

回折散乱波を考慮した越波問題

森 屋 陽 一*・水 口 優**

1. はじめに

近年、沖合人工島が計画されるのにとともに、多方向不規則波による防波護岸の三次元的な越波問題が扱われるようになってきた(榊山ら, 1994; 平石ら, 1994; など). 越波を三次元的に扱う場合, 断面二次元で越波を扱う場合とは異なり, 必ず防波堤の端部(または隅角部)が存在する. 防波堤端部付近では, 入射波が一方の規則波であっても, 防波堤端部からの回折散乱波の影響により, 防波堤に沿った方向に波峰高分布は変動する(森屋ら, 1995). その結果として, 越波量分布も防波堤に沿って変動することになる.

また, これまで越波を扱った研究は, 数多く行われているが, そのほとんどは防波堤模型を用いた実験的研究である. 数値計算によって越波を扱った研究も, Kobayashi et al. (1987) などによって行われているが, いずれの研究も断面二次元モデルであり, 三次元の越波を数値的に扱った研究はない.

そこで, 本研究では, 回折散乱波が越波におよぼす影響を検討するために, 非線形性を含み浅海域において回折現象を表せる Boussinesq 方程式に, 境界条件として堰の越流モデル(吉川ら, 1967)を導入することにより, 鉛直壁における越波量および鉛直壁背後への越波による伝達波を計算する手法を提案する. また, 断面二次元および三次元水理実験により, その妥当性を検討する.

2. 基礎方程式と境界条件

基礎方程式として, 非線形性を含み浅海域において回折現象を表せる Boussinesq 方程式を用いる. 具体的には, 森屋ら(1995)と同様に, 水位と流量を変数とした分散項を補正していない以下の式を用いる.

連続式

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

運動方程式

$$\begin{aligned} & \frac{\partial Q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q_x^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q_x Q_y}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ & = \frac{1}{3} h^2 \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial^2 Q_x}{\partial x^2} + \frac{\partial Q_x \partial Q_y}{\partial x \partial y} \right) \quad \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial Q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q_x Q_y}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q_y^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} \\ & = \frac{1}{3} h^2 \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial Q_x \partial Q_y}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 Q_y}{\partial y^2} \right) \quad \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

ここで, η は水面変動, Q_x , Q_y はそれぞれ x , y 方向の線流量, h は静水深, $D (= h + \eta)$ は全水深, g は重力加速度である. (1)~(3)式の計算は, 時間, 空間双方に中心差分を用いる陰解法を使用する. 計算に用いた空間的な格子幅は波長の $1/30$ 程度, 時間な格子幅は周期の $1/35$ 程度とした.

沖側の造波境界条件として流量のみを与えた. 計算領域は十分広く設定し, 側方, 岸側境界は完全反射とした. 鉛直壁における越波の境界条件としては, 越流モデルを用い, x 軸上の $x \geq 0$ に鉛直壁があるとすると, $y=0$, $x \geq 0$ での Q_y を,

$$Q_y = \frac{2\sqrt{2g}}{3} (\eta_e - H_c)^{3/2} \quad \eta_e \geq H_c \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$Q_y = 0 \quad \eta_e < H_c \quad \dots\dots\dots (5)$$

とした. ここで, η_e は鉛直壁前面での水位変動, H_c は天端高である. これは, 鉛直壁前面での波形から越流モデル((4)式)により計算される流量が越波し, その流量が水深方向に一樣な大きさで鉛直壁背後に吹き出していることに相当する. 差分格子としてスタッガード・リーブフログを用いているので, 水位と流量の計算点が半格子分ずれているが, 鉛直壁境界において越流モデルを用いるのに, その補正は行わなかった.

