

傾斜海浜に設置した人工海藻による波浪変形解析

間瀬 肇*・古田 幸也**・酒井 哲郎***
浅野 敏之*・柳生 忠彦****

1. ま え が き

人工海藻工法による波浪制御・海岸侵食制御の試みは、1960年代前半に始まった。Rogers (1986) のレポートによると、海岸侵食制御に対する効果については、現地観測中に人工海藻あるいはその基礎が波によって破壊されてしまって長期間にわたる観測がなされていないので、現在のところ確かめられていない。近年景観を損なわない海岸・海洋構造物の開発が盛んであるが、人工海藻工法はこの点を満足する。しかし、その実用化に当たっては、素材の選定、素材の固定方法や設置方法、人工海藻の設置に伴う波浪や流況の変化予測等の検討すべき問題も多い。

本研究は、浅野ら(1988)が示した人工海藻による波の減衰モデルおよび間瀬ら(1986)が用いた碎波減衰モデルを取り入れた放物型方程式の適用性を水理模型実験により検討した後、その放物型方程式を用いて、人工海藻が設置された傾斜海浜における二次元波浪変形計算を行うものであり、人工海藻工法の実用化のための基礎資料を得ることを目的とする。

2. 数値計算モデル

屈折と回折を同時に扱える放物型方程式は、数値計算が容易であり、近年波浪変形計算モデルとして注目されている。放物型方程式にはエネルギーの減衰効果を導入することができ、人工海藻や碎波によるエネルギー減衰をモデル化しておけば、それらを考慮した波の変形計算を行うことができる。

Booij (1981) によると、エネルギー減衰項を含む緩勾配方程式は次式で表される。

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla \phi) + (k^2 CC_g + i\omega W) \phi = 0 \quad (1)$$

$$\phi = -(igA'/\omega) \exp \left(i \int^x k dx \right) \quad (2)$$

ここで、 ∇ は二次元勾配ベクトル、 C は波速、 C_g は群

速度、 k は波数、 ω は角周波数、 g は重力加速度、 A' は複素振幅、 i は虚数単位、 W はエネルギー減衰係数で波のエネルギー E との間に次の関係がある。

$$\nabla \cdot (EC_g) = -WE \quad (3)$$

式(1)から、Dalrymple ら (1984) の splitting 法により、進行波成分に関する次の放物型方程式が導かれる。

$$\phi_x - iK\phi + (KCC_g)_x \phi / (2KCC_g) - i(CC_g \phi_y)_y / (2KCC_g) = 0 \quad (4)$$

$$K = k(1 + iW/kC_g)^{1/2} \quad (5)$$

ここで、下付きの変数 x および y は、それらに関する微分を意味する。基準点での波数 k_0 を用いて

$$\phi = -(igA/\omega) e^{ik_0 x} \quad (6)$$

とし、式(4)に代入すると次のようになる。

$$A_x - i(K - k_0)A + (KCC_g)_x A / (2KCC_g) - i(CC_g A_y)_y / (2KCC_g) = 0 \quad (7)$$

エネルギー減衰係数 W が小さい場合には

$$iKA = iKA - WA/2C_g \quad (8)$$

となり、これを用いて式(7)の左辺第2項を変形するとともに、他の項の K を k で近似すると Kirby-Dalrymple (1986) が用いたエネルギー減衰項を含む放物型方程式となる。また、Booij (1981) の splitting 法によっても形が少し異なる放物型方程式が得られる。

