

# 平面波浪場の越波伝達波の特性と算定法

東江隆夫\*・伊藤一教\*\*・織田幸伸\*\*・灘岡和夫\*\*\*

## 1. 緒 言

越波伝達波は、鉛直 2 次元では比較的精度良く求めることができる。鉛直 2 次元の越波伝達波の計算は、その初期波形をコーシーポアソン波と仮定した倉田 (1981) の研究、越波による流量をピストン造波でモデル化した西受・水口 (1996) の研究がある。また、織田ら (1997) は、越波による水塊の質量と運動量を取り込んだ新しい方程式系を用いて、越波伝達波を計算している。西受・水口 (1996)、倉田 (1981) の研究は、越波伝達波の初期波形を越波とは別の現象で置き換えたモデル化であるのに対し、織田ら (1997) の研究は、越波伝達波の現象を物理的に取り込んだ方程式を使用し、モデル化していないことに違いがある。両者の精度に関しては、西受・水口 (1996) が鉛直 2 次元の流体の方程式を解いているために、モデル化の精度に依存する。一方、織田ら (1997) は鉛直積分型の方程式を解いており、その精度は方程式の精度に依存する。

平面波浪場では、実験的には、平口ら (1991)、横木ら (1998) の研究がある。また、その解析についてはコーシーポアソン波重ね合わせとした渡辺ら (1997)、堰の公式を使用して線流量を求めそれを方程式の入力境界とした森屋・水口 (1996) の研究がある。実験的な研究から、規則波では、越波伝達波に 2 倍、3 倍モードの波が含まれる。これらが、伝達するときには独立に進むために、2 次元実験では、波速の速い基本周期が先に進み、2 倍、3 倍モードの波が後から進んで行く。方向性についても、平口ら (1991) が指摘しているようにその周波数に対応する波速で進む事になる。多方向不規則波については特にその方向分布特性などが解明されていない。

本論文では、平面波浪場における越波水理実験を実施し、その特性を解明すると共に、織田ら (1997) の解析方法を平面波浪場に拡張し、実験との比較によってその適用性を検証した。

## 2. 実験方法

水深 37.5 cm の平面水槽内に幅 35 cm、長さ 12 m の防波堤模型を設置した。防波堤の両側 4 m は天端が高く越波せず、中央の 4 m 部分からのみ越波する。計測項目は水位のみとし、防波堤の岸側で、1 m 間隔の格子状に 9×10=90 点で波高計で計測した (図-1)。また、そのうち 6 点で方向スペクトル推定のための波高計アレイを組んでいる。防波堤天端上 1 点でその水位を計測し、数値計算における境界条件とした。入射波浪は、周期 1.1, 1.6 s、波高 8.0 cm、波向 0, 30, 60°で、規則波と多方向不規則波を対象とした。実験ケースを表-1 に示す。防波堤の断面形状は図-2 のようである。今回は、比較的越波量が大きかったタイプ I についてのみ報告する。

## 3. 数値計算方法

水面における越波水塊の流入量と流速を境界条件に連続方程式、運動量方程式をそれぞれ鉛直方向に積分した修正ブシネスク方程式を導いた。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} + w_f = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + D \frac{\partial w_x^2}{\partial x} \\ + (w_f - w_0) w_f = \left( B + \frac{1}{3} \right) h^2 \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial^2 M}{\partial t \partial x} + \frac{\partial^2 N}{\partial t \partial y} \right) \\ + Bgh^3 \left( \frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 \eta}{\partial x \partial y^2} \right) \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

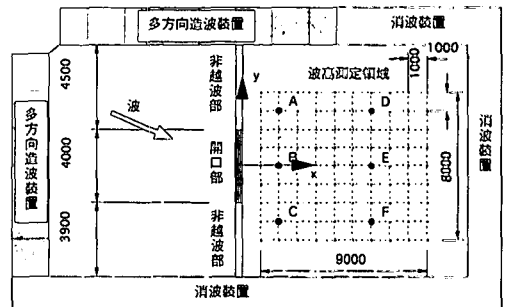
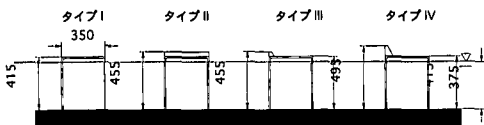


