

波群によって引き起こされる Bore 状サーフビート に関する研究

日野 幹雄*, 仲座 栄三**, 與那覇健次***

1. はじめに

最近, 沿岸に形成される長周期波と沿岸漂砂との関連性が具体的に指摘されるようになり¹⁾, 波群及び Surf-beat 等に関する研究が盛んになって来た. 筆者ら²⁾は, 明確な固有周期を有する海岸あるいは入射波群の周期と共鳴して形成された海岸 (例えば, ステップ型或はパー型海岸) では, 来襲する波群との干渉によって平均海面の共振応答が形成され, その際発生する Surf-beat は汀線に向かって進行するにつれ前傾化し (日本海中部地震の際見られた段波性の) 津波に酷似した形で来襲することを報告した. しかしながら, 平均海面の波群による共振応答に主眼が置かれたので, Bore 状 Surf-beat の特性については述べていない. 平均海面の長周期振動の可能性については, すでに筆者の一人 (日野・沢本)³⁾がその理論を提示している. また, パー型海岸における平均海面の共振については, Symonds と Bowen ら (1984)⁴⁾によって, いち早い指摘があった. しかし, Symonds らは, 基礎方程式を線形化して理論展開を行っているのので, その結果からは (個々波との比較に於て) 比較的ゆったりとした正弦的な長周期波が求められる. 一方, 筆者らは台風災害調査及び現地観測によって, 破波点と汀線との間の距離が長い海岸における Surf-beat は汀線に向けて進行するにつれ Bore 状化しその破壊力は極めて大きいことを確認している^{5),6)}.

本研究においては, こうした Bore 状 Surf-beat を実験的に検討し, さらに非線形性を考慮した数値計算によってその実態の解明を試みたものである.

2. 対象海岸及び実験装置・実験方法

本研究では, 図-1 に示すようなステップ型モデル海岸を対象とした (沖縄本島南部港川漁港周辺). 図-1 に示す海岸形状は, リーフ地形海岸の典型的な断面でもある. 実験には, 上記海岸を 1/80~1/120 の縮尺と成るようにモデル化した.

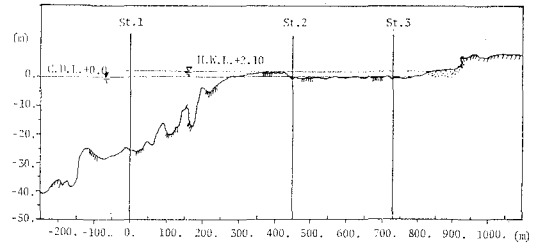


図-1 モデル海岸 (ステップ型海岸)

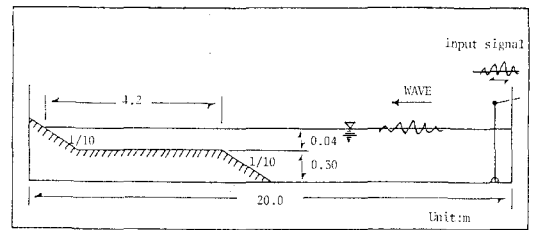


図-2 実験装置概要図

実験に用いた水路は長さ 20.0 m, 幅 0.4 m の二次元造波水路である (図-2). 水路の一端には無反射式造波装置が設置してあり, 他端には図示のように木製のステップ型海岸モデルを設置した. 入射波群は, その包絡線が正弦的に変化するようにし, 波群中の個々波の周期は 1.6 秒及び 1.3 秒に固定した. また, 波群中の個々波の平均波高 ($\bar{H}_0$) は 6.5 cm であり, 波群の変調振幅は平均波高の 0~50% まで変化させた. なお, 流速の測定には 2 成分電磁流速計を用いた.