放物型方程式は、波の進行方向と x 軸とのなす角 θ が大きくなると近似精度が低下する。 θ の許容範囲は、その放物型方程式が波の進行方向の波数を近似できる範囲によっておおよそ決まる。式(7)の放物型方程式においては $|\theta| < 20^\circ$ 程度である。Kirby (1986) は、Booij (1981) の splitting 法により得られる放物型方程式の係数の一部を minimax 近似式 (これにより波数の近似精度を上げる) に現れる係数で置き換えることにより、 θ の許容範囲を広げられることを示した。その他の改良方法としては、波向・波峰線座標を用いる方法、splitting matrix の成分に高次の項まで含める方法 (土屋ら, 1987) などがあるが、minimax 近似を利用した放物型方程式は数値計算が最も容易であり、本研究では、以下に示す minimax 近似を利用した放物型方程式を用いて、波の入射角度が大きい場合に対処する。

* 正会員 工博 京都大学助手 工学部土木工学科

** 正会員 工修 熊谷組

*** 正会員 工博 京都大学助教授 工学部土木工学科

**** 正会員 運輸省第三港建設局 神戸調査設計事務所長

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[k^{1/2} (CC_g)^{1/2} \left\{ 1 - \frac{b_1 M}{k^2 CC_g} \right\} \right] \phi \\ = ikk^{1/2} (CC_g)^{1/2} \left\{ a_0 - \frac{a_1 M}{k^2 CC_g} \right\} \phi \dots\dots\dots (9)$$

$$M\phi = (CC_g \phi_y)_y + i\omega W\phi \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 a_0 、 a_1 および b_1 は minimax 近似式の係数であり、それぞれ 0.9947、-0.8900 および -0.4516 とした。Kirby (1986) は、エネルギー減衰項は小さいと仮定し、式(9)の左辺の $\partial(M\phi)/\partial x$ を無視した。人工海藻によるエネルギー減衰項は小さいものの、砕波によるエネルギー減衰項は必ずしも小さくない。そこで、 $\partial(M\phi)/\partial x$ を無視せずに式を変形すると、次のようになる。

$$A_x + i(k_0 - a_0 k)A + C_{gx}A/(2C_g) \\ + i(a_1 - b_1 k_0/k)(CC_g A_y)_y/(\omega C_g) \\ - b_1 (CC_g A_y)_{yx}/(\omega k C_g) \\ + b_1 \{k_x/(k^2 C_g) + C_{gx}/(2k C_g^2)\} (CC_g A_y)_y/\omega \\ - (a_1 - b_1 k_0/k)WA/C_g \\ + ib_1 \{k_x/(k^2 C_g) + C_{gx}/(2k C_g^2)\} WA \\ - ib_1 W_x A/(k C_g^2) - ib_1 W_x A_x/(k C_g^2) = 0 \dots\dots (11)$$

式(7)および(11)における人工海藻および砕波による W については、以下のように与える。エネルギー減衰場においては、多くの場合(人工海藻の場合も)振幅 a の変化は、次のような指数関数で表される。

$$a = a_0 e^{-k_i x} \dots\dots\dots (12)$$

ここで、 a_0 は初期振幅である。Dalrymple ら (1984) によると、この k_i と W には次の関係がある。

$$W = 2k C_g (k_i/k) \{1 + (k_i/k)^2\}^{1/2} \dots\dots\dots (13)$$

人工海藻による k_i は、浅野ら(1988)によって求められており、それを用いたエネルギー減衰係数を W_1 とする。浅野ら(1988)の k_i および式(13)は、水深が一定という条件のもとに導かれたものであり、傾斜海浜の場合で式(13)を用いることは厳密には正しくないが、一波長内の水深変化が小さいとし(距離 x を微小区間 Δx に区切った時、その間は一定水深として)、式(13)が適用できるものとする。

砕波によるエネルギー減衰係数は、間瀬ら(1986)が用いた Battjes の bore モデルを用いて定式化する。エネルギー平衡式は

$$\frac{\partial}{\partial x} (EC_g) = -\frac{2B}{\gamma^3} \frac{1}{T} \left(\frac{H}{h} \right)^4 E \dots\dots\dots (14)$$

$$\gamma = 0.7 + 5 \tan \theta \dots\dots\dots (15)$$

と表されるので、式(3)との比較から、砕波によるエネルギー減衰係数 W_2 は

$$W_2 = \frac{2B}{\gamma^3} \frac{1}{T} \left(\frac{H}{h} \right)^4 \dots\dots\dots (16)$$

