

方向スペクトル波浪による Wave Setup と沿岸流速の設計図表

CALCULATION DIAGRAMS FOR WAVE SETUP AND LONGSHORE CURRENTS INDUCED BY DIRECTIONAL SPECTRAL WAVES

合田良実

Yoshimi GODA

土木学会名誉会員 工博 横浜国立大学名誉教授 (株) エコー (〒110-0014 東京都台東区北上野 2-6-4)

Honorary Member of JSCE, Dr.Eng., ECOH Corp.

Computation is made of wave setup and longshore currents induced by directional random waves on planar beaches with the bottom slope ranging from 1/100 to 1/10 for deepwater wave steepness of 0.005 to 0.080. The offshore wave incident angle is varied from 0° to 70°. The random wave-breaking model employed for computation is the author's PEGBIS model (parabolic equation with gradational breaker index for spectral waves), which incorporates surface roller effects. Empirical formulas are fitted to the computed results of wave setup and longshore current velocities for convenience of coastal engineers. Calculation diagrams are also provided.

Key Words : longshore currents, wave setup, directional wave spectrum, wave breaking model, eddy viscosity, surface roller

1. まえがき

沿岸流は漂砂現象の最大の起動力であり, これまでもいろいろな研究が行われてきた。しかし, Longuet-Higgins¹⁾の論文に始まる大半の研究は, 規則波によって励起される沿岸流を対象としてきた。不規則波を取り扱うようになったのは, Thornton・Guza²⁾や合田・渡辺³⁾などがその嚆矢といってよい。それでも, これらは単一周期, 単一方向の不規則波の碎波モデルに基づいており, 実際の波浪の特性である方向スペクトル特性は考慮されていない。

方向スペクトル波浪によって励起される沿岸流や Wave Setup (以下では簡単のために「波寄せ」の語を用いる) についてあまり研究されてこなかったのは, 外浜帯における方向スペクトル波浪の碎波現象を解析するための数値モデルが未発達であったためである。

著者は先に, 方向スペクトル波浪の碎波変形を取り扱うことができる段階的碎波モデル, すなわち PEGBIS (Parabolic Equation with Gradational Breaker Index for Spectral waves) モデルを開発し^{4) 5) 6)}, このモデルを用いてサーフェース・ローラーを導入した沿岸流の計算法

を発表した^{7) 8)}。計算結果は室内実験および現地観測値にかなり良く適合し, 計算法の妥当性が確かめられた。

実際の問題では, 複雑な海底地形を対象として波浪変形を計算し, それによって求められるラディエーション応力の空間分布を入力として, 平均水位の変化と海浜流を計算する。とはいっても, 単純な地形の場合に碎波による水位上昇と沿岸流速がどのくらいになるかを知りたい, という要請は多いと思われる。そこで, 新しい計算モデルを用いて一様傾斜海浜における平均水位上昇量と沿岸流速を広範囲の条件について計算し, その結果を経験式ならびに計算図表に取りまとめて, 調査設計業務の資料に供することとした。

2. 対象とする海浜地形と波浪条件

計算は直線状平行等深線海岸という1次元地形を対象とし, さらに一様傾斜海浜を取り上げる。海底勾配としては, 実際の海岸で見いだされる範囲として, $s = 1/10, 1/20, 1/30, 1/50$, および $1/100$ の5種類を選定した。

波高としては, 波寄せ高が波高に比例し, 沿岸流が波高の平方根に比例する線形現象と考えられるところか

ら、 $(H_{1/3})_0 = 2.0\text{m}$ の一定値を用いた。

周期については、深海波形勾配 H_0/L_0 を0.005～0.080の範囲で変わるように、表-1のように選定した。ただし、深海波長 L_0 は有義波周期 $T_{1/3}$ を用いて算定し、これを $T_{1/3} = 0.88T_p$ の関係を用いてスペクトルピーク周期に換算した。

方向スペクトルとしては、修正 JONSWAP 型周波スペクトルと光易型方向分布関数の積を使用した。波形勾配の小さな波は遠方からのうねりであり、波形勾配の大きな波は風波である。うねりは周波数スペクトルの帯域幅が狭く、ピーク増幅率 γ が大きい。また、方向分散も小さい。一方、十分に発達した風波はピーク増幅率 γ が1に近く、また方向分散も大きい。こうした風波とうねりの特性を勘案して、それぞれの波形勾配に対してスペクトルのピーク増幅率 γ および方向分散パラメータ $s_{\max}$ を表-1のように設定した。なお、表中の右から2番目の欄の $2N$ は後述の成分波数である。また、最右欄の α は3(2)で述べるサーフェース・ローラーへのエネルギー転換率である。