3. Bore 状 Surf-beat の理論的予測

海岸に形成される平均海面の長周期変動に対する基礎方程式は, 一般に浅海長波の基礎式で示される.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial U(h+\eta)}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + F_x + \frac{1}{\rho(h+\eta)} \cdot \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon \frac{\partial U}{\partial x} \right) + g \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

ここで, η : 平均海面の変動量, U : 平均流速, h : 静水深, S_{xx} : 波による Radiation Stress, ϵ : 拡散係数, F_x :

* 正会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 琉球大学助手 工学部土木工学科

*** 正会員 沖縄総合事務局那覇港工事事務所

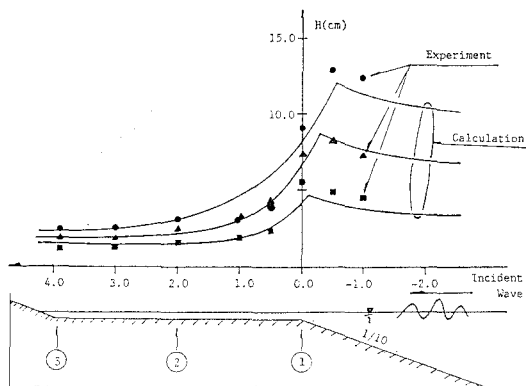


図-3 砕波後の個々波の変形

底面摩擦力である。水平粘性項は、 ϵ の見積りに問題点が多いこと及び地形に局所的な変動が無いこと等から、本研究のような一次元問題ではむしろ省略した方がよい。底面摩擦の項は、文献 8) に習うことにした。目的とする Surf-beat 波形は、式 (2) の Radiation Stress の項を適当に与えることによって数値計算より求められる。図-3 は、2. で説明した実験によって得られた波群中の個々波の変形パターンである。図中 ●, ▲ 及び ■ 印は、それぞれ波群中の最大波高、平均波高及び最低波高を有する個々波の場所的な波高分布に対応している。

また、実線は、津嘉山ら⁹⁾のリーフ上の波の変形に関する実験式を用いて算出した理論曲線である。両者は比較的一致しており、波群中の個々波の砕波後の波高変化は、津嘉山らの実験式を用いて算出できることになる。

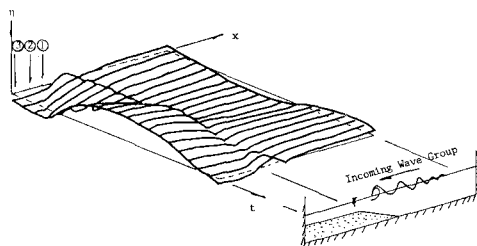


図-4 (a) Surf-beat の時・空間分布

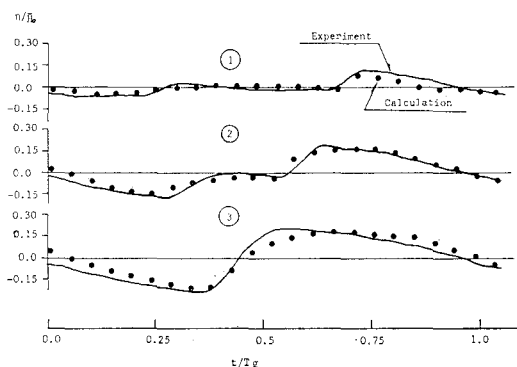


図-4 (b) Surf-beat の数値計算値と実験値との比較

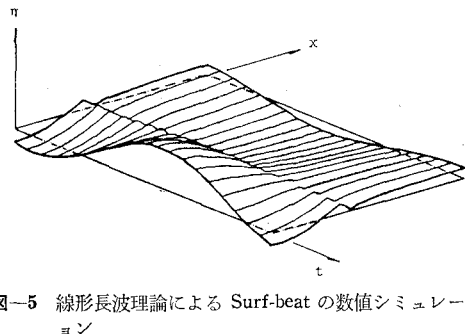


図-5 線形長波理論による Surf-beat の数値シミュレーション

図-4 は、波群周期 (T_0): 27.2 秒, 波高の変調率 (Δa): 平均波高の 50% の場合における式 (1), (2) の simulation 結果である。図-4 (a) 及び (b) は、Surf-beat 波形を時・空間で捉えたものである。なお、①, ② 及び ③ は、ステップ先端より汀線へ向って 0.0 m, 2.0 m 及び 3.9 m の位置を示し、実線が後に説明する実験値であり、● 印が数値計算値である。図-4 より、Surf-beat は汀線に段波状になり来襲し、汀線から反射され、更に前傾度を増し進行する様子が理解される。また、実験値と理論値とは比較的一致した傾向にあり、本計算法の妥当性が示された。一方、図-5 は、Symonds らの線形理論波形である。Symonds らは、砕波後の個々波の波高を単純に水深に比例すると仮定している。しかし、図-3 で示すように砕波後の波高変化は一様水深部でも指数曲線的に低減することから、図-5 に示す数値計算においては、Symonds らの波高変化に関する部分を修正してある。当然のことながら、非線形項を考慮した筆者らの計算結果と Symonds らの計算結果とは Surf-beat 波形に大きな違いが見られる。

