

極浅海波の反射波吸収式造波システムの試み

安田孝志*・篠田成郎**・服部 武***・向 勝巳****

1. 緒 言

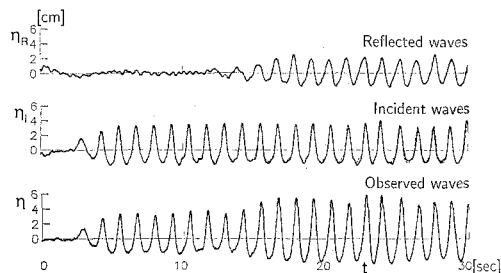
海洋・海岸構造物の水理特性や安定性の解明において水理模型実験の果たす役割は大きく、最近では、反射波の造波板からの再反射を制御する反射波吸収式造波装置による実験が行われるようになってきている。ところで、構造物が築造される海域は一般に極浅海であることが多く、波浪の非線形性が無視できない。このため、こうした海域を対象とした模型実験を実施する場合には、強い非線形性を有する波浪に対する反射波吸収式造波システムが必要となる。

これまでに提案されてきている反射波の吸収制御方式(例えば, Salter, 1985; 平口ら, 1988)は全て線形理論に基づいており、水深に比べて造波板の変位量が小さく、造波板の初期位置からの変位をゼロと見なして理論展開を行っている。このため、造波板前面での波形を固定点での波形(時間波形)と見なして造波板の運動を制御することができる。しかしながら、非線形性の強い波を造波する場合には、造波板の変位量が水深に比べて無視できなくなる(水深と同じオーダーとなる)ため、造波板初期位置での波形と造波板前面での波形とは位相が大きく異なることになり、正確な造波は期待できない。この点が非線形波動場における反射波吸収式造波の最大の難しさであろう。

そこで本研究では、非線形波を対象とした入・反射波共存場における造波問題をソリトンモードに基づいて定式化し、従来の線形造波理論では困難であった非線形波浪の反射波吸収式造波システムを提案するとともに、この造波システムの妥当性を水理実験によって検討する。

2. 反射波の推定法

造波板の運動によって反射波を吸収制御するためには、水位変動などの実測結果を基に反射波の波形を推定することが必要となる。そこで、反射波吸収式造波システムを提案するに先立ち、ここではまず、入射波と反射



図—1 合田らの方法による入・反射波の分離推定の結果

波とが重畳した実測波形から反射波を推定する方法について検討してみる。

線形の波動場を対象とする場合には、入射波と反射波の線形和として実測波を扱うことができる。しかしながら、ここで目的としている非線形波に対してこうした扱いを行うことの妥当性は保証されていない。水口(1991)は Ursell 数 50 程度以下の非線形波に関して詳細な実験的検討を行い、擬似非線形理論を用いた入・反射波の分離推定を推奨している。確かに、線形理論による結果とは細部においては相違はあるものの、波形の主要部分については大差のないことを示している。

図—1 は 3 測点での波形データを用いて合田ら(1976)の方法によって実測波形を入・反射分離した結果の一例である。図の下側から順に実測波形 η 、分離推定された入射波形 η_I および反射波形 η_R を示す。また、破線で示す入射波形は無反射状態(反射壁を設置しない場合)での実験結果を表している。このときの造波された入射波の無次元波高 H/h および無次元周期 $t\sqrt{g/h}$ はそれぞれ 0.37 および 10.0 であり、Ursell 数 37 の非線形性の比較的強い波である。また、このときの反射率 K_r は 0.58 であった。これにより、反射波の有無に拘らず、分離される入射波形はほぼ一致しており、この程度の反射率の場合には入射波と反射波との非線形干渉は無視できるほど小さいと判断できる。ただし、 $H/h > 0.5$ および $K_r > 0.7$ 程度のこの実験条件よりも大きな波高や反射率で実験を行うと、入射波と反射波が重畳した波が砕波してしまい、図—1 に示すほど良好な入・反射分離を行うことはできなかった。

* 正会員 工博 岐阜大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 岐阜大学助手 工学部土木工学科

*** 正会員 工修 五洋建設(株) 土木部土木設計部

**** 工修 (株)伊勢屋機械製作所

以上の考察から、入射波と反射波との干渉に伴う砕波が発生しない程度の波および反射条件の下では、入射波と反射波との干渉に及ぼす非線形性の影響は微小と見なせ、そこでの実測波形は両者の線形の重ね合わせで表現できると考えることにする。

