

吸収式造波機の基本特性に関する実験

Fundamental Experiments on the Basic Characteristics of Absorbing Wave Making System

湊 康裕*
Yasuhiro Minato

水野 晋**
Susumu Mizuno

金子 範彦*
Norihiro Kaneko

多田 彰秀***
Akihide Tada

西平 福宏****
Fukuhiro Nishihira

要 約

当社では、2次元造波水槽を建設し、海洋構造物の実験で特に問題となる反射波を吸収しつつ所定の波を造波できる吸収式造波機を導入した。なお、本造波機は、従来からの位置制御方式による造波も可能である。

本報では、両制御方式による造波の基本特性を把握する目的で基礎的な実験を行ったので報告する。まず、水槽内に構造物が無い状態で規則波および不規則波を発生させ、制御方式の相違による造波特性の差異について検討した。次いで、水槽内に直立板を設置し波高の安定性、造波機の反射率および不規則波のスペクトル分布について比較検討を加えたり。

その結果、入力信号と波高との関係、波高の安定性、不規則波作成の容易性などから総合的に判断して、吸収制御方式は位置制御方式より優れていることが確認された。

目 次

- §1. はじめに
- §2. 実験施設および計測システム
- §3. 規則波の造波実験
- §4. 不規則波の造波実験
- §5. 吸収式造波機の性能
- §6. おわりに

§1. はじめに

21世紀を迎えるにあたり、当社では「海洋・海岸の新しい利用法の開発」を一大テーマとして掲げ技術開発・

研究を推進している。その一環として、平成元年4月に2次元造波水槽を建設し、海洋構造物の実験で特に問題となる構造物からの反射波を吸収し所定の波を造波できる吸収式造波機を導入した。

一般的に、2次元造波水槽において、防波堤などに代表される高反射性の構造物を設置して波浪に対する実験を行う場合、構造物より反射して戻ってくる波をさらに造波機が再反射するために、構造物と造波板との間が重複波状態となり実験をより複雑なものにしてしまうことがある。このようなことを避けるために従来より、反射波が造波板に到達するまでに実験を終了させたり、構造物からの反射波を分散させるなど再反射の影響をなくす工夫が種々なされてきた。しかしながら、これらの方法では不規則波実験や長時間の造波実験の場合、再反射を十分に抑制できるとは断言できないようである。さらに、

*技術研究所水理研究課
**技術研究所海洋技術課
***技術研究所海洋技術課係長
****技術研究所部長

実験終了後静水面を得るまでに長時間を要するという問題もある。

これらの諸問題を解決するために、近年造波板での再反射波の発生を極力抑える機能を持つ吸収式造波機が実用化されている。すなわち、谷本ら²⁾は造波板に働く流体力を計測し、造波板の推力を制御する方式を開発した。一方、造波板前面の波高を情報として取り込み、造波板の速度を制御する方式の造波機を川口³⁾、小山ら⁴⁾が実用化している。

この度新たに設置した2次元水槽および吸収式造波機

を有効に利用していく上で、それらの基本特性を把握しておくことは極めて重要なことと考えられる。このような観点より、以下に示す内容の基礎実験を行ったので本報で報告する。まず、水槽内に反射性の構造物が無い状態で、位置制御方式および吸収制御方式により規則波および不規則波を発生させ、制御方式の相違による造波特性の差異について検討する。次いで、水槽内に直立板を設置し、両方式により規則波および不規則波を発生させ、波高の安定性、造波機の反射率および不規則波のスペクトル分布について比較検討を行う。最後に、従来型の造波機である位置制御方式と吸収制御方式の性能について考察を加える。

Table 1 2次元水槽および造波機の諸元

水 槽	B1.0m × H1.6m × L65.0m
造 波 形 式	ピストン型 / 背面水面 / ボールネジ駆動
造 波 板	全幅 1.0m 駆動点最大片振幅 0.30m
駆 動 装 置	サーボモータ 1.5kW
制 御 方 式	吸収制御方式 位置制御方式

§ 2. 実験施設および計測システム

水槽および造波機の諸元を Table 1 に示す。本造波機は、造波板前面にフィードバック用としての容量式波高計を設置している。水槽両端部には消波装置を設けており、端部からの反射波を極力低減できるようにしている。Fig. 1 に示すように、データの収集は、容量式波高計より A/D 変換ボードを介してパソコン PC-98XL²⁾ に取り込み、データ処理および解析を行う。

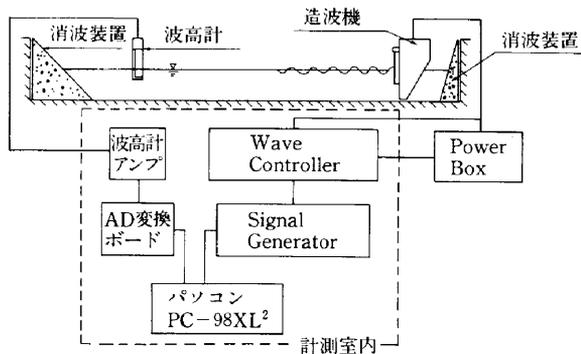


Fig.1 計測システム

Table 2 実験条件(規則波)

位置制御方式 (水深(cm) : 70.0)	
周 期 (秒)	1.2, 1.6, 2.0, 2.4
入力電圧 (V)	0.5, 1.0, 1.5, 2.0
吸収制御方式 (水深(cm) : 60.0, 70.0, 80.0)	
周 期 (秒)	1.2, 1.6, 2.0, 2.4
入力電圧 (V)	1.6, 2.4, 3.2, 4.0

