

傾斜海浜上における長波の伝播

伊 福 誠*・高石盛大**・柿沼忠男***

1. ま え が き

汀線から少し離れた沖合いで観測される2分～十数分周期の水位の不規則な変動は、最初 Munk (1949) 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、Tucker (1950) もサーフ・ビートの存在を確認した。Longuet-Higgins・Stewart (1962) は radiation stress の概念を導入し、Gallagher (1971) 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。一方、砕波帯内における波浪観測 (合田, 1975) や波・流れの観測 (Huntley, 1976) から砕波帯内においても長周期波の存在が確認されている。Brennikmeyer (1974), Wright ら (1982) 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・ビートに関連することを見出し、柿沼ら (1985) 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、砕波帯内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。

石田・中島 (1981) 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 Peregrine (1967), Madsen・Mei (1969) や和田 (1973) の解析結果と比較・検討しているが、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・花井 (1961) が示唆している。しかしながら、波の変形を海浜の反射をも考慮して数値解析的に取り扱った研究は数少ないようである。傾斜海浜上の波の伝播を解析する際、海浜の反射をいかに取り扱うかが極めて重要な問題となるが、ここでは“仮想流量”というものを岸側の境界で与え水位を連続させることによって海浜の

反射を考慮した数値モデルを提案し、斜面上を伝播する波の変形について検討するものである。

本論文では、特性曲線法を用いてまず、Saville (1958) 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、1982 年の冬期季節風時に波・流れの観測を実施した愛媛県中予海岸の海浜モデルを設定し、規則波および現地観測で得た波や流れの資料に基づき長波の変形について調べる。

2. 波の変形計算

(1) 基礎方程式

底面に沿って x 軸、底面に直角上向きに z 軸をとると運動方程式は

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \cos \varphi \frac{\partial h_s}{\partial x} + g (\sin \varphi + S_f) = 0 \cdots (1)$$

と表せる。ここに、 u は鉛直方向に平均した岸沖方向流速、 g は重力の加速度、 φ は海底と水平面とのなす角、 h_s は水面から海底までの深さ、 $S_f = n^2 |u| / R'^{4/3}$ (n : Manning の粗度係数、 R' : 径深) である。

連続の式は

$$\frac{\partial h_s}{\partial t} + \frac{\partial (uh_s)}{\partial x} = 0 \cdots (2)$$

と表せる。

(2) 初期条件および境界条件 (図-1)

初期条件は

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

とする。ここに、 z_j は断面 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 は断面の数である。

一方、境界条件 (図-1) は

$$\left. \begin{aligned} z(0, t) &= h_D + \eta_I(t) + \eta_R(t) \\ u(x_U, t) &= -Q_0 / z(x_U, t) \end{aligned} \right\} \cdots (4)$$

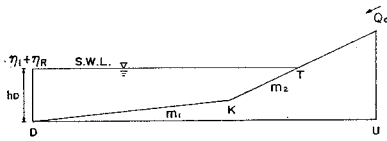
とする。ここに、 h_D は断面 D での平均水深、 $\eta_I(t)$, $\eta_R(t)$ は時刻 t における入射波、反射波の水面変動量である。

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 で分割する。空間きざみ Δx と時間きざみ Δt は Courant の条件、 $\Delta t \leq \Delta x / (|u| + c)$ を満足するように選

* 正会員 工修 愛媛大学講師 工学部海洋工学科

** 正会員 工修 愛媛県

*** 正会員 工博 愛媛大学教授 工学部海洋工学科



図—1 境界条件

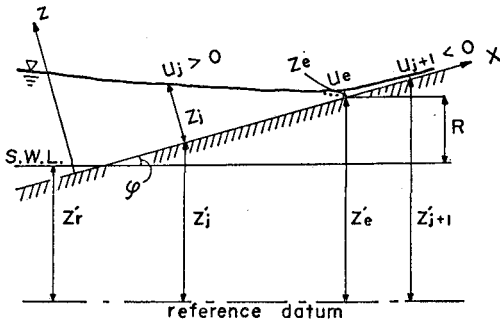
ぶものとする。

(3) 遡上高の算出法

海浜を遡上する波の先端を図—2 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隣接する断面、 j と $j+1$ 、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。遡上波の先端の水深および流速は 0 と仮定すれば、静水面を基準にした遡上高 R は次式で表される。

$$R = \frac{(u^2/2g + z' + z \cos \phi)_j + S_f z'_j / \sin \phi - z_r' \dots (5)}{(1 + S_f / \sin \phi)}$$