4. Bore 状 Surf-beat の実態

(1) Surf-beat の生記録

実験によって得られた水位変動及び流速変動の生記録 (それぞれの r.m.s. 値で無次元化した値) を図-6 に示した (実験条件: $T_0=27.2$ sec, $\Delta a=50\%$, 以下この章では、この条件の場合についてのみ説明していく)。図中、 H_0 は入射波群の波形, H はステップ先端より 3.9 m の測定点における Surf-beat 波形である。U 及び W はそれぞれ上記測定点 (静水深の 1/2 の深さ) における

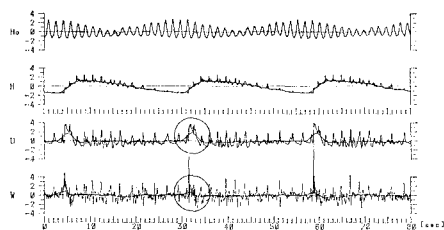


図-6 Surf-beat の生記録波形

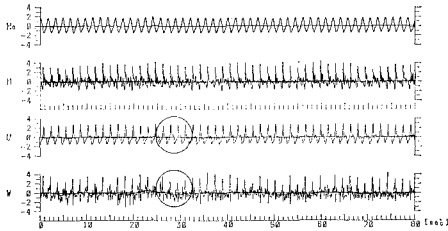


図-7 Surf-beat が発生しない条件での生記録波形

水平流速及び鉛直流速である。また、短周期 (1.6 秒程度) で振動しているのが個々波の変動に対応しており、長周期で振動しているのが Surf-beat の成分に対応している。なお、長周期波成分は、生記録に個々波の周期に対応する時間で Smoothing をかけることによって抽出した。Surf-beat 波形は汀線でかなり前傾化しており、その先端には激しい流速変動 (例えば、図中○印内) を伴っていることが理解される。図-7 は、波群中の最大波高 ($H \approx 10.0$ cm) を有する (一定波高の) 定常波を用いた場合の水位及び流速の波形である (測定場所は、汀線近傍の $x=3.9$ m の位置)。図-6 と図-7 における○内の、流速 U 及び W を比較した場合明かに違いが認められる。即ち、図-6 に示す Surf-beat は、その先端付近で、(個々波の時間スケール内で) 水平流速・鉛直流速ともに個々波の流速変動の倍以上にも変化している。このような現象は、加藤らによる現地観測の流速データにも捉えられている (例えば、文献 1) における図-4 あるいは 41)。

(2) Surf-beat の位相平均

上述の現象を更に捉えやすくするため、上記の生データから波群の 5 波の位相平均を取り高周波の乱れ成分を除去した。その後、長周期波 (Surf-beat) 成分と個々波に対応する成分とを分離したのが 図-8, 9 である。図中横軸は波群周期による無次元時間であり、縦軸は波群の平均波高 ($\bar{H}_0 = 6.5$ cm) による無次元水位変動 (図-8)、及びステップ上の線形長波の波速 ($\sqrt{gh}$) を用いた無次元流速である (図-9)。また、 x の値は、岸向きを正の方向に取ったステップ先端からの距離を示している。

理論的予測のところでも述べたように、Surf-beat は Bore 状になり汀線に来襲し、汀線近傍で反射され更にその前傾度を増しながら沖側へと進行して行く。図-9 はその際の流速変動であり、Surf-beat の先端付近、及び汀線近傍で反射された Surf-beat の先端付近で極めて大きな流速変動が生じている (例えば、図中矢印で示す位置)。

ここで防災上重要なことは、Surf-beat が汀線へ進行する場合よりもそれが反射され沖側へ進行する方が Bore 状化していること、即ち沖側へ向かう流速変動が大となる領域が存在することである (文献 6) においては、こ

