

多方向不規則波浪場における護岸越波量の空間分布特性

大野賢一*・松見吉晴**・竹田 壘***
塚本倫也****・木村 晃*****

多方向波の場合、波の方向分散性の影響に伴い護岸前面の波高が場所的に一方向波の場合より大きくなり、越波量が局所的に多くなる可能性が考えられる。本研究では、多方向波と一方向波における護岸軸方向の越波流量に関する空間変化特性について、まず水理模型実験より直立護岸を対象に検討した。護岸延長距離で平均化した平均越波流量は従来指摘されているように波の方向分散性が弱くなるに伴って増大するが、護岸軸方向の越波流量の空間分布の変化特性に対して波の方向分散性の影響が顕著に現れることが実験的に明らかになった。また、線形回折波モデルを適用した越波量の算定モデルは、越波流量の空間変化の特徴を再現することができた。

1. はじめに

護岸天端高は、背後地への許容越波量を越えない条件として設定される。この許容越波量は、一般に2次元実験による一方向不規則波を対象に得られた総越波量を造波作用時間および堤体幅で平均化された平均越波流量を基本量として算定される。この一方向不規則波に基づいた考え方を外海に面するような沖合人工島のような施設に適用する場合、越波流量に及ぼす波の方向分散性の影響を明らかにしておく必要がある。平石ら(1994)は、多方向不規則波による模型実験を実施し、多方向波の平均越波流量が一方向波より0.7~0.8倍程度と小さくなることを示している。また平石ら(1996)は、護岸前面における完全反射を仮定した多方向不規則波の水位変動と斜め入射による越波低減効果を取り入れた越波流量算定モデルにより、一方向不規則波に比較して多方向不規則波の越波流量が減少することを明らかにしている。

しかし、越波が発生する荒天時における波の方向分散性と護岸前面の入反射波を結びつけて考えた場合、護岸前面の波高は場所によって一方向波の場合より大きくなり、その箇所での越波流量が多くなる可能性が考えられる。すなわち、多方向不規則波の越波流量の評価に対して護岸総延長で平均化された平均越波流量を適用すると、一方向不規則波に比べて総越波量は小さくなるが、局所的には越波量が大きくなることも考えられる。その結果として、平均越波流量で設計された護岸背後の水たたき部の局所的な破損、また越流排水路の排水能力不足から、越波対策施設の全体としての排水機能の損傷につながる恐れがある。

本研究は、多方向不規則波と一方向不規則波における

- | | | | |
|-----------|------|------------------------------|--------------------|
| * 正 会 員 | 博(工) | 鳥取大学助手 | 総合メディア基盤センター |
| ** 正 会 員 | 工 博 | 鳥取大学助教授 | 工学部社会開発システム工
学科 |
| *** 正 会 員 | 修(工) | 三井共同建設コンサルタント(株) | 関西支社 |
| *** 学生会員 | | 鳥取大学大学院工学研究科社会開発システム
工学専攻 | |
| *** 正 会 員 | 工 博 | 鳥取大学教授 | 工学部社会開発システム工学
科 |

護岸軸方向の越波流量に関する空間変化の違いを明らかにするため、まず構造物として単純な隅角部を有する直立護岸を対象とした水理模型実験より多方向不規則波の越波特性を明らかにし、ついで越波量の算定法として線形回折波モデルを用いた計算モデルの適用性を検討したものである。

2. 水理模型実験

(1) 実験装置および方法

実験は、14 枚の造波板からなるスネークタイプの多方向不規則波造波水槽 (9×14×0.6 m) を用いて行った。水槽側壁には、ステラシートの二層構造からなる遊水部を持つ消波工を設置し、側壁での反射率を 0.3 程度に抑えている。また、水槽の岸側には捨石による 1/5 スロープと、その奥にステンレス板による 1/30 スロープが消波工として設置されている。直立護岸模型は、図-1 に示すように L 型モデル (4×2 m) であり、天端高 h_c は 20 cm である。模型の配置は、造波有効領域内に堤体の大部分が位置し、かつ造波板からの再反射を避けるために造波板

