

運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 34 NO. 2 June. 1995

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P. H. R. I)
第34巻 第2号 (Vol. 34, No. 2), 1995年6月 (June. 1995)

目 次 (CONTENTS)

マルチ・フェイス多方向不規則波造波装置の適用性について	平石哲也・金澤 剛 3
(Effective Test Area of Multi-Face Wave Generator	Tetsuya HIRAISHI, Tsuyoshi KANAZAWA)

マルチ・フェイス多方向不規則波造波装置の適用性について

平石 哲也*
金澤 剛**

要 旨

近年、防波堤や人工島と言った海洋構造物が、沖合いの大水深域に設置されるようになり、その設計において、波の多方向性を考慮する必要性が高まっている。それにともない実験室における平面水槽にも、多数の小型造波機を一直線に配置した多方向不規則波造波装置が各所で設置されている。この造波装置を用いて、多方向不規則波や斜め規則波を造波した場合、目標とする波浪場を再現できる領域、すなわち有効造波領域は水槽内の一部に限られる。多方向不規則波実験を効率よく行うには、広く安定した有効造波領域を水槽内に再現することが必要である。

本研究では、有効造波領域を拡大するために、造波機の両端に反射壁の代わりに造波板を設置し、すなわちコの字型に吸収型造波機を配置して、水槽の複数面から波を造波するマルチ・フェイス多方向不規則波造波装置を提案した。そして、水槽実験および数値計算により本造波装置の適用性と造波機の配置条件について検討した。得られた主な結論は以下の通りである。

(1) マルチ・フェイス多方向不規則波造波装置によって、水槽内の有効造波領域を拡大することが可能となる。

(2) マルチ・フェイス造波法による波浪場は、'斜め波の造波理論'を用いて予測することが可能である。また、数値計算により、造波機同士の接合部に曲率を考慮して造波装置を配置すれば、マルチ・フェイス造波法の適用性を高めることができることが判明した。

* 水工部 主任研究官
** 水工部 研修生 (東洋建設)

Effective Test Area of Multi—Face Wave Generator

Tetsuya HIRAIISHI*

Tsuyoshi KANAZAWA**

Synopsis

Wave generators with small segments have been developed to reproduce directional random waves in experimental basins. The multi-face directional random wave maker with generator faces along the three sides of a basin is proposed to enlarge the effective test area in which target directionality is reproduced. Applicability and reproducibility of the multi-face generator is experimentally investigated.

In the experiment, spatial variation of oblique regular wave heights and propagating angles are measured in the multi-face generation basin. Directional spectra of random waves are analyzed in several locations in the basin.

Numerical simulation is carried out to propose the best arrangement of multi-face generator.

The following main conclusions are derived ;

- 1) Uniform distributions of wave heights and propagating angles are formed in the whole area of the multi-face generation basin except an oblique line from the generator corner.
- 2) Target wave directionality is reproduced in the whole area of the multi-face generation basin.
- 3) Applicability of the multi-face generator is able to be raised by installing a curved part at the corners.

Key Words : Directional random wave, Serpent-type wave generator,
Effective test area, Multi—face wave generator, Directional spectrum

* Senior Research Engineer, Hydraulic Engineering Division

** Wave Laboratory(Trainee,Toyo Corp.),Hydraulic Engineering Division

目 次

要 旨	3
1. は じ め に	7
2. 実 験 の 内 容	7
2.1 マルチ・フェイス多方向不規則波造波装置の概要	7
2.2 計測装置の配置	10
2.3 実験ケース	11
3. 斜め規則波に関する実験の結果	13
3.1 水槽内における波高の分布	13
3.2 水槽内における波向の分布	15
3.3 造波装置の隅角部に消波柱を設置した場合の波高比と波向の分布	18
4. 多方向不規則波に関する実験の結果	18
4.1 水槽中央における波の特性	18
4.2 波特性の空間変化	21
5. 改良型マルチ・フェイス多方向不規則波造波装置の提案	27
5.1 波高分布計算法の妥当性の検討	27
5.2 数値計算による造波機配置条件に対する波高分布特性の検討	31
6. ま と め	34
参 考 文 献	35
主要記号一覧表	36

1. はじめに

近年、防波堤や人工島と言った海洋構造物が沖合いの大水深域に設置されるようになり、その設計においては、波の多方向性を考慮することが必要になってきている。それにともない実験室における平面水槽にも、多方向不規則波が造波できる造波装置が各所に設置されている(平石(1992)、池谷ら(1992)、斎藤ら(1993)、笈田・水口ら(1994)など)。こうした造波機は、その造波動作が大蛇の運動に似ていることから“サーペント型造波装置”と呼ばれ、通常、多数の小型造波機を一直線に配置して作られている(高山・永井, 1984)。

一方、このサーペント型造波装置を用いて、多方向不規則波や斜め規則波を造波した場合、目標とする波浪場が再現できる領域、すなわち有効造波領域は水槽内の一部に限られるという問題がある(Funke and Miles, 1987)。したがって、対象模型はこの有効造波領域内に設置しなければならず、その大きさと配置条件が制限される。また、有効造波領域は対象波浪の主波向によっても、その形状や生じる位置が異なるため、一度模型を設置すると波浪条件が制限されることもある。

こうしたことから、多方向不規則波実験を効率よく行うには、広く安定した有効造波領域を水槽内に再現することが必要である。有効造波領域を拡大するには、造波板数を増加し、造波機の総延長を延ばせばよいが、より広い水槽面積が必要となり、水槽範囲に制限がある場合には実現が困難である。現有の水槽と造波機を用いて有効造波領域を広域化する方法として、造波機の両端に反射壁を設置し、そこからの反射波を利用する方法が提案されている(平石, 1991)。しかしながら、この方法では反射波成分を造波させる造波機のスロークが2倍になり、造波機にかかる負荷が大きくなること、反射壁間でクロスモード波が生じることなどの問題が生じる。また、Darlymple(1989)は、側壁間の重複波モードを応用する造波方法を提案し、一部の水槽で実行されている。しかし、造波機の動作条件が複雑になり、模型からの反射波が生じる場合は対応が困難になる。

一方、模型からの反射波が造波板で再反射され、目標とする波の場が乱されることを防ぐために、造波板の前面に波高計を設置し、水面形を検知しながら造波板の制御を行う‘吸収制御方式’が開発されている(平石ら, 1988)、この吸収制御方式は多方向不規則造波装置へも適用されており、大規模な模型を設置した場合でも、水槽内に再反射波が生起されず、その適用性が高いことが

明らかにされている(平石・鹿島, 1988, 高山ら, 1991)。

そこで、造波機の両端に反射壁の代わりに造波機を配置することにより、コの字型に吸収制御型造波機を設置し、水槽の複数面から波を造波するマルチ・フェイス多方向不規則波造波装置を提案した。

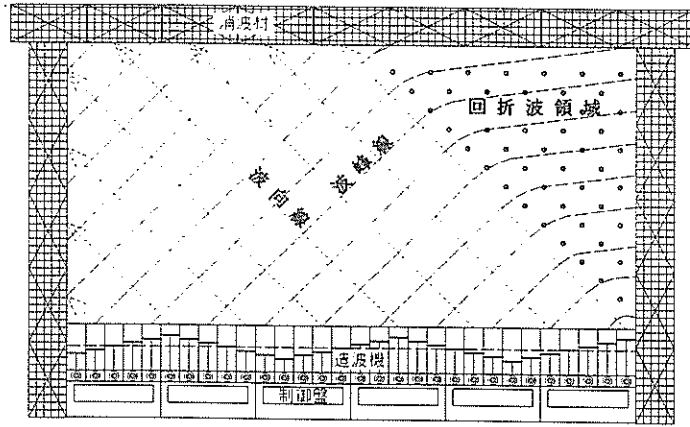
本研究は、斜め規則波および多方向不規則波を用いた水槽実験により、マルチ・フェイス多方向不規則波造波装置の適用性について検討するとともに、数値計算により造波機の配置条件について検討したものである。

2. 実験の内容

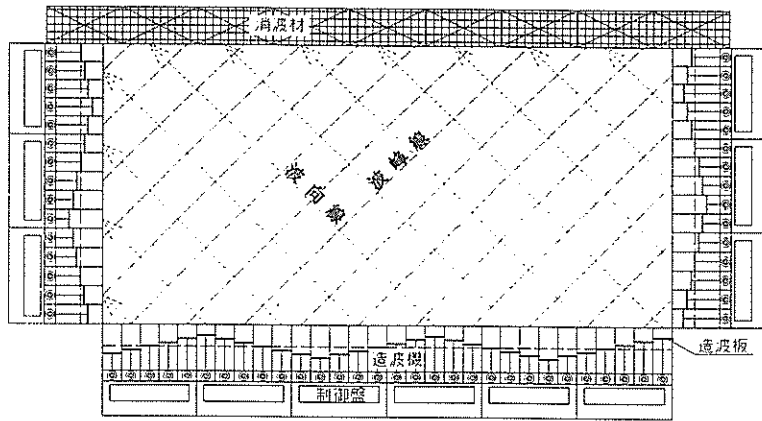
2.1 マルチ・フェイス多方向不規則波造波装置の概要

従来型の造波板を一行に並べた多方向不規則波造波装置で斜め規則波を造波した場合、水槽内に再現される波浪場は図-1(a)に示すように、造波機端から延びる波向線の外側では波が回折と似た振る舞いをし、波高が小さくなる。この波高減衰領域は、一般に回折領域と呼ばれている。この回折領域が存在するため、所定の波高を再現できる有効造波領域は、全水槽の一部に限られる。斜め規則波の重ね合わせである多方向不規則波を造波した場合の有効造波領域は、斜め波の有効造波領域の重ね合わせとして、造波装置前面の比較的狭い領域に三角形の形状をなして形成される。造波装置の全長と水槽面積に対して、このように比較的狭い有効造波領域は、実験を行う際に大きな制約条件となる。この狭い有効造波領域が生じる原因は、造波装置の長さが有限であることと、矩形をした水槽の側面から波が生じていないことである。そこで、図-1(b)のように造波装置を矩形水槽の両側面に配置して造波すれば、水槽全域を有効造波領域に拡張できると考えられる。

図-2は造波機をコの字型に配置したマルチ・フェイス多方向不規則波造波装置の配置状況を示す。造波装置は、1枚の造波板幅が50.0cmであり、それを15枚並べた左側および右側造波装置(延長7.5m)、また30枚並べた沖側造波装置(延長15.0m)の3ブロックから構成される。便宜上、左側、沖側、右側のブロックをそれぞれA, B, Cとする。左側および右側の造波装置(AおよびCブロック)と沖側造波装置(Bブロック)は90°の角度で接して、同一水平床の上に設置されている。水槽の岸側には左側および右側の造波装置端に接して消波材を一行に並べ、15.0m×7.5mの実験領域を形成した。消波材には濾過材として多用されているヘチマロンをステンレス製のかごに入れたものを用いた。実験水槽の座標系は沖側造波機前縁に沿ってx軸、沖側造波機中



(a) 従来型造波装置



(b) マルチ・フェイス造波装置

図-1 斜め規則波の有効造波領域

中央から x 軸に垂直に y 軸を設定する。 x 軸の正方向は図に向かって右側、 y 軸の正方向は岸側である。

沖側造波装置 (Bブロック) の i 番目の造波板に与える造波信号 (造波板の変位 $\eta_i(t)$) は、シングルサンメーション法 (Takayama and Hiraishi, 1989) を用いると次式で与えられる。

$$\eta_i(t) =$$

$$\sum_{n=1}^{N_s} \frac{a_n}{F_n} \sin(2\pi f_n t - (i-0.5) k_n b \cos \theta_n$$

$$+ \epsilon_n) \sin \theta_n \quad (1)$$

ここで、添字の n は n 番目の成分波の値であることを示し、 f_n 、 k_n および θ_n はそれぞれ、 n 番目の成分波の周波数、波数および波向を表す。また、 N_s は成分波の総数、 t は時間、 b は造波板の幅を表し、 $\sin \theta_n$ は斜め波の振幅を目標値と一致させるための係数である。

波数 k_n ($k_n = 2\pi/L_n$; L_n は n 番目の成分波の波長) は、次式で示す分散関係式を満足する実数解として求められる。

マルチ・フェイス多方向不規則波造波装置の適用性について

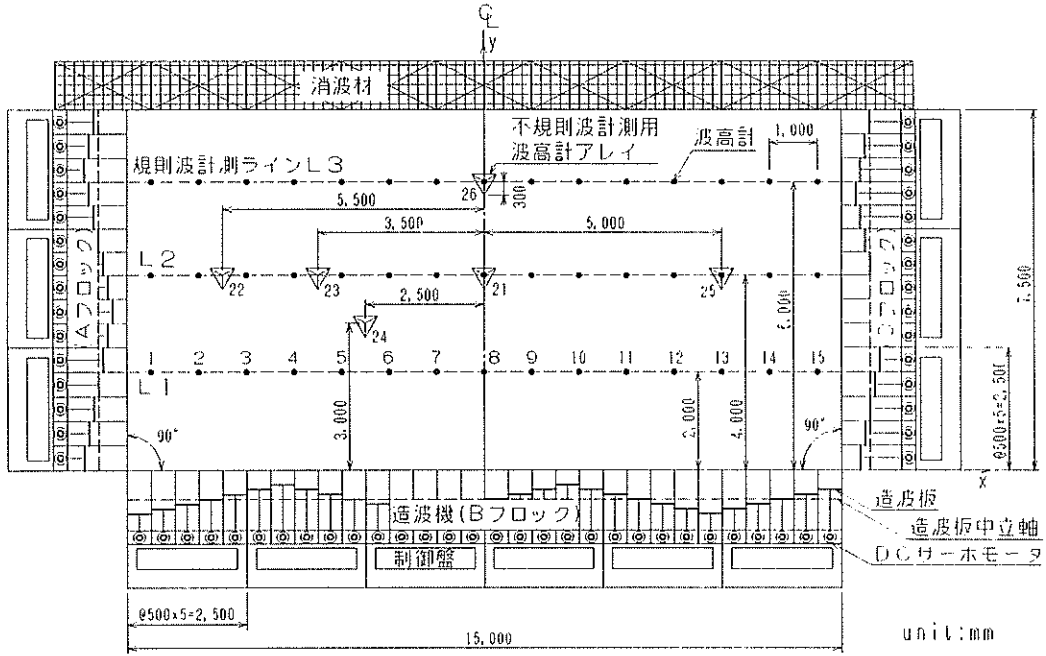


図-2 マルチ・フェイス多方向不規則波造波装置および実験水槽平面図

$$(2\pi f_n)^2 = k_n g \tanh k_n h \quad (2)$$

ここで、 h および g は静水深および重力加速度である。
 n 番目の成分波の振幅 a_n は次式で計算される。

$$a_n = \sqrt{2S(f_n) \delta f_n} \quad (3)$$

ここで、 $S(f_n)$ および δf_n は、それぞれ、周波数スペクトルとスペクトル幅を表す。 n 番目の成分波の代表周波数 f_n はバンド幅 δf_n に含まれる周波数スペクトルの2次のモーメントが等しくなるように決定する(永井, 1972)。周波数スペクトルには、港湾の設計に多く用いられている改良型 Bretschneider-光易型(合田, 1987)を用い、次式で与えられる。

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

ここに、 $H_{1/3}$ および $T_{1/3}$ は有義波の波高および周期を表す。周波数スペクトルに Bretschneider-光易型を用いた場合、代表周波数 f_n は近似的に次式で表される。

$$f_n = (1.007/T_{1/3}) [\ln(2N_s/(2n-1))]^{-1/4} \quad (5)$$

($n=1, 2, 3, \dots, N_s$)

n 番目の成分波の波向 θ_n は、目標とする多方向不規則波の方向分布特性を規定する方向関数 $G(\theta; f)$ を確率密度関数とみなし、0から1の値をとる一様乱数から決定する。図-3は方向関数が周波数に依存しない簡単なケースにおける波向 θ_n の求め方を示した模式図である。図中の γ_n が一様乱数である。方向関数には Mitsuyasu et al. (1975) が現地観測結果から導いた式を合田・鈴木(1975)が改良した次式を用いる。

$$G(\theta; f) = G_0 \cos^{2.5} \left(\frac{\theta}{2} - \frac{\pi}{4} \right) \quad (0 \leq \theta \leq \pi) \quad (6)$$

ここに、 G_0 は正規化のための係数であり、次式で表される。

$$1 / \int_0^{2\pi} G(\theta; f) d\theta = 1 \quad (7)$$

また、パラメータ S は次式に示す周波数の関数である。

$$S = \begin{cases} S_{\max} (f/f_p)^5 & : f \leq f_p \text{ の場合} \\ S_{\max} (f/f_p)^{-2.5} & : f > f_p \text{ の場合} \end{cases} \quad (8)$$

ここで、パラメータ S_{\max} は S のピーク値で、方向集中度パラメータと呼ばれる。

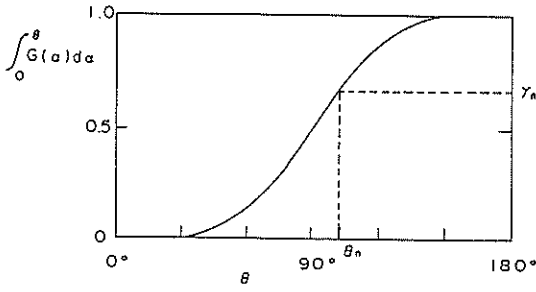


図-3 シングルサンメーション法における波向の決定

なお、式(1)中の F_n は造波機の造波効率であり、ピストン型造波機の場合は次式で表される。

$$F_n = \frac{4 \sinh^2 k_n h}{2 k_n h + \sinh 2 k_n h} \quad (9)$$

ϵ_n は n 番目の成分波の位相差で、0 から 2π の値をとる一様乱数として与えられる。

左側および右側の造波装置 (A および C ブロック) の j 番目の造波板に与える造波信号 (造波板の変位 $\eta_j(t)$) は、まず、これらの造波装置が沖側造波装置の延長線上にあるものとして考え、実際の造波板との 90° の位相差を考慮して与える。いま、沖側および右側造波装置から波向 θ の斜め波を造波する場合を考える。図-4 に示すように沖側造波装置の左端に原点をとり、造波板の中立軸に沿って右向き正に X' 軸、岸向き (図では上方) 正に Y' 軸をとる。沖側造波装置に与える造波信号は、成分波の分割数 N_s を 1 とし、式(1)で与えられる。ここで沖側造波装置の全造波板数は N とする。右側造波装置の j 番目の造波板から生じる波は、 $X' = Nb + \delta b + \{(j-0.5)b + \delta b\} \tan \theta$ および $Y' = 0$ の点 (X'_j とする) で生じた波が伝播したものに相当する。

