

遡上域を含めた沿岸漂砂量岸沖分布に関する研究

渡 辺 晃*・中 村 裕 史**・磯 部 雅 彦***

1. はじめに

海岸侵食・堆積の原因の一つに、沿岸方向漂砂量の不均衡が挙げられる。この沿岸漂砂量に関して、Kamphuis (1991) や Bodge and Dean (1987) は、実験および現地観測結果により、砕波点付近のみならず遡上域においても同オーダーのピークが現れることを報告した。

そこで、著者ら (1998, これ以降前報と呼ぶ) はこの点に注目し、汀線部での水の運動を再現するために、移動性汀線境界を用いた。それにより遡上域における沿岸漂砂量を算出することを試みた。その結果、砕波点付近における漂砂量分布や、汀線移動モデルに関しては妥当な結果が得られたものの、遡上域における沿岸漂砂量が過小に評価されてしまう傾向があった。

そこで、本報ではこの点を修正し、遡上域付近における沿岸漂砂量の岸沖方向分布をできるだけ精度よく算定することを目的とした。そして、波や地形の条件の変化が沿岸漂砂量分布におよぼす影響についても評価することとした。なお前報同様に、計算条件は規則波・単一粒径・沿岸方向に一樣な地形・一樣勾配を考えている。

2. 基礎方程式と境界条件

本報でも、基本的な計算手法は前報のものを引き継いでいる。よって、重複する部分もあるが、基礎方程式等の計算スキームについて触れておく。

(1) 擬時間の導入

前報同様に、Boussinesq 方程式を扱う際に、浅野・中野 (1992) にない擬時間 \hat{t} を導入することにより計算を簡略化した。つまり、本研究の対象としている条件が沿岸方向に一樣であるという仮定がなされていることから、以下のように沿岸方向波速 C_y を用いて変数変換し、式を変形した。

$$\hat{t} = t - \frac{y}{C_y} \quad \dots\dots\dots (1)$$

これにより、岸沖方向座標・沿岸方向座標・時間とい

う 3 つの独立変数を、岸沖方向座標と擬時間の 2 つに減らすことができる。

(2) 基礎方程式

擬時間の導入により簡略化された Boussinesq 方程式をオーダー評価し、微小項を無視したものを、基礎方程式とした。

なお前報では、Boussinesq 方程式の従属変数として岸沖方向・沿岸方向ともに流速を用いていたが、浅海域での wave set-up, set-down が十分に評価されないという問題点があった。そこで、本報では以下の様に流速のかわりに線流量を用いて計算を行うこととした。

連続式：

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{1}{C_y} \frac{\partial Q}{\partial \hat{t}} = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

x 方向運動量方程式：

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial \hat{t}} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P^2}{D} \right) - \frac{1}{C_y} \frac{\partial}{\partial \hat{t}} \left(\frac{PQ}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ = \frac{h^2}{3} \frac{\partial^3 P}{\partial x^2 \partial \hat{t}} + M_{D_x} - F_x \quad \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

y 方向運動量方程式：

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial \hat{t}} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{PQ}{D} \right) - \frac{1}{C_y} \frac{\partial}{\partial \hat{t}} \left(\frac{Q^2}{D} \right) + \frac{gD}{C_y} \frac{\partial \eta}{\partial \hat{t}} \\ = - \frac{h^2}{3C_y} \frac{\partial^3 P}{\partial x^2 \partial \hat{t}^2} + M_{D_y} - F_y \quad \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

ここで、 x ：岸沖方向座標、 \hat{t} ：擬時間、 P ：岸沖方向線流量、 Q ：沿岸方向線流量、 h ：水深、 D ：全水深、 η ：水面変位、 g ：重力加速度を示す。

また、 M_D は砕波減衰項、 F は底面摩擦項であり、以下の式で評価する。

$$M_{D_x} = \nu_e \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$M_{D_y} = \nu_e \frac{\partial^2 Q}{\partial y^2} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$F_x = \frac{f_{cw}}{2D^2} P \sqrt{P^2 + Q^2} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$F_y = \frac{f_{cw}}{2D^2} Q \sqrt{P^2 + Q^2} \quad \dots\dots\dots (8)$$

