

潜水浮防波堤周りの海浜流場と海浜地形変化に関する研究

村上宗隆*・水谷法美**・岩田好一朗***・下田直克****

1. 緒 言

近年、国土保全、防災などの面から環境を損なわない新しい海浜保全工法の必要性が急務の課題となっている。著者らは、従来の構造物に比べて景観や水質交換性の面から利点の大きい潜水浮防波堤を取り挙げ、潜水浮防波堤の海浜保全機能について論議してきた(岩田ら, 1990)。そして、潜水浮防波堤は背後に尖角州を形成さすなど海浜保全構造物として充分機能しうることを明らかにした。しかし、これまでの議論は、背後の海浜地形を中心に行われたものであり、周囲の海浜流場の特性などの背後地形の形成機構に関しては十分解明されていないのが現状である。そこで、本研究では、一様斜面上に緊張保留された潜水浮防波堤周りの海浜流場を、水理実験と数値解析によって明らかにし、背後の海浜地形の形成機構について考察する。

2. 水 理 実 験

(1) 実験方法

潜水浮防波堤周りの海浜流場を明らかにするため、名古屋大学工学部土木工学科の平面水槽(30m×10m×0.6m)を使って水理実験を行った。水槽内には、1/10勾配のコンクリート製斜面が設置されており、この斜面上に潜水浮防波堤をステンレスワイヤーによって緊張保留した。実験は、従来行ってきた移動床実験(岩田ら, 1990)によって典型的な海浜地形が形成された場合を対象とし、固定床の条件で行われた。一定水深域における静水深 h を 45cm で一定に保ち、発生波の周期 T を 1.0~1.6秒の間で3種類変化させた。そして、それぞれの周期に対し、正常海浜と暴風海浜となるよう波形勾配を2種類変化させた($H/L_0=0.01, 0.06$, H は波高, L_0 は沖波長)。また、潜水浮防波堤には、大きさの異なる4種類の模型(表-1 参照)を使用し、合計6種類の実験を行った。各々の実験条件に対し、潜水浮防波堤周りの流速と水位変動を電磁流速計と電気容量式水位計

を使って同時に計測し、その出力を全て磁気テープに記録した。なお、流速は、砂移動に及ぼす効果に着目し、主に底面上1cmの位置で計測したが、電磁流速計の計測可能な範囲で表層の流速も計測した。また、必要に応じてフロート追跡による表面の流れの計測も行った。

(2) 解析方法

実験で計測した流速と水位の時間変化をまずサンプリング周波数 30Hz で離散化した。そして、それぞれの時間変化を10波程度にわたって算術平均し、海浜流と平均水位の変化量を計算した。また、二方向の流速の時間波形から、流速ベクトルの軌跡を計算し、その卓越方向を求めた。

3. 数 値 解 析

(1) 基礎式

本研究では、非定常緩勾配方程式を使って波動場の計算を行い、この計算から求まるラディエーション応力を外力として海浜流の計算を行った。それぞれの基礎式は以下の様である(西村ら, 1983, 1984)。

<波動場>

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{n} \nabla_h (n \cdot q) = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + C^2 \nabla_h \eta = 0 \dots\dots\dots (2)$$

<海浜流場>

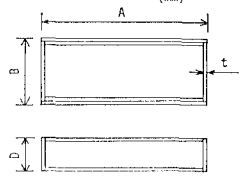
$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \nabla_h \cdot [(h + \zeta)U] = 0 \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + (U \cdot \nabla_h)U + g \nabla_h \zeta + R + F + M = 0 \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 η : 水位変動, ζ : 平均水位の変動量, n : 群速度と波速 C の比, h : 水深, q : 線流量ベクトル, U : 海浜流の流速ベクトル, F : 底面摩擦項, M : 拡散項,

表-1 実験模型の諸元

	A	B	D	t	material
a	1300	300	100	15	Plywood
b	670	300	100	10	Acrylite
c	1300	300	50	15	Plywood
d	670	300	50	15	Plywood



* 正会員 工修 玉野総合コンサルタント 設計第一部
** 正会員 工博 名古屋大学助教授 工学部土木工学科
*** 正会員 工博 名古屋大学教授 工学部土木工学科
**** 正会員 技研興業(株) 総合技術研究所

