

砕波巻き上げによる浮遊砂の輸送・沈降過程に着目した 地形変化の計算

片 山 裕 之*・合 田 良 實**

浮遊砂の巻き上げは砕波による波エネルギーフラックス損失に比例するとした, Katayama・Goda (2000) の断面 2 次元のマクロモデルに移流・拡散の過程を考慮することにより 2DH モデルを開発した。このモデルを用い, 代表的な海域制御構造物である離岸堤, 突堤周辺に対して地形変化の予測計算を行い, 掃流砂を考えず浮遊砂のみを考慮することで沿岸方向の海浜地形変化が説明できるかを試みた。その結果, 高濃度浮遊砂雲の様子や地形変化の傾向を定性的には表せるが, 離岸堤の背後へ浮遊砂雲が海浜流に乗って輸送される様子や, 背後でトンボロの発達する現象の再現までは至らなかった。

1. はじめに

海岸における底質移動には掃流移動, シートフロー, 浮遊移動の形態があるが, 沿岸漂砂に関しては浮遊砂による移動が卓越する。特に高波浪時には顕著であることが知られている。しかしながら, 今までの漂砂現象に関する研究のほとんどは掃流砂あるいは砂漣からの砂の巻き上がりを取り上げており, 砕波による底質の浮遊現象は現象の複雑さのため定量的に評価するまでに至っていない。Goda (2001) は, 沿岸漂砂の解析とその予測に浮遊漂砂が重要であることを例示し, 浮遊砂輸送に着目した海浜変形問題に対する新しい取り組み, 掃流砂から砕波による浮遊砂へのパラダイム変換を提唱している。

本研究ではまず, Katayama・Goda (2000) による, 比較的高濃度が維持される高波浪来襲時の浮遊砂濃度は, 砕波による波エネルギーフラックスの減耗率に比例すると導いた断面 2 次元のマクロモデルを基本とし, これに浮遊砂の移流による輸送・沈降による拡散過程を考慮することにより平面 2 次元モデルへと拡張した。更にこのモデルを用いて, 離岸堤, 突堤などの海域制御構造物周辺における沿岸漂砂による地形変化の予測を行い, 掃流砂を考えず浮遊砂のみを考慮することで沿岸方向の海浜地形変化が説明できることを例証した。

2. 不規則砕波による浮遊砂巻き上げ率

2.1 砕波帯内の浮遊砂総平均濃度の推定

沿岸漂砂量の予測式の一つに式 (1) に示す CERC 公式があり, 数多くの海浜変形の問題に適用されてきた。

$$q_{\text{total}} = \frac{KH_b^3(c_b)_b}{8s(1-\lambda)} \sin \alpha_b \cos \alpha_b \quad \cdots \cdots (1)$$

ここで, K は漂砂量係数, H は有義波高, c_b は群速度, α は波向, 添字の b は砕波点での値, s は底質の海水に対する比重 ($=\rho_s/\rho$), λ は底質の空隙率 ($=0.4$) である。この公式で予測される沿岸漂砂量の大半は浮遊漂砂であると考えられ, 沿岸漂砂の輸送率は浮遊砂の平均濃度と

平均沿岸流速との積で表すことができる。Katayama・Goda (2000) は, Goda・Watanabe (1991) の沿岸流モデルを使い平均浮遊砂濃度の計算を行った。その結果を図-1 に示す。添字 c_{CERC} は, 沿岸漂砂量を CERC 公式により求めたことを表示している。計算された総平均濃度は, 海底勾配と波形勾配によって $c_{\text{CERC}}=500\sim1,500$ ppm の範囲ではあるが, 入射角には依存しない。また, 総平均濃度の近似式として式 (2) を提示した。

$$\begin{aligned} c_{\text{CERC}} &= c_0 K(H_b/L_0)^{-0.43} \times (1+18i^{1.4}) \\ c_0 &= 3.25 \times 10^{-4} \quad \cdots \cdots (2) \end{aligned}$$