3. 断面二次元の越波量および越波伝達波

断面二次元の場合について, 孤立波を用いて検討を行った. 図-1に示す長さ 40 m, 幅 30 cm の断面水槽に, 高さ 12 cm, 厚さ 1.5 cm の鉛直壁(鉛直壁の上端は 45° にカットし, 鋭角になっている)を設置し, 鉛直壁前面水深 $h=10$ cm とし, 造波板の変位も考慮して一次の孤立波を造波した(Goring and Raichlen, 1980). 越波量は,

* 正会員 博(工) 五洋建設(株)技術研究所(前中央大学大学院)

** 正会員 工 博 中央大学教授 理工学部土木工学科

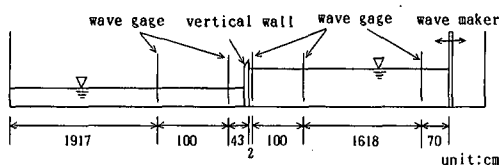


図-1 断面二次元の実験装置図

鉛直壁背後に集水箱を入れて測定した。越波伝達波は、鉛直壁背後に水を張り、鉛直壁から 43 cm 離れた地点に設置した水位計により測定した。

図-2 は、入射孤立波高に対する一波当たり単位幅当たりの越波量 q_e と反射率 K_r について、Boussinesq 方程式の数値計算結果 (□) と実験結果 (○) およびエネルギーフラックスの釣り合いモデル (Mizuguchi, 1993) による計算結果 (実線) を比較したものである。実験の入射波高は、鉛直壁から造波板より 100 cm 離れた水位計のデータにより求めた。Boussinesq 方程式の数値計算結果は、実験結果に比べて、越波量はやや大きく、反射率はやや小さくなるものの、妥当な結果を得た。図-3 は、鉛直壁背後の水深 $h_b = 5$ cm、裏天端高 $H_{cb} = 7$ cm の

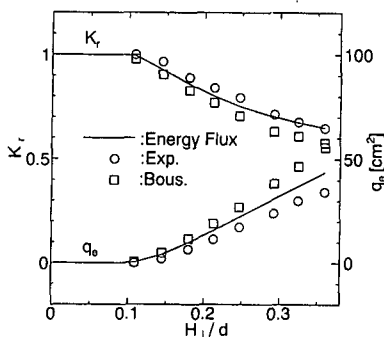
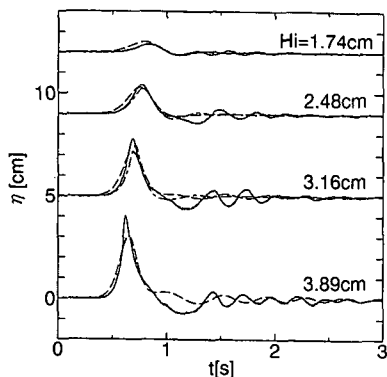
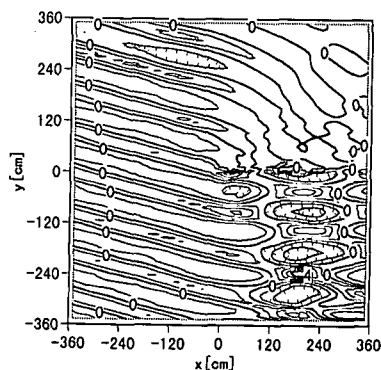
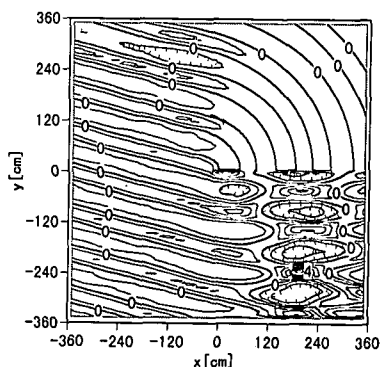
図-2 越波量と反射率 ($h = 10$ cm, $H_c = 2$ cm)

図-3 越波伝達波の時間波形 ($h = 10$ cm, $H_c = 2$ cm, $h_b = 5$ cm, $H_{cb} = 7$ cm, — : 実験結果, --- : Boussinesq 方程式, - · - : 西受・水口 (1996) のモデル)