$\nabla h = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$ である。また、 R はラディエーション応力項で波動場の計算から求まる。なお、 x は波進行方向を正とする水平軸、 y は x 軸に直行する水平軸で、潜水浮防波堤中央を $y=0$ とする。

砕波後の波動場に対しては、運動方程式に砕波によるエネルギー減衰を減衰係数 f_D を使って考慮した次式を式(2)の代わりに採用する(渡辺・丸山, 1984)。

$$\frac{\partial q}{\partial t} + C^2 \nabla h \eta + f_D q = 0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

(2) 境界条件

上述の基礎式を谷本・小舟(1975)、丸山・鹿島(1985)による任意反射境界の設定を全境界に適用し、差分法により計算を行った。この際、沖側境界では反射率を 0、側壁では反射率を 1.0 で与えた。また、汀線位置では、海浜流は不透過とし、法線方向成分を 0 で与え、波動成分は反射率を 0 とし、無反射境界として扱った。また、入射波として沖側境界で正弦波を与えた。なお、計算は、 $y=0$ での対称性を考慮して半断面のみを対象に行った。

以上の手法は、従来の手法と基本的には同じであるが、本研究では、通水域があり、さらに動揺を伴う潜水浮防波堤を対象とするため、これらの効果を新たに計算に考慮する必要がある。しかし、波動場、海浜流場を浮体の動揺と連立させて同時に計算するのは極めて煩雑であるため、本研究では現地における実用性の面から潜水浮防波堤の効果を以下のようにモデル化し、近似的に計算に組み込む手法を開発した。

(a) 下部通水域の効果

本計算手法は、鉛直方向の積分量、あるいは平均量を使った平面二次元の計算であるため、浮防波堤下部の通水域の効果も反射率と透過率を使って鉛直方向に一樣に与えた。まず、浮防波堤表面では完全反射、下部では完全透過と仮定する。そして、波動場の計算では、線流量に微小振幅波の鉛直方向流速分布を適用し、潜水浮防波堤下部を透過する線流量と反射する線流量を求め、全体の線流量との比から透過率と反射率を計算した。

海浜流も同様に、潜水浮防波堤からの反射成分と透過成分に分け、透過成分を浮防波堤下部に一樣な流れとして与えた。海浜流の x 方向成分を使って具体的に示すと次式のようなのである。

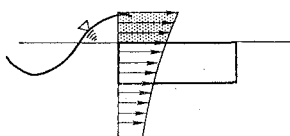


図-1 越波のモデル化の概念図

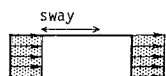


図-2 Sway のモデル化の概念図

$$U_{BF} + U_{BB} = (U_{BF-1} + U_{BB+1})/2 \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、添字はメッシュ番号を示し、BF と BB はそれぞれ潜水浮防波堤前面と後面である。

(b) 越波の効果

図-1 に示すように、潜水浮防波堤前面の線流量に微小振幅波の流速分布を適用し、潜水浮防波堤の天端から自由表面までの線流量を計算した(図中ドット部)。そして、これを潜水浮防波堤背後の海浜流に付加した。

(c) 潜水浮防波堤の動揺の効果

本計算で考慮すべき動揺は、 $y=0$ に関する対称性より heave, sway と roll の 3 つである。

i) heave

heave によって発生する水位変動を浮体の境界で与え、これを波動による水位変動に加えることにより、heave の効果を考慮する。heave による水位変動は、潜水浮防波堤を動揺させる代わりに潜水浮防波堤位置で式(7)に示す水位変動を与えることで生じさせた。

$$\eta_{BF-1} = \eta_{BB} = a \cos(kx_{BF} - \sigma t) \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 k は波数、 σ は角周波数、 a は heave の振幅である。なお、実験における動揺観測の結果によると波動による水位と heave の位相差はほとんど認められなかったので、式(7)に両者の位相差は考慮していない。

ii) sway

図-2 に示すように、sway と等価な流速を浮体境界面で与え、それを積分することにより sway によって生じる線流量を計算し(図中ドット部)、波動場の線流量に加えた。

iii) roll

roll の効果は、heave や sway のように簡単なモデル化が困難であったため、以下の方法を採用した。実験によると、roll が大きい場合、浮体上の越波が大きくなる。そこで、roll が大きい場合に対しては、浮体上の越波量に補正係数をかけることにより越波量を大きくすることで対処した。