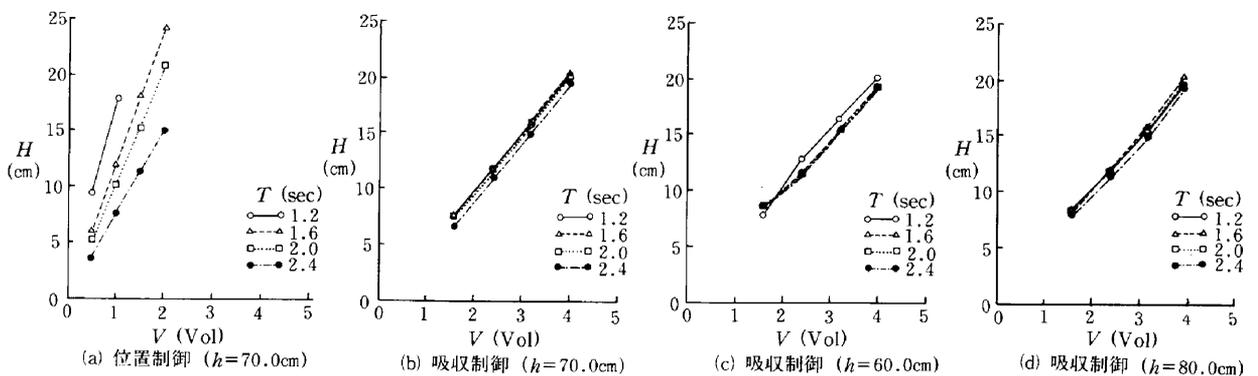


Fig.2 入力電圧と発生波高の関係

§ 3 . 規則波の造波実験⁵⁾

3-1 規則波の造波特性

本造波機で規則波を造波させた場合の、入力電圧と波高の関係を把握する実験を行った。実験方法は、造波板前面より0m,20m,30m,40mの4地点に波高計を設置し、Table 2 に示した周期および入力電圧の組合せにより規則波を発生させた。計測は造波板前面40mの地点に設置した波高計に所定の波が達した後、約10秒間(サンプリング間隔 $\Delta t = 0.02$ 秒, データ数 $N = 512$ 個)行い、反射波が最も岸側(造波板前面より40m地点)の波高計に到達する以前に計測を終了した。

実験は、まず、水深を一定として($h = 70$ cm), 位置制御および吸収制御の両方式で造波を行った。さらに、後者の方式については、水深を60cmおよび80cmに変化させて追加実験も行った。

なお、本造波機の位置制御方式は、入力電圧1V当り造波板変位が約5cmになるように造波板を制御している。一方、吸収制御では、入力電圧1V当り造波板前面で約5cmの波高が出現するような制御システムとなっている。

3-2 実験結果

位置制御および吸収制御の違いによる、入力電圧と測定波高の関係を比較したものが、それぞれFig. 2 (a) および (b) である。図の横軸は造波機への入力電圧を、縦軸は造波板前面より30mの波高検定位置での進行波

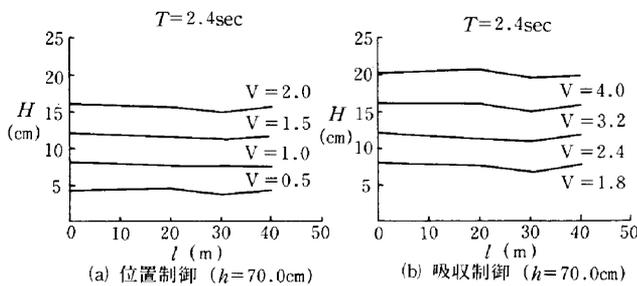


Fig.3 入力電圧を変えた場合の水路軸方向の波高変化図

Table 3 実験条件(規則波)

	微小振幅波	有限振幅波
位置制御方式	$T = 1.2$ (sec) $H = 6.7$ (cm)	$T = 2.8$ $H = 6.3$
吸収制御方式	$T = 1.2$ $H = 6.6$	$T = 2.8$ $H = 5.1$

の波高を示している。両者ともに、入力電圧と測定波高の間には比例関係が確認された。さらに、位置制御方式の場合には周期が長くなるほど比例定数が小さく、発生波高が小さくなることも認められる。なお、このことは、位置制御方式が、造波板変位を単に入力電圧に比例して制御することによるものと考えられる。一方、吸収制御方式では、周期によらず比例定数が一定となる。

また、吸収制御方式を用いて、水深60cmおよび80cmについて同様の実験を行った結果を Fig. 2(c) および (d) に示す。先の水深70cmでの結果も考慮すれば、入力電圧と測定波高の関係には、水深変化の影響がほとんど現れない。

さらに、周期2.4秒について、水槽軸方向の波高変化を Fig. 3 に示した。図の横軸は造波機からの距離を、縦軸は波高検定位置での進行波の波高を示す。波高が16cm以下の場合には、制御方式にかかわらず、伝播に伴う波高の減衰は小さい。また、40m地点での波高が30m地点での値より大きくなっている。この原因については明らかでない。

3-3 波形についての検討

水深を70.0cmとして、Table 3 に示す微小振幅波および有限振幅波を位置制御および吸収制御の両方式により発生させた。造波開始とともに造波板前面より0m, 15m, 25m, 35m地点において計測を開始し、任意の進行波が最も岸よりの地点(造波板前面より35m地点)を通過した後に終了した。なお、計測時間内には消波材からの反射波は存在していない。

