

リーフ性海岸における波群性サーフビートの発生と個々波の変形

日野 幹雄*・仲座 栄三**・野中 雅彦***・武若 聡****

1. はじめに

(1) リーフ海岸の静穏説とリーフ海岸の波浪災害の矛盾

海岸線から沖側に数 100 m の幅でサンゴ礁に縁取られた沖縄では、浅いサンゴ礁による波の減衰効果のため波浪災害は無いか稀であると考えられて来た。事実、荒天時にサンゴ礁先端の碎波帯では激しく高波が碎けているのに、汀線ではほとんど波が無いというのが普通の状態である。リーフ海岸における通常の短周期波の波高減衰については、津嘉山・仲座(1987)により研究が行われている。

ところで、波浪災害が少ないと考えられて来た沖縄も、意外にしばしば異常に高い波浪に襲われ、大きな災害を受けていることが、仲座・日野(1988)、仲座(1990)の現地調査から明らかにされた。荒天時の現地経験豊かな仲座は、自身の観察や漁師らの証言から、このような場合海面が数10分の間隔で異常に盛り上がりその上を波が牙を立てて海崖に襲い掛かることに注目した。日野・仲座・与那覇(1988)はこの長周期の波面変動が、波群(wave group)によって励起されるサーフビート現象であると考え、長波方程式の数値解析と室内実験によって現地で観測されるような段波状のサーフビートが発生することを理論・実験的にも明らかにした。

(2) 波群性サーフビートの発生理論の問題点とその解決

波群によりサーフビートが発生するであろうことは、最初 Longuet-Higgins・Stewart(1964) により示唆されたが、実際の海岸では碎波帯内の波高が入射波高には無関係で水深によって一義的に決まるため、波群による入射波高の変化がそのまま radiation stress の周期的変化、つまりサーフビートの起因力とはならないという難点があった。これに対し Symonds・Huntley・Bowen(1982) は、入射波高の周期的な変化が碎波点の位置の変化をもたら

すことに着目し、線型理論を提出した。しかし、この場合に発生する長周期波は波群との共鳴性を示さなかった。次に彼らは、沖側にバーをもつ海浜断面の場合について同じく線型理論から、波群がこの海岸地形を維持するよう作用することを論じた(Symonds・Bowen, 1984)。

なお、我々が非線型の数値解析を行い得たのは、沖側の無反射数値境界の新しいスキームを考え付いた(日野, 1987; 日野・仲座, 1988) ためであり、また室内実験で理論を検証し得たのは、無反射式造波装置(三井造船製)をもつ造波水路を利用できたためである。

(3) サーフビート上の個々波の変形

現地の観察でも、また先に行った室内実験でも、サーフビートの起因力である波群を構成する個々の短周期の波が変形し、急峻化することが認められた。それゆえ、長周期波(サーフビート)に乗る個々波の変形の特徴と性質を把握することは、我々の実験当初からの目標の一つであった。

2. 実験方法

実験水路、造波機、データ記録方法等は前報(日野・仲座・与那覇, 1988)と同様である。沖側静止水深は33 cm、リーフ上の静止水深は3 cmに設定した。約4 m 長のリーフに作用させた波群の周期は30.6 秒、変調率は50% (最大沖波波高5.8 cm) であり、これを構成する個々波の周期は1.8 秒である。

今回はボア状サーフビートに乗る波群を構成する個々波の変形を、沖側から岸まで追跡する目的で、3本の波高計を用意した。うち1本は一つの波群の位相時間を知るためリーフ先端から沖側 $x=700$ cm の地点に設置し、位相を決めるときの各波高計に共通の時間の基準とした。対応する各個々波の移動・変形を明らかにするため、他の2本の波高計は常に $\Delta x=5$ cm の間隔で隣接して並べて波形変化を記録した。この2本の波高計の組はリーフの先端を基準として沖側 $x=-200$ cm から岸側 $x=375$ cm まで移動させた。また、リーフ上では水位計の一つと同じ位置で同時に、小型電磁流速計により x 方向の流速 U を記録した。