3. 入・反射波共存場における造波理論

上述の検討結果に基づき、造波板位置 $x=X$ での波形 η_P が入射波 η_I と反射波 η_R の線形和としての次のように表されると仮定する。

$$\eta_P(x, t) = \eta_I(x, t) + \eta_R(x, t) \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 x は入射波の伝播方向を正とする空間軸であり、 t は時間軸を表す（座標系と記号を図-2に示す）。なお、以下では特に断らない限り全ての諸量は水深 h および重力加速度 g を基準量として無次元化したものとして扱うことにする。

反射波吸収式造波では造波板前面での波形を η_P とすることを目標としており、造波板問題はそれに必要な造波板の運動、具体的にはその変位速度 u_X を知ることに帰着される。 η_P に対応した鉛直平均の水平流速を $\bar{u}_P$ とすれば、質量保存則より次式が成立する。

$$\frac{\partial \eta_P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \{ \bar{u}_P (1 + \eta_P) \} = 0 \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $\bar{u}_P$ を $\bar{u}_X$ と等値すれば、造波目標である η_P とそれに必要な造波板の変位速度 $\bar{u}_X$ との関係が式 (2) によって厳密に与えられることになる。したがって、式 (2) に式 (1) を代入して、 $\bar{u}_X$ について解けば次式を得る。

$$\bar{u}_X = - \left(\int \frac{\partial \eta_I}{\partial t} dx + \int \frac{\partial \eta_R}{\partial t} dx \right) / (1 + \eta_I + \eta_R) \dots\dots\dots (3)$$

η_I をソリトンの連なりとして造波する場合には、その波形は次のように表示される（例えば、安田，1991）。

$$\eta_I(x, t) = \sum_i^N \eta_{Ii}(x, t) \dots\dots\dots (4)$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} \eta_{Ii}(x, t) &= A_i \operatorname{sech}^2 \theta_i(x, t) - \frac{\eta_0}{N}, \\ \theta_i(x, t) &= \alpha_i \{ x - c_i(t + \delta_i) \}, \\ \alpha_i &= \sqrt{3A_i/2}, \quad c_i = 1 + \frac{A_i}{2} - \frac{3}{2}\eta_0 \end{aligned} \right\} \dots\dots (5)$$

であり、 A_i : i 番目のソリトンの振幅、 δ_i : i 番目のソリトンの時間軸上での位相定数、 η_0 : 静水面と波谷面との水位差、および N : ソリトン数を表す。式 (4) を用いることにより、式 (3) 中の η_I に関する被積分部分は

$$\frac{\partial \eta_I}{\partial t} dx = - \sum_i^N c_i \eta_{Ii} \dots\dots\dots (6)$$

と求められる。

ここで、次の近似式を仮定する。

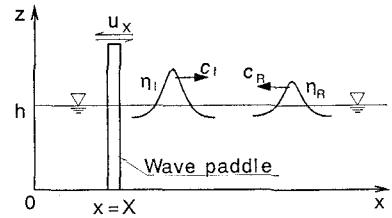
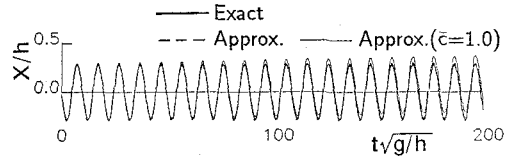
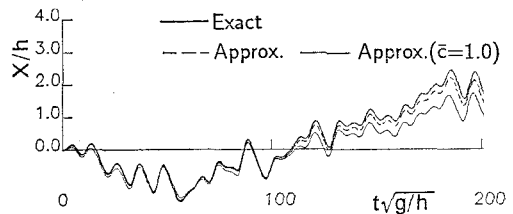