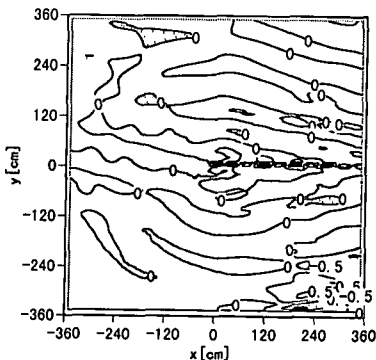
条件で、鉛直壁から 43 cm 離れた地点での越波伝達波の時間波形について、Boussinesq 方程式による数値計算結果 (破線) と実験結果 (実線) および full-nonlinear な方程式を境界要素法を用いて計算している西受・水口 (1996) によるピストン造波モデルの計算結果 (一点鎖線) を比較したものである。越波による伝達波の造波をピストン造波で表すこと、また、裏天端高の影響に関する議



(a) 越波する場合



(b) 越波しない場合



(c) 越波する場合と越波しない場合の差

図-4 造波 10 s 後の水面波形の計算結果 ($x \geq 0, y = 0$ に鉛直壁, $h = 10$ cm, $T = 1$ s, $H_c = 2$ cm, $H_i = 3$ cm, $\theta_i = 15^\circ$, (a), (b) の等高線間隔は 1 cm, (c) は 0.5 cm)

論については西受・水口 (1996) に譲るが、越波伝達波の時間波形に関しても、Boussinesq 方程式による数値計算結果と実験結果は、よく一致することがわかる。

4. 三次元の場合の越波量および越波伝達波

三次元の場合について、半無限の鉛直壁を想定し、周期波を用いて、検討を行った。図-4(a) は $h=10$ cm, $H_c=2$ cm で $H_i=3$ cm, 入射波周期 $T=1$ s, 入射角 $\theta_i=15^\circ$ (直入射を $\theta_i=0^\circ$ とする) の造波 10 s 後の水面波形の数値計算結果である。図-4(b) は、同条件で越波しない場合の造波 10 s 後の水面波形の計算結果である。鉛直壁背後には円筒状の峰を持つ回折散乱波を見ることができる。図-4(c) は、越波する場合の水面波形 (a) から、越波しない場合の水面波形 (b) を線形的に引いたものである。Boussinesq 方程式は非線形性を含んでいるために、図-4(c) が正しく越波伝達波を表してはいないが、弱非線形ということで定性的には越波伝達波を表していると考え、入射波とほぼ同じ波向を持った越波伝達波が形成されていることがわかる。この後で述べる実験において、鉛直壁に沿って水位の高まりが進み、鉛直壁を横越流することによって鉛直壁背後に波を造波している様子が見られたが、背後に伝わる越波伝達波の測定 (実験的検討) は、鉛直壁の構造上難しく今回は行わなかった。

実験は、図-5 に示す多方向波造波装置を有する三次元水槽 (1050×920 cm) 内に、長さ 540 cm, 高さ 12 cm の鉛直壁を、造波板から 380 cm 離し、造波板と平行に設置して行った。一樣な波浪場を得るために、端部制御方式 (寛田ら, 1994) を用い、造波板の変位と有限振幅性を二次まで考慮して一次のクノイド波を造波した (Moriya and Mizuguchi, 1995)。 $y=-2$ cm の地点を鉛

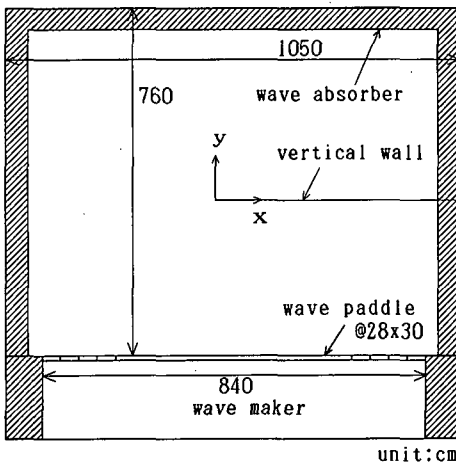
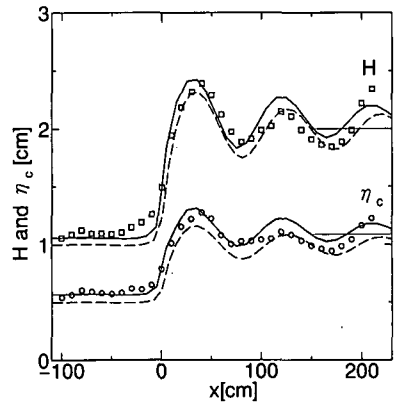
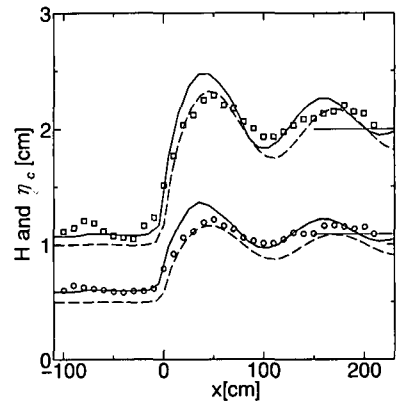