* 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 土木工学科

*** 大成建設(株)

**** 正会員 工博 東京工業大学助手 工学部土木工学科

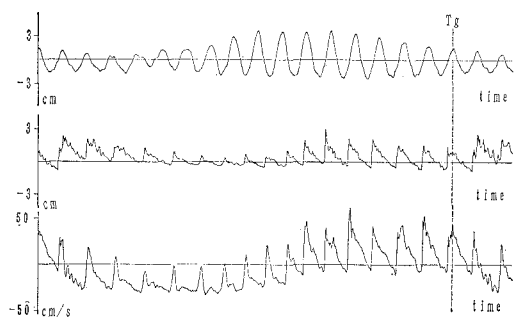


図-1 実測波形

上段: 沖波水位 ($x = -700$ cm)中段: リーフ上水位 ($x = 35$ cm)

下段: リーフ上流速

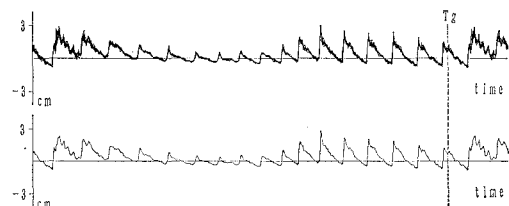


図-2 波形の位相平均

上段: 波群の重ね合わせ

下段: 位相平均波形

3. 実験データの整理とサーフビートの特性

(1) アンサンブル平均波形

図-1 に沖波波形 ($x = -700$ cm), リーフ上 ($x = 35$ cm) での波形および流速変動を例示する。

各測定点では波群の12波分の位相平均を求めた。ただし、2本の波高計は常に組になっているから、うち6波分はその位置に設置された後方の位置の波高計により、残り6波分は、 Δx だけ波高計の組を移動させたとき前方の波高計で記録した。図-2 に記録された12波群分の水位計記録(上段)とその位相平均(下段)

$$\bar{\eta}(x, t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \eta(x, t; i) \dots \dots \dots (1)$$

とを比較して示す。ここに、 $\eta(x, t; i)$ は第 i 番目の波群の位相時間 t での水位を表す。また、 t はすべての記録に共通の波群位相時間である。これよりわかるように、波群ごとの各々の波形は位相平均波形からのズレは極めて少ない。(正確には位相平均波形からのズレの r. m. s. で示せば良いが、今回の研究目的からは第二義的ゆえ省略した)。

流速記録 $u(x, t)$ についても同様の位相平均を求めた。

(2) 波の成分の分離

水位変化 $\eta(x, t)$ は、長周期成分 $\bar{\bar{\eta}}(x, t)$ と個々波成分

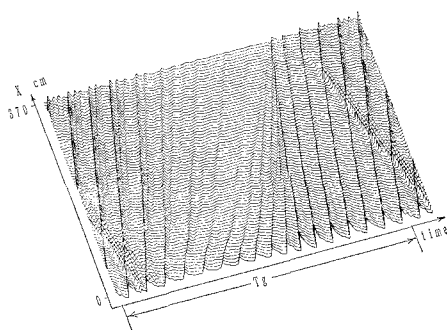
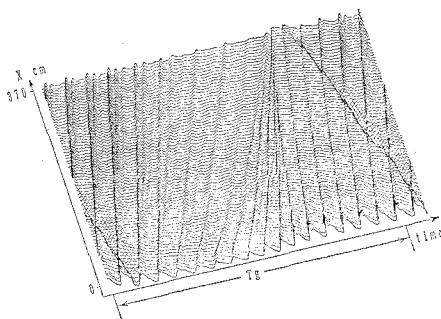
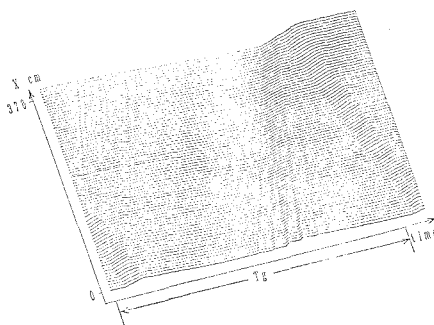
(a) η の鳥瞰図(b) η' の鳥瞰図(c) $\bar{\bar{\eta}}$ の鳥瞰図