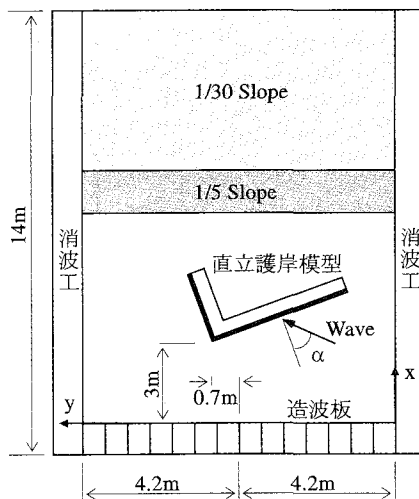


図-1 造波水槽と護岸模型の平面図

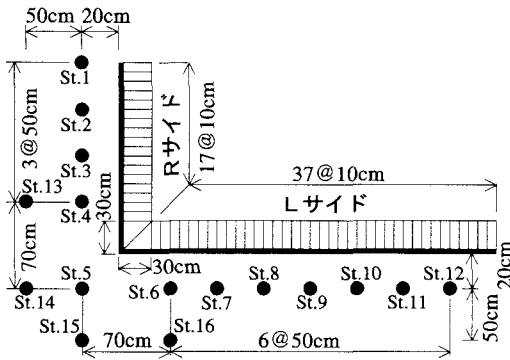


図-2 越波量計測位置と波高の設置位置

表-1 実験条件

有義波高 $H_{1/3}$	8 cm
有義周期 $T_{1/3}$	1 s, 1.4 s
波浪スペクトル	JONSWAP ($\gamma=3.3$)
方向集中度 S_{max}	5, 10, 20, ∞ (一方向波)
主波向 α	0° , -15°
造波時間 T_w	約 27 分間

に対して 20° 傾けて設置された。水深 h は 30 cm 一定である。

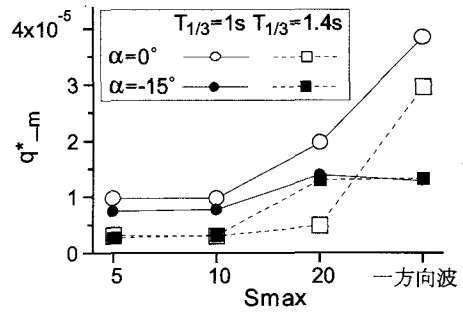
越波量の計測には、図-2 に示すように隅角部 (30 cm 幅) を除いて堤体軸方向に 10 cm ピッチに雨樋 (長さ 30 cm) を配列させ、その背後に設置したマスによって行った。なお、護岸 L サイドの計測数は 38 ヶ所、R サイドは 18 ヶ所である。護岸周辺の水位変動は、図-2 に ●印で併記するように 16 台の波高計により計測した。

(2) 実験波浪条件

入射波条件は、表-1 に示すように有義波高: $H_{1/3}=8$ cm, 有義周期: $T_{1/3}=1$ s と 1.4 s の多方向不規則波 ($S_{max}=5, 10, 20$) 及び一方向不規則波について、直角入射 ($\alpha=0^\circ$) と斜め入射 ($\alpha=-15^\circ$) の 16 ケースである。波浪スペクトルは、JONSWAP 型 (尖鋭度パラメータ $\gamma=3.3$) である。多方向不規則波および一方向不規則波共に造波信号のサイクル時間は 27 分間で、構成波数は 1440 ($T_{1/3}=1$ s の場合), 1028 ($T_{1/3}=1.4$ s の場合) である。実験は 16 ケースの波浪条件について 5 回繰り返し行った。