(1) 微小振幅波

位置制御方式および吸収制御方式により微小振幅波を造波した場合の波の変形過程を Fig. 4 (a) および (b)

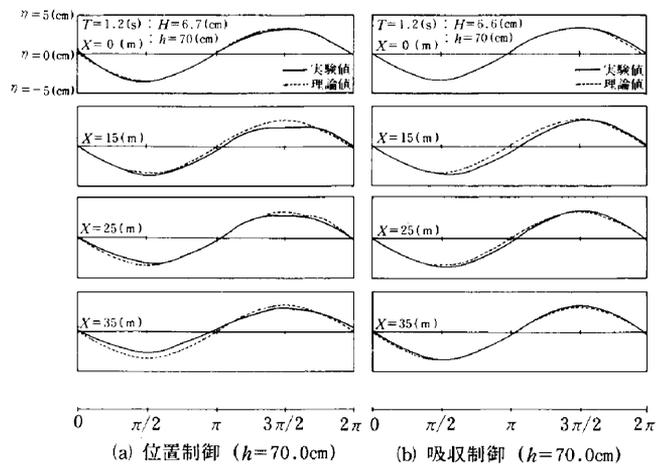


Fig.4 微小振幅波の進行に伴う波形変化図

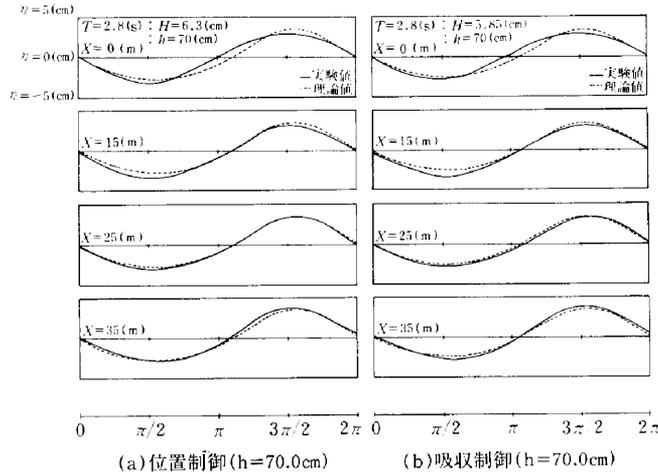


Fig.5 有限振幅波の進行に伴う波形変化図

に示した。図中の破線は正弦曲線である。造波方式による波形の違いは、前者の方式によって発生させた波の山の部分が平になっている点で顕著である。また、両方式の波形とも正弦曲線からのずれは小さい。

(2) 有限振幅波

両制御方式により有限振幅波の領域に属する波を造波した場合の、波形の変化を Fig.5 (a) および (b) に示す。図中の破線は式(1)により求められる有限振幅波の第3近似解⁶⁾である。

$$\begin{aligned} \eta &= L(A_1 \cos \theta + A_2 \cos 2\theta + A_3 \cos 3\theta) \\ &= a \cos \theta + \left[\frac{1}{4} k a^2 \frac{\cosh kh (\cosh 2kh + 2)}{\sinh^3 kh} \right] \cos 2\theta \\ &\quad + \frac{3}{64} k^2 a^3 \frac{(8 \cosh^3 kh + 1)}{\sinh^6 kh} \cos 3\theta \end{aligned} \quad (1)$$

ただし、

$$\begin{aligned} \theta &= \frac{2\pi}{L} x - \frac{2\pi}{T} t, \quad k = \frac{2\pi}{L}, \\ a &= \frac{H}{2} - \frac{3}{128} \left(\frac{\pi H^2}{L} \right) H \frac{(8 \cosh^6 kh + 1)}{\sinh^6 kh} \end{aligned} \quad (2)$$

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh kh \left[1 + (ka)^2 \frac{(\cosh 4kh + 8)}{8 \sinh^4 kh} \right] \quad (3)$$

ここに、 η : 水位, H : 波高, T : 周期,

a : 振幅, L : 波長, h : 水深

造波方式の相違による波形の違いはほとんど認められない。また、造波板が正弦曲線の動きをしているため造波板前面での水位は正弦曲線となっている。しかし、波の進行に伴って変形が進み、25mを越えた地点では理論的

Table 4 実験条件(不規則波)

CASE	$T_{1/3}$ (sec)	$H_{1/3}$ (cm)	備考
1	1.0	4.0	直立板無し
2	1.5	8.0	
3	2.0	12.0	

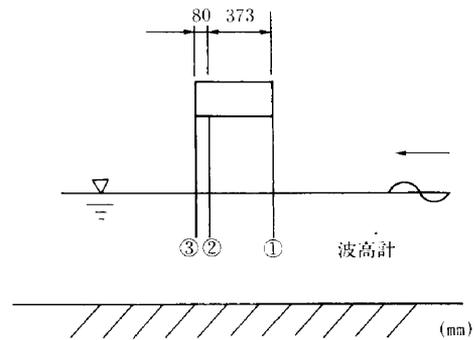


Fig.6 波高計の設置状況

に導かれた有限振幅波に極めて近い波形となった。

§ 4. 不規則波の造波実験⁵⁾

本研究では、乱数を用いて不規則波を発生させる際の目標スペクトルとして式(4)に示されるブレットシュナイダー・光易型の周波数スペクトルを採用し、Table 4 に示す3ケースについて不規則波実験を行った。

$$S(f) = 0.257 \left(\frac{H_{1/3}}{T_{1/3}^2} \right)^2 f^{-5} \exp[-1.03(T_{1/3} f)^4] \quad (4)$$