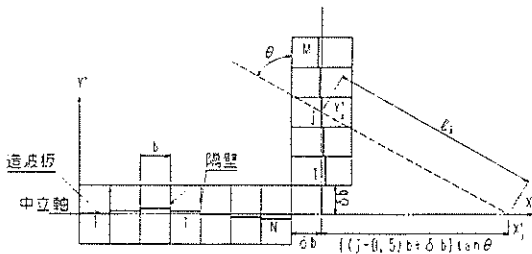


図-4 側面造波機の位相のずれ

ここで、 δb は沖側および右側造波装置の中立軸のずれを表し、中立軸から造波機前縁までの距離に相当する。したがって、 X' 軸上の点で生じた波が右側造波板に達するまでの時間を考慮すれば、式(1)を用いて右側造波装置の造波信号を作成できる。 j 番目の造波板の中点 Y'_j と X'_j との間の距離 l_j は次式で与えられる。

$$l_j = ((j-0.5)b + \delta b) / \cos \theta \quad (10)$$

微小振幅波理論を用い、対象波の波速を c とすると、 X'_j で生じた波が Y'_j に到達するのに要する時間 ϵ_τ は次式で表される。

$$\begin{aligned} \epsilon_\tau &= l_j / c \\ &= \frac{\omega}{g} ((j-0.5)b + \delta b) \frac{1}{\tanh kh} \\ &\quad \times \left(\frac{1}{\cos \theta} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

したがって、 X'_j で生じた波は ϵ_τ 時間後に Y'_j に達するので、 j 番目の造波板に与える信号は ϵ_τ 時間前の X'_j に与えた造波信号に相当する。

よって、右側造波装置の j 番目の造波板に与える造波信号は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \eta_j(t) &= \sum_{n=1}^{N_s} \frac{a_n}{F_n} \sin [2\pi f_n (t - \epsilon_\tau)] \\ &\quad - [(Nb + \delta b + \{(j-0.5)b \\ &\quad + \delta b\}) \tan \theta_n \cdot k_n b \cos \theta_n + \epsilon_n] \sin \theta. \end{aligned} \quad (12)$$

2.2 計測装置の配置

造波装置の配置状況を示した図-2は、計測機器の設置位置も示す。図中の破線は沿岸方向の計測ラインを示し、線上の●は容量式波高計の設置位置を示す。また▽は波高計アレイを示す。

マルチ・フェイス多方向不規則波造波装置の検定実験は斜め規則波および多方向不規則波を対象に行った。斜め規則波に関する実験では、容量式波高計を用いて水位を計測した。計測点は、沖側造波装置前縁から2.0m間隔に3本の沿岸方向計測ラインを設け ($Y=2.0\text{m}$, 4.0m , 6.0m)、各計測ラインの中央 ($X=0.0\text{m}$) から±1.0m間隔で7点ずつ、一つのライン上に計15点を設けた。

また、後述するように斜め規則波を対象とした実験では、波高が局所的に変化し、滑らかな波高分布が得られなかった。これは造波機が有限の長さであるために生じる回折波の影響であると考えられる。寛田・水口ら

(1994)は連続型多方向不規則波造波装置において、端部側の数枚の造波板の振幅を直線的に0まで減衰させることにより、端部での不連続による回折が抑えられて波の場が一様になることを示している。また、Isaacson (1984)は造波機をL字型に配置した場合の隅角部の処理として、消波柱を挟んで造波機を配置することを提案している。そこで、図-5に示すように造波装置の隅角部に消波柱を設置した場合についても実験を行った。消波柱には約50.0cm角のヘチマロン製のブロックを用いた。これにより、隅角部にある造波板1枚ずつの造波能力は低下する。

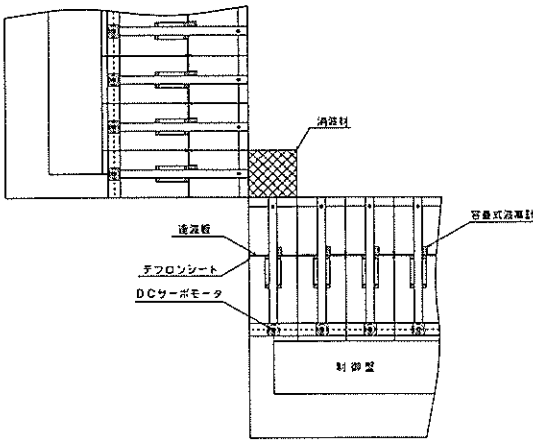


図-5 消波柱の設置状況

多方向不規則波に関する実験では、方向スペクトルを測定するために、容量式波高計4台からなる波高計アレイを用いて水位を計測した。波高計間最小距離 D は合田 (1980) によって、測定対象の最小波長の $1/2$ 以下にするのがよいとされている。水深を 50.0cm とした場合に有義波周期 0.9sec に対する波長は約 125cm になる。このことから波高計間最小距離 D は 30.0cm とした。波高計アレイは、図-2の▽印で示されているように水槽内 6 箇所に設置した。図-6は波高計アレイの構成図を示している。各計測点に設置した波高計アレイの中心位置の水槽座標系における値を表-1に示す。

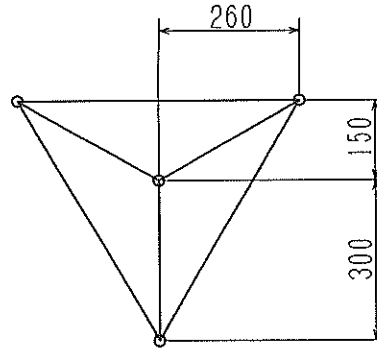


図-6 波高計アレイ

表-1 波高計アレイ設置限界

Point No.	X(m)	Y(m)
21	0.0	4.0
22	-5.5	4.0
23	-3.5	4.0
24	-2.5	3.0
25	5.0	4.0
26	0.0	6.0

2.3 実験ケース

(1) 斜め規則波

波向は y 軸から反時計回りに定義する。したがって、波向 0° は、沖側造波機面に直角で、岸側へ向かう方向に相当する。サーベント型造波装置を用いて、任意水深で斜め波を発生させる場合、造波板一枚の幅が十分小さい場合には、目標とする波とは 90° 異なる方向へ 2 次波が発生する。この 2 次波の発生を防ぐための実用的な条件として、Biesel (1954) は、

$$b/L \leq \frac{1}{\sqrt{2 + \sin \theta}} \quad (13)$$

を提案している。ここに、 b は造波機の幅、 L は波長である。この条件は Biesel limit と言われる。

式(1)あるいは(13)を用いて各造波板に造波信号を与える際、その波向がこの Biesel limit の造波角度限界を越える場合は、その造波信号を 0 として与える。よって、造波信号が 0 である造波板は、造波動作を行わず、反射波の発生を防ぐ吸収動作のみを行う。

実験水槽の水深を 50.0cm と固定し、周期を 0.6~1.0sec とした場合の造波角度限界を式(13)から算定する

表一 2 Biesel limit による造波角度限界

T(sec)	h(cm)	b(cm)	L (cm)	θ (°)
0.60	50.0	50.0	56.15	0.00
0.65			65.89	0.00
0.70			76.39	6.52
0.75			87.60	19.74
0.80			99.46	35.10
0.85			111.87	55.41
0.90			124.71	90.00
0.95			137.84	90.00
1.00			151.16	90.00

と表一2のようになる。表一2より、波向を 30° 以上とするためには周期が 0.8sec 以上でなければならないことがわかる。しかしながらマルチ・フェイス多方向不規則波造波装置の場合、波向を 30° とすると右側造波装置から生じる波は、その造波板の垂線から反時計回りに -60° の波向で伝播しなければならない。この右側造波装置に対する造波角度は、Biesel limit の造波角度限界を越えてしまう。したがって、周期が 0.8sec の場合に 30° の波向を有する斜め波は沖側造波装置からは生じるが、右側造波装置からは生じない。すなわち、この場合の右側造波装置には造波信号として0を与え、吸収動作だけをさせる。また、波向に対して下手側に存在する側方造波装置は、吸収動作だけを行わせた。こうしたことを考慮して、実験ケースは対象波の波高 H を 5.0cm と固定して表一3に示すように定めた。なお、右側、左側両方の側方造波装置が吸収動作のみを行うのは、Case 01~03の3ケースである。波高計による水位計測は造波30秒後から開始し、 20.0Hz で512点のデジタルデータをサンプリングした。したがって、計測時間は 25.6sec になる。

隅角部に消波柱を配置した実験もすべてのケースにつ

表一 3 実験ケース一覧 (斜め規則波)

Case	H(cm)	T(sec)	θ (deg)
01	5.0	0.8	0
02			30
03		0.85	30
04			45
05		0.9	30
06			45
07			60
08		1.0	30
09			45
10			60

いて同一条件で行った。ただし、水位計測は $Y=4.0\text{m}$ の位置に配置した計測ライン上の15点でのみ行った。

(2) 多方向不規則波

多方向不規則波実験ケース一覧を表一4に示す。斜め規則波と同様に水深は 50.0cm とした。対象波の有義波高 $H_{1/3}$ は 5.0cm 、有義波周期 $T_{1/3}$ はBiesel limit による制限がない 0.9sec で一定とし、方向集中度パラメータ S_{max} と主波向 θ_0 を変化させた。方向集中度パラメータは10, 25および75の3種類、主波向は 0° , 30° および 45° の3種類に変化させた。なお、前述したように、主波向はブロックBの沖側の造波機面の法線を 0° として、反時計回りを正とした。周波数スペクトルにはBretschneider-光易型を、方向スペクトルには光易型を用いた。シングルサンメーション法における成分波の分割数は1000とした。なお、不規則波信号作成時に使用する乱数によって発生波がばらつくことを考慮して、1波向について3種類の乱数を使用した。すなわち、1ケースにつき3種類の波群を作用させた。表中の乱数の種値において、 γ_1 および γ_2 はそれぞれ、周波数成分および波向に関するものである。波高計アレイによる水位計測は造波30秒後から開始し、 20.0Hz で2048点のデジタルデータをサンプリングした。したがって、計測時間は 102.4sec になる。

表-4 実験ケース一覧 (多方向不規則波)

Case	$H_{1/3}$ (cm)	$T_{1/3}$ (sec)	S max	θ_s (deg)	乱数の種値	
					γ_1	γ_2
D11	5.0	0.9	10	0	10	50
D12				0	20	70
D13				0	30	80
D21			10	30	10	50
D22				30	20	70
D23				30	30	80
D31			10	45	10	50
D32				45	20	70
D33				45	30	80
D41			25	0	15	55
D42				0	18	24
D43				0	19	31
D51			25	30	24	33
D52				30	40	60
D53				30	50	75
D61			25	45	10	50
D62				45	20	70
D63				45	30	80
D71			75	0	1	5
D72				0	2	8
D73				0	3	9
D81			75	30	13	91
D82				30	21	81
D83				30	11	57
D91			75	45	15	55
D92				45	18	24
D93				45	19	31

3. 斜め規則波に関する実験の結果

3.1 水槽内における波高の分布

(1) 沿岸方向波高比分布

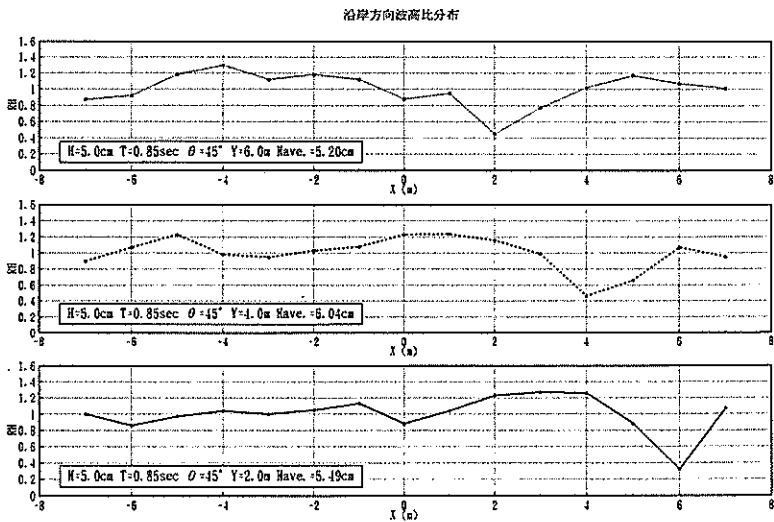
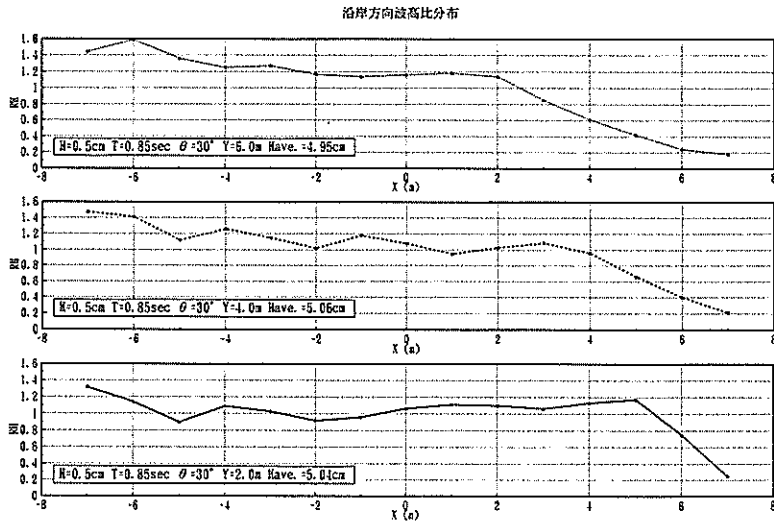
各実験ケースにおいて、沖側造波装置前縁から2.0m 間隔に3本設けた計測ライン(Y=2.0m, 4.0m, 6.0m) 上の沿岸方向波高比分布を調べた。図-7~8は、それぞれ Biesel limit により造波できないために右側造波装置が吸収動作のみ行う場合 (Case03), およびマルチ・フェイス造波を行う場合 (Case04) の沿岸方向波高比分布を示す。したがって、図-7が従来型の造波法による結果、図-8が今回開発したマルチフェイス造波法による結果に相当する。各図において3枚のグラフはそれぞれ、上から Y=6.0m, Y=4.0m および Y=2.0m の沿岸方向計測ライン上における波高比分布を示す。なお、波高比は次式で求められるように、各計

測点で得た波高を、各計測ラインの平均波高 (15計測点の平均波高) で除した値である。

$$RH = H_i / (1/15 \times \sum_{i=1}^{15} H_i) \quad (14)$$

ここで、添字のiは各計測ライン上の測点の番号である。したがって、各計測ラインで分母の値が異なる。各計測ラインの平均波高は図中に H_m で表している。

右側造波装置が吸収動作のみを行い、造波をしないときの Case03 ($H=5.0$ cm, $T=0.85$ sec, $\theta=30^\circ$) における沿岸方向波高比分布を示した図-7によれば、右側造波装置から波が生じていないため、各計測ラインの波高比が右端で右下がりに低下しており、回折波のみが存在し、波高が大きく低下する '回折波領域' が確認できる。この回折波領域は、Y=6.0m の計測ライン上では X=2.0m より右側に存在しており、この範囲は水



槽幅の1/3を占めている。

マルチ・フェイス造波を行った Case04 ($H=5.0\text{cm}$, $T=0.85\text{sec}$, $\theta=45^\circ$) に関する沿岸方向波高比分布を示した図-8において特徴的なのは、 $\theta=30^\circ$ (Case03) の図-7と異なり $X=7.0\text{m}$ 付近の右側造波装置前面でも1.0程度の波高比が得られていることである。これは造波信号通りに右側造波装置からも波が生じているためである。各計測ラインの波高比を比較すると、 $Y=2.0\text{m}$ ラインにおいては平均波高は5.49cmで

あり、波高比は右端の $X=7.0\text{m}$ で1.1程度であるが、 $X=6.0\text{m}$ では0.3程度と極端に小さい。 $X=1.0\text{m}$ よりも左側では多少の変動を伴うものの1.0付近に分布している。 $Y=4.0\text{m}$ ラインでは、平均波高は6.04cmであり、波高比は $X=4.0\text{m}$ で0.5程度と小さくなる。そのほかの計測点では0.9~1.2付近に滑らかに分布している。 $Y=6.0\text{m}$ ラインにおける平均波高は5.20cmであり、波高比は $X=2.0\text{m}$ で0.5程度と極端に小さく、その他の計測点では、1.0に比較的近い。

