

# 港湾技研資料

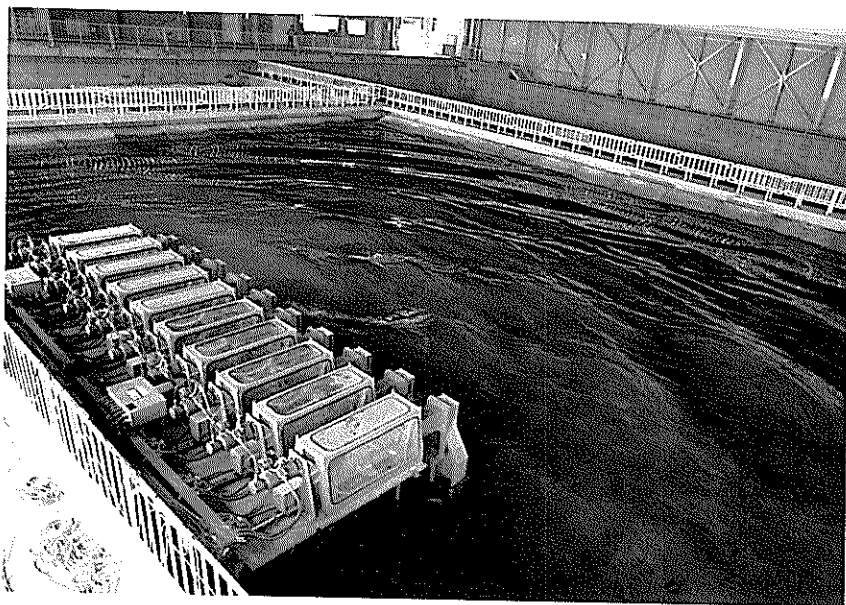
TECHNICAL NOTE OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 509      Dec. 1984

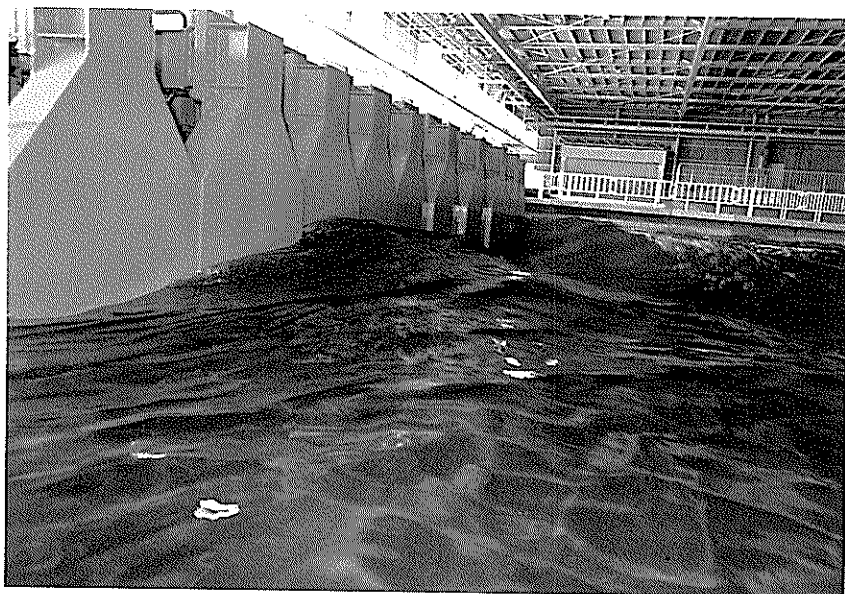
サーペント型造波装置の制御方式と造波特性

高 山 知 司  
永 井 紀 彦  
合 田 良 実

運輸省港湾技術研究所



写真一A サーペント型造波機による斜め交差波の発生



写真一B サーペント型造波機の造波板前面の状況

# 目 次

要 旨 .....	5
1. まえがき .....	6
2. 造波装置および造波信号発生装置 .....	6
2.1 大水深海洋構造物実験場 .....	6
2.2 造波装置 .....	7
2.3 造波信号発生装置 .....	9
3. システムの操作法 .....	11
3.1 造波機の制御系統 .....	11
3.2 システムの操作手順 .....	14
3.3 スイッチング .....	14
4. 造波信号のシミュレーション法 .....	15
4.1 緩起動と緩停止 .....	15
4.2 一方向規則波 .....	16
4.3 一方向不規則波 .....	16
4.4 斜め規則波 .....	17
4.5 多方向不規則波 .....	18
5. サーベント型造波機の造波特性 .....	20
5.1 造波板の運動応答特性に関する検討 .....	20
5.2 D/A 出力時間間隔に関する検討 .....	21
5.3 斜め波の波高・波向測定実験 .....	21
5.4 多方向不規則波発生可能領域に関する検討 .....	25
6. あとがき .....	26
参考文献 .....	29

# Characteristics of Serpent-type Wave-maker and its Control System

Tomotsuka TAKAYAMA\*

Toshihiko NAGAI\*\*

Yoshimi GODA\*\*\*

## Synopsis

Real sea waves have the properties of directional randomness as well known. It is of great importance to carry out hydraulic model tests in the reproduced waves with the properties similar to the real seas.