計測は、造波開始3分後より開始し、約160秒間(サンプリング間隔 $\Delta t = 0.04$ 秒, データ数 $N = 4096$ 個)に渡りデータの収集を行った。計測に用いた3本の波高計は Fig. 6 に示したような位置に設置した。なお、図中の波高計③と造波板間の距離は28mとした。

ここでは、合田⁷⁾により提案された有効周波数範囲の考えに従い、3本の波高計を用いて波高計間隔 Δl を最大3種類にすることでスペクトル解析できる有効周波数を広く取った。以下に、各々の波高計間隔により分担する周波数を示す。

$$\Delta l_{1,2} = 37.3\text{cm} : 0.33 \sim 1.37 \text{ (Hz)}$$

$$\Delta l_{2,3} = 8.0\text{cm} : 0.98 \sim 2.98 \text{ (Hz)}$$

$$\Delta l_{1,3} = 45.3\text{cm} : 0.28 \sim 1.25 \text{ (Hz)}$$

スペクトル解析には波高計間隔 $\Delta l_{1,2} = 37.3\text{cm}$ により

解析される周波数帯0.33~1.37 (Hz) を主として用い、残りの周波数帯を他の波高計間隔のものによって補完した。得られたデータに入・反射波分離解析を行い、実際に起こっている入射波のスペクトル分析と目標とする不規則のスペクトルとを比較するとともに、入力信号の補正係数を求め目標のスペクトルに近づけた。Table 5 に入・反射波分離解析時の計算条件を示す。位置制御方式の場合は、入力信号の修正計算を2回で、吸収制御方式では1回で所定の不規則波のスペクトルにはほぼ近い入力

Table 5 入射波・反射波の分離解析時の計算条件

波高計間隔	$\Delta l_{1,2}=37.3\text{cm}$, $\Delta l_{2,3}=8.0\text{cm}$ $\Delta l_{1,3}=45.3\text{cm}$
水深	70cm
有効周波数帯	0.28~2.98 (Hz)
データの数と時間間隔	4096個 0.04sec
計測時間	約160秒

信号を作成できた。

位置制御方式および吸収制御方式により実際に造波された入射波・反射波スペクトルと目標スペクトルとの比較を Fig. 7 および Fig. 8 に示す。これらの図より、両方式ともに3ケースいずれの場合についても有義周期に対応する周波数帯で目標スペクトルを十分に再現していることが認められる。また、造波方式の違いによる差はほとんど見られないが、しいて挙げるならば有義周期1.0秒、有義波高4.0cmの条件であるCASE 1の1.3~2.0Hzの周波数帯において、位置制御方式の方が吸収制御方式より目標スペクトルに近くなっている (Fig. 7(a) および Fig. 8(a) 参照)。

以上より、従来型の造波方式である位置制御方式に比べ吸収制御方式の方が、不規則波の作成に際し入力信号の補正回数が少ないぶん有利である。

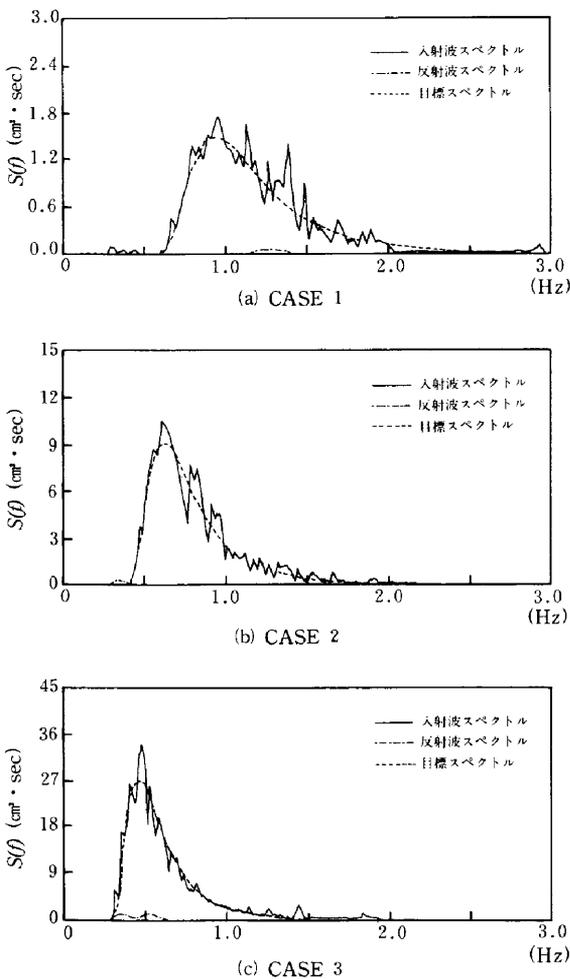


Fig.7 不規則波の造波特性(位置制御)

