

不規則波による沿岸流速に及ぼす 砕波モデル選択の影響

INFLUENCE OF RANDOM WAVE BREAKING MODELS ON LONGSHORE CURRENT VELOCITY PROFILE

合田良実
Yoshimi GODA

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)

Various factors affecting the velocities of longshore currents induced by obliquely incident random waves are examined through numerical calculation and literature review. Several models of the random breaking process are used for mutual comparison. These models produce some differences in the estimate of wave height decay in the surf zone, and the differences cause large changes in the longshore velocities. Efficiency of horizontal mixing also depends on the wave breaking model employed. The eddy viscosity formulation by Larson and Kraus (1991) is found better suited to random waves than those by Longuet-Higgins (1970) and Battjes (1975). Introduction of surface rollers in numerical models is necessary in shifting the longshore current profile toward the shoreline and brings forth appreciable strength of longshore currents at the trough of a barred beach. Compared to significant consequence of the selection of wave breaking models, eddy viscosity, and surface roller strength, a question of linear or nonlinear formulation of shear stress along the seabed seems trivial.

Key Words : *random waves, wave breaking model, longshore currents, 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、海浜変形を適切に予測するためには沿岸流速の岸沖分布を的確に計算することが不可欠である。沿岸流はまた、遊泳者に危険をもたらす離岸流の供給源であり、沖波の情報から沿岸流ひいては離岸流を予測することが要望されている。

沿岸流の本格的な研究の進展は Longuet-Higgins¹⁾ がラディエーション応力の概念を導入した理論を発表したときに始まる。この理論は規則波を対象としたもので、その後の多くの研究も規則波の理論や実験に基づいていた。不規則波によって励起される沿岸流を最初に計算したのは Battjes²⁾ である。ただし、この研究は学位論文として提出されたのみで、学術誌あるいは国際会議等では発表されなかった。

不規則波による沿岸流を計算して現地海岸における沿岸流速の岸沖分布と比較したのは Thornton・Guza³⁾ が最初である。この計算では同じ著者による 1983 年の不規則砕波変形モデル⁴⁾ を用いた。一方、合田・渡辺⁵⁾ は合田⁶⁾ の砕波変形モデルを用いて沿岸流速を計算し、一様傾斜海浜における沿岸流速算定

の経験式を導いた。このモデルは Thornton・Guza³⁾ の観測結果とある程度一致したものの、彼らの計算値とは若干異なる場所があった。沿岸流速の計算値がこうした不規則砕波変形モデルによって異なることを明らかにし、砕波モデルの選定を適正に行う必要性を例示することが本論文の第 1 の目的である。また、渦動粘性係数の取り扱い、底面摩擦項の線形解と非線形解の選択、さらに Surface roller (SR と略記) の沿岸流計算への取り込みなど、不明確な点が多い。これらについて系統的な数値計算を行って何らかの指針を得ることを第 2 の目的とする。

2. 一様傾斜海岸における砕波変形特性

(1) 比較検討の対象とする不規則砕波変形モデル

不規則波の砕波変形についてはこれまでに多くのモデルが発表されている。本論文では表-1 に掲載する 7 種類のモデルを対象とする。合田⁷⁾ 5 モデル⁶⁾ を含め、それ以前の 3 モデルは波高の確率密度関数 (pdf) を砕波限界でカットする方式である。次には、Battjes・Janssen⁷⁾ による跳水ボアのエネルギー減衰を援用した 2 モデルがある。さらに、砕波後の再生

波のエネルギーとの差に比例する速度でエネルギーを取り上げる。以上の諸モデルの特徴を一覧表で示したのが表-1である。

表-1 主要碎波モデルの特徴

モデルの提案者	エネルギー減衰方式	碎波した波の確率密度	碎波限界の設定要因					波スペクトル
			水深	周期	勾配	変動幅	Setup	
Battjes '72 ⁸⁾	波高pdfの変形	碎波点に集中	○	○	×	×	○	×
Kuo・Kuo '74 ⁹⁾	同 上	除去し、非碎波を嵩上げ	○	×	×	×	×	×
Goda '75 ⁶⁾	同 上	同 上	○	○	○	○	○	×
Battjes・Janssen '78 ⁷⁾	Boreモデル	碎波点に集中	○	○	×	×	○	×
Thornton・Guza '83 ³⁾	同 上	重み関数で指定	○	×	×	×	×	×
Larson・Kraus '91 ¹⁰⁾	Dally型モデル	碎波点に集中	○	×	×	×	○	×
Goda '04 ¹¹⁾	同 上	除去し、非碎波を嵩上げ	○	○	○	○	△	○