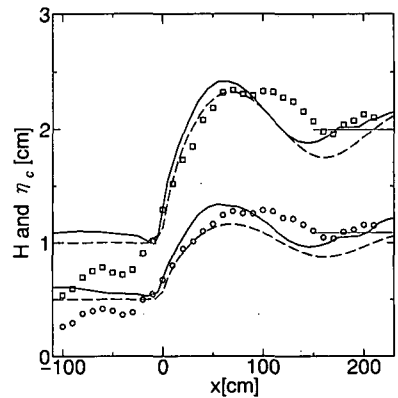
図-5 三次元の実験装置図



(a) $H_i=1$ cm, $\theta_i=0^\circ$



(b) $H_i=1$ cm, $\theta_i=15^\circ$



(c) $H_i=1$ cm, $\theta_i=30^\circ$

図-6 非越波の場合の鉛直壁に沿った方向の波高、波峰高分布 (□: 実験結果の波高, ○: 波峰高, —: Boussinesq 方程式, ---: Helmholtz 方程式 (波峰高は波高の 1/2 とした), 細直線は二方向波の波高と波峰高)

直壁沿いに $x=-100$ cm から 200 cm まで 10 cm 刻みで水位変動を測定し、越波量は鉛直壁背後に設置した集水箱 (幅 10 cm) 中の水位上昇を測定し求めた。

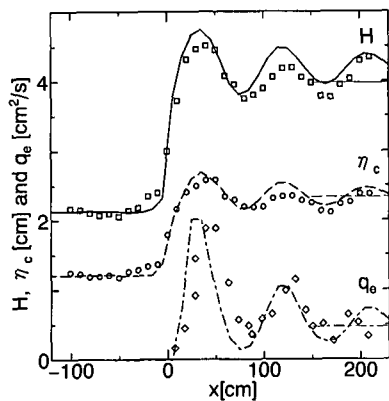
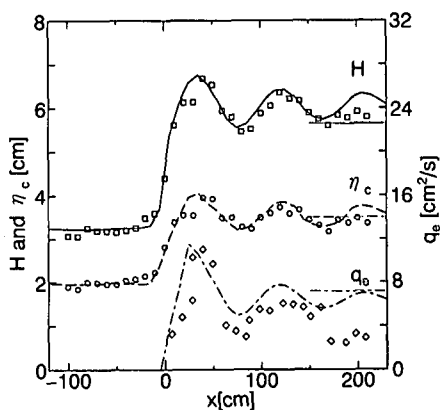
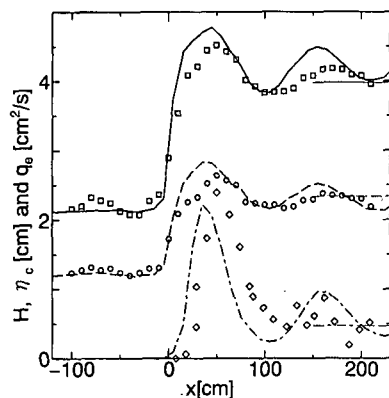
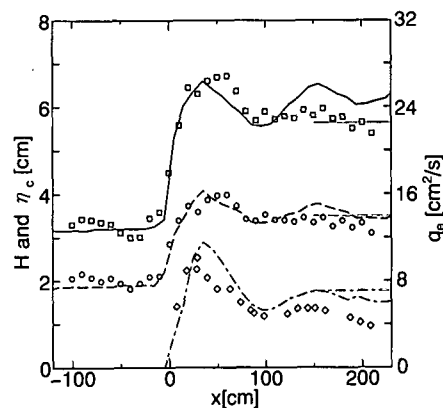
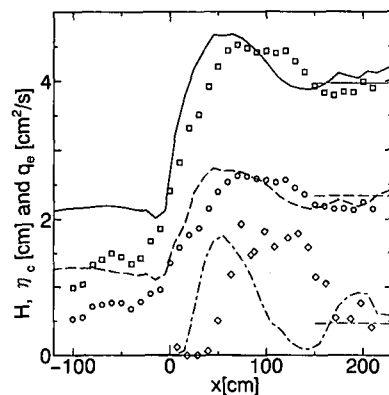
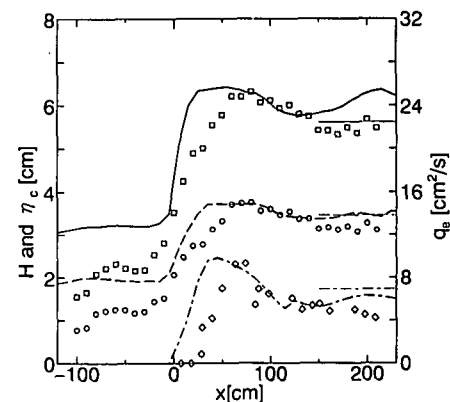
(a) $H_t = 2 \text{ cm}, \theta_i = 0^\circ$ (a) $H_t = 3 \text{ cm}, \theta_i = 0^\circ$ (b) $H_t = 2 \text{ cm}, \theta_i = 15^\circ$ (b) $H_t = 3 \text{ cm}, \theta_i = 15^\circ$ (c) $H_t = 2 \text{ cm}, \theta_i = 30^\circ$ (c) $H_t = 3 \text{ cm}, \theta_i = 30^\circ$

