

ラディエーションストレスの鉛直分布形状と 3 次元海浜流

信岡尚道*・J.A. Roelvink**・三村信男***

3 次元海浜流の駆動力である radiation stress の鉛直分布形状は, Eulerian 表記, Lagrangian 表記と碎波によるエネルギー逸散型の 3 つが提案されている. 本論文では, これら 3 種類の形状に加え新たに海底勾配の効果を考慮した改良 Lagrangian radiation stress による海浜流予測について, 一様海底勾配上の規則波下で基本能力を, 非一様海底勾配上の不規則波下で実用性を検討したものである. また, 碎波による surface roller のエネルギー輸送モデルとの関係についても考察して, 総合的に radiation stress 型数値シミュレーションモデルの可能性を示した.

1. 序 論

海岸環境に大きく影響する海浜流は 3 次元構造を有しており 5 つの力学的な項, radiation stress, 平均水位, Reynolds stress, 波動境界層のせん断力と海底面摩擦によって複雑に形づくられている. この中で radiation stress が, 波による流れの初期駆動力である. 現在, 3 つの有効な radiation stress の鉛直分布形状が提案されている. Eulerian 型 (信岡ら, 2000), 海洋を対象とした Lagrangian 型 (Mellor, 2003) と波エネルギー消散型 (Walstra ら, 2000) である. 計算機の発達により 3 次元数値シミュレーションモデルも実用的になりつつある現在, radiation stress 形状による海浜流の予測精度の違いを把握することは, 海浜変形や水質の問題解決に活用するために重要と考えられる.

本研究の目的は, 新たに改良した Lagrangian 型を含む各 radiation stress の海浜流予測能力を示すことである. 各形状を用いた計算結果を, 規則波と不規則波下の実験結果と比較する. 最後には, 3 次元海浜流予測のために適した radiation stress の鉛直形状を提示する. また, surface roller の運動を考慮したエネルギー保存モデルとの関係についても考察する.

2. 3 次元海浜流駆動力の鉛直分布

狭義の海浜流の駆動力は, 外洋から来襲する波浪を数周期平均して残存する力である. この中には碎波による運動量放出も含まれる. 本節では数値シミュレーションに用いられる先述の 4 つのモデルと surface roller 型の駆動力鉛直分布モデルの概略を示す.

(1) Eulerian 型 radiation stress

Longuet-Higgins・Stewart (1964) が示した水深平均の radiation stress に対して信岡ら (1997) が同様の誘

導で鉛直分布理論式を導いた. さらに, 海底傾斜の効果が分布に大きく作用するので, この効果を取り入れた改良式と算出方法も示した (信岡ら, 2000). 改良式を海底から水面までを積分すると, 水平 2 次元海浜流や平均水位予測に用いられる一般的な radiation stress と一致する. なお, 本研究では波による水面振幅範囲における静水圧の効果はまとめて最上層に与えた.

(2) 海洋対象の Lagrangian 型 radiation stress

Mellor (2003) は, 波水面から海底までの水柱の伸縮概念を導入して波動流速や圧力の鉛直分布を Lagrangian 的に導き, さらに radiation stress を含め, 波の 1 周期平均の運動量方程式を導いている.

(3) 海岸対象の Lagrangian 型 radiation stress

Eulerian 型分布で述べたとおり, 浅海域では海底傾斜の効果を radiation stress に組み込む必要がある. ここでも同様に Biesel 理論 (1952) で採用された海底傾斜を用いて摂動展開する手法を利用して式を展開し, Mellor 式に海底傾斜効果を表現する項, $S_{xx(slope)}$, を付加した.

$$S_{xx(slope)} = u^2 \frac{\partial \sigma(\eta+h)}{\partial x} + uw \dots \dots \dots (1)$$

ここに, u, w : x, z 方向流速, h, η : 水深と水面変位 ($\eta+h$ は全水深), σ : 鉛直座標で水面が 0, 水底が -1 と水深で無次元化したものである.

