

海浜の反射を考慮した長波の伝播特性

Characteristics of Propagation of Long Waves with Beach Reflection

愛媛大学工学部 正 員 伊 福 誠 M.Ifuku
 愛媛大学工学部 正 員 柿沼忠男 T.Kakinuma
 愛媛大学大学院 学生員 高石盛大 M.Takaishi

1. 緒 言

汀線近傍において0.5 - 5 min.で周期的に生ずる水位の不規則な変動は最初Munk¹⁾によって観測され、彼はその現象を“サーフ・ビート”と名付けた。その後、Tucker²⁾もサーフ・ビートを観測し、その存在を確認した。Longuet-Higgins and Stewart³⁾は radiation stress の概念を導入し、またGallagher⁴⁾は入射波の非線形干渉でサーフ・ビートの発生を説明しようとしているが、未だにその発生機構は明らかでない。

Brennikmeyer⁵⁾、Wrightら⁶⁾は砕波帯における波・流れと浮遊砂濃度の観測から浮遊砂濃度はうねりあるいは周期 30 s 以上の長周期波やサーフ・ビートと関連することを見出し、著者らの前二者は砕波帯において波・流れと浮遊砂濃度の観測を実施し、底面近傍における浮遊砂濃度と岸沖方向流速の記録から、浮遊砂濃度が高い値を生じその時間間隔は40 - 60 s 程度であるという現象は風波のピーク周波数付近や低周波数領域の流速に関連することを得⁷⁾、砕波帯における長周期波は漂砂の問題に密接に関連することを明らかにしている。

一様な傾斜海浜上を伝播する孤立波の挙動を岸⁸⁾、Freeman and Mehaute⁹⁾、Madsen and Mei¹⁰⁾は特性曲線法に基づいて解析している。石田は¹¹⁾は孤立波とクノイド波の傾斜海浜上での伝播を特性曲線法に基づいて解析し、波高変化の様子を Peregrine¹²⁾、Madsen and Meiや和田¹³⁾の解析結果と比較しているが、解析は反射波が無視できる領域に限定されている。周期波の傾斜海浜上での遡上を調べる際には海浜の反射を考慮すべきであることを岸が示唆しているが、その後、著者らの知りうる限りでは海浜の反射を考慮した波の伝播、遡上に関する数値解析的研究はなされていないようである。こうしたことから、著者らは傾斜海浜上を遡上した波が流下する現象を岸側の境界で“仮想流量”を与えることによって表現し、特性曲線法に基づいて解析する。本論文では、まずSaville¹⁴⁾の規則波による傾斜海浜上の波の遡上に関する実験結果に基づき波高変化や波の遡上について解析する。次に著者らが 1982 年の冬季節風時に平均水深 6.5 m(St.1)と 1.5 m(St.2)の地点で波・流れの観測を実施した愛媛県中予海岸¹⁵⁾について海浜モデルを設定し、規則波と不規則波による傾斜海浜上における長波伝播の数値解析を行って、波の遡上や海浜の反射率について検討しようとするものである。

2. 特性曲線法に基づく長波伝播の解析方法

2. 1 基礎方程式¹⁶⁾

図 1 のような単位幅のコントロールボリュームを考える。底面に沿って x 軸、底面より鉛直上向きに z 軸をとると非定常の運動方程式は次のように表せる。

$$z \times g \cos \theta + \frac{\tau_0}{\rho A / s} + g \sin \theta + 2u u_x + \frac{u^2}{A} A_x + \frac{u}{A} A_t + u_t = 0 \quad (1)$$

ここに、g:重力の加速度、θ:底面と水平面とのなす角、ρ:流体の密度、A:断面積、s:潤辺、τ₀:摩擦応力(=ρgn²u|u|/R^{1/3}、n: Manning の粗度係数、u:流速、R':径深)であり、添字の x, t は