2.2 波パワーの減衰率に比例させた浮遊砂巻き上げ率

式 (2) および図-1 の結果は, 砕波帯全体の浮遊砂濃度の総平均値のみを与えるため, 浮遊砂濃度の岸沖分布についてはパワーモデル的な考え方から導く必要がある。今, 一定のエネルギーを持った波が来襲し, 砕波により底質が海底から常に巻き上げられて浮遊し, 砕波による巻き上げと重力による沈降とがバランスしている定常状態を考える。浮遊砂濃度を一定に保つために必要な仕事率を考えると, 単位時間, 単位面積当たり沈降する浮遊砂量は $c_w r$ で与えられる。沈降した浮遊砂を補うためには, 同じ量の底質を海底から巻き上げ, 水面まで持ち上げなければならない。従って浮遊砂濃度を一定に

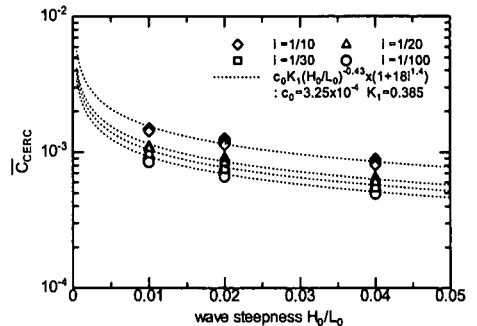


図-1 CERC 公式による沿岸漂砂量と Goda・Watanabe の沿岸流速公式から求めた浮遊砂の総平均濃度の推定結果 (Katayama・Goda, 2000)

* 正会員 博(工) 五洋建設(株)技術研究所
** フェロー 工 博 横浜国立大学名誉教授

保つための仕事率 dW_f は次式のようになる。

$$dW_f = (\rho_s - \rho) g w_f \bar{c}(x) h dx \quad \dots\dots\dots (3)$$

この仕事率が砕波による波エネルギーフラックスの減耗率に比例すると考えると、平均浮遊砂濃度は次式のように表すことができる。

$$\bar{c}(x) = \frac{\beta_s}{8(s-1)w_f h} \frac{\partial}{\partial x} (H_{rms}^2 C_g) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 β_s は巻き上げに使われる割合の係数（以降、浮遊砂巻き上げ係数とする）である。砕波帯内の浮遊砂の総平均濃度は、上式で求められる平均濃度を海底断面全体で積分することにより評価できるが、CERC 公式から求めた式 (2) の $\bar{c}_{CERC}$ に一致しなければならないと考えると、 β_s として次式を得ることができる。

$$\beta_s \cong 0.76 \times \frac{w_f K}{g T_{1/3}} (i^{-1} + 18i^{-0.4}) (H_0/L_0)^{-0.43} \quad \dots (5)$$

この式には、底質の粒径の関数として沈降速度 w_f が含まれている。ただし、CERC 公式の定数 K は、Del Valle et al. (1993) に示されるように粒径の増大につれて減少する。従って、両者の積 $w_f \cdot K$ は、粒径 d が 0.1~1.0 mm の範囲では 0.005~0.014 m/s と変化する程度である。

式 (5) による断面平均濃度の推定値を既往の実験および現地データにより検証した（図-2）。図中、横軸が式 (6) による推定値、縦軸が観測値に最も適合する値である。これを見ると、一部の現地観測値については最適値が極めて大きくなるものがあるが、これらを除けば、 β_s は 0.01~0.1 の値を取り、式 (5) による計算値と観測値に対する最適値とは 1/3~3.0 倍の範囲にほぼ収まっていることが分かる。

3. 2DH モデルへの拡張

Katayama・Goda (2000) による、不規則砕波による浮遊砂の移流・拡散による輸送過程を付加して平面 2 次元モデルへと拡張した。

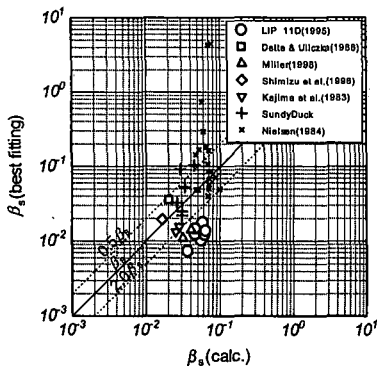


図-2 β_s の計算値と観測最適値との比較 (Katayama・Goda, 2000)

平面 2 次元の計算では、外力として波浪場と海浜流場の平面分布が必要になる。本研究では、平面波浪場の計算は合田 (2002) による放物型方程式に段階的砕波係数を導入した波浪変形モデルを用いた。このモデルは従来の合田 (1975) の砕波モデルで評価できなかったパー・トラフ地形など、より一般的な海底地形に対しても砕波を考慮した波高を算出することができる。また海浜流についてはラディエーションストレスの勾配に起因される断面平均流に関する連続式と運動方程式より算出した。なお、水平拡散項の評価は清水ら (1989) の方法を、底面摩擦の評価には田中・Sana (1996) の方法を用いている。