このように、右側造波装置が造波を行わない場合には、実験水槽右上の三角形領域に回折波領域ができており、波高が比較的小さくなる。これに対し、右側造波装置が造波動作を行った場合 (Case04～Case10) には回折波のみが存在するような領域が現れない。しかしながら、各計測ラインで極端に波高比が小さくなる計測点が、比較的右側造波装置に近いところで存在している。こうした計測点は沖側造波装置に近いほど右側にあり、また、波向が 0° に近いほど右側に存在している。マルチ・フェイス多方向不規則波造波装置が再現する斜め規則波波場は、2つの造波装置ブロックそれぞれから生じる斜め波の重ね合わせで形成される。すなわち、波向を 0° から 90° の間とした場合は、沖側造波装置から生じた波と、右側造波装置から生じた波が重なって波場を形成する。各造波装置から生じた波は、それぞれ目標波高が再現できない回折波領域を有している。したがって、2つの回折波領域が重なり合う領域が存在するものと考えられる。この回折波同士の重なり合う領域では、波高は目標とするものより小さくなるのが考えられ、前述した極端に波高比が小さくなる点が生じる。なお、この回折波が重なる低波高領域は、2つの造波装置ブロックが接する角から水槽中央部に向かって斜めに延びる波向線の周りに生じると考えられる。この波高減衰点を結ぶ斜めのラインを“波高減衰斜めライン”とする。

また、図-7の $Y=0.6\text{m}$ ライン等において、各計測ラインの左側で波高比が大きくなっているのは、左側造波装置からの反射波の影響であると思われる。波向を 0° から 90° の間とした場合、波を発生させない左側造波装置は吸収動作のみを行い、反射波の発生を防いでいるが、吸収制御は造波板面に対して直交する波を対象としており、面に斜めから侵入する波に対しては吸収制御の効率が低下するためである。また、本造波装置は造波板間に側壁を有する構造になっている。したがって、以下の点も原因として考えられる。すなわち、反射波の影響が顕著な波向が 30° の場合は、左側造波装置の造波板に対し、波は 60° といった大きな角度で進入してくる。このような場合、伝播してきた波の多くは造波板に当たる前に造波板間に設けられた隔壁に当たる。したがって、波は隔壁と造波板で区切られた小さな矩形領域内で多重反射を起こしており、その結果、造波装置による吸収能力が低下する。

(2) 岸沖方向波高分布

図-9は、マルチフェイス造波法による岸沖方向の波高分布を示す。図中には、岸沖方向15計測ラインの内、 $X=-7.0\text{m}$ (最も左側)、 -3.0m 、 0.0m (中央)、 3.0

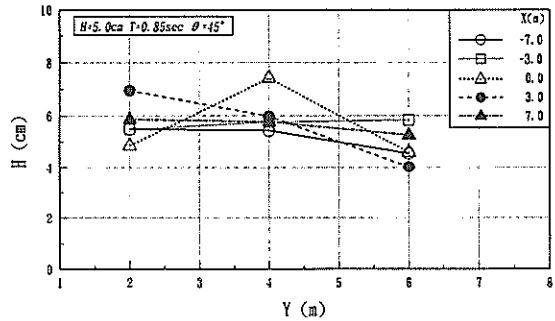


図-9 岸沖方向波高分布 (Case04; $H=5.0\text{cm}$
 $T=0.85\text{sec}$ $\theta=45^\circ$)

m 、 7.0m (最も右側) の5計測ラインについて波高分布を示してある。各図において○、□、△、●および▲が、それぞれ、 $X=-7.0\text{m}$ 、 -3.0m 、 0.0m 、 3.0m および 7.0m における波高を示す。

図に示すように $X=3.0\text{m}$ における波高は、 $Y=2.0\text{m}$ で約 7.0cm 、 $Y=6.0\text{m}$ で約 4.0cm と岸沖方向に大きな変化がみられる。これは、波高減衰斜めライン上で波高が小さくなる影響と考えられる。また、 $X=0.0\text{m}$ 、 $Y=4.0\text{m}$ における波高は約 7.4cm と極端に大きい。ただし、その他の計測点での波高は、 4.0cm ～ 6.0cm の間に分布し、岸沖方向に大きな変化はない。マルチ・フェイス造波を行った他の実験ケースにおいても、この場合と同様に岸沖方向の波高分布にはややばらつきが存在している。

3.2 水槽内における波向の分布

各実験ケースにおいて、沖側造波装置前縁から 2.0m 間隔に3本設けた計測ライン ($Y=2.0\text{m}$ 、 4.0m 、 6.0m) 上の沿岸方向の波向分布を検討した。図-10～11は、Case03およびCase04における沿岸方向波向分布を示す。各図において3枚のグラフはそれぞれ、上から $Y=6.0\text{m}$ 、 $Y=4.0\text{m}$ および $Y=2.0\text{m}$ の計測ラインを示す。波向は、まず各計測点の時系列水面変動量からゼロ・アップ・クロスする点の時刻を求め、隣合う2計測点で同一波の位相差 τ を算定する。これより、個々の波向を次式で算定し、測定時間中に計測した波の数で平均した値を、2計測点の中間点における波向 θ として採用した。

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{\tau}{T} \cdot \frac{L}{D} \right) \quad (15)$$

ここに、 T は進行波の周期、 L は T と水深 h から求まる波長、 D は x 軸方向の計測点間隔である。なお、各図において波向をプロットしてある位置は、波向の定義

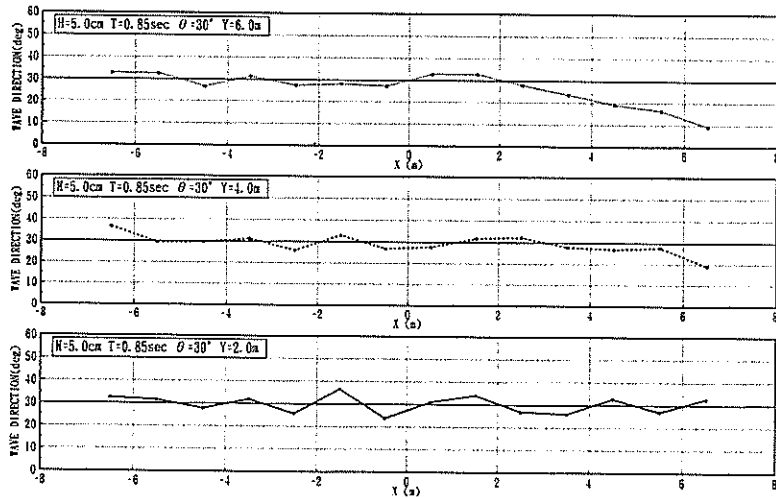


図-10 沿岸方向波高分布 (Case03 ; $H=5.0\text{cm}$ $T=0.85\text{sec}$ $\theta=30^\circ$)

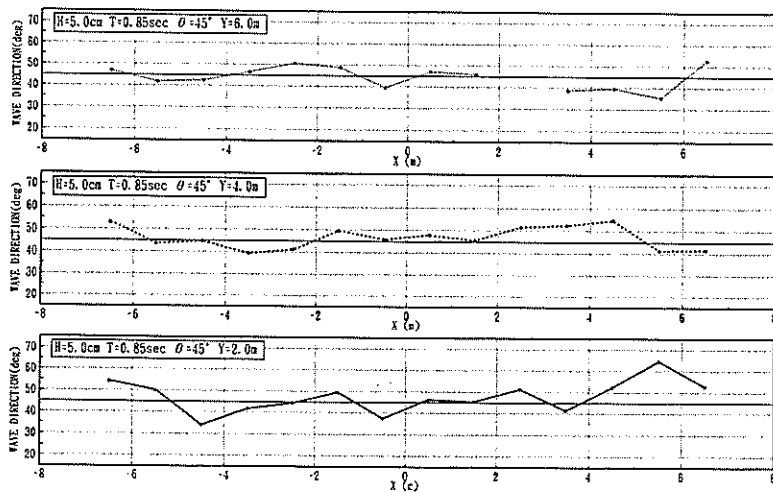


図-11 沿岸方向波高分布 (Case04 ; $H=5.0\text{cm}$ $T=0.85\text{sec}$ $\theta=45^\circ$)

から2計測点の中点である。たとえば、 $X=0.0\text{m}$ と 1.0m における計測点から得た波向は $X=0.5\text{m}$ にプロットしてある。ただし、波向を算定する際、波面の分裂などにより波長がばらついたため、式(9)が発散した点が多くあった。図中、こうした点は空白としている。

従来型の造波方法に相当する Case03 ($H=5.0\text{cm}$, $T=0.85\text{sec}$, $\theta=30^\circ$)に関する沿岸方向波向分布を示した図-10によれば、 $Y=2.0\text{m}$ の場合、 $X=0.0\text{m}$ から -3.0m の間に波向が大きく変動しており、その最大値は 36.6° 、最小値は 23.8° である。その他の点の波向も多少変化しているものの、その値は比較的 30° に近

い。 $Y=4.0\text{m}$ および $Y=6.0\text{m}$ の沿岸方向計測ラインでは、全体的に目標値である 30° の付近に分布している。また、各ラインの右端では回折波領域に含まれるため、波向が目標値より小さくなり、一致しない。回折波領域以外の区域では、波向は目標値 $\pm 5^\circ$ 程度に一定している。

マルチ・フェイス造波を行った Case04 ($H=5.0\text{cm}$, $T=0.85\text{sec}$, $\theta=45^\circ$)に関する沿岸方向波向分布を示した図-11によれば、 $Y=2.0\text{m}$ の場合、 $X=5.0\text{m}$ と 6.0m における計測点間で算定された波向が 64.6° とかなり大きく、その周辺の値も変化が大きい

マルチ・フェイス多方向不規則波造波装置の適用性について

が特徴的である。この $X=4.0\text{m} \sim 7.0\text{m}$ にかけては、沿岸方向波高比は1.2程度から0.3程度まで大きく変化しており、こうした波高比の急激な変化が波向にも影響しているものと考えられる。その他の点における波向も 45° の付近に多く分布しているが、ばらつきがやや大きい。 $Y=4.0\text{m}$ の場合、多くの点で $45^\circ \pm 5^\circ$ の範囲に分布している。しかしながら、沿岸方向波高比分布が比較的大きく変化している $X=3.0\text{m} \sim 6.0\text{m}$ の間では、波向が目標値である 45° から 10° 程度はずれている。 $Y=6.0\text{m}$ の場合では、波向は多くの点で $45^\circ \pm 5^\circ$ の範囲に分布しており、再現性が比較的高くなっている。マルチフェイス造波法を用いると、回折波領域において波向が大きく目標値からずれる現象を防ぎ、水槽内のほぼ全域で、目標値に近い波向を再現することができる。

次に、全ての計測点における波高と波向を平面的に示して再現された波浪場を検討する。図-12は、マルチフェイス造波法で波向 45° の斜め波を造波した場合の波高と波向の平面分布を示す。図中、矢印の始点が計測点を示し、その下の数値がその点における平均波高である。また、矢印はその両隣の計測点から得た平均波向の方向を示している。図の右下の隅角部から波向と同じ角度で左上がりに延びる破線は、沖側造波機から生じた波と右側造波機から生じた波が接する線を表し、左下の隅角部から右上がりに波向にマイナスをつけた負の角度で延びる破線は、左側造波機からの反射波の影響領域の境界を示す。

図に示されるように Case 4 ($H=5.0\text{cm}$, $T=0.85\text{sec}$, $\theta=45^\circ$) の波高分布においては 3.0cm 以下の低波高が右下の隅角部から左上に延ばした破線で表示した波向線周辺に分布している(“波高減衰斜めライン”)。これは、沿岸方向波高比分布の項で述べたように、沖側および右側造波装置から生じた進行波それぞれの回折波領域が重なった領域に当たる。この“波高減衰斜めライン”付近を除けば、水槽内に波高が極端に低い領域は存在しない。ただし、水槽中央部付近には、 7.0cm を越える高波高域が存在している。

このようにマルチ・フェイス造波を行った場合の波浪場には、水槽右下の隅角部から左上に延びた“波高減衰斜めライン”が確認できる。また、実験ケースによりばらつきがあるものの、局所的に高波高域が存在する場合がある。波向分布に関しては、いずれの実験ケースにおいても水槽全域でほぼ目標とする波向が得られている。したがって、マルチ・フェイス造波法は従来型の造波法に比べ、広い範囲に目標とする波浪場を形成できるものの、“波高減衰斜めライン”上において目標波より低い波高分布となることが特徴である。このような波高減衰ラインが生じる理由として以下のことが考えられる。すなわち、2つの造波装置ブロックが接合する隅角部において波を発生する板が得られないため、隅角部から波向に沿って引いたライン上で波高が減衰する。また、本造波装置は隔壁式で、各造波板の両側に全長 1m の壁面を有している。そのため、隅角部においては、壁面が障

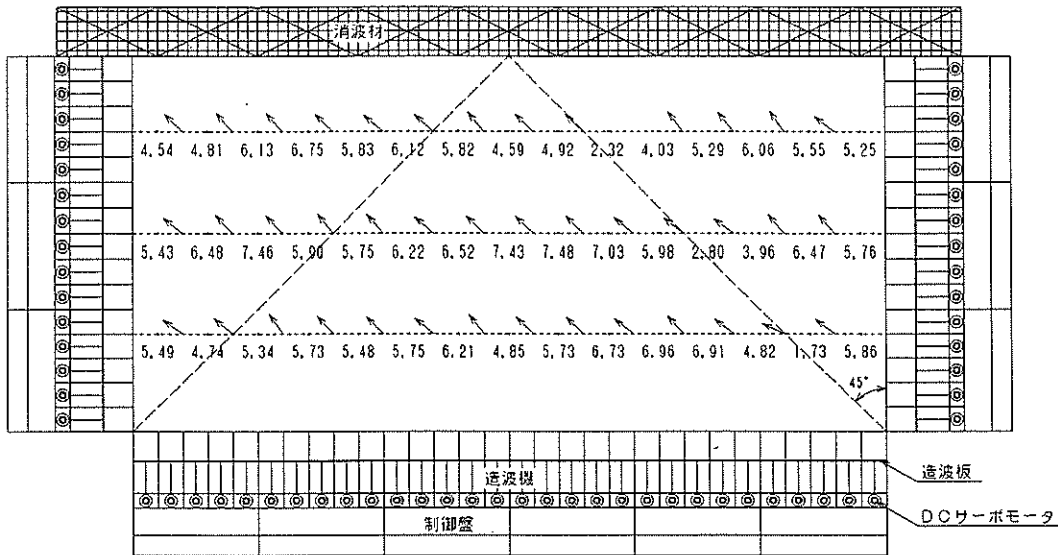


図-12 波高と波向の平面分布 (Case 04; $H=5.0\text{cm}$ $T=0.85\text{sec}$ $\theta=45^\circ$)

害となり、中立軸に位置する造波機同士を接することができない。図-4に示したように、中立線と中立線の交点から、造波板は δ すなわち50cm 離れることになる。マルチ・フェイス造波装置の隅角部に生じる、2つの造波装置ブロックの中立軸間の隙間は比較的大きく、その影響が水槽中央部へも伝播するものと考えられる。

3. 3 造波装置の隅角部に消波柱を設置した場合の波高比と波向の分布

隅角部からの波高減衰斜めラインの影響を低減させるために、隅角部に消波柱を設置した。

図-13は、Case04において造波装置の隅角部に消波柱を設置した場合の波高比と波向の沿岸方向分布を示す。波高比と波向は、沖側造波装置前縁から4.0mの位置に設置した計測ラインにおいて計測したものである。図において、(a)が波高比分布、(b)が波向の分布である。図中には消波柱が無い場合も示してあり、実線に○が消波柱が無い場合、破線に●が消波柱が有る場合を示している。なお、波高比 RH および波向は式(14)および(15)で算定したものである。したがって、波高比の算定において分母である計測ライン全体の平均波高が消波柱の有無により異なる。計測ライン全体の平均波高は H_{ave} として図中に示している。

波高比について示した(a)によれば、消波柱が無い場合と有る場合の平均波高は6.0cm 程度でほぼ同一の値を示している。また、その分布形も比較的似ており、消波柱設置の影響は小さい。波向分布を示した(b)では、消波柱が有る場合に波向の局所の変化が大きい。また、最大値および最小値の絶対値が、消波柱が無い場合のそれらより大きく、目標値である 45° から $\pm 15^\circ$ 近く差がある。したがって、消波柱を設置することによって、波

向は目標値よりやや大きくずれるようになる。

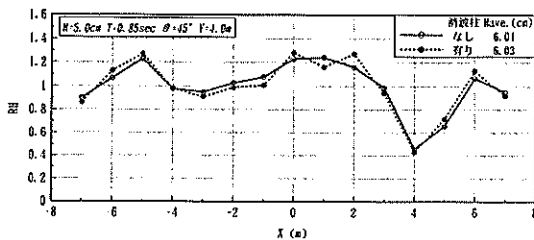
このように、波高比および波向の沿岸方向分布において、消波柱を設置することによる大きな改善点は見られない。マルチ・フェイス造波によって生じる波高減衰ライン上の波高は消波柱を設置しても増加することなく、消波柱の効果は見られなかった。

以上をまとめると、以下のことが言える；マルチ・フェイス造波法によって再現した斜め規則波波場場には、従来型造波法によってみられた波高が減衰する広範囲な回折波領域が現れない。ただし、“波高減衰斜めライン”や、局所的な高波高域が存在し、局所的に目標波高が再現できない点が生じる。これは、造波装置の隅角部に消波柱を設置した場合でも改善されなかった。波向については水槽全域でほぼ目標値を再現できる。なお、1つの峰線が短い切れ波である多方向不規則波を造波させる場合には、こうした局所的な波高のばらつきが軽減され、広範囲な有効造波領域が確保できるものと考えられるので、次に多方向波を用いて有効造波領域の検討を行う。