3. 実験結果

本実験で用いた入射波条件では、護岸 R サイドにおける越波が発生しなかったため、以下においては護岸 L サイドにおける越波のみについて検討している。

図-3 平均越波流量の S_{max} に伴う変化

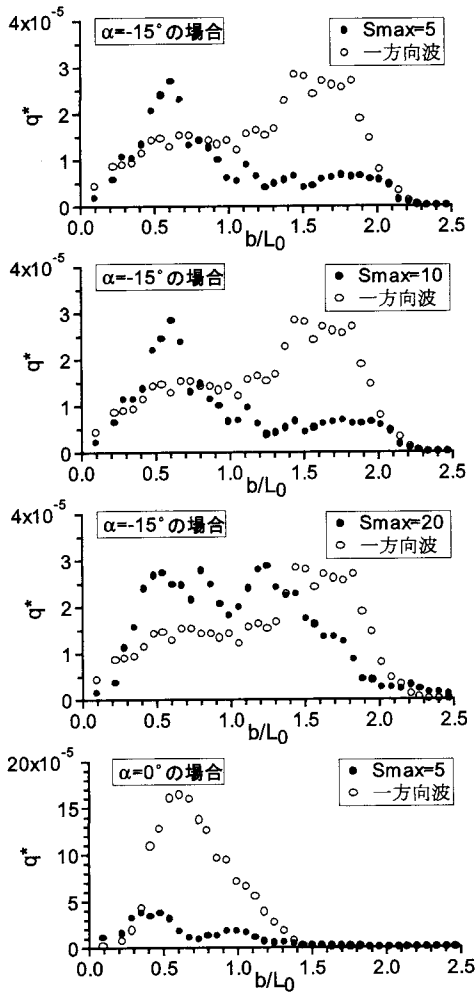
(1) 護岸長で平均化された平均越波流量

図-3 は、L サイドにおける総越波量 Q を護岸長、造波作用時間、および $\sqrt{2gH_{1/3}^3}$ (g : 重力加速度) で無次元化した平均総越波流量 q^*_m の S_{max} に対する変化を示したものである。この図より、 $\alpha=0^\circ$ の直角入射の場合、平石ら (1996) が明らかにしているように q^*_m は S_{max} の増加に伴って増大する。一方、 $\alpha=-15^\circ$ の場合は S_{max} の増加に伴って q^*_m が大きくなるものの、 $S_{max}=20$ と一方向波ではほぼ同程度の平均総越波流量となる。また S_{max} が小さい場合は波の方向分散性が強くなることから、 q^*_m に対する主波向きの影響は非常に小さくなることがわかる。なお、各波向き毎の有義周期による q^*_m の差は、造波作用時間内の構成波数の違いによるものと考えられる。

(2) 越波流量の空間分布特性

図-4 は、 $T_{1/3}=1$ s の場合の多方向波および一方向波における護岸 L サイドの無次元越波流量 q^* の空間分布を比較して示したものである。図中の縦軸の q^* は、各越波量計測位置における単位幅単位時間当たりの越波流量 q' を $\sqrt{2gH_{1/3}^3}$ で無次元化したもので、横軸は護岸隅角部からの距離 b を沖波波長 L_0 で無次元化したものである。まず、斜め入射波の多方向波の越波流量の空間分布特性は、 $S_{max}=10$ と 20 を境として局所的に越波流量が大きく現れる区間が S_{max} の増加に伴って入射方向に対して護岸隅角部から下手側に離れる傾向にある。特に一方向波の場合、同図に示す直角入射 ($\alpha=0^\circ$) の場合と比較して越波流量が大きく現れる区間が下手側に移動しているのは、護岸端部での回折波の影響による護岸前面の波高分布が斜め入射に伴って下手側に移動することによるものと考えられる。一方 $S_{max}=5, 10$ の場合は、波の方向分散性が強いことから主波向きの変化に対して各成分波による回折波および反射波の変化の影響が一方向波に比べて現れ難いため、越波流量が大きく現れる区間は $\alpha=0^\circ$ の場合より入射方向に対して護岸隅角部から少し下手側に離れる傾向にあるが、一方向波の場合のような顕著な下手側への移動は認められない。

次に、越波流量の大きさについて多方向波と一方向波

図-4 越波流量の空間分布 ($T_{1/3}=1$ s の場合)

を比較すると、 $\alpha=-15^\circ$ の場合は局所的に大きくなる越波流量が多方向波と一方向波で同程度になっている。 $\alpha=0^\circ$ の場合、一方向波の越波流量はすべての領域で大きく現れている。なお、 $T_{1/3}=1.4$ s の場合もここに示す $T_{1/3}=1$ s と同様の傾向が得られている。このことより、主波向きが護岸に対して角度を有する場合、平均総越波流量に基づいて排水施設が設計されると、局所的に発生する大きな越波量によってその機能が損傷される恐れがあると言えよう。

4. 越波量に関する数値計算モデル

(1) 数値造波水槽モデル

隅角部を有する護岸前面の波浪場は、森屋ら (1995) や藤田ら (2001) が指摘しているように入射角が浅い場合のマッハシステム、越波に伴う波の変形、隅角部からの回折散乱波等により非線形性の強い場である。本研究で