いずれのモデルも碎波限界を水深で規定しているものの、波の周期や海底勾配の影響の取り込み、碎波限界の変動幅の考慮、wave setupによる水深補正の有無などの諸点で相違している。海底勾配によって碎波限界を変えているのは合田の二つのモデルである。また、波浪スペクトルを取り込んだ合田'04モデル¹¹⁾以外はいずれも単一の代表周期を用いている。なお、合田'04モデルは碎波後のDally型減衰の定数を0.125と一定値に設定している。しかし本論文ではTajima・Madsen¹²⁾を参照し、関数形は異なるけれども、次のように水底勾配*s*によって変化させている。すなわち、修正合田モデルである。

$$K_b = \frac{3}{8}(0.3 + 2.5s) \tag{1}$$

(2) 碎波変形モデルの相互比較

上記の各種モデルを比較するため、表-2の条件で、一様傾斜海岸における波高変化を計算した。

表-2 碎波変形の比較計算の条件

項 目	数 値
沖波波高	($H_{1/3}$) ₀ = 2.0 m
波周期	$T = T_{1/3} = 8.004$ s ($L_0 = 100$ m)
沖入射角	$\theta_0 = 30^\circ$
水底勾配	$s = 0.10, 0.05, 0.02, 0.01$

このうち、水底勾配 $s = 0.05$ と 0.01 の場合の H_{rms} の計算結果を図-1、2に示す。碎波モデルのうち、Battjes '72とKuo・Kuo '74は水底勾配に関係ないので、両図とも波高値は共通である。ボアモデルとDally型モデルでは、碎波限界を水底勾配に関わりなく設定していても、碎波後の減衰距離が水底勾配に依存するため、急勾配斜面では減衰が遅く、波高が大きく計算される。

図から明らかなように、Battjes '72モデルは各種モデルのほぼ上限を与え、Kuo・Kuo '74モデルはほぼ下限値を与える。しかし、Thornton・Guza '83モデルは早くから碎波減衰が始まり、水底勾配 $s = 0.01$ ではKuo・Kuo '74モデルよりも波高が小さくなる。

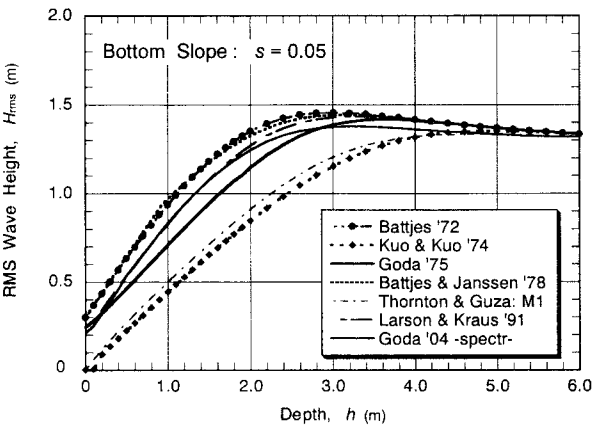


図-1 各種碎波変形モデルによる H_{rms} の計算結果 (水底勾配 $s = 0.05$)

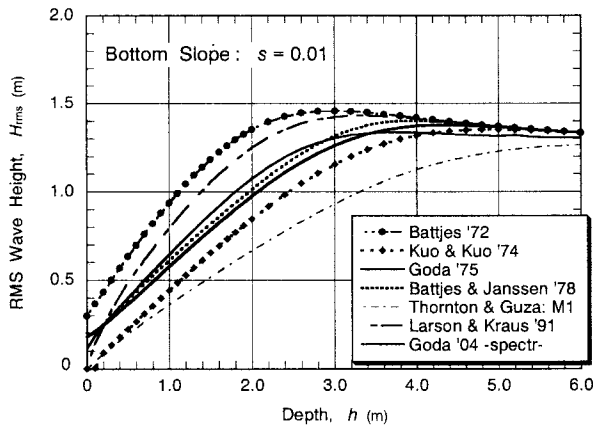


図-2 各種碎波変形モデルによる H_{rms} の計算結果 (水底勾配 $s = 0.01$)