図-2 座標系と記号



(a) 一様ソリトン列の場合



(b) 不規則ソリトン列の場合

図-3 厳密表示による造波板変位と近似表示による造波板変位との比較

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} dx \simeq -\bar{c} \eta \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 $\bar{c}$ は平均波速を表す。式 (6) と式 (7) との対比から、この近似はソリトンの連なりを一様なものとして扱うことに相当する。図-3は式 (6) に基づき厳密に計算された造波板変位と式 (7) の近似表示による造波板変位との比較を示す。図中の太い実線が厳密に計算された造波板変位および破線が $\bar{c}$ を最小自乗法によって求めた値を用いて近似的に計算された造波板変位を表す。なお、後述するように、実用上は $\bar{c}$ を既知定数として与える必要があるため、その一例として $\bar{c}=1.0$ の場合を細い実線で示す。一様ソリトン列の場合、太実線と破線が一致するのは当然であるが、細実線でも大きな差は認められない。一方、不規則ソリトン列の場合には、3者に若干のずれが生じている。ただし、造波において基本的に効いてくるのは各瞬間における造波板の変位速度であるため、この程度のずれは造波にはほとんど影響を及ぼさない。また、この近似に基づく造波実験を実施した結果、 $\bar{c}=1.0$ の場合ですら 5% 以内の誤差で造波可能であることを確認できた。以上より、以下では式 (7) に基づく扱いを行うこととする。

今、 η_I および η_R の平均波速をそれぞれ $\bar{c}_I$ および

$\bar{c}_R$ とすれば,

$$\frac{\partial \eta_I}{\partial t} dx \simeq -\bar{c}_I \eta_I, \quad \frac{\partial \eta_R}{\partial t} dx \simeq \bar{c}_R \eta_R \dots\dots (8)$$

なる近似が成立することになる。ここに、 $\bar{c}_I$ および $\bar{c}_R$ はそれぞれ入射波および反射波の平均波速を表す。式 (8) を式 (3) に適用すれば造波板変位速度 $\bar{u}_X$ は次式のように求められる。

$$\bar{u}_X = \frac{\bar{c}_I \eta_I - \bar{c}_R \eta_R}{1 + \eta_I + \eta_R} \dots\dots\dots (9)$$

この式は波形と造波板変位速度との間の関係を規定する一種の伝達関数である。従来の造波方法では、これら両者の関係は周波数応答関数として扱われているが、従来の方式に比べて式 (9) は極めて簡単な表示になっていることがわかる。

u_X と造波板変位 $X(t)$ との間には

$$\frac{dX}{dt} = \bar{u}_X(X, t) \dots\dots\dots (10)$$

の関係があり、これを解くことによって造波板前面での波形を η_P とするのに必要な造波板変位 $X(t)$ が決定される。ただし、式 (10) をこのまま解くことはできないため、 $\Delta t \ll 1$ として次式のように近似して解くことにする。

$$X(t + \Delta t) \simeq X(t) + \Delta t \bar{u}_X(X(t), t) \dots\dots\dots (11)$$

4. 造波制御の手順とシステム構成

上述の理論展開に基づき、反射波吸収弱造波の制御手順を具体的に述べる。3. に示したように、反射波吸収制御時の造波板変位は式 (9) および (11) から求められる。これらの式において、時間ステップ Δt 後の造波板変位 $X(t + \Delta t)$ を算出するためには、時刻 t における入射波形 $\eta_I(t)$ 、反射波形 $\eta_R(t)$ および造波板位置 $X(t)$ を既知とすることが必要となる。このうち、造波板位置 $X(t)$ は造波装置のポテンシオメータからの出力信号として容易に取得できる。また、入射波形については、式 (4) を用いて、現位置 $X(t)$ での期待波形 $\eta_I(X(t), t)$ として計算可能である。さらに、反射波については、造波板直前面に設置された波高計の水位データ $\eta_P(X(t), t)$ を用いて、式 (1) から

$$\eta_R(X(t), t) = \eta_P(X(t), t) - \eta_I(X(t), t) \dots\dots\dots (12)$$

として算出できる。

以上の信号処理を時々刻々と正確に実行することにより反射波吸収式造波が実現される。一般にこうした信号処理を行う場合にはアナログ回路が用いられる。しかしながら、式 (4) による $\eta_I(X(t), t)$ の算出のような複雑な計算を行う必要があることやシステムの改良時における労力・時間・費用の問題を考慮して、ここでは、パソコンによるデジタル信号処理を用いて造波制御を実施することにする。

パソコンおよび AD/DA 変換ボードには、それぞれ NEC 製 PC-9801DA2 およびコンテック製 ADA12-8/2(98) を使用する。また、造波装置としては岐阜大学工学部土木工学科水環境工学講座実験棟に既設の海岸波浪発生装置 (安田ら, 1990) を用いる。なお、この造波装置は最大変位 2 m および最大速度 7.3 cm/s の低速駆動部と最大変位 30 cm および最大速度 60 cm/s の高速駆動部を有する 2-ウェイモード方式の不規則造波装置であり、両駆動部に適切な信号を与えることにより、2 m もの長いストロークを持ちながら従来のピストン型造波装置と同様の高速応答性が実現可能となっている。