The Port and Harbour Research Institute has built a serpent-type wave-maker which generates the directional random waves in the experimental basin newly constructed for deep sea offshore structures. In the 1983 fiscal year of Japan, 10 units of the wave-maker and the control system of the wave-maker have been completed. Another more units of the wave-maker are scheduled to be built in the following years.

The present paper describes the characteristics of the wave-maker, the control system and the wave generation by the wave-maker. The wave-maker is a movable serpent-type one whose individual unit has a wave paddle of 0.8 m wide. Independent signal for the wave generation is transmitted to each unit of the wave-maker. The wave-maker is controlled through the micro-computer system, which consists of two systems of D/A converters for the wave signal transmission, digital input and output systems for the control and the monitor, and two remote controllers. Two remote controllers are used to carry out two different experiments simultaneously. The differences among the wave paddle motions in the same signal are small enough to be satisfactory. The time interval of the D/A conversion should be about 0.025 s in order to assure the smooth motions of the wave paddles.

---

\* Chief of the Wave Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

\*\* Member of the Wave Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

\*\*\* Deputy Director General

# サーペント型造波装置の制御方式と造波特性

高山 知 司 \*

永井 紀 彦 \*\*

合田 良 実 \*\*\*

## 要 旨

実際の海の波が方向スペクトルを有する多方向不規則波であることはよく知られている。この多方向不規則波を実験水槽内に再現し、実際の海の波に近い不規則波を用いて水理模型実験を行うことは非常に重要である。

港湾技術研究所においては、新しく建設した大水深海洋構造物実験場に設置する造波装置として、多方向不規則波が発生できるサーペント型造波装置を整備している。昭和58年度には、10台の造波機と制御装置を完成させた。10台の造波機は本造波装置の全体計画の一部であり、今後増設してゆく予定になっている。

本資料は、造波装置および制御方式の特徴、操作方法、造波信号のシミュレーション法と本造波装置の造波特性について記述したものである。

造波装置は、各造波板の幅が80 cmのピストンタイプのサーペント型造波機で、各造波機にはそれぞれ独立の造波信号が入力できるようになっている。本造波装置は造波器5台を1組として、1台の架台の上に固定されており、各組の造波機は架台とともにクレーンで移動できる。

造波装置の制御はミニコンピュータで行われ、本ミニコンピュータは造波信号発生装置にもなっている。そのため、本装置は造波信号出力用のアナログ出力装置、造波機制御用のデジタル出力装置、造波機の状態を監視するデジタル入力装置と2台の端末機からなっている。端末機は同時に2つの実験ができるように、2台備え付けられている。

本造波装置の造波特性を検討した結果、各造波板間の運動振幅および位相のずれは十分満足できるほど小さく、造波信号のD/A出力間隔としては0.025sがよいことがわかった。

---

\* 海洋水理部 波浪研究室長

\*\* 海洋水理部 波浪研究室

\*\*\* 次長

## 1. まえがき

海面を撮った航空写真が示しているように、実際の海の波は波峰線が短く切れた切れ波である。このような切れ波は、さまざまな方向から来襲する波が重なり合うために生じると考えられており、そのため多方向不規則波とも呼ばれている。実際の海の波の方向分布特性については、多くの研究者によって解析されているが、その特性が十分に解明されたとはまだいえない。しかしながら、波のエネルギーの方向分布を示す方向関数についてはいくつかの関数形が提案されており、光易等<sup>1)</sup>やCote等<sup>2)</sup>のものが特に有名である。

波の屈折や回折などの波の変形計算においては、既に波を多方向不規則波として取り扱う方法が提案されており、港湾や海岸の構造物の設計や防波堤の配置計画に活用されている<sup>3),4)</sup>。しかし、これらの計算法の妥当性については模型実験や現地観測によって十分検証されているとはまだいえない。模型実験による検証が十分に行われていないのは、多方向不規則波を発生する造波装置がないことに起因している。このため、実際の海の波に近い多方向不規則波を発生する造波装置の開発が非常に重要となっている。