3. 一様傾斜海岸における沿岸流速の比較

(1) 沿岸流速計算の基本式

沿岸流速 V は radiation stress, S_{xy} , の岸沖勾配と底面摩擦力 F_y の平衡条件で定まり、渦動粘性による水平拡散によって平滑化される。さらに、碎波の初期において失われるエネルギーの一部が surface

roller (SR) に転換され、その運動エネルギーの輸送によって沿岸流速の岸沖分布が岸側へある程度移動させられる。この SR を考慮したときの沿岸流速の計算式¹³⁾は次のように表すことができる。

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

ここに、 x は岸向きを正とする座標、 E_{sr} は SR の運動エネルギー、 θ は波向、 ρ は水の密度、 v_t は渦動粘性係数、 h は wave setup を考慮しない水深である。

(2) 渦動粘性係数の選択

水平拡散項を支配する渦動粘性係数に関しては Longuet-Higgins¹⁾ が汀線からの距離と波速の積に比例させることを提案した。しかし、不規則波のように碎波が広い範囲で徐々に起こる場合には、合田・渡辺⁵⁾ が例示したように、沿岸流が碎波帯の沖の広い範囲まで広がってしまうので不適当である。これに代わるものとして、Battjes¹⁴⁾ は単位面積あたりのエネルギー減衰率 D を用いる次式を提案した。

$$v_t = M h (D / \rho)^{1/3} \quad (3)$$

ここに、 M は 1 のオーダーの定数である。

一方、Larson・Kraus¹⁵⁾ は代表速度として底面の水粒子水平速度 u_m 、代表長として波高 H を用いる式 (4) を提案した。深海域で 0 となる特長がある。

$$v_t = \Lambda u_m H \quad (4)$$

ここに、 Λ は値が 0.3~0.5 程度の定数とされている。

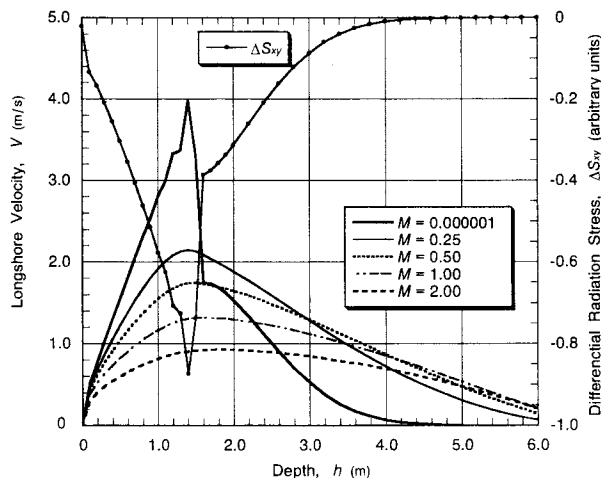


図-3 Battjes・Janssen '78モデルにおける渦動粘性係数の定数 M による沿岸流速の変化 ($s=0.10$)

水底勾配 1/10 の一様傾斜海岸について、SR を考慮しない場合の沿岸流を Battjes・Janssen '78 モデルで計算した結果が図-3, 4 である。前者は式 (3)、後者は式 (4) の渦動粘性係数を用いた場合である。図の右縦軸は計算格子間の radiation stress, S_{xy} , の差分に対応している。

このモデルでは、ある水深以下で H_{rms} が碎波限界波高 H_b を超える場合に、 $H_{rms} = H_b$ の制限を設けている。このため、波高変化曲線に突角が生じ、そこで S_{xy} が急増する。図-3 (水平拡散項を無視) における水深約 1.5 m での沿岸流速の急変は、こうした波高変化の急変に対応している。水底勾配 $s=0.05$ の図-1 でも予細に見ると、水深 0.92 m の地点で波高変化曲線に突角が生じている。

渦動粘性係数の定数 M を大きくするにつれて、沿岸流速の急変は避けられるけれども、沿岸流が沖へ広がり、流速のピーク値も顕著に減少する。

渦動粘性係数として式 (4) を用いた図-4 では沿岸流の沖側への広がりが最小に抑えられ、ピーク値の減少があまり著しくない。したがって、渦動粘性係数は Battjes¹⁴⁾ の式 (3) よりも Larson・Kraus¹⁵⁾ による式 (4) を用いて算定するのが適切である。

