

造波機の性能について

ON ABILITY OF WAVE GENERATORS

榎木 亨*・岩田好一朗**・田端竹千穂***

By Toru Sawaragi, Koichiro Iwata and Takechiho Tabata

1. 緒 言

波高、波速、流速などといった波動の基本的な諸量の挙動に関する問題、および波浪にともなう海岸工学上の諸問題を主として実験によって研究する場合、所要の波動を造波機によって生起させるため、これまで造波機に関して種々検討が加えられ、その性能について議論されてきた。特に風浪にともなう諸問題を処理する場合、これまで不規則な波浪を有義波、平均波あるいは最大波といった代表値によってあらわされる規則波として取扱ってきたため、規則波発生方法およびその造波理論については、Biesel と Suquet¹⁾ の詳細な研究をその初めとして比較的良好に議論されてきており、わが国においても運輸省港湾技術研究所^{2),3)}などで造波機の性能について検討が加えられてきている。

現在、用いられている代表的な造波機構としては、フラップ型、ピストン型、プランジャー型、ニューマチック型、ペンジュラム型、サーペント型、偏心ローラー型などがあり、こういった形式の選定は、(i) 建設費の大小、(ii) 波の特性に応じた機構調整の難易、(iii) 造波板の運動と波の運動との合致性の良否、(iv) 造波高をあらかじめ計算によって求めることの難易さ、などの観点から決定される。上記の諸要素を考慮して現在、表面波造波用として、プランジャー型造波機が、深水波用としてフラップ型造波機が、浅水波用としてピストン型造波機が主として広く用いられている。しかし、フラップ型およびピストン型造波機設計において、発生波高を Biesel と Suquet の微小振幅波理論により推定しているが、実際生起する波は必ずしも微小振幅波とは限らず、造波板前面で砕ける波もあるため、こういった微小振幅波理論により発生波高を推定することの妥当性は検討を

要する。また造波機の所要駆動力については、安全率を見込んで上記の微小振幅波理論によって算定される駆動力の2倍程度の値をとる場合もあるなど、経験に依拠することが多く、その合理性については明確な検証がなされていない。一方、プランジャー型造波機は広く用いられ、その算定式として一、二の例があるが、その発生波高と造波板の運動との応答関係が不明確で、駆動力あるいは、発生波高の推定は経験によらざるを得ないことなど問題点が多く設計上不便を感じることが多い。

また、従来の不規則な波を規則波に置換して取扱う方法の合理性、その結果の妥当性について明確な根拠がなく、不規則な波相互の干渉作用が波の作用の対象に応じては、無視できないことが明らかにされてきている。したがって、実験においても正確に実際の波を再現しようとして、不規則波を発生させる方法が近年開発されてきている。不規則波発生方法としては、(i) 風洞水槽において発生させる方法、(ii) 有限個の規則波を重ね合わせる方法、(iii) 造波板の変動周期と振幅を連続的に変化させる方法、(iv) 造波板の運動そのものに不規則性を与える方法に大別される。わが国においては、(ii) の方法により京都大学⁴⁾で、(iii) の方法により運輸省港湾技術研究所^{5),6)}でそれぞれ不規則波発生装置が製作され、その造波原理および発生波の特性について報告されてきている。

筆者らは、(iv) の方法、つまり造波板の運動そのものに不規則性を与える方法により不規則波発生装置を製作したが、ほぼ所要の不規則波の発生をみたので、造波原理および発生波の特性についてここで報告する。また、筆者らの採用した造波方法を用いる場合には、造波板の運動と発生波の応答特性を正確に把握しておく必要がある。筆者らは不規則波の造波形式としてフラップ型造波機を採用したが、フラップ型造波機については先述のような問題点があるため、微小振幅波理論による Biesel と Suquet の理論の適用性に検討を加え、さらに造波機の駆動力を正確に算定するため、従来の算定式に対

* 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 大阪大学助手 同

*** 学生会員 大阪大学院工学研究科

して検討を加えた。また、プランジャー型造波機による発生波高の推定についても若干の考察を加えたので、その結果もあわせて報告することとした。

2. 規則波造波機の性能

(1) フラップ型造波機の性能について（発生波におよぼす $h/2e$ の効果）

a) 発生波高

Biesel と Suquet による微小振幅波理論によれば、フラップ型造波機による発生波高は、式 (1) で与えられる。

$$\frac{H}{2e} = 4 \cdot \left(\frac{1 - \cosh \frac{2\pi h}{L} + \frac{2\pi h}{L} \sinh \frac{2\pi h}{L}}{\sinh \frac{4\pi h}{L} + \frac{4\pi h}{L}} \right) \cdot \frac{\left(\sinh \frac{2\pi h}{L} \right)}{\left(\frac{2\pi h}{L} \right)} \dots\dots\dots (1)$$

ただし、上式において、 H ：発生波高、 e ：静水面上での造波板の片振幅、 h ：水深、 L ：波長、である。

一方、関係する諸量を列挙すると式 (2) のように表わすことができる。

$$H = f(T, e, h) \dots\dots\dots (2)$$

したがって、次元解析により波高無次元量は、式 (3) のように示されるはずである。

$$\frac{H}{2e} = f\left(\frac{h}{2e}, \frac{h}{L}\right) \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 T は造波板の変動周期である。式 (1) で与えられる微小振幅波理論では発生波高は式 (4) で示すように相対水深 h/L のみの関数となっている。したがって、式 (3) 中の $h/2e$

$$\frac{H}{2e} = f_1\left(\frac{h}{L}\right) \dots\dots\dots (4)$$

の効果が発生波 H にいかなる効果を示すかを明らかにしなければ式 (1) でもって発生波高を算定することに大きな疑問が生じる。また、一方、発生波においても波そのものの特性から発生限界があるはずである。すなわち、実際に生起する波が造波板の直前で砕けるという発生波の砕波限界である。深水波および浅水波に対しては、種々の砕波条件があるが、ここでは、限界波形勾配により規定される場合の式 (5) で示される浜田式⁷⁾を採用して検討を進める。

$$\frac{H_b}{L_b} = 0.142 \tanh 2\pi h_b/L_b \dots\dots\dots (5)$$

式 (5) を $h/2e$ の効果を含むように変形すると

$$\frac{H_b}{2e} = \left(\frac{h_b}{2e} \times 0.142 \tanh 2\pi h_b/L_b \right) \left/ \frac{h_b}{L_b} \right. \dots\dots\dots (6)$$