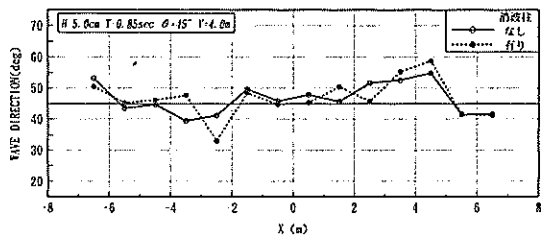
4. 多方向不規則波に関する実験の結果

4. 1 水槽中央における波の特性

多方向不規則波の有効造波領域は、成分波の有効造波領域の重ね合わせとして表すことができる。たとえば、主波向が 0° の場合には、成分波としては少なくとも $-45^\circ \sim +45^\circ$ の範囲が必要であり、有効造波領域の範囲は -45° と $+45^\circ$ の波向の成分波の有効造波領域から決定される。図-14は、主波向 0° の多方向不規則波を造波する場合の、従来型造波装置の有効造波領域を示す(平石, 1994)。主波向が 0° より離れると、従来型の有効造波領域は図より狭くなる。主波向が 45° の場合には、



(a) 波高比分布



(b) 波向分布

図-13 消波柱を設置した場合の沿岸方向波高比・波向分布

(Case04; $H=5.0\text{cm}$ $T=0.85\text{sec}$ $\theta=45^\circ$ $Y=4.0\text{m}$)

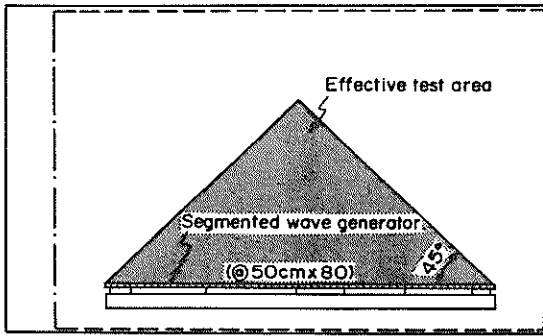


図-14 従来型造波機の多方向不規則波に対する有効造波領域

+90°の成分波が必要になるが、この方向の成分波は従来型では造波できないので、従来型では、主波向45°のような斜め方向へ主波向を有する多方向不規則波が造波できない。マルチフェイス造波法を用いると、右側あるいは左側から角度の大きい成分波が造波できるので、多方向不規則波造波における主波向の制限が緩和され、水槽全域で任意の方向の主波向を有する多方向不規則波が造波できると思われる。そこで、以下において、マルチフェイス造波機で造波された多方向不規則波の特性を検討する。

(1) 周波数スペクトルの変化

各実験ケースにおいて、水槽内の6箇所に設置した波高計アレイで得た時系列水面変動量から、周波数スペクトルを求めた。ただし、波高計アレイは4本の容量式波高計を有しているもので、それぞれについて周波数スペクトルを求め、それらを平均したものをアレイの中心位置における周波数スペクトルとした。周波数スペクトルの計算にはFFT法を用い、平滑化関数としては三角フィルターを使用した。

図-15にマルチフェイス造波法によって再現した実験ケースの内、 $\theta = 45^\circ$ の場合において、水槽のほぼ中央に位置するpoint21 ($X=0.0\text{m}$, $Y=4.0\text{m}$)における周波数スペクトルを示す。各実験ケースには同一波浪条件で乱数列の種類が異なる3ケースがあるが、ここではその内の1ケースについて示してある。図中の実線は実験結果、破線は目標周波数スペクトルを示す。なお、図中の γ_1 および γ_2 は、それぞれ、成分波の位相および波向を決定する乱数列を発生させるときに用いる初期のシード値を示す。

有義波高、有義波周期および主波向はそれぞれ $H_{1/3}=5.0\text{cm}$, $T_{1/3}=0.9\text{sec}$, $\theta_a=45^\circ$ であり、(a)

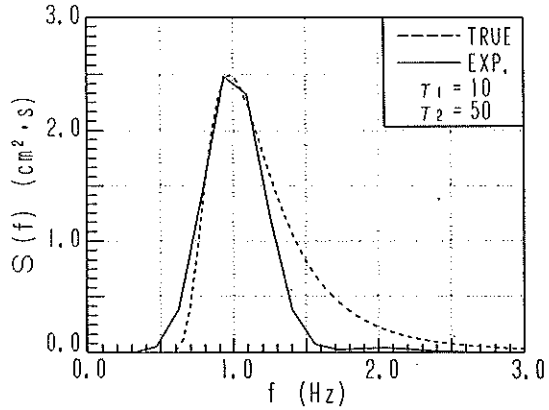


図-15(a) 周波数スペクトル

(Case D31; $\theta_a=45^\circ$, $S_{\max}=10$, $\gamma_1=10$, $\gamma_2=50$, point21)

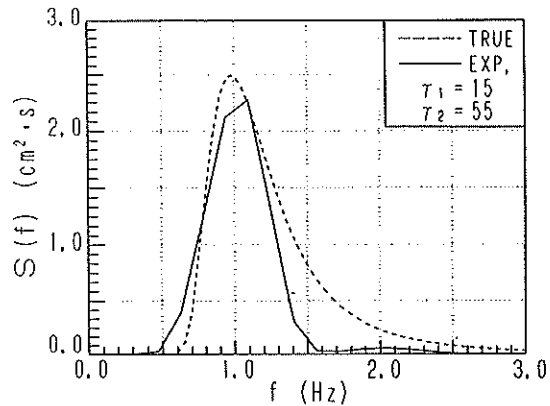


図-15(b) 周波数スペクトル

(Case D71; $\theta_a=0^\circ$, $S_{\max}=75$, $\gamma_1=1$, $\gamma_2=5$, point21)

が目標方向集中度 $S_{\max}=10$, (b)が $S_{\max}=75$ に相当する。(a)では、全体としてスペクトル形は実験値と目標値ではよく一致し、ピーク周波数周辺の周波数スペクトルは、目標スペクトルをよく再現している。ただし、 $f > 1.5\text{Hz}$ 以上の高周波数領域では実験値が目標値より小さくなっている。これは、高周波数の信号に対して、造波機の駆動モーターの追従性が悪くなるためで、マルチフェイス造波法の特徴ではなく、造波装置一般の問題点と考えることができる。図-15(b)の $S_{\max}=75$ は、方向集中度が高く、単一方向波の特性に近い波を造波したケースである。この図においても、ピーク周波数付近では、実

験値と目標値はよく一致しており、マルチフェイス造波法においても、従来型と同様に目標とする周波数スペクトルを有する波が再現できることがわかる。

(2) 方向スペクトルの変化

(i) 解析手法の違いによる方向スペクトルの変化

各実験ケースにおいて、波高計アレイを設置した点における方向スペクトルを求めた。方向スペクトルの解析手法はいくつか提案されているが、ここでは比較のために、Capon (1969) による最尤法 (以下, MLM) と最も精度が高いとされる橋本ら (1993) による拡張最大エントロピー原理法 (以下, EMEP) を使用した。

図-16は、マルチフェイス造波法によって主波向が45°の多方向不規則波を起こした場合の方向スペクトル

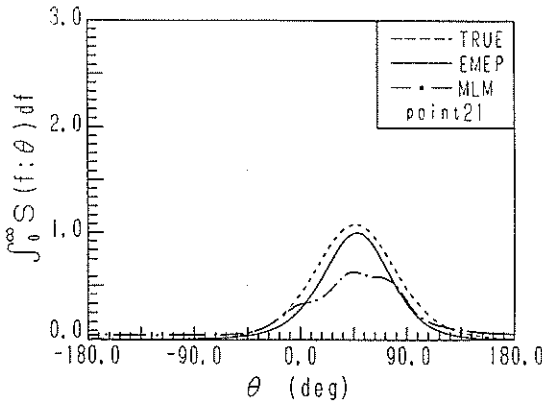


図-16 波エネルギー方向分布

(Case D31; $\theta_a = 45^\circ$, $S_{max} = 10$, $\gamma_1 = 10$, $\gamma_2 = 50$, point21)

解析結果を、波エネルギーの方向分布として示したものである。波エネルギーの方向分布は、波のエネルギーを各波向毎に周波数方向へ積分したもので、各波向方向へのエネルギーのばらつきを表し、次式で計算できる。

$$G(\theta) = \int_0^\infty S(f; \theta) df \quad (16)$$

図中の破線、実線および一点鎖線はそれぞれ目標値、EMEPによる解析値およびMLMによる解析値を示す。今回のマルチフェイス造波法においては、EMEPで解析した実験値は、目標値とよく一致し、所定の多方向性を有する波が再現されていることがわかる。MLMで解析した実験値の分布形は、ピークの波向はほぼ目標値と一致するものの、エネルギーレベルが一致せず、ピークの低いなだらかな分布を示す。他の実験ケースにおいては、MLMの解析結果は双山型のピークを有するものも生じた。したがって、アレイデータの解析方法としては、EMEPの方が優れており、以下の解析においては、EMEPを用いる。

(ii) 水槽中央部における方向スペクトルの特性

図-17は、主波向0°の場合の水槽中央部における方向スペクトルの解析結果を示したものである。主波向が0°の場合には、point 21および26は、従来型造波装置の場合でも有効造波領域に含まれている。したがって、シングルサンメーション方式で成分波数を500以上にすれば、目標値として造波信号で入力した方向分布特性が精度よく再現できることが明らかになっている (Takayama and Hiraishi, 1989)。図に示すように、光易型方向関数を有する多方向波の方向スペクトルのコンター図は、中央がくびれたが分布を示すのが特徴であ

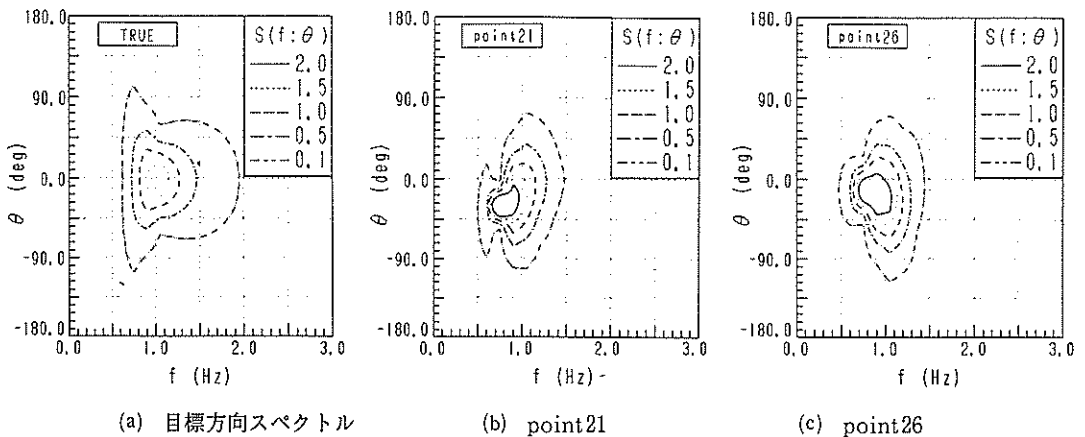


図-17 造波された波の方向スペクトル (Case D11; $\theta_a = 0^\circ$, $S_{max} = 10$, $\gamma_1 = 10$, $\gamma_2 = 50$)

る。point21およびpoint26の実験波の方向スペクトル分布も中央部が少しくびれた分布を示し、目標値の特性をよく再現している。主波向が45°の場合には、主波向方向の成分波が限界波向となり、それより大きい波向を有する成分波を従来型では造波できない。マルチフェイス造波法においては、角度の大きい成分波は主に右側の造波機ブロックで造波することができるので、主波向の範囲の制限を取り外すことができる。図-18は、主波向が45°の場合の水槽中央部における方向スペクトルの解析結果を示す。目標分布が有する中央部のくびれは、point21の実験値ではよく再現できている。point26の実験値はくびれ方が小さく、低周波数側のエネルギーの広がりが目標値よりやや小さい。最もエネルギーレベルの高いピークの値は、目標値では1.5~2.0である。実験値でも1.5~2.0であり、ピークの高さはよく再現できている。実験値のピークの波向は両測点で45°であり目標値と一致する。したがって、マルチフェイス造波法を用いると、従来型造波装置では不可能であった主波向45°の多方向不規則波を再現することができる。

方向スペクトルの解析においては、方向スペクトルの全体的な方向分布だけでなく、各周波数毎の方向関数の分布形が議論される場合が多い(平石, 1992)。図-19は、主波向45°のケースにおけるピーク周波数近傍の周波数における方向関数の分布形を示したものである。図の(a)および(b)はそれぞれ主波向0°および45°の場合を示す。主波向が0°の場合は、目標値と実験値は $f=0.78$ および 0.94 Hz でよく一致し、非常に精度の高い再現ができています。ピーク周波数である $f=1.09\text{ Hz}$ では、実験値のピークは目標値よりやや低下する。しかし、ピーク

ク波向は一致しており、ほぼ目標値を再現できたものとみなすことができる。(b)の主波向が45°のケースでは、ピーク周波数 $f_p=0.94\text{ Hz}$ において目標値と実験値はよく一致する。ピーク周波数より高周波数側では、実験値のピークの高さは、目標値よりやや低くなっているものの、ピーク波向のずれはなく、45°方向へ主たるエネルギーが伝播されている。以上のことから、マルチフェイス造波法を用いると、方向関数のレベルの議論においても、実験値と目標値はほぼ一致し、主波向が45°の場合でも目標とする多方向不規則波が再現されていることがわかる。

4.2 波特性の空間変化

(1) 周波数および方向スペクトルの空間的な分布

次に、従来型の有効造波領域に含まれない水域における波の再現性を検討した。図-20は、主波向45°のケースにおける水槽内の全測点における周波数スペクトルの分布を示したものである。点線が造波の目標値、破線が実験値を示す。計測点の位置は、図-2に示すpoint21~26の6点である。図-20では、各地点のスペクトル図を各測点の位置で示しているが、point22は、測点位置よりやや左上の位置にスペクトル図が示されている。各スペクトルにおいて、ピーク周波数は実験値と目標値ではよく一致する。また、ピークのエネルギー密度は、point26でやや実験値が低下しているものの、他の測点ではよく一致している。 $f > 1.5\text{ Hz}$ の高周波数側で実験値が目標値より低下しているのは、造波機のモーターの駆動信号に対する応答性が低下するためである。このように、マルチフェイス造波法を用いると従来型では造波できなかった主波向45°の多方向不規則波の場合でも、

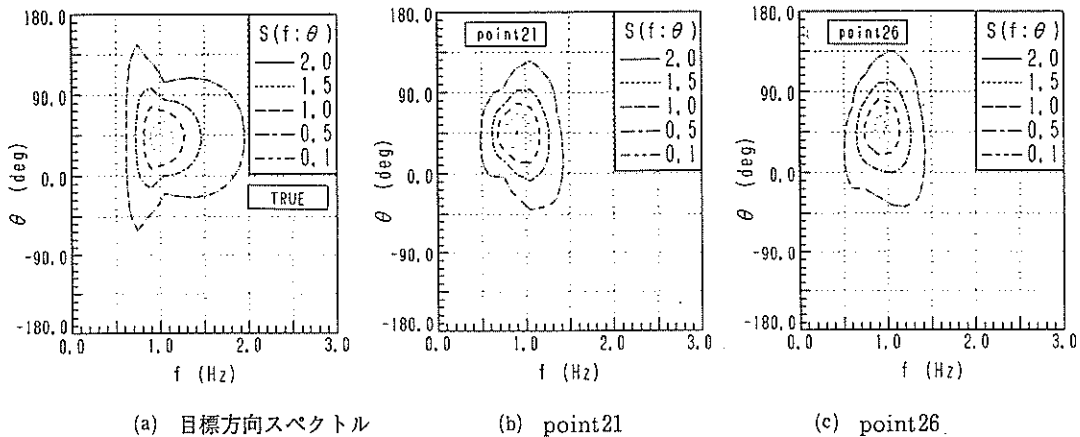
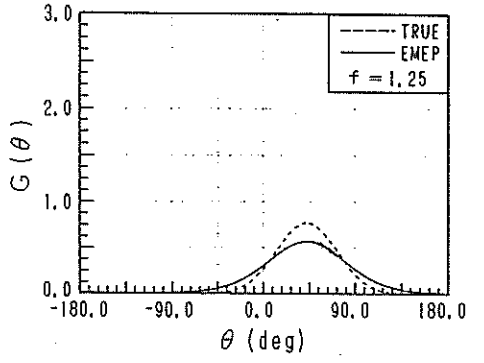
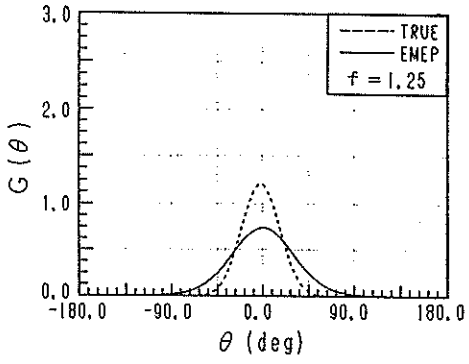
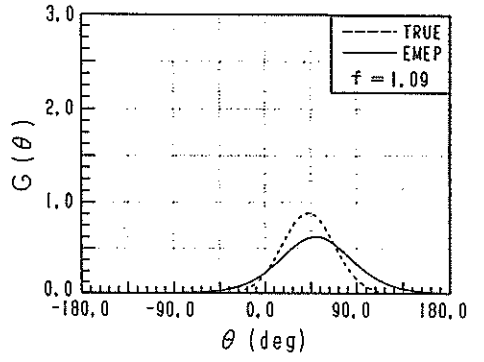
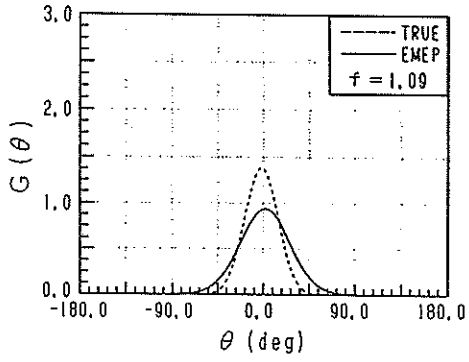
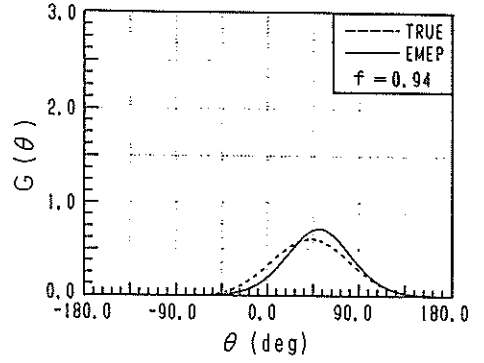
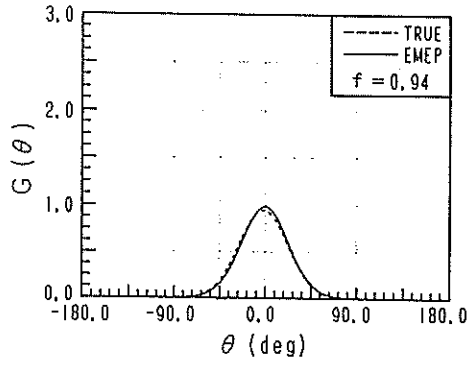
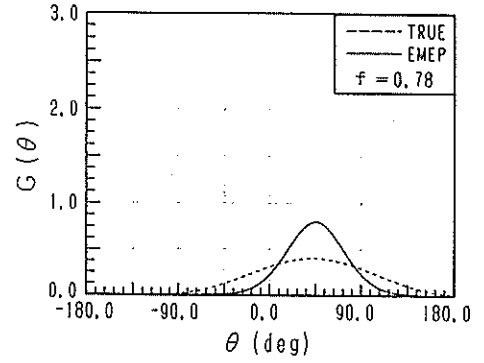
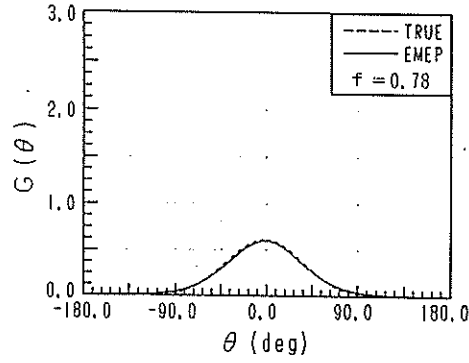