場所、時間に関する微分を意味する。

側方からの流入がないとすれば連続の式は次のように表せる。

$$u A_x + u_x A + A_t = 0 \quad (2)$$

2.2 座標分割法¹⁸⁾

解析には固定格子法を用い、沖側から岸側までを等間隔 Δx で分割し、時間きざみ Δt は“Courantの条件” $\Delta t \leq \Delta x / (|u| + c)$ を満足するように選ぶものとする。ここに、 c は波速である。

2.3 初期条件および境界条件

(1) 初期条件(図 2)

$$z(x_j, 0) = z_j \quad (j = 1, \dots, N) \quad (3)$$

ここに、 z_j : 断面 U から仮想流量 Q_0 を流した際、不等流計算によって求めた各断面の水位、 N : 断面の数である。

(2) 境界条件(図 2)

$$\left. \begin{aligned} z(0, t) &= h_D + \eta_i(t) + \eta_r(t) \\ u(x_D, t) &= -Q_0 / z(x_D, t) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここに、 h_D : 断面 D での平均水深、 $\eta_i(t)$ 、 $\eta_r(t)$: 断面 D での時刻 t における入射波、反射波の水面変動量である。

2.4 波の遡上高

海浜を遡上する波の先端を図 3のようにモデル化する。岸沖方向流速が岸向きから沖向きへ変わるような隣接する断面 $j \sim j+1$ 間に最大遡上位置が存在すると仮定し、断面 j と遡上波の先端との間で開水路定常流のエネルギー方程式を考えると、エネルギー方程式は

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{u^2}{2g} + H' \right) = - \frac{\tau_0}{\rho g R'} \quad (5)$$

と書ける。ここに、 u は断面平均流速、 $H' = z' + h \cos \theta$ (z' : 基準水平面からの高さ)である。遡上波の先端の水深 h_e と流速 u_e は0であると仮定し、式(5)中の径深 R' は断面 j の水深と遡上波の先端水深との平均値とする。

2.5 反射率

Guza (ほか¹⁷⁾)は長波が汀線に直角に入射する場合について、一地点における水面変動量と岸沖方向流速から“岸向き特性量”と“沖向き特性量”を算出した。彼らは岸沖方向流速が鉛直方向で一定としているが、ここでは鉛直方向に変化するとして、岸向き特性量 PC と沖向き特性量 MC を

$$PC = \left[\eta + \frac{u}{k h / \sigma \{1 + (k z)^2 / 2\}} \right] / 2 \quad (6-1)$$

$$MC = \left[\eta - \frac{u}{k h / \sigma \{1 + (k z)^2 / 2\}} \right] / 2 \quad (6-2)$$

