

湧き出し吸い込み型の無反射造波装置の造波特性について

田中正博*・大山 巧**・清川 哲志***

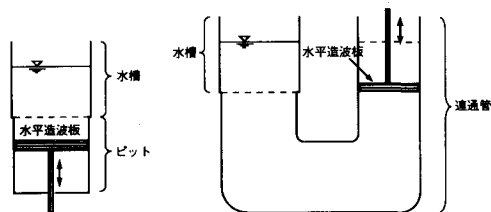
1. はじめに

最近、より実海域に近い波浪をつくり出すことができる多方向不規則波の発生装置が多く設置されてきた。しかし、この装置は、1) 波の入射角が大きくなると、使用できる有効領域が著しく狭くなる、2) 水槽内からの反射波が造波板で再反射し、水槽内の波浪場を乱してしまう、等の問題点がある。水槽中の模型等からの反射波が造波部で再反射し波動場を乱す影響を低減する方法として、1) 造波部と模型の間にフィルターを設置し反射波のエネルギーを減衰させる、2) 造波板の近傍で水面変動または水圧を測定して反射波を検出し、反射波が再反射しないように造波板の運動を制御する、3) 造波部を反射波が透過し再反射しない構造とする等がある。フィルターにより反射波のエネルギーを減衰させる方法は、造波板で発生させた波もフィルターによって減衰されるため、造波効率が著しく低下する。また、フィルターによる波の減衰率は周波数により異なるので、不規則波の造波には不適である。反射波の成分を造波板の運動により相殺する方法は、谷本ら (1983)、川口 (1986) によって 2 次元水槽で規則波を造波する方法が検討、実用化され、その後平口ら (1988) は不規則波に適用している。現在使用されている反射吸収型の造波装置はほとんどこの方法によるものである。池谷ら (1992) はこの反射波吸収方法の多方向の不規則造波への適用方法を理論的に検討している。しかし、この方法は水槽内のセンサで測定したデータを入反射分離法により反射波の振幅と位相を検出して造波板の運動にフィードバックするというプロセスを必要とするので、多方向の不規則造波の場合、多点の水面データを処理し造波板の制御にリアルタイムでフィードバックすることは極めて困難である。造波部を反射波が透過し再反射しない構造とする方法については、岩垣ら (1962) が図-1 に示すような水槽底に設けたピットに鉛直振動流を発生させ造波する装置を用いて実験を行っている。その後、合田 (1964) は鉛直振動流による造波

に関する造波特性や造波力について理論的に検討している。さらに、広本ら (1967) は合田の理論的検討に基づき造波装置を製作し、その造波特性を検討している。鉛直振動流による方法は、実用的には無反射に近い造波が実現できるにも拘わらず、今日ほとんど使用されていないのは、1) 無反射造波に対する要望が今日ほど大きくなかったこと、2) 浅海波の場合、通常のピストン型やフラップ型と同等またはそれ以上の造波効率を期待できるが、深海波になると極端に造波効率が低下すること、3) 水槽底に設けるピット部が高精度な加工を要し、また止水性の確保に不安が残る等の理由によるものと考えられる。しかし、無反射の造波を行うためには再反射を引き起こす造波板を水路内からなくすることが最も確実でシンプルな方法である。大山ら (1993) は無反射型の多方向不規則波の造波方式として、造波板の代わりに水の湧き出しと吸い込みを行なう造波ソースを円形状に配置する方法を考案し、この方法によれば反射波が造波部で再反射されることなく、かつ有効領域の広い造波が可能であることを理論的な検討により確認した。本研究はその具体的な方法として、水槽の底に設けたピットから水の湧きだしと吸い込みを与える方法（以下、ピット方式と称する）を考案し、造波部からの波の再反射とその造波効率の特性について理論と試作機により検討した。