図-18 造波された波の方向スペクトル (Case D31; $\theta_a = 45^\circ$, $S_{max} = 10$, $\gamma_1 = 10$, $\gamma_2 = 50$)



point26 (fp=1.09Hz)

point26 (fp=0.94Hz)

図-19(a) ピーク周波数周辺の方向関数 (Case D42 ; $\theta_a=0^\circ$ $S_{max}=25$ $\gamma_1=18$, $\gamma_2=24$)

図-19(b) ピーク周波数周辺の方向関数 (Case D31 ; $\theta_a=45^\circ$ $S_{max}=10$ $\gamma_1=10$, $\gamma_2=50$)

マルチ・フェイス多方向不規則波造波装置の適用性について

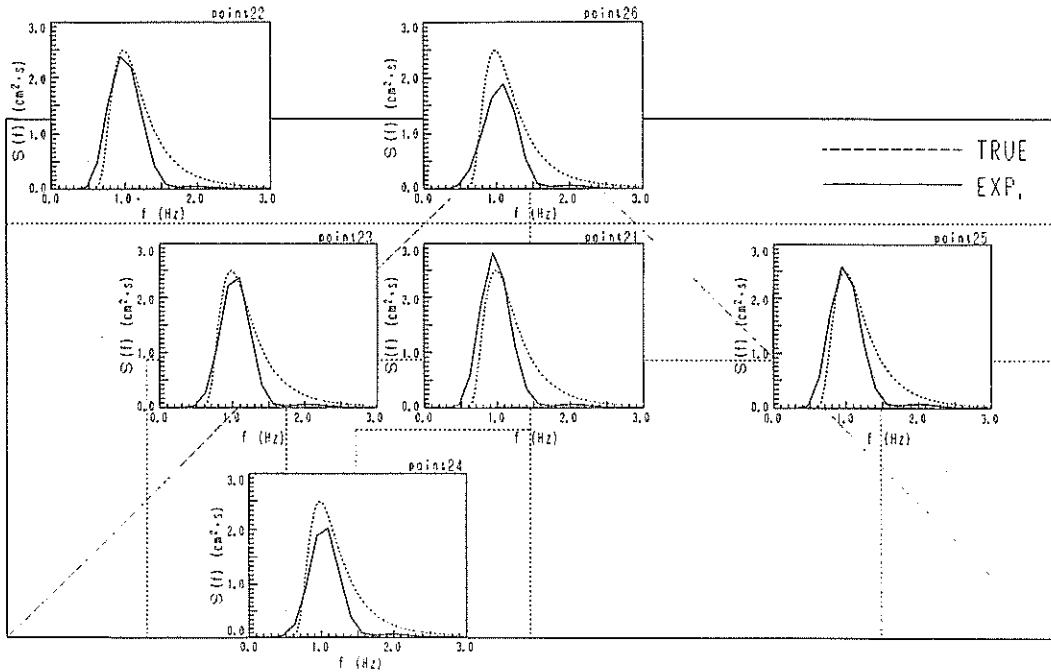


図-20 周波数スペクトルに基づく有効造波領域
(Case D61; $\theta_a = 45^\circ$, $S_{max} = 25$, $\gamma_1 = 10$, $\gamma_2 = 50$)

水槽全域にわたって目標とする周波数スペクトルを有する波を再現できる。

図-21は波エネルギーの方向分布について空間的な変化を調べたものである。図の(a)および(b)はそれぞれ主波向0および45°の代表ケースを示す。point22を除いて図中の分布形を示す図の中心が測点位置に相当する。図中の分布形において、実線が実験値、破線が目標値である。図-21(a)において実線の四角い枠は水槽範囲を示す。水槽範囲の右および左下端から斜め上方へ伸びた破線は、従来型造波装置の斜め波の造波限界を示し、両破線で囲まれた二等辺三角形の領域が、従来型で主波向0°の多方向波を造波したときの有効造波領域に相当する。したがって、point21, 24は、従来型でも有効造波領域に含まれ、point23, 26は、有効造波領域の境界線上に位置する。point22と25は有効造波領域外に位置する。マルチフェイス造波法の結果である図-21(a)においては、point21および23の実験値は目標分布形にはほぼ等しく、目標とする波の場が再現できている。point22では、ピークの高さはほぼ一致しているが、ピークの角度に数度の差が生じている。ただし、数度の差は計測器の配置誤差から生じる場合もあり、誤差範囲とし

て許容できる値である。point24および26では、ピークの高さが目標値より低くなっているが、角度は一致する。point25では、実験分布形が左右対称ではなく歪んだ分布形を示すが、ピーク角度のずれは数度以下である。従来型の造波方法においては、有効造波領域の範囲外では、主波向が全くずれてしまうのに対して(Takayama, Hiraishi, 1989)、マルチフェイス造波法を用いると、エネルギーレベルでは目標値よりやや低くなる測点も生じるが、全測点で目標とする主波向が再現できる。図-21(b)は従来型では造波できない主波向45°のケースを示す。図(a)と同様に、実験値のピークの波向は、数度以内のずれで目標である45°と一致する。ピークのエネルギーレベルは、目標値より小さく、目標とする $S_{max} = 25$ で表されるものよりやや広範囲にエネルギーが広がる方向分布特性を有している。これは、主波向が45°と厳しい条件であり、この主波向方向の成分波の波高が目標値よりも小さくなり、方向スペクトルのピーク値が低下したものと思われる。また、周波数方向に積分したエネルギーの方向分布を比較しているため、高周波数側でエネルギーレベルが目標値より低下する影響が含まれていると思われる。分布形は全測点において一山型の分布

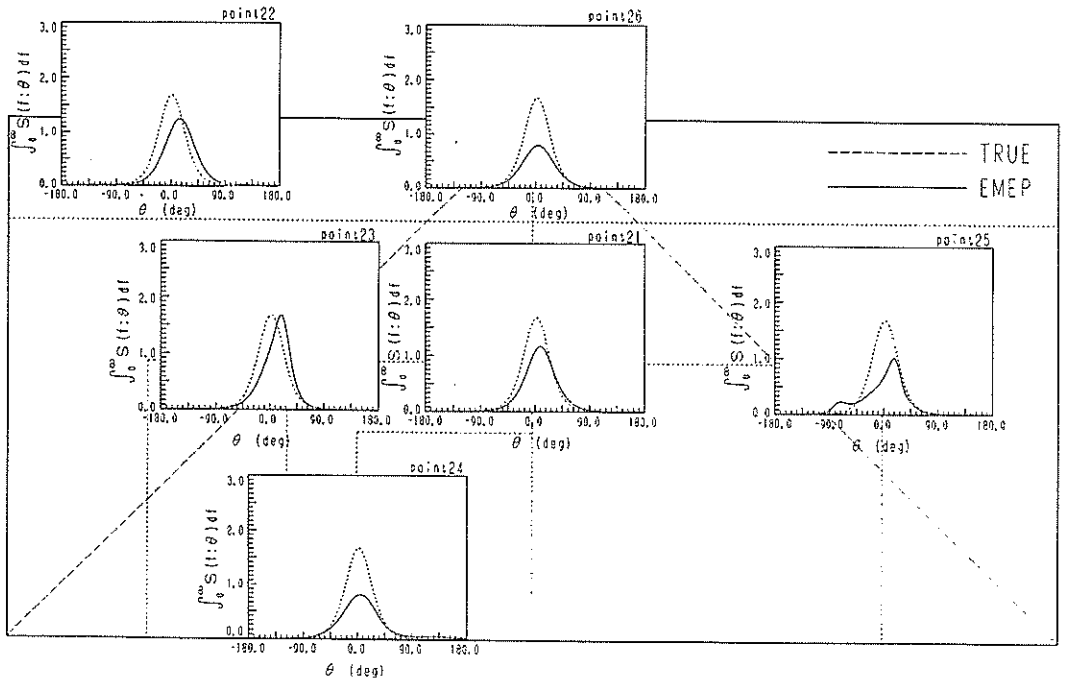


図-21(a) 波エネルギー方向分布に基づく有効造波領域
(Case D42; $\theta_a = 0^\circ$, $S_{max} = 25$, $\gamma_1 = 18$, $\gamma_2 = 24$)

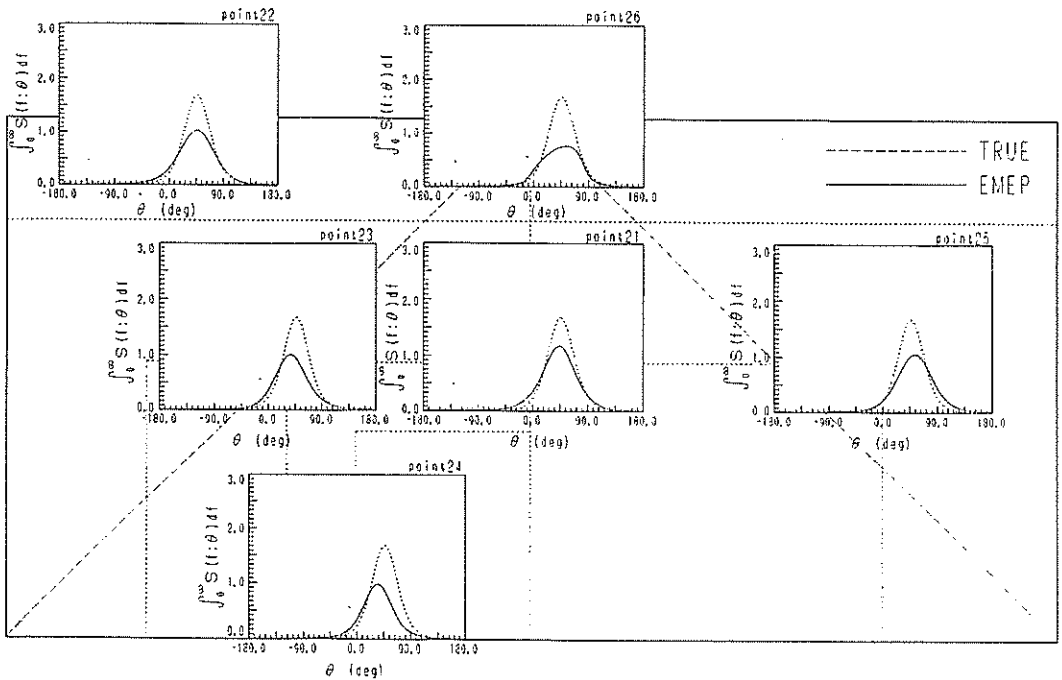


図-21(b) 波エネルギー方向分布に基づく有効造波領域
(Case D16; $\theta_a = 45^\circ$, $S_{max} = 25$, $\gamma_1 = 10$, $\gamma_2 = 50$)

形であり、ひずみや双山形分布は見られない。したがって、主波向 45° の場合には、マルチフェイス造波法を用いると水槽全域で所定の主波向を有する多方向不規則波を造波することができる。ただし、 $S_{max} = 25$ で示されるようなやや方向集中度の高い波を再現する場合には、その方向分布が目標値より広がり、方向集中度がやや低下する。

方向スペクトルの再現性の議論においては、エネルギーが最大となるピーク周波数における方向関数の分布形が使用される場合がある。図-22は、従来型では造波が不可能である主波向 45° のケースについて方向関数形の空間的な変化を調べたものである。実線で示した実験値は、全測点で、破線で示した目標値によく一致する。ピークの角度および高さの両者が非常によく一致するので、マルチフェイス造波法の適用性が高いことがわかる。図-21(b)の方向エネルギーの分布形に比較すると、実験値と計算値の一致の度合いが向上している。これは、エネルギーが集中するピーク周波数付近では多方向不規則波の再現精度がよいことを示す。すなわち、方向スペクトルのエネルギー分布で比較すると、高周波数側の造波機の追従特性の低下が一因となり、エネルギーのピークレベルは目標値よりも低下するが、ピーク周波数だけ

を比較すると、所定方向分布特性を有する多方向波が再現されている。したがって、マルチフェイス造波法を用いると水槽全域にわたって目標とする多方向不規則波を再現できることがわかる。

図-23は、目標 $S_{max} = 75$ で $\theta_0 = 45^\circ$ であるCase D 91に関して示したピーク周波数における方向関数の分布形である。ピーク周波数は 1.09Hz である。各計測点の方向関数は似た分布形状を示しているが、その方向集中度はいずれの場合も、目標値よりかなり小さい。ただし、ピーク角度は全測点で 45° を示し、方向関数形にひずみや双山型は見られない。これは、主波向 0° の場合でも同様で、目標値として $S_{max} = 75$ を与えてた場合でも、マルチフェイス造波法を用いると、主波向 $0 \sim 45^\circ$ の方向へ多方向不規則波を造波することができることを示す。ただし、再現できる方向分布特性は $S_{max} = 25$ 程度で表現される集中度の低いものになる。方向集中度の高い多方向波が造波しにくいことは、従来から指摘されており(高山・平石, 1987)、これはマルチフェイス造波法だけの問題点ではなく、多方向不規則波造波装置全体の課題となっている。この原因としては、水槽内の側壁における消波が完全ではなく、若干のエネルギーが反射されること、造波板の反射波吸収機能が完全では

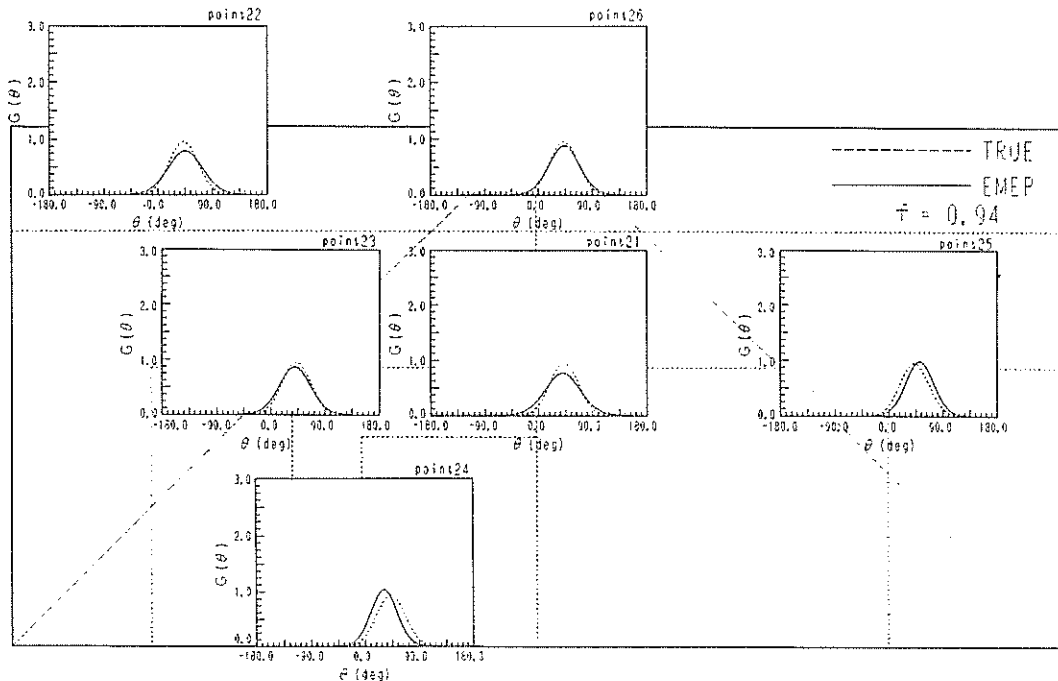


図-22 方向関数に基づく有効造波領域
(Case D61; $\theta_0 = 45^\circ$, $S_{max} = 25$, $\gamma_1 = 10$, $\gamma_2 = 50$)

