

外づけ型反射波吸収システムの機能向上とコンパクト化

木 村 晃*・谷 口 丞**

1. はじめに

不規則波発生装置を用いた実験の最大の問題点は構造物模型からの反射波の存在である。構造物模型に作用した波は一部反射され、水槽を逆に伝播して造波板で再反射され、新たに発生した波とともに再度模型に作用する。造波板の駆動信号は発生波が一定の特性を持つように予め設定されているので、再反射波が加わると模型に対して過剰な波エネルギーを作用させることとなり、実験結果は所期のものとは異なる条件に対するものとなる。これを防ぐために1980年代に入り、反射波を造波板で吸収しつつ所期の波を発生させる吸収制御式造波システムが開発された。わが国では港湾技術研究所、三井造船、日本テトラポッド、関西大学等のシステムがある。しかしこれらのシステムは全体の機能の一部として反射波の吸収機構を備えており、この機能だけが単独に製品化されたものはない。このため、“旧型”の不規則波発生装置は依然として上記の問題を抱えている。この研究は反射波の吸収機構を独立させ、コンパクトで従来のいかなるタイプの不規則波発生装置にも取り付けることが可能なシステムを開発することを目的として行ったものである。

2. 造波理論

波のエネルギーを機械的に吸収する技術は1970年代にSalterの波力発電装置(1974)などで既に用いられており、基本的にはBiesel-Suquet(1954)の造波理論に基づいている。まずこの造波理論について概説する。

いま幅一定の2次元水槽を考慮して x 軸を静水面上に水槽の長さ方向、 z 軸を静水面より上向きに正にとって、 $x=0$ の位置に x 軸に垂直にピストン式の造波板をおく。造波板を

$$e_1 = r_1 \sin(\sigma t) \quad \dots\dots\dots (1)$$

のように振幅 r_1 で周期的に動かすと造波板の前には次式で与えられる波が発生する。

$$\eta = Ar_1 \cos(kx - \sigma t) + \sum_{m=1}^{\infty} A_m \exp(-k_m x) r_1 \sin(\sigma_m t) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに

$$A = \frac{4 \sinh^2(kh)}{2kh + \sinh(2kh)} \quad \dots\dots\dots (3a)$$

$$A_m = \frac{4 \sinh^2(k_m h)}{2k_m h + \sinh(2k_m h)} \quad \dots\dots\dots (3b)$$

である。ただし、 k, k_m は波数、 σ, σ_m は角周波数、 h は水深、 t は時間である。また k, k_m と σ, σ_m にはそれぞれ

$$\sigma^2 = gk \tanh(kh), \quad \sigma_m^2 = gk_m \tanh(k_m h) \quad \dots\dots (4)$$

なる関係がある。(2)式の第2項は散乱波の項であり、周期が小さい場合を除いて無視して差し支えない。したがって A は造波板の変位の振幅と発生波の振幅の比となる。造波板の運動が小さい場合には(1)、(2)式は線形重ね合わせが可能であり、例えば造波板の変位が

$$e_1 = \sum_{n=1}^{\infty} r_{1n} \sin(\sigma_n t + \varepsilon_n) \quad \dots\dots\dots (5)$$

の場合、発生する波の波形は

$$\eta = \sum_{n=1}^{\infty} A_n r_{1n} \cos(k_n x - \sigma_n t) \quad \dots\dots\dots (6)$$

で与えられる。 A_n は σ_n のときの(3a)式の A の値である。(3a)式は造波板の変位の振幅を入力、発生する波の振幅を出力とする変換システムの周波数特性を与える。以後、 $A=H(f)$ とおき、 $H(f)$ をシステム関数と呼ぶ。

水槽内に期待スペクトル $S(f)$ をもつ不規則波を造波するためには、 $S(f)$ と

$$S(f) = H(f)^2 S^*(f) \quad \dots\dots\dots (7)$$

なる関係をもつスペクトル $S^*(f)$ の不規則信号で造波板を動かしてやれば良い。いまそのスペクトルが $S^*(f)$ であるような不規則信号 x に対して次式の荷重移動平均操作を行う。

$$y_k = \sum_{n=-N}^N a_n x_{k-n}, \quad (k=1, 2, \dots\dots) \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに N は十分大きな数である。 x_{k-n} は間隔 dt で離散化された x の $t=(k-n)dt$ における値である。荷重 a_n を次のように与えると y のスペクトルが目標とする $S(f)$ となる。

