

長水槽における横波モードを考慮した斜波・ 多方向不規則波の造波方法

森 田 知 志*・大 本 晋 士 郎*

1. ま え が き

波の方向性を考慮した実験手法の確立を目的に、多方向造波機の制御方法に関する一連の研究（例えば、高山ら、1989）が精力的に進められてきた。こうした研究の多くは水槽幅を造波機列の長さよりも充分大きくとった角水槽を対象としたものであり、両側の側壁前面に消波材を設置して波の反射を抑えるのが通例となっている。

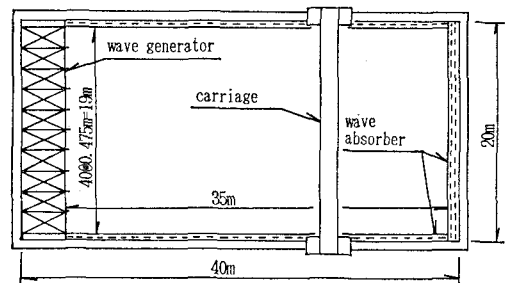
一方、近年では水槽の新設に際して敷地やコストなどの制約から短辺を造波機の列長に合わせた長水槽を採用した施設が多く見受けられる。この場合には側壁よりの反射波の消波が不十分となりやすく、斜め規則波にしてみると波浪特性の安定した水域は角水槽のそれに比較して狭くなる。この問題に対しては、Funke ら（1987）や Dalrymple（1989）が提案した側壁での完全反射を利用した造波方法が有効と考えられる（今井ら、1991 など）が具体的な適用法や実験での検証など検討の余地が残されている。また多方向不規則波に関してみても、発生波の特性など具体的なデータはほとんど公表されておらず、長水槽による実験の効率化を図る上で大きな障害と言えよう。

本研究は、波浪の安定水域を長水槽内の広い範囲で再現することを目的に、上記した手法による斜め規則波の造波方法と発生波の特性について明らかにする。また同手法の多方向不規則波への応用方法についても検討し、併せて造波実験による検証を行うものである。

2. 実験装置

2.1 平面水槽

（株）熊谷組技術研究所の、長さ 40 m、幅 20 m、深さ 1.5 m の平面水槽を用いた。図—1 に示すように、水槽の一端には後述の造波装置が、他端には厚さ 1 m の消波かごとが全幅にわたって設置してある。両側壁にも厚さ 50 cm の消波かごとが設けてあるが、今回はその前面に耐水ベニヤ板を張りつけて波が反射する状態で使用した。また側壁上のレールを走行する門型の計測台車を備えており、移動計測の省力化が可能である。



図—1 平面水槽

2.2 造波装置

幅 47.5 cm のピストン式パドル 40 枚からなる不連続型の多方向造波装置で、各パドルは 500 W のサーボモータによって駆動される。最大ストロークは ± 40 cm であり、周期 0.4~4.0 s、最大波高 50 cm の能力がある。

各パドルは専用の演算器で制御され、最大 1 024 個の正弦波の加算とサーボモータへの信号出力をリアルタイムで処理することができる。ホストコンピュータから演算器へ転送するデータは各正弦波の周波数、振幅および初期位相であり、時系列を入力する方法に比べ記憶容量や転送時間が少なく済む。そして一旦転送されたデータは、新たなデータを追加転送しない限り保持されつづけ、同じ条件による造波を繰り返して行うことができる。40 台の演算器の各々に 1 024 成分の造波データを転送する場合の所要時間は約 20 分である。

3. 造波信号の作成方法

3.1 速度ポテンシャルの表示

図—2 に示すような幅 B の平面水槽において、 y 軸上に設置された列長 B のピストン式造波機が、単一の周波数で運転されるものとする。両側壁は鉛直・不透過で波は一樣に反射されるもの、また水槽は $x \rightarrow \infty$ まで続き奥壁からの波の反射はないものと仮定する。水深を一定とし波動場が微小振幅波理論によって表現できる時、発生波の速度ポテンシャル ϕ の基礎方程式と、造波機表面を除く境界条件は以下のように表される。