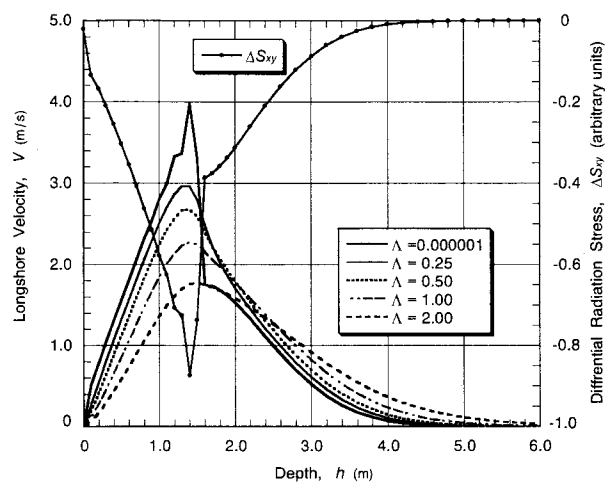


図-4 Battjes・Janssen '78モデルにおける渦動粘性係数の定数 Λ による沿岸流速の変化 ($s=0.10$)

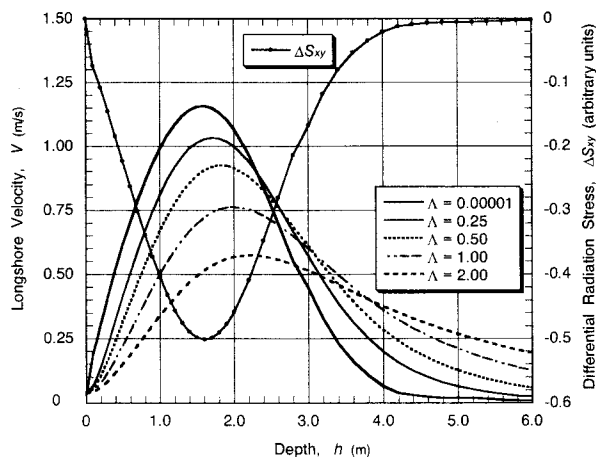


図-5 修正合田モデルにおける渦動粘性係数の Λ による沿岸流速の変化 ($s=0.05$)

しかしながら、水平拡散項の効き方は使用する碎波変形モデルによって異なる。修正合田モデルの場合には、図-5 に示すように、定数 Λ を大きくするにつれて沿岸流が沖側へ広がる傾向が強い。したがっ

て、使用する碎波変形モデルについてあらかじめ水平拡散項の効き方を吟味し、定数 Λ として適切な値を選定することが必要であろう。

(3) SRを考慮しない場合の一樣傾斜海岸における沿岸流速の岸沖分布の比較

表-1に示した7種類の碎波変形モデルに基づいて沿岸流速を計算した結果のうち、水底勾配が $s=0.10$ と 0.02 の場合を図-6, 7に示す。渦動粘性係数は修正合田モデルが $\Lambda=0.1E-6$ で、他はすべて $\Lambda=0.25$ に設定した。底面摩擦力は線形近似による次式で $C_f=0.010$ として計算した。

$$\bar{F}_y = \frac{2}{\pi} \rho C_f u_{\max} V \quad (5)$$

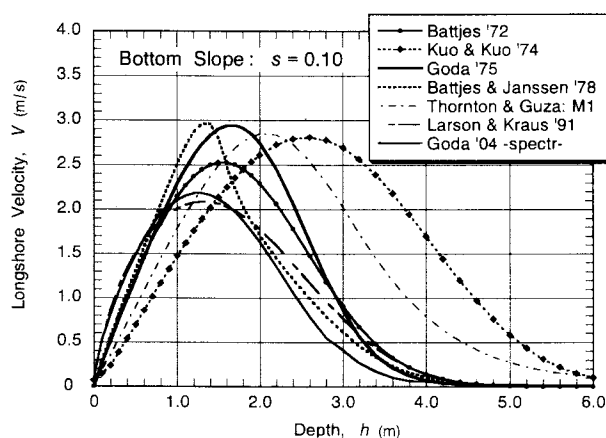


図-6 各種碎波変形モデルによる沿岸流速の計算結果 (水底勾配 $s=0.10$)