図-4 はパソコンによるデジタル信号処理の手順をフローチャートで示したものである。以下に、造波制御の手順を箇条書きにして示す。

- 1) 造波条件の入力: 造波の対象となる時間 T とソリトン数 N 、時間ステップの大きさ (AD/DA 変換時のタイマーのサンプリング時間間隔) Δt 、 N 個のソリトンの振幅 A_i と位相 δ_i のペア、波谷面と静水面との水位差 η_0 、造波板位置での水深 h 、造波板の初期位置 $X(0)$ および入射波と反射波の平均波速 $\bar{c}_I$ と $\bar{c}_R$ を最初に入力しておく。
- 2) AD 変換によるデータ入力: 造波板直前面に設置された波高計からの出力としての実測波形 η_P と造波装置のポテンシオメータからの出力としての造波板位置 X (実際には、低速および高速駆動部各々の変位) を AD 変換し、現時刻 t におけるデータとして入力する。
- 3) 造波板前面での期待波形の算出: 式 (4) に基づき、現在の造波板位置 $X(t)$ における期待波形としての入射波形 $\eta_I(X(t), t)$ を算出する。
- 4) 反射波形の算出: 式 (12) に基づき、造波板前面

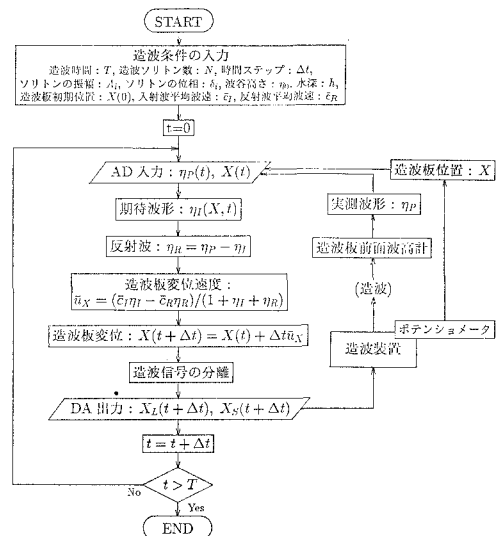


図-4 反射波吸収式造波制御のフローチャート

での波形 η_P から期待波形 η_I を差し引いて反射波形 η_R を計算する。

5) 造波板変位速度の算出: 式 (9) に基づき, 現時刻における造波板変位速度 $\dot{u}_x$ を求める。

6) 造波板変位の算出: 式 (11) に基づき, 時間ステップ Δt 後の造波板変位 $X(t+\Delta t)$ を算出する。

7) 造波信号の分離: 次式で表されるデジタルフィルタを用いて, n 番目の時間ステップにおける造波板変位 X_n を低速および高速駆動用の造波信号 X_{Ln} および X_{Sn} に分離する。

$$X_{Ln} = \sum_{k=0}^K w_k X_{n-k}, \quad X_{Sn} = X_n - X_{Ln} \quad (13)$$

ここに, w_k は指数関数型のウィンドウ関数であり,

$$w_k = C_1 (\exp[C_2(K-k)] - 1), \quad k=0, \dots, K \quad (14)$$

で定義され, 係数 C_1 および C_2 は

$$\sum_{k=0}^K w_k = 1 \quad (15)$$

なる関係を満足するように定められる。また, K は移動平均幅に対応する時間ステップ数を表し, ここでは,

$$K\Delta t = 2\mu_D \quad (16)$$

となるように K を与えることにする。ただし, μ_D は平均波峰 (ソリトン) 間隔である。

8) DA 変換によるデータ出力: AD/AD 変換ボードに搭載されているタイマーを用いて, 正確に $t+\Delta t$ の時刻に高速および低速駆動部用の造波信号を DA 変換し, これらを造波装置に出力することにより造波を行う。

以上の 2)~8) の処理を時間ステップごとに繰り返せば, 反射波を吸収しつつ造波が行えることになる。これからも明らかなように, 時間ステップに関するループ内の処理は比較的簡単なものであるため, AD および DA 変換の繰り返しによるフィードバックが実現可能となっている。この点はこの造波制御システムの大きな特徴の一つである。