表-1 計算に用いた周期とスペクトルパラメータ

H_0/L_0	$(L_{1/3})_0$ (m)	T_p (s)	γ	$s_{\max}$	$2N$	α
0.005	400.0	18.19	10.0	150	110	0.20
0.007	285.7	15.37	5.2	100	130	0.22
0.010	200.0	12.86	3.3	75	142	0.25
0.014	142.9	10.87	2.4	47	156	0.28
0.020	100.0	9.10	1.85	29	170	0.32
0.030	66.7	7.43	1.40	16.6	180	0.36
0.040	50.0	6.43	1.25	12.5	188	0.40
0.060	33.3	5.25	1.10	10.0	196	0.45
0.080	25.0	4.55	1.05	10.0	200	0.50

実際の波浪のスペクトル特性は、波形勾配によって必ずしも一義的に定まるものではない。しかし、表-1に設定した波形勾配ごとのスペクトル特性は、実際の波浪の性質を平均的に表していると見てよいであろう。

沖波の入射角としては 0° から 70° まで 10° ごとに8通りに変化させた。ただし、 $\theta_0 = 0^\circ$ のケースは波寄せ高の計算を目的とし、沿岸流速は極めて微弱であるため、沿岸流速の解析から除外した。

なお、海岸線は直線で $\theta_0 = \pm 90^\circ$ の方向にある。このため入射角が大きいときには、成分波の方向が沖向きにならないように方向に制限を設けた。すなわち、 $\theta_0 = \pm 90^\circ$ の制限を超えたときには、 $(\theta_0)_{\min} = -90^\circ$ あるいは $(\theta_0)_{\max} = +90^\circ$ の値を与えた。

また使用したプログラムでは、シングルサンメーション法で周波数成分波ごとに波向を割り振っており、その場合に生じがちな成分波の波向の非対称性を解消するために、主波向に対称な成分波を追加している。こうした追加分成分波についても $\theta_0 = \pm 90^\circ$ の制限を設けて計算を実行した。表-1に記載した成分波数 $2N$ はこうした成分波を追加した結果である。シングルサンメーション法で

は、波向の割り当てに乱数を用いており、ここに示すような成分波数を用いても、初期乱数の値によって碎波帯内の波高や沿岸流速に数%以上の差が生じることがあった。このため、特に方向分散性の大きなケースについては成分波数を多く取ったものである。ただし選択の基準があるわけではなく、やや恣意的である。

3. 計算の基本式と計算パラメータ

(1) 碎波変形の計算式

段階的碎波変形計算モデル (PEGBIS) は平口・丸山⁹⁾による放物型方程式に基づく数値解析法を採用し、そのエネルギー減衰項に段階的碎波係数の手法を取り込んだものである。ただし、碎波減衰に係わる定数 K_b については、Tajima・Madsen¹⁰⁾を参照して、海底勾配 s の関数である $K_b = 0.375(0.3 + 2.5s)$ のように変更している。

また、段階的碎波係数の定数 C_b の標準値は0.08であるけれども、前報⁹⁾で現地海岸の沿岸流を計算した事例では $C_b = 0.06 \sim 0.07$ のほうが適切なケースが多かったため、今回の数値計算では $C_b = 0.07$ の値を採用した。なお、段階的碎波を計算する波高レベルとしては $M = 31$ を用いたので、実際には0.0648に割り引いて使用した。

一様斜面の計算条件としては、沖側水深を $h_0 = 1000\text{m}$ とし、汀線までの距離を1000区間に区分して沖から順に浅水・屈折・碎波変形を計算した。このうち、汀線から水深12mまでの600区間は水深0.02m刻み、さらに水深20mまでの40区間は水深0.20m刻みで所定の勾配とした(勾配1/100については80区間を0.10m刻み)。ただし、それよりも沖側は水深2.722m刻みとした。