(4) 波エネルギー消散型 radiation stress

Dingemans ら (1987) は流れを引起す主因子は波のエネルギー消散と関係があることを導き, 式 (2) の形式で一般的な radiation stress (S_{xx}) に相当することを示した.

$$S_{xx} \approx D \frac{k}{\omega} \dots \dots \dots (2)$$

ここに D は波の碎波による消散エネルギー, k と ω は波数と角周波数である. Walstra ら (2000) は, この式 (2) を水表面へのせん断力と仮定して Delft-3D-FLOW の改良モデルに組み込み, 海浜流の鉛直分布予測に成功している.

(5) Surface roller 型エネルギーモデル

碎波により生じる surface roller のモデル化を, エネ

* 正 会 員 博 工 茨城大学講師 工学部都市システム工学科
** Phd Delft University of Technology, AP
*** 正 会 員 工 博 茨城大学教授 広域水圏環境科学教育研究センター

ルギー保存を考慮して求める方法を Dally・Brown (1995) が開発した。Tajima・Madsen (2003) は改良モデルを提案し、平均水位分布や戻り流れの総量を正しく予測できることを実験結果と比較で明らかにして、また沿岸流予測への可能性も示した。合田 (2004) は係数を改定して、実際に沿岸流予測を行って surface roller の効果の必要性を説明している。これらの手法は本論文で扱う予測手法と異なるので、モデルの違いと予測現象の同一性について3.5節で考察するに留める。

(6) 各鉛直分布形状の比較

4つのモデルによる radiation stress 水平勾配の鉛直分布形状を図-1(a)と(b)に示す。予測対象は海底勾配が1/20で沖側一様水深部 ($h=35$ cm) の波高と周期は $H=7.5$ cm, $T=2.0$ s の規則波、測線水深は碎波帯外が $h=15$ cm, 碎波帯内が $h=5$ cm である。

碎波帯内の分布形状は、Eulerian 型では水面付近で沖向きの応力が強くなっている。一方、海洋対象の Lagrangian 型では底面から水面に近づくにつれて沖向き応力が弱くなっている。この力の向きでは水面で岸向き、水底で沖向きとなる岸沖方向の鉛直循環流が発生する可能性が高い。しかし、現実には海底付近で岸向き、

海面付近では沖向きの流れになる (例えば、堀川ら, 1972)。他方、海底傾斜の効果を検討した海岸対象の Lagrangian 型 (Improved Lagrangian) の結果は鉛直方向にほぼ一様になっており、この矛盾は修正される。しかし、この駆動力だけでは全水深で力の拮抗関係が同じになるので循環流を表現できない。同様に、エネルギー消散型では碎波帯外なので、駆動力が全水深に渡って零で、鉛直方向に一様になる。

碎波帯内の分布形状は、Eulerian 型では水面付近で沖向きの応力が強くなっており、碎波による運動量放出を表現できている。エネルギー消散型ではさらに強い力となっている (5.7 N/m 図枠外, 最上層1点)。他方、両 Lagrangian 型ではほぼ鉛直方向に一様、若干程度に水面に近づくにつれ岸向きで強くなる結果となった。

3. 海浜流モデルの概要

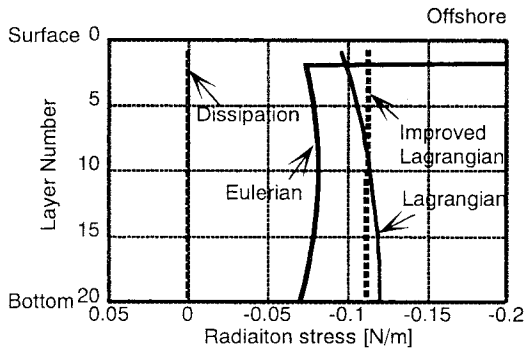
海浜流の鉛直分布は、駆動力の radiation stress に加え、平均水位勾配による静水圧力、レイノルズ応力、海底摩擦、海底直上の波動境界層のせん断力の釣り合いで決まる。したがって、駆動力の鉛直分布形状による海浜流予測精度比較には、radiation stress 以外のモデリングも重要である。海浜流予測に用いたモデルには、信岡ら (2002) の支配方程式と数値解法を用いた (以降、Ibaraki-3D と呼ぶ)。ただし、radiation stress 以外の各サブモデルも、Delft-3D-Flow で用いられているモデルを参考に、次のように改良や追加をおこなった。