2. ピット式造波装置の構造と構成

大山ら (1993) の考案した造波ソース方式の理論的検討では湧き出し・吸い込み源が鉛直方向に連続して配置されているが、実際には湧き出し・吸い込み装置が水槽



(a) ピットによる方法

(b) 連通管による方法

図-1 鉛直振動流による造波

* 正会員 清水建設 技術研究所
 ** 正会員 工博 清水建設 技術研究所
 *** 正会員 工博 清水建設 大崎研究室

内からの反射波の進行を妨げない(再反射しない)ように、その数をできるだけ少なくし、しかも深い位置に設置する必要がある。本研究で検討した造波装置は、図-2に示すように、水槽の底に設けたピット式の造波部(水の湧き出し・吸い込み装置)と、その背後の消波装置で構成される。造波部は、端部にフレキシブルなゴムチューブを取付けた密閉構造のピットと、ゴムチューブに鉛直運動を与える載荷板と加振装置からなる。本方式では、図-1に示した従来の方法のようにピット内に設けた水平板で振動流を起こすのではなく、ピットの外部に設けた水平板によりゴムチューブを伸縮させて水槽底のピット口から湧き出しと吸い込みを行う。なお、深海波に対し造波効率を高めることができるように、ピット口の位置を水深に応じて変えられる構造とする。また、ピット口からの水の吸い込みが円滑に行えるように、ゴムチューブの位置は水槽の水面よりも充分低く設置する。本研究用に試作した装置の造波部は、ピット幅10~80 cm、水平板と水槽底までの距離70 cm、また、水槽部は幅40 cm、長さ18 m、深さ60 cmである。

3. 解析理論

ピット式の水の湧き出し・吸い込み装置を有する造波水路を、図-3に示すような底に幅 B 、深さ q のピットに鉛直方向に振動する水平板 S_P を有する2次元水路を考

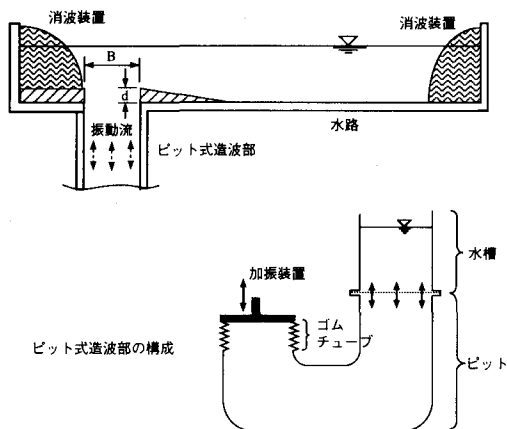


図-2 ピット式造波装置の構成

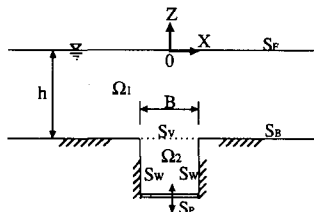


図-3 座標と記号の定義

える。座標を図のように定義し、水路は $x=\pm\infty$ まで続くものとする。定式化にあたり、領域を水路部 Ω_1 とピット部 Ω_2 に分ける。そして、水平板 S_P は $U=e^{-i\omega t}$ (ただし、 U :速度振幅、 ω :角振動数、 t :時間、 i :虚数単位($=\sqrt{-1}$)である)の速度で往復運動するものとする。板の運動に伴う流体の運動は速度ポテンシャルで記述できるものとし、領域 Ω_1 と Ω_2 でそれぞれ、 $\phi_1(x, z)e^{-i\omega t}$, $\phi_2(x, z)e^{-i\omega t}$ で定義する。このとき、 ϕ_1, ϕ_2 に関する基礎方程式と境界条件は以下に示すとおりである。

$$\nabla^2 \phi_1 = \frac{\partial \phi_1}{\partial z} \delta(z - z_v) \quad (\text{in } \Omega_1) \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial z} - \frac{\omega^2}{g} \phi_1 = 0 \quad (\text{on } S_F) \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial z} = 0 \quad (\text{on } S_B) \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial z} = \frac{\partial \phi_2}{\partial z}, \quad \phi_1 = \phi_2 \quad (\text{on } S_V) \dots\dots\dots (4)$$

$$\lim_{|x| \rightarrow \infty} \left(\frac{\partial \phi_1}{\partial |x|} - ik\phi_1 \right) = 0 \dots\dots\dots (5)$$

$$\nabla^2 \phi_2 = -\frac{\partial \phi_2}{\partial z} \delta(z - z_v) \quad (\text{in } \Omega_2) \dots\dots\dots (6)$$

$$\frac{\partial \phi_2}{\partial n} = 0 \quad (\text{on } S_W) \dots\dots\dots (7)$$

$$\frac{\partial \phi_2}{\partial n} = U \quad (\text{on } S_P) \dots\dots\dots (8)$$