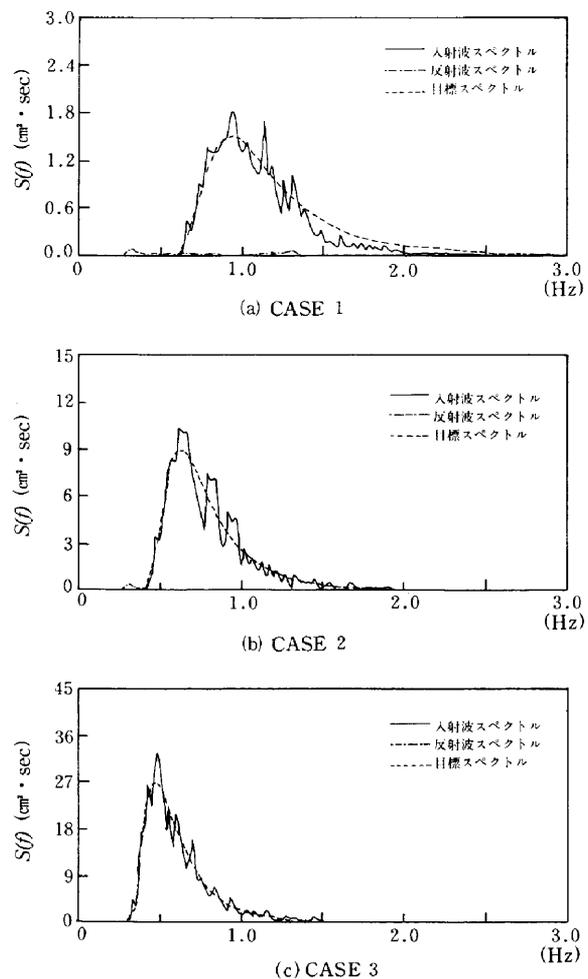


Fig.8 不規則波の造波特性(吸収制御)

§ 5 . 吸収式造波機の性能

5-1 造波板の反射率⁴⁾

造波方式の違いが反射率に及ぼす影響に注目し、造波終了後、水槽内を伝播する波の波高変化を計測して造波板の反射率を算定した。水深70cmとした水槽内の造波機前面より30mの位置に直立板を設置し、Table 6 に示すような周期および波高の異なる5種類の規則波を発生させて実験を行った。なお、5種類の波の波形勾配は、 $H/L=0.035$ で一定とした。

計測は造波板前面より7mの位置に設置した波高計2本を用いて以下のような順で行った。まず、所定の規則波を水槽内に発生させた。次いで、造波した波の先端が造波板と直立板の間を2往復して水槽内が重複波状態になった時点で造波機を停止させた。計測を造波機停止10秒後から約20秒間(サンプリング間隔 $\Delta t=0.02$ 秒, データ数 $N=1024$ 個)行った。なお、得られたデータに対して入・反射波分離解析を行い造波機の反射率を求めた。

Fig. 9 より明かなように、位置制御方式の場合、造波板は完全に停止しているため、反射率は0.8以上と高くなっている。一方、吸収制御方式の場合、造波板前面の水位の乱れを抑制するように造波板が作動するため、反射率は0.3以下となっている。また、吸収制御方式の場合、水深波長比 h/L が大きくなるに従って、すなわち周期が短くなるほど反射率が大きくなる傾向も見られた。

Table 6 実験条件(規則波)

水深：70.0cm

	1	2	3	4	5
周期(秒)	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
波高(cm)	7.5	10.0	12.0	14.0	16.0
h/L	0.32	0.25	0.20	0.17	0.15

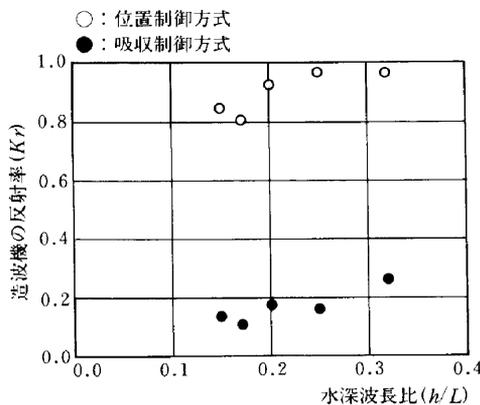


Fig.9 造波機の反射率

5-2 波高の安定性実験²⁾

ここでは谷本らと同様、吸収制御方式を用いることによる造波水位の安定性を確認する目的で、水槽内に直立板を設置し、Table 7 に示すような波高10.0cmで周期の異なる6種類の規則波を発生させて実験を行った。計測は水槽内に設置した直立板の前面30cmに取り付けた波高計に、反射波が到達した後に開始し、約100秒間(サンプリング間隔 $\Delta t=0.1$ 秒, データ数 $N=1024$ 個)行った。

波高の安定性を表すパラメータとして、直立板前面で

Table 7 実験条件(規則波)

水深：70.0cm, 波高：10.0cm

	1	2	3	4	5	6
周期(秒)	1.0	1.3	1.5	1.8	2.0	2.3
h/L	0.45	0.28	0.22	0.17	0.15	0.13

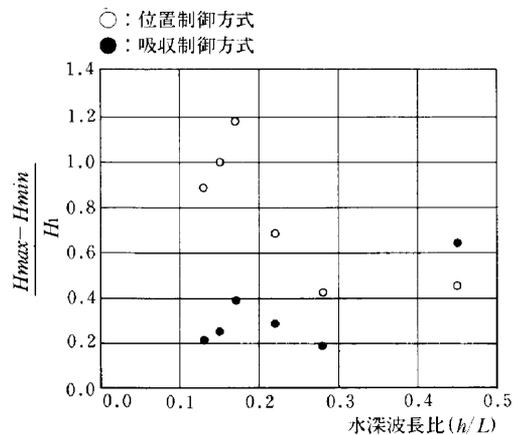


Fig.10 波高の安定性

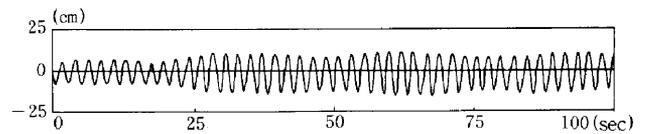


Fig.11 位置制御方式による波形記録
($h=70.0$ cm, $T=2.3$ sec, $H=10.0$ cm)