(2) 波寄せ高の計算式

波が岸へ向かって伝播するときの平均水位の変化は岸沖方向のラディエーション応力 S_{xx} の勾配に依存する。さらに、碎波によって失われる波エネルギーの一部がサーフェース・ローラーを形成し、そのエネルギー勾配も平均水位の変化に影響を与える。したがって、沿岸方向に一樣な海浜における平均水位の変化量 $\bar{\eta}$ は、式(1)を解くことによって求められる。

$$\frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x} = -\frac{1}{\rho(h + \bar{\eta})} \left[\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (E_{sr} \cos^2 \theta) \right] \quad (1)$$

ここに、 ρ は水の密度、 h は水深、 E_{sr} は次項に述べるサーフェース・ローラーの運動エネルギー密度、 θ は波向角である。なお、本論文では汀線における平均水位の上昇量のみを論じるので、記述を簡単にするため、これを $\zeta = \bar{\eta}_{x=0}$ の記号で表すことにする。

(3) 沿岸流速の計算式

沿岸流速 V は式(2)を数値計算で解いて求められる。

$$\frac{\partial S_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (E_{sr} \sin 2\theta) - \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho \nu_t h \frac{\partial V}{\partial x} \right) + F_y = 0 \quad (2)$$

ここに、 S_{xy} はラディエーション応力、 ρ は水の密度、 ν_t は渦動粘性係数、 F_y は底面摩擦力である。ラディエーション応力 S_{xy} は、砕波変形計算の過程で成分波毎に計算し、その結果を合成して各地点の値を求めている。

サーフェース・ローラーのエネルギー E_{sr} はその断面積 A_{sr} を用い、 $E_{sr} = \rho A_{sr} c / 2T$ として求められる¹¹⁾。サーフェース・ローラーは、砕波によって失われたエネルギーの一部を受け取って成長し、やがて自らの減衰機構によって消滅する。このサーフェース・ローラーの成長減衰過程は、Tajima・Madsen¹²⁾が示すように、式(3)を A_{sr} について数値的に解くことによって解析される。

$$\alpha \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{8} \rho g H_{rms}^2 c_g \cos \theta \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho A_{sr}}{2T} c^2 \cos \theta \right) = - \frac{K_{sr}}{h} \frac{\rho A_{sr}}{2T} c^2 \quad (3)$$

ここに、 α は波からサーフェース・ローラーへのエネルギー転換率、 K_{sr} はサーフェース・ローラーの減衰定数である。本論文ではTajima・Madsen¹²⁾に従い、砕波減衰定数 K_b と同一の $K_{sr} = 0.375(0.3 + 2.5s)$ の値を用いる。また、波向角としては各地点の平均波向を使用する。

エネルギー転換率 α については、沿岸流速に関する室内実験および現地観測データに対して $\alpha = 0.25$ または 0.50 の値が適合していた^{7, 8)}。検証データが少ないために確言できないけれども、波形勾配が小さくて巻き波砕波が起こると思われるケースではエネルギー転換率が小さいようである。そこで本論文では、 $H_0/L_0 = 0.005$ の波に対して $\alpha = 0.20$ 、 $H_0/L_0 = 0.08$ の波に対して $\alpha = 0.50$ を当てはめ、その中間の波形勾配に対しては表-1に示すように漸増する値を用いることにした。

渦動粘性係数 ν_t については、Larson・Kraus¹³⁾が提案した次式で算定した。

$$\nu_t = \Lambda u_{\max} H \quad (15)$$

ここに、 $u_{\max}$ は水底における軌道粒子速度の振幅であり、微小振幅波理論により $u_{\max} = \pi H / (T \sinh kh)$ で計算される。波高としては H_{rms} 、周期としてはスペクトルピーク周期 T_p を用いる。また Λ は定数であり、今回は海底勾配が急な場合には小さく、緩やかな場合には大きく設定した。具体的には $s = 1/10$ では $\Lambda = 0.05$ 、 $s = 1/20$ では $\Lambda = 0.27$ 、 $s = 1/30$ では $\Lambda = 0.40$ 、 $s = 1/50$ では $\Lambda = 0.50$ 、 $s = 1/100$ では $\Lambda = 0.60$ とした。

底面摩擦項はLonguet-Higginsによる線形解¹⁾に基づき、摩擦係数としては $C_f = 0.01$ の値を用いた。

4. 波寄せ高の計算図表

今回の計算ケースのうち、まず入射角 0° の結果を整理した。初期水深 $h = 0$ の汀線における平均水面の上昇量、すなわち波寄せ高を ξ で表すと、これは沖波波高に比例し、その相対値 ξ/H_0 は波形勾配が小さいほど、また海底勾配が急なほど大きくなる。そこで、入射角 0° のときの相対波寄せ高を式(4)の関数形で表示した。

$$\frac{\xi_{\theta=0}}{H_0} = A_s + B_s \ln H_0/L_0 + C_s (\ln H_0/L_0)^2 \quad (4)$$