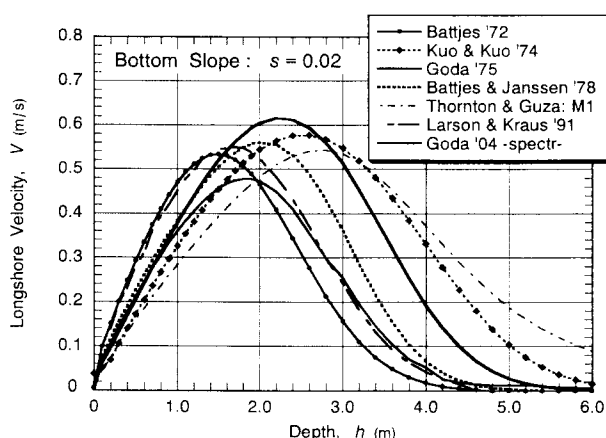


図-7 各種碎波変形モデルによる沿岸流速の計算結果 (水底勾配 $s=0.02$)

沿岸流速は水底勾配にほぼ比例するため、図-6は図-7の約5倍の流速となっている。この両図から明らかなように、使用する碎波変形モデルによって、沿岸流速の岸沖分布はその形状、ピークの位置、流速の絶対値など大きく異なる。水底勾配 $s=0.02$ の図-7はモデル間の差が比較的小さいとはいえ、無視できるようなものではない。

これらの差異は、すべて碎波減衰の様相がモデルによって異なるために生じるものである。碎波変形の場合には波高の絶対値が対象であり、実験値あるいは現地観測値と比較する際には、若干の差異は無視して計算モデルがほぼ検証されたと結論づけることが多い。しかし、沿岸流速はradiation stressの勾配、すなわち波高の2乗の差分に比例するため、波高変化のわずかの差によって大きく異なる結果を生むのである。

沿岸流速が碎波変形モデルによってこのように大幅に異なるのであれば、底面摩擦力を非線形解で求める必要性が希薄になる。Thornton・Guza³⁾は沿岸流速の現地観測値に理論を当てはめた際、非線形解であれば $C_f=0.006$ が最適であったけれども、摩擦係数を大きくした $C_f=0.009$ の線形解でも観測値に適合したと述べている。また、Larson・Kraus¹⁰⁾は数値計算による比較検討で、摩擦係数を大きめにとることで線形解も利用してよいと結論している。

底面摩擦項は流速の絶対値を支配するけれども、沿岸流速の岸沖分布の形状を変える機能は小さい。したがって、不規則波の碎波変形モデルによって沿岸流の計算結果が大きく変わる現状では、底面摩擦力は線形解を用い、摩擦係数の値を実験・観測値によく適合するように定めるのが適切と考えられる。

(4) SRを考慮した沿岸流速の計算

沿岸流速の計算にSRを考慮する場合には、まずその運動エネルギー $E_{sr} = \rho A_{sr} c / T$ の岸沖分布を求めなければならない。ここに、 c は波速、 T は波の周期、 A_{sr} はSRの面積である。碎波によって失われるエネルギーフラックスがSRに転換されるプロセスはDally・Brown¹⁵⁾が計算式を提示し、Tajima・Madsen¹³⁾はSRへのエネルギー転換率 α を導入する修正を提案した。それによれば、 A_{sr} は碎波帯の外における0の値を境界条件として、次式を差分式に変換して沖から岸へ逐次解くことで求められる。

$$\alpha \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{8} \rho g H^2 c_g \cos \theta \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho A_{sr}}{2T} c^2 \cos \theta \right) = - \frac{K_{sr}}{h} \frac{\rho A_{sr}}{2T} c^2 \quad (6)$$

ここに K_{sr} はSRエネルギーの減衰定数であり、本論文では式(1)の K_b に等しく設定している。

実際に水底勾配 $s=0.05$ の一樣斜面における沿岸流速を計算したのが図-8である。碎波変形は修正合田モデルで計算している。波は表-2の条件で、渦動粘性係数の定数は $\Lambda=0.25$ を用いた。図から明らかなように、SRへのエネルギー転換率 α を0から0.5に高めるにつれて沿岸流速のピークが岸側へ移動するとともに、ピーク値が大きくなる。この計算例からみる限り、 α を0.5以上に高めることは、沿岸流速の分布を極端にひずめることになり、あまり適当とは思われない。Tajima・Madsen¹³⁾が提唱した $\alpha=0.5$ の値をその意味で妥当と思われる。

また、この計算で同時に求められたwave setupを

表示したのが図-9である。SR へのエネルギー転換率が高まるにつれて、wave setdown の範囲が水深の小さな地点まで広がり、wave setup はより狭い範囲に限定されるために、その勾配が大きくなり、結果として汀線における水位上昇量が高くなることが分かる。