ただし、 S_F :自由表面、 S_B :水槽底面、 S_V :水路部とピット部との仮想面、 S_W :ピット部側面、 S_P :ピット部の水平造波板である。式(1)~(5)および式(6)~(8)、(4)で定義される境界値問題に ϕ_1, ϕ_2 に対応するグリーン関数 G_1, G_2 と、グリーンの定理を適用して積分方程式に変換すると、領域 Ω_1 と Ω_2 の任意の点 $P(x, z)$ におけるポテンシャルはそれぞれ式(9)および(10)のように表される。

$$\alpha \phi_1(P) = -2 \int_{S_V} G_1 \frac{\partial \phi_1}{\partial z} dz \quad (\text{in } \Omega_1) \dots\dots\dots (9)$$

$$\begin{aligned} -\alpha \phi_2(P) = & \int_{S_W} \phi_2 \frac{\partial G_2}{\partial n} + \int_{S_P} \left(\phi_2 \frac{\partial G_2}{\partial n} - U G_2 \right) dc \\ & + \int_{S_V} \left(\phi_2 \frac{\partial G_2}{\partial z} - 2 G_2 \frac{\partial \phi_2}{\partial z} \right) \quad (\text{in } \Omega_2) \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

ただし、 α は点 P が領域内にあるときは1、境界上にあるときは1/2となる定数である。 G_1 はJohn(1951)によって導かれたグリーン関数で次式のとおりである。

$$\begin{aligned} \alpha G_1(P, Q) = & \frac{i(k^2 - \nu^2)}{k(h(k^2 - \nu^2))} \\ & \cdot \cosh k(h+z) \cosh k(h+\zeta) e^{ik|x-\xi|} \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(k_n^2 + \nu^2)}{k_n \{h(k_n^2 + \nu^2) - \nu\}} \cos k_n(h+z) \end{aligned}$$

$$\cdot \cos k(h+\xi)e^{-ikn|x-\xi|} \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 $\nu=w/g$ 、 k ：波数 ($k \tanh kh=\nu$ の実正根)、 k_n ：固有値 ($k_n \tanh k_n h=-\nu$ の実正根、 $k_1 < k_2 < \dots$)、 $Q(\xi, \zeta)$ ：境界上の点である。また領域 Ω_2 におけるグリーン関数 G_2 は式 (12) で与えられる。

$$\alpha G_2(P, Q) = -\frac{1}{2\pi} \ln r \quad (r = \sqrt{(x-\xi)^2 + (z-\zeta)^2}) \dots\dots\dots (12)$$

積分方程式 (9) および (10) を離散化し、境界上でのポテンシャル ϕ_1 、 ϕ_2 を求めれば、式 (9) により領域 Ω_1 の任意の点のポテンシャルが得られる。なお、ピット部での波の反射の計算では、まず領域 Ω_1 における速度ポテンシャル Φ を次式のように定義する。

$$\Phi(x, z, t) = \frac{gH}{2\omega} \{\phi_1(x, z) + \phi_2(x, z)\} e^{-i\omega t} \dots\dots (13)$$

ただし、 g ：重力加速度、 ϕ_i ：入射波のポテンシャルである。基礎方程式は、式 (1)、(6) に示したポアソン方程式の代わりにラプラス方程式を、また境界条件のうち、仮想面 S_V で $\phi_i + \phi_1 = \phi_2$ 、 $\partial \phi_i / \partial n + \partial \phi_1 / \partial n = \partial \phi_2 / \partial n$ 、水平造波板 S_P で $\partial \phi_2 / \partial n = 0$ とすれば、同様の手順で領域 Ω_1 の任意の点のポテンシャルが得られるので、反射率を求めることができる。

4. 造波効率と反射率

ピット方式は、ピット幅を大きくするほど造波効率が高くなるが、模型等からの反射波のピット部での再反射も大きくなる。したがって、波の再反射が小さくかつ造波効率が大きくなるようにピットの条件を設定することが重要である。

(1) ピット部での波の反射：ピット幅と水深との比 B/h を 0.63, 1.2, 1.5, 2.0, 3.0 に変化させたときのピット部での波の反射率特性を図-4 に示す。ただし、図中の実験値は、ピット幅 B を 30 cm に固定し、水深 h を 15, 20, 25, 40 cm に変化させたときの結果である。また、実験における反射率 K_R はピット中心から $N \times L/2$ および $N \times L/2 + L/4$ (L ：波長、 $N=1, 2, \dots$) の位置に鉛直壁を設置して重複波を形成し、壁面で測定した重複波高から算出した (Goda et al., 1964)。このとき反射率は次式で求められる。

$$K_R = \frac{(H_s)_{\max} - (H_s)_{\min}}{(H_s)_{\max} + (H_s)_{\min}} \dots\dots\dots (14)$$