となる。

b) 造波機の駆動力

造波機の駆動力の算定は、造波板がなす仕事量と発生波の伝達エネルギーが等価であると考えて微小振幅波理論を用いて行なわれる。

造波板に作用する圧力は (i) 静水圧、(ii) 正規波動圧、(iii) 慣性波動圧の3つが主として考えられるが、フラップ型では、造波板の前後に水があるため、静水圧は考慮する必要はない。また、筆者らの計算および鶴田らの報告⁸⁾によれば、慣性波動圧が正規波動圧より小さいため考慮しないとすると、造波板に作用するのは正規波動圧だけと考えてよく、微小振幅波理論によれば、次式で与えられる。

$$P_n = \frac{1}{2} \rho g H \frac{\cosh \frac{2\pi y}{L}}{\cosh \frac{2\pi h}{L}} \cos kt \dots\dots\dots (7)$$

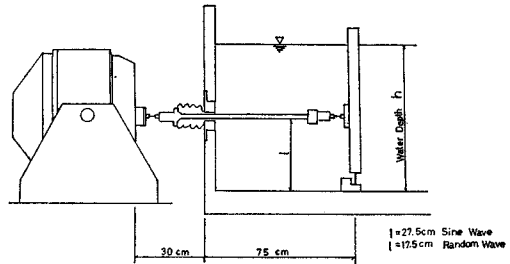


図-1 フラップ型造波機

本造波機では図-1に示すように、造波板に直結しているロッドに作用する力 P は、ロッドの位置が水底のヒンジ部から 27.5 cm の点にあるため、式 (8) で与えられる。

$$P = \int_0^{h+\frac{H}{2}} \frac{y}{27.5} \cdot P_n \cdot B \cdot dy \dots\dots\dots (8)$$

ただし、式 (8) で、 B は造波板の幅、 y は水底からの鉛直距離を示す。また本装置のごとく、後方へも波の発生をみる場合は、造波板背面、水面下降の影響を加え、式 (8) の2倍の大きさの波動圧が作用すると考えるべきである。また設計の際、重要なのはむしろ最大正規波動圧であるから、次の式 (9) で与える波圧を用いている。

$$P_{\max} = \frac{\rho \cdot g \cdot B \cdot H}{27.5} \int_0^{h+\frac{H}{2}} y \cdot \frac{\cosh \frac{2\pi y}{L}}{\cosh \frac{2\pi h}{L}} dy \dots\dots\dots (9)$$

(2) プランジャー型造波機による発生波高

従来プランジャー型造波機による発生波高の算定式がないのは、造波板部分での境界条件の与え方がきわめて複雑なためであろうと考えられる。Biesel と Suquet によ

ると造波板部に擾乱を具えた場合の発生波高 H については一般的に、次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{H}{2} &= C_1 \cdot \sinh \frac{2\pi}{L} \cdot h \\ C_1 &= 2k \cdot \frac{\int_0^h \xi(y) \cdot \cosh \frac{2\pi y}{L} \cdot dy}{\sinh \frac{2\pi h}{L}, \cosh \frac{2\pi h}{L} + \frac{2\pi h}{L}} \end{aligned} \right\} \dots(10)$$

ただし、上式において、 y は水底からの距離、 $\xi(y)$ は造波板の変位である。しかし、上式には液体が造波板におよぼす浮力の効果、抗力の効果などが考慮されていないため、そのまま用いることはできない。筆者らは、第1近似として式(10)を用いるが、その際、上述の浮力、抗力などの効果を補正係数 C_0 として導入して式(11)より波高の算定を行なう。

$$\left. \begin{aligned} \frac{H}{2} &= C_0 \cdot C_1 \cdot \sinh \frac{2\pi h}{L} \\ C_1 &= 2k \cdot \frac{\int_0^h \xi(y) \cdot \cosh \frac{2\pi y}{L} \cdot dy}{\sinh \frac{2\pi h}{L} \cdot \cosh \frac{2\pi h}{L} + \frac{2\pi h}{L}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(11)$$

C_0 : 補正係数

造波板の運動は複雑であるが、筆者らの用いているプランジャーの造波板は、三角柱状であるため第1近似として造波板の偏位を式(12)で与える。

$$\left. \begin{aligned} y \leq l_1 \quad \xi(y) &= 0 \\ l_1 \leq y \leq l_2 \quad \xi(y) &= \frac{1}{2} \left(\frac{e}{l_2 - l_1} \right) \cdot (y - l_1) \sin kt \\ y \geq l_2 \quad \xi(y) &= \frac{1}{2} e \sin kt \end{aligned} \right\} (12)$$

なお、式(12)で用いた記号は、図-2に示してあるが l_1, l_2 は、造波板の最底位置と最高位置における水底から、造波板最下部までの鉛直距離を示し、 e は造波板の最低位置と最高位置における水平方向の偏位で、 $e = e_1 - e_2$ である。式(12)を式(11)に代入すると式(14)を得る。