図-1 実験装置と測定点

\* 正 会 員 工 修 大成建設(株)技術研究所海洋水理研究室  
 \*\* 正 会 員 M.S. 大成建設(株)技術研究所海洋水理研究室  
 \*\*\* フェロー 工博 東京工業大学教授 大学院情報理工学研究所情報環境学専攻

表一 実験ケース

防波堤	周期 (s)	波高 (cm)	$S_{max}$	入射角 (°)
4 ケース	1.1	8	$\infty$	0
				30
				60
	1.6	8	$\infty$	0
				30
				60
	1.1	8	30	0
				30
				60
	1.6	8	30	0
				30
				60



図二 防波堤形状断面図

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + D \frac{\partial w_z^2}{\partial y} + (v_f - v_0)w_f = \left( B + \frac{1}{3} \right) h^2 \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial^2 M}{\partial t \partial x} + \frac{\partial^2 N}{\partial t \partial y} \right) + Bgh^3 \left( \frac{\partial^3 \eta}{\partial y^3} + \frac{\partial^3 \eta}{\partial x^2 \partial y} \right) \dots (3)$$

ここで、 $M, N$  :  $x, y$  方向の線流量、 $\eta$  : 水位、 $h$  : 水深、 $D = h + \eta$  : 全水深、 $B$  : 分散性を表す係数 ( $= 1/21$ )、 $u_0, v_0$  : 水表面での  $x, y$  方向の流速、 $u_f, v_f, w_f$  : 越波した水塊が水面に流入する際の  $x, y, z$  (鉛直) 方向の流速である。越波による伝達波の発生は、防波堤天端上の水位実験時系列値を用いて計算の入力とした。実際には、防波堤岸側端部で、限界水深が生じていると仮定して、越波水塊の流速を次式で推定した。

$$u_b = \sqrt{g\eta_b} \cos \theta \dots (4)$$

$$v_b = \sqrt{g\eta_b} \sin \theta \dots (5)$$

ここに、 $u_b, v_b$  : 越波水塊が防波堤岸側端部を通り過ぎる時の  $x, y$  方向の流速、 $\eta_b$  : 越波水塊の防波堤岸側での水位の計測値、 $\theta$  : 波向きである。さらに、その越波の突入点を次式で求めた。

$$x_b = u_b T_f \dots (6)$$

$$y_b = v_b T_f \dots (7)$$

ここに、 $x_b, y_b$ 、越波水塊が水面に突入する  $x, y$  方向の位置、 $T_f$  は、水塊が落ちる時間で次式による。

$$T_f = \sqrt{2hc/g} \dots (8)$$

ここに、 $h_c$  : 静水面からの天端高さ、 $g$  : 重力加速度である。

### 4. 考 察

#### (1) 規則波の越波

図-3 は、周期  $T = 1.6$  s、波高  $H = 8.0$  cm の入射波に対する  $y = 0.0$  m、 $x = 2.0, 4.0, 6.0$  m おける水位の時系列を示している。全ての点の波形にはその初期において基本周波数の波だけが現れる。その後、追い付いてきた高周波数の波が重合してきているのがわかる。このことは、すでに織田ら (1997) が指摘しているように、越波伝達波の初期波形には 2 倍、3 倍の高周波数が成分が含まれており、それらが独自に伝播して行くことによる。

図-4 は、周期 1.1, 1.6 s、波高 12 cm、波向 0, 30° の規則波が入射した場合の、基本、2 倍、3 倍周波数成分の振幅の空間分布を示している。沖の入射角に対して、基本周波数成分はほぼ同じ方向、しかし、倍周波成分はそれよりも角度が小さく分布している。越波伝達波の発生時刻は防波堤法線方向に沿って入射波向と波速に応じた遅れがある。発生後は、各々の周波数成分の波速で伝播するため、周波数毎に波向が変化する (図-5)。図-4 中の矢印は、この考えに基づいて、各周波数成分に対する波向を示したもので実験結果の波向を良く説明している。