となる。ただし、

$$B = \begin{cases} 11 - 10(h/h_0), & 0.6 < h/h_0 \leq 1.0 \\ 5, & h/h_0 \leq 0.6 \end{cases} \dots\dots (17)$$

である。ここで、 h_0 は砕波水深である。以上より、エネルギー減衰係数は $W = W_1 + W_2$ とする。

放物型方程式で計算された波高 H をそのまま用いて合田の砕波指標により砕波点を算定すると、砕波点はかなり岸側になるので、岩垣ら(1981)による微小振幅波理論の浅水係数とハイパボリック波による浅水係数を便宜的に結び付ける式を用いて、 H から

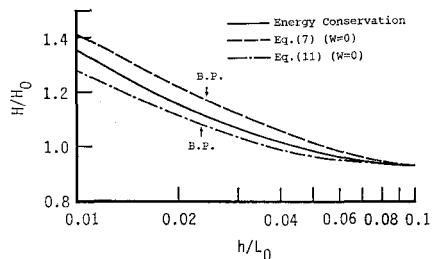
$$H' = H + 0.0015(h/L_0)^{-2.8} (H_0/L_0)^{1.2} H_0 \dots\dots (18)$$

のように有限振幅性を考慮した波高 H' に換算し、

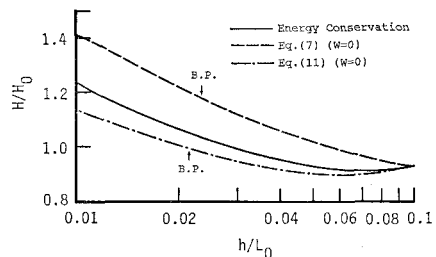
$$H_0/L_0 = 0.17 [1 - \exp \{-1.5\pi h(1 + 15 \tan^4 \theta)/L_0\}] \dots\dots\dots (19)$$

から求められる波高 H_0 と H' が等しくなる点を砕波点とした。 H_0 および L_0 は、それぞれ沖波波高と沖波波長である。

ここで、波向線間におけるエネルギー保存則、 $W=0$ とした式(7)および(11)の放物型方程式を用いて、等深線が平行で直線の海浜に波が斜めに入射する場合の波高変化の計算結果を図-1に示す。計算に当たっては、水深 16 m の地点において振幅 1 m、周期 10 sec、入射角 30° および 45° を入力条件とした。(a)図は入射角が 30° 、(b)図は 45° の場合であり、実線がエネルギー保存則によるもの、砕線が式(7)、一点鎖線が式(11)による計算結果($\Delta x/L_0 = 1/60$ とした)である。ここでは示していないが、入射角が 0° の場合には三者の結果はほとんど一致する。 $W=0$ とした式(7)を変形すればわかるが、この式では屈折の効果を考慮できず、図-1に示してある式(7)による計算結果は、実は入射角が 0° の時のそれと同じである。一方、式(11)



(a) 入射角 30°



(b) 入射角 45°

図-1 等深線が平行な直線海浜上の波高変化

を用いると、入射角の変化に対して異なった結果が得られ、その値は実線に比べて小さいが、式 (18) および (19) で算定される砕波点付近での一点鎖線と実線の差は入射角が 45° の場合で約 6% であり、十分適用に値する。

土屋ら(1987)のモデルでは、高次成分を求めるために、波向線法による計算が必要である。その際、波向線が交差しないように海底地形の平滑化が必要となる。式 (11) を用いれば、一般の不規則な海底地形に対しても付加的な計算は必要ではなく、かつ計算が簡単である。

