

サーフビートの発生メカニズムに関する研究

仲 座 栄 三*・濱元朝一郎**・津嘉山正光***・日 野 幹 雄****

1. はじめに

海岸における海面の長周期変動は、Munk (1949) や Tucker (1949) らの論文をきっかけとして広く知られるようになった。その後、Longuet-Higgins・Stewart (1962) による radiation stress の概念の導入と共に、その力学が理論的に検討されることとなった。この radiation stress の概念は、流体力学でいう Reynolds 応力と同じであり、そういう意味では Longuet-Higgins 応力とでも呼ばれるべきであろう。彼らの radiation stress に関する理論は、その後の理論海岸工学を大きく前進させ、例えば、wave set-up & set-down の計算あるいは海浜流の計算などを可能ならしめるようになった。

Tick (1959) は不規則波の二次非線形波を求めたが Longuet-Higgins・Stewart らは、wave set-down 波としてサーフビートが存在することを示し、それが一次波の非線形干渉波（周波数の差の成分）と同じであることを示している。不規則波の二次の非線形波動に関しては、Tick の後 Hamada (1965), Sharma・Dean (1979), Sand (1982) らによって理論展開が行われている。

これまでの研究におけるサーフビートの議論が、主に砕波帯よりも沖側での wave set-down 波としての長周期波の議論であったのに対し、Symonds ら (1982, 1984) は、砕波帯内で新たにサーフビートが形成されるとする説を提示した。これは、砕波帯内で wave set-up 波としての長周期波が形成されるとするもので、砕波帯内からの漏出波は沖側へも伝播するものとされている。さらにバー型海浜上での共振現象に関しても論じている。彼らの理論展開では極力解析解を求めるという理由から、入射波群の影響を省略しているため、沖側での wave set-down 波としてのサーフビートに関しては議論していない。しかしながら、Longuet-Higgins・Stewart と Symonds をもってサーフビートに関する理論的な枠組みは終了したと言えよう（後で詳しく述べる）。

最近、日本国内ではサーフビートに関する研究がにわ

かに増えてきた（例えば、長瀬・水口 1994, 1995）。それらを大別すると、実験や現地観測データを基に表面波の 2 次干渉による拘束波として説明するもの（砕波帯より沖側に限定）、Symonds らの数値計算手法の改良を目指すもの、サーフビートの発生メカニズムに関するもの、非線形波動方程式を用いた長周期波の挙動解析に関するものに分けられる。

サーフビートそのものの特性に関するものとして、未だ十分解明されていない点は、次の 4 点にまとめられる。
①波群拘束波の行方②砕波点で新たなサーフビートが発生すること（Symonds のサーフビート発生メカニズム）の証明③サーフビートと戻り流れとの関連④拘束波と自由波との分離方法、⑤多方向不規則波浪場におけるサーフビートの挙動。

本研究では、上記の①～③までに焦点を絞り、サーフビートの発生メカニズムを明らかにする。

2. 実験装置及び方法

実験には、図-1 に示す長さ 27 m 幅 0.7 m の二次元造波水槽を用いた。水槽の一端には勾配 1/20 の斜面と長さ 3.0 m のフラット部とを有するステップ海岸モデルを設置した。長さの縮尺としては 1/100 程度を想定している。実験に用いた入射波は、周期 1.0 秒、波高 8 cm の規則波である。実験では、静水状態にこの緒元を持つ規則波の波列を入射させた。この波列は、その伝播と共に先端部でサイドバンド不安定性によって、弱い振幅の変調を生じた。水位の測定には、12 台の容量式波高計を用い、流速の測定には 2 台の二成分電磁流速計と 2 台の 3 成分超小型プロベラ流速計を用いた。

造波板

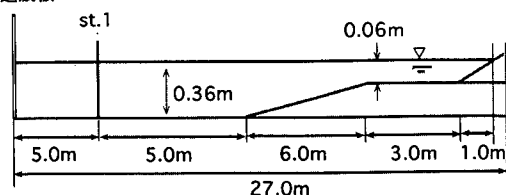


図-1 室内実験装置

* 正 会 員 工 博 琉球大学助教授 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
 *** 学生会員 琉球大学大学院 工学研究科建設工学専攻
 **** 正 会 員 工 博 中央大学教授 総合政策学部