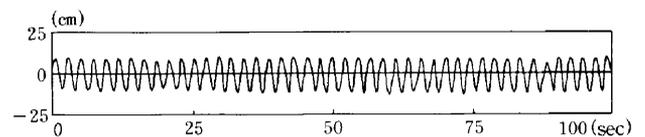


Fig.12 吸収制御方式による波形記録
($h=70.0$ cm, $T=2.3$ sec, $H=10.0$ cm)

Table 8 実験条件(不規則波)

CASE	$T_{1/3}$ (sec)	$H_{1/3}$ (cm)	備考
4	1.0	4.0	直立板有り
5	1.5	8.0	
6	2.0	12.0	

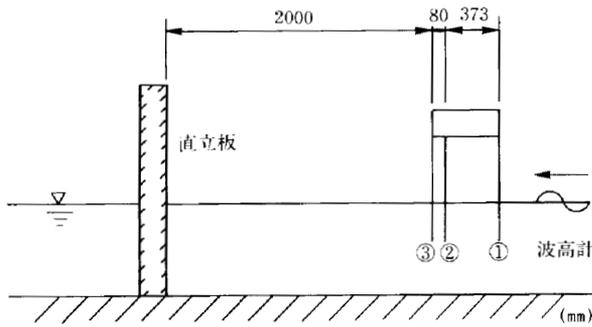


Fig.13 波高計の設置状況

計測した波高の最大値 H_{max} と最小値 H_{min} の差を本来の重複波高 H_1 で除した値と h/L の関係を Fig. 10 に示す。位置制御方式ではこのパラメータ値が 0.43~1.18 であるのに対し、吸収制御方式では 1 例を除き 0.4 以下と全体に小さい値となっている。さらに、水深波長比 $h/L=0.2$ 以下では、両方式によるパラメータ値の差は大きく、一方 $h/L=0.2$ 以上ではその差は小さい。また、水深波長比 $h/L=0.45$ の場合を除けば、 h/L に対する $(H_{max}-H_{min})/H_1$ の増減傾向は、位置制御方式および吸収制御方式とも同じ傾向を示している。 $h/L=0.45$ の場合については、周期が 1.0 秒と短いため、反射波を吸収しつつ造波する信号に、造波板の動きが十分に追従できていないため、他の結果とは異なる特性を示している。これは、造波板の慣性、駆動部の摩擦および造波機背後の水面の乱れなどの造波機にかかる抵抗が原因と推測される。

さらに、周期 2.3 秒の場合の位置制御および吸収制御で行った実験時の波高記録を Fig. 11 および Fig. 12

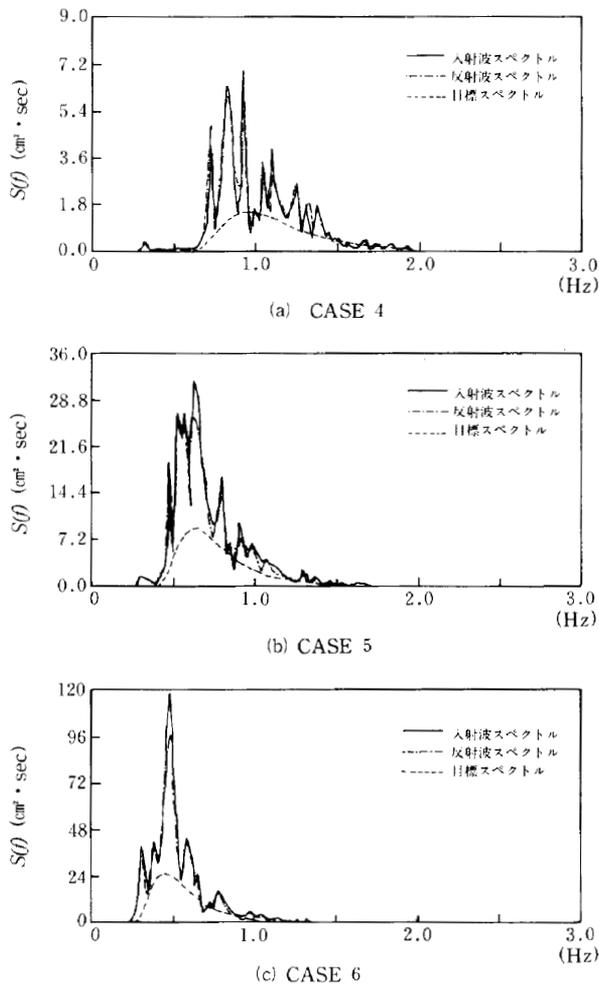


Fig.14 直立板設置時の不規則波の造波特性 (位置制御)