図-3 水位の鳥瞰図

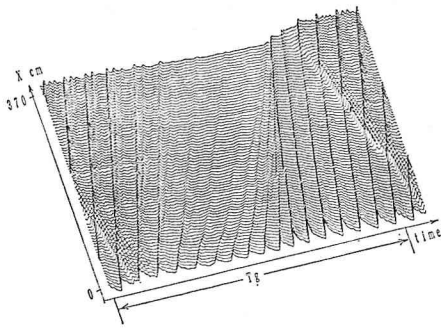
$\eta'(x, t)$ に分離できる。さらに長周期成分は wave-setup 分 $\bar{\bar{\eta}}(x)$ とサーフビート成分 $\bar{\eta}(x, t)$ とに分離できる。すなわち

$$\eta(x, t) = \bar{\bar{\eta}}(x) + \bar{\eta}(x, t) + \eta'(x, t) \dots \dots \dots (2)$$

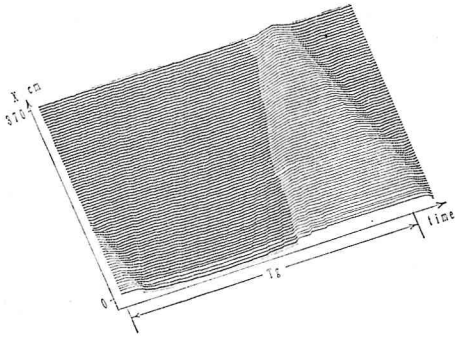
ここでは、長周期成分は移動平均により定義した。

$$\bar{\bar{\eta}}(x, t) = \frac{1}{(2m+1)} \sum_{i=1}^m \eta(x, t \pm i \Delta t) \dots \dots \dots (3)$$

m の値としては、 $(2m+1)\Delta t$ が個々波の一周期分の長さとなるように採った。また、wave-setup $\bar{\bar{\eta}}(x)$ は $\bar{\bar{\eta}}$ の平均より求める。



(a) U の鳥瞰図



(b) $\tilde{U}$ の鳥瞰図
(ハッチング領域: 冲向き流速)

図-4 流速の鳥瞰図

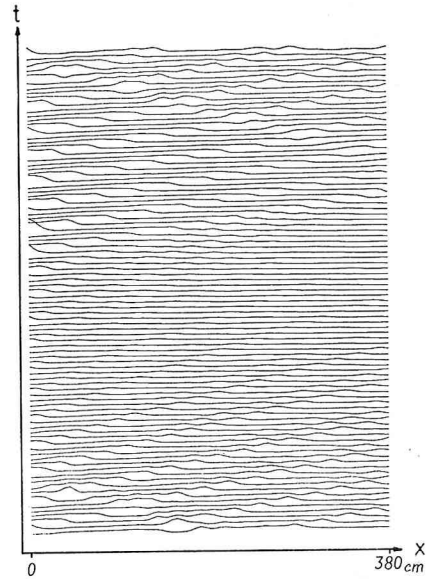


図-5 空間波形の時間変化

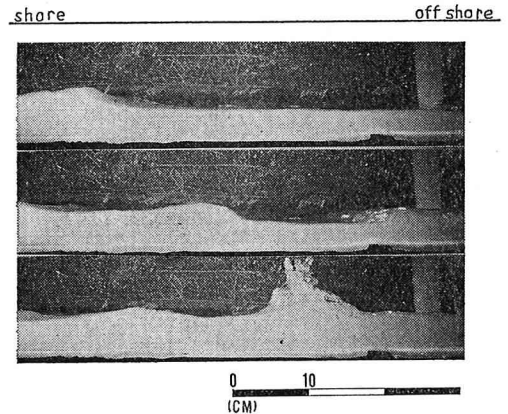


写真-1 岸からの反射波が重複波性砕波を生じる様子
($x=100$ cm 付近)