ここに、 A_s 、 B_s 、および C_s は経験的定数である。数値計算で得られた $\xi_{\theta=0}/H_0$ のデータに対して最小2乗法を当てはめ、海底勾配 s の関数として次の結果を得た。

$$\left. \begin{aligned} A_s &= 0.0063 + 0.768 s \\ B_s &= -0.0083 - 0.011 s \\ C_s &= 0.00372 + 0.0148 s \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式(4)、(5)による相対波寄せ高の推定値を、数値計算に用いる元データと比較した結果が図-1であり、推定式は数値計算データをほぼ的確に表現している。

なお図-1の結果は、以前に著者が提示した波寄せ高の算定図表(合田,1975)と比べると、波形勾配の小さな範囲で高めの値、波形勾配の小さな範囲で低めの値となっている。前者についてはサーフェース・ローラーの影響であり、後者については方向スペクトルの方向分散の影響と考えられる。

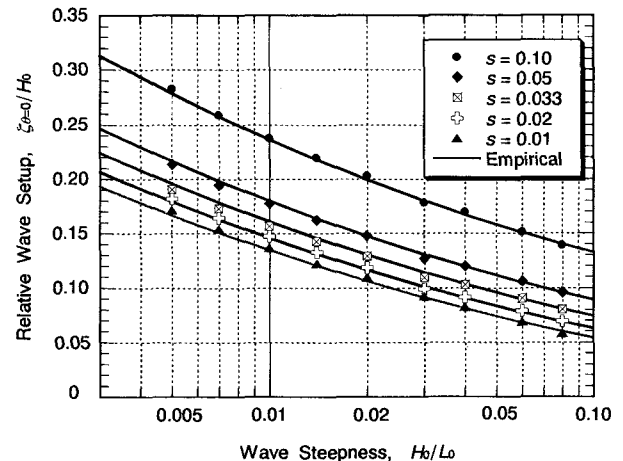


図-1 垂直入射時の汀線における相対波寄せ高の数値計算結果と推定値の比較

波が斜めから入射するときには、垂直入射時よりも波寄せ高が低くなる。入射角による波寄せ高の減少の度合いは海底勾配の影響をあまり受けなため、入射角と波形勾配の関数として次のような経験式で表現した。

$$\xi = \xi_{\theta=0} (\cos \theta_0)^{0.545 + 0.038 \ln H_0/L_0} \quad (6)$$

波寄せ高に関しては、茨城県波崎海岸の海洋観測施設における現地観測データが発表されている^{14), 15)}。1987年の約1年間にわたる汀線近傍の平均水位から水位上昇量、すなわち波寄せ高を解析したもので、波寄せ高の解析結果はばらつきが大きいものの、加藤ほか¹⁴⁾と柳嶋ほか¹⁵⁾は重回帰分析の結果として式(7)の評価式を提示した。

$$\xi/H_0 = 0.052(H_0/L_0)^{-0.2} \quad (7)$$

波崎海岸の平均的海底勾配 $s = 1/60$ に対して、今回の波寄せ高の推定式を用いて相対波寄せ高を計算し、式(7)の観測平均値と比較したのが図-2である。計算では波向を $\theta_0 = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ および 45° の4通りに変えたが、入射角の増加による波寄せ高の減少は10%前後である。

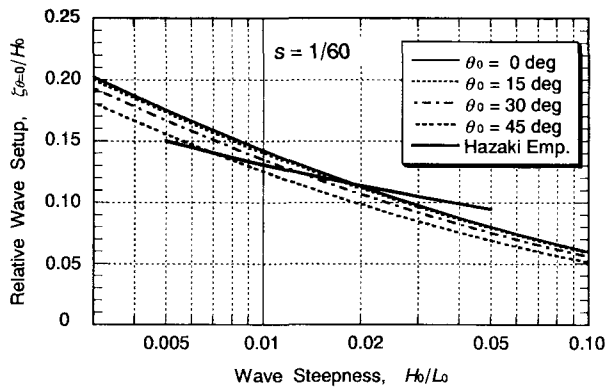


図-2 波崎海岸における波寄せ高の観測値の平均曲線と推定値の比較

波崎海岸での観測データに基づく評価式に比べて、今回の推定式は波形勾配への依存性が強い。このため波形勾配が小さい範囲では観測データの傾向よりも高め、波形勾配の大きな範囲では低めの値を算出する。しかしながら、実務上で要求される波寄せ高の精度を勘案すると、この程度の差異は許容範囲内にあるといえよう。特に今回は、波寄せ高の推定式に波向の影響も取り込んでいるのが特長であり、利用範囲が広いと思われる。