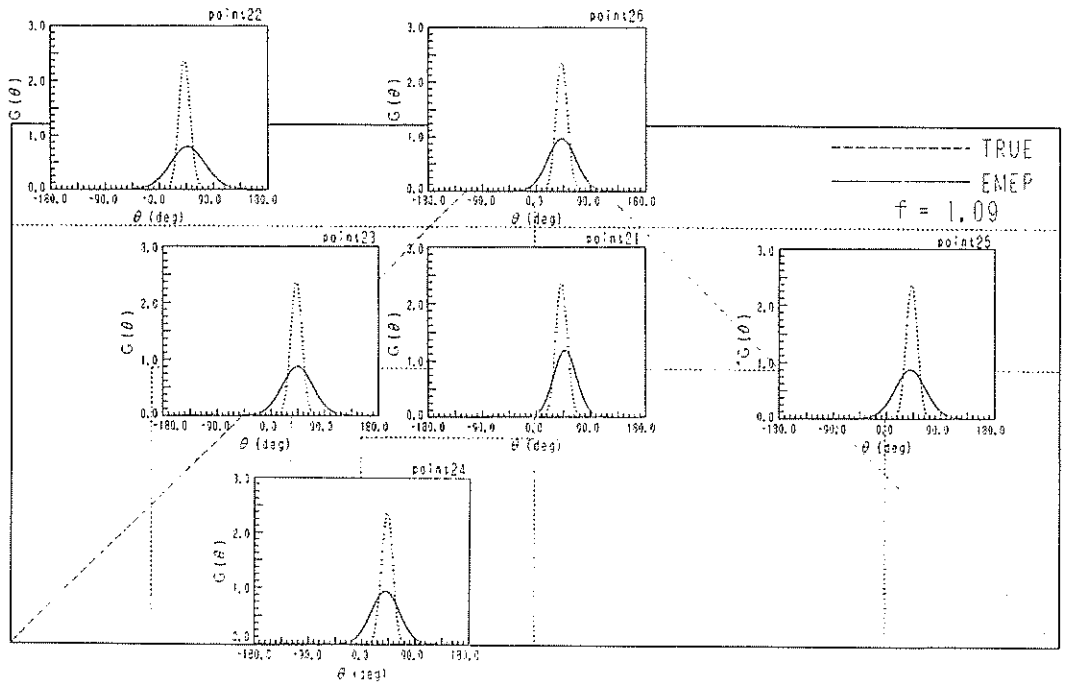


図-23 方向関数に基づく有効造波領域
(Case D91; $\theta_a = 45^\circ$, $S_{max} = 75$, $\gamma_1 = 15$, $\gamma_2 = 55$)

なく若干の再反射波が形成されること、成分波の斜め波の水粒子運動が水平面上で直線分布をせず楕円軌道を有すること (Takayama, 1982) などが考えられる。したがって、マルチフェイス造波法を用いると、造波装置全体の課題である方向集中度の高い波の再現性の低下という問題は解決されないものの、従来型に比べて著しく造波可能範囲を拡張でき、水槽全域にわたって多方向不規則波を造波できるものと考えられる。

(2) 有義波高と有義波周期の分布

(i) 有義波高の分布

各実験ケースにおいて、水槽内6ヶ所の各計測点における有義波高を比較し、その分布特性を検討した。各計測点における有義波高は、波高計アレイを構成する4本の容量式波高計で得た水位変動量時系列データから統計計算により有義波高を求め、次式に示すように4点における有義波高の平均値を波高計アレイ中心位置での平均有義波高と定義した。

$$\bar{H}_{1/3} = \left(\sum_{i=1}^4 (H_{1/3})_i \right) / 4 \quad (17)$$

ここに、 $\bar{H}_{1/3}$ は各計測点における平均有義波高であり、

($H_{1/3}$)_i は4本の容量式波高計の設置位置における有義波高である。

図-24は $H_{1/3} = 5.0$ cm, $T_{1/3} = 0.9$ sec, $\theta_a = 45^\circ$, $S_{max} = 25$ で乱数の種類が異なる Case D61, D62 および D63 について、各計測点の波高比を示したものである。図の横軸は計測点番号であり、縦軸の波高比は、各計測点の平均有義波高を水槽中央に位置する point 21 における平均有義波高で無次元化したものを示している。図中の実線、破線および点線は、それぞれ乱数の種類の違いを表す。また、($H_{1/3}$)_{p21} は point 21 における平均有義波高を表し、その値は図中の凡例内に示してある。

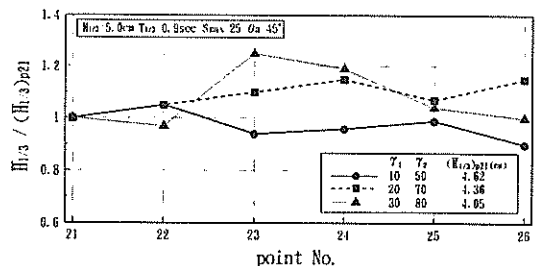


図-24 波高比分布 ($\theta_a = 45^\circ$, $S_{max} = 25$)

図において、Case D61の point21における平均有義波高は4.62cm、Case D62およびD63のそれは、4.36cm および4.05cmである。各実験ケースにおける波高比は、乱数の種類の違いにより、分布傾向が異なり、乱数の種類が波高の平面的な分布に与える影響があることがわかる。特に、水槽中央付近の point23, 24および26で、波高比のばらつきが大きいのが特徴的である。ただし、Case D63 ($\gamma_1=30$, $\gamma_2=80$)の point23を除いて、波高比はすべて1.0±20%以内に分布している。

(ii) 有義波周期の分布

次に水槽内6ヶ所の各計測点における有義波周期を比較した。波高と同様に、次式に示すように4点における有義波周期の平均値を波高計アレイ中心位置での平均有義波周期と定義した。

$$\bar{T}_{1/3} = \left(\sum_{i=1}^4 (T_{1/3})_i \right) / 4 \quad (18)$$

ここに、 $\bar{T}_{1/3}$ は各計測点における平均有義波周期であり、 $(T_{1/3})_i$ は4本の容量式波高計の設置位置における有義波周期である。図-25は $H_{1/3}=5.0\text{cm}$, $T_{1/3}=0.9\text{sec}$, $\theta_a=45^\circ$, $S_{\max}=25$ で乱数の種類が異なる Case D61, D62およびD63について、各計測点の周期比を示したものである。図の横軸は計測点番号であり、縦軸の周期比は、各計測点の平均有義波周期を水槽中央に位置する point21における平均有義波周期で無次元化したものを示している。図中の実線、破線および点線は、それぞれ乱数の種類の違いを表す。また、 $(T_{1/3})_{21}$ は point21における平均有義波周期を表し、その値は図中の凡例内に示してある。

図において、Case D61の point21における平均有義波周期は1.02sec、Case D62およびD63のそれは、0.98sec および1.01secである。各実験ケースにおける周期比は、point24を除いてばらつきが小さく、その値はすべて1.0±5%以内に分布し、周期比の場所的変化

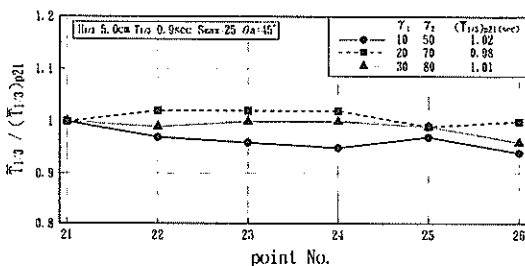


図-25 周期比分布 ($\theta_a=45^\circ$, $S_{\max}=25$)

は極めて小さいことがわかる。

以上のことから、波群を変更すると、各測点において周期は変化しないものの波高が若干変化することがわかる。したがって、構造物を用いた模型実験を行う際には、同じ波高・周期の条件を用いて波群を変化させた実験を数回行い、その平均値を実験値として採用することが必要であることがわかる。

5. 改良型マルチ・フェイス多方向不規則波造波装置の提案

5.1 波高分布計算法の妥当性の検討

本節では、斜め規則波を対象とした実験結果と、数値計算による結果を比較し、マルチ・フェイス造波に対する波高分布計算法の妥当性を検討した。数値計算には Takayama (1982) が提案している、サーベント型造波機を対象とした"斜め波の造波理論"を用いる。Takayama (1982) によれば、図-26のように配置された単一の造波板によって発生する波の速度ポテンシャル ϕ は定常減衰項を無視すると、次式で与えられる。

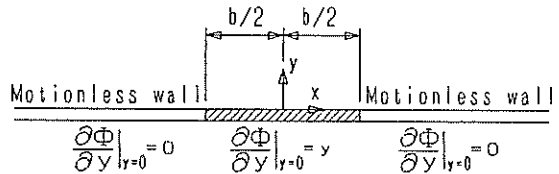


図-26 単一造波板の配置

$$\begin{aligned} \phi = & \left[\frac{\sigma}{k} (\zeta \alpha_p) \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh kh} \right. \\ & \times \int_{-kb/2}^{kb/2} N_0(\sqrt{(kx-q)^2 + (ky)^2}) dq \cos \sigma t \\ & - \frac{\sigma}{k} (\zeta \alpha_p) \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh kh} \\ & \left. \times \int_{-kb/2}^{kb/2} J_0(\sqrt{(kx-q)^2 + (ky)^2}) dq \right] \quad (19) \end{aligned}$$

ここに、 $J_0(x)$ および $N_0(x)$ はそれぞれ0次のベッセル関数およびノイマン関数である。 x および y は図-26に示す平面座標系における任意点の座標であり、 z は静水位を原点とし鉛直上向きにとった鉛直座標である。 b は造波板の幅、 h は静水深、 σ は角周波数、 t は時間、 ζ は造波機の変位振幅である。また、 k は次式の実数解として与えられる。

$$\sigma^2 = g k \tanh kh \quad (20)$$

ここに、 g は重力加速度である。 α_p は式(9)で表されるピストン型造波機の造波効率の1/2に相当する関数で、 α_p は次式で与えられる。

$$\alpha_p = 2 \sinh^2 kh / (2 kh + \sinh 2 kh) \quad (21)$$

造波板を複数並べた場合を考え、各造波板の位相 ϵ_A を図-27から求めると次式になる。

$$\epsilon_A = -k b \cos \theta \quad (22)$$

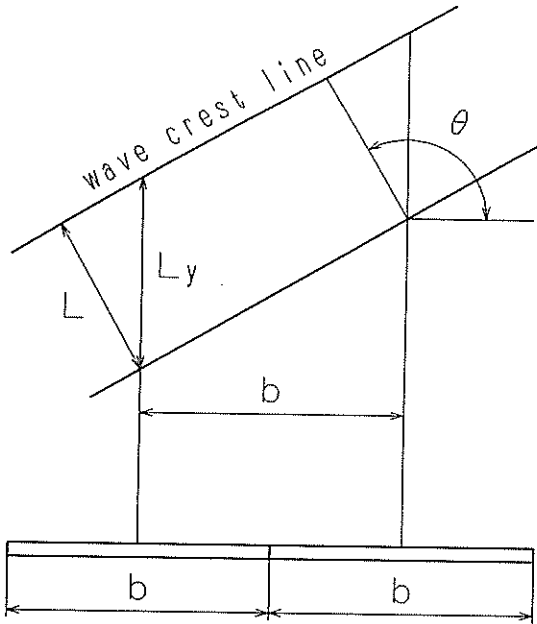


図-27 沖側造波装置における造波板間の位相差

ここに、 θ は波向である。

したがって、定常減衰項を無視した波向 θ の斜め波の速度ポテンシャル ϕ_{ob} は、各造波板の位相 ϵ_A を考慮して、式(19)を重ね合わせるにより次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \phi_{ob} &= \sum_{i=-N_-}^{N_+} \left[\frac{\sigma}{k} (\zeta \alpha_p) \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh kh} \right. \\ &\times \left. \cos(\sigma t - i k b \cos \theta) \right. \\ &\times \left. \int_{(i-1/2)kb/2}^{(i+1/2)kb/2} N_0(\sqrt{(kx-q)^2 + (ky)^2}) dq \right] \end{aligned}$$

$$- \sin(\sigma t - i k b \cos \theta)$$

$$\times \int_{(i-1/2)kb/2}^{(i+1/2)kb/2} J_0(\sqrt{(kx-q)^2 + (ky)^2}) dq \quad (23)$$

ここに、 N_+ および N_- はそれぞれ x 軸の正と負の側の造波板の数で、 $(N_+ + N_- + 1)$ が全造波板数となる。この斜め波の速度ポテンシャル ϕ_{ob} は、マルチ・フェイス造波装置の沖側造波機からの速度ポテンシャルに対応するので、 ϕ_{obA} とする。

$$\phi_{obA} = \phi_{ob} \quad (24)$$

次にマルチ・フェイス造波装置の右側造波機からの寄与分である速度ポテンシャル ϕ_{obr} について定式化する。右側造波装置は M 枚の造波板を有しているものとし、最も沖側に位置する造波板の番号を1とする。

まず、沖側造波装置の最も右側に位置する造波板 (N_+ 番目の造波板) と右側造波装置の最も沖側に位置する造波板 (1番目の造波板) について、両者の位相差を求める。図-28のように、沖側および右側の造波板の中立軸が δb の隙間を有して直交する場合を考える。双方の造波板の中点から延びる法線が交差する点で、それぞれの造波板から発生した波の位相が一致することから、次式が成立する。

$$\frac{2\pi}{L_y} \left(\frac{b}{2} + \delta b \right) - \sigma t$$

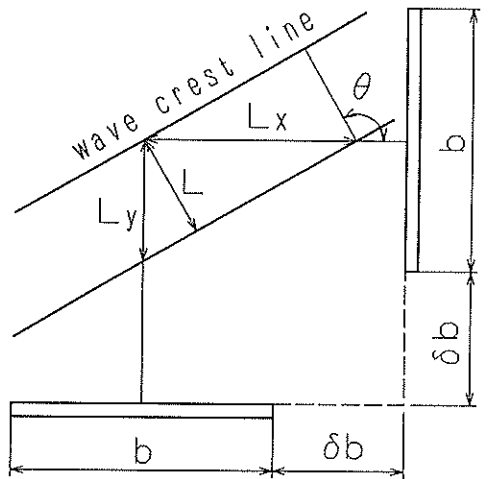


図-28 沖側および右側造波装置間の位相差

$$= \frac{2\pi}{L_x} \left(\frac{b}{2} + \delta b \right) - (\sigma t + \epsilon_{AB}) \quad (25)$$

ここに、 ϵ_{AB} は沖側造波板に対する右側造波板の位相差である。また、波長の x 方向成分および y 方向成分である L_x および L_y は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} L_x &= -L/\cos\theta \\ L_y &= L/\sin\theta \end{aligned} \quad (26)$$

式(25)より、位相差 ϵ_{AB} は次式となる。

$$\epsilon_{AB} = -k(b/2 + \delta b)(\sin\theta + \cos\theta) \quad (27)$$

一方、右側造波装置における隣合う造波板間の位相差 ϵ_B は図-29から求めると次式となる。

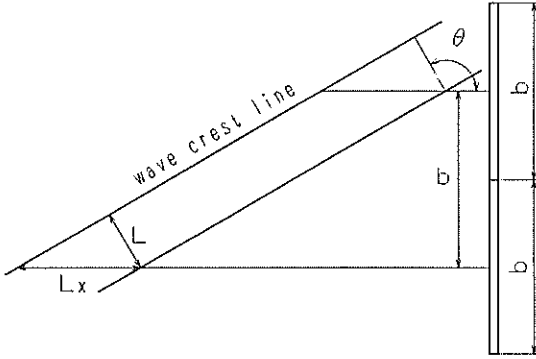


図-29 右側造波装置における造波板間の位相差

$$\epsilon_B = -kb \sin\theta \quad (28)$$

これより、右側造波機からの寄与分である速度ポテンシャル Φ_{obB} は次式で求められる。

$$\begin{aligned} \Phi_{obB} &= \sum_{j=1}^M \left[\frac{\sigma}{k} (\zeta a_p) \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh kh} \right. \\ &\times \left. \cos(\sigma t - \epsilon_{AN+} - \epsilon_{AB} - (j-1)\epsilon_p) \right. \\ &\times \int_{(j-1/2)kb/2}^{(j+1/2)kb/2} N_0 \left(\sqrt{(kx')^2 + (ky' - q)^2} \right) dq \\ &- \sin(\sigma t - \epsilon_{AN+} - \epsilon_{AB} - (j-1)\epsilon_B) \\ &\times \left. \int_{(j-1/2)kb/2}^{(j+1/2)kb/2} J_0 \left(\sqrt{(kx')^2 + (ky' - q)^2} \right) dq \right] \quad (29) \end{aligned}$$

ここに、 ϵ_{AN+} は沖側造波装置の最も右側に位置する造波板(N_+ 番目の造波板)に与えられる位相差であり、 x' および y' は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} x' &= x - (N_+ + 1/2)b - \delta b \\ y' &= y - \delta b \end{aligned} \quad (30)$$

