

# 実海域地形を考慮した多方向不規則波による 波、海浜流、地形変化に関する数値実験

水工学研究室 樺澤 弘悦  
指導教官 細山田 得三

## 1 研究目的

我が国は国土の約 70% が山岳地帯であり、一方海岸線は 34265km にも及んでいる。このため、古くから低平地である沿岸平野部に人口が集中してきた。現在わが国の海岸付近は様々な建設構造物が設置されるとともに、人々の憩いの場として利用され、人々にとって欠かすことのできない場である。しかし台風、冬季波浪などの厳しい波浪条件やダム、海岸構造物の建設によって起こる海への土砂流出の減少と漂砂の異変、海岸自体の地盤沈下などによって年々砂浜が侵食される傾向のある海岸が多い。

日本の海岸は海岸防災や港湾建設のため種々の海岸構造物が設置され、複雑な形状をなしている。このような複雑な現象を理解するためには、細かい地形情報を取り込んだより現実的な条件に基づいた数値実験や室内実験が不可欠である。特に現実的な波の条件は多方向であり、かつ不規則である。本研究ではより現実的な海岸波動場を数値実験によって表現するため、波動の分散性を考慮した波動場数値モデルを用いて、多方向不規則波を入射波とした波動場、海浜流、地形変化、および構造物との相互関係を把握することを目的とする。

## 2 数値計算法

本数値計算では波動場、海浜流、地形変化の支配方程式を 1 つの時間ステップに入れることにより、3 者が互いに影響しながら時間発展することを計算できる。

### 2.1 波動場の計算

本研究では、二次元の連続式(1)と修正ブシネスク方程式(2)、(3)、多方向不規則波を用いて波動場の数値計算を行った。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q_x^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{Q_x Q_y}{D} \right) + gD \frac{\partial h}{\partial x} + MD_x = \left( B + \frac{1}{3} \right) t^2 \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial^2 Q_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Q_y}{\partial x \partial y} \right) + Bg\hat{h} \left( \frac{\partial^3 h}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 h}{\partial x \partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial Q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q_x Q_y}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{Q_y^2}{D} \right) + gD \frac{\partial h}{\partial y} + MD_y = \left( B + \frac{1}{3} \right) t^2 \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial^2 Q_x}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 Q_y}{\partial y^2} \right) + Bg\hat{h} \left( \frac{\partial^3 h}{\partial y^3} + \frac{\partial^3 h}{\partial y \partial x^2} \right) \quad (3)$$

ここで、 $t$ 、 $Q_x$ 、 $Q_y$ 、 $h$ 、 $B$ 、 $d$ 、 $f_d$ 、 $MD$  はそれぞれ時間、岸沖方向の線流量、沿岸方向の線流量、水位変動、静水深、ブシネスク方程式の形による定数、水深 ( $+h$ )、砕波項、エネルギー減衰項である。

エネルギー減衰項は砕波減衰項と渦動粘性係数からなり、式(4)、(5)でされる。

$$MD_x = n_e \left( \frac{\partial^2 Q_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Q_y}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

$$MD_y = n_e \left( \frac{\partial^2 Q_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Q_y}{\partial y^2} \right) \quad (5)$$

ここで  $n_e$  は渦動粘性係数であり式(6)、(7)で示される。

$$n_e = \frac{gd}{S^2} f_D \quad (6)$$

$$n_e = 8 \times 10^{-4} \sqrt{gd} \frac{d}{s} \quad (7)$$

### 2.2 海浜流の計算

平面 2 次元の海浜流の流速 ( $U, V$ ) は式(8)、(9)によって流量を水深で除し、有義波の 1 周期にわたって平均することによって計算した。流速は 2 次元を仮定し、鉛直方向に平均された流れ場について計算を行った。

$$U = \frac{Q_x}{D + h} \quad (8)$$

$$V = \frac{Q_y}{D + h} \quad (9)$$

### 2.3 碎波減衰係数の計算

碎波減衰係数の計算は式(10)を用いて行う。

$$f_D = a_{D,s} \sqrt{\frac{g}{d} \frac{\hat{Q} - Q_r}{Q_s - Q_r}} \quad (10)$$

ここで、 $a_{D,s}$ 、 $d$ 、 $\hat{Q}$  はそれぞれ碎波帯で 2.5 となる係数、 $d$  は海底勾配、 $\hat{Q}$  は平均水深、線流量の振幅であり、 $Q_s$ 、 $Q_r$  は次式で計算される。