ここに、 z'_r は基本水準面から静水面までの距離である。



図—2 遡上高の算出法

(4) 反射率

Guza ら (1984) に従い、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、それらのエネルギー密度から次式で反射率 K_R を評価する。

$$K_R = \sqrt{\frac{\text{沖向き特性量のエネルギー密度}}{\text{岸向き特性量のエネルギー密度}}} \dots (6)$$

3. 解析結果

(1) Saville の実験に基づく解析

Saville の実験結果のうち斜面上では碎波せずに surging wave となるケースを選び、斜面勾配が 1/10、一樣水深部の平均水深が 0.375 m と 0.45 m の場合について、次のような海浜モデルを設定した。図—1 に示す沖側の断面 D から勾配が変わる断面 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

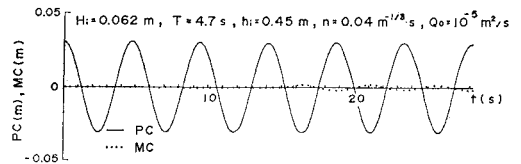
T から断面 U までの距離は 3.75 m と 3 m とし、沖側の断面 D より岸側の断面 U までを 350 の断面に分割した。空間きざみ Δx は 0.05 m、時間きざみ Δt は 0.02 s とし、Manning の粗度係数を $0.03 \sim 0.06 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ 、仮想流量を $10^{-5} \sim 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ としてパラメータ解析を行った。

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—3 であり、図中の実線および点線は岸向き特性量および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。

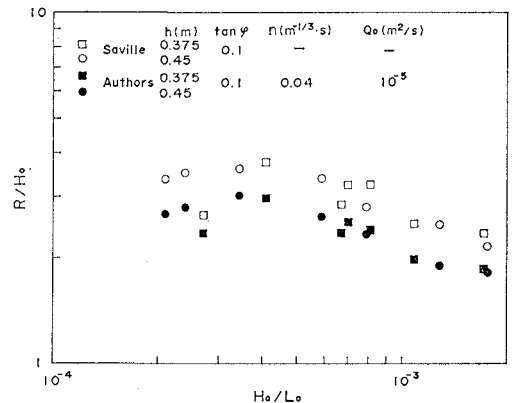
計算結果のうち相対遡上高が Saville の実験結果をうまく再現する場合の相対遡上高と沖波波形勾配との関係を図—4 に示す。相対遡上高は沖波波形勾配がほぼ 2.7×10^{-4} のものを除けば、 3.4×10^{-4} 付近で最大となり、沖波波形勾配が増大するにつれ相対遡上高は減少し、実験値と計算値は定性的には良くあっている。計算値は実験値より 8 ~ 22 % 程度小さく、僅かではあるが沖波波形勾配が増大するにつれて両者の差は増大する。Saville の実験では摩擦係数の値がどの程度であるか明らかでないが、数値計算では摩擦係数を大きめに評価しているため波高減衰率が大きくなり、相対遡上高が小さくなるのではないかと考える。

(2) 現地海浜モデルによる解析

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。図—1 に示す沖側の断面 D から勾配が変わる断面 K までの距離は 172.5 m、断面 D から断面 T までの距離は 16.25 m、断面 T から



図—3 沖側境界における特性量の時間変動



図—4 相対遡上高と沖波波形勾配

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 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 としてパラメータ解析を行った。

規則波による解析

波高は 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, 30, 50 s, Manning の粗度係数は自然流路の大流路における値 0.08 および $0.1 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$, また玉石などが存在する場合の値 $0.06 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ (水理公式集, 1971) を用いた。仮想流量は $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ とした。

