とのコヒーレンス及びフェイズ

次に、長周期波の発生メカニズムについて検討する。リーフ上の長周期波に関しては、先に共振応答としての説明を与えたが、それは一定外力の作用下で自励振動として生じるのではなく、あくまでも不規則波浪の来襲に付随する何らかの作用外力によって生じたリーフ上の長周期波が、選択的にリーフ上の固有周期の位置で強調されるものと考えなければならない。なぜならば、単一波の入射によっては、図-11に示したほどの大波高を有する長周期波は発生し得ないからである。

図-13に、St. 1における長周期波に関して、現地観測値とLonguet-Higgins・Stewart (1962)あるいはSand (1982)の理論から予測される計算値とのコヒーレンス及びフェイズを示す。図示のとおり、0.01~0.05 Hzの振動数を有する長周期波に関しては、コヒーレンスが高く、この周波数帯の長周期波の発生は、Longuet-Higgins・Stewartの理論から説明できそうである。実測値と計算値とは、位相差が存在するが、これは、計算値が一定水深の仮定を用いていることに起因するもので、その仮定を用いない数値計算ではこのことが改良される(これについては、紙面の都合上割愛し、別の機会に説明する

予定である)。図-14に、周波数が0.01~0.05 Hzの長周期波成分に関して、実測値と計算値との比較を示した。両者の一致度は比較的よい。

図-15に、St. 1~St. 4までの岸沖方向の水面の長周期変動の時間変化を示す。また、図-16には、この鳥瞰図をコンターで見た時の様子を示した。これらの図から、リーフ上(碎波帯内)とリーフより沖側(碎波帯外)とでは、海面の長周期振動のパターンがかなり異なることが分かる。碎波帯外は定常波であり、碎波帯内のリーフ上は自由波動的な振舞いである。また、碎波帯外でset-down波が形成される時、リーフ上ではset-up波が発生していることから、リーフ上の長周期波は高波高を有する波群がreef edgeで碎波変形するときに形成されるset-upが自由波となって進行し、汀線で反射され重複波を形成することによって生じるものと判断される。さらに、こうして生じた長周期波の一部はリーフ上にトラップされ(共振現象が発生し)、それがリーフ上の長周期波を強調しているものと判断される。そうすると、碎波帯外でLonguet-Higgins・Stewart (1962)の理論値と実測値とが殆ど相関をもたない0.01 Hz以下の長周期波(far-infragravity waves)の一部は、リーフ上からの漏出波として説明される。しかし、リーフ沖での観測値は一点しかなく、このことを確かめるにはデータが不十分である。

図-17に、汀線付近の水位上昇量と沖波有義波高との関係を示す。この場合も、水位上昇量は沖波波高とほぼ二次曲線の関係にある。この図より、沖波波高が10 mのとき、水位上昇量は約2.0 mと読みとれる。これに、図-12で示した長周期波の振幅1.0 mを加え、さらに個々波の振幅0.4 mとH.W.L.+2.1 mを加えると、最大高潮高さはD.L.+5.5 mとなる。この値は、当海岸で台風8310号によって記録したD.L.+7.2よりかなり低いものの、沖縄県各地のリーフ海岸で記録された痕跡値の大半を説明し得る。

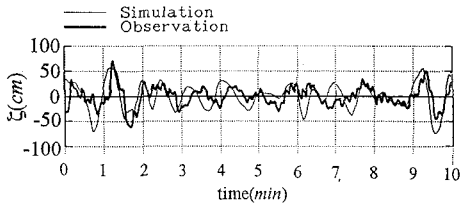


図-14 長周期波に対する観測値と計算値の比較

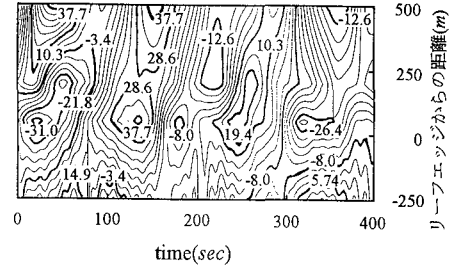


図-16 水位の長周期変動の時空間分布 (等値線図)