図-7 鉛直壁に沿った方向の波高、波峰高および越波量分布 (□: 実験結果の波高, ○: 波峰高, ◇: 越波量, —: Boussinesq 方程式による波高, ---: 波峰高, - - - : 越波量, 細直線は斜め波の越波モデルの計算結果)

実験条件は $h = 10 \text{ cm}$, $H_c = 2 \text{ cm}$, $T = 1 \text{ s}$ は固定し, $H_t = 1, 2, 3 \text{ cm}$ と変え, それぞれの波高に対して入射角を $\theta_i = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ と変えた。

図-8 鉛直壁に沿った方向の波高、波峰高および越波量分布 (□: 実験結果の波高, ○: 波峰高, ◇: 越波量, —: Boussinesq 方程式による波高, ---: 波峰高, - - - : 越波量, 細直線は斜め波の越波モデルの計算結果)

図-6 は非越波の $H_t = 1 \text{ cm}$ の場合の (a) $\theta_i = 0^\circ$, (b) $\theta_i = 15^\circ$, (c) $\theta_i = 30^\circ$ の結果であり, 鉛直壁前面での鉛直壁沿いの波高 (□) と波峰高分布 (○) について, 実験

結果と Boussinesq 方程式による数値計算結果 (実線) および線形理論である Helmholtz 方程式の解析解 (Berger and Kohlhase, 1976) の計算結果 (破線) を比較したものである。また、細直線で一次のクノイド波の線形重ね合わせによる二方向波の波高と波峰高も合わせてのせた。Boussinesq 方程式による計算結果は、Helmholtz 方程式の解の計算結果と同様な分布形状になるが、Boussinesq 方程式による数値計算結果は、非線形性を含んでいるために Helmholtz 方程式の解の計算結果よりもやや大きい値となる。 $\theta_i=0^\circ, 15^\circ$ の場合は実験結果と Boussinesq 方程式による数値計算結果はよい一致を示している。 $\theta_i=30^\circ$ の場合に、 $x<0$ の領域で実験結果は Boussinesq 方程式による数値計算結果より小さい値になっている。これは、有効造波領域からややはずれているためであると考えられる。