(3) 計算方法

式(1)～式(4)を差分化した方程式を各タイムステップ毎に逐次計算する。計算に際し、空間に対してスタaggerドメッシュを採用し、メッシュ間隔は Δx 、 Δy とともに 10 cm とした。また、時間変化の計算はリープフロッグ法を採用し、 Δt は $T/50$ とした。

また、砕波位置については、潜水浮防波堤部では潜水浮防波堤上とし、潜水浮防波堤の側方では実験から得られた砕波位置を与えた。潜水浮防波堤の heave と sway の振幅は、二次元実験の結果(上田, 1989)に基づいてそれぞれ入射波の振幅の 1/10 倍、1 倍として計算を行った。

4. 結果とその考察

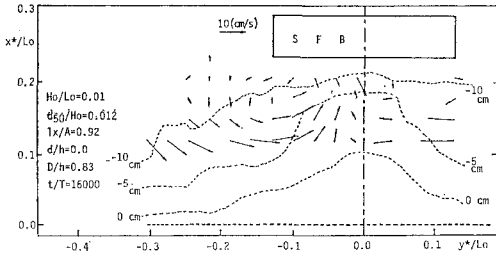
(1) 背後の地形に及ぼす D/h と lx/A の効果

潜水浮防波堤を設置した場合、背後に形成される海浜地形には、潜水浮防波堤の離岸距離 lx と y 方向の長

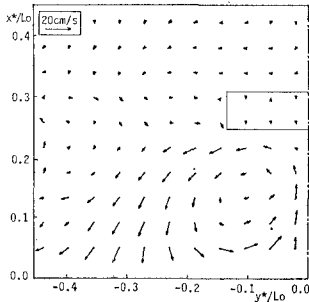
さ A の比 lx/A と潜水浮防波堤高さ D と設置水深 h の比 D/h が大きく影響を及ぼすことが明らかにされている (岩田ら, 1990). そこで、まず、 D/h と lx/A が海浜流場に及ぼす影響とその機構について論議する. 図—3 と 図—4 は $lx=0.92$ の一定条件下で、 D/h を 0.83 と 0.41 に変化させた場合の海浜流の実験結果と数値解析結果をそれぞれ示したもので、実験結果には 5 cm 間隔の等深線も同時に示してある. なお、 x^* は初期汀線位置を原点とし、沖向きを正とする水平軸で、 $y^*=y$ である.

まず、海浜流の実験値と計算値を比較すると、実験値が底面流速の結果であるのに対し、計算値は鉛直方向の平均流であるため、若干絶対値に差はあるものの、実験値と計算値の対応はよいといえる. したがって、本研究で開発した簡易算定手法により潜水浮防波堤周りの海浜流は計算可能であるといえる. つぎに、海浜地形に着目すると、 D/h が大きい場合には明瞭な尖角州が形成されるのに対し、 D/h が小さくなると尖角州は明瞭ではなくなる. これは、両者の場合で潜水浮防波堤近傍の海浜流場が異なるためである. 海浜流場の実験結果を示した 図—3 (a) と 図—4 (a) を比較すると明らかなように、 $y^*/L_0 < -0.15$ ではあまり差異は認められないものの、 $y^*/L_0 > -0.15$ では $D/h=0.83$ に比べ $D/h=0.41$ の場合、沖向きの流れが弱くなっている. この沖向きの流れは、尖角州の成長を助長するものと考えられ、この沖向きの流れが弱められたために $D/h=0.41$ の場合は尖角州が成長しなかったと考えられる. 一方、数値解析結果では、両者とも海浜流の循環セルが形成されているものの、やはり、潜水浮防波堤背後の沖向き流れは $D/h=0.41$ の場合弱くなっていることが認められる.