ここに、 $(H_s)_{\max}$ 、 $(H_s)_{\min}$ ：ピット中心よりそれぞれ $N \times L/2$ 、 $N \times L/2 + L/4$ の距離に鉛直壁を設置したときに測定される重複波高である。なお、計算ではピットの深さをいずれも 30 cm としている。計算結果によれば、 $B/h \leq 2.0$ であれば K_R は最大でも 0.1 程度であり、 $B/h=3.0$ でも 17% の反射となっている。実験結果の方

が計算結果よりも大きくなっており、特に反射率 K_R がピークとなる水深波長比 $h/L=0.15$ 近傍においてその差が大きい。これは、 h/L の小さい (すなわち周期の長い) 領域では、発生波に高次の周波数成分が現われ波形が乱れること、また、ピット内での水柱の共振、全般に反射率が小さいことによる相対的なバラツキの増大、等の理由によるものと考えられる。実験結果はバラツキがあるが、 $h/L > 0.15$ の領域において $B/h \leq 2.0$ の場合には $K_R \leq 0.15$ を、また、 $B/h \leq 1.5$ の場合には $K_R \leq 0.1$ を期待できる。図-5 にピット幅を 80 cm に固定し、水深を 15, 25, 40 cm に変化させたときの反射率特性 (実験値) を示す。 $B/h=3.2, 5.3$ の場合、広い範囲の h/L に対して $K_R \geq 0.2$ で、ピークでは $K_R > 0.35$ となっており、反射波の再反射をなくすという目的に適わない。両図より、広範囲の h/L に対して $K_R \leq 0.15$ を期待する場合には $B/h \leq 2.0$ 、また、 $K_R \leq 0.1$ を期待する場合には $B/h \leq 1.2$ がそれぞれピットに求められる条件と考えられる。ただし、計算結果から推察すれば、ピット部の構造や形状の工夫によりさらに幅広のピットに対しても $K_R \leq 0.1$ 、0.15 とすることが可能と考えられる。

(2) 造波効率：図-6 は、 $B/h=1.2$ に固定し、 q/h を 0.2, 2.0, 4.0 に変化させたときの造波効率 $H/2e$ の計算結果を示したものである (q ：ピット深さ)。ただし、図中の $q/h=0.0$ に対する結果は、次式に示す合田 (1964) が導いた鉛直振動流による造波効率の算定式により求めた値である。

$$\frac{H}{2e} = \frac{8 \sinh kh}{\sinh 2kh + 2kh} \sin kb \dots\dots\dots (15)$$

ここに、 H ：波高、 e ：造波板の片振幅、 $2b$ ：ピットの幅 ($=B$) である。なお、図中に示したピット式造波装置の振幅 e は、フレキシブルチューブの運動片振幅 e' をピット口の幅 B での等価な振幅に換算した値である。ピット

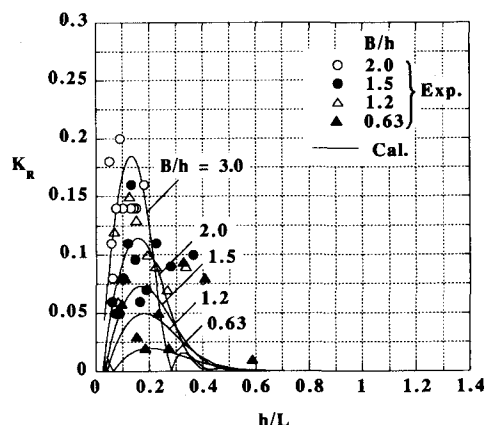


図-4 ピットでの波の反射 (計算値と実験値の比較)

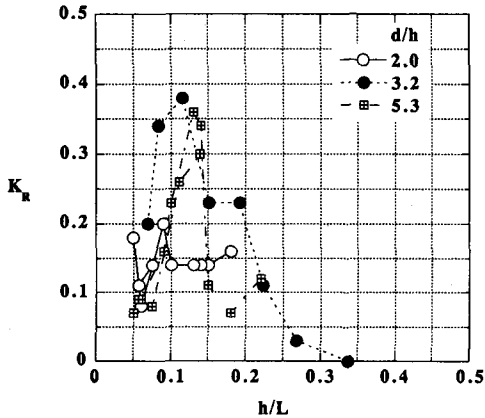


図-5 ピットでの波の反射 (実験値)