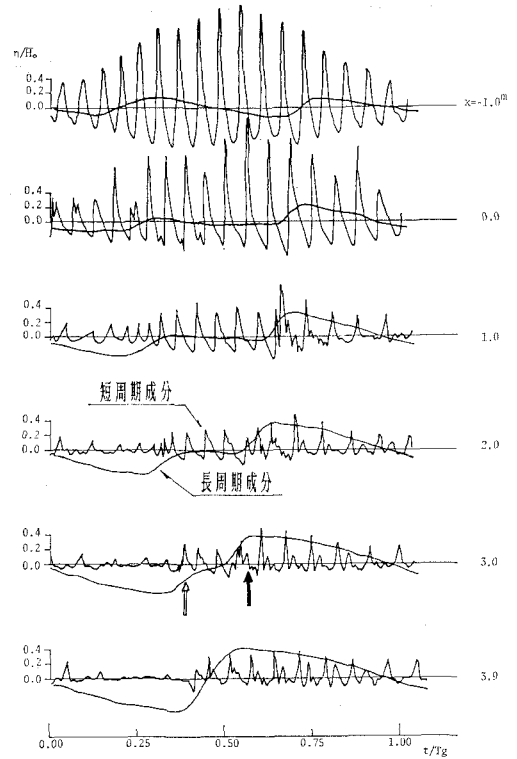


図-8 水位変動の位相平均

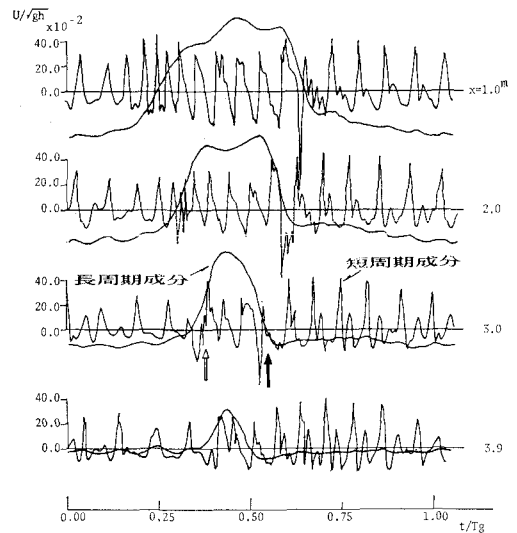


図-9 流速変動の位相平均

の現象を波力の面から詳細に検討した)。

(3) Bore 状 Surf-beat と個々波との干渉

写真-1 は、上記 Bore 状 Surf-beat が汀線近傍で反射され、ステップ先端近くまで進行した状態を捉えたものである (ステップ先端より岸側へ 1.5 m 付近)。写真-1 には、汀線近傍で反射後、沖側へ進行する Surf-beat のフロント付近に明瞭なソリトン分裂が生じてい

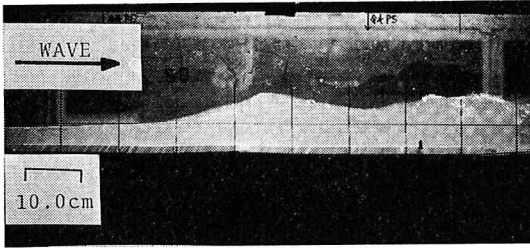


写真-1 汀線で反射され沖側へ進行する Surf-beat

るのが認められる。

沖側(写真左側)より進行してきた個々波は、この Bore 状の Surf-beat と激しく衝突・碎波した後 Surf-beat 上へ乗り上げ飛び跳ねながら進行して行く。このような現象が 図-8, 9 で見られた波形及び流速の激しい変動を生じさせる(図中黒塗の矢印で示す位相)。また、こうした現象は、本来ステップ前面の斜面上で碎波した個々波がステップ上で再生し、安定した波動場となるような領域においてさえも激しい流速の乱れを生じさせる原因となる(図-7 に示す定常波の場合の波形参考)。上述した激しい流速変動は、個々波と長周期波との干渉によって作られるものであり、単独で存在するわけでない。即ち、個々波と Surf-beat とは鶏と卵のようなものであり、現地観測等で得られたデータから長周期波成分のみを取り出し、その大きさ、あるいは変動の激しさのみで海岸構造物に与える影響は小であるとか、漂砂現象に与える影響が小さいとか議論するのは誤りと言えよう。

5. 平均水面の波群による共振応答

波群振幅の変調率を平均波高の 50% と一定にし、入射波群の周期を 10~40 秒まで変化させ、平均水面の波群による共振応答を調べたのが 図-10 である。図において縦軸は、平均水面の r.m.s. 共振応答値を入射波群の平均波高で無次元化した値であり、横軸は、振動数で