(1) 乱れのモデリング

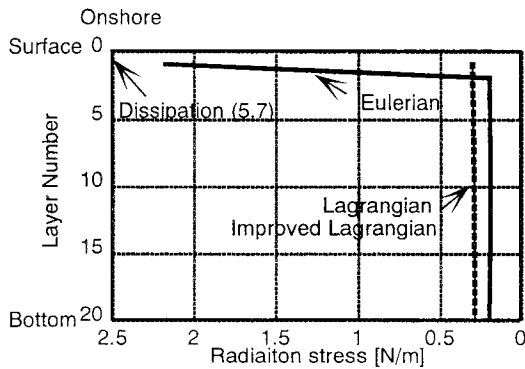
2つの0次方程式を組合せた渦動粘性モデルを採用した。1つは、碎波と底面の摩擦で発生する乱れのモデリングで、乱れ混合距離 L の鉛直分布と発生した乱れエネルギー k の鉛直分布は流れが対数分布になると仮定されたものである。渦動粘性係数は式 (3) であらわされる。

$$v = \kappa L \sqrt{k} \quad (3)$$

ここに、 κ はカルマン定数 ($=0.4$) である。波からの逸散エネルギーの1/3乗が乱れの代表速度になるとして、またこの転換係数を岡安ら (1987) の詳細実験に基づく経験式で算出される渦動粘性係数と本手法の結果ができるだけ一致するように試行計算を経て、0.65とした。波消散型 radiation stress を用いる場合には、海浜流の予測結果が実験値にあうようにさらに大きな値を与えた。なお、波からの逸散エネルギーは、半分が直下で、残りは山下ら (1988) の大規模渦の挙動実験をもとに岡安ら (1989) が開発したモデルを参考に、波向き方向へ水深の4倍の距離の間で一様に乱れエネルギーに転換されるとした。もう一つの0次方程式はプラントルの混合距離モデルであり、海浜流の流速差、流速分布から発生する乱れを表現したものである。



(a) 碎波帯外



(b) 碎波帯内

図-1 Radiation stress の鉛直分布形状比較

最終的に適用する渦動粘性係数には、前者に海浜流による底面で発生する乱れを付加したものと、後者のうち、大きい値を用いた。なお、Delft-3D-Flow 改良モデルでは $k-\epsilon$ モデルを用いている (Walstra ら, 2000)。

(2) 海底摩擦応力

海底に接する計算格子における流れから海底摩擦を算定するために、3次元流用の *chézy* 係数を用いた (例えば Zijlema ら, 2002)。

(3) 海底境界層のせん断応力

境界層層によるせん断力には、Walstra ら (2000) と同じ式を、簡便的に境界層が海底直上の計算格子内に含まれると考え、適用した。

(4) Lagrangian 流速から Eulerian 流速への変換

Ibaraki-3D では方程式を時間平均し水表面を平均水面と定めたことから、求められる流速は帰納的 Lagrangian 平均流と扱う。支配方程式も同 Lagrangian 表記が必要であるが、導かれる式は Euler 的に導いたものと同形である。現代の測定値は Eulerian 表記のものが多く、サブモデルや測定結果と比較する際、次の変換式を適宜に用いた。詳細は Walstra ら (2000) に詳しい。

$$\bar{u} = \bar{u}_L - u_s \quad (4)$$

ここに u , u_L , u_s は Eulerian と Lagrangian 流速, Stokes drift である。

(5) Surface roller モデルとの関係

Tajima・Madsen (2003) は碎波で消散したエネルギーの一部は、surface roller を介して乱れエネルギーへと移行するモデルを開発している (以降、SRT モデルと呼ぶ)。合田 (2004) は同モデルの減衰係数を改定したものを示している (以降、SRG モデルと呼ぶ)。これらのモデルでは、水面近くでの岸向き流れは主に surface roller で輸送され、その輸送量までを算定できるものである。