* 正会員 工博 鳥取大学教授 社会開発システム工学科

** 正会員 工修 日本建設コンサルタント

$$a_n = \sum_{j=-N}^N H(f_j) \exp(-i2\pi f_j t_n) \cdots (9)$$

ここに $i = \sqrt{-1}$, $f_j = j/(2Ndt)$ である。(3a) 式は単に e_i と η_i の対応する周波数成分 (成分波) の振幅の比を与える式であるので、両者の成分波に位相差があるような場合の $H(f_n)$ は次式を使わなければならない。

$$H(f_n) = A\{\cos(\theta_n - \varepsilon_n) + i\sin(\theta_n - \varepsilon_n)\} \cdots (10)$$

ここに θ_n , ε_n は e_i と η_i の成分波の位相角である。(1), (2) 式の場合には $\theta_n - \varepsilon_n = \pi/2$ とすればよい。後で問題となるように、反射波の波形が与えられ、これを吸収するような造波板の運動を計算する場合には

$$H(f_n) = 1/A \cdot \{\cos(\theta_n - \varepsilon_n) + i\sin(\theta_n - \varepsilon_n)\} \cdots (11)$$

を用いる。位相は $\theta_n - \varepsilon_n = -\pi/2$ とする。(10) あるいは (11) 式の $H(f)$ を (9) 式のようにフーリエ変換すれば a_n が計算できる。 a_n は x の周波数特性も変えるので一般に数値フィルタと呼ばれる。

3. システムの応答の遅れ

2. で説明した原理に基づいて不規則波のシミュレーションに関する水槽実験を行った。水槽の長さは 29 m, 幅は 50 cm, 深さは 75 cm, 造波装置は油圧ピストン方式である。期待スペクトルは次の式で与えられるものを用いた。

$$S(f) = S(f_p)(f/f_p)^{-5} \exp\{1.25[1 - (f/f_p)^{-5}]\} \cdots (12)$$

実験は $S(f_p) = 1.0$, $f_p = 0.8$ Hz および水深を 50 cm として行った。あらかじめ dt 間隔で計算しておいた造波板の駆動信号を D/A 変換して造波装置に入力した。図-1 は実験の結果の 1 例を示したもので図中で実線は造波板に取り付けた波高計で記録した波形 η , 点線は (8) 式に基づき造波板の変位に対して, (10) 式から計算した数値フィルタを用いて計算した波形 η^* である。図より波形 η, η^* は非常に良く対応しており, ここで用いた数値フィルタが良好な結果を与えることがわかる。しかし実線が点線に比べて少し遅れている。これは造波装置の油圧ピストン等物理系の応答遅れと, 回路の途中に使用したローパスフィルタの応答遅れによるシステムの遅延であ

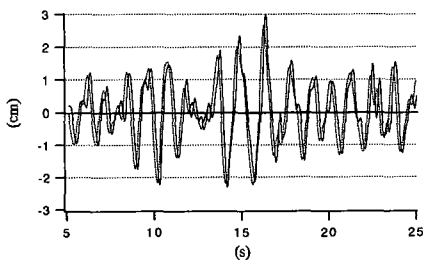


図-1 発生波形と予測波形

る。ここで用いたシステムでは (8) 式で $dt = 0.05$ s, $N = 128$ とした場合, 期待スペクトルに関わらず遅延時間は $0.08 \sim 0.09$ s であったので以後これを見込んでシステムを制御した。

4. 反射波の吸収制御方式

造波板前面の波高計で計測される水位 η は造波された波と構造物からの反射波 η_R の重なったものである。造波した波は図-1 からわかるように造波板の運動から精度よく予測できるので, 反射波の波形 η_R は $\eta_R = \eta - \eta^*$ で計算できる。この η_R を消すように造波板を制御すれば η_R が再反射されることはない。この方式としてこの研究では次に説明する 2 つの方法を試みた。1 つは位置吸収制御方式, 他の 1 つは位置波形制御方式であり, それぞれの方式の原理は次のとおりである。

位置吸収制御方式

この方式では造波板に達した反射波 η_R と同じ波をリアルタイムで造波板の後方に向かって発生するように造波板を制御する。 η_R は形式的に造波板を素通りするため造波板での再反射は起こらない。