は、一方向波と多方向波における護岸軸方向の越波流量の空間的な変化特性について、進行波成分の反射、護岸隅角部および端部での回折と、波の方向分散性の影響による重ね合わせに伴う護岸軸方向の波高と流速の空間変化から局所的な越波流量の増大の有無を明らかにすることを目的としている。そのため、造波水槽内の直立護岸を含めた波浪場 (水位変動、流速) の計算は、Isaacson (1989) の線形回折波モデルを拡張した手法 (松見ら, 1994) を用いることにした。

この手法は、造波板および護岸等の固定境界表示に対して湧き出し分布法、また部分反射面境界に対してはBerkhoffの混合境界条件に基づいて誘導されている。

まず計算モデルの座標系を図-1に併記しているようにとると、波動場の速度ポテンシャル ϕ は一般に次式で表される。

$$\phi = \left\{ \phi_0(x) \cosh(kz) + \sum_{m=1}^{\infty} \phi_m(x) \cos(k_m z) \right\} e^{-i\sigma t} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $z=h$ 、 z は静水面より上向きの座標、 x は静水面の点 (x, y) 、 σ は角周波数、 ϕ_0 および ϕ_m は回折波の複素振幅関数である。波数 k および k_m は次式の実正根として与えられる。

$$kh \tanh(kh) = \sigma^2 h / g \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$k_m h \tan(k_m h) = -\sigma^2 h / g \quad \dots\dots\dots (3)$$

式 (1) の右辺第2項は、松見ら (1994) の計算によると堤体境界面から水深の1割程度離れた位置で第1項の数パーセント程度になることから、ここでは無視することにした。 ϕ_0 の支配方程式は次式に示すとおりである。

$$\frac{\partial^2 \phi_0}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi_0}{\partial y^2} + k^2 \phi_0 = 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、造波板および護岸反射境界面、水槽側壁反射境界面に対して湧き出し分布を適用する。すなわち、ポテンシャル $\phi_0' (= \phi_0 \cosh(kh))$ は次式で表される。

$$\phi_0'(x) = -\frac{1}{4\pi} \int_S D(X) G(x, X) dS \quad \dots\dots\dots (5)$$

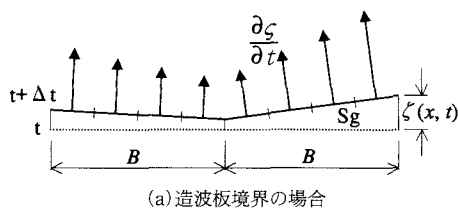
ここに、 S は造波板および反射境界面、 X はその位置のベクトル表示、 $D(X)$ は湧き出し強さの分布関数、 $G(x, X)$ は次式で与えられるグリーン関数である。

$$G(x, X) = i\pi H_0^{(1)}(kr) \quad \dots\dots\dots (6)$$

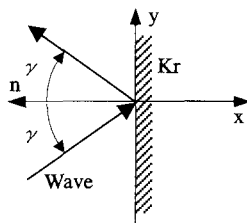
ここに、 $H_0^{(1)}$ は0次の第1種ハンケル関数、 $r=|x-X|$ である。湧き出し強さ $D(X)$ は、以下に示す造波板、反射境界面における境界条件より与えられる。

まず造波板における境界条件については、図-5 (a) に示すように造波板の水平方向変位速度と水粒子の造波板法線方向の速度が等しいことから次式で与えられる。

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = \frac{\partial \xi}{\partial t} \quad (\text{造波板上 } S_g) \quad \dots\dots\dots (7)$$



(a) 造波板境界の場合



(b) 反射境界の場合

図-5 境界条件に関する説明図

ここに、 n は造波板 Sg より流体中に向かう単位法線ベクトル、 ζ は造波板の水平変位である。造波板の変位に対してスネーク理論 (Biesel, 1954) を適用することにより、式 (7) は次式のように表示できる。

$$\frac{\partial \phi_0(\mathbf{x})}{\partial n} = \sigma b e^{ik'y} F(kh) \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 b 、 k' および F はそれぞれ造波板の変位振幅、変位波数および造波効率であり、次式で与えられる。

$$k' = k \sin \alpha \dots\dots\dots (9)$$

$$b = \frac{a \cos \alpha}{\sinh(kh) F(kh)} \frac{\tau}{\sin \tau} \dots\dots\dots (10)$$

$$F(kh) = \frac{4k}{2kh + \sinh(2kh)} \int_0^h \cosh(ks) ds \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 $\tau = k'B/2$ 、 B は造波板 1 枚の幅である。数値計算に当たっては、各造波板端部のピストン部の変位から造波板上に分布させた湧き出し位置での法線方向速度成分を内挿により与えている。