一方、Ibaraki-3D では、surface roller による輸送量も求めるべき海浜流の中に含めている。また、碎波による乱れエネルギーについては、surface roller を介する点までを先述のように水深の4倍の距離で逸散すると仮定するなど、サブモデルで独立して算定している。

現象の同一性を確認するため、これら3つのモデルに

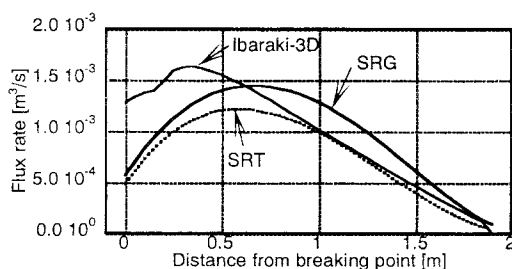


図-2 碎波後の水表面付近の岸向き質量輸送量の比較

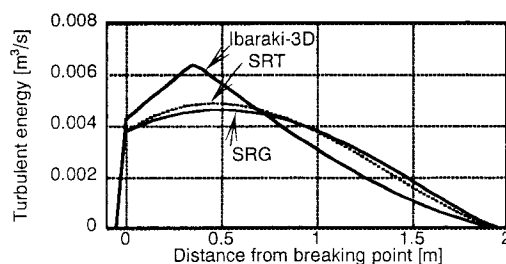


図-3 碎波後のエネルギー逸散分布

よる碎波後の岸向き輸送量と全乱れエネルギーの岸沖分布を比較した (図-2, 図-3)。計算対象は岡安ら (1987) の case-2 である。

3つのモデルによる岸向き輸送量は、碎波点から増加で SRT と SRG モデルの方が緩やかであるが、それ以外は概ね一致している。碎波帯の中程から岸側では、Ibaraki-3D と SRT モデルの結果が良く一致している。乱れエネルギーは、碎波の突っ込み点付近でのピークで Ibaraki-3D で算定した値が大きく、岸に近づくとき SRT や SRG モデルの値と大小関係が逆転しているが、分布の傾向は全般的に良く一致しており乱れの遅れを表現できている。以上より SRT や SRG モデルと Ibaraki-3D では、surface roller のモデリング方法が異なるだけと言える。なお、SRT モデルでは波の非線形現象を考慮しているが Ibaraki-3D ではまだそれを考慮していない。

4. 各駆動力の海浜流予測精度

(1) 比較検討ケース

一様海底勾配上の規則波、非一様海底勾配上の不規則波の2種類を対象とした。前者は碎波帯外についてはオリジナル実験、碎波帯内では岡安ら (1987) の実験 case-2 と比較した。オリジナル実験では、超音波ドップラー流速計による Eulerian 測定と染料をトレーサーとした Lagrangian 測定で流速を得た。後者には Boers (1996) の実験を用いた。大規模水槽の移動床実験で得た地形を縮小再現した固定床上に移動床実験の波に相当するものを入射させて海浜流の鉛直分布を詳細に測定している。それぞれの波の諸元を表-1に示す。

波動場の再現に、規則波については Biesel の理論、

表-1 比較ケースの緒言

Case	実験	沖水 深 hin[cm]	周期 T or $T_{1/3}$ [s]	入射波高 H or $H_{1/3}$ [cm]	海底勾配
1	オリジナル	35	規則波 2.0	7.5	1/20
2	岡安ら (1987)	40	規則波 2.0	5.63	1/20
3	Boers (1996)	75	不規則波 2.05	11.1	不規則(入射波対応)