位置波形制御方式

この方式では $\eta - \eta^*$ を造波システムの制御の誤差ととらえ, これを小さくするように造波板を連続的に制御する。反射波 η_R がある場合には $\eta - \eta^* = \eta_R$ となるため η_R が誤差としてシステムにフィードバックされ, これを 0 にするように造波板が制御される。

5. 数値フィルタ

5.1 位置吸収制御方式

数値フィルタは (10) あるいは (11) 式で計算する。この際システム関数は

$$H(f) = \begin{cases} (10) \text{ あるいは } (11) \text{ 式} & 0.3 \text{ Hz} < f < 1.8 \text{ Hz} \\ 0 & \text{それ以外の周波数帯} \end{cases} \cdots (13)$$

のように帯域を限定したものを用いた。図-2 に η_R を吸収する造波板の駆動信号を計算するための数値フィルタ a_n を示す (水深 50 cm)。ここで問題となることは (8)

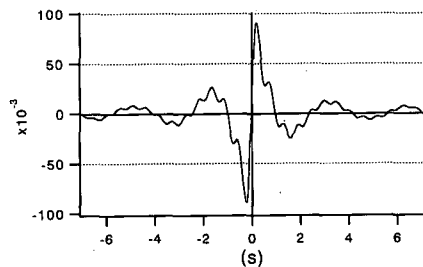


図-2 数値フィルタ

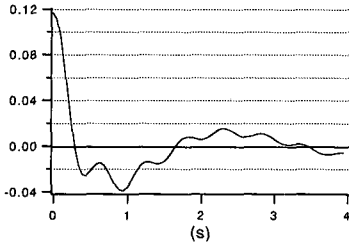


図-3 位置波形制御方式のための数値フィルタ

式からわかるように、任意の時刻 kdt の y_k を計算するためには時刻 kdt 以前のみならずそれ以後の x の値も必要となる。すなわち現在の η_R を制御するためには未来の η_R の情報まで必要となり計算ができない。形式的にこの問題を回避するために反射波の制御信号の計算の場合だけ (8) 式の x に

$$c_{k-n} = \begin{cases} 0 & n < 0 \\ 1 & n \geq 0 \end{cases} \dots\dots\dots (14)$$

なるデータフィルタを予め掛けることにする。すなわち未来のデータをすべて 0 とする。図-2 の α の負の部分 をすべて 0 としても同じ効果が得られる。

5.2 位置波形制御方式

この方式では反射波などの存在により η が η^* より大きければ造波板を後ろに引き、小さければ前に押し出すように制御する。システムの時定数が小さく、造波特性が比較的平坦であればこの制御は電気的なフィードバック回路自体の働きに任せておくことも可能であるが、 η と η^* に差がある場合には位相遅れ無しにその差を小さくするように造波板を動かすことが望ましいこと、造波板の動きとそれによる水位の変化は Biesel-Suquet の理論で計算できることの 2 つの理由から (11) 式の $(\theta_n - \varepsilon_n)$ を 0 とした $H(f_n)$ をシステム関数とする数値フィルタを用いることとした。図-3 は上の $H(f_n)$ から計算した数値フィルタを示したものである (水深 50 cm)。 α の負の部分は 5.1 で説明したようにすべて 0 とした。

6. 実験によるシステムの検証

反射波の吸収制御実験におけるシステムの制御の流れを示したものが図-4 である。システムは大きく分けると入射波の信号を計算する信号発生部と反射波を処理する反射波制御部から出来ている。システムはまず、(1).造波板の駆動信号を計算する。この信号は予め計算して計算機のメモリにストアしておけばよい。(2).(1)と後の(5)からの信号の和を計算し、D/A 変換して造波装置へ出力する。(3).(2)の信号から造波板前面の波形 η^* を計算する。(4).波高計からの信号 η を A/D 変換ボードを介して読み込み $\eta - \eta^* = \eta_R$ を計算する。(5). η_R を吸収する