3. 実験結果及び考察

図-2 に、観測点 st. 1 で捉えた水位変動の時間変化を示す。太い実線は、平滑化して求めた水位の長周期変動を示す。入射波群のフロントよりも先に長周期波に伴う水位の高まりが現れ、波群のフロント付近で水面勾配を変化させて波群の下では水位の低下が生じている。図-3 に、次式によって求めた入射波の波高の時空間変化を示す（以下簡単のために波高分布と呼ぶ）。

$$\left. \begin{aligned} \zeta^2(x, t) &= \frac{8}{T_p} \int_{-T_p}^{T_p} \eta^2(x, t + \tau) Q(\tau) d\tau \\ Q(\tau) &= \begin{cases} 1 - |\tau|/T_p, & -T_p \leq \tau \leq T_p \\ 0, & \tau < -T_p, \tau > T_p \end{cases} \end{aligned} \right\} \dots\dots (1)$$

ここで、 T_p は波の周期、 $\eta(x, t)$ は水面変動、 $\zeta(x, t)$ は波の平滑化された波高である。また、図-4(a) には、実験で得られた水位の長周期変動の時空間変化を示す。また図-4(b) は後で述べる数値計算で求めたものである。図中に C 及び C_g で示す実線は、長波の波速及び入射波の群速度を基にして引いた同位相線である。これらの結果の説明は後に述べることにして、次に数値計算手法について述べる。

数値計算に用いた基礎式は、次式のとおおり、波の radiation stress の項 (S_x) を付加した運動方程式と連続の式である。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \xi}{\partial t} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial M}{\partial x} \\ \frac{\partial M}{\partial t} &= -\rho g h \frac{\partial \xi}{\partial x} - \frac{\partial S_x}{\partial x} \\ M &= \rho U h \end{aligned} \right\} \dots\dots (2)$$

ここで、 U は平均流速、 M は線流量、 ξ は平均水面である。波の radiation stress の時空間変動に関しては、式 (1) から得られる実測値を用いることとした。これらの基礎式は、Longuet-Higgins・Stewart 及び Symonds らに

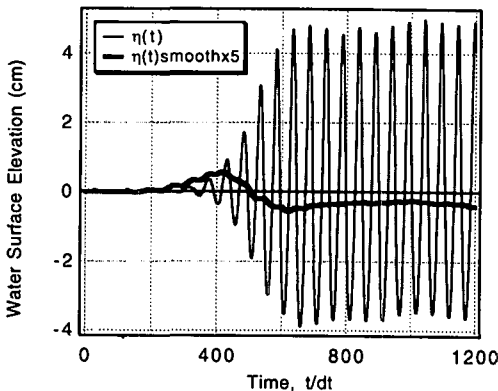


図-2 入射波列 (st. 1)

従ったものであり、日野ら及び Nakaza ら (1988, 1990) がサーフビートの計算に用いた手法そのものである。なお、基礎式の数値計算は差分解法による。

図-5(a) に、造波後 14 秒における流速分布、波高分布、サーフビート成分の実測値と計算値とを示す。図-3

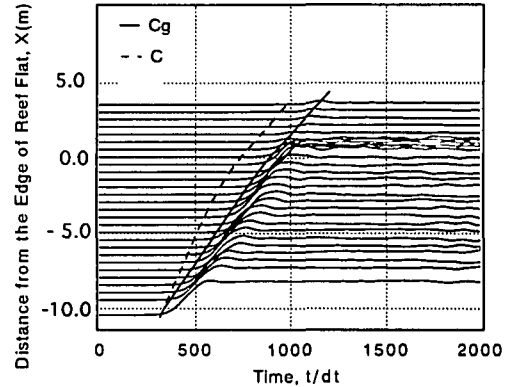
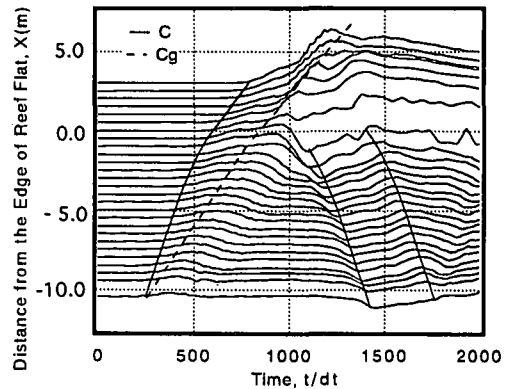
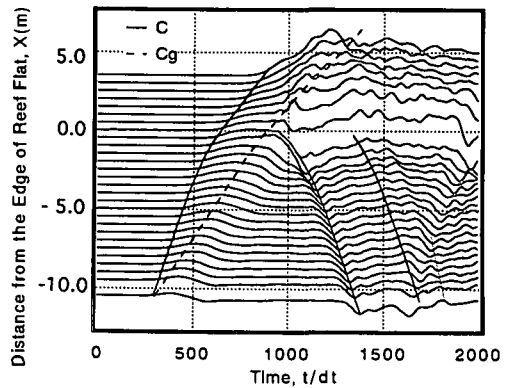