したがって、マルチ・フェイス造波法によって生じた波の場の速度ポテンシャル Φ_{ob} は、沖側造波装置および右側造波装置それぞれからの寄与分である速度ポテンシャル Φ_{obA} および Φ_{obB} を合成することによって求められる。

$$\Phi_{ob} = \Phi_{obA} + \Phi_{obB} \quad (31)$$

速度ポテンシャル Φ_{ob} が求まると、水面波形 η は次式で求めることができる。

$$\eta = -\frac{1}{g} \frac{\Phi_{ob}}{t} \Big|_{z=0} \quad (32)$$

x および y 方向の水粒子速度 u および v は次式で求められる。

$$u = \frac{\Phi_{ob}}{x}, \quad v = \frac{\Phi_{ob}}{y} \quad (33)$$

各地点における波向 θ は水粒子の合成速度 $V = u^2 + v^2$ が最大となる方向として定義し、次式で求める。

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left\{ \frac{(u)_{\max}}{(v)_{\max}} \right\} \quad (34)$$

ここで、 $(u)_{\max}$ および $(v)_{\max}$ は合成速度 V が最大となるときのそれぞれの値である。

図-30は実験に用いたマルチ・フェイス多方向不規則波造波装置と斜め波の造波理論に基づく数値計算に用いた造波装置および波高算出点のモデルを示している。実験で用いた造波装置はガイド板方式であるため、図-30(a)に示すように各造波板の中立位置(中立軸の位置)は造波装置前縁から60cm後退しており、2つの造波装置ブロックが形成する隅角部には δb の隙間が生じる。したがって、この斜め波の造波理論を用いた再現計算も図-30(b)のようにこの隙間 δb を考慮した。なお、図中の●が計算点であり、実験における水位計測点と同一地点である。

計算は規則波実験で用いたCase01からCase10までの10ケース全てを対象として実施した。

図-31は、周期が0.85sec、波向が 30° であるCase03に対応する計算と実験波高分布の比較である。このケースは右側の造波装置ブロックは吸収動作のみを行っ

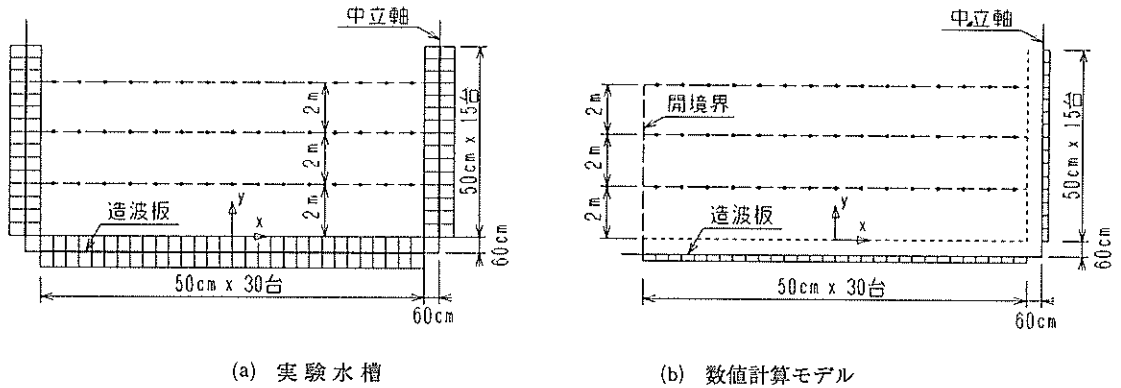


図-30 実験水槽のモデル

ているので従来型の造波方法に相当する。図では、沖側造波装置前縁から2.0m 間隔に3本設けた計測ライン ($Y=2.0\text{m}$, 4.0m , 6.0m) 上の沿岸方向波高分布を実験結果と共に示した。図において、3枚のグラフはそれぞれ、上から $Y=6.0\text{m}$, $Y=4.0\text{m}$ および $Y=2.0\text{m}$ の沿岸方向計測ライン上における波高分布を示す。また、図中、実線に●が実験結果、破線に▲が再現計算結果である。図に示すように、実験結果と再現計算結果は計測ライン右端部で右下がりの波高分布を示し、明確な回折波領域が現れている。ただし、実験結果のそれは再現計算結果よりやや狭い範囲に存在している。回折波領域以外の領域では、両者の沿岸方向波高分布は似ているものの、 $Y=4.0\text{m}$ および $Y=6.0\text{m}$ では左側端部

付近で両者の波高には差がある。これは、実験において左側造波装置における波の吸収が完全ではなく反射波が生じた影響であると考えられる。

マルチ・フェイス造波を行った Case06 ($H=5.0\text{cm}$, $T=0.9\text{sec}$, $\theta=45^\circ$) に関する図-32でも、いずれの計測ラインにおいても実験結果と再現計算結果は、定性的に良く似た波高分布を示している。ただし、局所的に両者の大きさは2.0cm 程度異なる。また、実験結果には比較的明確な”波高減衰斜めライン”が確認できるが、計算結果では明確なそれは見いだせない。これは、計算では造波板間の隔壁の影響を考慮していないが、実際には隔壁があり、その影響が斜め減衰ライン上における波高低下を顕著にしているためと考えられる。図の左

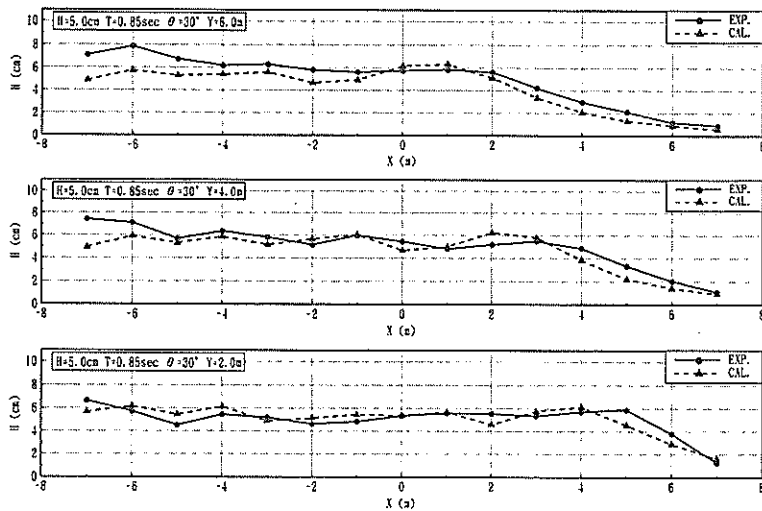


図-31 沿岸方向波高比分布 (Case03; $H=5.0\text{cm}$ $T=0.85\text{sec}$ $\theta=30^\circ$)

マルチ・フェイス多方向不規則波造波装置の適用性について

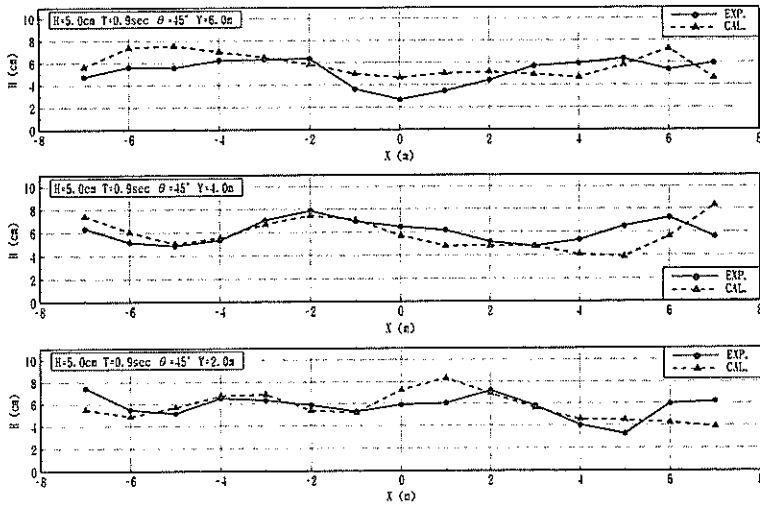


図-32 沿岸方向波高比分布 (Case06; $H=5.0\text{cm}$ $T=0.9\text{sec}$ $\theta=45^\circ$)

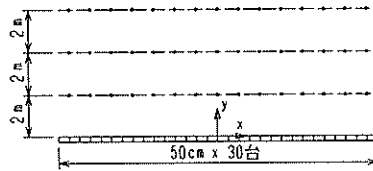
側の範囲では実験波高と計算波高はよく一致し、本計算で用いた数値計算モデルがほぼ妥当であることがわかる。

5.2 数値計算による造波機配置条件に対する波高分布特性の検討

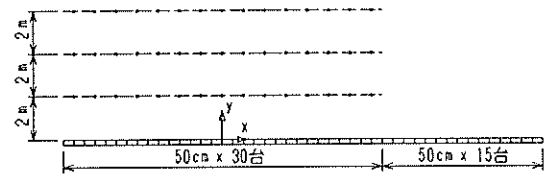
(1) 従来型造波法とマルチ・フェイス造波法の波高分布特性の検討

マルチ・フェイス造波法を用いた場合の斜め規則波造波場の特性は、斜め波の造波理論の応用によって検討可能であることが確認できたので、数値計算により、造波板を一列に配置した従来型造波法とマルチ・フェイス造波法のそれぞれの利点を検討した。

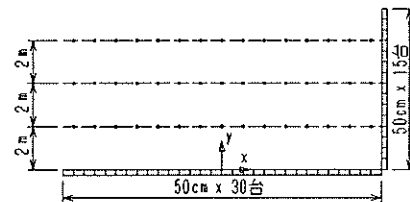
図-33(a)~(c)は、数値計算の対象とした造波装置と波高算出点のモデルであり、図に示すように3種類のモデルを対象とした。また、図中の●が計算点であり、実験における水位計測点と同一地点である。なお、実験で用いた造波装置の隅角部には、図-30に示したように造波板中立軸間に $\delta b=60\text{cm}$ の隙間が生じているが、この場合は計算のみの比較を行ったので、簡単化のため $\delta b=0$ とみなした。図中、(a)は造波板を30枚有する沖側造波装置だけを対象とした場合 (type1) であり、(b)はその沖側造波装置に加え、右側造波装置に相当する15枚の造波板を沖側造波装置の延長線上、 x 軸正の方向に隣接させた場合 (type2) である。したがって、(b)では原点 ($x=0$) より左側に15枚、右側に30枚の造波板がある。(c)は、造波板を30枚有する沖側造波装置の右端に、その法線方向に15枚の造波板を並べた場合 (type3) であり、実験と同様な配置条件である。



(a) type 1 (沖側造波装置 (造波板30枚) のみ)



(b) type 2 (沖側造波装置+右側 (造波位置15枚) 延長)



(c) type 3 (マルチ・フェイス造波装置)

図-33 数値計算モデル

図-34は、斜め規則波実験10ケースの内、波向 45° のケースについて、沖側造波装置前縁から2.0m間隔に3本設けた計測ライン($Y=2.0\text{m}$, 4.0m , 6.0m)上の沿岸方向波高分布を示したものである。図において、3枚のグラフはそれぞれ、上から $Y=6.0\text{m}$, $Y=4.0\text{m}$ および $Y=2.0\text{m}$ の沿岸方向計測ライン上における波高分布を示す。また、図中、実線に●が沖側造波装置のみのtype 1, 破線に■が沖側造波装置を右側造波装置分延長したtype 2であり、点線に▲が造波装置を実験と同様に配置したtype 3である。図においてtype 1の計算結果は計測ライン右端部から水槽中央部にかけて明確な回折波領域があることを示している。特に、 $Y=6.0\text{m}$ の計測ラインでは、 $X=-3.0\text{m}$ より右側の領域で波高は右下がりに分布し、その範囲は計測ラインの $2/3$ に相当する。type 2の計算結果は、局所的に波高が変化し、全体に目標波高の 5.0cm より大きな波高を示している。しかしながら、全ての領域でほぼ均一な波高が得られている。一方、type 3の計算結果もtype 2の計算結果と比較的良く似た波高分布を示し、全ての領域でほぼ均一な波高を示している。したがって、斜め波を造波する場合にはtype 2とtype 3の配置条件がともに計算対象領域内の目標波浪場を良好に再現することができる。

図-35は、波向をさらに大きくした $H=5.0\text{cm}$, $T=1.0\text{sec}$, $\theta=60^\circ$ であるCase10に関する沿岸方向波高分布を示す。この場合にはtype 1の場合は全ての計測ラインで明確な回折波領域を示して水槽の広範囲に

わたって所定の波高が再現できない。type 2は、従来型の造波法式で造波機の総延長を拡大した場合である。type 1と比較すると、波高分布の最大値と最小値の差は小さい。しかし、 $Y=6.0\text{m}$ ラインで、 $X=0$ を境に右側と左側の波高が異なり、 $X>3\text{m}$ の範囲では波高が 5cm 以下になる。すなわち、マルチフェイス造波法のように右側の造波機ブロックからの造波がないために、波向が大きくなると、広範囲な回折波領域が形成されるためである。マルチフェイス造波法に相当するtype 3においては、右側造波機ブロックからの造波が可能なので波向が大きくなっても回折波領域が生じない。したがって、 $Y=6\text{m}$ ラインにおける波高分布は一樣に近くほぼ全域で同一の波高が造波できる。したがって、波向が 45° 程度までの斜め波の造波に当たっては、type 2と3の相違は大きくないが、波向が 60° で大きくなると、沖側造波ブロックから計測点の距離が大きくなるに従って、type 2でも回折波領域が生じてくる。type 3では、波向が大きい場合でも回折波領域が生じないので、従来型造波法に比べてマルチフェイス造波法はより広い有効造波領域を形成できることがわかる。

このように各波浪条件において、30枚の造波板を有する沖側造波装置から生じる波のみを対象としたtype 1の計算結果は、各計測ラインにおいて右下がりの波高分布を示し、回折波領域が存在することを明確に表す。この右下がりの波高分布は Y が大きくなり造波板面からの距離が大きくなるほど、また、波向が大きくなるほど広範囲に存在する。沖側造波装置に加え、右側造波装

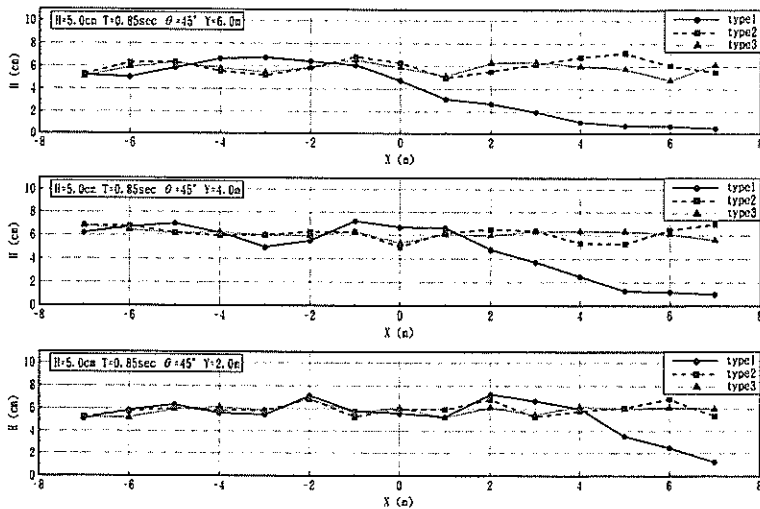
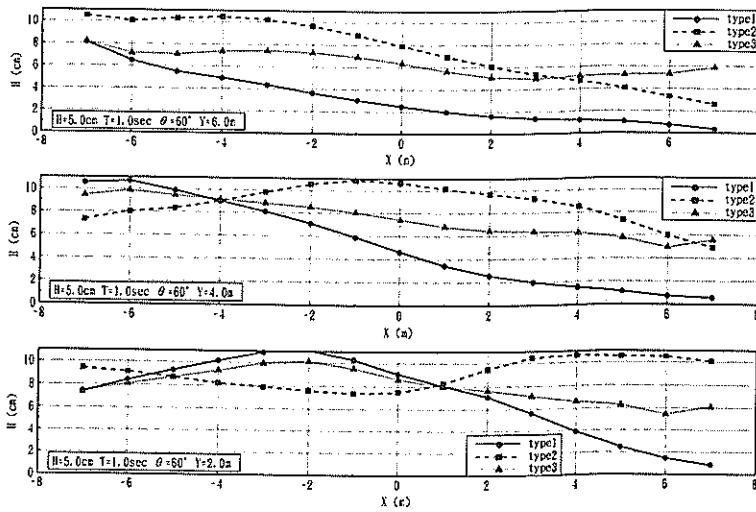


図-34 沿岸方向波高分布 (Case04 ; $H=5.0\text{cm}$ $T=0.85\text{sec}$ $\theta=45^\circ$)

マルチ・フェイス多方向不規則波造波装置の適用性について



図一35 沿岸方向波高分布 (Case10; $H=5.0\text{cm}$ $T=1.0\text{sec}$ $\theta=60^\circ$)

置に相当する15枚の造波板を沖側造波装置の延長線上、 x 軸正の方向に隣接させた場合のtype 2の計算結果は、波向が比較的小さい場合は計測ラインの全域で比較的安定した波高分布を示すが、波向が大きい場合はtype 1よりは狭くなるものの、明確な回折波領域が存在する。実験と同様、右側側面からも波を発生させ、マルチ・フェイス造波法を試みたtype 3は、波向が比較的小さい場合はtype 2と良く似た波高分布を示す。また、type 2でも回折波領域が生じるような波向が大きい場合でも、比較的均一な波高分布を示す。したがって、波向が大きくなった場合は、従来型の造波法に比較して、マルチ・フェイス造波法が優位になる。一般に、極端に波向が大きい場合を実験対象としない場合、広い水槽であれば造波装置は一列に配置した従来型の造波法を採用する方が、造波信号の作成等の制御法が簡単であり、利便性が高い。しかしながら、造波装置の延長ができない狭い水槽において、有効造波領域を拡張するには、造波装置を延長した場合と同程度の有効造波領域が確保できるマルチ・フェイス造波法が有効な手法である。