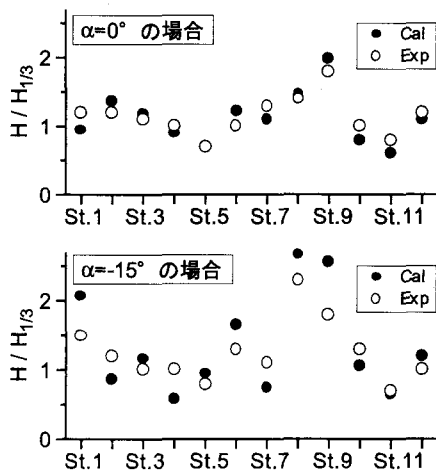
次に、護岸および水槽側壁の反射境界面における境界条件については、Berkhoff (1976) の方法に従って次式で与えている。

$$\frac{\partial \phi_0}{\partial n} + \beta k \phi_0 = 0 \dots\dots\dots (12)$$

ここに、 $\beta (= \beta_1 + i\beta_2)$ は複素反射率を表し、一般的な反射率 Kr および反射波の位相のずれ ε と次のように関係付けられる。すなわち、図-5 (b) に示すように入射角および反射角共に等しい場合、波浪場の速度ポテンシャル ϕ_0 は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \phi_0(\mathbf{x}) = & \exp\{i(kx \cos \gamma + ky \sin \gamma)\} \\ & + Kr \exp\{i(-kx \cos \gamma + ky \sin \gamma + \varepsilon)\} \end{aligned} \dots\dots\dots (13)$$

式 (13) を式 (12) に代入して整理すると、 β_1 および β_2

図-6 Kr および ε の検討結果

は次のように表される。

$$\begin{aligned} \beta_1 &= \frac{2Kr \sin \varepsilon \cos \gamma}{1 + Kr^2 + 2Kr \cos \varepsilon} \\ \beta_2 &= \frac{(1 - Kr^2) \cos \gamma}{1 + Kr^2 + 2Kr \cos \varepsilon} \end{aligned} \dots\dots\dots (14)$$

直立護岸の反射率と遊水部を有する二層構造の水槽側壁での反射波の位相のずれ ε については、特に ε に対してどのような値に設定すればよいかわからないため、非越波の規則波 (波高 $H=6$ cm、周期 $T=1$ s) による護岸前面の波高計測実験結果を対象とした予備計算より、図-6 に示すように護岸前面の波高の空間変化が再現できる値として、護岸の反射率 $Kr=0.95$ 、直立護岸での反射波の位相のずれ $\varepsilon=0$ をそれぞれ採用することにした。なお、水槽側壁での反射率は $Kr=0.3$ 、水槽側壁での反射波の位相のずれは $\varepsilon=0$ に設定した。

(2) 越波量の算定方法

造波板の時間変位に伴う護岸前面の水位変動 η および静水面 ($z=0$) における平面流速 (u, v) はそれぞれ次のように与えられる。

$$\eta = -\frac{\sigma}{g} \text{Im}(\phi_0') = \frac{\sigma}{g} |\phi_0'| \cos \varphi \dots\dots\dots (15)$$

$$u = \frac{\partial \phi_0'}{\partial x}, \quad v = \frac{\partial \phi_0'}{\partial y} \dots\dots\dots (16)$$

$$\varphi = -\tan^{-1} \left[\frac{\text{Re}(\phi_0')}{\text{Im}(\phi_0')} \right] \dots\dots\dots (17)$$

ここに、 $\text{Re}(\quad)$ 、 $\text{Im}(\quad)$ はそれぞれ実部と虚部を表す。

護岸の越波量は、式 (15)～(17) により算定された護岸前面の水位変動 $\eta(t)$ と護岸天端高さ h_c 、ならびに堤体法線方向の流速 $U(t)$ の時系列結果より以下のように算定する。すなわち、護岸の各位置における単位幅当たりの越波量 q は、図-7 に示すように $\eta(t) > h_c$ かつ $U(t)$