$W \neq 0$ の場合、式 (11) を用いて入射角が小さい時の波浪変形計算を行うと、砕波点以後の計算結果が振動する。入射角が小さい場合には式 (7) が適用でき、かつ安定した計算結果が得られるので、波浪変形計算に当たっては、波の入射角が 20° までは式 (7)、それ以上の場合には式 (11) を用いることにする。

3. 人工海藻による波高減衰に関する実験結果と計算結果の比較

3.1 実験装置および実験方法 (運輸省第三港湾建設局神戸調査設計事務所実験報告書(1989)による)

実験は、波高減衰効果が大きい素材を選定するための実験(素材実験)と、選定された素材についてより詳細に波高減衰効果を調べるための実験(波高減衰実験)から成り、長さ 64 m、幅 1.5 m、高さ 1.5 m の造波水路で行われた。模型海浜の勾配は 1/50 である。波高計は斜面法先を始点として 5 m 間隔で 5 台 (W-2~W-6)、さらに造波板の 5 m 下手(素材実験の場合)あるいは斜面法先の 5 m 上手(波高減衰実験の場合)に 1 台 (W-1) が設置された。一樣水深部の水深は 60 および 80 cm とした。

素材実験に関しては、次の 3 種類の素材が用いられた。

A 素材: ポリプロピレン (発泡), 比重 0.54, 幅 15.5 mm, 厚さ 0.6 mm; B 素材: ポリエチレン, 比重 0.96, 幅 50 mm, 厚さ 0.02 mm; C 素材: ポリプロピレン, 比重 0.90, 幅 15.5 mm, 厚さ 0.55 mm

人工海藻の模型は、 $1.48 \text{ m} \times 0.9 \text{ m}$ の金網をベースとして上記の素材を千鳥状に配置したものであり、単位面積当りの本数は 0.0925 本/cm^2 とした。これを 2 枚、波高計 W-2~W-3, W-3~W-4, W-4~W-5, W-5~W-6 間に設置した。

波高減衰実験では、波高減衰効果が最も大きかった C 素材を用いた。人工海藻の単位面積当りの本数は 0.0949 本/cm^2 であり、波高計 W-2~W-4 区間に設置した。

3.2 数値計算に用いる基礎式

実験は一次元水路で行われているので、数値計算においても水路延長方向のみの波高変化を考えればよい。す

なわち、造波水路延長方向に x 軸を取り(斜面法先の位置を $x=0$ とする)、水路幅方向に y 軸を取ったとき、 y 方向微分は 0 となるので、式 (7) は次のようになる。

$$A_x - i(K - k_0)A + (KCC_g)_x A / (2KCC_g) = 0 \quad \dots\dots\dots (20)$$

3.3 実験結果と計算結果の比較

図-2 に素材実験結果の一例を示す。人工海藻を波高計 W-5~W-6 の間 ($15 \text{ m} < x < 20 \text{ m}$) に設置した場合である。下段の図は波高の実測値と計算値をそのままプロットしたもの、上段は、人工海藻を設置した状態において測定された(計算された)波高 H を人工海藻を設置しない状態で測定された(計算された)波高 H' で無次元化して示したものである。ここでは、等価直径を 15.5 mm (A および B 素材の幅) とし、その他のパラメータは浅野ら(1988)が用いた値をそのまま用いた。