で算出する。ここに、 k は波数、 σ は角周波数である。

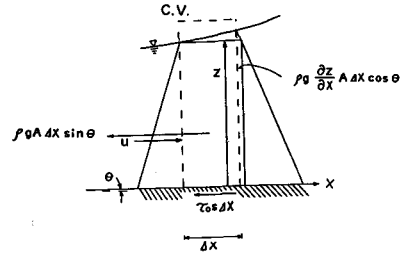


図 1 コントロール ボリューム

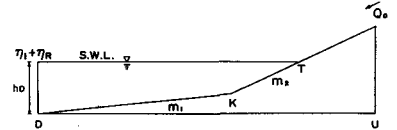


図 2 海浜モデル

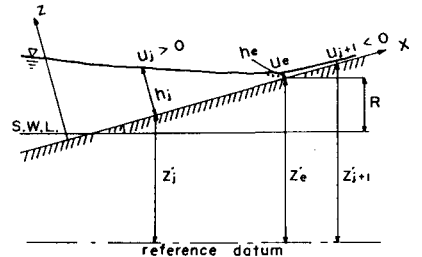


図 3 遡上波先端のモデル化

式(6-1)と式(6-2)で算出した岸向き特性量と沖向き特性量のパワースペクトルを求め、得たエネルギー密度から次式で反射率KRを算出する。

$$K_R = \sqrt{\frac{\text{沖向き特性量のエネルギー密度}}{\text{岸向き特性量のエネルギー密度}}} \quad (7)$$

3. 解析に用いた諸量

3. 1 Savilleの実験結果に基づく解析

Savilleの実験結果のうち傾斜海浜上では碎波せずにsurging waveとなる場合を選び、一様水深部の平均水深が0.375 mと0.45 mについて次のような海浜モデルを設定した。沖側の断面Dから勾配の変わる断面Kまでの距離は10 m、断面Kから断面Tまでの距離は3.75 mと4.5 m、断面Tから断面Uまでの距離は3.75 mと3 mとし、沖側の断面Dから岸側の断面Uまでを350の断面に分割した。海浜勾配 m_1 および m_2 (図2)はそれぞれ0および0.1、空間きざみ Δx は0.05 m、時間きざみ Δt は0.02 sとし、Manningの粗度係数を $0.03 - 0.1 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}$ 、仮想流量を $10^{-5} - 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ としてパラメータ解析を行った。

3. 2 現地海浜モデルに基づく解析

著者らが波・流れの観測を実施してきた愛媛県中予海岸を次のようにモデル化した。沖側の断面Dから勾配の変わる断面Kまでの距離は172.5 m、断面Kから断面Tまでの距離は16.25 m、断面Tから断面Uまでの距離は35.75 mとし、沖側の断面Dから岸側の断面Uまでを277の断面に分割した。海浜勾配 m_1 および m_2 (図2)はそれぞれ0.029および0.093、沖側の断面Dでの平均水深は6.5 mとした。空間きざみ Δx は0.8125 m、時間きざみ Δt は0.05 sとして解析した。

(1) 規則波

波高は平均水深6.5 mの地点で得た圧力変動のスペクトル密度から算出した平均波高0.2 m、周期は平均水深6.5 mの地点で長波近似が成り立つ最小の周期20 sと25, 30, 40, 50 s、Manningの粗度係数は自然流路の大流路における値¹⁸⁾として0.06, 0.08, 0.1 $\text{m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ 、仮想流量は $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ としてパラメータ解析を行った。

(2) 不規則波

平均水深6.5 mの地点で得た圧力変動量の時系列から平均水深6.5 mの地点で長波近似が成り立つ最小の周期より短い周期成分波をFFT法により除去した圧力変動量を初期波の水面変動量とする。Manningの粗度係数は $0.03 - 0.1 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ 、仮想流量は $10^{-5} - 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ としてパラメータ解析を行った。

4. 解析結果

4. 1 Savilleの実験結果に基づく解析

初期波の入力断面での反射波の影響について検討したのが図4であり、図中の実線と点線は式(6-1)と式(6-2)から算出した岸向き特性量と沖向き特性量である。沖向き特性量の振幅は岸向き特性量のそれの5%程度であり、初期波の入力断面では反射波の影響は極めて小さいことがわかる。

計算結果のうち相対遡上高がSavilleの実験結果と比較的良好に合う場合の相対遡上高 R/H_0 と沖波波形勾配 H_0/L_0 との関係を図5に示す。相対遡上高は沖波波形勾配が 3.4×10^{-4} 付近で最大となり、沖波波形勾配が増大するにつれ相対遡上高は減少する。計算値は実験値より12 - 40%程度小さく、沖波波形勾配が増大するにつれて両者の差は増大する。Savilleの実験では摩擦係数の値がどの程度であるか明らかで