碎波には碎波点が実験と一致するように設定した波高水深比モデルを用いた。不規則波については、SWAN (SWAN Group, 2003) を用いて算定した。

(2) 一様海底勾配上規則波での比較

まず、図-4 に Eulerian 流速と Lagrangian 流速の実験値と予測値を示しているが、両者の対応が良いことがわかる。これ以下では Eulerian 流速で比較を進める。図-5(a), (b) に碎波帯内と外の各モデルによる海浜流の予測と実験の結果を示す。碎波帯外では海洋対象の Lagrangian 型の駆動力を用いた場合だけ、表面付近で岸向き底面付近で沖向きと流れのパターンが大きく異なる。駆動力の分布形状比較(2.6節)で述べた推察に対応する現実と異なった流れである。しかし、海岸対象の Lagrangian 型 (Improved Lagrangian) を用いると妥当な結果を得ている。これも海底傾斜の効果を導入する必要があることを示す一つである。Eulerian 型の駆動力による予測結果では循環パターンが一致しているが流速がやや過大評価されている。波エネルギー消散型の結果は、海岸対象の Lagrangian 型と同様に予測精度が高い。予測精度が高かった二つは radiation stress の鉛直分布は一樣である。その中で波消散型は碎波前なので radiation stress が零である。以上より、碎波帯外の radiation stress の分布形状は全水深にわたって一樣、水面付近で沖向き海底近くで岸向き流れの駆動力は海底境界層のせん断力と考えるのが適切と言える。

碎波帯内では、両 Lagrangian 型 radiation stress を用いた場合、大規模渦、戻り流れを十分に表現できていない。碎波による水面付近での波からの大きな運動量放出を、これらの型では表せないためである。他方 Eulerian 型や波消散型を用いた場合には適切な海浜流の分布形状を表せている。ただし、両型を用いた碎波点から突っ込み点区間の戻り流れ総量は多くなる傾向が表われた。Surface roller モデルと比較した図-3 の結果で、岸向き輸送量が多いことに対応した誤差と考えられる。

(3) 非一様海底勾配上不規則波での比較

前節での碎波帯内外での海浜流予測精度を元に二つの駆動力モデルを適用した。一つは波エネルギー消散型 radiation stress, もう一つは非碎波域では海岸対象の Lagrangian 型とし碎波域では Eulerian 型とした Hybrid モデルを用いて、海浜流予測を試みた(図-6)。両駆動力モデルとも一部の予測結果に誤差があるが、不規則な海底勾配上で不規則波のもとでの海浜流の鉛直分布を良く表せている。ただし対象としたような現地に即した非一様勾配の不規則波では碎波の扱いが難しい。今回の Hybrid モデルでは一部の成分波でも碎波があれば碎波域と判断させた。

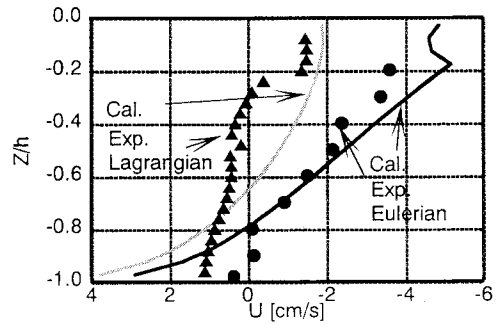
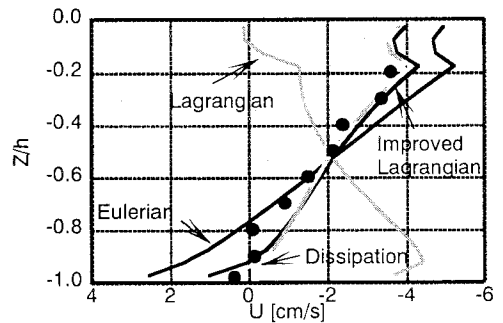
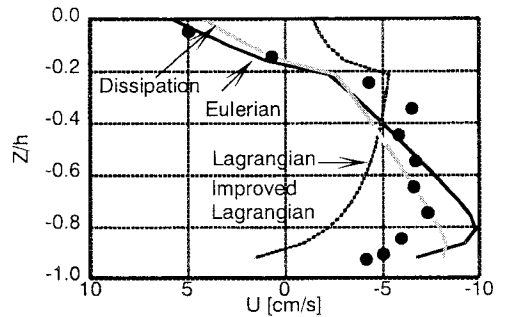