図-7 は $H_i=2$ cm の場合、図-8 は $H_i=3$ cm の場合の鉛直壁前面での鉛直壁沿いの波高 (□, 実線) と波峰高 (○, 破線) および越波量 (◇, 一点鎖線) の分布について、実験結果と Boussinesq 方程式の数値計算結果を比較したものであり、(a) $\theta_i=0^\circ$, (b) $\theta_i=15^\circ$, (c) $\theta_i=30^\circ$ である。図中の細直線はエネルギーフラックスの釣り合いによる斜め波の越波モデル (森屋ら, 1994) の計算結果である。森屋らのモデルは鉛直壁端部から (回折散乱波が無視できる程度) 十分離れた地点で成立するものである。Boussinesq 方程式の数値計算結果と実験結果は、波高、波峰高および越波量共に、よく一致している。また、回折散乱波の影響で波高と波峰高は変動し、波峰高が大きい部分で越波量が多くなっていることがわかる。特に、鉛直壁の端部付近では、森屋らのモデルの予測よりも、越波量はかなり多くなっており、防波堤端部付近の越波量の算定には、回折散乱波の影響が無視できないことがわかる。

以上により、鉛直壁に斜め規則波が入射するという理想的な条件ではあるが、Boussinesq 方程式の数値計算に境界条件として堰の越流モデルを導入することにより、回折散乱波がある場合の鉛直壁に沿った方向の越波量分布を、定量的に評価できることがわかった。

5. おわりに

Boussinesq 方程式に境界条件として、堰の越流モデルを導入することにより、断面二次元および三次元の場合の、鉛直壁での越波量および越波による伝達波を数値計算する手法を提案した。

水理実験により、その妥当性の検討を行った。断面二次元の場合は、越波量および越波伝達波において、数値計算結果と実験結果を比較し、妥当な結果を得た。三次元の場合については、半無限の鉛直壁に斜め規則波が入射するという条件で、数値計算結果と実験結果を比較し、本研究で提案した方法により、鉛直壁沿いの越波量分布を、定量的に評価できることを示した。また、三次元の場合の越波伝達波に関しても、数値的に検討し妥当な結果を得た。

本研究の断面二次元の実験は、中央大学大学院生 (現在、株式会社エムエーシー) の西受由裕氏により、行われたものであり、実験結果ならびに数値計算結果を、快く提供して頂きました。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 吉川秀夫・椎貝博美・河野二夫 (1968): 海岸堤防の越波に関する基礎的研究 (1), 第 14 回海岸工学講演会講演集, pp. 118-122.
- 榊山 勉・鹿島遼一・窪 泰浩 (1994): 多方向不規則波に対する人工島防護岸の越波特性と耐波特性, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 656-660.
- 寛田博章・水口 優・森屋陽一 (1994): 多方向造波装置において一様な波の場を作るための端部制御方式, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 106-109.
- 西受由裕・水口 優 (1996): 越波による伝達波について, 海岸工学論文集, 第 43 巻.
- 平石哲也・望月徳雄・鈴木康正 (1994): 護岸越波流量における波の多方向性の影響, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 666-670.
- 森屋陽一・大福浩之・水口 優 (1994): 鉛直壁における斜め波の越波と反射率について, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 671-675.
- 森屋陽一・菊地正行・松立博樹・水口 優 (1995): 浅海域における周期波のマッハ反射について, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 6-10.
- Berger, V. and S. Kohlhase (1976): Mach-reflection as a diffraction problem, Proc. 15th, Conf. Coastal Eng., ASCE, pp. 796-814.
- Goring, D. G. and F. Raichlen (1980): The generation of long waves in laboratory, Proc. 17th, Conf. Coastal Eng., ASCE, pp. 763-783.
- Kobayashi, N. and A. Wurjanto (1989): Wave overtopping on coastal structure, Jour. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., Vol. 113, No. 3, May, ASCE, pp. 323-345.
- Mizuguchi, M. (1993): Wave overtopping rate over a vertical wall and reflection coefficient, Coastal Eng. in Japan, vol. 36, No. 1, pp. 37-47.
- Moriya, Y. and M. Mizuguchi (1995): Multi-directional wave basin and Mach reflection of periodic waves, Wave generation '95, Proc. Int. Sympo., Yokohama, JAPAN, ITTC, pp. 28-43.