比較のため、下部に通水域を持たない着定式離岸堤に対する計算結果を 図—5 に示す. 離岸堤背後に形成される海浜流の循環セルは潜水浮防波堤よりも明瞭で、 $y^*/L_0=0$ 付近の沖向き流れは $D/h=0.83$ の場合よりも強いことがわかる. したがって、潜水浮防波堤背後の海浜流場には下部の通水域が大きく影響を及ぼしていることが以上の結果より明らかである. すなわち、潜水浮防波

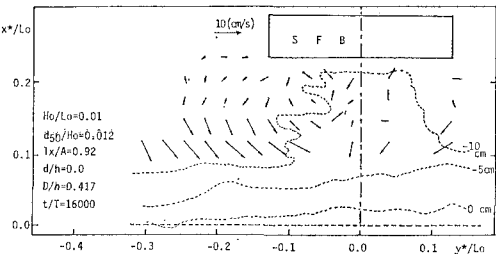


(a) 実験結果

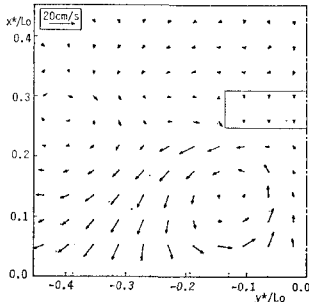


(b) 数値解析結果

図—3 潜水浮防波堤背後の海浜流場 ($D/h=0.83$)

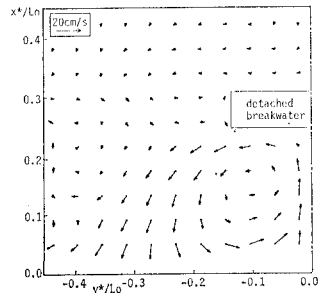


(a) 実験結果



(b) 数値解析結果

図—4 潜水浮防波堤背後の海浜流場 ($D/h=0.41$)



図—5 着底式離岸堤背後の海浜流場の数値解析結果

堤下部からの透過波が背後の岸向きの海浜流を弱め、その結果、 D/h が小さくなると尖角州は成長しなくなるという。

つぎに、 lx/A の効果について論議する。図-6 は、 $D/h=0.50$ と図-4 に近い条件で lx/A を 2.99 と大きく変化した場合の実験結果と解析結果を示したものである。図-6 にも、実験結果には海浜地形も 5cm 間隔の等深線で示した。また、フロート追跡による表面の流れも同時に示してある(図中、○印付きの矢印)。実験で計測した範囲が限られているため、図-3 と図-4 の場合のような詳細な比較はできないが、図-6 より以下のことが認められる。

lx/A が大きくなると、図-6 (a) に示したように、海浜流の循環セルは形成されるものの、 lx/A が小さい場合に比べると特に y 方向の流れが弱くなる。一方、数値解析結果に着目すると、海浜流の循環セルが $lx/A=0.92$ の場合に比べて潜水浮防波堤の外側に移動する。そして、実験値の場合と同様、 $lx/A=0.92$ の場合に比べて循環セルを形成する海浜流は弱くなる。これは、海浜流に及ぼす波の回折の効果に差があるためである。図-7 は、図-6 の条件に対する線流量ベクトルの波一周期間の変化を示したものである。潜水浮防波堤より岸側では、波の回折効果のために、線流量ベクトルの卓越方向が潜水浮防波堤中央に向かうようになることがわかる。これは、図示していないが、 $lx/A=0.92$ の場合と同様である。しかし、 lx/A が大きくなると、潜水浮防波堤背後に回折した波が、屈折のため再び汀線に直角に入射するようになり、汀線付近では再び岸沖方向が卓越するようになる。これは、離岸距離が小さい $lx/A=0.92$ の場合には認められない傾向である。この回折波の差により海浜流の外力となるラディエーションストレスの分布に差が生じ、海浜流の循環セルの位置が変化し

たものである。

したがって、 D/h と lx/A が海浜地形に大きく影響を及ぼすのは、潜水浮防波堤下部の通水域からの透過波と回折波の影響がこれらのパラメータによって変化するためであることが明らかになった。