結局、規則波の越波伝達波は、その初期波形に含まれる成分波の大きさで決定され、その後の伝達波はそれぞれが独自に伝達すると考えて良い。したがって、越波伝達波を精度良く求めるには、この初期波形を正しく見積もること。すなわち、越波水塊エネルギーの各周波数帯への分配を正しく見積もることが重要である。図-6 には、周期 1.6 s 波向き 30° の波に対する数値計算による、図-4 と同様の図を示している。また、図-7 には、同じ波に対する水位の瞬間空間分布を示す。図-6 を見ると計算は、図-4 に示した実験と比較して方向性について良好な結果を示している。また、図-7 から、前述の方向性についての議論の妥当性がわかる。すなわち、2 つの波の波峰線が別の方向に進行していくと、一部に水位の高い/低い (図中点線) 部分が現れる。図はこの様子を良く表している。しかし、定量的に図-3 をみると、計算結果は 2 倍周波数の波が卓越している。これは、基本としている方程式が Boussinesq 型の方程式であることに起因している。すなわち、越波の突入による波の発生にモデル化は行っていない。突入した水塊によって発生する波は、方程式の性質によって決定される。しかし、鉛直積分型の方程式であるために、突入した運動量は鉛直方向方程式が仮定している流速分布に応じて分配されている。これが、初期波形を精度良く表現できない原因と思われる。