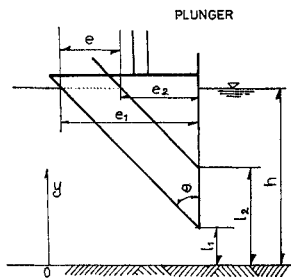


図-2 記号の説明

$$\frac{H}{2e} = 2C_0 \cdot \left(\frac{\frac{2\pi h}{L} \cdot \sinh \frac{2\pi h}{L} - a \cdot \frac{h}{e} \left(\cosh \frac{2\pi l_2}{L} - \cosh \frac{2\pi l_1}{L} \right)}{\sinh \frac{4\pi h}{L} + \frac{4\pi h}{L}} \right) \cdot \left(\frac{\sinh \frac{2\pi h}{L}}{\frac{2\pi h}{L}} \right) \dots\dots\dots(14)$$

なお、式(14)で C_0 は実験により決まる定数とし、 a は $a = \tan \theta$ の関係を満たすものである。なお θ は図-2で示す三角柱状の造波板の先端の角度である。

(3) 実験による検証

a) フラップ型造波機

① 発生波高: 水槽は図-3に示す長さ30m×幅0.7m×高さ0.95mの片面ガラス張りの鋼製水槽で、発生波は電気抵抗線式波高計で計測する。なお計測地点は造波板の前面1.5m, 6.5m, 11.5mの地点である。フラップ型造波機は動電型加振機により作動するが、この造波板に作用する力を直接測定するために、造波機に直結

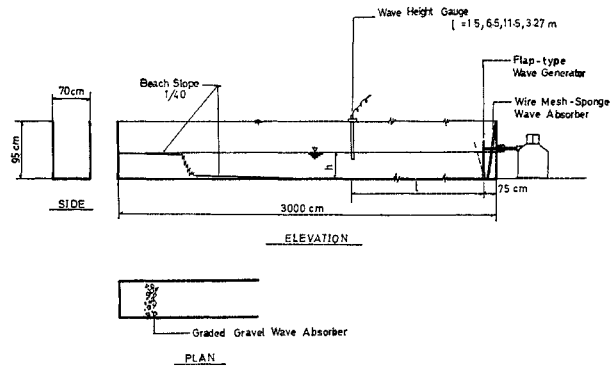


図-3 造波装置および造波水槽

表-1 フラップ型造波機

h : 静水深	40.7 cm
T : 造波板の変動周期	0.6 ~ 6.8 sec
e : 静水面上の造波板の片振幅	0.76 ~ 3.81 cm
h/L : relative water depth	0.03 ~ 0.70
$h/2e$	5.3 ~ 26.8

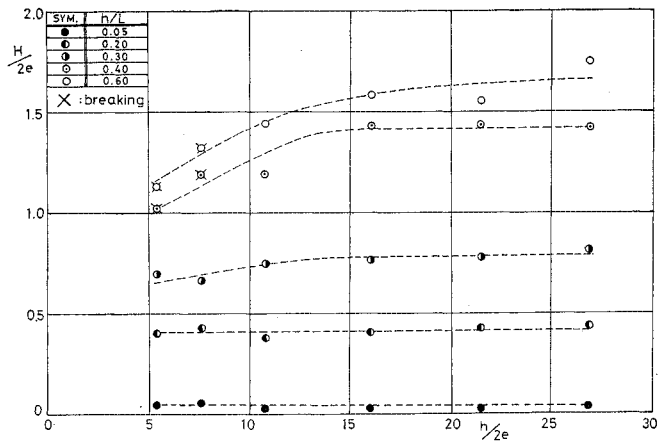


図-4 発生波高におよぼす $h/2e$ の効果

しているロッドに120オームの wire strain gauge をはり、two-gauge 法でひずみを計測して応力に換算して力を算定する。なお実験諸元は表-1に示すものである。

図-4 は h/L をパラメーターにして、 $h/2e$ の変化にともなう発生波高 $H/2e$ の変化を示したものである。同図より $h/L < 0.3$ の範囲に対して $h/2e$ の変化にともなう発生波高 $H/2e$ の変化は認められないが、 $h/L \geq 0.3$ の範囲では $h/2e < 13$ になると、 h/L の増大にともない $H/2e$ の値が急激に減少し、 $h/2e$ の効果により波高 $H/2e$ が3割も減少することが認められる。このことは、微小振幅波理論に基づく波高算定式(1)に適用限界があることを示すものであって、式(1)は、 $h/2e \leq 13$ で $h/L \geq 0.3$ の範囲に対して適用することができず、 $h/2e$ の効果を含むように修正しなければならない。また相対水深 h/L の変化にともなう発生波高の変化を示した図-5によれば、微小振幅波理論に基づく式(1)は実験値と比較すると、ほぼ全体に大きな値を与えるものといえる。したがってこのことから、式(1)はそのまま適用することはできない。なお、同図によれば、 $h/L \geq 0.3$ の範囲では実験値の散乱が認められるが、これは前述の $h/2e$ の効果と碎波の効果のためである。なお、ここでいう碎波は造波板前面での波の碎波であり走行後の碎波とは異なる。図-5の×印はこの碎波を示すものであり、限界波形勾配による碎波限界式(6)と実験値とを同時に比較してある。図-5によれば、 $h/2e \leq 10.7$ の範囲では(なお $h/2e > 10.7$ では碎波しなかった)、式(1)と式(6)の交点近傍ではほぼ碎波しており、限界波形勾配を規定する浜田式は発生波の限界を比較的よく規定すると考えてよい。このことより、フラップ式造波機による発生可能領域は第1近似としては、たとえば $h/2e=2$ の場合、図-6の斜線で示した部分、つまり浜田式と Biesel と Suquet 式に囲まれた領域に存在すると考えてよからう。

② 造波機の駆動力：図-7はストレインゲージをロッドにはり、直接作用する力を測定した実験値と式(9)で与えられる計算値との比較を示したものである。なお図中の計算値は式(9)において Biesel と Suquet の式(1)で与えられる発生波高 H を用いて計算したものである。同図より $h/L < 0.3$ の範囲では実測値の方が計算値より大きく、 $h/L \approx 0.04$ では計算値の3.5倍程度も大きくなっていることが認められる。一方 $h/L \geq 0.3$ になると、計算値は実測値より大きな値を示し、 $h/L \approx 0.5$ で、その差異は最も大きくなり、計算値は実測値の2.4倍程度にもなるが、 $h/L > 0.5$ になると計算値と実測値の差異は減少してくる。これは既述したように $h/L \approx 0.5$ で碎波する波が多く、発生波が碎波することによるものである。したがってこのことより微小振