ための造波板の駆動信号を数値フィルタを用いて計算して(2)に戻る。位置吸収制御方式と位置波形制御方式の場合の違いは、(5)のステップで η_R にかける数値フィルタとして図-2 のものを使うか図-3 のものを使うかという点である。検証実験は造波板から 9 m 離れた水槽中に鉛直滑面の反射板を設置して行った。水位変動は造波板前面の波高計で測定した。水深は 50 cm とし $dt=0.05$ s で図-4 に従って処理を行った。実験はまず図-4 の信号発生部だけを動かして規則波を 4 周期分造波した。つぎに信号の発生を停止して反射波制御部だけ機能させた。図-5 は $T=1.0$ s の波を用いた場合の結果であり、上の図が消波をしない場合、中央は吸収制御方式を用いた場合、下の図は波形制御方式を用いた場合の結果である。下図の波形制御方式では良好な結果が得られているが、吸収制御方式では水槽中を波高の大きな波群が何度も往復している。図-6 は $T=2.0$ s の波を用いて同様な実験を行った結果である。この場合には吸収制御の方が結果が良好で、波形制御の方に小さな波群の往復が見られる。

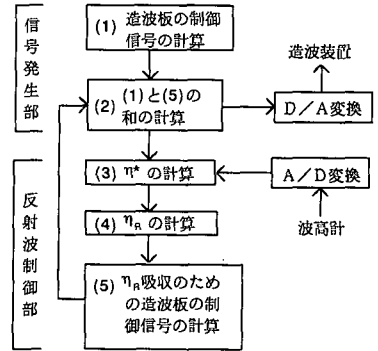


図-4 反射波吸収制御システムの制御のながれ

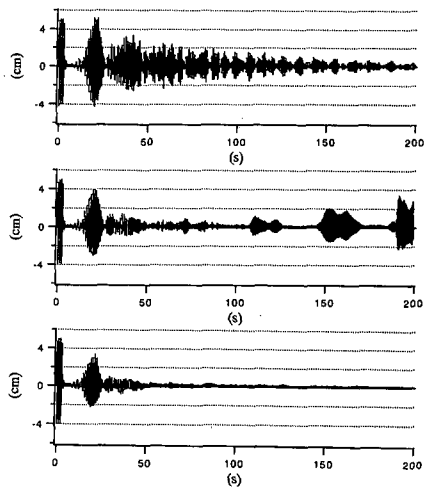


図-5 無制御(上), 吸収制御(中), 波形制御(下)周期 1.0 s

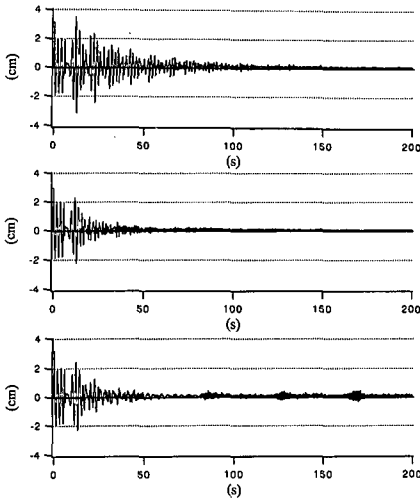


図-6 無制御(上), 吸収制御(中), 波形制御(下)周期 2.0 s

両図に現れる間欠的な波群の波は周期が約 0.5 s あるいはそれ以下の波であった。前述したようにこのシステムで用いたシステム関数は 0.3 Hz から 1.8 Hz の範囲でのみ値をもたせた。これはこのタイプの造波機では低周波の波の消波が困難であること、一方、高周波域では波形の非線形特性により生じる高周波の拘束波に対して線形のシステムでは自由波を発生してこれを消そうと“誤動作”することなどを考慮して決めた。(13) 式のように周波数帯域を限るとシステム関数の値の急変部付近の周波数帯で発振が起こる場合がある(図-5)。しかし発振と考えられるものを除けば両制御方式とも一定の効果をあげており大きな差はないようである。ただ発振もシステムの特性とすれば周期が短い場合には波形制御, 長い場合には吸収制御方式の方が幾分効果的である。

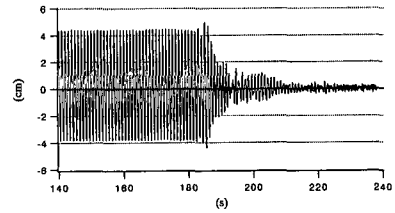
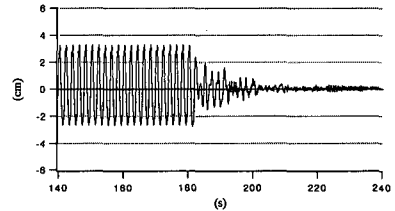
7. システム関数の補正とシステムの機能の検定