3.1 波エネルギー減衰率と浮遊砂巻き上げ率の評価

本モデルを海浜地形予測に適用するには、浅水変形、屈折、および回折作用を受ける平面 2 次元空間における砕波による波エネルギー減耗率を評価する必要がある。ここでは、砕波変形を伴わないときの波エネルギーフラックスと、砕波減衰を伴うときの値との差から、砕波によるエネルギーフラックスの減耗分として評価した。

$$\left. \begin{aligned} W_s &= W_0 - W_b \\ W_0 &= \frac{1}{8} \rho g (H_{rms})^2 C_g \cos \alpha \\ W_b &= \frac{1}{8} \rho g (H_{rms})^2 C_g \cos \alpha \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 W_s は波エネルギーフラックスの減耗量、 W_0 は砕波しないときのフラックス、 W_b は砕波した波が保有するエネルギーフラックス、 $(H_{rms})_0$ と $(H_{rms})_b$ はそれぞれ非砕波、砕波のエネルギー平均波高、 α は波向である。なお、波浪変形計算は多方向不規則波を対象とした。

単位面積当たりの浮遊砂巻き上げ率 q は、一様海浜の定常状態では浮遊砂の沈降率に等しい。複雑な海底地形の場合には、式 (7) によって計算することができる。

$$q(x, y) = \begin{cases} \frac{\beta_s}{(\rho_s - \rho) g h} \frac{\partial}{\partial x} W_s(x, y) : \frac{\partial W_s}{\partial x} \geq 0 \\ = 0 : \frac{\partial W_s}{\partial x} < 0 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (7)$$

従って、波エネルギーフラックスの減耗量 $W_s(x, y)$ の空間分布が分かれば、砕波による海底からの浮遊砂巻き上げ率を求めることが可能になる。

3.2 浮遊砂に対する連続方程式

海底の底質粒子は、砕波によって式 (7) の割合で巻き上げられ、浮遊して海浜流で運ばれ、重力によって次第に沈降していく。巻き上げ率が沈降率を上回る場所では侵食が、少ない場所では堆積が生じる。鉛直拡散プロセスを無視すると、浮遊砂に対する連続方程式は次式のようになる。

$$\begin{aligned}
 q - w_f \bar{c} + \frac{\partial(\bar{c}vh)}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{c}uh)}{\partial y} \\
 = \varepsilon_x \frac{\partial^2(\bar{c}h)}{\partial x^2} + \varepsilon_y \frac{\partial^2(\bar{c}h)}{\partial y^2} \dots\dots\dots (8)
 \end{aligned}$$

ここに、 ε_x と ε_y は x および y 方向の水平拡散係数、 u と v はそれぞれ x と y 方向の海浜流の速度成分である。

上記の連続方程式を、波浪場の計算から求められる海浜流および各地点の浮遊砂巻き上げ率を入力として解くことにより、平均浮遊砂濃度の空間分布が求められる。各地点の水深変化率は、浮遊砂の巻き上げ率と沈降率との差として次式で与えられる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{1-\lambda}(q - w_f \bar{c}) \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 λ は底質の堆積状態での空隙率である。

3.3 断面平均浮遊砂濃度の岸沖分布の検証

モデルの検証のため、大型断面水路実験での岸沖断面平均浮遊砂濃度を Katayama・Goda (2000) の結果と併せて比較を行った (図-3)。なお合田 (2002) の放物型方程式による計算は直入射の条件で行っている。

その結果を見ると、波高分布に関しては、特にステップ地形上の勾配が緩やかに変化した後の波高変化の様子など改善されていることが分かる。また浮遊砂濃度については、断面2次元モデルで提案した浮遊砂巻き上げ係数 β_s を用いて岸沖断面の平均浮遊砂濃度を十分評価できるとともに、波高分布の推定精度の向上に併せて実験結果との一致も良くなっている。