5. 沿岸流速の岸沖分布のモデル化

(1) 沿岸流速岸沖分布へのワイブル分布の適用

不規則波による沿岸流速の岸沖分布に対し、先に Goda・Watanabe¹⁶⁾が3母数ワイブル分布を当てはめた。これは、初期水深0の汀線位置においても有限な流速値を示すことが多かったためである。しかし、今回のモデルによる計算では、汀線位置で沿岸流速が0となる境界条件を設定したため、式(8)の2母数型ワイブル分布を当てはめることとした。

$$V = V_0(z/a)^{k-1} \exp[-(z/a)^k] \quad : \quad z = h/H_0 \quad (8)$$

ここに、 V_0 は速度の次元を持つ基準流速、 a は尺度母数、 k は形状母数である。 a と k は無次元量である。

式(8)のワイブル分布は、形状母数が $k > 1$ であれば $z > 0$ において一つの極大値を持ち、その位置は式(9)で与えられる。

$$z_{\text{mod}} = a(1 - 1/k)^{1/k} \quad (9)$$

またワイブル分布の最大値は式(10)で求められる。

$$V_{\text{max}} = V_0(1 - 1/k)^{1-1/k} \exp[-(1 - 1/k)] \quad (10)$$

一方、ワイブル分布の重心位置は次のように求められる。

$$\bar{z} = \frac{\int_0^\infty V(z)z \, dz}{\int_0^\infty V(z) \, dz} = a \Gamma(1 + 1/k) \quad (11)$$

ここに、 Γ はガンマ関数である。

(2) ワイブル分布の母数および基準流速の推定式

数値計算で得られた沿岸流速の岸沖分布から、極大値の位置 z_{mod} と重心位置 $\bar{z}$ を求め、それを式(9)、(10)と比較することによって、形状母数 k と尺度母数 a の推定値を得ることができる。各種条件の計算ケースについて両母数の推定値を求め、それに対して重回帰分析によってそれぞれに対する推定式を導いた。

形状母数に対する推定式は次の通りである。

$$k = [A_k + B_k \ln H_0/L_0](\cos \theta_0)^{r_k} \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} A_k &= -0.9017 - 1.9486 \ln s - 0.3783 (\ln s)^2 \\ B_k &= -0.6884 - 0.5869 \ln s - 0.1246 (\ln s)^2 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$$r_k = 0.326 + 0.218 \ln s + 0.0446 (\ln s)^2 \quad (14)$$

式(12)、(13)で推定した $\theta_0 = 0^\circ$ のときの形状母数の推定値 $(k_{\theta=0})_{\text{est}}$ の値を図示したのが図-3である。ここでは数値計算の範囲($H_0/L_0 = 0.005 \sim 0.08$)を超えた部分についての推定値も示している。

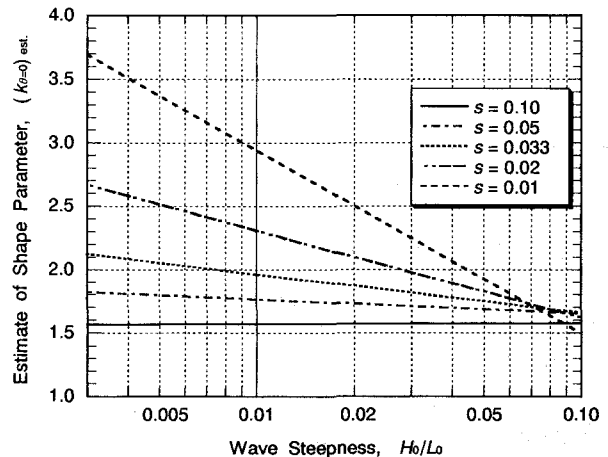


図-3 垂直入射時の形状母数の推定値 $(k_{\theta=0})_{\text{est}}$

尺度母数に対する推定式は次の通りである。

$$a = [A_a + B_a \ln H_0/L_0 + C_a (\ln H_0/L_0)^2] (\cos \theta_0)^{r_a} \quad (15)$$

$$\left. \begin{aligned} A_a &= 3.148 + 1.855 \ln s + 0.3631 (\ln s)^2 \\ B_a &= 1.766 + 1.122 \ln s + 0.1929 (\ln s)^2 \\ C_a &= 0.2211 + 0.1194 \ln s + 0.02019 (\ln s)^2 \\ r_a &= -0.751 - 0.327 \ln H_0/L_0 - 0.0228 (\ln H_0/L_0)^2 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