* 正会員 工修（株）熊谷組 技術研究所

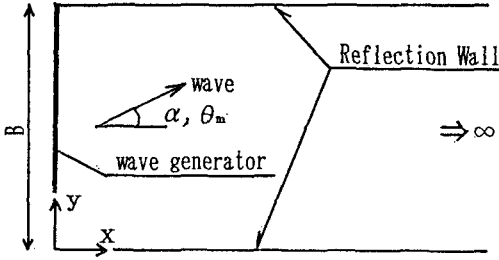


図-2 解析モデル

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} - \frac{\omega^2}{g} \Phi = 0 \quad (z=0) \quad (2)$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \left\{ \frac{\partial \Phi}{\partial x} - i k \Phi \right\} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \quad (z=-h) \quad (4)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial y} = 0 \quad (y=0, B) \quad (5)$$

ここに、 ω : 角振動数、 k : 波数、 $\bar{k}$: k の x 方向成分

g : 重力加速度、 h : 水深、 $i = \sqrt{-1}$

側壁の反射条件を表す式 (5) を考慮すると、 Φ は y 方向へのフーリエコサイン展開式で表現できる。

$$\Phi = -\frac{ig}{\omega} \sum_{m=0}^{\infty} \phi_m(x, z) \cos(\lambda_m y) e^{-i\omega t} \quad (6)$$

ここに $\lambda_m = m\pi/B$ で m 次のフーリエモードの特性量を、 ϕ_m は Φ の m 次モード成分の振幅を各々表す。

式 (6) を式 (1)~(4) に代入して得られる基礎方程式と境界条件を解いて ϕ_m を求めた後、式 (6) に代入すると、 Φ と進行波型および定常波型の分散関係式が各々式 (7)~(9) のように導ける。

$$\begin{aligned} \Phi = & -\frac{ig}{\omega} \left[\sum_{m=0}^{\infty} A_{0m} \frac{\cosh\{k(h+z)\}}{\cosh(kh)} e^{ip_m x} \cos(\lambda_m y) \right. \\ & + \sum_{m=\bar{m}+1}^{\infty} A_{0m} \frac{\cosh\{k(h+z)\}}{\cosh(kh)} e^{-q_m x} \cos(\lambda_m y) \\ & \left. + \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{l=1}^{\infty} A_{lm} \frac{\cos\{k_l(h+z)\}}{\cos(k_l h)} e^{r_{lm} x} \cos(\lambda_m y) \right] \\ & \cdot e^{-i\omega t} \quad (7) \end{aligned}$$

$$\omega^2 = gk \tanh(kh) \quad (8)$$

$$\omega^2 = -gk_l \tan(k_l h) \quad (l=1 \sim \infty) \quad (9)$$

ここに、 k_l : 定常波型の波数、 $p_m = \sqrt{k^2 - \lambda_m^2}$ 、

$q_m = \sqrt{\lambda_m^2 - k^2}$ 、 $r_{lm} = \sqrt{k_l^2 - \lambda_m^2}$ である。

また、 $\bar{m}$ は p_m が実数値となる m の最大値であり、式 (7) の第 1 項は進行波成分を表す。第 2, 3 項は減衰定常波成分を表すものである。そして $0 \leq m \leq \bar{m}$ の範囲内では式 (10) の関係が成立し、各モードは波向が $\pm \theta_m$ の斜め重畳波を表現することになる。以下ではこれらのモードを横波モードと呼ぶことにする。

$$\lambda_m = \frac{m\pi}{B} = k \sin \theta_m \quad (0 \leq m \leq \bar{m}) \quad (10)$$

3.2 造波パドルの運動変位

a) 運動変位の表示

ピストン式造波パドル列の運動変位 ξ を、式 (6) と同様にフーリエコサイン展開し、式 (11) のように表す。

$$\xi = R_0 \left[e^{-i\omega t} \sum_{m=0}^{\infty} G_m \cos(\lambda_m y) \right] \quad (11)$$

ここに、 R_0 は複素数の実部である。

そして、造波パドル表面上での Φ の境界条件式 (12)

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} = \frac{\partial \xi}{\partial t} \quad (x=0) \quad (12)$$