(2) 隅角部の形状による波浪場の変化

水槽実験で得たように、沖側と右側面に造波装置を 90° の角度で接するように配置した場合、斜め規則波を作用させると2つの造波装置から生じる回折波同士が重なり合う波高減衰領域が存在する。また、Takayama (1982)の斜め波の造波理論を用いた、マルチ・フェイス造波を行った場合の数値計算では、水槽実験で得たような明確な波高減衰領域は存在しなかったものの、計算

領域内で波高がややばらつく傾向があった。こうした問題の一因として、造波装置が有限の長さであること、2つの造波装置ブロックの中立軸が直交していることが考えられる。そこで将来、小型平面水槽において、多方向造波装置を設置する場合は、2つの造波装置ブロックが接する隅角部の処理について、なんらかの工夫を施し、出来るだけ均一な波高場を得る必要がある。

今回の実験で用いた沖側造波装置と右側造波装置からなるマルチ・フェイス造波装置の隅角部では、それを構成する2枚の造波板が 90° ずれた方向にピストン運動をすることで、隅角部の頂点を中心とした円筒波が生じないこと等が原因となって、滑らかな峰線が得られていないものと考えられる。この対策として、沖側と右側面の造波装置の間に、数枚の造波板を曲率をもたせて配置し、滑らかに沖側と右側面の造波装置を接合することが考えられる。しかしながら、造波板1枚ずつの運動軸を変化させて造波機を設置することは、現状の造波機の状態からは現実的でない。また、曲率をもたせて配置した造波板、それぞれに造波信号を与えることは、非常に複雑な操作が必要となる。こうしたことから、ある程度実現可能な造波装置の配置法を提案する。すなわち、現在使用している造波装置が、5枚の造波板が1ユニットになっていることから、この5枚の造波装置を曲率をもたせて配置する代わりに、 x 軸に対し 45° の角度で配置する。

この沖側と右側面の造波装置を x 軸に 45° の角度で配置した造波装置で接合したマルチ・フェイス造波装置を、ここでは改良型マルチ・フェイス多方向不規則波造波装

置と呼ぶ。この改良型マルチ・フェイス造波装置の適用性を数値計算で検討した。数値計算法は図-30の場合と同様であり、3つのブロックからの速度ポテンシャルを重ね合わせて波高を求めた。図-36は改良型マルチ・フェイス多方向不規則波造波装置の状況を示し、また図中の●は実験の水位計測点と同一地点を示す。ここでは、50.0cmの造波板を30枚有する沖側造波装置の右端に、 x 軸に 45° の角度で造波板を5枚有する造波装置を設置し、さらにその右端に10枚有する右側造波装置を y 軸と平行に設置するものとした。全造波板数は前述したtype2およびtype3と同一である。この改良型マルチ・フェイス多方向不規則波造波装置による計算結果と前述のtype3の計算結果を比較することにより、造波機配置条件に対する波高分布特性の検討を行った。

図-37は、 $T=1.0\text{sec}$ で $\theta=30^\circ$ (Case08) のケースについて沖側造波装置前縁から2.0m間隔に3本設けた計測ライン ($Y=2.0\text{m}, 4.0\text{m}, 6.0\text{m}$) 上の沿岸方向波高分布を示したものである。図において、3枚のグ

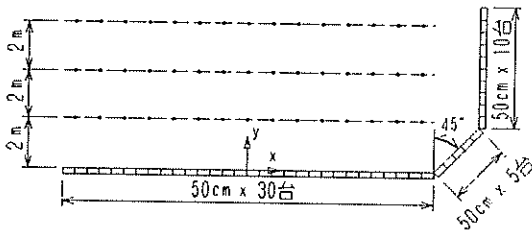


図-36 改良型マルチ・フェイス造波装置の状況

ラフはそれぞれ、上から $Y=6.0\text{m}$ 、 $Y=4.0\text{m}$ および $Y=2.0\text{m}$ の沿岸方向計測ライン上における波高分布を示す。また、図中、実線に●が改良型マルチ・フェイス多方向不規則波造波装置による計算結果、点線に△が右側造波装置を有するtype3の計算結果である。この場合には、各計測ラインの右端でtype3の波高は増大している。また、この傾向は岸側の計測ラインほど顕著である。一方、改良型のそれは $Y=6.0\text{m}$ の計測ラインの右端部を除くと、ほぼ全域で比較的均一な波高分布を示している。したがって、この場合は、type3に比べ、改良型が良好な波高場を形成している。他の斜め波のケースにおいても右端に近い波高分布を除いては、改良型とtype3の結果に相違はなかった。しかし、右端に近い波高分布が、改良型ではより一様になり、隅角部の改良の効果が見られた。したがって、改良型マルチフェイス造波法を用いると、本実験で用いたマルチフェイス造波法に比べて、より一様な波高分布が得られると思われる。

6. まとめ

本報告では、複数枚の造波板を横一列に配置した従来型のサーベント型多方向不規則波造波装置を用いた場合、所定の波浪場が再現される有効造波領域が水槽の一部に限られるという問題に着目し、その対策として水槽の複数面から造波するマルチ・フェイス多方向不規則波造波装置を提案した。ここでは、造波板が30枚の沖側造波装置と15枚の造波板を有する左右の側方造波装置の3ブロックで構成されるマルチ・フェイス多方向不規則波

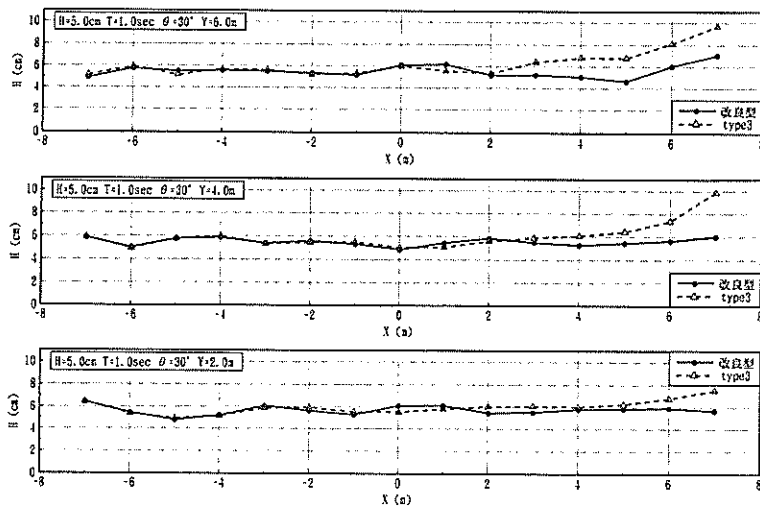


図-37 沿岸方向波高分布 (Case08; $H=5.0\text{cm}$ $T=1.0\text{sec}$ $\theta=30^\circ$)

造波装置を構築し、斜め規則波および多方向不規則波を用いた実験を行い、本造波装置の波高分布特性、各スペクトルや方向関数の分布特性を検討した。また、斜め規則波を対象として、Takayama (1982) の '斜め波の造波理論' を用いた数値計算を行い、造波装置の最適配置法を検討した。本研究で得られた結果を以下にまとめる。

1) 水槽の複数面から造波することによって、従来型のサーベント型造波装置で生じていた広範囲な回折波領域が解消できることが確認できた。しかしながら、各造波装置ブロックから生じた回折波のみが重なり合う低波高領域が、2つの造波装置の接点から延びる波向線周辺に生じることがわかった。これを "波高減衰斜めライン" と呼ぶ。

2) マルチ・フェイス多方向不規則波造波装置によって波高減衰斜めライン上の波高低下を防ぐ目的で、隅角部に消波柱を設置したが、改善することができない。

3) 方向スペクトルの解析から、有効造波領域を検討したところ、マルチフェイス造波法においては、水槽の全域において所定の方向分布特性を有する波を再現でき、有効造波領域を水槽全域に拡大できる。

5) 不規則波の各実験ケースでは、斜め規則波実験の場合に存在した "波高減衰斜めライン" の様に特定のライン上で波高が減衰する現象は生じず、有義波高や有義波周期は、水槽内の広い範囲で比較的均一な値を示している。

5) マルチ・フェイス造波法による波浪場は、Takayama (1982) の '斜め波の造波理論' を応用して予測することが可能である。この場合、水槽内の任意点における波高は、2台の造波装置ブロックから別々に造波した波の速度ポテンシャルの線形重ね合わせ法から算定する。

7) 数値計算で検討したところ、同一枚数の造波板がある場合、波向が比較的小さい場合は造波板を一列に配置した従来型の造波法とマルチ・フェイス造波法は同程度の有効造波領域を形成できる。しかしながら、波向が大きくなった場合は、従来型の造波法では回折波領域が拡大し、有効造波領域が狭くなるのに対し、マルチ・フェイス造波法は水槽全域で有効造波領域を形成できる。

7) 数値計算で検討したところ、沖側造波装置と右側造波装置の間に、 x 軸に対し 45° の角度で5枚の造波板からなる造波装置を設置した場合の改良型マルチフェイス造波装置による波高分布は、沖側造波装置と右側造波装置を 90° の角度で接合した場合の波高分布より、滑らかな波高分布を形成した。したがって、造波機同士の接合

部に曲率を考慮して造波装置を配置すれば、マルチ・フェイス造波法の適用性を高めることができる。

このようにマルチ・フェイス多方向不規則波造波装置は、水槽全域を有効造波領域として使用でき、従来型に比べてその適用性が高い。しかし、構造および制御の面から従来型より複雑になる。したがって、有効造波領域の拡張を狙って造波板数を増設する場合、水槽に余裕があれば直線上に延長するのが制御の面からも有利である。しかしながら、造波装置の延長が望めないような水槽で有効造波領域を拡張する場合には、マルチ・フェイス造波法は有効な手法であると考えられる。マルチ・フェイス造波法の適用性は、数値計算で示したように隅角部に曲率を考慮することによって改善されるものと考えられ、今後、この方向に沿った改良・検討が必要である。

最後に、実験の実施にあたっては、波浪研究室藤咲秀可氏ならびに、波浪研究室研修生上原功氏 (若築建設) の協力を得た。研究全般の遂行にあたっては、高山知司水工部長の御助言を賜った。造波装置の製作・改良作業には三井造船の御尽力を得た。上記の皆様にも厚く感謝する次第である。
(1995年3月24日受付)

参考文献

- Biesel, F. (1954) : Wave machines, *Proc. 1st Conf. on Ships and Waves*, Hoboken, N. J., pp.288~304.
- Capon, J. (1969) : High-resolution frequency-wave-number spectrum analysis, *Proc. IEEE*, Vol. 57, pp. 1408~1418.
- Darlymple R. A. (1989) : Directional wave-maker theory with sidewall reflection, *J. Hydraulic Research*, Vol. 27, No.1, pp. 23~34.
- Funke, E. R. and M. D. Miles (1987) : Multidirectional Wave Generation with corner reflectors, *Technical Report, National Research Council Canada*, TR-HY-021, 17p.
- Isaacson, M. (1984) : Theoretical analysis of directional sea state synthesis, *Seaconsult marine Research Ltd.*, 59p.
- Mitsuyasu, H., T. Tasai, S. Mizuno, M. Ohkusu, T. Honda and K. Rikiishi (1975) : Observation of the directional spectrum of ocean waves using a cloverleaf buoy, *J. Physical Oceanography*, Vol. 5, No. 4, pp. 750~760.
- Takayama, T. (1982) : Theoretical properties of oblique waves generated by serpent-type wave-makers, *Rep. the Port and Harbour Research Institute*, Vol. 21, No. 2, pp. 3~48.
- Takayama, T. and T. Hiraishi (1987) : Fundamental characteristics of oblique regular waves and directional random waves generated by a serpent-type wave generator, *Rep. of the*

Port and Harbour Research Institute, Vol. 26, No. 5, pp. 101~136.

Takayama, T. and T. Hiraishi (1989): Reproducibility of directional random waves in laboratory wave simulation, Rept. of PHRI, Vol. 28, No. 4, pp. 3~24.

池谷 毅・秋山義信・今井貫爾 (1992): 多方向不規則波の吸収造波理論, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 81~85.

合田良実・鈴木康正 (1975): 光易型方向スペクトルによる不規則波の屈折・回折計算, 港湾技研資料, No. 155, 33p.

合田良実 (1980): 波高計群による方向スペクトルを用いた反射波推定法の検討, 港湾技術研究所報告, Vol. 19, No. 3, pp. 37~70.

合田良実 (1987): 数値シミュレーションによる波浪の標準スペクトルと統計的性質, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 131~135.

齊藤栄一・沖 政和・清水琢三・鷗飼亮行・磯部雅彦 (1993): 港湾模型を用いた波の変形特性に関する研究, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 56~60.

高山知司・永井紀彦・合田良実 (1984): サーベント型造波装置の制御方式と造波特性, 港湾技研資料, No. 509, 30p.

高山知司・平石哲也 (1987): サーベント型造波機による発生波の特性に関する実験, 港湾技術研究所報告, Vol. 26, No. 3, pp. 37~83.

高山知司・池田直太・小杉宣史 (1991): 多方向不規則波を用いた波浪変形模型実験, 港湾技術研究所報告, Vol. 30, No. 1, pp. 69~136.

笈田博章・水口 優・森谷陽一 (1994): 多方向造波装置において一様な波の場を作るための端部制御方式, 海岸工学論文集, 第41巻(1), pp. 106~110.

永井康平 (1972): 不規則な海の波の屈折および回折の計算, 港湾技術研究所報告, Vol. 11, No. 2, pp. 47~119.

橋本典明・永井紀彦・浅井 正・菅原一晃 (1993): 海洋波の方向スペクトルの推定における最大エントロピー原理法 (MEP) の拡張, 港湾技術研究所報告, Vol. 32, No. 1, pp. 3~25.

平口博丸・鹿島遼一 (1988): 水面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, 研究報告 U88013, 47p.

平石哲也 (1991): サーベント型造波装置の有効造波領域の拡張法に関する実験的検討, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 126~130.

平石哲也 (1992): 多方向不規則波の発生とその応用に関する研究, 港湾技研資料, No. 723, 176p.

平石哲也 (1994): 多方向不規則波を用いた港内波高分布に関する模型実験手法の検討, 港湾技研資料 No. 788, 32p.

主要記号一覧表

a_n	: n 番目の成分波の振幅
b	: 造波板の幅
c	: 波速
D	: x軸方向の計測点間隔
f_n	: n 番目の成分波の周波数
F_n	: n 番目の成分波の造波効率
g	: 重力加速度
$G(f; \theta)$: 方向関数
G_0	: 方向関数を正規化する係数
h	: 水深
H	: 波高
H_i	: 各計測点における波高
H_{ave}	: 各計測ラインの平均波高
$H_{1/3}$: 有義波高
$\bar{H}_{1/3}$: 波高計アレイ中心における平均有義波高
$(H_{1/3})_i$: 波高計アレイの i 番目の波高計位置における有義波高
$(H_{1/3})_{p21}$: point 21 における平均有義波高
i	: x 軸方向の造波板の番号
j	: y 方向の造波板の番号
$J_0(x)$: 0 次のベッセル関数
k_n	: n 番目の成分波の波数
L_n	: n 番目の成分波の波長
M	: 側方造波装置の全造波板数
n	: 成分波の番号
N	: 沖側造波装置の全造波板数
N_+	: x 軸の正方向の造波板の数
N_-	: x 軸の負方向の造波板の数
N_s	: 成分波の分割数
$N_0(x)$: 0 次のノイマン関数
RH	: 波高比
S_{max}	: 方向集中度パラメーター
$S(f)$: 周波数スペクトル
t	: 時間
T	: 周期
$T_{1/3}$: 有義波周期
$\bar{T}_{1/3}$: 波高計アレイ中心における平均有義波周期
$(T_{1/3})_i$: 波高計アレイの i 番目の波高計位置における有義波周期
$(T_{1/3})_{p21}$: point 21 における平均有義波周期
u	: x 方向の水粒子速度
$(u)_{max}$: 水粒子の合成速度 V が最大となるときの u の値

マルチ・フェイス多方向不規則波造波装置の適用性について

u	: y 方向の水粒子速度
$(V)_{\max}$: 水粒子の合成速度 V が最大となるときの u の値
V	: 水粒子の合成速度
x	: 沿岸方向の平面座標
X'	: 造波板中立軸に沿った沿岸方向の平面座標
y	: 岸方向の平面座標
Y'	: 造波板中立軸からの岸方向の平面座標
z	: 静水位を原点とした鉛直座標
α_p	: 造波効率の $1/2$ に相当する関数
γ_1	: 周波数成分に関する乱数の種値
γ_2	: 波向に関する乱数の種値
δ	: 造波板間の運転位相差
δf_n	: n 番目の成分波のバンド幅
δb	: 造波板中立軸のずれ
ϵ_A	: 沖側造波装置の造波板間の位相差
ϵ_{AB}	: 沖側と右側造波装置の造波板間の位相差
ϵ_{AN+}	: 沖側造波装置の $N+$ 番目の造波板の運転位相差
ϵ_B	: 右側造波装置の造波板間の位相差
ϵ_n	: n 番目の成分波の位相差
ϵ_T	: 側方造波装置の運動位相差
ζ	: 造波機の変位振幅
η_i	: i 番目の造波板の変位
θ	: 斜め規則波の波向
θ_a	: 多方向不規則波の主波向
θ_n	: n 番目の成分波の波向
τ	: 隣合う 2 計測点を同一波が通過する位相差
Φ	: 速度ポテンシャル
Φ_{ob}	: 斜め波の速度ポテンシャル
Φ_{obA}	: 沖側造波装置による斜め波の速度ポテンシャル
Φ_{obB}	: 右側造波装置による斜め波の速度ポテンシャル
ω	: 角周波数

港湾技術研究所報告 第34巻 第2号

1995・6

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所

横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 (株) 東京プリント

Copyright © 運輸省港湾技術研究所 1995

本報告書の転載・複写を希望される場合は、港湾技術研究所企画課へご連絡をお願いします。