最初に多方向不規則波を発生させたのは英国の水理研究所 (Hydraulic Research Station) で、その方法は、10台の造波機を円弧状に並べて、各造波機で起した波を円弧の中心付近で重ね合わせて、多方向不規則波を得るものである<sup>5)</sup>。この方法では、多方向不規則波は円弧の中心の2m四方程度の範囲にしか起らず、海洋構造物のような孤立構造物の実験にしか適用できないという問題があった。

英国のエジンバラ大学においては、サーペント型造波機を用いて多方向不規則波を起している<sup>6)</sup>。サーペント型造波機とは、幅の狭い造波板をもつ造波機を一直線状に何台も並べて、隣り合う造波板の運動の位相を制御することによって斜め波を発生させることができる装置のことである。造波時にサーペント型造波機の造波板がへびのようにうねることからこの名称がつけられている。多方向不規則波の発生法としては、サーペント型造波機によって起される斜め波を成分波として、波向の異なる数多くの斜め波を同時に起して、重ね合わせる方法がとられる。この方法では、比較的広い範囲に多方向不規則波が発生できる利点がある。

この方法による多方向不規則波の造波機は、既に、ノルウェーの水理実験所 (Norwegian Hydrodynamic Laboratory)<sup>7)</sup>、デンマークの水理研究所 (Danish

Hydraulic Institute)<sup>8)</sup>、米国の水理センター (Coastal Engineering Research Center)<sup>9)</sup> など世界の主要な実験所において、設置あるいは計画されている。

港湾技術研究所においても、多方向不規則波を発生させることができる造波装置の開発に昭和54年から着手した。それと同時に本造波装置を設置する実験水槽として、大水深海洋構造物実験場の建設を開始し、昭和58年に上屋および水槽が完成した。造波装置としては、多方向不規則波が広範囲に発生できるサーペント型造波装置に決定していたが、サーペント型造波装置の各造波板の幅の選定方法については何ら報告されたものがなかったため、サーペント型造波装置の開発に当たって、まず、サーペント型造波機によって起される斜め波の特性について理論的な検討を行った<sup>10)</sup>。理論的検討の結果および与えられた予算額にも配慮しながら、各造波板幅は80cmとした。昭和58年度に、造波機10台、全造波板幅8m分を完成させた。昭和59年以降も追加製作する予定である。

本資料は、当研究所で開発したサーペント型造波装置の構成とその制御方式の概要および不規則信号の発生方法と発生波の特性について述べたものである。

## 2. 造波装置および造波信号発生装置

### 2.1 大水深海洋構造物実験場

図-1は、サーペント型造波装置を設置している大水深海洋構造物実験場の平面図を示したものである。本実験場の水槽は50m×45mの広さで、その周囲にはプラットフォームが設置されている。水槽の東西には、それぞれに取りはずし可能なゲートが置かれている。さらに、西側の端には、制御室および居室が設けられている。