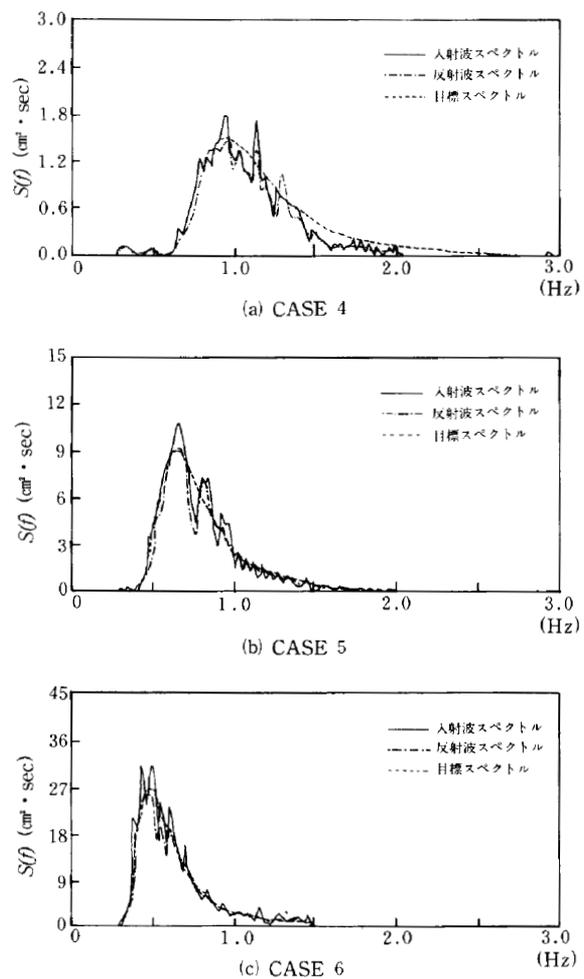


Fig.15 直立板設置時の不規則波の造波特性 (吸収制御)

に示す。この比較からも、吸収制御方式の方が安定した波高を発生できることが確認される。

以上のことより、水深70cmに限れば、本吸収式造波機はどちらかと云えば短周期に比べて長周期の波をより安定して造波できる特性を有している。また、これに関連して本水槽長が65mであることは、長周期の不規則波実験を行う上で大きなメリットとなるものと考えられる。

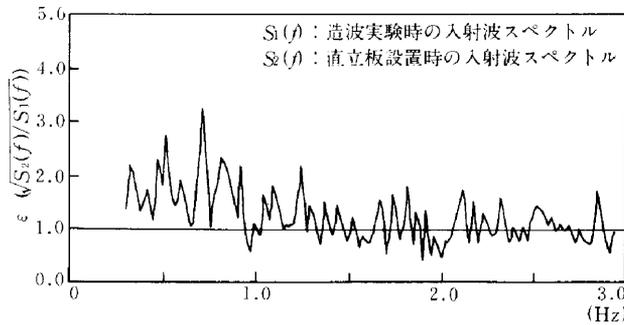
5-3 スペクトル特性⁵⁾

水槽の中央部(造波板前面30m地点)に直立板を設置し、構造物からの反射波が大きい場合を想定して実験を行った。Table 8 に示すように、§3で既に実験した3ケース(CASE 1, CASE 2, CASE 3)の不規則波を発生させるとともに、造波後3分経過した時点から計測を開始し、約160秒間(サンプリング間隔 $\Delta t = 0.04$ 秒, データ数 $N = 4096$ 個)データの収集を行った。計測に用

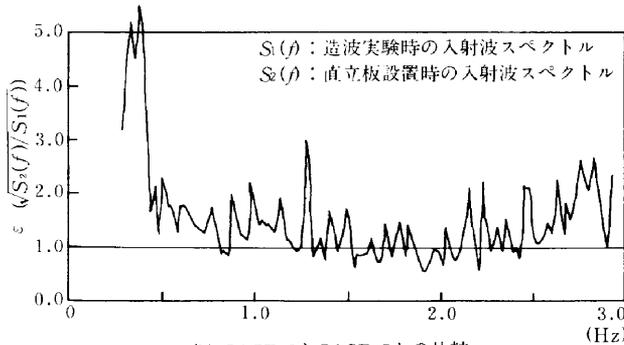
いた3本の波高計は、Fig. 13 に示すような位置に設置した。

位置制御方式および吸収制御方式による実験結果から得られた各ケースのスペクトル形を Fig. 14 および Fig. 15 に示す。位置制御方式の場合、§3で行った実験では入射波スペクトルは、かなりの精度で目標スペクトルを再現していた(Fig. 7 参照)。一方、CASE 4, CASE 5 および CASE 6 のように構造物を設置した場合には、有義周期の近傍の周波数域においてスペクトル値が目標スペクトルをはるかに上回る分布となった(Fig. 14 参照)。また、吸収制御方式の場合には、構造物からの反射率が大きくなっても入射波のスペクトルは目標スペクトルをほぼ再現している。

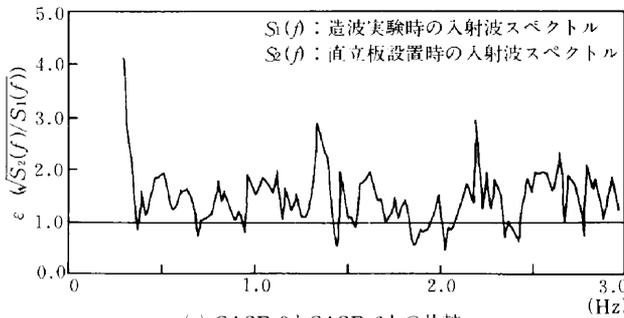
次に、直立板設置前と後での入射波スペクトルの比の平方根 ϵ を Fig. 16 および Fig. 17 に示す。CASE 1 (直