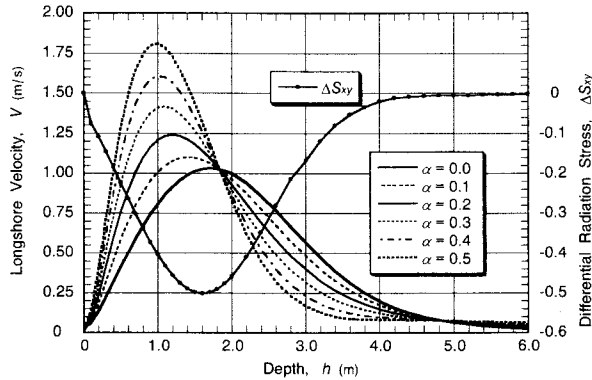


図-8 修正合田モデルにおけるSRのエネルギー転換率 α による沿岸流速の変化 ($s=0.05$)

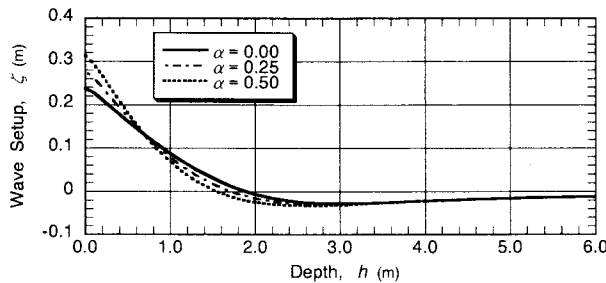


図-9 修正合田モデルにおけるSRのエネルギー転換率 α による wave setup の相違 ($s=0.05$)

4. 水理模型実験による沿岸流速と修正合田モデルの計算値との比較

沿岸流速の計算値は碎波モデルによって大きく異なるが、渦動粘性係数の定数 Λ , SR へのエネルギー変換率 α , および底面摩擦係数 C_f の最適値を選ぶことによって、実験・観測値にかなり適合する計算結果を得ることができる。ここでは修正合田モデルを対象として、沿岸流速に関する検証を試みる。

図-10は米国陸軍工兵隊のLSTF(大型漂砂実験水槽)で水底勾配1/30の様なコンクリート斜面での実験値¹⁶⁾と計算値の比較である。図の上半に示す波高は計算値がやや小さいけれども、適合度は悪くない。沿岸流速はSRを考慮することによって、計算値が実験値と合致するようになる。

次の図-10はデルフト工科大学でコンクリート床のバー型海浜の実験値¹⁷⁾との比較である。波高、沿岸流速とも計算値は実験結果とよく適合している。ただし、流速の絶対値を合わせるために底面摩擦係数を $C_f=0.025$ と過大に設定しており、実験状況と異なることが難点である。

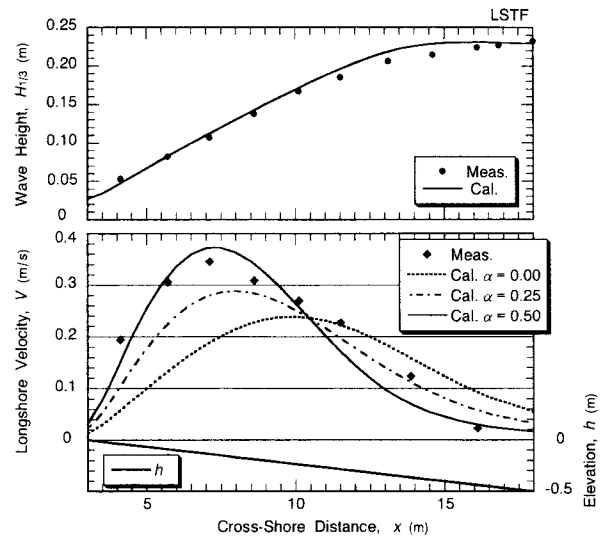


図-10 LSTFの実験値¹⁶⁾と修正合田モデルとの比較 ($H_{1/3}=0.23\text{m}$, $T_p=2.5\text{s}$, $\theta_0=10^\circ$; $\Lambda=0.05$, $C_f=0.007$)