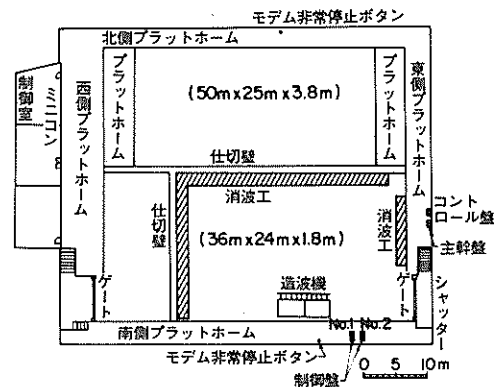


図-1 大水深海洋構造物実験場

水槽は通常の場合、3つに分けて使用される。図-1の平面図では、取りはずし可能な仕切壁で3つの水槽に



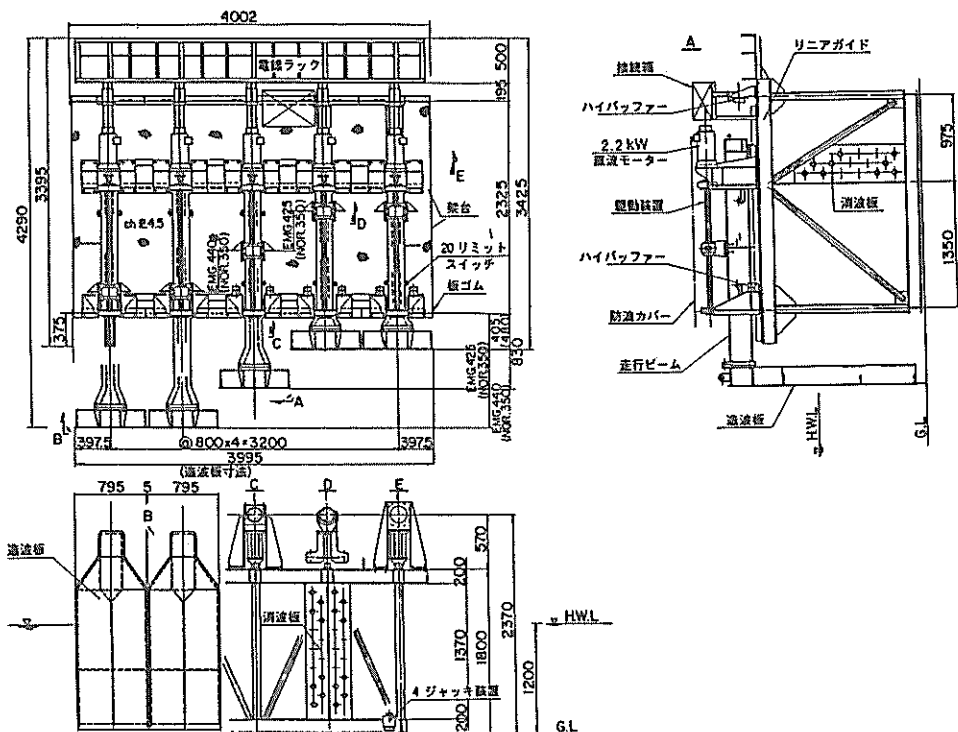


図-3 造波機製作図

表-1 造波機の仕様

モーター	定格出力	2.2 kw
	定格トルク	119 kg cm
	定格回転数	1800 rpm
有効ストローク		± 35cm
造波板	幅	79.5 cm
	側面幅	20 cm
	造波板間のすきま	5 mm
架台	幅	4 m
	奥行	3.5 m
	高さ	1.8 m
	高さ調整	± 2 cm

行ビームは前後2台のローラベヤリングに固定され、このローラベヤリングは一本のリニアガイド上をスライドするようになっている。ローラベヤリングの中心間隔は1.5mで、ローラベヤリングはリニアガイド上をスライドするが、上下の往復荷重が作用してもリニアガイドからはずれることはないような構造になっている。本造波機においてはローラベヤリングおよびリニアガイドが非

常に重要な要素であるため、造波時に大きな往復荷重が作用しても、それに十分耐え、寿命も十分あるものが選定されている。

造波板の有効ストロークは、±35cmである。この有効ストロークを超えて造波板が運動すると、リミットスイッチが働き、造波板の運動が強制的に停止させられる。しかし、造波板がリミットスイッチを超えて動く場合も想定してゴムパッファーのストッパーがリミットスイッチの外側に設けてある。

造波板間の隙間は5mmであるため、厳密な意味では造波板の幅は795mmとなる。斜め波あるいは多方向不規則波を発生させる場合、各造波板は位相がずれて運動する。造波板の側板の幅が狭いと、造波板間で大きくない違いが生じ、渦が発生して造波効率が低下する。そのため、造波板の側板の幅を20cmにとり、造波板の運動の位相がずれても、大きな渦が発生しないようにしている。

架台の4ヶ所の脚には、それぞれ±2cm以内の高さ調整ができるジャッキが取り付けられている。このジャッキは架台の脚を水槽床に密着させ架台の振動をできるだけ少なくするためと、造波板間の隙間が5mmと小さいので、架台を水平に保つ必要があるために取り付けられている。



### (3) 制御盤

表-2は、制御盤の機能を示したものである。制御盤は1台で1舞台上の5台の造波機を制御する。制御盤には、主回路電圧計、主回路電流計および各モータの電流計が備えつけられており、電圧値と電流値をモニターすることができる。造波板がリミットスイッチを越えて運動したとき、造波機のモータに過電流が流れたとき、および造波機のモータがオーバーヒートしたときは、異常を表示するランプとブザーが働き、5台の造波機の運転を同時に停止させる。これらの異常状態は、制御盤に備えつけられているボタンを押すことによって5台の造波機をリセットすることができる。造波板を中立位置に戻すことも、ボタン操作一つで可能である。

表-2 制御盤の機能

計機による表示	主回路電圧計 主回路電流計 各モータの電流計
異常表示 (ランプ、ブザー)	リミットオーバー 過電流 オーバーヒート
ボタン操作	異常リセット 行き過ぎ復帰
スイッチ操作	手動/ミニコン 操作切換
BNC端子	各造波板に入力する信号 各造波板の変位 各モータの電圧 各モータの電流