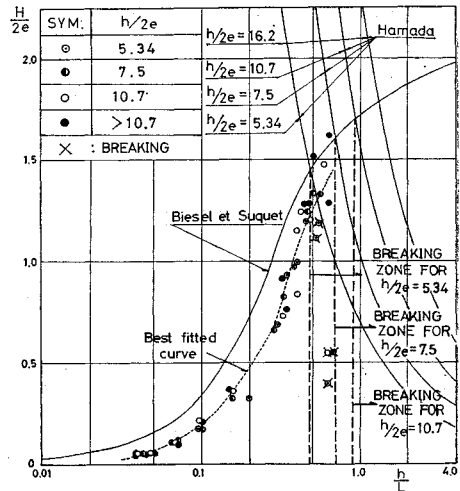


図-5 発生波高

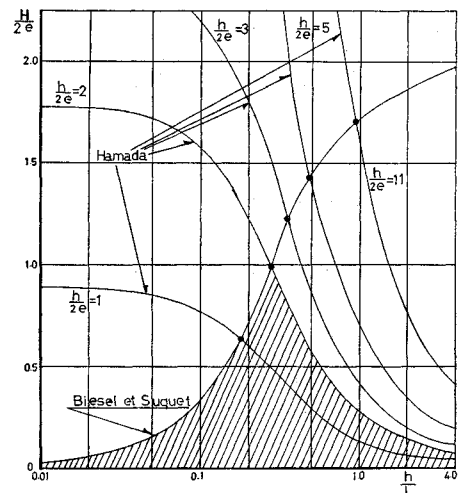


図-6 発生波の発生領域

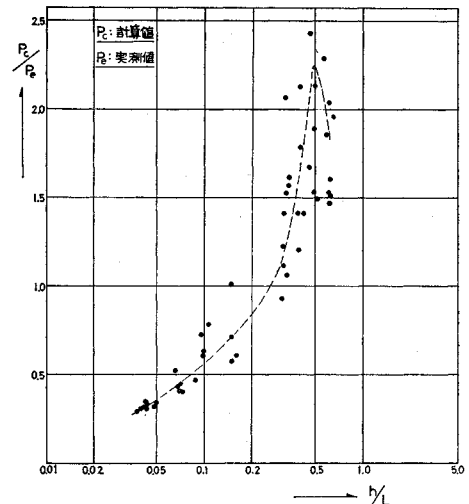


図-7 フラップ型造波機の駆動力(計算値と実測値の比較)

幅波理論を用いて駆動力を算定することはできない。

すなわち、従来最大所要馬力数は、同一の波高を発生させるのに最長周期での値を採用していたが、その場合、周期を変化させて同一波高を発生させるためには、造波板の振幅を変化させていかなければならない。造波板の振幅に限度がありその範囲内で周期を逆に種々変化させて造波機を使う場合には最長周期のとき必要とされる造波板の振幅を他の短い周期に対して作動させると当然発生波高が大きくなり最長周期で決めた馬力数を越える。このように造波板の振幅を一定とし周期を幅広く変える場合は、 $h/L > 0.3$ の条件の時 図-5 に示すように、式 (1) と式 (6) の交点近傍の h/L で与えられる計算値を採用すれば十分といえる。なお $h/L < 0.3$ の条件の時は 図-10 に示した曲線により算定すればよい。

b) プランジャー型造波機

水槽は長さ 30 m × 幅 0.65 m × 高さ 0.95 m の片面ガラス張りの鋼製水槽で、発生波の計測位置および方法はフラップ型造波機と同様である。ただし、プランジャー型造波機については発生波高のみを計測する。なお実験諸元は 表-2 に示す。図-8 は l_1 と l_2 をパラメーターにして、式 (13) で与えられる理論値と実測値の適合度を調べたものである。なお同図の理論値は $C_0 = 0.815$ の値に対して得られたものである。また波が造波板直前で碎ける場合があるため、フラップ型造波機との比較の意味もあるため、碎波条件としては浜田式 (6) を用いた。同図より、碎波しない範囲で計測値と計算値が比較的よく一致することが認められる。したがってこのことよりプランジャー型造波機による発生波高は式 (13) で $C_0 = 0.815$ と置いた場合、つまり式 (14) で一応算定できる

表-2 プランジャー型造波機

h : 静水深	50.0 cm
T : 造波板の変動周期	0.8 ~ 2.48 sec
e : 造波板の静水面上の水平方向の移動距離	15.3 ~ 6.24 cm
l : 鉛直方向の造波板の移動距離	36.9 ~ 15.00 cm
h/L : relative water depth	0.07 ~ 0.500

$(l = l_2 - l_1) \quad (e = e_1 - e_2)$

と考えてよい。

$$\frac{H}{2e} = 1.63 \cdot \left(\frac{\frac{2\pi h}{L} \cdot \sin \frac{2\pi h}{L} - a \cdot \frac{h}{e} \cdot \left(\cos \frac{2\pi l_2}{L} - \cosh \frac{2\pi l_1}{L} \right)}{\sinh \frac{4\pi h}{L} + \frac{4\pi h}{L}} \right) \cdot \left(\frac{\sinh \frac{2\pi h}{L}}{\frac{2\pi h}{L}} \right) \dots \dots \dots (14)$$

また、同図によれば、フラップ型造波機とは異なり浜田式による碎波限界より大きい周期ですでに碎波することが観察される。これは造波機構が異なるため、発生波の特性が異なるためであろう（たとえば、プランジャー式はフラップ式にくらべて底部近傍における水粒子運動が微弱である）。