初期波の波高 0.2 m, 周期 20 s, Manning の粗度係数 $0.06 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$, 仮想流量 $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ の場合, 斜面上での初期波高に対する各断面での波高の比 H/H_i と初期水深に対する各断面での水深の比 h/h_i の関係を 図-5 に示す。部分重複波が形成されている。最大波高と最小波高の生ずる間隔は岸に近づくにつれて小さくなり, これらの間隔は水平床上での部分重複波の最大波高と最小波高の発生間隔 $L/4$ (L : 波長) より小さい。 h/h_i が 0.2, 0.4 および 0.7 付近の谷では初期波高水深比の大小にかかわらず H/H_i はほぼ同一であるが, 部分重複波の峯が生ずる位置では初期波高水深比が小さいほど波高の増大の傾向は大きく, 和田や石田の結果と似た傾向を示す。岸 (1962) は斜面上での有限振幅長波の変形を特性曲線法に基づいて解析した結果, 波高変化に関する経験式を得ている。図-5 中の一点鎖線は岸の経験式で初期波高水深比を 0.015 として算出したものである。岸の結果は水深が減少するにつれて波高は徐々に増大するが, 解析結果は部分重複波の最小波高が生ずる付近では岸の結果より小さめ, 最大波高が生ずる付近では岸の結果より

大きめである。海浜の反射を考慮する場合と考慮しない場合とでは波高変化の様子がかなり異なることから, 汀線近傍の流れや漂砂の問題等を解明しようとする際には海浜の反射の取り扱いが極めて重要となる。

Irribarren-Nogales (Hunt, 1961) に従うと, 解析に用いた波が碎波せずに遡上する限界の海浜勾配は 0.016 ~ 0.040 となる。この値は海浜モデルにおいて波が遡上する付近の海浜勾配 0.093 より小さいことから, 解析に用いた波は海浜上では砕けないで遡上する。

相対遡上高 R/H_0 と H_0/T^2 (ft-s 単位) の関係を Hunt (1961) の滑面床, 粗面床上での実験結果とともに 図-6 に示す。計算結果は Hunt の実験範囲外である。相対遡上高は H_0/T^2 が 3×10^{-4} より小さい範囲では H_0/T^2 が減少するにつれて相対遡上高は増大するが, 3×10^{-4} より大きい範囲では Hunt の実験結果のうち斜面上を碎波せずに遡上するものとはほぼ同一で 2 ~ 3 であり計算結果は Hunt の実験結果と定性的・定量的に一致する。また, Manning の粗度係数が大きいものほど相対遡上高は小さい。

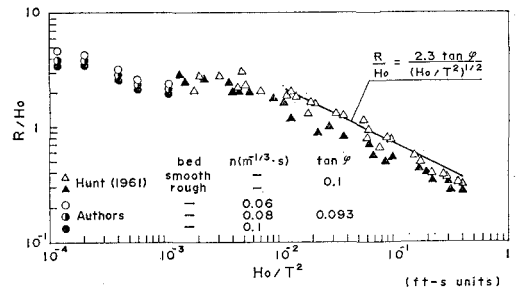


図-6 相対遡上高と H_0^2/T

岸向き特性量と沖向き特性量から算出した反射率と Healy の方法で求めたそれは深海波の波形勾配が増大するにつれて減少し, 両者は似た傾向を示すが特性量から算出した反射率は Healy の方法で求めたその 1.1 ~ 1.3 倍程度である。

一様水深部の水深が 6.5 m で沖側境界から約 190 m の地点から勾配が 1/30 となる海浜において, 勾配が変わる地点より岸側約 50 m の位置にのり勾配 1/5, 1/8 および 1/10, 天端幅 20 m, 天端水深 1.5 m の潜堤を設置し, 沖側境界で波高 0.2 m, 周期 20 s の初期波を与えた場合, 勾配が変化する地点での反射率は 0.22, 0.17 および 0.1 となり, それぞれ, 無堤の場合の 13, 9.5 および 5.5 倍程度となる。