制御盤には、主動/ミニコン操作切換スイッチがあり、このスイッチを手動にすれば、制御盤に備えつけられた造波板駆動用のダイヤルを回転させることによって各造波板を手動運転することができる。一方、このスイッチをミニコン操作にすれば、ミニコンからの信号によって造波機を運転することができる。制御盤には、各造波機に対応する入力信号、造波板変位、各モータの電圧と電流をモニターするためのBNC端子が備えつけられている。このため、ペンオシロやデータレコーダを用いて、これらの信号をモニターすることが可能である。

### (4) コントロール盤

表-3はコントロール盤の機能を示したものである。コントロール盤は、ミニコンと制御盤との信号のやり取りをおこなうほか、非常停止信号のリセットボタンを有す

表-3 コントロール盤の機能

ミニコンと制御盤との 間の信号の伝達	アナログ出力 デジタル入出力
非常停止リセットボタン	

る。非常停止ボタンは、図-1に示されるように、大水深海洋構造物実験場内の南側と北側とのプラットホーム上に設置されているボタンである。このボタンを押すことによって造波機はただちに運転を停止する。運転を再開するためにはコントロール盤に備えられた非常停止リセットボタンを押さなければならない。また、コントロール盤は運転ON/OFFの信号を受けると、緩起動および緩停止の機能が働く。

### 2.3 造波信号発生装置

#### (1) 全体構成

送波信号の計算と発生および造波機のコントロールは、すべて写真-2に示されるミニコンシステムによってお

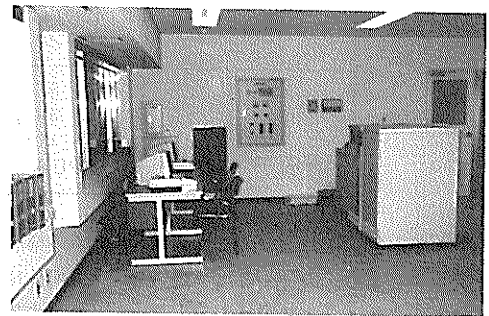


写真-2 制御室のミニコンシステム

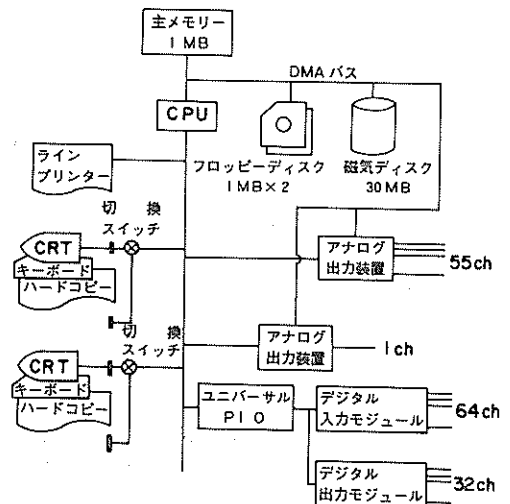


図-4 ミニコンシステム構成図

表-4 ミニコンシステムの仕様

中央処理装置	基本ワード長 主メモリーサイズ サイクルタイム	32ビット 1 Mバイト 0.6 $\mu$ s/4 バイト
固定ディスク (1基)	メモリーサイズ	30.4 Mバイト
フロッピーディスク (2基)	サイズ	8インチ (1 Mバイト)
ラインプリンター (1基)	印字速度 印字数 字種	240行/分 132字/行 128種
アナログ出力装置 (2基) 55 ch 用と1 ch 用	方式 出力速度  出力レンジ 分解能	DMA (A + 3N) $\mu$ s ここで A: 3~7 N: 出力点数  $\pm 10$ V S + 11ビット ( $\pm 2048$ )
デジタル入力装置	入力信号 チャンネル数	1ビット 64
デジタル出力装置	出力信号 チャンネル数	1ビット 32
CRT (2基) 1基はコンソール兼用	表示部 文字数 ハードコピー付 CPUとモデムで接続	12インチ 1920字 (80字×24行)

こなわれる。図-4は、このミニコンシステムの構成を示したものであり、表-4はミニコンシステムの仕様を示したものである。本装置は主として、ミニコン本体、造波信号を発生するアナログ出力装置、造波機制御用デジタル出力装置、モニター用デジタル入力装置およびデータ入力用の端末機から成っている。

### (2) ミニコン本体

本ミニコンは、32ビットミニコンで、主メモリーサイズは1MBである。外部記憶装置としては、30MBの磁気ディスクと、1MBのフロッピーディスク2基が備えつけられている。外部記憶装置は、プログラムの収納や造波信号データの収納に用いられるものである。プログラムの開発およびディバックのため、ラインプリンターも備えつけられている。