式(15),(16)で推定した $\theta_0=0^\circ$ のときの尺度母数の推定値($a_{\theta=0}$)_{est.}の値を図-4に示す。

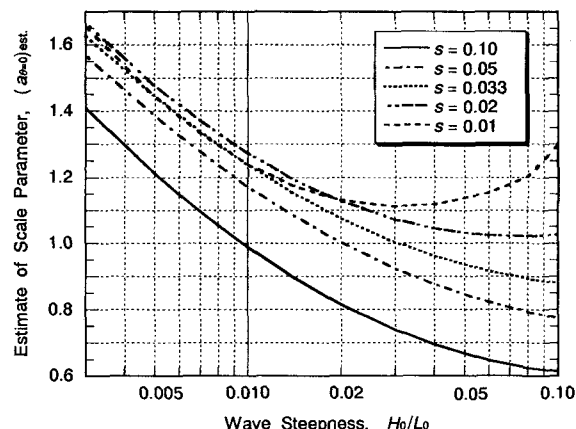


図-4 垂直入射時の尺度母数の推定値($a_{\theta=0}$)_{est.}

基準流速 V_0 については、まず数値計算で得られた最大流速を $V_{\max} = c_{\max} V_c$ のように名目流速 V_c と最大流速係数 $c_{\max}$ の積の形で表現した。そして、式(10)の逆関数として、式(17)で算定することとした。

$$\left. \begin{aligned} V_0 &= c_{\max} V_c (1 - 1/k)^{-(1-1/k)} \exp[1 - 1/k] \\ V_c &= \frac{s \sqrt{g H_0}}{C_f} \sin \theta_0 \cos(0.8 \theta_0) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

そして、最大流速係数 $c_{\max}$ に対して、次のような推定式を導いた。

$$c_{\max} = A_c + B_c \ln H_0/L_0 + C_c (\ln H_0/L_0)^2 \quad (18)$$

$$\left. \begin{aligned} A_c &= 0.8642 + 0.3141 \ln s + 0.02741 (\ln s)^2 \\ B_c &= 0.3292 + 0.1616 \ln s + 0.001616 (\ln s)^2 \\ C_c &= 0.03281 + 0.01856 \ln s + 0.00202 (\ln s)^2 \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

式(18),(19)の推定式を用いて求めた最大流速係数 $c_{\max}$ を図-5に示す。最大流速係数は、海底勾配1/10のケースおよび波形勾配0.06以上の場合を除けば、 $c_{\max} = 0.07 \sim 0.16$ の範囲にある。海底摩擦係数として $C_f = 0.01$ の値を与えると、沿岸流速の最大値の略算式を式(20)のように表すことができる。

$$V_{\max} \cong (7 - 16) s \sqrt{g H_0} \sin \theta_0 \cos(0.8 \theta_0) \quad (20)$$

この略算式は、以前にアメリカ陸軍工兵隊の海岸工学研究センター¹⁷⁾が提示した式(21)と関数形が同じである。ただし、後者が碎波点における波高と波向角を使用するのに対し、今回の式(20)は沖波の波高と入射角を入力するため、流速の値を直接に比較することがむずかしい。しかし、オーダー的には同等の結果を与えるものと推測される。