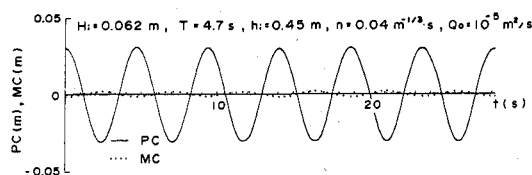


図4 断面DにおけるPCとMCの時間変動

ないが、数値計算では摩擦係数を大きめに評価しているため波高減衰率が大きくなり、相対遡上高が小さくなるのではないかと考えられる。

4. 2 現地海浜モデルに基づく解析

(1) 規則波

(a) 遡上高

解析で得た相対遡上高 と surf similarity parameter $\xi_o (= \tan \theta / \sqrt{H_o / L_o})$ との関係を図 6 に示す。相対遡上高は surf similarity parameter が増大するにつれて増大する。計算結果から次の近似式を得る。

$$R / H_o = 0.63 \xi_o^{0.70} \tag{8}$$

この規則波による近似式の勾配は間瀬¹⁹⁾らの不規則波による実験結果とほぼ同一であるが、遡上高は小さい。計算結果は間瀬らの斜面勾配 1/10 の実験結果より沖波波形勾配の範囲が小さいが、間瀬らが実験で得た有義遡上高の傾向が計算結果の範囲まで続くと考えた場合、式(8)による遡上高は不規則波による有義遡上高のほぼ 1/2 である。

(b) 反射率

斜面勾配が変化する断面 K での水面変動量と岸沖方向流速から求めた反射率 K_R と surf similarity parameter との関係を図 7 に示す。反射率は surf similarity parameter が 5 付近で小さくなり、それより 15 程度までは徐々に大きくなるが、15 程度より大きい範囲では増大の傾向は鈍化し 1 に漸近するようである。計算結果から次の近似式を得る。

$$K_R = 1 - 1.20 e^{-0.11 \xi_o} \tag{9}$$

(2) 不規則波

(a) 断面 K での水面変動量と流速の頻度分布

断面 K での水面変動量と岸沖方向流速の頻度分布を図 8 に示す。水面変動量の実測値と計算値はピークの位置が異なるもののガウス分布とほぼ似ている。岸沖方向流速は平均値付近で実測値、計算値ともガウス分布より僅かに大きいようであるが実測値と計算値はほぼ似ている。

(b) 水面変動量、岸沖方向流速のパワースペクトル

図 9 に断面 K での水面変動量と岸沖方向流速のパワースペクトルを示す。水面変動量は低周波数側で計算値が実測値より大きい事を除けばほぼ似た傾向を示す。岸沖方向流速は水面変動量と同じく低周波数側で計算値が実測値より大きい事を除けばほぼ似た傾向を示す。低