の深さが大きくなると造波効率 $H/2e$ はわずかに小さくなるが影響は小さい。したがって、実用的にはピットの入口で水平板が鉛直運動するものとして扱ってもよいことがわかる。

図-7 は、図-4 に示した結果に対応する造波効率特性の実験値と計算値を示したものである。実験値は計算結果とよく一致しており、造波効率 $H/2e$ はここに提案した計算方法で精度よく算定できる。ピット方式の理論値に対する実効値は概ね 90 % 以上で、合田ら (1964) の行った実験結果 (平均 80 %) に比べて高くなっている。

図-8 は、 $B/h=1.2, 2.0, 3.2$ に対するピット式と、一般的なフラップ式およびピストン式造波装置の造波効率特性を比較したものである。ただし、図中に示したピストン式およびフラップ式造波装置の $H/2e$ は理論値に平均的な実効率 75, 70 % (当社所有装置の実測値) をそれぞれ乗じて求めた値である。ただし、フラップ式およびピストン式の造波板とピット式の造波板では、同じ振幅 e でも仕事量が異なるので、 $H/2e$ のみで厳密な造波効率を比較することはできないが、概略の効率は評価できる。フラップ式やピストン式の場合には深海波領域になるほど効率は大きくなるが、ピット式の効率は浅海波領域でピークをとり深海波になるに従って低下する。図より、ピット式で $B/h=2$ 程度にすれば $h/L \leq 0.15$ でピストン式と同程度、 $h/L \leq 0.2$ でフラップ式よりも高い造波効率を得ることができる。 h/L が大きい場合におけるピット方式の造波効率は、造波条件に応じてピットの湧き出し口の幅と位置 (図-2 の B と d) を可変とすることにより改善できる。図-9, 10 は、水面からピット湧き出し口までの深さ h' を 25 cm に固定し、水深 h を 25, 36, 44 cm ($d/h=0.0, 0.305, 0.432$) に変化させたときの造波効率 $H/2e$ とピット部での波の再反射の特性をそれぞれ示したものである。ただし、いずれのケースもピット

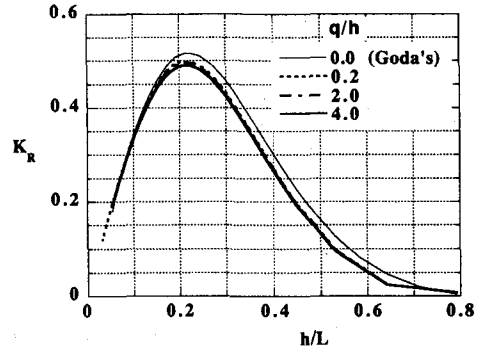


図-6 造波効率 (ピット深さの影響)

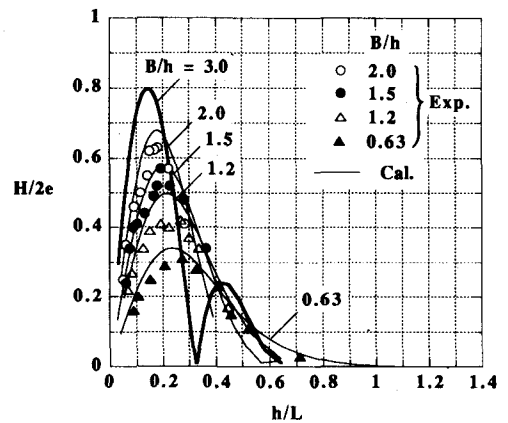


図-7 造波効率 (計算値と実験値の比較)

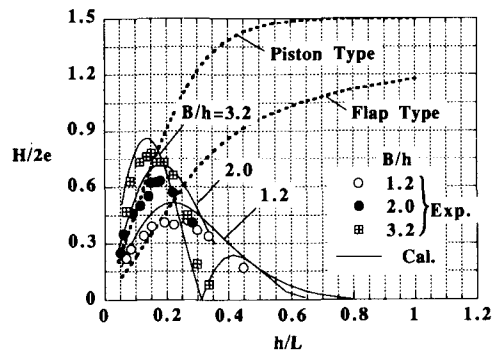


図-8 各種方式の造波効率の比較

幅は 30 cm である。 h' が一定でも、水深の増加に対応してピットの湧きだし口の高さ d を高きした場合、造波効率はむしろ高くなっている。一方、反射率 K_R は若干バラツキはあるが、いずれの場合もピークで 12~15 %, 平均的には 10 % 以下になっている。従来、鉛直振動流による造波方式は浅海域の波に対しては有効であるが、深海域