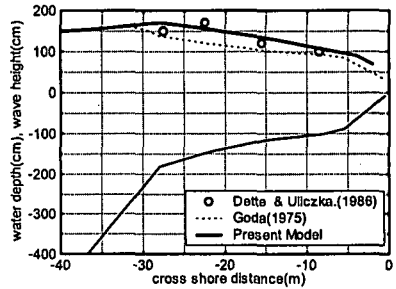
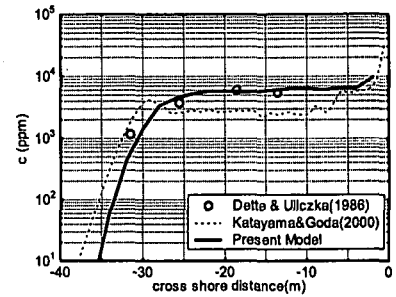
4. モデル地形における地形変化の計算

4.1 モデル地形および計算条件

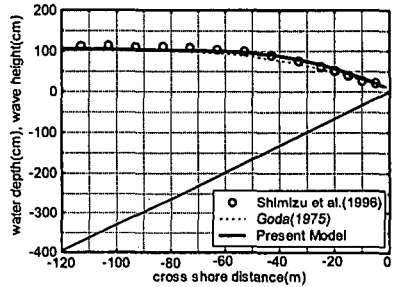
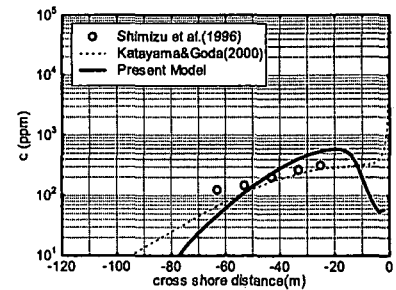
代表的な海域制御構造物である離岸堤および突堤周辺における沿岸漂砂による地形変化の予測計算を試みた。計算条件は、沿岸方向1.5 km、岸沖方向0.5 km、海底勾配1/50の直線状等深線海岸に対して、入射沖波有義波高4 m、スペクトルピーク周期8秒の沖波を、離岸堤のケースでは直入射、突堤のケースでは入射角 30° として入波した。なお入射波は成分波数を100、方向集中度 S_{max} を75とした多方向不規則波とした。モデル離岸堤は設置水深、沿岸方向延長を変えて全部で9ケース、突堤は先端部水深を変えて全部で3ケースの計算を行った (表-1)。なお、拡散係数 $\varepsilon=0.01$ 、底質の堆積状況の空隙率 $\lambda=0.4$ とした。

4.2 計算結果

計算ケースのうち、代表ケースとしてCase-A31(離岸堤)とCase-B3(突堤)についての波浪・海浜流場の結果を図-4に示した。なお海浜流は0.5 m/s以下はプロットしていない。この結果を見ると、離岸堤のケースでは、背後の循環流の渦の中心がやや外側になってしまってい



(a) Dette & Uliczka (1988)



(b) 清水ら (1996)

図-3 断面平均浮遊砂濃度の比較

ることと、背後の沖向の循環流がやや過小評価となると考えられる。また突堤のケースでは突堤の極近傍で波高変化が大きくなってしまっている。これらの課題は残されるが、全体としては定性的には海浜流の向きなど再現されている。

同様のケースについて、浮遊砂の移流・拡散による輸送、沈降過程を考慮した浮遊砂濃度の空間分布の計算結果を図-5に示した。これを見ると、離岸堤背後の高濃度

表-1 計算ケース

Case	構造物	設置水深	構造物延長
Case-A41	離岸堤	4 m	100 m
Case-A42			200 m
Case-A43			300 m
Case-A31		3 m	100 m
Case-A32			200 m
Case-A33			300 m
Case-A21		2 m	100 m
Case-A22			200 m
Case-A23			300 m
Case	構造物	先端水深	構造物延長
Case-B1	突堤	4 m	200 m
Case-B2		3 m	150 m
Case-B3		2 m	100 m

部分や、離岸堤の外側からその背後へ浮遊砂が引き寄せられている様子が再現されている。なお、背後における冲向きの流れをもっと大きく評価できるならば更に背後へ高濃度域が広がるものと考えられる。また突堤のケースでは、上手側における浮遊砂の高濃度の様子、下手側における低濃度の様子など定性的には再現できていると思われる。ただし、現地における観測データとの検証を行う必要があり、今後の課題である。