### (3) アナログ出力装置

造波板の運動を制御するためのアナログ信号を発生させるものである。将来、2つの実験を並行して実施することができるようにするため、2系列のアナログ出力を独立に並行しておこなうことができるようになっている。2系列のうちの1つ(A系列と呼ぶ)は、55chまでの

アナログ信号をそれぞれ独立に発生できるようになっており、その信号を調整することによって所要の方向スペクトルを有する多方向不規則波が発生できる。他の1つ(B系列と呼ぶ)は、1chだけのアナログ信号を発生するようになっており、すべての造波板がこの信号に従って同じように動き、これによって造波板の運動方向に伝播する波が発生できる。

アナログ信号の出力は、DMA方式によっておこなわれる。DMA(Direct Memory Access)とは、あらかじめメモリーあるいは固定ディスク内のファイルに収録されたデータを、CPUを介さずに、一定の時間間隔ごとにD/A変換しアナログ出力する方式である。DMA方式の長所としては、D/A変換時間間隔を精度よくコントロールすることができ、本システムのような多チャンネルのD/A変換においても、チャンネル間のD/A変換時間のずれを非常に小さく押えることができることがあげられる。一方、DMA方式の短所としては、D/A変換するデータをメモリーや磁気ディスク内のファイルにあらかじめ収録しておかなければならないため、新しいデータを計算しながらアナログ出力をすることができ

ないことがあげられる。

#### (4) デジタル入力装置

本装置は、造波機の準備・運転のON-OFF状態、A系列あるいはB系列や休止の切換状態あるいは、各ユニットごとの異常信号の有無などの状態など、造波機から送られてくる1ビットのデジタル信号を入力し、造波機の状態をモニターするために用いられる。デジタル入力信号は、64chまで入力可能であるが、そのうちの44chを使用している。

#### (5) デジタル出力装置

本装置は、造波機の準備・運転のON-OFF 切換、各ユニットごとにA系列・B系列・休止の切換および位置と推力制御の切換等をおこなうためのデジタル信号を送る装置である。現在、32chまでの1ビットのデジタル信号の出力が可能であるが、そのうちの28chを使用している。

#### (6) 端末器

2系列の実験を並行しておこなうことができるように、本ミニコンシステムは2台の端末器を有している。各端末器は、CRT（キャラクターディスプレイ）とその画面をコピーできるハードコピー装置から成っている。2台の端末器は通常は制御室内に設置されているが、図-1に示す南側と北側のプラットホーム上のモデムに配線し、プラットホーム上で操作することも可能である。端末器を制御室内に設置する場合とプラットホーム上に設置する場合との切換は、図-4に示す制御室内に設置された切換スイッチによっておこなう。写真-3は、南側プラットホーム上に設置されたモデム（柱の下部）と、造波機非常停止ボタンを示している。写真-4は、南側プラットホーム上で端末器を操作している状況を示したものである。



写真-3 プラットホーム上のモデムと非常停止ボタン

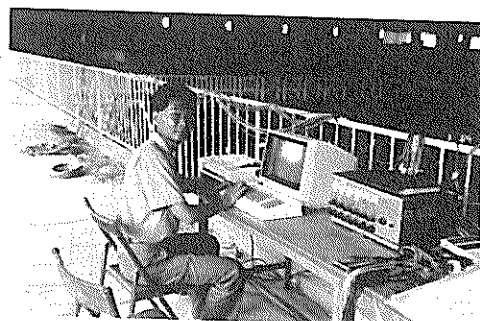


写真-4 プラットホーム上に移設したCRTによる造波機制御

### 3. システムの操作法

#### 3.1 造波機の制御系統

図-5は、造波機の制御系統を示したものである。本サーベント型造波機は従来の造波機とは異なり、ミニコン端末器のCRTおよびキーボードが造波機操作盤としての機能を果している。

2台の端末器のうちの1台は、コンソールを兼用している。システムの立ちあげおよび終了は、常にコンソール用の端末器からおこなわなければならない。しかし、システムが立ちあがっている間は、2台の端末器はまったく同じ機能を有する。

ミニコンと造波機との間の信号の受け渡しは、すべてプラットホーム上に設置されたコントロール盤を通じておこなわれる。ミニコンからコントロール盤へ送られる信号としては、2系列のアナログ信号と28chの1ビットデジタル信号が挙げられる。コントロール盤からミニコンへは44chの1ビットデジタル信号が送られる。これらの信号について以下に説明する。

##### (1) 造波板の運動を制御するためのアナログ信号

2系列の実験を同時に実施できるようにするため、2系列のアナログ信号を独立に発生できるようになっている。

一つは、A系列と呼ばれるアナログ信号発生装置であり、最大55chの信号を発生させることができる。各造波機に入力する信号の位相差を調整することによって方向性を有する波を発生させることができる。他の一つは、B系列と呼ばれるアナログ信号であり、1chだけのアナログ信号で、B系列になっている造波機を同一位相で動かす。