図-3 入射波の波高の時・空間分布



(a) 実測値



(b) 計算値

図-4 長周期水面変動の時・空間分布

及び4と関連させて、現象を説明すると次のようになる。

3.1 波列の進行

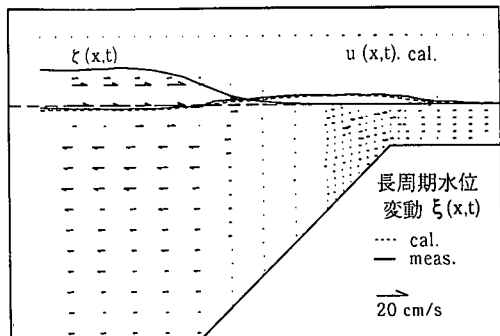
波群のフロント付近の波高変化部で Longuet-Higgins・Stewart らが示したように、radiation stress の空間分布から、それに釣り合う水面の勾配が作られる。その水面勾配が波群に拘束された状態で群速度と共に伝播する。水面の連続性から作られた波群前面の水位の高まりは、その前面に自由波を派生させる。ここでは、波群速度と自由波の速度差で波の分散が生じる。波高変化部では、水面勾配から生じる圧力勾配によって冲向きの流れが生じる。その流れに必要な水量は、波の進行と共に形成される波群の下水面の低下 (wave set-down) 部の領域拡大によって補われている。そのため、冲向き流れが生じて、波群の前面の水位は下がらない。また、ここで作られた冲向き流れは、波の質量輸送に対する補償流であり、この水量は造波板前面で新たに造波される波に受け渡される。沖側に無限の波列が続く場合、波群の下では一定の冲向き流れ (等流) となる。

図-5(a)で示すように、サーフビートに関する数値計算値と実験値とはかなり良く一致している。しかしながら、流速分布の計算値は波群フロントの前面でのみ岸向きの流速となり、波群の下では、ほぼゼロとなっている。

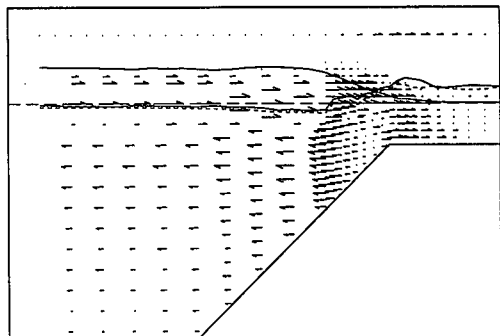
3.2 波群拘束波の行方と、砕波に伴う長波の発生

図-5(b)は波群のフロントがステップ先端にたどりついた瞬間 (入射後 19.0 秒) である。図-5(c)に、波群の波高一定部が平均的な砕波点まで伝播した瞬間 (入射後 21.0 秒) の流速分布及び水位変動の空間分布を示す。また、図-5(d)に、入射後 27.0 秒の状態を示す。入射後 19.0 秒から 27.0 秒までの 8 秒間は、長波がステップ上を往復するのに要する時間である。

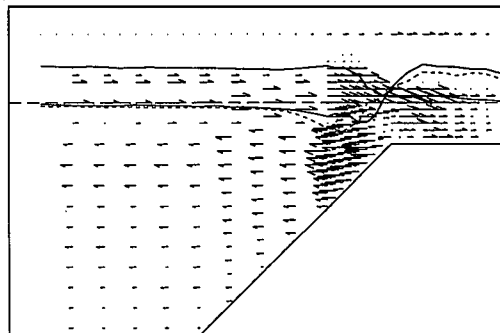
入射波群に拘束され押し進められるように伝播する拘束波の前面に常に生成される自由波は、ステップ上に乗り上げるが、入射波群が砕波点に達すると、押し込みの作用が無くなるため、一端停止する状態からコシーボアソンのように沖側と岸側に発散する波となる。次に、入射波群の砕波に伴い、輸送されてきた水塊がステップ上に投げ出され、大きな岸向き流速を形成させている (図-5(c))。砕波点近傍は、丁度水の湧き出し点に対応しており、波のトラフレベルよりも上の流れが、そのままステップ上を流れる形になっている。ステップ上に投げ出された水塊は、波の突っ込み点からいくらか岸側へ移動した後、ステップ上を波として伝播する (当然ながら、伝播距離がある程度確保されていれば自由波となろう)。砕波に伴う急激な波高変化は、運動量の釣り合いから、急激な水面勾配の形成を保證するが、砕波点直下では水位の低下をもたらす、岸側では水位の上昇を形成させる。水位の上昇に必要な水量は来襲波の質量輸送量によってま