不規則波による解析

著者らは, 1982 年の冬期季節風時, 中予海岸の平均水深 6.5 m の地点 (St. 1) において水圧式直結型波高計 (協和商工 (株) 製) を改良したものを使用して圧力変動の記録を得た。また, 平均水深 1.5 m の地点 (St. 2) におい

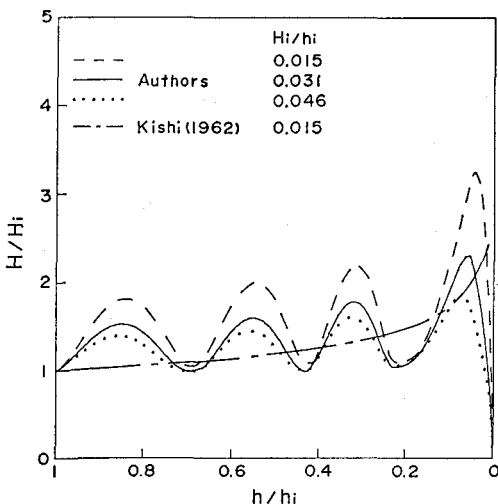


図-5 波高分布

断面 U までの距離は 35.75 m とし、沖側の断面 D から 2 成分が測定可能な電磁誘導型流速計 MODEL 551 (MARSH McBIRNEY 社製) とそのうち 1 台の流速計に内蔵した圧力計 MODEL 205-2 (Setra Systems 社製) によって圧力変動と流速を観測した。数値計算に際し、沖側の境界において水面変動量を入力する必要があるが、観測においては圧力変動しか得ていない。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はほぼ 20 s である。水深を 6.5 m、波の周期を 20 s として微小振幅波理論に基づき水面変動量に対する圧力変動量の比を算出すると 0.967 となり圧力変動量は水面変動量とほぼ等しいと見なせる。こうしたことから、中予海岸の平均水深 6.5 m の地点で得た圧力変動の時系列から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 $0.03 \sim 0.05 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ 、仮想流量は $10^{-5} \sim 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ としてパラメータ解析を行った。Manning の粗度係数は $0.03 \sim 0.05 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ 、仮想流量は $10^{-5} \sim 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ としてパラメータ解析を行ったわけであるが、Manning の粗度係数を $0.04 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ 、仮想流量を $5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ として解析した場合が観測結果の再現性が高い。

観測して得た圧力変動の時系列および計算して得た水面変動量の時系列をもとにゼロ・アップ・クロス法によって求めた平均波高および平均周期を算出した。平均波高は数値計算結果から求めたものが観測結果に比較して 10~20% 程度、平均周期は数値計算結果から求めたものが観測結果に比較して 5~15% 程度小さい。

平均水深 1.5 m の地点での水面変動量と岸沖方向流速のパワースペクトルを図-7 に示す。水面変動量は低周波数側で計算結果が観測結果よりも大きいが高周波数側では両者はよくあっている。岸沖方向流速をみると、観測結果は 0.03 Hz より低周波数側では海底からほぼ 1 m 程度の高さで得たものがほぼ同一であるのに対して 0.6 m 程度の高さで得たものは周波数が高くなるにつれてエネルギー密度は増大する。0.03 Hz より高周波数側では周波数が高くなるにつれてエネルギー密度は減少する。計算結果は低周波数側を除けば海底からほぼ 1 m の高さで得たものとはほぼ 0.6 m 程度の高さで得たものの間にあり周波数が高くなるにつれてエネルギー密度は減少し観測結果と似た傾向を示す。低周波数側の観測結果と計算結果の違いが何によるものなのか現在のところ明らかでない。ただ、解析に用いた圧力変動と岸沖方向流速のバイコヒーレンススペクトルの解析から周波数成分波間の干渉の度合を表す非線形量は 10% 程度であることを得ている (柿沼ら, 1987) ことを考えれば非線形干渉以外のものが要因のように思える。