7.1 システム関数の補正

発振などの影響を軽減するためここでは $H(f)$ を次のように補正した。

$$H(f) = \begin{cases} H(f_{\min}) \exp\{(f - f_{\min})^2 / 2S_{\min}^2\} & (f < f_{\min}) \\ H(f) & (f_{\min} < f < f_{\max}) \\ H(f_{\max}) \exp\{(f - f_{\max})^2 / 2S_{\max}^2\} & (f > f_{\max}) \end{cases} \dots\dots\dots (15)$$

式中の $S_{\max}$, $f_{\max}$ の値は実験をもとに最適な値を決める。ただし $S_{\min} = 0.1$ Hz, $f_{\min} = 0.3$ Hz は固定とした。(15) 式を (9) 式に代入して a_n を計算し, 5. で説明したようにその負の部分をして再度フーリエ変換したものを $G(f)$ とすると, $f_{\min} < f < f_{\max}$ で $|G(f)| < |H(f)|$ となる。ここでは

図-7(a) 波形制御方式の機能の検証 ($T=1.0$ s)図-7(b) 波形制御方式の機能の検証 ($T=2.0$ s)

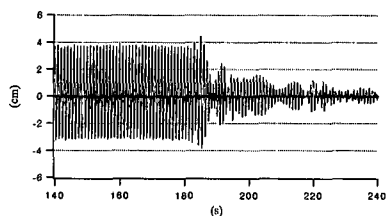
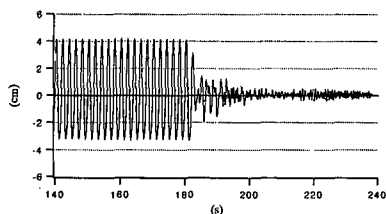
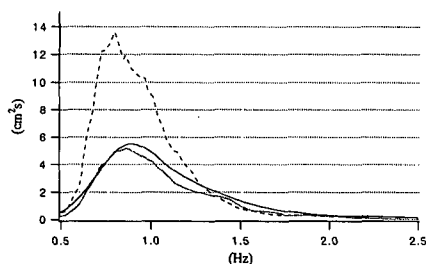
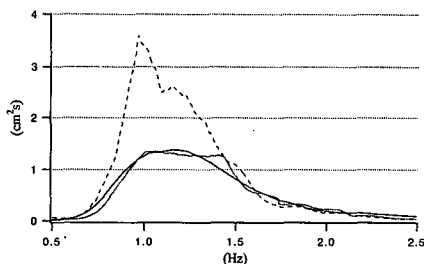
$$a = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |H(f_n)| / |G(f_n)| \quad (f_{\min} < f < f_{\max}) \dots\dots\dots (16)$$

で両者の絶対値の比の平均値を求め, $aG(f)$ を仮のシステム関数とした。ただしこのままでは $f_{\min} < f < f_{\max}$ 以外の周波数帯成分も増幅させるのでこれに r ($0 < r < 1$) を掛けた $raG(f)$ を最終的なシステム関数とする。 r の値も実験をもとに最適値を決める。

7.2 規則波を対象としたシステムの検証

吸収制御, 波形制御両方式とも実験装置は 6. と同じものを用いて行った。両方式とも $S_{\max}$ は 0.1, 0.5 (Hz), $f_{\max}$ は 1.0, 1.3, 1.5 および 1.8 (Hz), r は 0.5, 0.8, 1.0 のように変えて計 24 ケースについて行った。実験は周期 1.0 s, 波高 2 cm の規則波を用いた。実験結果の評価は波高の定常性と波形および消波特性の 3 点について行った。安定した結果が得られたのは位置吸収制御方式では $f_{\max} = 1.0$ Hz, $S_{\max} = 0.5$ Hz, $r = 0.5$ のケース, 位置波形制御方式では $f_{\max} = 1.3$ Hz, $S_{\max} = 0.1$ Hz, $r = 0.8$ のケースであったのでこれらの値を採用して以後の実験を行った。