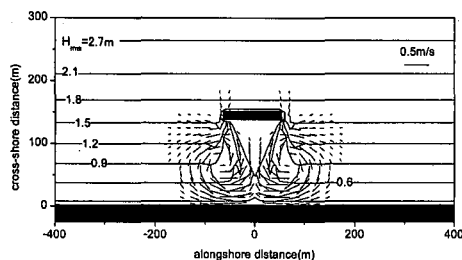
次に、式(9)を用いて3時間後の海底地形変化の計算を行った結果を、離岸堤、突堤の全ケースについて図-6に示した。図中、点線は初期水深コンターを、実線は3時間後のコンターを示している。なお、地形変化の計算では汀線は固定境界としている。また、浮遊砂巻き上げ係数 β_s については式(5)を用いて評価した。

離岸堤背後では、一般的には汀線が前進し、トンボロが発達してくる様子が見られるが、計算結果では離岸堤端部の岸側から堆積してくる傾向が見られるケースが多く、また一部のケースでは背後域でトンボロが発達してくる様子が再現されている。しかしながら、浮遊砂雲が海浜流に輸送されて背後域へと運ばれている様子までは再現されていない。また堆積速度が速すぎると考えられ、 B_s の現地地形データによる検証が必要である。

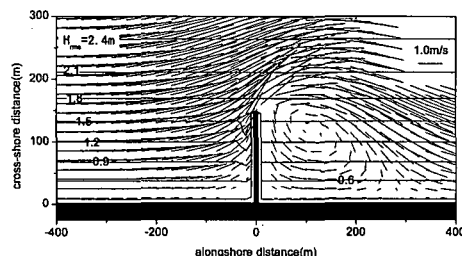
突堤のケースを見ると、下手側で等深線が後退している傾向が見られるものの、突堤の極近傍において激しい地形変化が生じてしまっている。これは波浪場の計算において、突堤の近傍において突堤からの反射の影響などにより波高分布を過大評価してしまっていることに起因すると考えられる。しかし、波浪場算定の精度の向上により解決される問題である。

5. 主要な結論

砕波巻き上げによる浮遊砂の輸送・沈降過程に着目した海浜変形の2DHモデルを開発した。このモデルを用

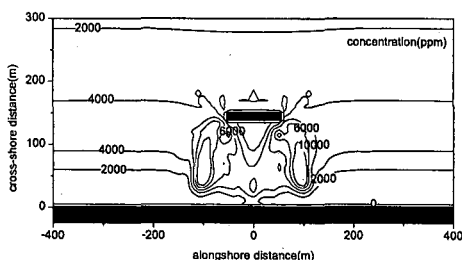


(a) 離岸堤 (Case-A31)

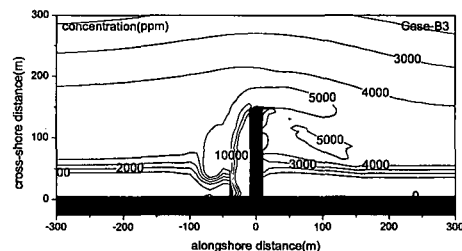


(b) 突堤 (Case-B3)

図-4 エネルギー平均波高と海浜流の計算結果



(a) 離岸堤 (Case-A31)



(b) 突堤 (Case-B3)

図-5 浮遊砂濃度の空間分布

いて、浮遊砂のみを考慮した地形変化の例として、離岸堤および突堤周辺の沿岸漂砂による海底地形変化の予測計算を行った。その結果、地形変化の傾向を定性的には表せることを示したが、離岸堤の背後へ浮遊砂雲が海浜流に乗って輸送されて行く様子や、背後でトンボロの発達する現象の再現までは至らなかった。波浪、海浜流の外力場の精度にも起因するところもあるが、現地地形変