$$V = 20.7 s \sqrt{g H_b} \sin 2 \theta_b \quad (21)$$

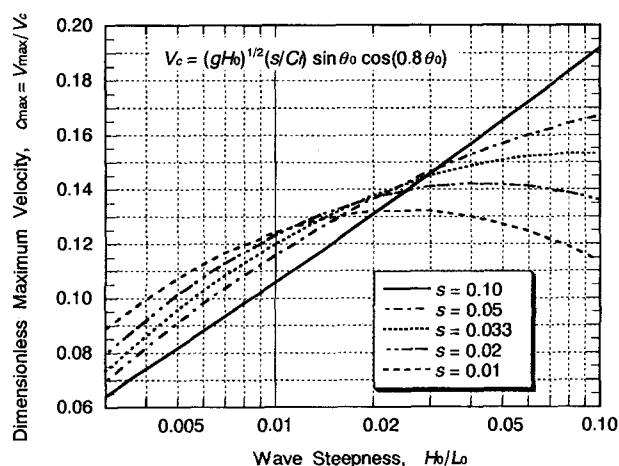


図-5 最大流速係数 $c_{\max} = V_{\max}/V_c$ の推定値

(3) 沿岸流速の推定値と数値計算結果および現地観測値との比較

これまでに紹介した諸推定式を用いて沿岸流速の岸沖分布を求め、数値計算による結果と比較した一例を図-6に示す。数値計算では沖波波高を $H_0 = 2.0\text{m}$ に固定していたけれども、波高を1.0mおよび4.0mに変えて波高の絶対値の影響を比較したものである。若干の差異はあるものの、推定曲線は数値計算値をほぼ再現している。

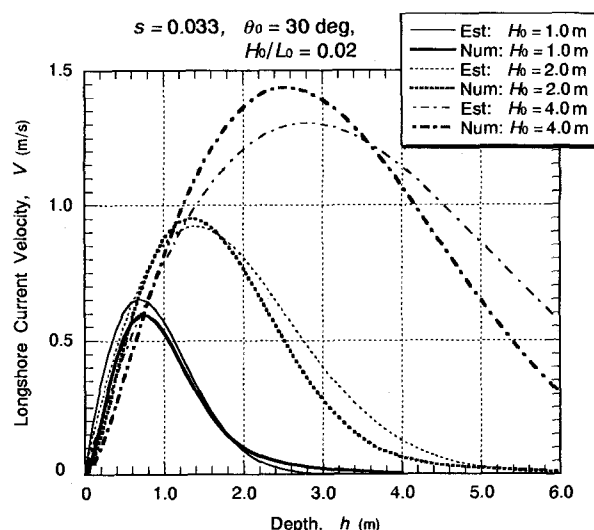


図-6 波高を変えた場合の沿岸流速の数値計算と推定値の比較 ($s=1/30, H_0/L_0=0.02, \theta_0=30^\circ$)

次に、ほぼ一様な海浜における沿岸流速の数少ない観測事例である、米国カリフォルニアの Leadbetter Beach のデータ²⁾について比較した一例が図-7である。

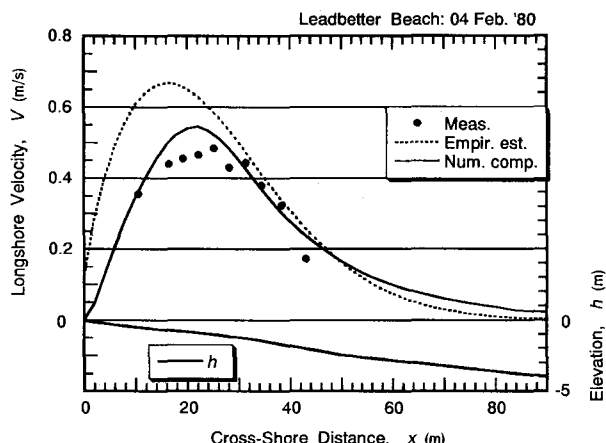


図-7 Leadbetter Beach における沿岸流速の観測値、数値計算値、および経験式による推定値の比較 ($s=0.038$, $H_0=0.794\text{m}$, $T_p=14.3\text{s}$, $\theta_0=49.2^\circ$, $\gamma=7$, $s_{\max}=200$)

数値計算⁸⁾では波高の観測値に整合させるために、段階的碎波係数の定数を $C_b=0.06$ に低減させて計算した。これによって波高および沿岸流速の岸沖変化が観測値と良く一致する結果が得られた。今回の推定式の誘導では統一値として $C_b=0.07$ を用いたこともあって、推定式で求めた沿岸流速の岸沖分布は観測値および数値計算値よりも岸側にずれており、また最大流速も過大である。

もっとも、波浪によって励起される沿岸流の現象は僅かの条件の変化によって流速が大幅に変動し、それを的確に予測することは容易ではない。図-7の結果は、定量的には食い違うものの、少なくともオーダー的には合致しているといえる。したがって、現地における沿岸流速の概略推定用としては有効と考えられる。