なお、 ν_e は砕波の乱れによる渦動粘性係数、 f_{cw} は底面摩

* 正 会 員 工 博 東京大学教授 工学系研究所社会基盤工学専攻
** 株式会社大林組
*** フェロウ 工 博 東京大学教授 新領域創成科学研究科環境工学専攻

擦係数を示す。

渦動粘性係数 ν_e は、佐藤・鈴木 (1990) により導かれたものを用いて次式で表わされる。

$$\nu_e = \frac{g\bar{D}}{\sigma^2} f_D \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 \bar{D} は周期平均の全水深 ($\bar{D} = h + \bar{\eta}$)、 σ は角周波数を示す。また、 f_D は Dibajnia・渡辺 (1987) による碎波減衰係数である。

$$f_D = \alpha_D \tan \beta \sqrt{\frac{g}{D}} \sqrt{\frac{\hat{P} - P_r}{P_s - P_r}} \dots\dots\dots (10)$$

\hat{P} は波進行方向の線流量の振幅、 α_D は碎波点を挟む 1 波長で 0 から 2.5 に線形的に増加する係数、 P_s と P_r はそれぞれ一様勾配上減衰域と一様水深再生域での波進行方向の線流量の振幅で次のように表わされる。

$$P_s = 0.4(0.57 + 5.3 \tan \beta) Ch \dots\dots\dots (11)$$

$$P_r = 0.4 \left(\frac{a}{h}\right)_b Ch \dots\dots\dots (12)$$

C は波速、 $\tan \beta$ は碎波点近傍底面勾配、 $(a/h)_b$ は碎波点での振幅水深比である。

底面摩擦係数 f_{cw} に関しては、田中・Thu (1993) および田中・Sana (1995) により提案されているものを用いる。

(3) 汀線移動モデル

汀線の移動については、波の最先端部の岸沖方向流速 $u_{top}(=P/D)$ を汀線移動速度と考えることにした。なお、先端部での流速は汀線より沖側の 2 点より 1 次的な外挿により求めた値を用いている。また、最も岸側の格子にある程度の伸縮性を持たせることにより、格子間隔にとらわれずに連続性を保ち、より滑らかな汀線移動の表現を可能にした。先端部での格子長さを Δx_i とすると、このモデルは以下ようになる。ただし、ここで i はタイムステップを示している。

$$\Delta x_i^{t+1} = \Delta x_i^t + u_{top} \Delta t \dots\dots\dots (13)$$

$$0.5 \Delta x < \Delta x_i \leq 1.5 \Delta x \dots\dots\dots (14)$$

Δx_i が上限値を超えるような値になる場合に格子数を増やし、また下限値を下回るような値になる場合に格子数を減らす。その際の格子数変化に伴い、先端部では 2 方向の線流量 P と Q および水面変位 η の定義点にずれが生じる。その場合は、そのタイムステップでの各値の波形を維持するように、内挿・外挿を行い処理した。

(4) 碎波判定

佐藤・Kabiling (1993) にならない碎波判定には、水表面水粒子速度 u_s と波速 C の比を用いた。水粒子速度の x 方向成分 u_s は次式で与えられる。

$$u_s = \bar{u} - \left(\frac{D^2}{2} - \frac{h^2}{6}\right) \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} \dots\dots\dots (15)$$

この式を用いて各点での 1 周期間の流速の計算値から水

表面の最大水粒子速度 u_{smax} が決定できる。合田 (1970) を参考にすると、本計算に関しては u_{smax} と C の比の限界値は 0.6~0.7 が妥当な値と考えられた。

(5) 漂砂量算定

Dibajnia・渡辺 (1994) はシートフローに対する無次元漂砂量モデルを、シートフロー状態の漂砂量評価を基礎としながら、掃流状態や砂漣が発達する浮遊状態にも対応できるように拡張している。