$$Q_s = 0.4(0.57 + 5.3s) \sqrt{gd^3} \quad (11)$$

$$Q_r = 0.135 \sqrt{gd^3} \quad (12)$$

### 2.4 地形変化の計算

地形変化には海浜流とそれに伴う漂砂現象が大きく関係しており、計算にはベイラードによって提案された方法を用いた。式(13)は漂砂量、式(14)は浮遊砂量、式(15)は掃流砂量である。これらによって各地点ごとの漂砂量と方向を求め、地形変化の計算は式(16)によって局所的な勾配の影響を考慮して漂砂量を修正し、式(17)の底質量保存式によって地形変化を計算した。

$$\vec{q} = \vec{q}_s + \vec{q}_B \quad (13)$$

$$\vec{q}_s = \frac{C_f \mathbf{e}_B}{(r_s/r - 1)g w_s} \left( \vec{u}_b |\vec{u}_b|^2 - \frac{\mathbf{e}_s}{w_s} s |\vec{u}_b|^5 \mathbf{i} \right) \quad (14)$$

$$\vec{q}_B = \frac{C_f \mathbf{e}_B}{(r_s/r - 1) \tan f} \left( \vec{u}_b |\vec{u}_b|^2 - \frac{s}{\tan f} |\vec{u}_b|^3 \mathbf{i} \right) \quad (15)$$

$$\vec{q}_m = \vec{q} + \mathbf{e} |\vec{q}| \nabla h \quad (16)$$

$$\frac{1}{1 - I} \frac{dh}{dt} = \nabla \cdot \vec{q}_m \quad (17)$$

ここで、 $q$ 、 $q_s$ 、 $q_b$ 、 $s$ 、 $C_f$ 、 $\tan f = 0.78$ 、 $w_s = 2.5$ 、 $\mathbf{e}_s = 0.13$ 、 $\mathbf{e}_B = 0.0025$ 、 $u_b$ 、 $q_m$ 、 $h$ 、 $\mathbf{e}$  はそれぞれ体積漂砂量、浮遊砂量、掃流砂量、水の密度、底質の密度、抗力係数、底質の内部摩擦角、沈降速度、定数、底面流速、局所漂砂量、水深、底質の空隙率、局所的な勾配の影響を表す係数である。

### 3 計算対象

本研究で計算対象とした計算領域は仮想的に作成した海浜地形 3 ケースと、新潟西海岸の実地形である。仮想的な海浜地形は一様勾配を持つ地形に、構造物がない場合、離岸堤(天端+1.5m)を設置した場合、潜堤(-1.5m)を設置した場合の 3 ケースである。仮想地形の領域は岸沖方向 500m、沿岸方向 1000m であり、 $dx=5m$ 、 $dy=5m$  の矩形格子で覆い、 $x,y$  方向の格子数

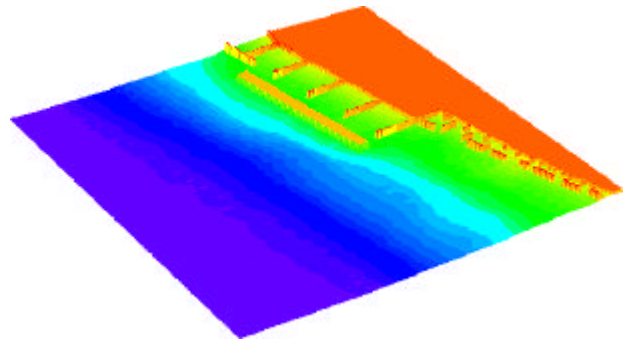


図-3.1 新潟西海岸の地形図をメッシュ化したもの

はそれぞれ 100、200 のである。波の条件は有義波高 4.0m、有義周期 9.0 秒、主波向き 45° で行った。図-3.1 に新潟西海岸の地形図をメッシュ化したデータを可視化したものを示す。新潟西海岸の実地形を取り入れたケースについては岸沖方向 2550m、沿岸方向 2300m の領域を  $dx=5m$ 、 $dy=5m$  の矩形格子で覆い、それぞれ 510、460 の領域とした。波の条件はこの領域のエネルギーピーク波である有義波高 4.0m、有義周期 9.0 秒、計算領域に対して主波向き 12° で行った。どちらも計算時間間隔は 0.1 秒とした。