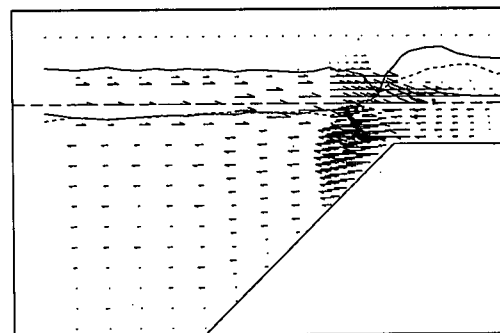
(a) $t = 14.0$ s



(b) $t = 19.0$ s



(c) $t = 21.0$ s



(d) $t = 27.0$ s

図-5 入射波の波高及び surf beat に伴う流速・水位変動

かなわれる。この時、砕波点より沖側ではいわゆる輸送水量の戻り流れは形成されない(先に述べた補償流のみが存在する)。

3.3 砕波点から沖に向う長波の発生

急激な水面勾配の形成は、水面形の連続性を保つため、砕波点より沖側へも水位の低下部を形成させる。砕波点付近を水の湧き出し点とすると、すでに述べた通り、岸側への水量はほぼ波の輸送水量でまかなわれる。その波による質量輸送量は、図-5(c)に示す状態までは、波群の進行と共に、波群下の wave set-down 領域の拡大でまかなわれてきたが、砕波点が固定されると同時にその作用が止まる。一方、波による質量輸送は続く。しかし、この時点では波による輸送水量は沖側に戻らないので、それと同じ水量を確保するため、沖側へ向かう流れの最後尾である砕波点付近の水位を下げる。この現象は次第に沖側へ伝播する(伝播速度はほぼ自由波の波速と一致している)。これが、図-4で見られる砕波点から沖側へ伝播する水位の低下部である。

図-5(a)の状態の長周期波は波群に拘束された波、すなわち phase-locked waves であり、図-5(b), (c)で砕波点から作り出される長周期波は、波群構造のクライシスによる、Long Wave Spawning とでも呼ばれよう。

3.4 数値計算の問題点

以上が砕波点で新たに長周期波を形成させるメカニズムである。図示のとおり、平均海面に対する数値計算値と実験値とはほぼ一致している。しかしながら、数値計算では波の質量輸送を考慮していないため、ステップ上に流れが形成されるに伴い、砕波点から沖側で岸向きの流れが形成されるようになり、その結果として水面の低下も生じている。すなわち、数値計算上では、ステップ上に岸向きの波(水位の上昇)を作る時、質量の連続を満たすため、沖側へも水位の低下を伴う新たな波を作ることになる。実験では、波による質量輸送量がそのままステップ上流れに受け渡され、それに見合う補償流(沖向き流れ)を確保するため、砕波点より沖側の水面が低下したのに対して、数値計算では丁度同じ水量を砕波点の沖側から直接ステップ上の波に補給させている。

ステップ上を伝播した波が汀線で反射されてステップ先端まで伝播した状態が図-5(d)であるが、この時から波による輸送水量の戻り流れが形成される。当然ながら、この反射波は砕波帯から沖側へ漏出する自由波となる(図-4に反射波で示す位相)。

3.5 共振現象

流れが砕波点と汀線との間を1往復する時間をかけて、砕波帯内の水量は力学的に与えられる水面形を飽和させることができるが、ステップ海岸の場合、これは海岸の固有周期の約半分の時間とほぼ一致する。一樣斜面