まず、図-1(a) のような、規則波と定常流が任意角度で交差する単純化した条件を考える。ここで、 u_w^+ 、 u_w^- は規則波による底面近傍軌道流速ベクトル、 U は定常流の流速ベクトル、 α は交差角である。定常流速は、本研究においては沿岸流のみを考える。この沿岸流速ベクトルを、波の進行方向成分 U_w とそれに直行する成分 U_n とに分ける。波進行方向の底面近傍流速成分の時間波形は、周期 T とすると図-2 のようになる。正・負の流速の継続時間を T_c と T_i で表している。これを用い 1 周期に関して各時間で積分することで、各方向の流速の代表値 u'_c と u'_i を求める。

$$u'_c = \frac{2}{T_c} \int_0^{T_c} (u + U_w)^2 dt, \quad u'_i = \frac{2}{T_i} \int_{T_c}^T (u + U_w)^2 dt \dots\dots\dots (16)$$

以上より、時間の関数であった合成流速ベクトル $\bar{u} + \bar{U}_w$ は、一定値をとる 2 つの流速ベクトル \bar{u}'_c と \bar{u}'_i で置き換えることができる (図-1(b))。

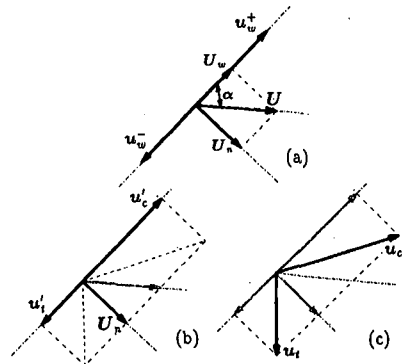


図-1 波・流れの共存する場合の各流速ベクトルの定義

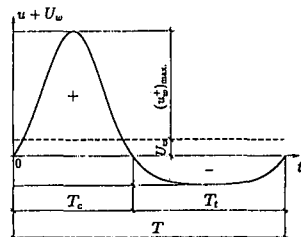


図-2 底面近傍軌道流速の波進行方向成分の時間変化

さらに、 \vec{u}_c と \vec{U}_n のベクトル和を \vec{u}_c で、 \vec{u}_i と \vec{U}_n のベクトル和を \vec{u}_i で表し、最終的に流速場を継続時間がそれぞれ T_c 、 T_i の連続する流速ベクトル \vec{u}_c 及び \vec{u}_i により代表される周期 T の周期運動として表現されると仮定できる(図-1(c))。

これより、無次元漂砂量ベクトル Φ は次式により算定できることになる。

$$\Phi = \frac{\vec{q}_{net}}{w_b d} = 0.001 \frac{\vec{F}}{|F|} |F|^{0.55} \dots\dots\dots (17)$$

ここに、

$$\vec{F} = \frac{T_c(\Omega_c^3 + \Omega_i^3)\vec{u}_c + T_i(\Omega_i^3 + \Omega_c^3)\vec{u}_i}{(u_c + u_i)T} \dots\dots (18)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{if } \omega_j \leq \omega_{critical} \\ \text{if } \omega_j > \omega_{critical} \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \Omega_j = \omega_j \frac{2\omega T_j}{d} \\ \Omega_j = 0 \\ \Omega_j = \omega_{critical} \frac{2\omega T_j}{d} \\ \Omega_j'(\omega_j - \omega_{critical}) \frac{2\omega T_j}{d} \end{array} \right. \dots\dots (19)$$

ここで、 \vec{q}_{net} は単位幅・単位時間当たりのネットの漂砂量ベクトル、 d は底質粒径、 w_b は沈降速度であり、添字 j は c または i で置き換えられる。 ω の限界値 $\omega_{critical}$ は次式で与えられる。

$$\omega_{critical} = 1 - 0.97\sqrt{A} \dots\dots\dots (20)$$

$$A = [1 - \{(\Psi_{rms} - 0.2)/0.4\}^2] \cdot \min(1, 2\lambda/d_0) \dots\dots (21)$$

ここで、 Ψ_{rms} は底面近傍流速のrms値を用いて計算されるシールズ数であり、 λ は砂漣波長、 d_0 は底面近傍軌道直径を表している。シートフロー条件に相当する $\Psi_{rms} > 0.6$ の場合には、 $A=0$ となる。 A が1に近づくにつれ $\omega_{critical}$ は掃流漂砂に相当する値0.03にほぼ等しくなる。