3. 不規則波発生機の特性的について

(1) 発生原理と装置

線形性の仮定のもとにおける周波数領域での入力と出力の関係は、入力および出力のパワースペクトルをそれぞれ $S_{ii}(f)$, $S_{oo}(f)$ とすると、次のような関係式が成り立つ。

$$S_{oo}(f) = |H(f)|^2 S_{ii}(f) \dots \dots \dots (15)$$

ここで、 $H(f)$ は、System function といわれるもので応答系固有のものである。

また、入力と出力のクロス・スペクトルを $S_{io}(f)$ とすると、

$$S_{io}(f) = H(f) S_{ii}(f) \dots \dots \dots (16)$$

なる関係式がある。

特に、入力のパワースペクトルがホワイトノイズのように、周波数に関係なく、一定 (S) である場合は、上式は

$$\left. \begin{aligned} S_{oo}(f) &= |H(f)|^2 S \\ S_{io}(f) &= H(f) S \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (17)$$

となる。これより、任意のスペクトル $S_{oo}(f)$ を得るためには、System function $H(f)$ を決定すればよいことになる。筆者らの用いた不規則波発生装置の1つの方法は、後述するように、この入力のパワースペクトルとしてホワイトノイズを用い、System function として、帯域濾波器の特性および振動板の応答特性を実験的に決定して電気系に組み入れ、任意のスペクトル $S_{oo}(f)$ を得

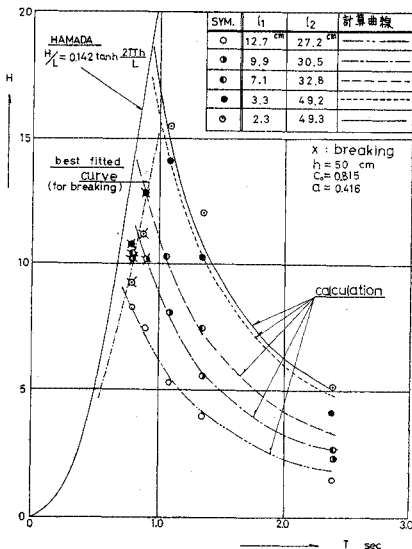


図-8 発生波の波高 (プランジャー型)

ようと試みたものである。

図-9 に本装置のブロックダイアグラムを示すが、図中のそれぞれの機器の特性を記すと次のようである。

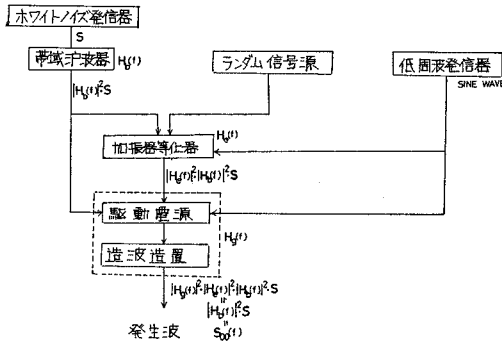


図-9 不規則波発生装置のブロックダイアグラム

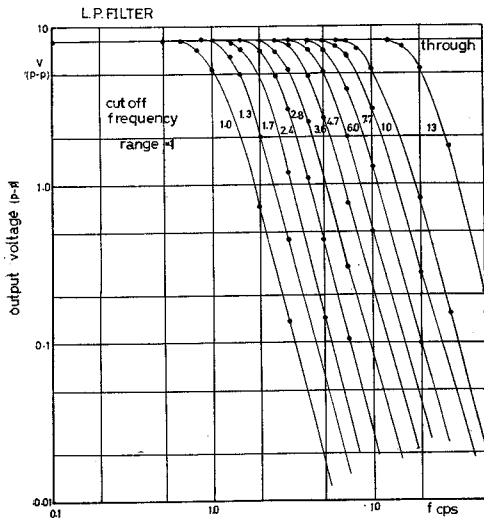


図-10 Low Pass Filter の特性

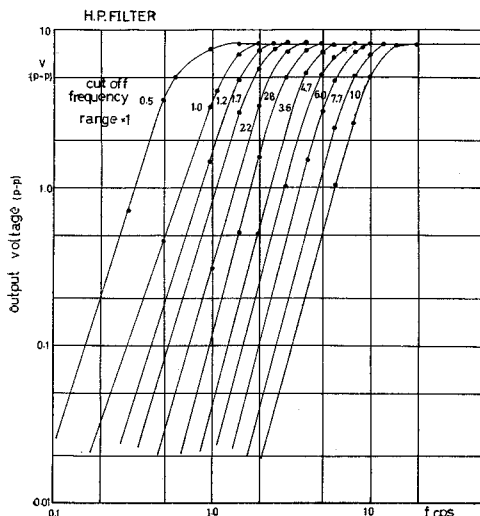


図-11 High Pass Filter の特性

ホワイトノイズ発生器

本器は、0~100 cps のホワイトノイズを発生する。

帯域濾波器

本器は、Low pass filter と High pass filter よりなる。そのそれぞれの特性を、図-10 と 図-11 で示す。

図中の数字は、cut off frequency で、たとえば L.P. filter の 10 と H.P. filter の 10 を組み合わせることにより、その peak が $f=10$ cps になることを示すものである。なお、図中の range は cut off frequency の移行度を示すもので、 $\times 0.1$ と $\times 1$ がある。たとえば、 $\times 0.1$ は図中の cut off frequency の $1/10$ の値となり、 $\times 1$ は図中の数値そのものを示す。

帯域濾波器の特性は、これら 2 つの filter の組み合わせによって決定されるわけであって、たとえば、L.P. filter 1.0, H.P. filter 0.5 とすると、図-12 中の破線に示す範囲の周波数特性をもつ帯域が得られる。

ランダム信号源

現地波を周波数変調したものか、または関数表示されたスペクトルをもつ信号をこの点においてあたえることができる。

加振機等化器

造波装置の発生波の特性を打ち消し、入力をそのまま出力としてとり出そうとする装置である。

加振機 (造波装置) (図-1)