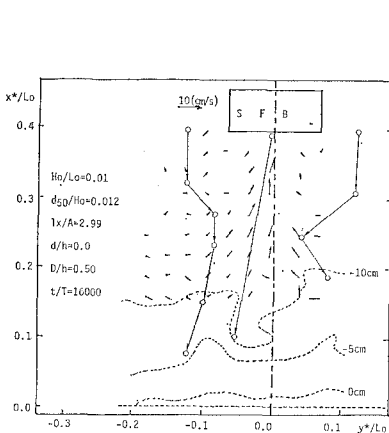
一方、潜水浮防波堤の動揺にともなう放射波の効果を明らかにするため、同一の条件下で潜水浮防波堤を固定した状態の計算を行った。図示しないが、浮防波堤の動揺を考慮した場合の結果と潜水浮防波堤のごく近傍を除いて明瞭な差は認められなかった。したがって、海浜流場に及ぼす放射波の効果は透過波や回折波にくらべて小さいといえる。しかし、二次元の移動床実験によると、浮体が動揺することにより浮体近傍で局所洗掘が起こることが明らかにされており(金ら, 1989)、潜水浮防波堤のごく近傍の海底地形には大きく影響を及ぼすことが予想される。

(2) 海浜地形におよぼす海浜流の影響

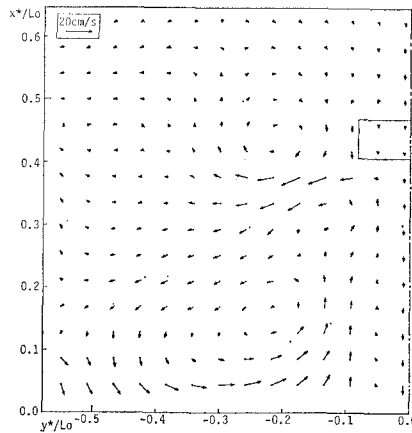
著者らは、潜水浮防波堤背後に形成される尖角州の形状は、a) 単頭の尖角州、b) 双頭の尖角州、および c) 三頭の尖角州、の三つのタイプに分類できることを明らかにし、それぞれの出現特性を D/h と lx/A の関数として図式化している(岩田ら, 1990)。本研究では、海浜流場の実験結果と数値解析結果に基づいてそれぞれの海浜地形の形成機構を考究する。

a) 単頭の尖角州

単頭の尖角州が形成されるのは、 lx/A が小さく D/h が大きい場合である。すなわち、透過波の影響が小さく、逆に回折波の効果が大きい場合である。この条件の典型的な例が図-1 に示した場合である。この場合、海浜流の特徴としては、碎波帯付近で潜水浮防波堤背後に向かう流れが強く、 $y=0$ を中心に海浜流の循環セルが左右に一つずつ形成されることである。図-3 より明ら



(a) 実験結果



(b) 数値解析結果

図-6 海浜流場に及ぼす lx/A の効果

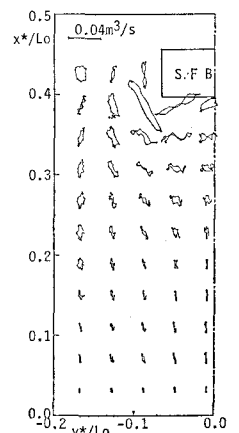


図-7 線流量ベクトルの空間分布

かなように、尖角州はこの海浜流の循環セルに沿うように形成されており、 $y/L_0=0$ 付近の離岸流が単頭の尖角州の発達を促進させると考えられる。

b) 双頭の尖角州

双頭の尖角州が形成されるのは、 $1.5 \leq lx/A \leq 3.0$ で $0.3 \leq D/h \leq 0.8$ の場合である (岩田ら, 1990)。図-6 に示した結果が双頭の尖角州が形成される場合の典型的な例である。既述したように、この場合も海浜流の循環セルが形成されるものの、その位置は全体的に潜水浮防波堤の外側に移動する。これは、上述したように、回折波の影響が汀線付近まで及ばないためである。ところで、底面流速から求めた実験結果からはあまり明瞭ではないが、数値解析結果より海浜流が沖方向へ向かう位置は尖角州のピークの位置にはほぼ一致していることがわかる。一方、図-6 (b) より、 $y^*/L_0=0$ 付近では、潜水浮防波堤背後に尖角州の成長を妨げる岸向きの流れが認められる。この岸向きの流れの存在は、尖角州のピーク付近の沖向き流れとによって尖角州のピーク位置より内側に弱いながらももう一つの逆向きの循環セルの形成を示唆するものである。実験値からはこのような第二の循環セルは認められないが、これは、実験値は底面流速から求められたことによる。フロートの追跡結果によると潜水浮防波堤中央部の自由表面には強い岸向き流れが存在する。この流れも考慮すると平均的には実験結果にも計算値と同様、 $y^*/L_0=0$ 付近に岸向き流れが存在すると考えられよう。したがって、これらの二対の海浜流の循環セルが双頭の尖角州を形成したと考えられる。なお、実験結果より、海浜流の循環セルは水平面だけでなく鉛直面内にも存在し、この鉛直方向の循環セルも双頭の尖角州の形成に寄与しているといえよう。