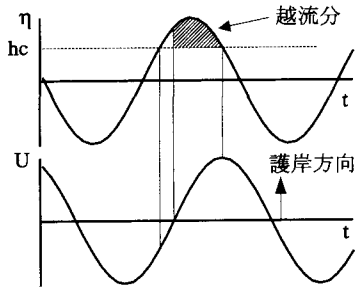


図-7 越波算定モデルの説明図

が護岸方向の場合、次式で算定できる。

$$q = \sum C(\eta(t) - h_c) U(t) \Delta t \quad \dots\dots\dots (18)$$

ここに、 C は越流係数、 Δt は計算時間ステップである。越流係数は、実験結果との比較より $C=0.2$ としている。

(3) 計算モデルの適用性

多方向不規則波浪場に関する計算では、ダブルサンメーション法を適用し、波向成分は主波向きに対して $\pm 45^\circ$ の間を 1° 刻み、周波数成分に関しては $0.1 \sim 2.0$ Hz の間を 0.1 Hz 刻みとしている。

図-8は、一方向波と多方向波における護岸Lサイドの無次元越波流量の空間分布に関する実験結果と計算結果の比較の一例を示したものである。なお、 $T_{1/3}=1$ s の場合である。一方向波の場合、計算モデルは越波流量の空間変化の特徴を再現しているが、多方向波の場合、このケースを含めて空間分布におけるピーク位置は再現するものの、計算結果には顕著な不連続な変動が全般に認められ、さらに検討が必要である。

5. ま と め

本研究は、隅角部を有する直立護岸を対象に護岸軸方向の越波流量の空間変化について多方向波と一方向波の違いについて検討し、以下のことが明らかになった。

(1) 護岸延長距離で平均化した平均越波流量は、従来通り直角入射の場合は一方向波が大きくなり、斜め入射の場合、入射角の変化に伴って越波量が低減することから多方向波と一方向波は同程度の越波流量となった。

(2) 護岸軸方向の越波流量の空間分布より、一方向波および S_{max} が大きい多方向波の場合は、主波向きの変化に対応した護岸前面の波高変化により越波流量が大きく現れる区間が入射方向に対して下手側に移動するが、波の方向分散性が強い多方向波では一方向波の場合のような顕著な下手側への移動は認められなかった。また $\alpha = -15^\circ$ の多方向波の場合、越波流量のピーク値は一方向

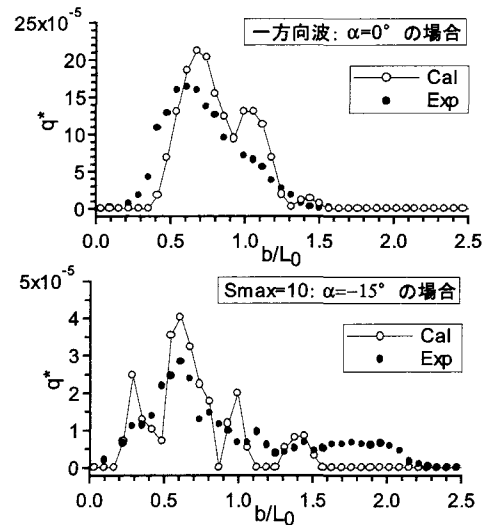


図-8 越波流量の空間分布に関する実験結果と計算結果の比較

向波と同程度となった。

(3) 越波量の計算モデルは越波流量の空間変化の特徴を再現するものの、多方向波の再現性に問題を残しており、今後さらに検討を行う予定である。

参 考 文 献

- 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.
- 平石哲也・金澤 剛・榎本達也・佐藤一央 (1996): 多方向不規則波の護岸越波流量の数値計算, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 716-720.
- 藤田 竜・森屋陽一・関本恒浩 (2001): 数値モデルによる隅角部を有する護岸越波流量の評価法, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 746-750.
- 松見吉晴・E. P. D. Mansard・大野賢一 (1994): 多方向波浪場における防波堤周辺の波動場の計算モデル, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 131-135.
- 森屋陽一・菊池正行・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.
- Berkhoff, J. C. W. (1976): Mathematical model for simple harmonic water wave diffraction and refraction, Delft Hydraulics Laboratory, Rpt. No. 168.
- Biesel, F. (1954): Wave machines, Proc. of 1st Conf. on Ships and Waves, Hoboken, N. J., pp. 288-304.
- Franco, C. and L. Franco (1999): Overtopping formulas for caisson breakwaters with nonbreaking 3D waves, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Vol. 125, No. 2, pp. 98-108.
- Isaacson, M. (1989): Prediction of directional waves due to a segmented wave generator, Proc. of 23rd Congress of IAHR, Vol. C, pp. 435-443.