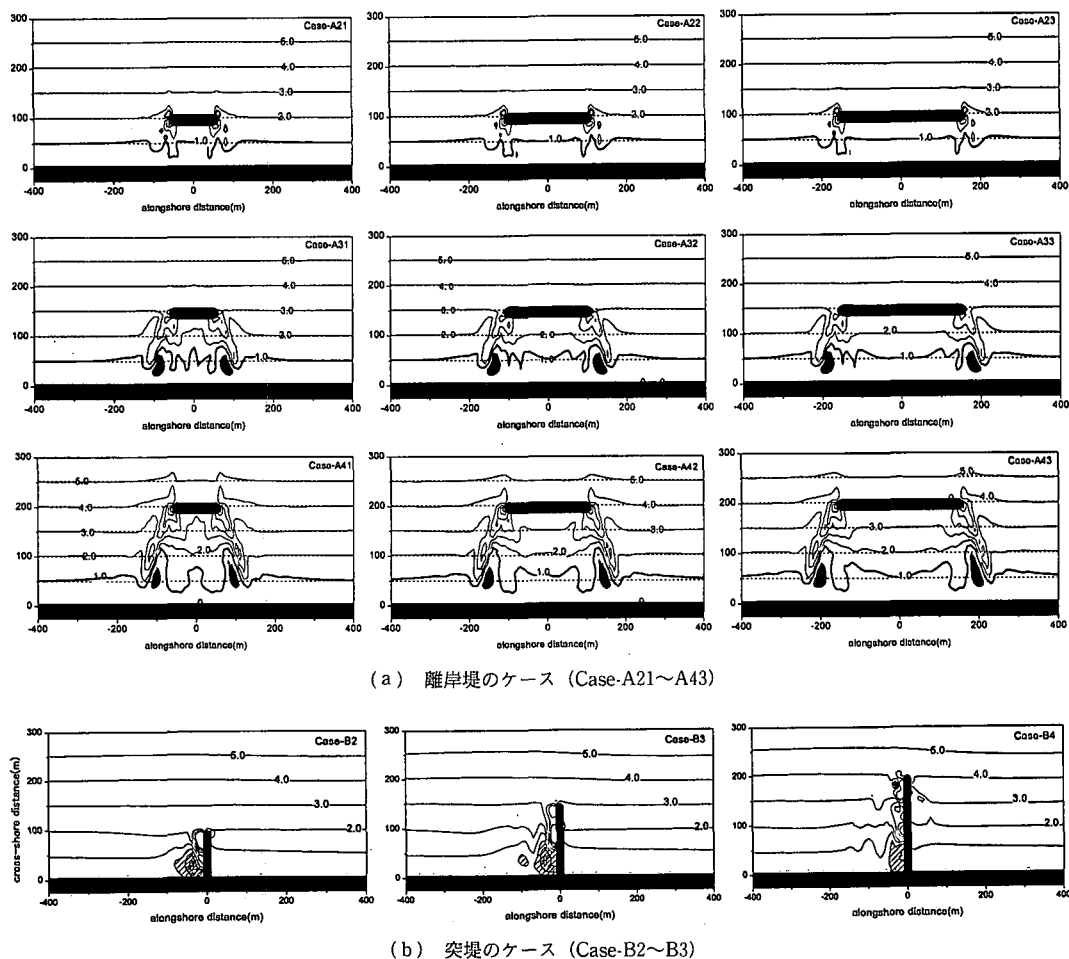


図-6 浮遊砂の移流・沈降過程を考慮した地形変化予測結果 (3時間後)

化データなどとの検証も行う必要があり、今後更に検討を続ける必要がある。

参考文献

- 合田良實 (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.
- 合田良實 (2002): 段階的碎波係数を導入した3次元地形場の不規則波浪変形計算, 海洋開発論文集, 第18巻, pp. 197-202.
- 清水隆夫ら (1996): 不規則波による大型海浜断面変形実験と外力場の多点同期計測, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 491-495.
- 清水琢三ら (1989): 海浜変形予測手法の現地適用性に関する研究, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 404-408.
- 田中 仁・A. Sana (1996): 交差する波と流れによる抵抗則の検討, 土木学会論文集, 第533号/II-34, pp. 273-277.
- Detle, H. and K. Uliczka (1986): Velocity and sediment concentration fields across surf zones, Prof. 20th ICCE, pp. 1062-1076.
- Goda, Y. and N. Watanabe (1991): A longshore current formula for random breaking waves, Coastal Engineering in Japan, JSCE, Vol. 34, No. 2, pp. 159-175.
- Goda, Y. (2001): A new approach to beach morphology with the focus on suspended sediment transport, Proc. of APACE 2001, pp. 1-24.
- Katayama, H. and Y. Goda (1999): Sediment suspension by random breaking waves evaluated from the CERC formula, Proc. 4th Int. Conf. Coastal Sediments, Long Island, New York, ASCE, pp. 1019-1033.
- Katayama, H. and Y. Goda (2000): A sediment pickup rate formula based on energy dissipation rate by random breaking waves, Proc. 27th ICCE, pp. 2859-2871.