次に、 η より $\tilde{\eta}$ を引いて $\eta'(x, t)$ とする。すなわち

$$\eta'(x, t) = \eta(x, t) - \tilde{\eta}(x, t) \dots\dots\dots (4)$$
 となる。

(3) 波の変形および波速変化の鳥瞰図

すべての位置において η , η' , $\tilde{\eta}$ と流速 U , $\tilde{U}$ を求め、これを (x, t) 面の perspective として図-3(a), (b), (c) および図-4 (a), (b) に示した。この図から、個々波の進行する状況が理解される。例えば、波速の小さい波は後方から進行してくる速い波に追いつかれ、その位相が不明瞭になる、岸に達したボア状サーフピートが反射し個々波と干渉する等である。

(4) アニメ化表示

水位と流速は、一つの位置で時間的な変化として記録されている。しかし、以上のようにすべての (x, t) について水位と流速がアンサンブル平均 $\eta(x, t)$ として記録され、しかも、個々の生の実験値 $\eta(x, t; i)$ とアンサンブル平均波形はほぼ同じであるので、これを実験室で波の形の時々刻々の進行と変化を見るように、各瞬間の波形 $\eta(x)$ の形で表示できる。この時刻を dt ごとにすすめれば、個々波がサーフピートに乗って変形する様子をアニメ

的に示すことができる (図-5)。この図は実験水路の側面から記録撮影 (写真-1) したものと類似したものである。

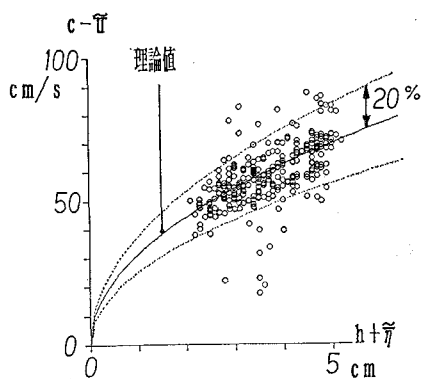
4. 個々波の特性

(1) 個々波の波速と流速

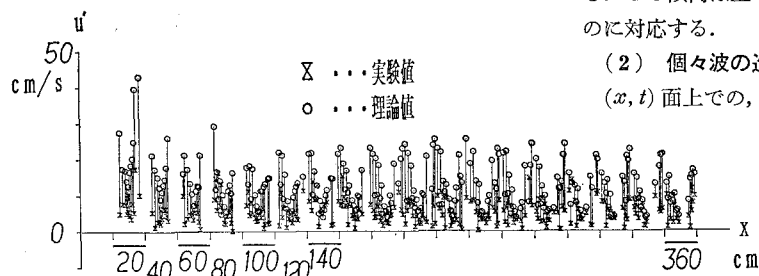
以上のように個々波の進行と変形を記録・解析し得たので、これらのデータから個々波の波速 C' を求め、長波近似式と比較した (図-6(a))。ただし、波速は流れ (流速の長周期変動成分) に対する相対値

$$C'(x, t) = C(x, t) - \tilde{U}(x, t) \dots\dots\dots (6)$$

であり、 $C(x, t)$ は観測された波速である。図中の実線は線形波理論によって与えられる波速 C_0 である。



(a) 個々波の波速と平均水位



(b) 個々波に伴う流速

図-6 個々波の波速と流速

$$C_t = \sqrt{g(h + \bar{\eta})} \quad \text{..... (7)}$$

ここで h は静止水深であり、リーフ上では一定値となる。これより、個々波はリーフ上をほぼ線型の長波として進行していると考えられる。突出した値を示した点は、主に進行波と反射波の干渉が生じる領域のものである。