5. 反射波吸収制御に関する実験

ここでは, 上述の反射波吸収式造波システムによる造波制御の妥当性を水理実験によって検討する。

(1) 実験方法と条件

図-5 は実験に用いたコンクリート製の 2 次元波浪水槽と波高計の配置の概略を示したものである。測点 P.1 は造波板に直接取付けられており, 造波板直前面での水位変動を反射波吸収式造波システムにフィードバックさせるために用いられる。また, 測点 P.2 から P.4 は入・反射波の分離推定を行うための波高計群である。実験水深は 15 cm であり, 造波板初期位置から 5.6 m の位置に直立の反射壁 (耐水ベニヤ製) を設置してある。

造波システムへの入力条件としては, AD/DA 変換の

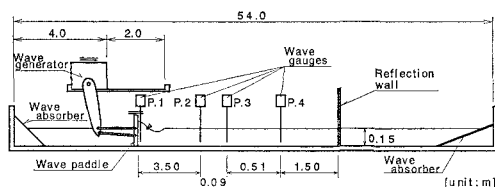


図-5 実験水槽の概略

サンプリング周波数を 100 Hz, 造波対象波を無次元振幅 0.4 および無次元波峰間隔 10.0 の一様ソリトン列とする。また, 前述の 図-3 での検討結果に基づき, 入射波および反射波の平均無次元波速 $\bar{c}_I$ および $\bar{c}_R$ を両者とも 1.0 として与えることにした。

ここで行う実験ケースとしては, 反射波吸収制御の効果を検討するために次の 4 つを設定する。

ケース 1: 反射壁を設置せずに反射波吸収制御を行った場合, このとき水槽内には造波装置によって造波された入射波しか存在しない。

ケース 2: 反射壁を常設して反射波吸収制御を行わない場合。

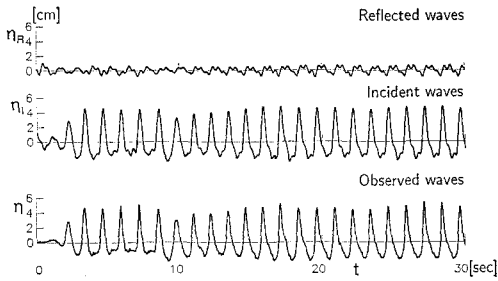
ケース 3: 反射壁を常設して反射波吸収制御を行った場合。

ケース 4: 反射壁を一時的に設置して反射波吸収制御を行った場合。この場合には, 造波開始直後の数波をやり過ごした後に反射壁を水槽内に入れ, 数波を反射させてから再び反射壁を抜くことにより実験を行う。

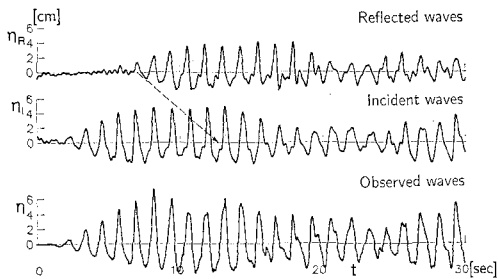
(2) 実験結果と考察

図-6 は上述の 4 つのケースに関する実験結果を示す。図中の実測波形は測点 P.2 において得られたものであり, 入射波形および反射波形は合田らの方法により測点 P.2~P.4 の実測波形から分離される測点 P.2 での波形である。なお, ケース 2 および 3 の反射率はそれぞれ 0.69 および 0.70 であった。また, 実際には反射波の存在しないケース 1 において若干の反射波が認められるが, これは入・反射分離に伴う誤差であり, この程度の誤差は微小と見なせるとして以下の考察を行うことにする。

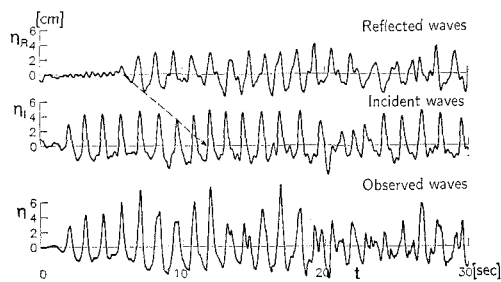
(b) の反射波の存在するケース 2 では, 造波された波が反射壁と造波板との間を往復して伝播することを繰り返す, 顕著な入射波形のビートが見られる。これに対して (c) に示すケース 3 では, そうした傾向はかなり抑えられている。また, 約 6 秒の時点で測点 P.2 を通過した反射波が造波板に衝突して再びこの測点に戻ってくるのは約 12 秒の時点であり (図中に破線の矢印で示す部分), 若干の擾乱はあるもののその後もほぼ一様な入射波形が得られている。(d) の実験ケース 4 は, 反射波吸収制御を行うと同時に反射壁を一時的に設置して入射波の一部 (7 波) だけを反射させた場合であるが, (c) で見られた