に式 (7) と (11) を代入し、分散関係式と関数の直交性を考慮して水深方向に積分すると、 A_{lm} と G_m の関係が次のように導ける。

$$A_{0m} = -\frac{ikC_0}{p_m} G_m \quad (13)$$

$$A_{lm} = -\frac{k_l C_l}{r_{lm}} G_m \quad (14)$$

ここに C_l はピストン式造波パドルの造波効率である。

$$C_0 = \frac{4 \sinh^2(kh)}{2kh + \sinh(2kh)} \quad (15)$$

$$C_l = \frac{4 \sin^2(k_l h)}{2k_l h + \sin(2k_l h)} \quad (l=1 \sim \infty) \quad (16)$$

b) 斜め規則波の造波信号

$x=x_a$ に位置する y 軸と平行な直線上において、 Φ は波向角度 α 、波高 H の一様な斜め規則波を表しているものとする。この時 A_{0m} は次式を満足する必要がある。

$$\sum_{m=0}^{\infty} A_{0m} e^{ip_m x_a} \cos(\lambda_m y) = \frac{H}{2} e^{i(k x_a + k_y y)} \quad (17)$$

ここに、 $k_x = k \cos \alpha$ 、 $k_y = k \sin \alpha$ である。

A_{0m} は式 (17) を三角関数の直交性を利用して y 方向に積分して求められ、結果のみ示すと次のようである。

$$A_{0m} = \frac{-ik_y H e^{i(k_x - p_m) x_a}}{B(k_y^2 - \lambda_m^2)} \{ (-1)^m e^{ik_y B} - 1 \} \quad (0 \leq m \leq \bar{m}) \quad (18)$$

なお、式 (18) において m の上限を $\bar{m}$ としたのは、 Φ のうち進行波成分のみを考慮したことによる。

A_{0m} が求まると式 (13) と (11) を介して造波パドルの運動変位 ξ が算定でき、造波信号が確定する。また式 (7) によって Φ が算定でき、再現波浪場のシミュレーションを行うことができる。

c) 多方向不規則波の造波信号

主軸が x 軸方向で左右対称の方向分布をもつ多方向不規則波の造波を考える。この場合、式 (10) に示したように成分波の波向は横波モード毎に分解表示されており、その合成方法としては各々の周波数成分波の表現に

波向の異なった多くの方向波を用いるダブルサメーション法が適しているものと考えられる。この方法に従うと造波パドル列の運動変位は、 Φ の進行波成分のみ考慮して式 (19) によって算定される。

$$\xi = \sum_{n=1}^{N_f} \sum_{m=0}^{\infty} a_{nm} \cos(\omega_n t + \varepsilon_{nm}) \cos(\lambda_m y) \dots (19)$$

ここに、 N_f は周波数分割数で、下添字 n は各々の成分に基づく量を示す。下添字 m は横波モードに基づく量であり、式 (10) によって波向が $\pm\theta_m$ の重腹波に対応する。 ε_{nm} は $0 \sim 2\pi$ の一様乱数である。そして、各成分波の振幅 a_{nm} は式 (20) によって決定される。

$$a_{nm} = \frac{\cos \theta_m}{(C_0)_n} \sqrt{2G(f_n, \theta_m) S(f_n) \Delta\theta \Delta f} \dots (20)$$

ここに、 f , $S(f)$ および Δf は各々代表周波数、周波数スペクトル、分割幅であり、波のもつ全エネルギーを N_f 等分して決定できる。また $G(f, \theta)$, $\Delta\theta$ は正規化された方向関数と方向幅であり、 θ_m に従って決定できる。

3.3 不連続型造波機への適用

不連続型造波機の各パドルの制御信号は、前節で示した運動変位の、パドル中央点での値を代表させることによって決定できる。そしてこの場合には、 ξ は y 軸方向になめらかに運動する理想的なパドルを仮定したものであり、離散型パドルへの適用に際しては合成するモードの個数 M に制限を課す必要がある。既に M は式 (18) や (19) の算定時に制約を受けており、これら2つの制約をまとめて示すと以下のようである。

① 発生波が進行波となるための制約：式 (10) が成立し横波モードとなるための条件で、次式で表される。

$$M = \bar{m} = \max [2N_p b/L] \dots (21)$$

ここに、 $\max(\cdot)$: $(\cdot)$ 内の値を越えない最大の整数、 N_p : パドル数、 b : パドル幅、 L : 波長である。

② パドル数の有限性による制約：隣接したパドルの運動位相差が π を越えないための制約で、 $M = N_p$ で表される。

図-3 は発生波と横波モードとの関係を示すもので、図中には上記の制約による造波可能範囲が併記してある。斜め規則波を再現するために必要な M は、 b/L が増加するにつれてより大きくなることや、 $b/L > 0.5$ で α の大きい領域では造波困難となりやすいことなどがわかる。