3. 計算精度の確認

(1) 波・流れ場の計算精度

波・流れ場の計算精度を確認するため、Visser (1991)による実験値および水口ら (1978)による実験値との比較を行なった(図-3及び図-4)。波の条件は表-1の通りである。いずれの場合も再現性は良好である。

(2) 汀線移動の計算精度

汀線移動に関しては、Carrier and Greenspan (1957)の非線型長波の非砕波解析解と比較を行なった(図-5)。

表-1 比較する実験条件

case	周期 T (s)	入射波高 H_i (m)	波形勾配 H_0/L_0	入射角 θ_i (deg.)	底面勾配 s
Visser	1.85	0.071	0.015	15.4	1/20
水口ら	0.81	0.0326	0.0327	20.5	1/10.4

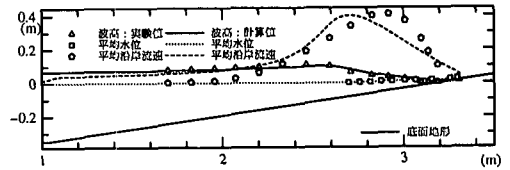


図-3 Visser (1991)の実験との比較

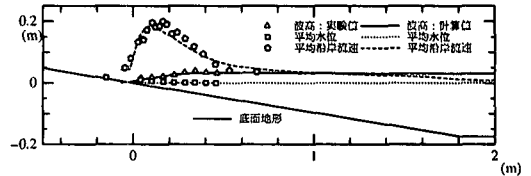


図-4 水口ら (1978)の実験との比較

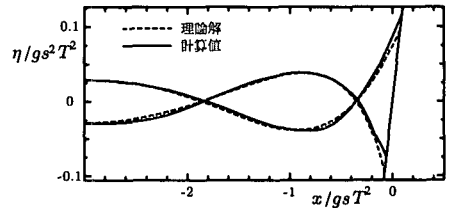


図-5 Carrier and Greenspanの解析解との比較: $T = 2.0(s)$, $s = 1/20$

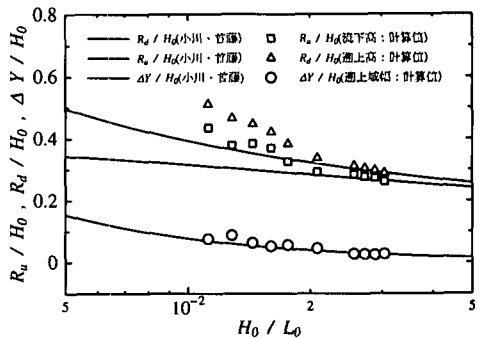


図-6 遡上高・流下高・遡上域幅の検証

汀線付近で計算による波形が解析解に対しやや上にシフトしているが、これは数値粘性などによるエネルギー減衰のために set-up が起きているためと考えられる。

また、汀線の遡上高・流下高・遡上域幅に関して小川・首藤 (1983)で示されている算定式による指標と比較を行ない、その妥当性を検証した(図-6)。遡上域での沿岸漂砂を算定するにあたって遡上域の幅が重要となるが、指標と比較して妥当な値が算定されていることが確認できた。

(3) 漂砂量算定精度

入射波が規則波であるような条件での沿岸漂砂量分布

表-2 実験・計算条件

case	周期 T (s)	入射波高 H_i (m)
case 1	1.15	0.63
case 2	1.38	0.084

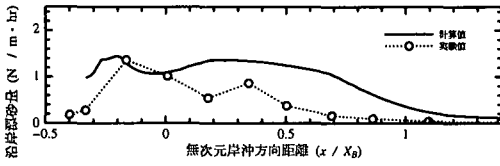


図-7 実測データとの比較 (case 1)

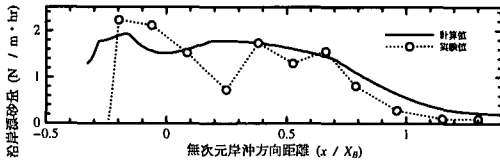


図-8 実測データとの比較 (case 2)