c) 三頭の尖角州

三頭の尖角州が形成されるのは、 lx/A と D/h が双頭の尖角州が形成される範囲にあり、さらに特定の条件を満たすときに限定される (岩田ら, 1990)。紙面の都合上図示できないが、数値解析結果によると、半断面に明瞭な二つの海浜流の循環セルの形成が認められた。循環セルを形成する海浜流が岸向きとなる位置は、 $y^*/L_0=0$ 付近と $y^*/L_0=\pm 0.65$ 付近であり、この結果からは、これらの位置にピークをもつ三頭の尖角州の形成が予想される。しかし、移動床実験の実験結果より、尖角州のピーク位置は $y^*/L_0=0$ と $y^*/L_0=\pm 0.4$ 付近であり、計算結果から予想される位置と異なる。実験の観察によると三頭の尖角州は、汀線より上側に遡上した流れが戻り流れになったとき砂を沖側に移動させるようにして形成される。しかし、本計算手法では、境界条件とし

て汀線の方線方向の海浜流を 0 としており、汀線より陸側の流れは考慮していない。このため計算結果と実験結果の間に差が生じたと考えられる。したがって、今後より精度高い海浜流の予測手法を確立するためには、この波の遡上の効果も計算に考慮する必要がある、今後解明すべき課題の一つである。

5. 結 言

本研究では、実験結果と数値解析結果に基づいて潜水浮防波堤周りの海浜流場の特性について議論し、背後の海浜地形の形成機構を考究した。本研究で得られた結論を以下に要約する。

(1) 潜水浮防波堤周りに形成される海浜流場は、回折波と透過波に大きく影響され、潜水浮防波堤の動揺による放射波の効果は小さい。

(2) 潜水浮防波堤の高さが水深に占める割合が小さくなると、潜水浮防波堤下部からの透過波が大きくなるため、背後の循環セルは弱くなる。

(3) 潜水浮防波堤の離岸距離が大きくなると、潜水浮防波堤による波の回折効果は潜水浮防波堤背後の汀線付近で小さくなる。このため、潜水浮防波堤背後の海浜流は弱くなると同時に、海浜流の循環セルは潜水浮防波堤の外側へ移動する。

(4) 単頭の尖角州は、中央部で合流し、離岸流となる明瞭な左右対称な一対の海浜流の循環セルによって形成される。

(5) 双頭の尖角州は、潜水浮防波堤の外側に形成される循環セルと中央部に形成される逆向きの弱い循環セル、および鉛直方向の循環セルによって形成される。

参 考 文 献

- 岩田好一朗・水谷法美・下田直克・村上宗隆 (1990): 潜水浮防波堤背後の海浜地形変化について, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp. 414-418.
- 上田敏隆 (1989): 潜水圧気型緊張係留浮体の波浪動揺特性と波変形に関する研究, 名古屋大学修士論文, 29 p.
- 金 度参・浅井 正・岩田好一朗・上田敏隆・下田直克 (1989): 没水浮体周辺の海底地形変動, 第 44 回年次学術講演会概要集 II, pp. 798-799.
- 谷本勝利・小舟浩治 (1975): 数値波動解析法による港内波高分布の計算, 第 22 回海岸工学講演会論文集, pp. 249-253.
- 西村仁嗣・丸山康樹・平口博丸 (1983): 直接数値積分法による波の場の解析, 第 30 回海岸工学講演会論文集, pp. 123-127.
- 西村仁嗣・丸山康樹・桜井 力 (1984): 海浜流の数値計算手法について, 第 34 回海岸工学講演会論文集, pp. 396-400.
- 丸山康樹・鹿島遼一 (1985): 非定常緩勾配方程式を用いた数値計算方法の解説, 電力中央研究所研究報告, 19 p.
- 渡辺 晃・丸山康樹 (1984): 屈折・回折・碎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, pp. 103-107.