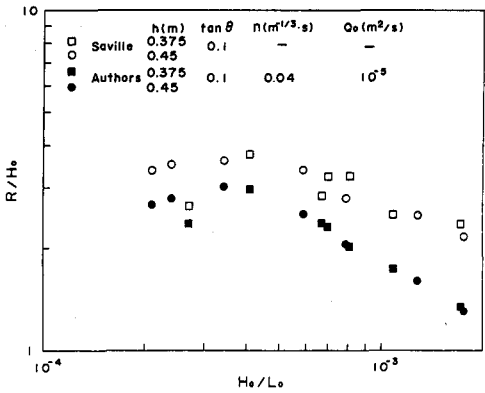


図 5 相対遡上高と沖波波形勾配

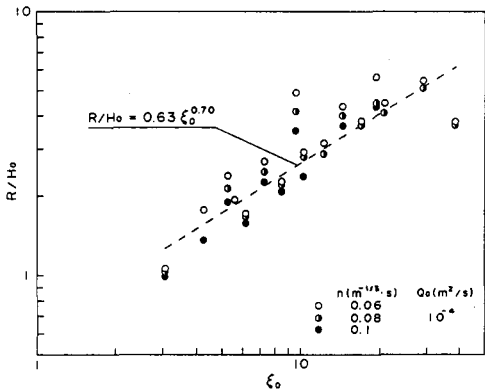


図 6 相対遡上高 と surf similarity parameter

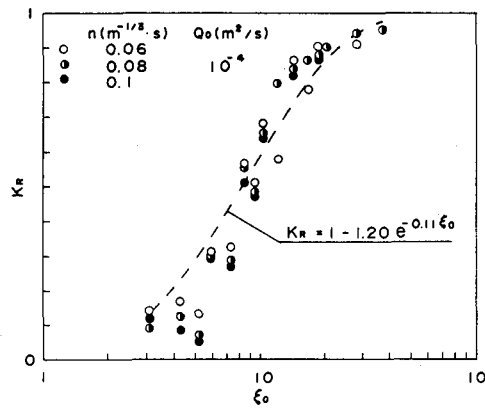
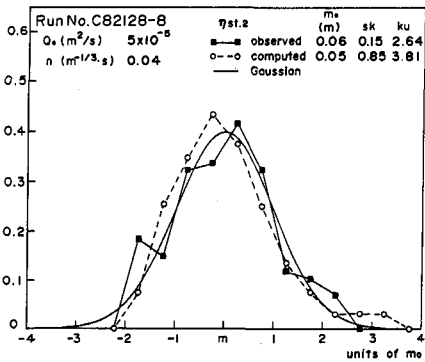
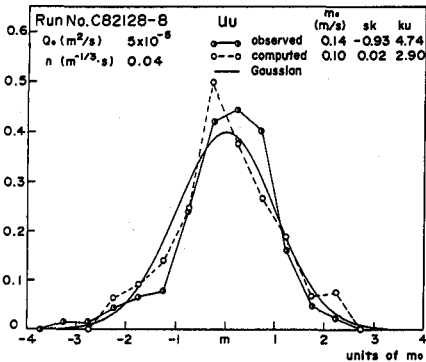


図 7 反射率と surf similarity parameter

周波数側の実測値と計算値の違いがスペクトル解析の分解能によるものなのか、成分波間の非線形干渉によるものなのかあるいは他の要因によるものなのか詳細に検討する必要がある。



(a) 水面変動量



(b) 岸沖方向流速

図 8 水面変動量と岸沖方向流速の頻度分布

(c) 反射率

実測で得た圧力変動量と上部および下部の岸沖方向流速から求めた反射率を図 10 に示す。実測値と計算値の反射率は周波数が高くなるにつれて減少する。数値解析結果から得た反射率は下部の岸沖方向流速を用いて得た反射率とほぼ同一の値を示す。

4. 3 長波変形

Saville の実験結果と現地海浜モデルの規則波に基づく解析において、汀線近傍では水面変動量、岸沖方向流速の波形はともに前傾し、汀線に近づくほどその度合いが大きいことを得た。

現地海浜モデルによる規則波、不規則波に基づく解析において、傾斜海浜上では部分重複波が形成され、最大波高と最小波高の間隔は水平床上での発生間隔 $L/4$ (L :波長) より小さいことを得た。

5. 結 語

以上、現地海浜を想定した海浜モデルを設定して長波の伝播特性について時間的に一定な仮想流量というものを導入して解析した。傾斜海浜上を遡上する規則波および不規則波とも遡上位置が時間とともに変化することを考えれば仮想流量が時間的に一定でよいのかどうか、また、Manning の粗度係数を用いて評価した摩擦応力が適切な値であるのか否か定かではない。今後、こうした点を明確にしながらか傾斜海浜上における長波の伝播について調べていくつもりである。