素材実験の結果を整理すると、次のようである。1) 水路の底面および側壁における摩擦のために、人工海藻が設置されていない領域においても波高の減衰がみられ、

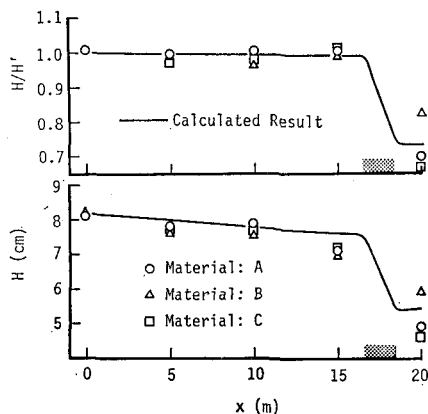


図-2 傾斜海浜上の波高変化に関する実験結果と計算結果の比較

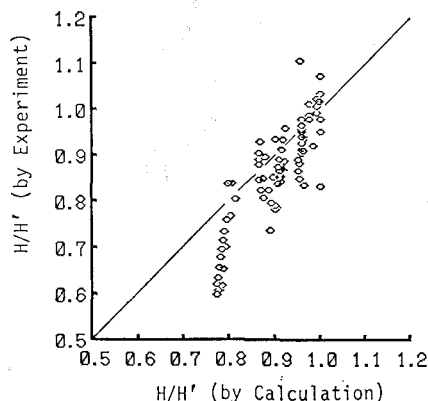


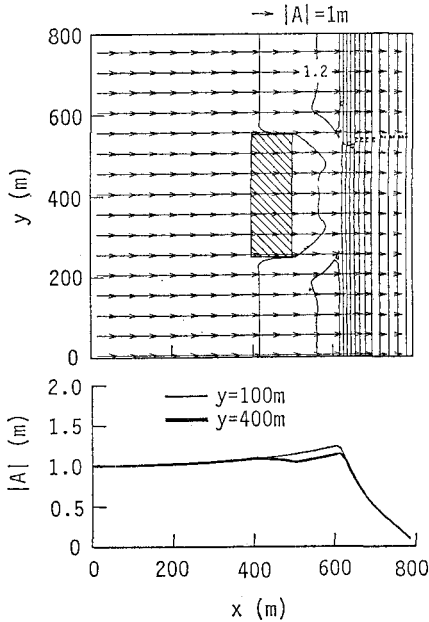
図-3 人工海藻による波高減衰効果に関する実験結果と計算結果の比較

実験結果は計算結果に比べ小さくなる。2) 摩擦の影響が入らないように無次元波高を用いて整理すると、両者は比較的良好一致する。3) C素材によって作られた人工海藻が、最も波高減衰効果大きい。

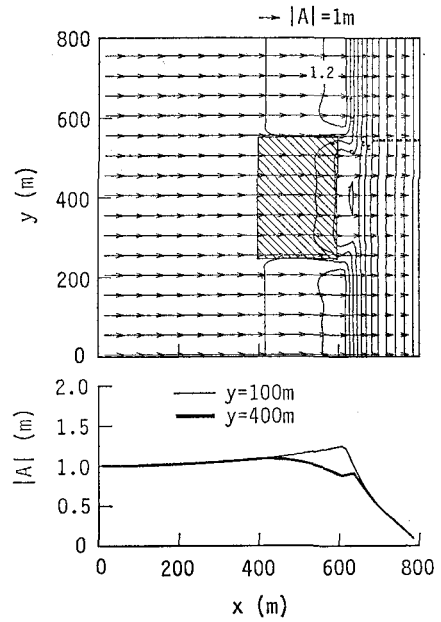
波高減衰実験の結果を図-3に示す。これは、波高計 W-3 および W-4 の地点における無次元波高の実験値と計算値を比較したものである。ただし、波高計 W-1 お

よび W-2 により測定された、人工海藻を設置した場合と設置しない場合の波高の差（入射波高の差）が 1 cm 以内の実験データだけを用いた。図-3 によると、実験結果の方が計算結果より人工海藻による波高減衰効果が大きくなっているが、両者の対応は良い。