次に造波の可否を定量的に評価するために、上記の制約による式 (17) の近似誤差を次式によって算定してみた。

$$\delta = \left[\frac{4}{BH^2} \int_0^B \left| \frac{H}{2} e^{ik_y y} - \sum_{m=0}^M A_{0m} \cos(\lambda_m y) \right|^2 dy \right]^{1/2} \dots (22)$$

図-4 は縦軸と横軸に再現波の α と b/L をとり、 δ を等値線で示すものである。この図から上記②の制約を受け

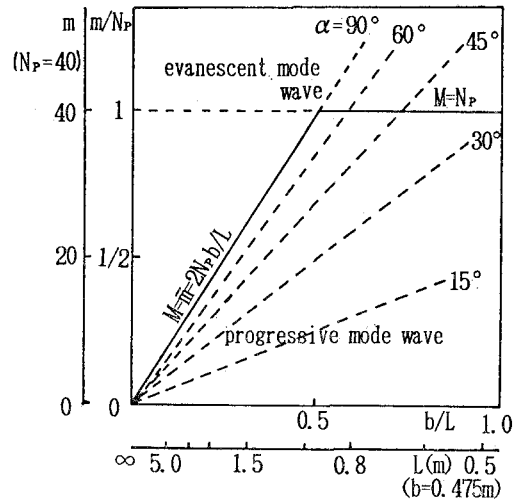


図-3 発生波と横波モードの関係

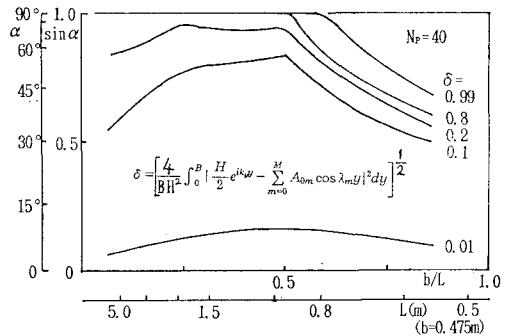


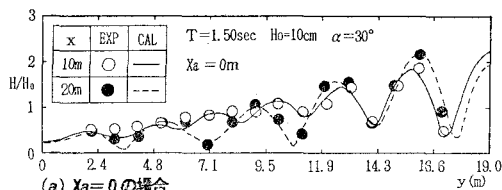
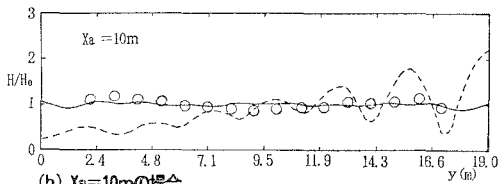
図-4 モードの打ち切りによる再現誤差

ない $b/L < 0.5$ の範囲では、横波モードを利用することによって α の大きな領域まで斜め規則波を精度よく表現できることがわかる。

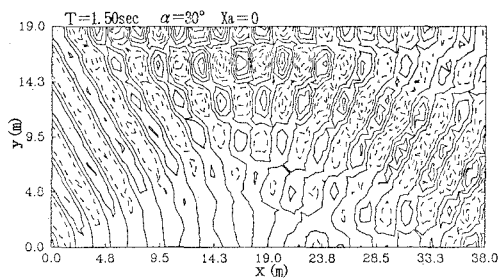
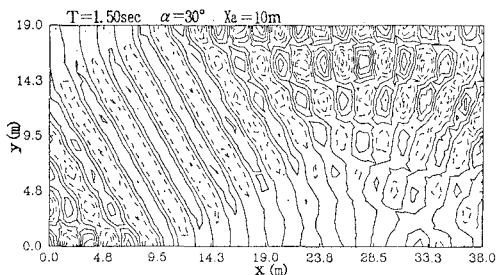
4. 発生波の特性