他の積分型の方程式の中で分散性に優れた方程式系

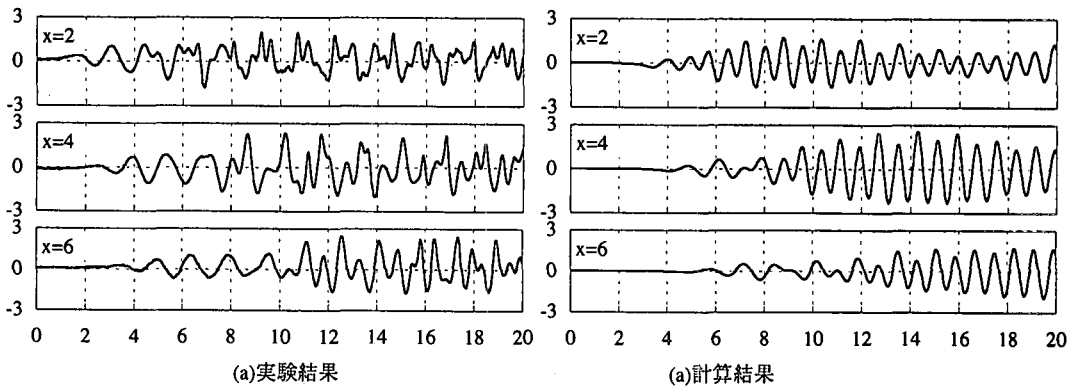


図-3 計測点  $y=0, x=2, 4, 6$  m での時系列波形

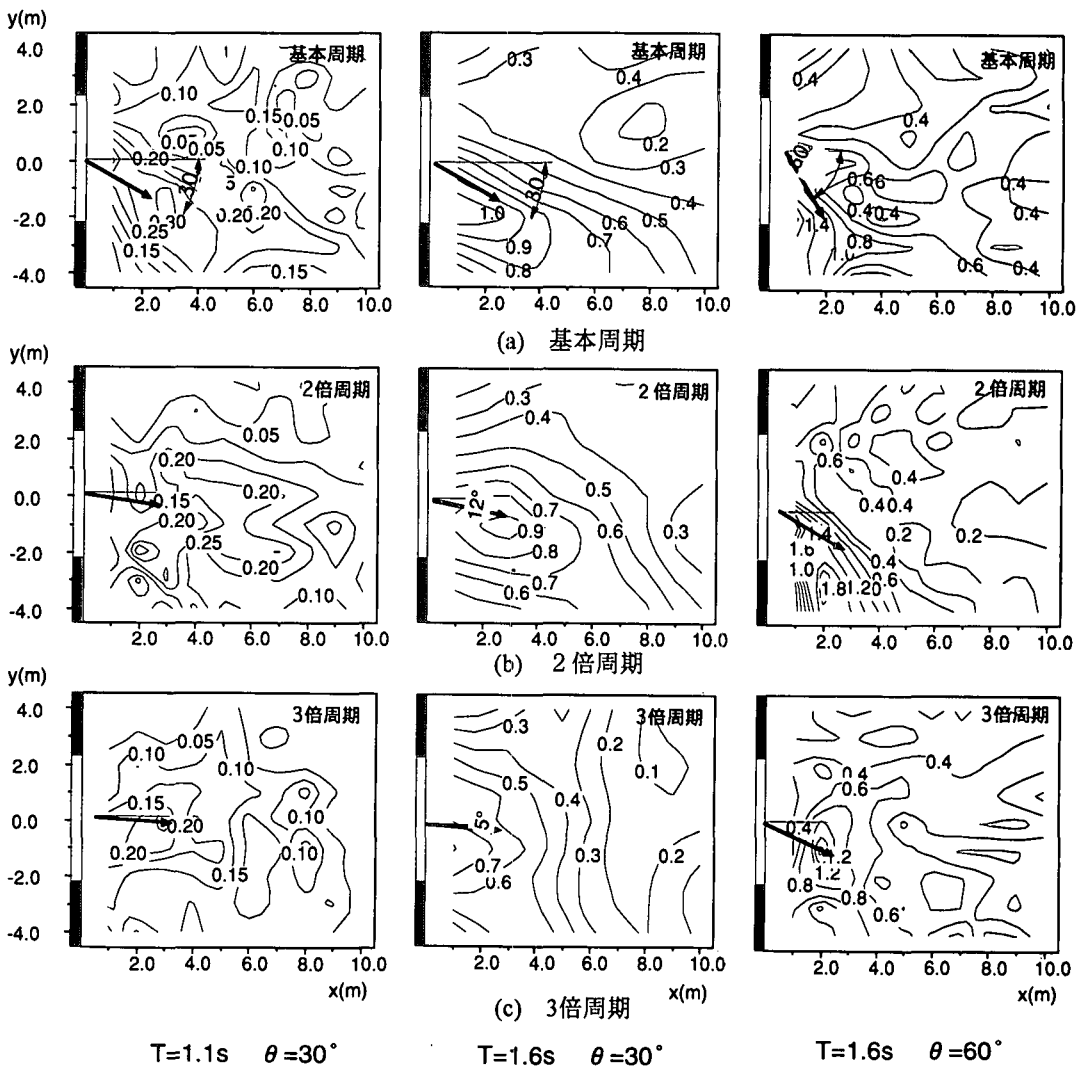


図-4 周波数毎のフーリエ振幅平面分布

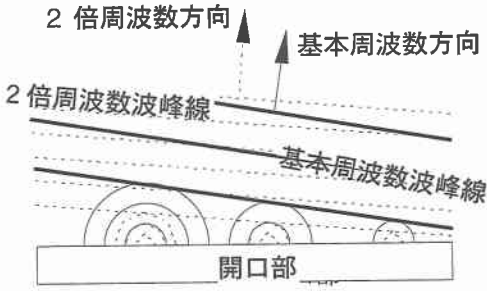


図-5 波向き説明図

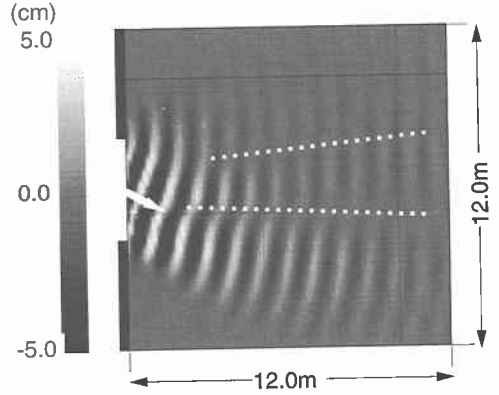
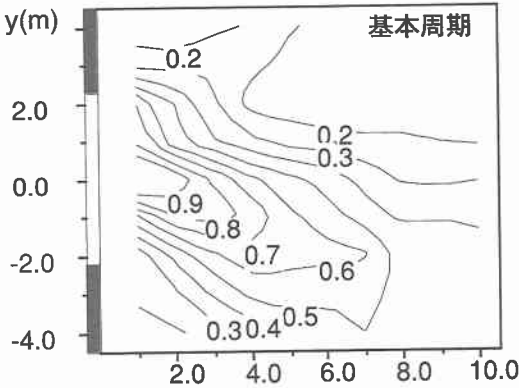
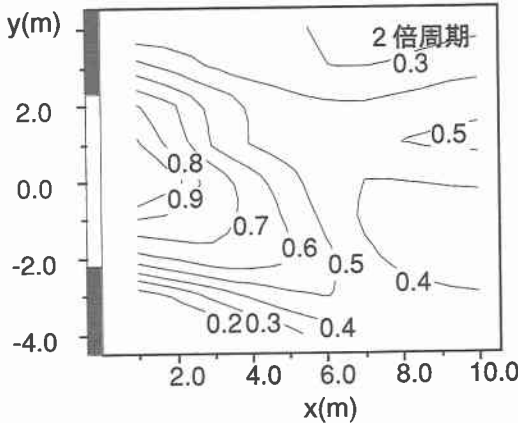