## 4 結果

### 4.1 モデル地形

#### 4.1.1 水位変動の計算結果

図-4.1 には波が定常状態になった後の水位変動の瞬時値を示す。この 3 ケースの結果を比較すると、構造物を設置していないケースでは、岸側に近くなるほど波高が徐々に減衰していることがわかる。離岸堤を設置したケースでは離岸堤の形状が直立であり、完全反射となっているため、構造物前面において、入射波と反射波が合成されて、波高が増大している。また、離岸堤背面においては構造物を越波し、落下した水塊によって発生したと思われる、周期の短い散乱波が見られる。離岸堤による遮蔽域では波高が減少し、多方向波であるため明瞭ではないが、波の回折現象が発生している。潜堤を設置したケースでは、潜堤の上面では波が乱れており、潜堤の背面においては全体的に波高が減少していることがわかる。また、全ケースにおいて波の屈折現象や砂浜への波の遡上が見られる。そして多方向波特有の切れ波が見られる。

#### 4.1.2 碎波減衰係数の計算結果

図-4.1 に波が定常状態になった後の碎波減衰係数の分布を示す。

この3ケースを比較すると、構造物を設置していないケースでは、汀線の全域にわたって比較的強い碎波が発生しており、構造物が無い場合エネルギーの減衰が無く、碎波帯が他のケースよりも広がっている。離岸堤を設置したケースでは、離岸堤によって遮蔽されているため、汀線付近ではさほど碎波が発生していない。そして、離岸堤前面においては入射波と反射波が重複して碎波したと思われるものや、背面においては離岸堤を越波して落下して発生したと思われる碎波が見られる。潜堤を設置したケースでは潜堤上部において碎波が発生し、波が減衰する原因と考えられる。そして、潜堤によって波が減衰するため、汀線付近ではさほど碎波は発生していない。また、離岸堤を設置したケースと、潜堤を設置したケースでは領域右上部の隅角部において碎波が発生している。これは海浜流によって運ばれた底質が堆積し、水深が初期状態より浅くなり汀線が前進したためと考えられる。

#### 4.1.3 海浜流の流速ベクトル

図-4.3 に計算開始から 3600 秒後の海浜流の流速ベクトルを可視化したものを示す。海浜流のベクトルは領域内で渦状の循環流を形成している。今回の計算では境界にスポンジ層を設けているが、境界近くでの流れの循環が強く形成されている。

構造物を設置していないケースでは沿岸方向に一樣な流れが発生している。離岸堤を設置したケースでは離岸堤が不透過であるため、離岸堤前面では構造物に沿って下向きの流れが発生し、背面では離岸堤を回り込み上向きに沿岸方向へ一樣な流れが発生している。離岸堤上部においては越波による流速変動を非周期的な流速として計算しているため、海浜流として現れているものと思われる。潜堤を設置したケースでは潜堤の上部において強い流れが発生しているが、構造物の岸側においてはそれほど強い流れは発生していない。このことは、潜堤による伝達波の減衰によるものである。

#### 4.1.4 地形変化量の計算結果

図-4.4 に計算開始から 3600 秒後の初期地形からの地形変化量を示す。

構造物が設置していないケースでは波のエネルギーを遮る構造物が無い場合、この図では不明瞭ではあるが、Aの汀線全域にわたって地形変化が発生している。そして B では沖側へ流れ出る海浜流によって底質が輸送されていることがわかる。また、領域の左上には底質が堆積することがわかる。

離岸堤を設置したケースでは離岸堤前面に発生した流れによって、C において比較的広い範囲にわたって

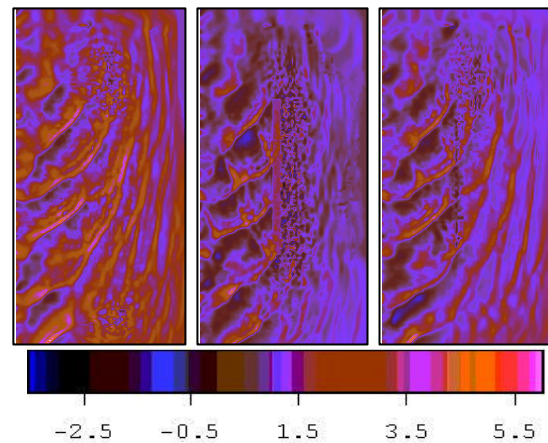


図-4.1 水位変動 (m)  
(左：構造物なし 中：離岸堤 右：潜堤)