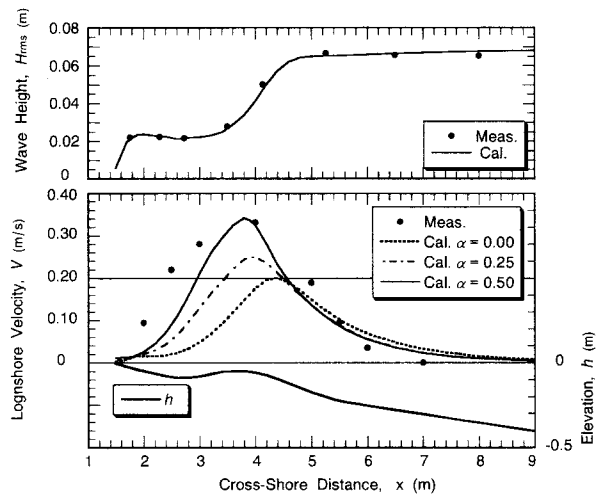


図-11 Reniers・Battjesの実験値¹⁷⁾と修正合田モデルとの比較 ($H_{rms}=0.07\text{m}$, $T_p=1.2\text{s}$, $\theta_0=30^\circ$)

5. 現地観測による沿岸流速と修正合田モデルの計算値との比較

沿岸流速の現地観測値としては、独立行政法人港湾空港技術研究所が茨城県波崎海岸に所有する研究栈橋(HORS)で観測した1989年3月28日のデータ¹⁸⁾、ならびに米国陸軍工兵隊のDuck海岸の研究栈橋で行われたSandyDuckプロジェクトの1998年2月4日のデータを使用する。前者については図-12、後者については図-13に観測値と計算値の比較を示す。

HORSに関しては、計算値が碎波帯内の波高を過大に評価しているものの、沿岸流速はSRへのエネルギー転換率を $\alpha=0.5$ とすることで観測値の岸沖変化の傾向をある程度表現できている。ただし、 $x=300\text{m}$ より沖の 0.3m/s 前後の流れは再現できない。

SandyDuckに関しては、波高の計算値がやや大きめであるが、観測値とかなりよく合っている。沿岸流については碎波帯の前半部分で計算による再現が

良好であるものの、 $x = 350\text{m}$ 付近から岸側では計算結果が観測値の傾向から乖離している。

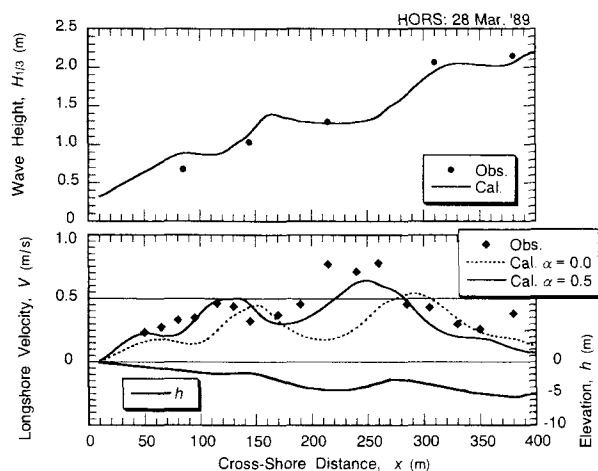


図-12 波崎海岸のHORSにおける観測値¹⁸⁾と修正合田モデルとの比較 ($H_{1/3}=2.1\text{ m}$, $T_{1/3}=8.9\text{ s}$, $\theta_0=25^\circ$; $\Lambda=0.25$, $C_f=0.0075$)

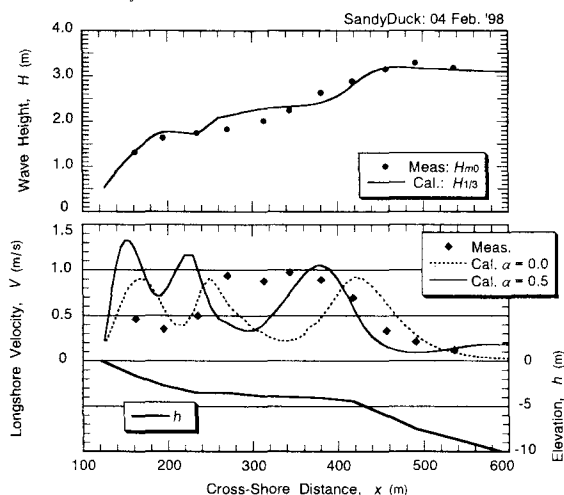


図-13 SandyDuck の観測値と修正合田モデルとの比較 ($H_{1/3}=3.1\text{ m}$, $T_p=10.6\text{ s}$, $\theta_0=29^\circ$; $\Lambda=0.5$, $\alpha=0.5$, $C_f=0.0075$)