4.1 斜め規則波の場合

式 (18) に基づいて作成した造波データによる発生波について、 y 軸方向への波高分布に関する実験結果と計算結果の比較を図-5 (a) (b) に示す。なお実験は2章で紹介した計測台車を設定位置に移動させて造波機を運転し、車上に 50 cm の間隔をおいて直列配置した 16 台の波高計によって水槽幅方向への波高分布を計測したものである。造波条件は、水深 $h=80$ cm、波周期 $T=1.5$ s、波高 $H_0=10$ cm、波向 $\alpha=30^\circ$ の各条件の下で、 x_a のみを 0 m、10 m と 2 種類に変化させた。図-5 から実験値と計算値の比較を行ってみると、両者の対応は定量的にみても満足でき、本計算法によって造波データに対する発生波の予測が精度よく行えるものと言えよう。また (b) 図中に示した $x=10$ m における波高分布は一定値を示しており、 x_a の設定に従って波高の一樣


 (a) $X_a = 0$ の場合

 (b) $X_a = 10$ m の場合

図—5 斜め規則の波高分布


 (a) $X_a = 0$ の場合

 (b) $X_a = 10$ m の場合

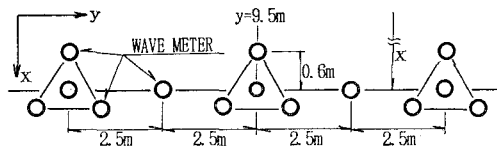
図—6 斜め規則波の水位の平面分布

な安定水域が再現されていることがわかる。

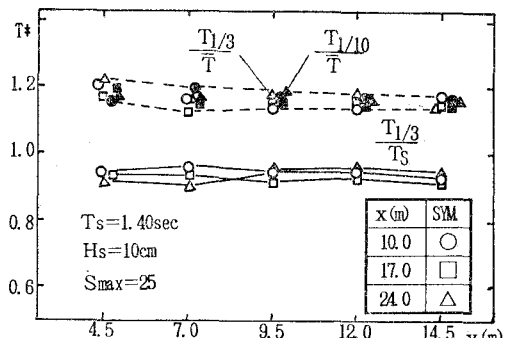
図—6(a), (b) は各々 図—5(a), (b) と同一の条件下において、水槽内に出現する瞬間的な水位分布の計算結果をコンターで示す。側壁反射を考慮しない従来型の造波方法に相当する (a) 図においては、波峰線がそろって出現する領域が $x=0$ の造波機前面付近に限られることが確認できる。そしてこうした領域は (b) 図においては $x=10$ m を中心としたより広い面積で現れてきており、本造波方法によって斜め規則波に対する安定水域の面積をほぼ 2 倍に拡大できるものと言える。

4.2 多方向不規則波の場合

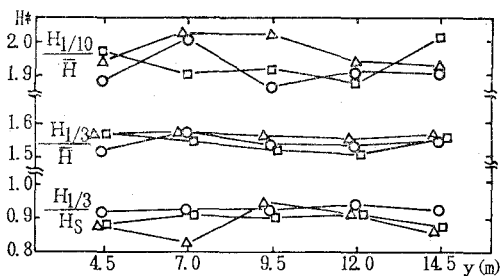
周波数スペクトルと方向関数に、Bretschneider 一光易型と光易型を採用し、有義波周期 $T_s=1.4$ s、波高



図—7 波高計の配置状況



(a) 周期分布



(b) 波高分布

図—8 代表波の空間分布

$H_s=10$ cm、方向集中度パラメータ $S_{max}=25$ 、水深 $h=80$ cm の造波条件による実験を行った。0.25~2.5 Hz の範囲で 500 個の代表周波数を設定し、式 (19) に従って造波データを作成した。横波モードを含む成分波の個数は総合計で 9 762 個となった。発生波は 図—7 のように計測台車上に配置した 14 台の波高計で計測し、直列に位置する 5 点での周波数スペクトル、および 3 組の星型アレイの各々について MLM 法による方向関数の推定を行った。

発生波の空間分布特性に関して、代表波の波高比と周期比を 図—8 に、周波数スペクトルを 図—9 に、方向関数を 図—10 に各々示す。これらの図から本造波方法による発生波の特性は水槽内の各点においてほぼ一樣なものであることがわかる。このことについて本研究では、比較のため横波モードを考慮しない従来型の造波方法による実験も行っているが、ここに示したものと大差のない結果が得られた。従って多方向不規則波が広い領域で安定した特性を示すのは造波方法ではなく、水槽側壁の鏡像効果による影響が大きいものと考えている。