の適当な資料がないため、ここでは Kamphuis (1991) に示されている不規則波での実験データを用いて漂砂量算定精度の検証を行なうこととした。

そのため、ここで示す実験・計算条件のうち、実験値に関しては周期・波高はそれぞれ有義波高 $H_{1/3}$ ・ピーク周期 T_{peak} を示している。

入射部水深 h_i : 0.55 (m), 入射角 θ_i : 10 (deg.), 底面勾配: 1/10, 底質粒径 d_{50} : 0.18 (mm) に関しては共通である。図-7 と図-8 に比較を示す。ただし、 X_B は碎波帯の幅である。

波高分布に代表されるような規則波と不規則波との違いのため、2つのケースともに十分に分布形状が一致しているとはいえない。しかし、これまでに定性的に示されてきた2つのピーク位置がほぼ同様の位置に現れている。また、オーダー的に妥当な漂砂量が求まることが確認できた。

4. 計算結果

以上に示したモデルにより実際に計算を行ない、入射角、入射波高、底面勾配をそれぞれ変化させたときの沿岸漂砂量の岸沖方向分布への影響を調べた。

(1) 入射角の影響

はじめに入射角の影響として、表-3 に示すような入射角に対する沿岸漂砂量を算定した (図-9)。なお、入射波の周期: 10 (s), 入射波高: 2 (m), 入射部水深: 10 (m), 底面勾配: 1/20, 底質粒径: 0.2 (mm) は共通としている。

表-3 計算条件

case	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7
入射角 (deg.)	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	20.0

表-4 計算条件

case	h1	h2	h3	h4	h5	h6
入射波高 (m)	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00

表-5 計算条件

case	s1	s2	s3	s4	s5	s6	s7
底面勾配	1/15	1/20	1/25	1/30	1/35	1/40	1/50

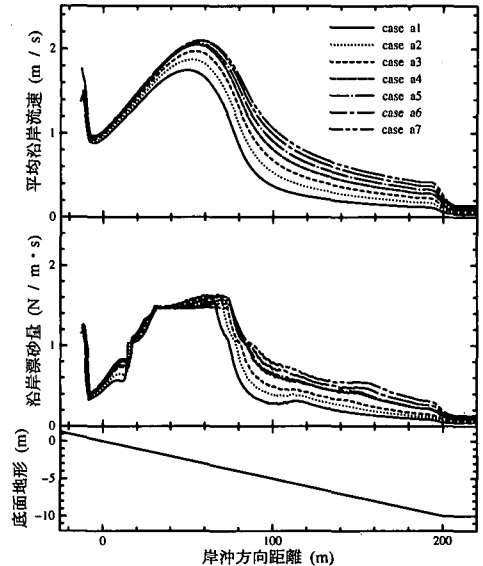


図-9 沿岸漂砂量への入射角の影響, 上段: 沿岸流速, 中段: 沿岸漂砂量, 下段: 底面地形。

(2) 入射波高の影響

入射波高は、表-4 の通りに変化させた (図-10)。ここでも、入射波の周期: 10 (s), 入射角: 10 (deg.), 入射部水深: 10 (m), 底面勾配: 1/20, 底質粒径: 0.2 (mm) は共通である。

(3) 底面勾配の影響

ここでは、表-5 のように底面勾配を変化させた (図-11)。波の条件は、周期: 10 (s), 入射波高: 2 (m), 入射角: 10 (deg.), 入射部水深: 10 (m), 底質粒径: 0.2 (mm) である。

5. まとめ

波・流れ場の計算には、汀線移動モデル及び擬時間を導入した Boussinesq 方程式を用い、漂砂量算定には、Dibajnia・渡辺の漂砂量算定モデルを用いることにより、

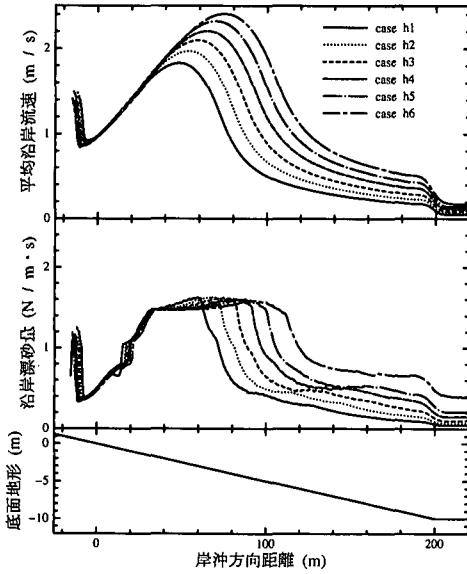


図-10 沿岸漂砂量への入射波高の影響, 上段: 沿岸流速, 中段: 沿岸漂砂量, 下段: 底面勾配.