図-4 Eulerian 流速と Lagrangian 流速の比較 (碎波帯外)



(a) 碎波帯外



(b) 碎波帯内

図-5 海浜流鉛直分布の比較：黒丸は実験値、碎波帯内実験値は岡安ら(1987)

5. 結 論

提案されている海浜流の駆動力である radiation stress の鉛直分布のうち波エネルギー消散型が、現時点で海浜流予測分布に汎用性が高いといえた。また海底傾斜を考慮した Lagrangian 型を碎波帯外に Eulerian 型を碎波帯内に適用する Hybrid 型駆動力も将来的には可能性があり、今後、乱れのモデリングと合わせて碎波判定を検討する価値がある。海浜流数値シミュレーションモデルは、代数解析的な surface roller モデルと同様な大規模渦や乱れエネルギーへの転移を表現できること、不

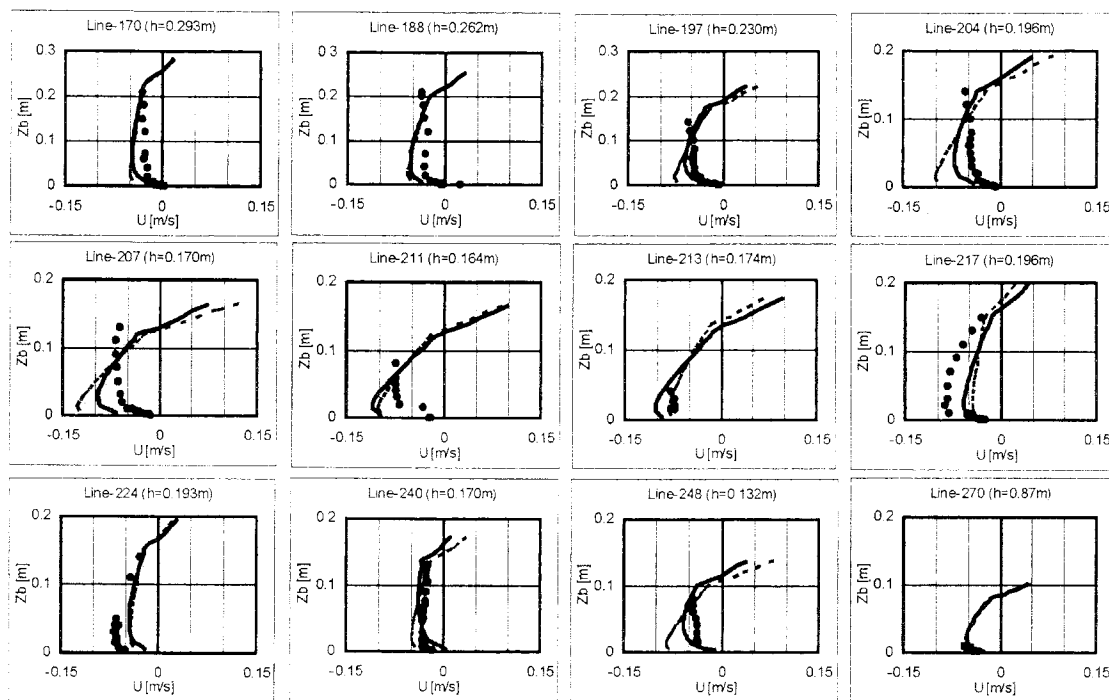


図-6 非一様海底勾配上の不規則波下の海浜流予測の比較：実線は hybrid 型，点線は Dissipation 型，実験値（黒丸）は Boers (1996)。