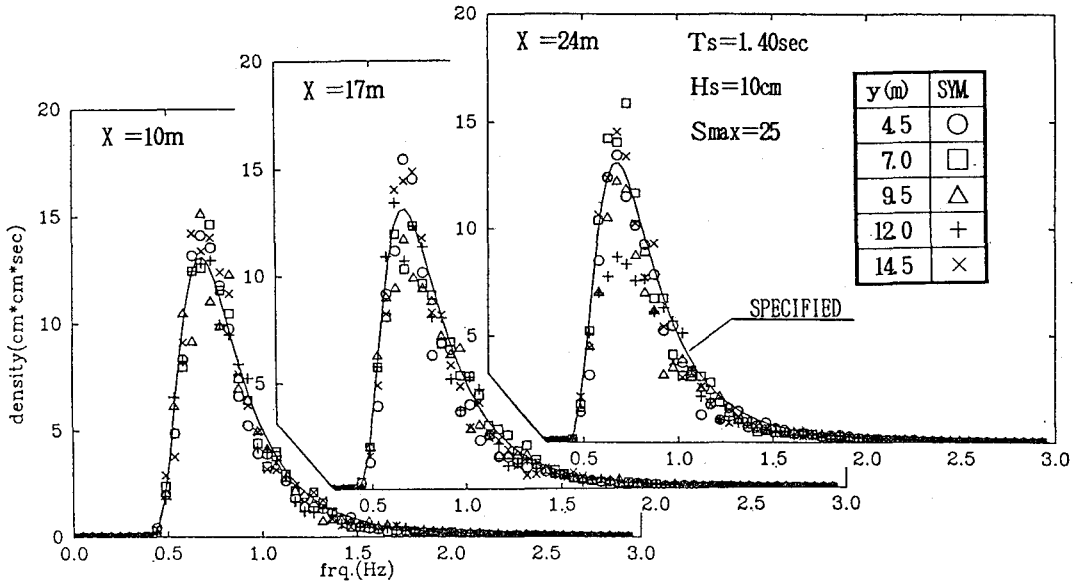


図-9 周波数スペクトルの空間分布

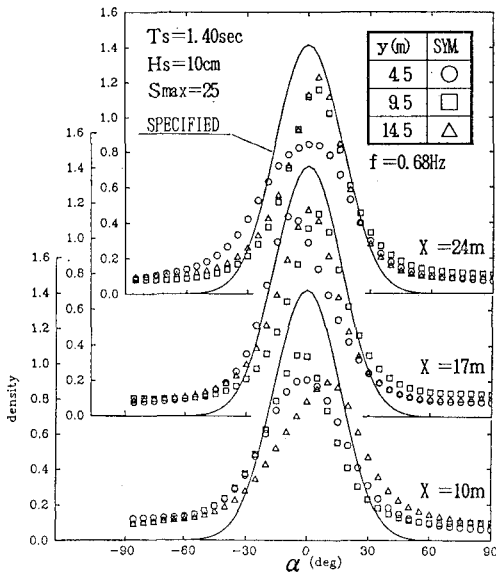


図-10 方向関数の空間分布

5. 結 語

1) 長水槽内に造波した斜め規則波は、有限個の横波モードに分解して表示できる。そして造波に必要なモー

ドの個数は、水槽幅、波長および波向で決定できる。

2) 本研究で示した造波方法により、斜め規則波の安定領域を任意の位置に設定でき、またその面積もほぼ2倍に拡大できる。

3) 完全反射側壁の鏡像効果により、水槽内の広い範囲でほぼ様な特性の多方向不規則波を造波することが可能である。

本研究を実施するにあたり、愛媛大学工学部の中村孝幸助教授より貴重な助言をいただいた。ここに記して謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 今井貫爾・池谷 毅・秋山義信・南誠信・岩瀬浩二 (1991): 側壁反射を利用した斜め規則波の造波方法, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 131-135.
- 高石知司・平石哲也・立石義博 (1989): 多方向不規則波の造波信号発生法に関する検討, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 153-157.
- Dalrymple, R. A. (1989): Directional wavemaker theory with sidewall reflection, J. of Hydraulic Research, Vol. 27, No. 1, pp. 23-34.
- Funke, E. R. and M. D. Miles (1987): Multidirectional wave generation with corner reflections, TR-HY-21, National Research Council Canada.