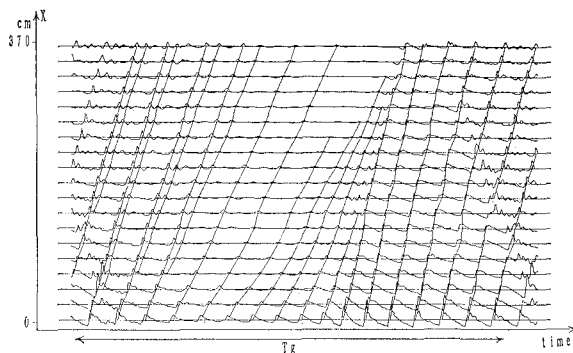
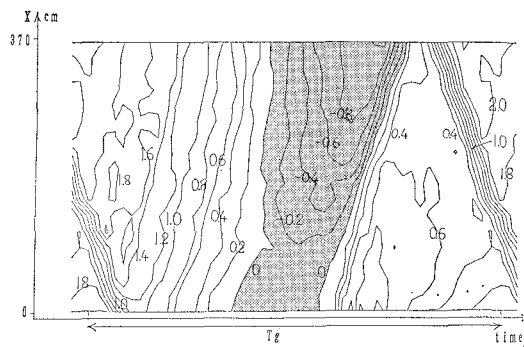
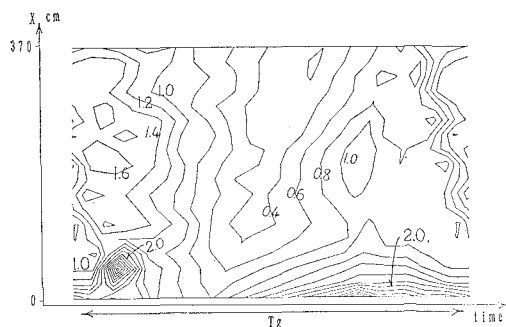
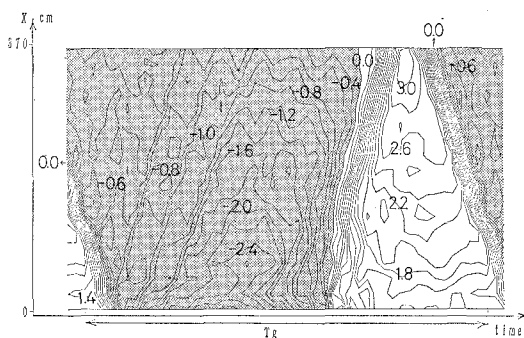
次に、波動(波峰)通過に伴う長波の流速変動値

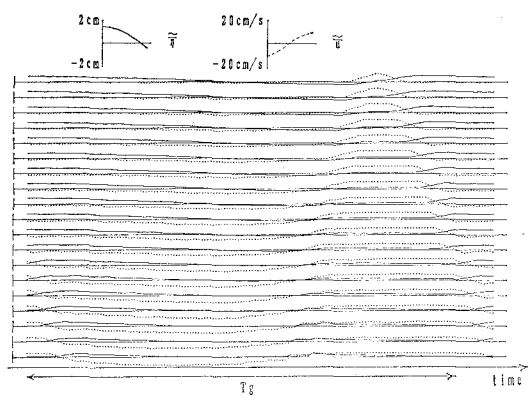
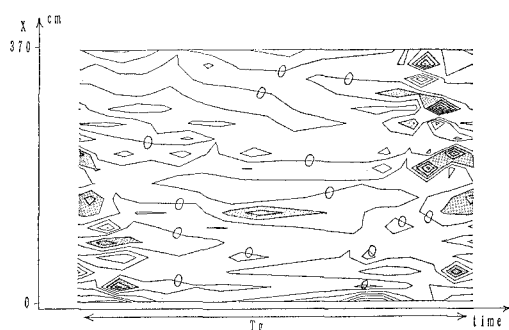
$$U_t = \eta' \sqrt{g/(h + \bar{\eta})} \quad \text{..... (8)}$$

と実験で得られた流速データから長周期成分を引いた値 ($U - \bar{U}$) を各測定地点で比較した結果が図-6 (b) である。個々波の水位変動が相対的に小さい時には両者は良い一致を示すが、変動が大きくなると不一致が顕著となる。この傾向は上の個々波の波速の比較を行った時のものに対応する。

(2) 個々波の進行

(x, t) 面上での、(位相平均をした) 個々波のピークの軌跡を示したのが、図-7 である。この軌跡に沿っての個々波の水位 η'_{peak} をコンター図で示したのが図-8 である。個々波の峰は波峰線に沿ってのみ定義できるが、一つの波群を構成する個々波の数や周期が変わってもその変化特性は