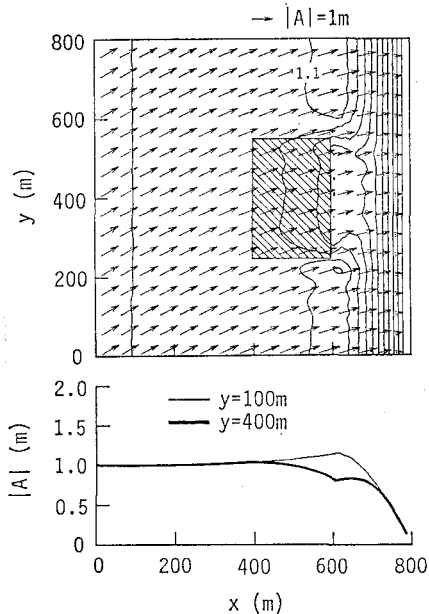
計算結果をより実験結果と一致させるためには、海藻の運動と水粒子速度との相対速度を用いて抗力項をモデ



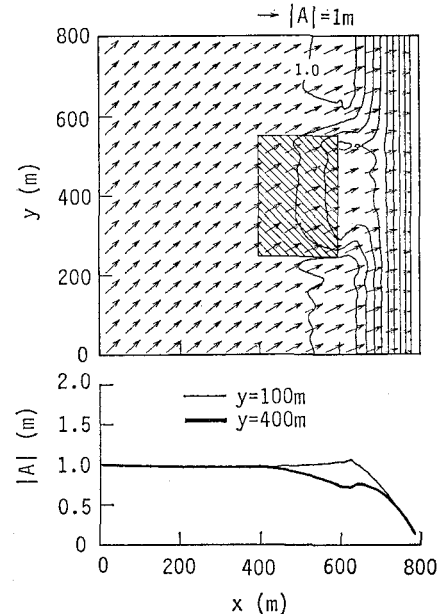
(a) 人工海藻 300 m × 100 m, 入射角 0°



(b) 人工海藻 300 m × 200 m, 入射角 0°



(c) 人工海藻 300 m × 200 m, 入射角 30°



(d) 人工海藻 300 m × 200 m, 入射角 45°

図-4 人工海藻を設置した傾斜海浜上の波浪変形の計算結果

ル化すること、その際の抗力係数を正しく評価すること、海藻の運動によって生じる乱れの状況に応じて渦動粘性係数を設定することなどが考えられるが、浅野ら(1988)のモデル化において設定されたパラメータは良好な計算結果を与えるよう程よく釣りあっていると思われる。

4. 人工海藻を設置した傾斜海浜上の二次元波浪変形の計算

4.1 計算条件

計算領域は x 方向に 800 m, y 方向に 800 m の正方形領域とし、海底地形は y 方向には水深が変化しない、斜面勾配 1/50 の一様勾配地形とした。 $x=800$ m が汀線の位置である。人工海藻の長さ、等価直径、密度は、Rogers(1986)のレポートを参考にし、それぞれ 3 m, 2 cm, 2000 本/m² とし、これを $400 \text{ m} \leq x \leq 500 \text{ m}$, $250 \text{ m} \leq y \leq 550 \text{ m}$ の範囲に設置した場合と、 $400 \text{ m} \leq x \leq 600 \text{ m}$, $250 \text{ m} \leq y \leq 550 \text{ m}$ の範囲に設置した場合の2種類を計算の対象とした。また、入射波の振幅は 1 m とし、周期は 6, 8 および 10 sec の3種類とした。 Δx は、 $h/L_0 > 0.05$ では $L_0/30$ 、それより浅いところでは $L_0/60$ とし、 Δy は $L_0/30$ とした。

数値計算には、Crank-Nicholson の陰解法を用いた。側方境界条件としては、側方境界の1格子外側の水深は境界のそれと等しいと仮定し、土屋ら(1987)が提案した次式の放射条件を用いた。

$$\left. \begin{aligned} A_N^i &= A_N^i \exp(-ik\Delta y \sin \theta) \\ A_{N+1}^i &= A_N^i \exp(ik\Delta y \sin \theta) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (21)$$