図-7 周期1.6波向き30°の越波伝達波の水位瞬間分



(a) 基本周期：計算



(b) 2倍周期：計算

図-6 越波伝達波の計算結果 ( $T=1.1s, \theta=30^\circ$ )

(例えば、灘岡・Beji・大野, 1994) に本手法を適用して、改善できる可能性がある。ただし、波の分散性に優れている方程式系が、水塊による造波、換言すれば、各周波数への運動量の分配までも的確に表現できるかは確認していない。

(2) 多方向不規則波の越波

図-8は、図-1に示す点A~Fでの多方向不規則波 ( $T=1.1s$  波向き  $30^\circ$ ) に対する入射波と伝達波の方向ス

ベクトルである(図中の方向の値は正負が逆)。全体のエネルギーは、当然入射波に比べてかなり小さくなっている。波向きに沿ったC点は波の遮蔽域にあたるA点に比べてそのエネルギーは大きい。また、D、E、F点も小さくなっている。周波数に関しては、入射波がかなり狭帯域のスペクトルであるのに対し全ての点で高周波数側に分散している。それぞれ、1/2、1/3の有義周期の点でピークを持つものもある。波向きについても同様に、入射波の方向分散性に比べて、伝達波の分散性は大きくなっている。この周波数と方向分散性については規則波における議論の延長ができそうである。しかし、主たる波向きを見ると、入射波向が約  $30^\circ$  であるにもかかわらず、点A~Fでの主波向きは、概略それぞれ  $45, 0, -45, 10, 0, -20$  となる。これは、回折効果と多方向不規則波越波の特有の現象である。今回の実験条件では、越波量が小さく、発生する場所も一部である。したがって、越波が起きた波は、水塊が落下した点から同心円上に進む。波高計にとってはこの波は一方からの波として認識するために、図の様な方向スペクトルを持つ。

このように、多方向性が増すほど、そして越波量が小さいほど、入射波の方向特性と越波伝達波との相関は小さくなる。

5. 結 論

越波伝達波について多方向不規則波を用いた水理実験と数値計算を実施した結果、以下のような結論を得た。

規則波の越波伝達波は、その発生した初期に基本周波数のほかに2倍、3倍の周期の波形を含んでいる。そのため、越波した波の方向は落下時刻と波速に応じた方向に進む。また、多方向不規則波による越波伝達波、周波数、方向ともその分散性が大きくなり、さらに、その入射波が持っていた特性との相関は小さくなる。