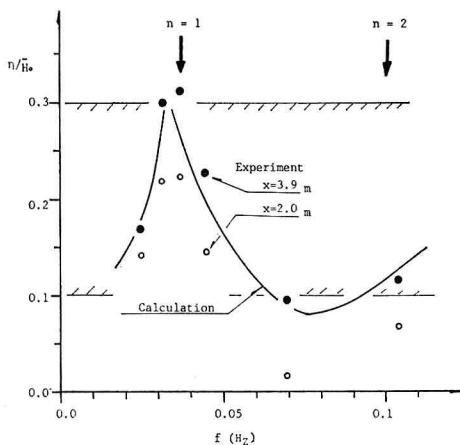


図-10 平均水面の r.m.s. 共振応答

ある。なお、矢印で示す振動数は、ステップ上にその先端を節とする長周期波が形成されるとした場合の近似的な海岸の固有周期である²⁾。また、●及び○印はそれぞれステップ先端より岸側へ 3.9 m 及び 2.0 m の位置における実験値を示し、実線は 3.9 m の位置における数値計算値を示す。図において、実験値と数値計算値とは比較的一致した傾向にあり、共に $n=1$ の矢印で示す周波数付近で強く共振応答を引き起こしている。斜線で示す領域が定常波を用いた場合の wave set-up の範囲であるから、広い範囲に渡って平均水面の共振応答が生じていることが理解される。

6. リーフ地形(現地)海岸における Surf-beat

(1) 観測日及び気象・海象条件

以下においては、1985~87 年間に計 6 回行われた現地観測の中から台風 8520 及び 8712 号について述べる。

図-11 に、T8520, T8712 の台風経路図を示した。経路図上の○印は 9 時における台風中心位置を示す。T8520 及び T8712 は、ほぼ同じ経路をとり、沖縄県宮古島付近を通り沖縄本島の約 300 km 西側(東シナ海のはぼ中央)を北上した。現地観測位置は、図-11 の小枠内に示す沖縄本島南部の港川漁港周辺である。観測当日の沖波波高は、T8520 の場合(10/3・20 時)有義波波高約 3.0 m であり、T8712 の場合(8/29・10 時)約 6.0 m であった。