海岸の場合、エッジ波の振動モードを取る以外には海岸にトラップされる波は存在せず、ステップ海岸の場合のような固有周期も存在しない。しかしながら、波群が砕波する場合は、来襲波高(平均的な砕波点)に対応した固有周期が存在する。これは、砕波帯内で新たな自由波が形成され、汀線で反射されるならば、その波が平均的な砕波点と汀線とを1往復するに要する時間に等しい連長の波群に形成されたサーフビートが最も顕在化することになるというメカニズムによる。この具体的な例は、例えば Madsen (1995) らの数値計算結果(文献中、図-9)に見られる。すなわち、いかなる海岸の場合であっても、砕波帯内では一種の共振モードが存在し、Symonds ら(1982) 日野・仲座(1988, 1994)らが指摘している共振現象によるサーフビートの顕在化のメカニズムが存在することになる。

4. おわりに

本研究では、平均海面のみでなく波群に伴う内部流速の構造や波による質量輸送量を詳しく調べることで、波群拘束波の挙動、砕波点から新たに形成される長周期波、砕波帯内での共振現象、戻り流れの形成過程などを具体的にかつ物理的に説明することができた。また、理論的には従来の理論の枠組みで数値計算を行い、サーフビート現象が Longuet-Higgins・Stewart 及び Symonds らの力学で説明されることを示した。しかしながら、数値計算で波による質量輸送を考慮しない場合、砕波点から新たに形成される長周期波に対して、砕波点より沖側の水量が直接補給されるというような、実際と異なる解釈を行うことになる。このことは、勿論、数値計算に波による質量輸送を考慮すれば改善される問題であるが、これに関しては紙面の都合で割愛した。

参考文献

- 加藤一正・柳嶋慎一・栗山善昭・磯上知良(1989): 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 354-358.
- 加藤一正(1990): 漂砂と海岸地形変化に及ぼす長周期波の影響に関する研究, 東京工業大学博士論文, 平成2年9月.
- 合田良実(1975): 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.
- 仲座栄三・津嘉山正光・日野幹雄・大城 勉(1988): 波群津波の津波力に関する研究, 第35回海溝, pp. 597-601.
- 長瀬 覚・水口 優(1994): 砕波帯における長周期波に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 91-95.
- 長瀬 覚・水口 優(1995): 波群性入射波の砕波による長周期波について, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 146-150.
- 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.
- Bowen, A. J. and D. L. Inman (1971): Edge waves and crescentic bars, J. G. R., Vol. 75, No. 36, pp. 8662-8671.
- Hamada, T. (1965): The secondary interactions of surface

- waves, Rept. Port and Harbour Res. Inst., No. 10, p. 28.
- Huntley, D. A. and A. J. Bowen (1973): Field obserbation of edge waves, *Nature*, Vol. 243, No. 5403, pp. 160-162.
- Huntley, D. A. and R. T. Guza and E. B. Thornton (1981): Field obserbation of surf beat, 1. progressive edge waves, *J. G. R.*, Vol. 86, No. C7, pp. 6451-6466.
- Longuet-Higgins, M. S. and R. W. Stewart (1962): Radiation Stress in water waves, with application to 'surf beats', *Deep Sea Res.*, Vol. 11, pp. 529-569.
- Madsen, P. A., O. R. Sorensen and H. A. Schaffer (1994): Time domain modelling of wave breaking, runup, and surf beats, *Pro. ICCE, Kobe, 24th Coastal Engg.*, pp. 399-411.
- Munk, W. H. (1949): Surf beats, *Trans. Amer. Geophys. Un.* 30, pp. 849-854.
- Nakaza E., S. Tsukayama, and M. Hino (1990): Bore-like surf beat on reef coasts, *Proc. ICCE, 22th Coastal Engg. Delft*, pp. 743-756.
- Sand, S. E. (1982): Long waves in directional seas, *Coastal Engg.*, 9, pp. 195-208.
- Sharma J. N. and R. G. Dean (1979): Development and evaluation of a procedure for simulating a random directional secondorder sea surface and associated wave forces, *Ocean Engg. Rep.*, No. 20. p. 139.
- Symonds, G., D. A. Huntly and A. J. Bowen (1982): Two-dimensional surf beat: long wave generation by a time-varying breakpoint, *J. Geophys. Res.*, Vol. 87, No. C1, pp. 492-498.
- Symonds, G. and A. J. Bowen (1984): Interactions of near-shore bars with incoming wave groups, *J. Geophys. Res.*, Vol. 89, No. C2, pp. 1953-1959.
- Tick, L. J. (1959): A non-linear random model of gravity waves, *J. Math. Mech.*, 8, pp. 643-652.
- Tucker, M. J. (1950): Surf beats: sea waves of 1 to 5 minutes' period. *Proc. Roy. Soc. A*, 202, pp. 565-573.
-