(a) CASE 1 と CASE 4 との比較

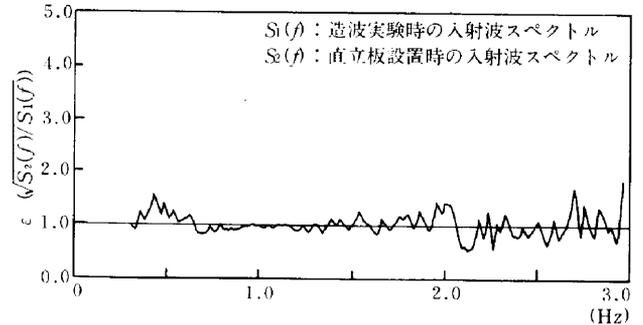


(b) CASE 2 と CASE 5 との比較

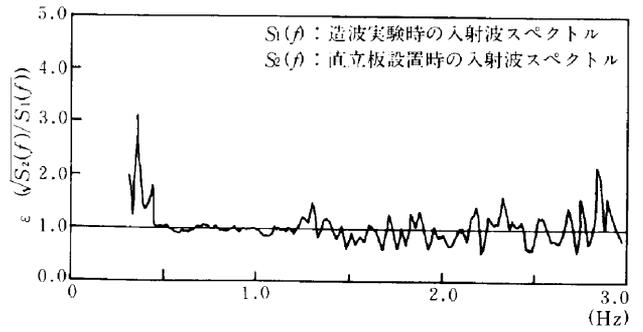


(c) CASE 3 と CASE 6 との比較

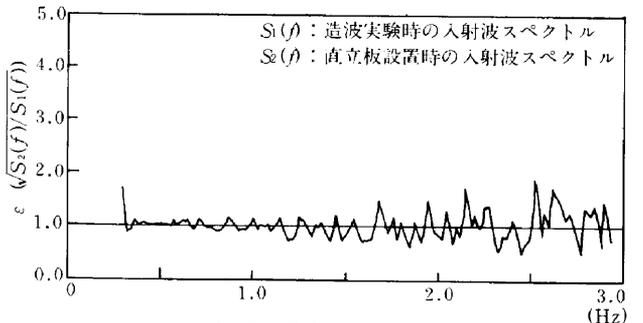
Fig.16 直立板の有無による入射波成分の比較対
(位置制御)



(a) CASE 1 と CASE 4 との比較



(b) CASE 2 と CASE 5 との比較



(c) CASE 3 と CASE 6 との比較

Fig.17 直立板の有無による入射波成分の比較対
(吸収制御)

立板設置前)の入射波スペクトルとCASE 4(直立板設置後)の入射波スペクトルの場合を例にすれば、 ε は次のように定義される。

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\text{直立板設置時の入射波スペクトル(CASE4)}}{\text{造波実験時の入射波スペクトル(CASE1)}}$$

なお、入射波スペクトルの比の平方根を採用したのは、以下に示す関係があるためである。

$$E(f) \propto S(f), \frac{1}{2} a^2(f) \propto E(f), H(f) \propto a(f)$$

ここで、	$E(f)$:	任意の周波数でのエネルギー
	$S(f)$:	スペクトル
	$a(f)$:	振幅
	$H(f)$:	波高

したがって、図に示した値 ε は、吸収制御方式および位置制御方式により不規則波を発生させた場合の、各周波数に対する波高成分の比と解釈できる。

Fig. 16より位置制御方式の場合、直立板設置時の波高成分は設置前と比較すると平均して2倍程度の増大となっている。一方、吸収制御方式の場合、直立板の設置前と設置後における値の比は有義周期に対応する周波数近傍で1に近い値をとっている。したがって、吸収制御方式では、事前に目標スペクトルを満たす不規則波信号を作成しておけば、水槽内に高反射率の構造物を設置しても所定のスペクトル分布の不規則波を入射波として与えることが可能であると判断される。

§ 6. おわりに

当社の2次元水槽に設置した吸収式造波機の基本特性を把握するために行った実験結果をまとめれば、以下のとおりである。

- (1)規則波を発生させる場合、吸収制御方式によれば入力電圧と発生波高は周期にかかわらず一定の比例関係が得られた。一方、位置制御方式の場合、入力電圧と発生波高の関係は周期により勾配の異なる比例関係が確認された。
- (2)構造物を水槽内に設置して規則波を発生させる場合、波高の安定性は吸収制御方式の方が位置制御方式より優れている。
- (3)不規則波を発生させる場合、位置制御方式と比較すれば吸収制御方式の方が目標とする不規則波の信号が早く作成できること、さらに、水槽内に高反射性の構造物を設置した場合でも目標とするスペクトル分布に近い不規則波を造波できることが明らかになった。

以上より、吸収制御方式の造波機は、位置制御方式に比べ造波の安定性および実験時の便利さにおいて優れるものであることが確認された。

参考文献

- 1) 湊 康裕・水野 晋：吸収式造波機の特性に関する基礎的実験，土木学会第45回年次学術講演会講演概要集II，1990(投稿中)
- 2) 谷本 勝利・原中 祐人 他：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, 1983.
- 3) 川口 隆：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, 1986.
- 4) 小山 裕文・岩倉 重行 他：反射波吸収式造波システムの開発と基本特性，第30回海岸工学講演会論文集，pp. 25~29, 1988.
- 5) 平口 博丸・鹿島 遼一：水面波形制御方式による無反射型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, 1988.
- 6) 近藤 俊郎・竹田 英章：消波構造物，森北出版，pp. 251~252, 1983.
- 7) 合田 良実・鈴木 康正 他：不規則波実験における入・反射波分離推定法，港湾技研資料，No. 248, pp. 9~10, 1976.