ここで、複素振幅 A の右上の添字は x 方向の格子点番号、右下の添字は y 方向の格子点番号であり、 $y=0$ m において 1, $y=800$ m で N としている。式(21)の指数部を Taylor 展開して Δy の1次の項までとったものが、前進差分による差分式となる。上手側の $k \sin \theta$ は Snell の法則により与える。下手側は1ステップ前の複素振幅 A を用いて

$$\left. \begin{aligned} k \sin \theta &= \partial \beta / \partial y \\ \beta &= \tan^{-1} (\text{Im } A / \text{Re } A) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (22)$$

と与える。ここで、Im および Re は複素数の虚数部と実数部を意味する。

4.2 計算結果

図—4 (a)～(d) は、4 例の計算結果を示したものである。入射波の周期はすべて 10 sec であり、入射角は (a) 図と (b) 図が 0°, (c) 図が 30°, (d) 図が 45° である。上段の図では矢印を用いて波の振幅と伝播方向を示すとともに、0.1 m おきの等振幅線を示してある。斜線部分に人工海藻がある。下段の図には、 $y=100$ m および $y=400$ m に沿った振幅変化をそれぞれ細線と太線で示してある。

図—4 (a) と (b) から、波の進行方向の人工海藻の敷設長さが 100 m ではあまり波高減衰効果は期待できないが、敷設長さが 200 m になると、人工海藻による波高減衰効果が期待できることがわかる。波が斜めに入射する場合、図—4 (c) と (d) にみられるように、波の進行に伴って波向は汀線に直角に近づいていく。側方境界条件として前進差分あるいは中央差分を用いた場合には、側方にじょう乱が生じたが、土屋ら(1987)の放射条件を用いると、図に示すように安定した計算結果が得られた。

5. 結 び

本研究は、人工海藻が設置された傾斜海浜における二次元波浪場の浅水変形、屈折、回折および砕波変形を計算するための放物型方程式を示し、その妥当性を水理模型実験により検討した後、具体的な波浪変形計算を行ったものである。

現地に対してもこうした計算により、人工海藻を設置した場合どれ程の波高減衰効果が得られるのか、あるいは、所定の波高減衰効果を得るためにはどのくらいの規模の人工海藻が必要となるかを見積ることができると期待される。

最後に、本研究は運輸省第三港湾建設局神戸調査設計事務所の「人工海藻による養浜開発調査の研究」の一部として実施したものであり、お世話になった関係者の方々に謝意を表する。

参 考 文 献

- 浅野敏之・筒井勝治・酒井哲郎 (1988): 海藻が繁茂する場の波高減衰の特性, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 138～142.
- 岩垣雄一・塩田啓介・土居宏行 (1981): 有限振幅波の浅水係数と屈折係数, 第 28 回海岸工学講演会論文集, pp. 99～103.
- 土屋義人・山下隆男・山元淳史 (1987): 放物型屈折・回折方程式の数値計算法と現地海岸への適用, 第 34 回海岸工学講演会論文集, pp. 96～100.
- 間瀬 肇・松本明男・岩垣雄一 (1986): 不規則波の浅水・砕波変形計算モデルに関する研究, 土木学会論文集, 第 375 号, II-6, pp. 221～230.
- Booij, N. (1981): Gravity waves on water with non-uniform depth and currents, Report 81-1, Dept. Civil Eng., Delft Univ. of Tech., The Netherlands. 130 p.
- Dalrymple, R. A., J. T. Kirby and P. A. Hwang (1984): Wave diffraction due to areas of energy dissipation, Jour. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., Vol. 110, No. 1, ASCE, pp. 67～79.
- Kirby, J. T. (1986): Rational approximations in the parabolic equation method for water waves, Coastal Eng., Vol. 10, No. 3, pp. 355～378.
- Kirby, J. T. and R. A. Dalrymple (1986): Modeling waves in surfzones and around islands, Jour. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., Vol. 112, No. 1, ASCE, pp. 78～93.
- Rogers, S. (1986): Artificial seaweed for shoreline erosion control, UNC Sea Grant Pub., UNC-SG-WP-8-6-4, 18 p.