(2) 現地における Surf-beat

図-12 は、沖縄県漁港課によって測定された T8520 に伴う Surf-beat の一例である⁷⁾。St. 2 及び St. 3 (図-

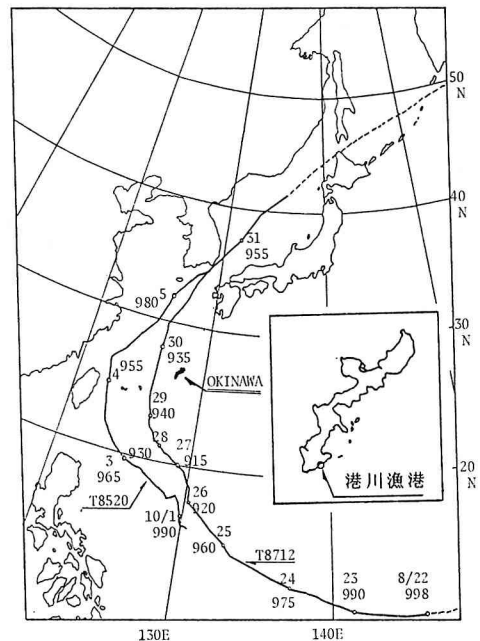


図-11 台風経路図

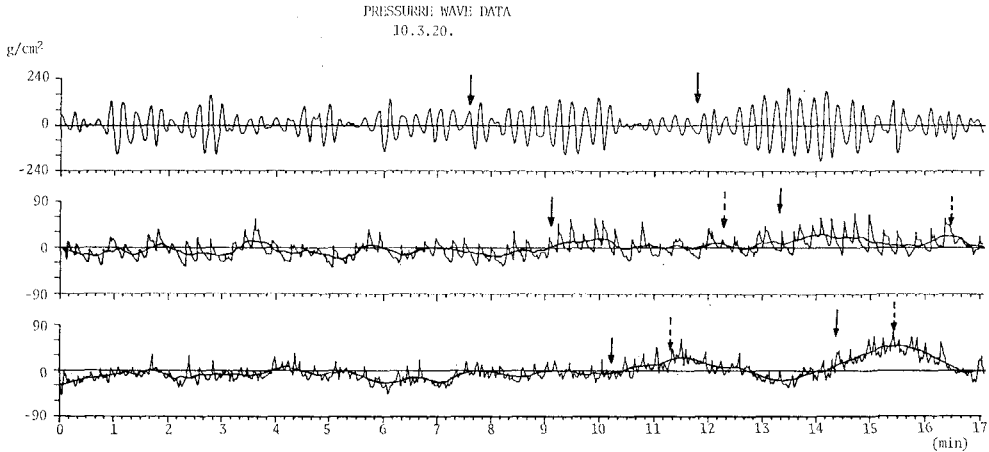


図-12 T8520 によって引き起こされた Surf-beat (沖縄県漁港課による)

1 参考)においては、周期が1～5分の Surf-beat が認められる。特に、8～17分間に形成された Surf-beat は個々波の振幅を遥かに上回る。図中矢印は、線形長波に基づく波速を用いた場合の進行波のフロントと汀線からの反射波のフロントに対応する位相を示している。

当海岸の近似的な固有周期は、(水深を $h=2.5\text{ m}$ として)約9分程度と計算される。図-12で8～17分に見られる Surf-beat の周期は3分程度であり、約2倍振動数に対応している。この場合、有義波高が比較的小さく、十分大きな振幅の Surf-beat を作るに至っていない。それ故、筆者らが指摘するような Bore 状 Surf-beat は発生していない。しかしながら、図-12は、現地海岸においても平均海面の弱い共振応答が存在することを示唆している。また、20分程度の波浪観測がいかに短いか理解される。なお、ここで説明することはできなかったが、上述の T8712 の際には、明瞭な Bore 状 Surf-beat が発生したことを付記する(文献6参考)。

6. おわりに

本研究では、ステップ型海岸(あるいは、バー型海岸)のような(個々波の)碎波点と汀線との距離が比較的に長く、かつ水深が浅い海岸において、来襲波群によって引き起こされる Surf-beat の特性を明らかにすることを試みた。その結果、こうした海岸に来襲する Surf-beat は、Bore 状化しその先端に激しい流速変動を伴いながら汀線へ来襲する。また、それが汀線近傍で反射され更に前傾化し、ソリトン分裂しながら沖側へ進行する過程において、個々波との干渉により特異な水理現象を引き起こすこと等を明らかにした。理論的には、数値計算値と実

験値とは比較的良く一致する傾向にあることを得た。しかしながら、今後非線形分散波理論を用いた検討が必要である。先の報告で提案したように、こうした“Bore 状 Surf-beat”は、防災面から考えた場合、“波群津波”としての認識が必要であると考える。

謝 辞: 本研究を行うに当たり、東京工業大学及び琉球大学の両水工学研究の皆さんには、多大なご援助を頂いた。ここに記して深く感謝の意を表します。

なお、本研究においては、文部省科学研究費一般研究(B)(代表者:日野幹雄)及び奨励研究(A)(代表者:仲座栄三)の援助を受けていることを付記する。

参 考 文 献

- 1) 例えば、加藤一正: 漂砂、沿岸地形と長周期波の関連、運輸省港湾技術研究所講演会講演集, 1987.
- 2) 仲座栄三・日野幹雄: 波群によって引き起こされる平均海面の共振応答, 第32回水理講演会論文集, pp. 571～576, 1988.
- 3) 日野幹雄・沢本正樹: 非定常過程としての海浜流の研究, 第24回海岸工学講演会論文集, pp. 596～599, 1977.
- 4) Symonds, G. and Bowen, A. J.: Interaction of near-shore bars with incoming wave groups, J. Geophysical Research, Vol. 89, No. C2, pp. 1953～1959.
- 5) 仲座栄三・日野幹雄: リーフ地形海岸における Bore 状サーフビートによる災害の実態調査, 第35回海岸工学講演会論文集, 1988.
- 6) 仲座栄三・津嘉山正光・日野幹雄・大城 勉: 波群津波の津波力に関する研究, 第35回海岸工学講演会論文集, 1988.
- 7) 沖縄県農林水産部漁港課: 昭和60年度珊瑚礁内波浪観測調査報告書.
- 8) 本間 仁監修: 海岸環境工学, 東京大学出版会.
- 9) 津嘉山正光・仲座栄三: 二次元リーフによる波の変形と平均水位変化, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 76～80, 1987.