図-7 η' と波峰の軌跡図-9 平均水位 $\bar{\eta}$ の等高線図
(単位: cm)図-8 個々波の軌跡に沿った水位 η'_{peak} の等高線図
(単位: cm)図-10 平均流速 $\bar{U}$ の等値線図
(単位: $\times 10$ cm/s)

図-11 平均水位 $\bar{\eta}$ と平均流速 $\bar{u}$ の位相関係図-12 個々波の軌跡に沿った水位の変化率
(ハッチング領域: 変化率 < 0)

同じであると考えられるので、これをコンター図の形で示した。 $\bar{\eta}$ 、 $\bar{u}$ をコンター図で示したのが図-9、10であり、また、図-11にはこれらの位相関係を調べるために (x, t) 平面上へ表示した。これらの図より、個々波が冲向きの流速に逆らって進む時は当然のことながら、波の進行が遅くなるのがわかる。また、汀線近くでの長周期の水位上昇はスパイク状に現れる岸向き流速によって誘発されているように見受けられる。全般に水位上昇が生じる領域では岸からの反射波と岸方向への進行波が次々と干渉している。

(3) 個々波の波高減衰率

上で得られた個々波のピークに沿って、以下で定義される水位の変化率を調べた。

$$\gamma_t = \frac{1}{\eta_{\text{peak}}} \frac{D\eta_{\text{peak}}}{Dt} \quad (9)$$

これをコンター図で示したのが図-12である。厳密な意味ではこれらの値は波高ではないが、実質的には半波高値に相当すると考えてよいであろう。前節の結果と併せて考えると、i) サーフビートは岸で反射し、そのフロント部分(図-3、12の右部分)では入射して来る個々

波がこれと干渉する。この時個々波に砕波が生じるとエネルギーが失われ波高は急激に減少する。ii) サーフビートの反射フロントに続く領域(図-3、12左部分)では、冲向きの流れに逆らって個々波が進行する。ここで steepness が増大し、また分散が激しく起こるが、波高の減衰は少ない。iii) 入射波の波高が小さい領域(図-3の中央部)では波速は遅くなり、波の分散や逆流による散逸のため波高が減衰する。iv) サーフビートに伴う流れが岸向き方向に転じた直後(図-3、12の中央部右1/3部分)に進行して来る個々波は順流に乗った状態となり波の間隔が狭まり個々波の波高の減衰は少なくなる。

5. 結 論

リーフ上のサーフビートの起因力である波群を構成する個々波が、長周期のサーフビートの波に乗って進行するときの変化特性を調べた。

(1) サーフビートは段波状に進行し、岸で反射し、冲向きの流れを伴って進む。

(2) 個々波が冲向きの流れに向かって進行するときには激しく分散する。個々波が岸向きの順流に乗って進行する時には波高の減衰は少ない。

(3) サーフビートの反射フロントで個々波に重複波性砕波が生じるとエネルギーが失われる。

参 考 文 献

- 津嘉山正光・仲座栄三(1987): 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.
- 仲座栄三(1990): リーフ性海岸における段波状サーフビートの発生とそれに対する防災対策に関する基礎的研究, 第一章, 東工大提出博士論文.
- 仲座栄三・日野幹雄(1988): 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, pp. 202~206.
- 日野幹雄(1987): 開放境界における波の無反射透過条件の極めて簡単な計算スキームの提案, 東工大土木工学科研究報告, No. 38, pp. 31~38.
- 日野幹雄・仲座栄三(1988): 数値波動解析における新しい無反射境界スキームの平面2次元問題への適用, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 262~266.
- 日野幹雄・仲座栄三・与那覇健次(1988): 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, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 197~201.
- Longuet-Higgins, M. S. and Stewart, R. W. (1964): Radiation stresses in water waves; a physical discussion with applications, Deep-Sea Res., Vol. 11, pp. 529~562.
- Symonds, G. and Bowen, A. J. (1984): Interaction of near-shore bars with incoming wave groups, J. Geophysical Research, Vol. 89, no. C2, pp. 1953~1977.
- Symonds, G., Huntley, D. A. and Bowen, A. J. (1982): Two-dimensional surf beat: Long wave generation by time-varying breakpoint, J. Geophys. Res., Vol. 87, no. C1, pp. 492~498.