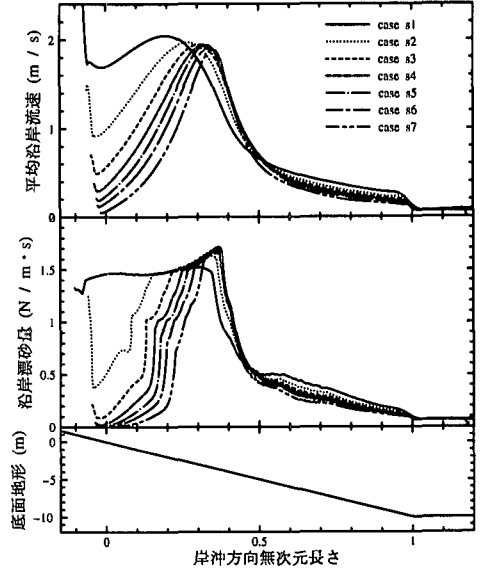


図-11 沿岸漂砂量への底面勾配の影響 (岸沖方向に斜面部長さで無次元化), 上段: 沿岸流速, 中段: 沿岸漂砂量, 下段: 底面勾配.

従来から定性的にも定量的にも示されてきた“沿岸漂砂量の岸沖方向分布の2つのピーク”を数値シミュレーションにより再現することができた。また、入射角、入射波高、底面勾配といった諸条件の変化に対する沿岸漂砂の分布形態の変化を定量的に示した。その結果、

- ・入射角: 碎波点寄りの沿岸漂砂量, ピーク値に影響
 - ・入射波高: 碎波点寄りの沿岸漂砂量に影響
 - ・底面勾配: 遡上域寄りの沿岸漂砂量に影響
- という結果を得た。

参 考 文 献

- 浅野敏之・中野 武 (1992): 斜め遡上波の数値解析, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 26-30.
- 小川由信・首藤伸夫 (1983): Swash zoneの観測, NERC TR, No. 17, TR-82-1, 第7回合同総合現地観測報告書, 海岸環境工学研究センター, pp. 189-203.
- 合田良実 (1970): 碎波指標の整理について, 土木学会論文報告集, 第180号, pp. 39-49.
- 佐藤慎司・鈴木秀典 (1990): 碎波帯における底面流速変動波形の評価法, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 51-55.
- 佐藤慎司・M. Kabiling (1993): Boussinesq方程式を用いた波浪・海浜流・海浜変形の数値計算, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 386-390.

- 田中 仁・A. Thu (1993): 全ての flow regime に適用可能な波・流れ共存場抵抗則, 土木学会論文集, No. 467/II-23, pp. 93-102.
- 田中 仁・A. Sana (1995): 交差する波と流れによる抵抗則の検討, 土木学会論文集, No. 533/II-34, pp. 273-277.
- 渡辺 晃・中村裕史・佐々木淳・小林 博・磯部雅彦 (1998): 斜め入射波の遡上とそれに伴う浜漂砂の数値モデル, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 186-190.
- 水口 優・大嶋義隆・堀川清司 (1978): 沿岸流速の断面分布について, 第25回海岸工学講演会論文集, pp. 425-429.
- Dibajnia, M.・渡辺 晃 (1994): シートフロー漂砂量式の波・流れ交差場への拡張と沿岸漂砂量の検討, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 366-370.
- Bodge, K.R and R.G. Dean (1987): Short-term impoundment of longshore transport, Coastal Sediments '87, pp. 468-483.
- Carrier, G.F. and H.P. Greenspan (1957): Water waves of finite amplitude on a sloping beach, J. Fluid Mech., Vol. 4, pp. 97-109.
- Kampuis, J.W. (1991): Alongshore sediment transport rate distribution, Coastal Sediments '91, pp. 170-183.
- Visser, P.J. (1991): Laboratory measurements of uniform longshore currents, Coastal Engineering, Vol. 15, pp. 563-593.