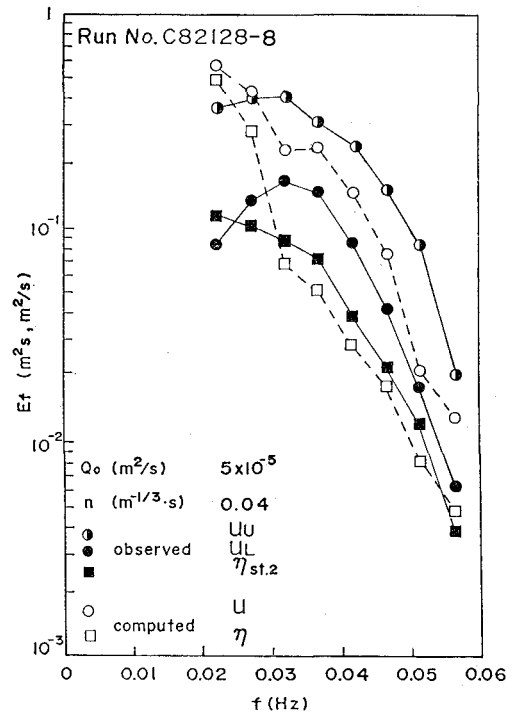


図-7 パワースペクトル

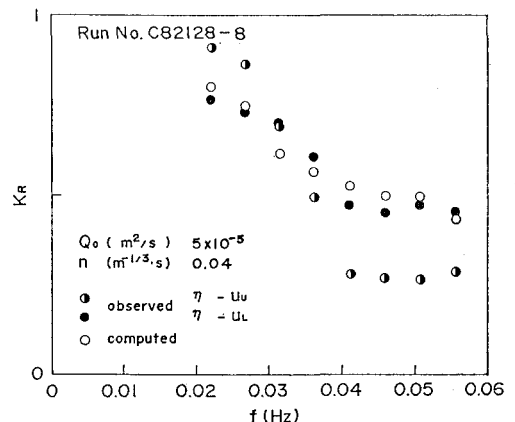


図-8 反射率の周波数特性

観測して得た圧力変動量と海底からほぼ 1 m および 0.6 m の高さで得た岸沖方向流速から算出した特性量および計算して得た水面変動量と岸沖方向流速から算出した特性量に基づいて得た反射率を図-8 に示す。実測値および計算値から求めた反射率とも周波数が高くなるにつれて減少する。計算値から求めた反射率は 0.03 Hz より高周波数側では圧力変動と水深のほぼ 1/2 の高さであるほぼ 1 m で観測して得た岸沖方向流速に基づいて求めたものと良く一致する。すべてのデータセットに基づいて得た反射率の実測値と計算値の関係を示したのが図-9 である。ばらつきはあるがすべてのデータのうち約

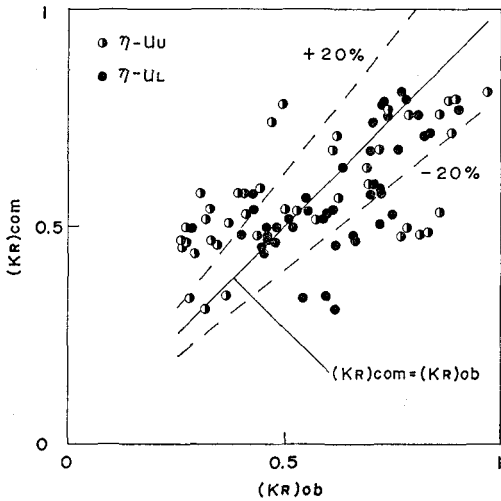


図-9 反射率の観測値と計算値との比較

65% のものが $\pm 20\%$ の誤差の範囲内にあり、実測結果と計算結果はよく対応しているのではないかと考える。詳細にみると、観測して得た圧力変動量と海底からほぼ 1 m の高さで得た岸沖方向流速から算出した反射率のばらつきが大きいようであり、計算値との差が大きい。