各造波機は、5台1組として1台の制御盤で制御され、各制御盤ごとにA系列かB系列か休止(OFF)のどれかを選択することになっている。A系列を選択した場合に

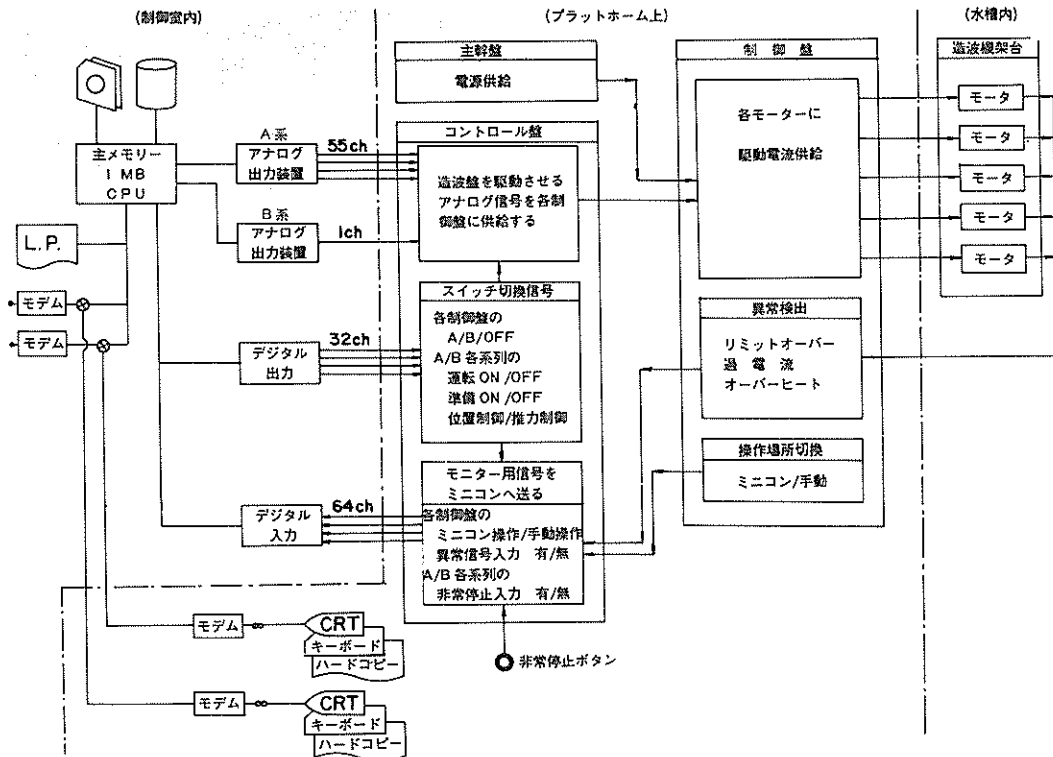


図-5 造波機の制御系統

は、A系列の造波機にそれぞれ独立の造波信号が入力できる。また、B系列を選択した造波機には同一の信号がどの造波機にも入力される。しかし、A系列を選択した造波機でも各造波機への入力信号を同じにすれば、B系列を選択した場合と同じことになる。

各造波機は上述のように3つのうちのどれかが選択されるため、端末器が2台あって、1台の端末器を用いてA系列を起しているとき、他の端末器ではB系列の波しか起すことはできない。逆の場合もありうるが、A系列の場合には上述のようにB系列と同じように起すことは可能である。

(2) 造波機のスイッチ切り換えするためのデジタル出力信号

本ミニコンは、コントロール盤へ1ビットのデジタル信号を32chまで送ることができる。このデジタル信号によって、以下のスイッチ切り換えをおこなうことができる。ただし、この切り換えスイッチによって各系列に属する制御盤が同時に切り変わる。

- a) A系列に設定されている各制御盤に対して
- |    |        |
|----|--------|
| 準備 | ON-OFF |
| 運転 | ON/OFF |

- |                        |           |
|------------------------|-----------|
| 入力信号                   | 位置制御/推力制御 |
| b) B系列に設定されている各制御盤に対して |           |
| 準備                     | ON/OFF    |
| 運転                     | ON/OFF    |
| 入力信号                   | 位置制御/推力制御 |

- c) 各制御盤に対して
- |      |         |
|------|---------|
| 入力信号 | A/B/OFF |
|------|---------|
- c)のスイッチ切り換えにおいてAはA系列、BはB系列の信号を受けることを意味し、OFFは休止を示す。この切り換えを行うためには各制御盤ごとに2ビットの信号が必要である。