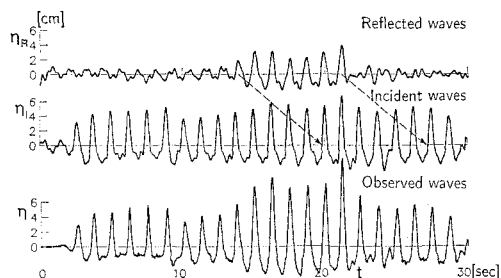
(a) 実験ケース 1 (反射壁を設置せずに反射波吸収制御を行った場合)



(b) 実験ケース 2 (反射壁を常設して反射波吸収制御を行わない場合)



(c) 実験ケース 3 (反射壁を常設して反射波吸収制御を行った場合)



(d) 実験ケース 4 (反射壁を一時的に設置して反射吸収制御を行った場合)

図-6 反射波吸収式造波実験による実測波形, 入射波形および反射波形

傾向がより明確に現れている (図中の 2 本の破線の矢印で挟まれる区間). さらに, (c) および (d) の入射波形

は, 若干の相違は存在するものの, (a) の反射波の存在しない場合の入射波形とほぼ一致している. (c) および (d) に認められるこうした入射波形の一様化の傾向は反射波吸収制御の結果であり, その効果が多少なりとも顕れていると判断できる.

ただし, 完全に反射波を吸収できているとは言い難く, 改良の余地は十分残されている. 第 1 の問題は, 制御システムの応答性である. 予備実験から, AD/DA 変換のサンプリング周波数を大きくすればするほど造波システムの応答性が向上し, 反射波の吸収制御の精度が増すことが判明している. 今回の実験で用いたパソコンではサンプリング周波数 100 Hz が上限であるが, さらに高速なパソコンを使用してサンプリングを密にすれば, より精度の高い造波制御が可能となることが期待される. 第 2 の問題は, 入射波形の造波精度である. 式 (12) に基づき反射波を推定するため, 期待波形と実際に造波される入射波形とが正確に一致することが造波制御の前提となっている. しかしながら, 今回の実験では両者に若干のずれが存在しており, これが反射波成分と見なされるために反射波吸収精度が低下する原因となっていると考えられる. この点については, 期待波形の補正を行うなどして今後さらに改良する必要がある.

6. 結 語

非線形波動場における反射波吸収式造波の制御理論を提案し, ソリトンモード法を用いることによって制御手法が従来のものに比べ格段に簡便なものになることを示した. また, さらなる改良の余地は残されるものの, 水理実験を通じてこの方式による反射波吸収制御の可能性を示すことができた.

最後に, 本研究の実験を行うに当たり, ご協力を頂いた三井建設株式会社山田雄二氏 (当時, 本学 4 年生) に謝意を表すとともに, 財団法人鹿島学術振興財団から研究助成を得たことを記して, 深謝する.

参 考 文 献

- 合田良実・鈴木康正・岸良安治 (1976): 不規則波実験における入・反射波の分離推定法, 港湾技研資料, No. 248, 24 p.
- 平口博丸・鹿島遼一・川口 隆 (1988): 水面波制御方式による無反射造波機の不規則波実験への適用性, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 30-34.
- 水口 優 (1991): 浅海域における入・反射波の分離手法について, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp. 31-35.
- 安田孝志・篠田成郎・服部 武・向 勝巳 (1990): ソリトンモードに基づく海岸波浪の造波システム, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp. 71-75.
- 安田孝志 (1991): ソリトンの海岸工学への応用, 水工学シリーズ 91-B-9, 土木学会水理委員会, pp. 1-19.
- Salter, S. H. (1985): Absorbing wave-makers and wide tanks, Physical modelling in coastal engineering (Ed. R. A. Dalrymple), A. A. Balkema, pp. 49-65.