4. 結 論

本論文では、規則長波および不規則長波を対象として傾斜海浜上における伝播を特性曲線法に基づいて調べようとしたものであり、得た結果を要約すると以下のようである。

規則長波による解析では、波は傾斜海浜上では碎けず遡上し、遡上高は傾斜海浜上を碎けないで遡上する Hunt や Saville 実験結果と定性的・定量的に一致すること、不規則波による解析では、計算して得た水面変動量をもとにゼロ・アップ・クロス法で求めた平均波高および平均周期は現地観測で得たそれより 10% 程度小さいものの観測結果と定性的・定量的に一致すること、水面変動量および岸沖方向流速のパワースペクトルの解析から、水面変動量および岸沖方向流速とも高周波数側では両者はよくあっているが、低周波数側で計算結果が観測結果よりも大きいようであり、この違いは非線形干渉以外のものが要因のように思えること、計算して得た水面変動量と岸沖方向流速から算出した特性量に基づいて算出した反射率は周波数が増大するにつれて増大し、観測結果とも良く一致すること、などが明らかとなった。

提案したモデルによる数値解析において、現地観測で得た結果をある程度再現し得たが、摩擦応力を評価する

際に用いた Manning の粗度係数が果して適切な値であるのか否か定かではなく、水面変動量や岸沖方向流速の時間変化も十分な精度で再現できたとは言い難い。特に後者の問題は解析に使用した海浜形状が現地海岸を的確に再現し得てなかったためではないかと思われる。

参 考 文 献

- 石田 啓・中島光浩 (1981): 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.
- 柿沼忠男・伊福 誠・栗原 薫 (1985): 碎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.
- 柿沼忠男・伊福 誠・大矢佳一 (1987): 碎波帯における低周波成分の観測研究, 第 34 回海岸工学講演会論文集, pp. 61~65.
- 岸 力・花井正次 (1961): 津波の変形と陸上への打ち上げ高, 第 8 回海岸工学講演会論文集, pp. 41~45.
- 合田良実 (1975): 浅海域における波浪の碎波変形, 港湾技術研究所報告, 第 14 巻, 第 3 号, pp. 59~106.
- 土木学会編 (1971): 水理公式集 昭和 46 年度改訂版, 技報堂, p. 157.
- 和田 明 (1973): 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.
- Brennikmeyer, B. M. (1974): Mode and period of sand transport in the surf zone, Proc. 14th Coastal Eng. Conf. ASCE, pp. 812~827.
- Gallagher, B. (1971): Generation of surf beat by non-linear wave interactions, J. Fluid. Mech., Vol. 49, pp. 1~20.
- Guza, R. T., E. B. Thornton and R. A. Holman (1984): Swash on steep shallow beaches, Proc. 19th Coastal Eng. Conf. ASCE, pp. 708~723.
- Hunt, Ira A. Jr. (1961): Design of sea-walls and breakwaters, Trans. ASCE, Vol. 126., Part IV, pp. 542~570.
- Huntley, D. A. (1976): Long-period waves on a natural beach, J. Geophys. Res., Vol. 81, No. 36, pp. 6441~6449.
- Kishi, T. (1962): Transformation, breaking and run-up of a long wave, Proc. 8th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 60~76.
- Longuet-Higgins, M. S. and R. W. Stewart (1962): Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to "surf beat", J. Fluid. Mech., Vol. 13, pp. 481~504.
- Madsen, O. S. and C. C. Mei (1969): The transformation of a solitary wave over an uneven bottom, J. Fluid. Mech., Vol. 39, pp. 781~791.
- Munk, W. H. (1949): Surf beats, Trans. A.G.U., Vol. 30, No. 6, pp. 649~654.
- Peregrine, D. H. (1967): Long waves on a beach, J. Fluid. Mech., Vol. 27, pp. 813~827.
- Saville, T. Jr. (1958): Wave run-up on shore structures, Trans. ASCE, Vol. 123, pp. 139~150.
- Tucker, M. J. (1950): Surf beats, Sea waves of 1 to 5 min. period, Proc. Roy. Soc., Ser. A, Vol. 202, pp. 565~573.
- Wright, L.D., R.T. Guza and A.D. Short (1982): Dynamics of a high-energy dissipative surf zone, Marine Geology, Vol. 45, pp. 41~61.