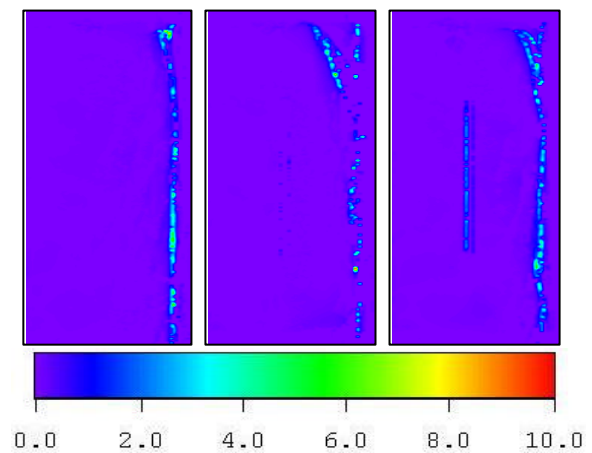


図-4.2 碎波減衰係数 (s<sup>-1</sup>)  
(左：構造物なし 中：離岸堤 右：潜堤)

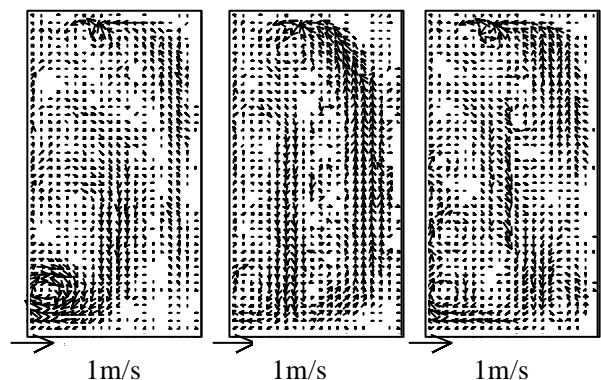


図-4.3 海浜流の流速の計算結果(3600 秒後)  
(左：構造物なし 中：離岸堤 右：潜堤)

地形変化が発生し、その後領域の下側の D に底質が堆積している。離岸堤の背面に回りこんだ流れによって E の領域右下の汀線付近において広い領域に渡って侵食が発生し、領域左上の F に底質が堆積していることがわかる。またこのケースでは離岸堤による遮蔽領域が存在するため、この図では不明瞭であるが汀線付近には底質が堆積する領域と侵食される領域が存在している。

潜堤を設置したケースでは G の潜堤の前面や下側では局所的な洗堀が発生している。その後領域の下側底質が堆積している。潜堤の背面に回りこんだ流れによって H の潜堤右下において侵食が発生し、I の中央下に底質が堆積していることがわかる。潜堤背後において上側に向かって流れる流れによって、汀線付近において地形変化が発生し、その後、領域右上の J において底質が堆積していることがわかる。また汀線付近では大きな地形変化は発生していない。

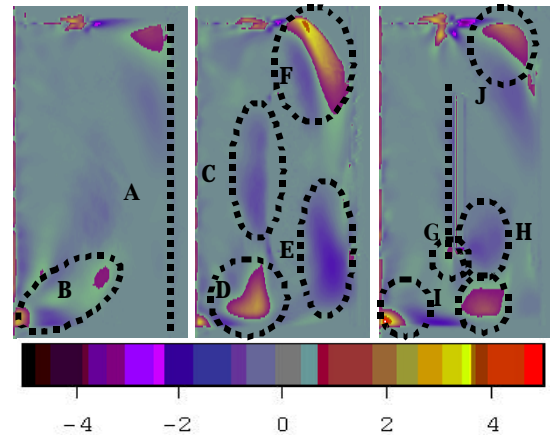


図-4.4 地形変化量(3600 秒後) (m)  
(左：構造物なし 中：離岸堤 右：潜堤)

## 4.2 実地形を取り入れたケース

### 4.2.1 波の計算結果

図-4.5 に波が定常状態になった後の水位変動の空間分布を示す。

この図から潜堤の前面においては様々な周期の不規則的な波が見られるが、潜堤より岸側においては波が減衰し、さらに岸側では波長が長く、波高の低い波が見られる。これは、一度碎波した波が再度安定した波となって伝播したためと思われる。また、突堤先端部によって波が減衰されるため、波峰線がやや湾曲した形となっている。そして、突堤に沿って波高が増大する沿い波が見られる。領域の上部、下部の直立護岸が設置されている前面においては、直立護岸で越波が無い場合、完全反射となり、入射波と反射波が合成され、多重反射となっている。また、上部の直立護岸の背後では、波が回折している様子がわかる。