このほか Smith et al.¹⁹⁾が再現に成功しなかったプロジェクト DELILAH の観測値についても計算を試みた。しかし、波高は再現できてもトラフにおける流速増大を再現することが難しかった。

6. むすび

沿岸流は波応力の微妙なバランスで決まるため、計算条件が僅かに変わただけで結果が大きく異なる。沿岸流モデルの開発は難しいというのが感想である。

本研究に際しては、独立行政法人港湾空港技術研究所の栗山善昭漂砂研究室長より波崎海岸の観測機橋(HORS)のデータを提供していただき、また文献収集に当たって大変にご助力いただいた。ここに記して謝意を表する次第である。

なお、本研究の詳細については文献²⁰⁾を参照されたい。

参考文献

- Longuet-Higgins, M.S.: Longshore current generated by obliquely incident sea waves, 1 & 2, *J. Geophys. Res.*, **75** (33), 1970, pp.6779-6801.
- Battjes, J.A.: Computation of set-up, longshore currents, run-up and overtopping due to wind-generated waves, *Dept. Civil Eng., Delft Univ. of Tech., Report No. 74-2*, 1974, 244p.
- Thornton, E.B. and Guza, R.T.: Surf zone longshore currents and random waves: Field data and models, *J. Phys. Oceanogr.*, **16**, 1986, pp.1165-1178.
- Thornton, E.B. and Guza, R.T.: Transformation of wave height distribution, *J. Geophys. Res.*, **88** (C10), 1983, pp. 5925-5938.
- 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**, 1991, pp.210-214.
- 合田良実：浅海域における波浪の砕波変形, 港湾技術研究所報告, **14** (3), 1975, pp.59-106.
- Battjes, J.A. and Janssen, J.P.F.M.: Energy loss and set-up due to breaking of random waves, *Proc. 16th Int. Conf. Coastal Eng.*, Hamburg, ASCE, 1978, pp.1-19.
- Battjes, J.A.: Set-up due to irregular waves, *Proc. 13th Int. Conf. Coastal Eng.*, Vancouver, ASCE, 1972, pp. 1993-2004.
- Kuo, C.T. and Kuo, S.T.: Effect of wave breaking on statistical distribution of wave heights, *Proc. Civil Eng. Ocean*, ASCE, 1974, pp.1211-1231.
- 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), 1991, pp.326-347.
- Goda, Y.: A 2-D random wave transformation model with gradational breaker index, *Coastal Engineering Journal*, **46** (1), 2004, pp.1-38.
- Tajima, Y. and Madsen, O.S.: Shoaling, breaking and broken wave characteristics, *Coastal Engineering 2002, Proc. 28th ICCE*, World Scientific, 2002, pp.222-234.
- Tajima, Y. and Madsen, O.S.: Modeling near-shore waves and surface roller, *Proc. APAC 2003*, Makuhari, Chiba, Japan, Paper No. 28 in CD-ROM, 2003, 12p.
- Battjes, J.A.: Modeling of turbulence in the surf zone, *Proc. Symp. Modeling Techniques*, 1975, pp.1050-1061.
- Dally, W.R. and Brown, C.A.: A modeling investigation of the breaking wave roller with application to cross-shore currents, *J. Geophys. Res.*, **100** (C12), 1995, pp. 24,873-24,883.
- Hamilton, D.G. and Ebersole, B.A.: Establishing uniform longshore currents in a large-scale sediment transport facility, *Coastal Engineering*, **42**, 2001, pp.199-218.
- Reniers, A.J.H.M. and Battjes, J.A. (1997): A laboratory study of longshore currents over barred and non-barred beaches, *Coastal Engineering*, **30**, pp.1-22.
- Kuriyama, Y. and Ozaki, Y.: Longshore current distribution on a bar-trough beach – Field measurement and calculation at HORS, *Rept. Port and Harbour Res. Int.*, **32** (3), 1993, pp.3-37.
- Smith, J.McK., Larson, M., and Kraus, N.C.: Longshore current on a barred beach: Field measurement and calculation, *J. Geophys. Res.*, **98** (C12), 1993, pp.22,717-22,731.
- 合田良実：不規則波による沿岸流速に及ぼす諸要因の影響の検討, ECOH/YG 技術論文 No.4, 2004年5月, 24p. (URL <http://www.ecoh.co.jp> の顧問の頁に掲載)