規則な地形と波の下でも海浜流鉛直分布の予測精度が高いことから，実用性があることも示した。

謝辞：本研究は文部科学省の平成15年度在外研究員派遣制度（Delft University of Technology, Marcel Stive 教授受入）と科学研究費補助金（若手研究（b），No.16760401）の援助による研究成果の一部である。また，東京海洋大学の岡安章夫教授から貴重な実験データを提供頂いた。これらの支援に対して心から感謝したい。

参 考 文 献

- 岡安章夫・柴山知也・堀川清司(1987)：砕波帯内定常流速場の鉛直分布に関する研究，第34回海講論文集，pp. 31-35。
- 岡安章夫・磯部雅彦・渡辺晃(1989)：砕波帯におけるエネルギー収支と戻り流れのモデリング，海工論文集，第36巻，pp. 31-35。
- 合田良実(2004)：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，海洋開発論文集，第20巻，pp. 785-790。
- 信岡尚道・加藤始・三村信男(1997)：多層3次元海浜流モデル：海工論文集，第44巻，pp. 156-160。
- 信岡尚道・加藤始・三村信男(2000)：緩傾斜海底面上の海浜流予測モデルの高精度化—radiation stressの鉛直分布の再検討，海工論文集，第47巻，pp. 86-90。
- 信岡尚道・熊田紗織・三村信男(2002)： σ 座標系による海浜流モデルの高精度化—radiation stressの鉛直分布を駆動力として—，海工論文集，第49巻，pp. 141-145。
- 堀川清司・砂村継夫・鬼頭平三・品川正典(1972)：海浜変形に関する実験的研究（第一報）—波による斜面上の net flow patternについて—，第22回年次講演会概要集，II，pp. 95-98。
- 山下隆男・J. R. Tallent・土屋義人(1988)：砕波水平渦の生成機構と移動特性，第35回海講論文集，pp. 54-58。
- Biesel, F.(1952): Study of Wave Propagation in Water of Gradually Varying Depth. Gravity Waves, pp. 243-253.
- Boers, M.,(1996): Simulation of a surfzone with a barred beach; Report I: wave heights and wave breaking. Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering, Delft University of Technology, No.96-5, 116p.
- Dally, W. R. and C. A. Brown(1995): A modeling investigation of the breaking wave roller with application to cross-shore current, JGR, 100, C12, pp. 24873-24884.
- Dingemans, M.W., A. C. Radder and H.J. De Vriend (1987): Computation of the driving force of wave-induced currents, Coastal Engr, 11, pp. 539-563.
- Mellor, G.L.(2003): The three-dimensional current and surface wave equations, J. Phys. Ocean., 33, 9, pp. 1978-1989.
- Longuet-Higgins, M. S. and R. W. Stewart (1964): Radiation stresses in water waves: a physical discussion, with applications, Deep-Sea Research, 11, pp. 529-562.
- SWAN Group (L.H. Holthuijsen, N. Booij, R.C. Ris, I.J.G. Haagsma, A.T.M.M. Kieftenburg, E.E. Kriez and M. Zijlema) (2003): SWAN Cycle III version 40.20 USER MANUAL
- Tajima, Y. and O.S. Madsen (2003): Modeling near-shore waves and surface roller, Proc. 2nd APAC, paper No. 28 in CD-ROM, 12p.
- Walstra, D. J. R., J. A. Roelvink and J. Groeneweg (2000): Calculation of wind-driven currents in a 3D mean flow model, ICCE2000, pp. 1050-1063.
- Zijlema M., J.J. Leendertse J.A.Th.M. van Kester(2002): Omrekenings formules ter belaking van 3D Chezy uit 2D Chezy tbv. OMS, RIKZ & Delft Hydraulics, 23p.