フラップ型造波装置を連結したもので、この機器の性能は、次のような値をもつ。

- 加振力 120 kg
- 周波数範囲 0.1~10 cps
- 最大変位 ± 30 mm
- 振動波形 正弦波 (変位波形)
- ランダム波

この装置によるランダム波の発生には、次に述べる I, II の 2 つの方法をとることができる。すなわち、

方法 I

入力としてホワイトノイズを用い、図-12 に示したような System function に相当する帯域濾波器を通して、出力の振幅の分布が次式で示すような Rayleigh 分布せしめる方法である。

$$p\left(\frac{H}{\bar{H}}\right) = \frac{\pi}{2} \left(\frac{H}{\bar{H}}\right) e^{-\frac{\pi}{4} \left(\frac{H}{\bar{H}}\right)^2} \dots \dots \dots (18)$$

なお、周期についても次式に示すような分布となるようにする。

$$p\left(\frac{T}{\bar{T}}\right) = 2.7 \left(\frac{T}{\bar{T}}\right)^3 e^{-0.675 \left(\frac{T}{\bar{T}}\right)^4} \dots \dots \dots (19)$$

ここで、 H : 波高, \bar{H} : 平均波高, T : 周期, \bar{T} : 平均周期である。

方法 II

現地波をデータレコーダーで記録したものを周波数変

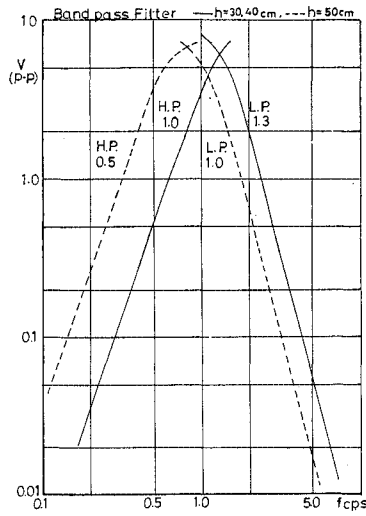


図-12 帯域フィルターの特性 (実線 L.P. 1.3, H.P. 1.0) (破線 L.P. 1.0, H.P. 0.5)

調して入力とするか、あるいはある関数で表示されたスペクトルを持つ信号を入力とする。この方法は模型実験において、模型波を不規則波として再現する場合にきわめて好都合と考えられる。

このいずれの場合においても、与えられた入力をそのまま出力として得るためには、造波装置の特性 (System function) が問題となってくる。本装置においては先に述べたように、この特性を打ち消す必要があるため、加振機等化器を用い、これに対する逆特性を与えるようにしている。

以上の関係を方法 I について記号で表示してみると、先に示した、図-12 のブロックダイアグラム中の記号のようになる。ここで各記号は以下に示すとおりである。

- $H_b(f)$: 帯域濾波器の System function
- $H_e(f)$: 加振機等化器の System function
- $H_g(f)$: 造波装置の System function
- S : ホワイトノイズのスペクトル値
- $S_{00}(f)$: 出力のパワースペクトル

また、上述の $H_e(f)$ と $H_g(f)$ は次式を満足しなければならない。

$$|H_e(f)||H_g(f)|=1 \dots\dots\dots (20)$$

(2) 発生波の特性

a) 造波装置の特性 (駆動電源を含む)

水深 $h=30, 40, 50$ cm のそれぞれ水深に対して、入力の振幅を一定として、周波数の異なる正弦波を発生させ、波高を測定すると、図-13 に示すような波高に関する周波数特性が得られ、これが造波装置の特性と考えられる。

図-13 よりわかるように、水深 h に関係なく、 $f=1.7$ cps 前後で特性のピーク値が現われている。このピーク値の勾配は、 $h=30, 40$ cm ではほぼ同じで、高周波数側では約 $f^{-1.5}$ 、低周波数側では約 $f^{0.8}$ に比例している。しかし、 $h=50$ cm では高周波数側では約 $f^{-3.0}$ 、低周波数側では約 $f^{0.75}$ に比例している。

これに基づいて、加振機等化器の特性をあらわすために、ピーク値 H_p を各周波数における波高 H で除して、上記の特性の逆特性を図-14 に示した。

b) 不規則波の発生

現在の機器に組込まれている等化器の特性が本装置の逆特性とかなり異なるため、IIの方法は用いずに、Iの方法を用いて発生せしめた不規則波の特性について検討する。

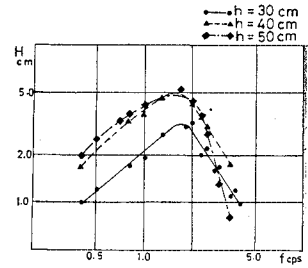


図-13 発生波の特性 (sine 波発生)

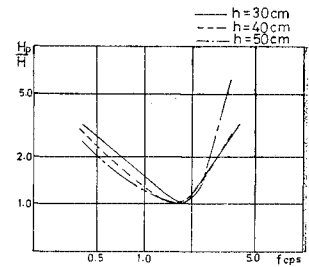


図-14 加振機等化器の特性 (発生波高の逆特性)

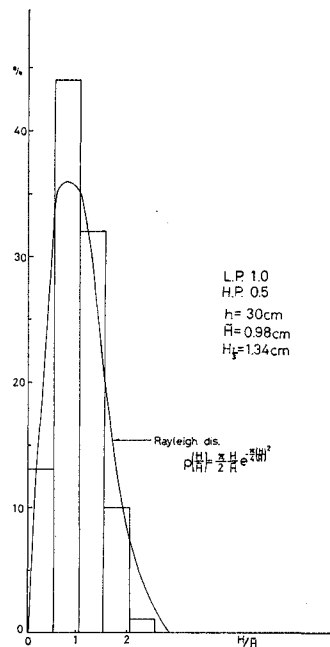


図-15 発生波の波高の度数分布, $h=30$ cm の場合 (L.P. 1.0) (H.P. 0.5)