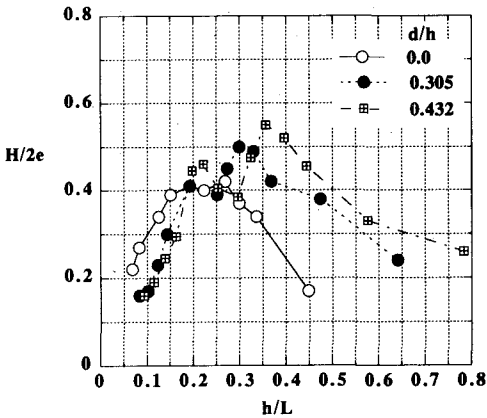


図-9 造波効率（湧き出し位置の影響）

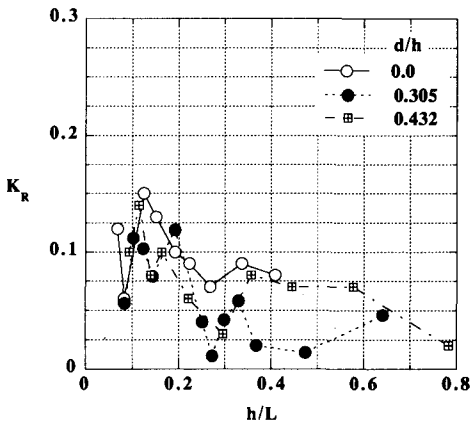


図-10 波の反射率（湧き出し位置の影響）

の波に対しては極めて造波効率が悪いと考えられていた。しかし、ここに提案したようにピット湧きだし口の位置や幅が可変である構造にすることにより深海域の波を効率よく、しかもほとんど再反射しない状態で発生させることができる。

5. おわりに

製作、制御の容易な無反射造波方式として、水路の底

に設けたピットから水を湧きだし・吸い込みする方法を提案し、ピット部での波の反射および造波効率特性について理論および実験により検討した。得られた主な結果は以下のとおりである。

1) ピット式造波装置によって得られた波高は、理論値の約90%であった。

2) ピット湧きだし口の幅と水深との比 B/h を1.2~2.0 にすれば、浅海波領域でピストン式と同程度、フラップ式よりも高い造波効率を得ることができる。そして、造波部からの波の再反射を10~15%以下に抑えることができる。

3) ピットの湧き出し口の幅と位置を変えることができる構造とすることにより、ピット部での低反射を維持したままで、深海域の造波に対しても効率を高めることができる。

参考文献

- 池谷 毅・秋山義信・今井貫爾 (1992): 多方向不規則の吸収造波理論, 海岸工学論文集, 第39巻(1), pp. 81-85.
- 岩垣雄一・土屋義人・井上雅雄 (1962): 風洞水槽を用いた海岸堤防の越波に関する研究(1), 第9回海岸工学講演会講演集, pp. 153-158.
- 大山 巧・田中正博・灘岡和夫 (1993): 円形造波ソースを用いた多方向不規則波の無反射造波法について, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 36-40.
- 川口 隆 (1986): 波面検出及び速度制御を用いた無反射造波方式, 三井造船技報第128号, pp. 20-24.
- 合田良実 (1964): 鉛直振動流による造波の理論について, 第11回海岸工学講演会講演集, pp. 69-73.
- 谷本勝利・原中祐人・富田英治 (1983): 無反射性造波方式の試み, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 54-58.
- 平口博丸・鹿島遼一 (1988): 水面波形制御方式による無反射造波機の不規則波実験に対する適用性, 電力中央研究所報告 U88013, pp. 1-48.
- 広本文泰・阿部淑輝・須藤 茂 (1967): 鉛直振動流型造波装置の設計とその造波特性について, 港湾技研資料 No. 467, pp. 81-97.
- John, F. (1951): On the motion of floating bodies II, Communication in Pure & Applied Mathematics, Vol. 3, pp. 45-101.
- Goda, Y. and T. Kikura (1964): The generation of water waves with a vertically oscillating flow at a channel bottom Report of Port and Harbour Tech. Res. Inst., No. 9, pp. 1-24.