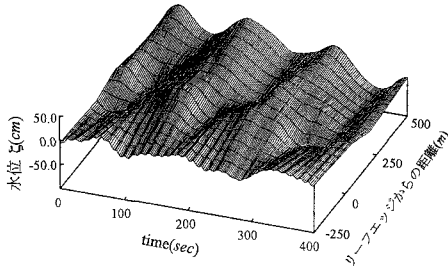


図-15 水位の長周期変動の時空間分布 (鳥瞰図)

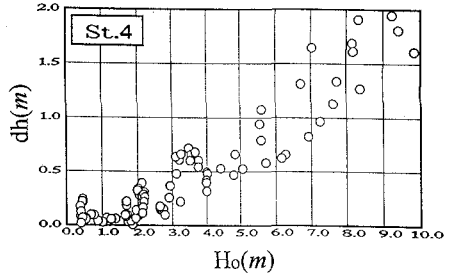


図-17 沖波波高 (有義波) と汀線近傍における水位上昇量との関係

4. おわりに

本研究では、3年間にも渡る現地観測によって、有義波高が10.0 mにも及ぶ波浪の観測に成功した。これは台風9313号に伴う波浪で、その諸元は設計波に十分匹敵するものであった。この間のデータには波高が2.0 mにも達するサーフビートが観測され、平均水位の上昇量は2.0 mを越えた。これらのデータは、沖縄県各地のリーフ海岸で台風時に生じていた異常な水位の上昇量を十分説明するものであった。さらに、研究では、これらのデータを用いて、台風接近・通過に伴う沖波波浪の波群特性値の変化を調べた。沖波波浪の有義波高及び有義波周期はそれぞれ2~10 m及び7~10秒と大きく変化したものの、沖波波浪の波群特性値は、台風の接近通過に伴い系統的な変化を示さないことなどを明らかにした。また、砕波帯内外の長周期波の波高は、一義的には入射波の波高に影響を受け、波群特性値の影響は二義的であることを明らかにした。

本研究で得られた事実の大半は、設計条件等にそのまま適合するものと思われるが、水理現象解明に関してはデータ不足から不明瞭な点も多い。現地観測や数値計算モデルとの比較検討は、現在でも継続中であり、今後これらの問題点をさらに明らかにして行く予定である。

本研究の一部は、沖縄県漁港課・(財)漁港漁村建設技術研究所の委託の一部として行った研究の成果に基づいている。また、文部省科学研究費(一般C)(代表:津嘉山正光)の援助を受けたことをここに記して感謝致します。

参考文献

合田良実 (1985): 波浪の統計的性質に関する二・三の数値的検討, 港湾技術研究所報告, Vol. 24, No. 4, pp. 66-102.
 合田良実 (1992): 不規則波の研究の流れと展望, 1992年度水工学に関する夏期研修会講義集, 土木学会水理委員会, B-5.
 Goda Y. (1985): Random seas and design of maritime structures, University of Tokyo Press, pp. 323.
 Kimura, A. (1980): Statistical properties of random wave groups, Proc. 17th Conf. on Coastal Eng., pp. 2955-2973.
 Longuet-Higgins M. S.・Stewart R. W. (1962): Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to 'surf beats', J. Fluid Mech., Vol. 13, pp. 481-504.
 Mase H. (1988): Spectral characteristics of random wave run-up, Coastal Eng. in Japan, JSCE, Vol. 12, No. 2, pp. 175-189.
 Nakaza E.・Hino M. (1991): Reef-zone disaster caused by bore-like surf beat, Coastal Eng. in Japan, JSCE, pp. 49-61.
 Sand, S. E. (1982): Long waves in directional sea, Coastal Engineering, Vol. 6, pp. 195-208.