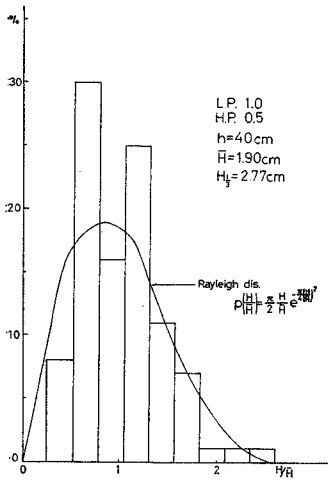


図-16 発生波の波高の度数分布
 $h=40$ cm の場合 (L.P. 1.0)
 (H.P. 0.5)

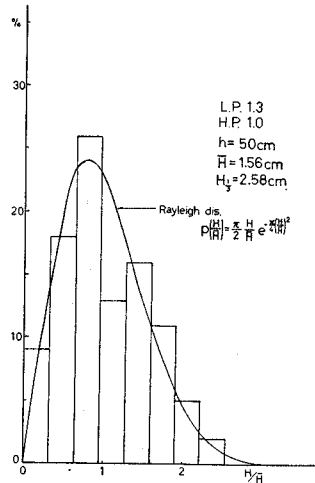


図-17 発生波の波高の度数分布
 $h=50$ cm の場合 (L.P. 1.3)
 (H.P. 1.0)

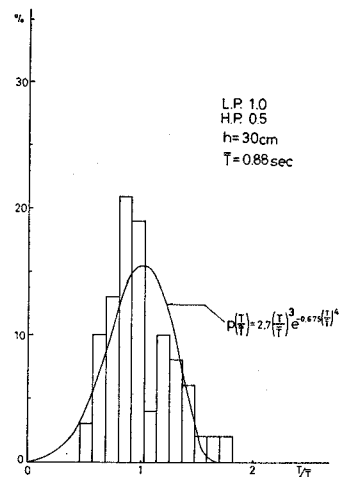


図-18 発生波の周期の度数分布
 $h=30$ cm の場合 (L.P. 1.0)
 (H.P. 0.5)

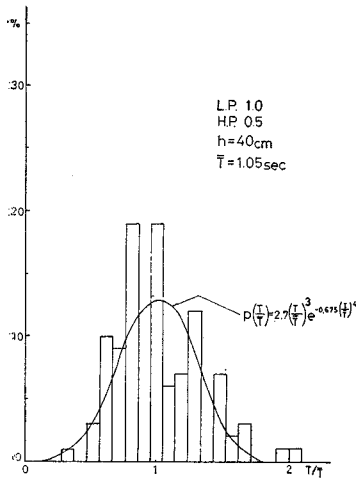


図-19 発生波の周期の度数分布
 $h=40$ cm (L.P. 1.0)
 (H.P. 0.5)

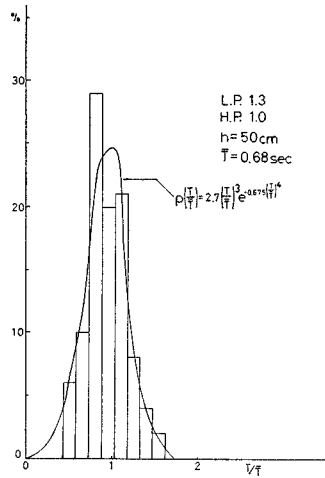


図-20 発生波の周期の度数分布
 $h=50$ cm (L.P. 1.3)
 (H.P. 1.0)

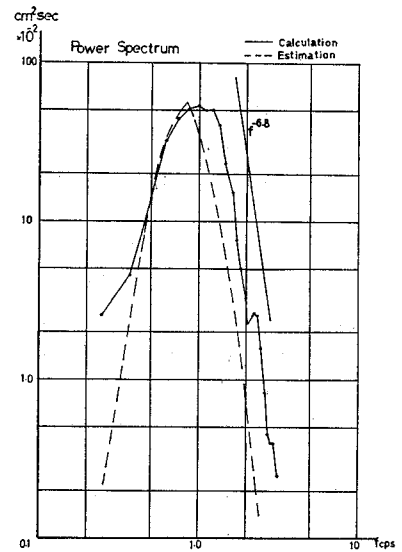


図-21 パワースペクトル ($h=30$ cm)
 (L.P. 1.0 c/s)
 (H.P. 0.5 c/s)

この場合の方法は、図-13 よりわかるように、帯域濾波器の特性のピーク値を 1~2 cps に持ってくる限りにおいては、この造波特性が I の方法の主目的である波高の分布が Rayleigh 分布を示す波の発生が容易となる。したがって、等化器の影響をできるだけ小さくして、不規則波を発生させた。

波高および周期に関する本装置による $h=30, 40, 50$ cm のそれぞれの水深における発生波 100 波の解析結果を 図-15~図-20 に示す。なお用いた帯域濾波器幅は、 $h=30, 40$ cm では、H.P. 0.5, L.P. 1.0(図-15 破線)、 $h=50$ cm では H.P. 1.0, L.P. 1.3(図-15 実線)である。

この結果によると、波高は 図-15~図-17 に示すように本来の目的通り、Rayleigh 分布にかなり一致している。また、1/3 有義波高と平均波高との比は次のようである。

$$\begin{aligned}
 h=30 \text{ cm} & \quad H_{1/3}/\bar{H}=1.37 \\
 h=40 \text{ cm} & \quad H_{1/3}/\bar{H}=1.46 \\
 h=50 \text{ cm} & \quad H_{1/3}/\bar{H}=1.65
 \end{aligned}$$

これによると、 $h=30, 40$ cm では、理論値 1.60 よりもかなり小さいが、 $h=50$ cm ではよく一致している。これは 図-12 で示す、帯域濾波器の帯域幅と同様な波のスペクトル幅が生じているものと考えられ、 $h=30$ cm,