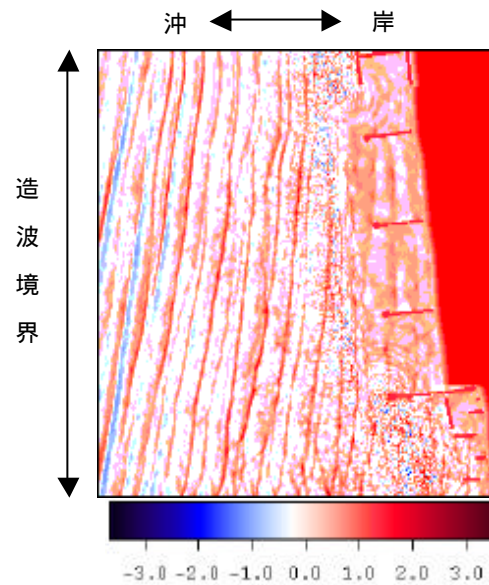


図-4.5 新潟西海岸の水位分布 (m)

### 4.2.2 碎波減衰係数の計算結果

図-4.6 に波が定常状態になった後の碎波減衰係数の瞬時値を示す。

この図より、潜堤の周辺と汀線付近で碎波が発生していることがわかる。また、突堤付近では沿い波が発生し、その波が碎波したと思われる部分や突堤からの反射波と入射波合成されて碎波したと考えられる部分が見られる。領域の上部と下部の直立護岸前面では多重反射による碎波が発生している。

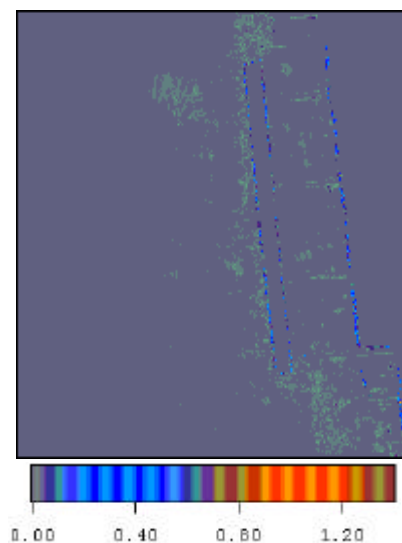


図-4.6 碎波減衰係数の分布 (s<sup>-1</sup>)

### 4.2.3 海浜流の流速ベクトル

図-4.7 に計算開始から 2300 秒後の計算領域全体における海浜流の流速ベクトルを可視化したものを示す。

図-4.8 はその汀線付近の拡大図である。また、図-4.9 に国土交通省新潟港湾空港技術調査事務所によって行われた大規模な室内実験によって計測された海浜の実験値を示す。模型実験の実験条件は模型縮尺 1/25、波高 4.0m、波向き周期 9.0 秒の一方方向不規則波を用いている。図-4.8 と 4.9 は計算と実験の比較を行うため、ほぼ同領域となっている。

図-4.7 の領域中央部において上部から下部へ向かって大きな流れが渦を伴いながら発生している。潜堤の周辺では強力な海浜流が生じている。この流れは循環や蛇行をしている。突堤間では突堤間の距離と同じようなスケールの循環流が生じている。各突堤先端付近および計算領域上部の直立護岸と潜堤の開口部においては、早い流速が発生している。また、突堤付近においては、突堤に沿って沖側へ流れ出る流れが見られる。

計算と実験の比較を行うと、図の右側のから 1、2 番目の突堤付近では潜堤を回りこむ流れや突堤間を左から右へと流れる流れがほぼ一致している。しかし、左側では全く一致していない。この理由としては波の条件の違いと実験では潜堤に開口部が設けてあるためと考えられる。

## 5 結論

本研究を行うことにより以下の知見を得るに至った。修正ブシネスク方程式により、波の分散性や波の進行にともなう屈折、構造物による回折を計算できた。多方向不規則波を計算に取り入れることができた。また、碎波頂の空間分布より碎波帯を空間的にとらえることができた。海浜流やそれに伴う地形変化を漂砂量、掃流砂量およびそれに伴う地形変化の時間発展を計算できた。室内実験と数値計算の結果との定性的な一致が得られた。