数値解析は、規則波についてほぼ妥当な結果を与える。

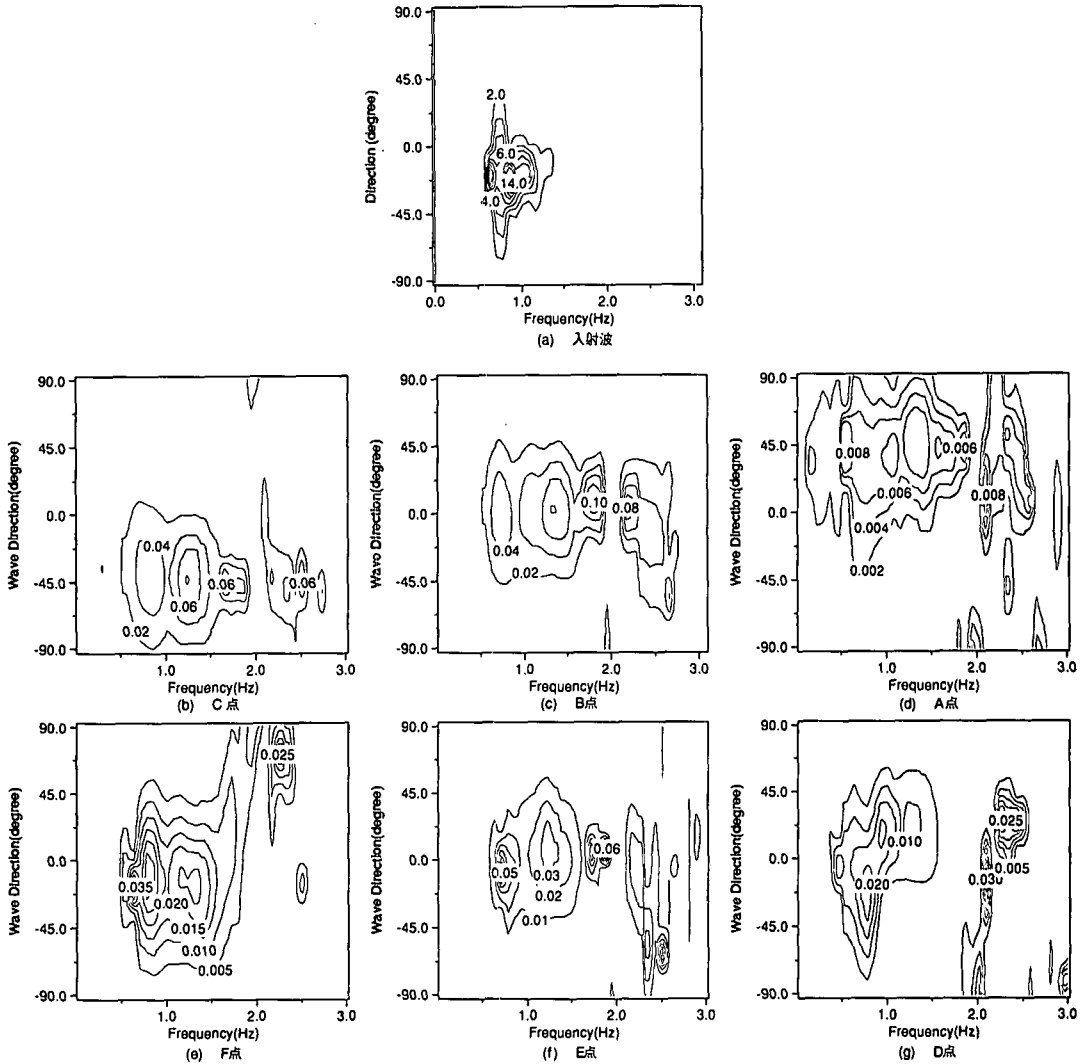


図-8 入射波と A-F 点の方向スペクトル (実験値)

しかし、高周波の波高が若干大きくなることなどの改良の余地がある。

参考文献

織田幸伸・東江隆夫・灘岡和夫 (1997): 運動量を考慮した越波伝達波の算定法, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 751-760.  
 倉田克彦 (1981): 越波による伝達波高, 第28回海岸工学講演会論文集, pp. 339-342.  
 平口博丸・池野正明・井上素行・柏木洋之・阿部光信 (1991): 越波直後の伝達波の方向スペクトルを考慮した港内波の算定法, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 531-535.  
 灘岡和夫・Serdar Beji・大野修史 (1994): 新たな波動モデルに

よる強分散性非線形場の解析法の確立と屋内実験による検証, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 11-15.  
 森屋陽一・水口 優 (1996): 回折散乱波を考慮した越波問題, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 711-715.  
 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, pp. 726-730.  
 横木裕宗・岸田隆嗣・鈴木重勝・三村信男 (1998): 越波伝達波の方向分布特性に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 681-685.  
 渡辺 晃・藤田 龍・磯部雅彦 (1997): 越波による港内伝達波の計算法, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 746-750.