つぎに上記の補正パラメータを用いて規則波を対象としたシステムの機能の検証実験を行った。実験装置は 6. と同じである。水深 h は 50 cm, 30 cm, 波高 H は 4 cm から 1 cm 刻みで 8 cm まで, 周期 T は 1.0 s, 1.5 s および 2.0 s に変えて行った。実験は 180 s の間造波し, 以後は造波せずに吸収制御部だけ動作させた。実験結果の 1 例を示したものが図-7 である。図は波形制御方式で水深 50 cm, 入射波高 2.5 cm の場合で上が周期 1.0 s, 下が 2.0 s の場合の反射板前面の波高計の記録を示したものである。図-8 は図-7 と同じ条件の波を対象として吸収制御方式を用いた場合の結果である。いずれのケースで

図-8(a) 吸収制御方式の機能の検証 ($T=1.0$ s)図-8(b) 吸収制御方式の機能の検証 ($T=2.0$ s)図-9(a) 不規則波の反射波制御実験 ($f_p=0.8$ Hz)図-9(b) 不規則波の反射波制御実験 ($f_p=1.0$ Hz)

も波高の定常性に問題はない。造波板停止後の水位は周期にかかわらず波形制御方式の方が早く静穏化する。したがって総合的にはこの方式の方が高い反射波吸収効果が期待できる。しかしこの方式では周期が短い場合、定常状態での波高が設定値より大きくなる。この傾向は波高が大きくなるほど顕著になる。これは図-6の部分で説明したように、非線形な高周波成分を消すように発生された自由波が重なって波高が高くなったためと考えられる。周期の長い波のケースにおいても高周波成分と見

られる波が重なって幾分波形に歪が見られる場合もある。相対的な波形の非線形性は $T=1.0$ s の場合が最も波形勾配が大きいのでこうした問題点が大きく現れたものとする。波の非線形性の問題点は線形のシステムでは対応できないのでこれ以上の検討は行わなかった。図-8の吸収制御方式では定常状態での波高が設定値より大きくなる場合が多い。

しかし発生した波の波形はひずみが少なく、周期による定常状態での波高の差も小さい。したがって規則波の実験にはこちらの方式の方が望ましい場合ようである。

7.3 不規則波を対象としたシステムの検証

6. と同じ実験装置を用いてシステムの機能の評価を行った。期待スペクトル $S(f)$ としては (12) 式を用い、 $S(f_p)$ を 1.5 および 6.0 (cm^2/s) の 2 種類、 f_p を 0.6 Hz から 1.0 Hz まで 5 種類変えて実験を行った。入射波の分離は造波板から 4.5 m 付近に設置した 4 本の波高計の記録を合田ら (1975) の方式によって解析した。反射波の制御は波形制御方式によった。図-9(a) は $S(f_p)=6.0 \text{ cm}^2/\text{s}$, $f_p=0.8 \text{ Hz}$, (b) は $S(f_p)=1.5 \text{ cm}^2/\text{s}$, $f_p=1.0 \text{ Hz}$ の場合の結果である。図中で破線は入射波の重なりあった波形のスペクトル、点線は入射波のスペクトル、実線が入射波の期待スペクトルであり良好な反射波吸収制御が来ている。

7.4 システムの結合

この研究で製作したシステムは、波高計およびそのアンプを除けば、A/D, D/A 変換ボードを装着したノート型パソコン (PC 9801 NS/R) と制御用プログラムより構成されている。造波機とこのシステムの接続はパソコン側の D/A 変換ボードの出力端子と造波機の外部信号入力端子とを結線するだけでよい。dt を 0.05 s 程度にする場合、この間にローパスフィルタを用いることが望ましい。ただしこの際には図-1 の部分で説明した遅延時間が少し増加する。

謝辞：この研究は文部省科学研究費試験研究 (B) (代表者木村 晃) の補助を受けた。また実験に際して荻田潤一氏 (エイトコンサルタント, 当時学生) の協力を得た。ともに記して感謝の意を表する。

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射波の分離推定法, 港湾技研資料, No. 248, 24 p.
- Biesel, F. and F. Suquet: Laboratory wave generating apparatus (Translation of a series of French articles from a La Houille Blanche by Straub, G. L. 1954)
- Salter, S. H. (1974): Wave power, Nature, Vol. 249, pp. 720-724.