なお、この研究の数値計算は愛媛大学情報処理センターの FACOM M-180 II AD によった。

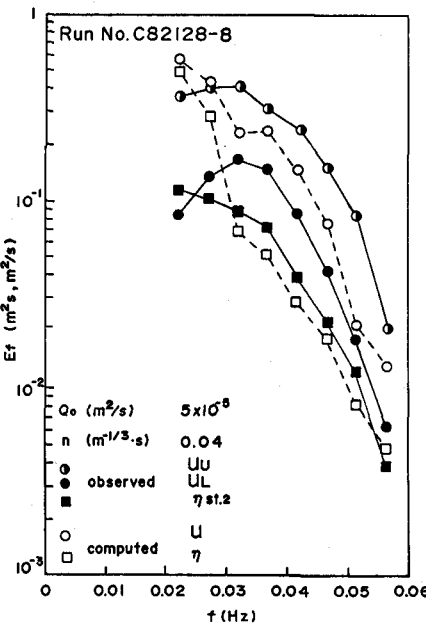


図 9 パワースペクトル

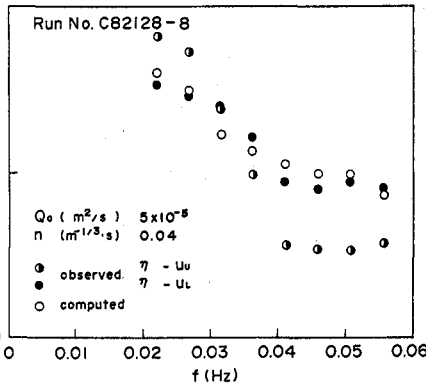


図 10 反射率

参 考 文 献

- 1) Munk, W.H. : Surf beats, Trans. Amer. Geophys. Union, Vol. 30, No. 6, pp. 649- 654, 1949.
- 2) Tucker, M.J.: Surf beats : Sea waves of 1 to 5 min. period, Proc. Roy. Soc. London, Series A 202, pp. 565-573, 1950.
- 3) Longuet-Higgins, M.S. and R.W. Stewart: Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to "surf beat" , J.F.M., Vol. 13, pp. 481-504, 1962.
- 4) Gallagher, B.: Generation of surf beat by non-linear wave interactions, J.F.M., Vol. 49, pp. 1-20, 1971.
- 5) Brenninkmeyer, B.M. : Mode and period of sand transport in the surf zone, Proc. 14 th Conf. Coastal Eng., pp. 812-827, 1974.
- 6) Wright, L.D., R.T. Guza and A.D. Short : Dynamics of a high-energy dissipative surf zone, Marine Geology, Vol. 45, pp. 41-61, 1982.
- 7) 柿沼忠男・伊福 誠・栗原 薫 : 砕波帯における浮遊砂濃度に関する二、三の観測例、第32回海岸工学講演会論文集、pp. 321-325, 1985.
- 8) 岸 力・花井正次: 津波の変形と陸上への打ち上げ高、第8回海岸工学講演会講演集、pp. 41-45, 1961.
- 9) Freeman, J.C. and B.L. Mehaute : Wave breakers on a beach and surges on a dry bed, Proc. ASCE, Vol. 90, No. HY2, pp. 187-216, 1964.
- 10) Madsen, O.S. and C.C. Mei : The transformation of a solitary wave over an uneven bottom, J.F.M., Vol. 39, pp. 781-791, 1969.
- 11) 石田 啓・中島光浩: 特性曲線法による非線形長波の変形特性について、第28回海岸工学講演会論文集、pp. 59-63, 1981.
- 12) Peregrine, D.H.: Long wave on a beach, J.F.M., Vol. 27, pp. 813-827, 1967.
- 13) 和田 明: 数値モデルによる有限振幅波の研究、第28回海岸工学講演会論文集、pp. 387-392, 1973.
- 14) Saville, T. Jr.: Wave run-up on shore structures, Trans. ASCE, Vol. 123, pp. 139 -150, 1958.
- 15) 柿沼忠男・伊福 誠・藤原隆一: 砕波帯における波・流れの観測(I)、愛媛大学工学部紀要、第10巻、第3号、pp. 279 - 330, 1984.
- 16) Wylie, E.B. and V.L. Streeter : Fluid Transient, McGraw - Hill, pp. 286 - 292, 1978.
- 17) Guza, R.T., E.B. Thornton and R.A. Holman : Swash on steep shallow beaches, Proc. 19 th Conf. Coastal Eng., pp. 708-723, 1984.
- 18) 土木学会編: 水理公式集、技報堂、p. 157, 1971.
- 19) 間瀬 肇・土居宏行・岩垣雄一: 不規則波の遡上特性に及ぼす Wave Grouping の影響に関する研究、第30回海岸工学講演会論文集、pp. 114 -118, 1980.