5. むすび

方向スペクトル波浪による碎波帯内の諸現象を把握するには、多方向不規則波の碎波変形を適切に算定することが不可欠である。本論文は著者の PEGGIS モデルによる結果を提示したもので、他の碎波変形モデルを用いれば異なる沿岸流速が得られるであろう。なお、今回提示した重回帰分析による諸推定式は、係数の僅かの違いによって結果がかなり異なってくる。本論文に掲載した図表と見比べて、推定式を確認して使用されることをお勧めする。

なお、文献¹⁸⁾にはスペクトルピークの増幅率、方向集中度パラメータ、サーフェース・ローラーへのエネルギー転換率、渦動粘性係数の定数などの影響に関する感度分析も記載したので、併せて参照していただければ幸いである。

参考文献

- 1) Longuet-Higgins, M.S.: Longshore current generated by obliquely incident sea waves, 1 & 2, *J. Geophys. Res.*, 75 (33), pp.6779-6801, 1970.
- 2) Thornton, E.B. and Guza, R.T.: Surf zone longshore currents and random waves: Field data and models, *J. Phys. Oceanogr.*, 16, pp. 1165-1178, 1986.
- 3) 合田良実・渡辺則行：沿岸流速公式への不規則波モデルの導入について，*海岸工学論文集*，37，pp.210-214, 1990.
- 4) 合田良実：段階的碎波係数を用いた不規則波浪変形計算モデルの改良，*海洋開発論文集*，19，pp.141-146, 2003.
- 5) 合田良実：不規則波浪変形計算における段階的碎波係数の導入について (Ver. 5)，*ECOH/YG 技術論文 No. 2*，2004年5月19日，18p., 2004.
- 6) Goda, Y.: A 2-D random wave transformation model with gradational breaker index, *Coastal Engineering Journal*, 46 (1), pp. 1-38, 2004.
- 7) 合田良実：不規則波による沿岸流速に及ぼす碎波モデル選択の影響，*海洋開発論文集*，20，pp.785-790, 2004.
- 8) 合田良実：不規則による沿岸流速に及ぼす諸要因の影響の検討 (Ver. 4)，*ECOH/YG 技術論文 No. 4*，2004年8月4日，24p., 2004.
- 9) 平口博丸・丸山康樹：斜め入射波に対する放物型方程式の適用性の拡張，第33回海岸工学講演会論文集，pp.114-118, 1986.
- 10) Tajima, Y. and Madsen, O.S.: Shoaling, breaking and broken wave characteristics, *Coastal Engineering 2002, Proc. 28th Int. Conf.*, Cardiff, Wales, World Scientific, pp. 222-234, 2002.
- 11) Svendsen, I.A.: Wave heights and set-up in a surf zone, *Coastal Engineering*, 8, pp.303-329, 1984.
- 12) Tajima, Y. and Madsen, O.S.: Modeling near-shore waves and surface roller, *Proc. 2nd Int. Conf. Asian and Pacific Coasts (APAC 2003)*, Makuhari, Chiba, Japan, Paper No. 28 in CD-ROM, 12p., 2003.
- 13) Larson, M. and Kraus, N.C.: Numerical model of longshore current for bar and trough beaches, *J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Eng.*, ASCE, 117 (4), pp.326-347, 1991.
- 14) 加藤一正・柳嶋慎一・磯上知良・村上裕幸：波による汀線付近の水位上昇量－波崎海洋観測施設における現地観測－，*港湾技術研究所報告*，28(1)，pp.3-41, 1989.
- 15) 柳嶋慎一・加藤一正・磯上知良・村上裕幸：波による汀線付近の水位上昇量に関する現地調査－水位上昇を生じる二次的要因－，*海岸工学論文集*，36，pp.80-84, 1989.
- 16) Goda, Y. and Watanabe, Y.: A longshore current formula for random breaking waves, *Coastal Engineering in Japan*, JSCE, 34 (2), pp.159-175, 1991.
- 17) CERC: *Shore Protection Manual* (3rd edition), U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Eng. Res. Center, p.4-48, 1977.
- 18) 合田良実：方向スペクトル波浪による波寄せ高 (wave setup) と沿岸流速の計算図表，*ECOH/YG 技術論文 No.5*，2005年3月，17p. (URL <http://www.ecoh.co.jp> の顧問の頁に掲載)