## 謝辞

本研究の数値計算結果の妥当性を検討するにあたり、国土交通省北陸整備局新潟港湾空港技術調査事務所の白石哲也所長、高野剛光係長には実験データを提供していただき、ここに謝意を表す。

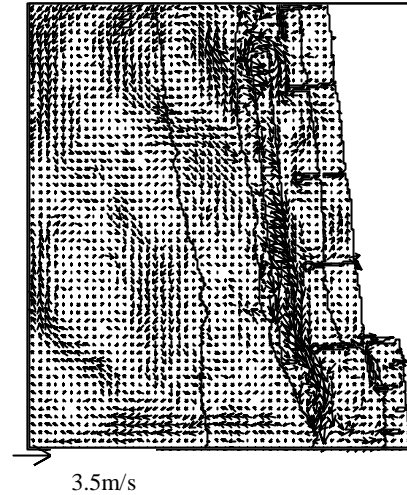


図-4.7 実地形を用いた海浜流の流速の計算結果(2300 秒後)

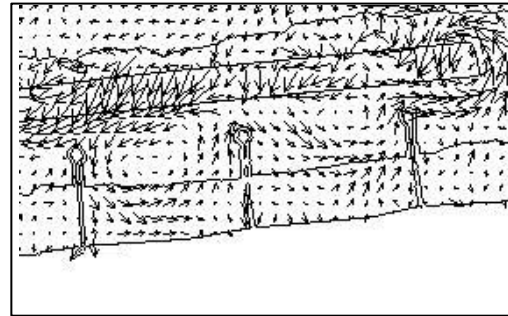


図-4.8 数値計算による海浜流の流速ベクトル (汀線付近の拡大図)

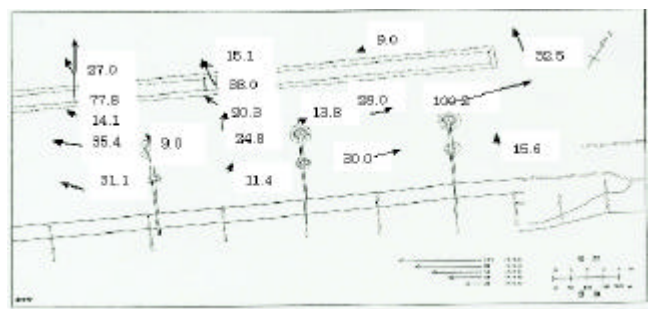


図-4.9 室内実験の流速拡大図

## 参考文献

- [ 1 ] 合田良實 : 港湾構造物の耐波設計, 波浪工学への序説, 鹿島出版会, pp.173 ~ 174 (1990)
- [ 2 ] 服部昌太郎 : 土木系大学講義シリーズ 13, 海岸工学, コロナ社, pp.30
- [ 3 ] 海岸波動 (波・構造物・地盤の相互作用の解析法), 土木学会海岸工学委員会 研究現況レビュー小委員会(1994), pp.520.
- [ 4 ] 海岸環境工学 海岸過程の理論・観測・予測方法 本間仁監修 堀川清 司編 東京大学出版会(1985), pp.575.
- [ 5 ] 岩垣雄一・榎木亨: 海岸工学, 共立出版 (1979), pp.463.
- [ 6 ] 榎木 亨・岩田好一郎・松本 昇: 砕波後の波の変形について, 第 20 回海岸工学講演会論文集(1973), pp.565 ~ 570.
- [ 7 ] 平口博丸・丸山康樹: 斜め入射波に対する放物型方程式の適用性の拡張, 第 33 回海岸工学講演会論文集(1986), pp.565 ~ 570.
- [ 8 ] 渡辺晃・丸山康樹: 屈折・回折・砕波減衰を含む波浪場の数値解析法, 第 31 回海岸工学講演会論文集(1984), pp.114 ~ 118.
- [ 9 ] 渡辺晃・丸山康樹・清水隆夫・榊山 勉: 構造物設置に伴う三次元海浜変形の数値予測モデル, 第 31 回海岸工学講演会論文集(1984), pp.406 ~ 410.
- [ 10 ] 佐藤慎司・Michael Kabiling: 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(1993)pp386 ~ 390
- [ 11 ] Bailard, J.A (1981) An energetics total load sediment transport model for a plane sloping beach, J, Geophys. Res., vol.86, No. C11, pp, 10938-10954