$h=40$ cm のスペクトル幅が $h=50$ cm のそれより広い
ためであると思われる。

この点からして、本装置においては、帯域濾波器の幅
を狭くして、波を発生させる方がよい結果を与えるもの
と考えられる。また、周期についても検討してみると図
—18—図—20 に示すように式 (19) の分布に一致して
いるので、この方法で十分よい結果が得られることがわ
かった。ついで、パワースペクトルについて検討して
みると、図—21 が得られる。これは、L.P. 1.0, H.P.
0.5 の帯域濾波器 (図—12 破線) を用いた $h=30$ cm の
データについて解析し、求めたパワースペクトル (実線)
と、帯域濾波器より推定したパワースペクトル (破線)
とを比較したものである。なお、この解析に当り自由度
 $df=40$, 分解能 $\Delta f=0.125$ cps, Nyquist frequency f_{ny}
 $=5$ cps とした。

この結果、解析値のピークは、推定値のそれより少し
高周波数側によっている。また、ピークの幅も広くなり
、全体的にピークの高周波数側の値がすこし左へずれ
ているが、これは 図—14 の造波特性による影響が入っ
ているためであろう。

これより、造波特性を考慮に入れるなら、帯域濾波器
より簡単に発生波のスペクトルを推定しうることがわか
る。また、ピークより高周波数側の勾配は、約 $f^{-6.8}$ と
なり、現地波のその値が $f^{-5} \sim f^{-7}$ といわれているのに
比較して、きわめて好結果が得られるものといえること
ができる。

4. 結 言

本論では、まず規則波発生装置として、フラップ型造
波機と、プランジャー造波機をとりあげ、フラップ型造
波機については、従来の微小振幅波理論に基づく発生波
の波高および駆動力算定方法の妥当性に検討を加え、プ
ランジャー型造波機については、発生波の波高算定式を
提案した。次に、不規則波発生装置として、造波板の変動
そのものに不規則変動を与えて不規則波を生起させる方
法をとりあげ、その発生原理と発生波の特性について論
じてきた。得られた結論を要約すれば次のとおりである。

(1) フラップ型造波機による発生波の波高および
駆動力の算定に対して従来用いられてきた Biesel と
Suquet の微小振幅波理論は造波板前面で砕波しない領
域においてほぼ同様の傾向を示すので若干の補正により
適用することができるが、砕波する場合には適用するこ
とができないことは注意を必要としよう。造波板により
発生する波には限界があり第 1 近似としては、Biesel と
Suquet の式 (1) と浜田式 (6) 式で規定される領域に発
生波は生起すると考えてよいが、 $h/2e$ の値が小さくな

ると $h/2e$ の効果があらわれ発生波の波高が急激に減少
し、 $h/2e$ の効果を有していない Biesel と Suquet の式
(1) では正確に発生波の波高の算定はできないためであ
る。また造波板に作用する力も、 h/L が大きくなるにつ
れて、計算値の方が実測値よりも大きくなり、微小振幅
波理論では、正確な算定はできないが、造波板の振幅に
限度があり、その範囲内で造波板の振幅を一定にして、
周期を変化させて、造波機を使用する場合、最長周期の
とき必要とされる造波板の振幅を他の短い周期に対して
作動させると、発生波高が増大するとともに、駆動力も大
きくなる。したがってこのような場合においては、 h/L
 > 0.3 の範囲に造波特性を変化さず場合は、 $h/2e$ の値
の最大値を求め、式 (1) と式 (6) の交点に対応する発生
波高を用いて式 (9) により造波機の所要駆動力数を決定
すれば十分安全であるといえる。

(2) プランジャー型造波機による発生波の波高は式
(14) によりほぼ算定される。

(3) 不規則波発生に対しては、ホワイトノイズを入
力として狭帯域濾波器を通して造波板の振幅の変動その
ものを Rayleigh 分布に一致させる方法によれば、所要
の式 (14)、式 (15) で与えられる Rayleigh 分布を示す
波高をほぼ生起せしめることができる。また、Rayleigh
分布波発生のみに関しては、造波特性にあまり関係なく、
帯域濾波器の幅を狭くするだけでよいので容易に造波可
能となる。パワースペクトルに関しては、本装置の帯域
濾波器を用いた限りにおいてはスペクトルの高周波数側
勾配が従来いわれている値にかなりよく一致している。

さらに、現地波再現の場合でも、造波特性の逆特性を
持つ加振機等化器を用いることにより可能となると思わ
れる。

これに関しては、現在 図—14 に示す逆特性をもつ等
化器に改良中であり、その結果については後日報告した
い。

参 考 文 献

- 1) F. Biesel et F. Suquet : Les appareils générateurs de
houle en laboratoire. (étude théorique d'un certain type
d'appareil a houle), La Houille Blanche, Juillet.-
Aout., Mars.-Arriil, Sept. -Oct., (1951).
- 2) 鶴田千里・久田安夫 : 大型造波水路の設計について、運
研報告 Vol. 7, No. 11, 1957 11.
- 3) 合田良実・鶴田千里 : 小型造波水路の設計について、運
研資料, 1961 6.
- 4) 岩垣雄一・石田 昭 : 波起 6 機によって起した不規則波
の特性, 第 16 回海岸工学講演会講演集, 1969 11.
- 5) 竹田英章・永井康平 : 無反射性造波水路における不規則
波の性質—鉛直振動流型とフラップ型造波機による波の
干渉の利用, 第 6 回港研研究発表会講演概要集, 1968 12.
- 6) 合田良実・永井康平 : 造波板の変速運動による発生不
規則波のスペクトルについて、港研報告, 第 8 巻, 第 3 号,
1969.
- 7) 浜田徳一 : たとえば水理公式集, 土木学会編, p. 482.
- 8) 2) と同じ。 (1970.10.8・受付)