- (3) 造波機の監視をするためのデジタル入力信号
- 本ミニコンは、1ビットのデジタル入力信号を64chまで読み取ることができるようになっていて、これによって、造波機のスイッチ状態の監視をおこなうことができる。

監視の内容としては、(2)で述べた a), b), c)に以下の項目が加わる。

- d) A・B各系列に対する非常停止信号の入力
- 非常停止信号とは、緊急に造波機の運転を停止させるためのものである。写真-3に示すプラットフォーム上の

表-5 デジタル信号コード

CH	内 容	(1)信号	(0)信号	備 号	
1	A系列準備	ON	OFF	IN・OUT に共通	
2	A系列運転	ON	OFF		
3	A系列入力信号	位置制御	推力制御		
4	B系列準備	ON	OFF		
5	B系列運転	ON	OFF		
6	B系列入力信号	位置制御	推力制御		
9	第1制御盤入力信号切換	A	B		
10		ON	OFF		
11	2 "	A	B		
12		ON	OFF		
13	3 "	A	B		
14		ON	OFF		
15	4 "	A	B		
16		ON	OFF		
17	5 "	A	B		
18		ON	OFF		
19	6 "	A	B		
20		ON	OFF		
21	7 "	A	B		
22		ON	OFF		
23	8 "	A	B		
24		ON	OFF		
25	9 "	A	B		
26		ON	OFF		
27	10 "	A	B		
28		ON	OFF		
29	11 "	A	B		
30		ON	OFF		
33	第1制御盤からの異常信号入力	有	無		INのみ
34		2 "	有		
35		3 "	有	無	
36		4 "	有	無	
37		5 "	有	無	
38		6 "	有	無	
39		7 "	有	無	
40		8 "	有	無	
41		9 "	有	無	
42		10 "	有	無	
43		11 "	有	無	
44	A系列非常停止信号入力	有	無		
45	B系列非常停止信号入力	有	無		
49	第1制御盤の操作場所	ミニコン	制 御 盤		
50		2 "	"		"
51		3 "	"		"
52		4 "	"		"
53		5 "	"		"
54		6 "	"		"
55		7 "	"		"
56		8 "	"		"
57		9 "	"		"
58		10 "	"		"
59		11 "	"		"

ボタンを押すことによって造波機はただちに運転を停止する。非常停止信号が ON になっている間は、造波機の運転はできない。非常停止信号の解除は、コントロール盤内のリセットボタンを押しておく。

(e) 各制御盤の操作場所 ミニコン/手動

各制御盤には、手動/ミニコンの切換スイッチがある。このスイッチを手動にすると、その制御盤が制御する5台の造波機を手動操作することができる。スイッチが手動になっていると、ミニコンから制御盤を操作することができないので、通常は、このスイッチをミニコン操作に切換えておかなければならない。

(f) 各制御盤への異常信号入力 有/無

各制御盤に以下のような異常が生じたときは、制御盤からコントロール盤へ異常信号が送られる。

- (i) 造波板のオーバートラベルによってリミットスイッチが働いたとき
- (ii) 過電流が流れたとき
- (iii) オーバーヒートしたとき

表-5は、ミニコンから入出力される1ビットデジタル信号の内容をチャンネル別に示したものである。

3.2 システムの操作手順

図-6は、本システムの操作手順をフローで示したものである。プログラムとして示した部分は、著者らが開発したプログラムを実行させる部分を示している。

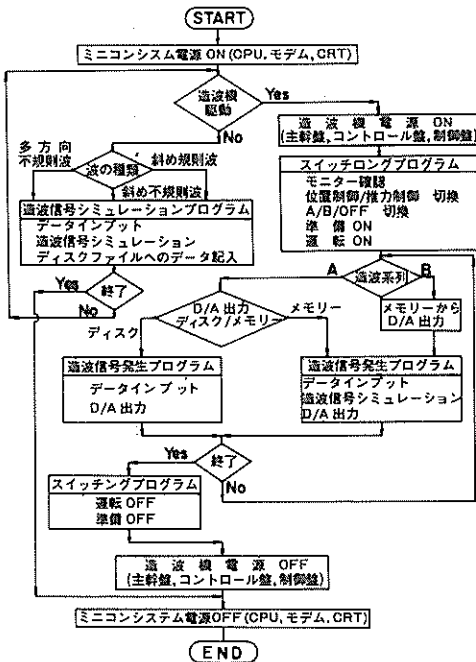


図-6 システムの操作手順

造波機の運転に先だって、デジタル信号出力によってスイッチ切換をおこなわなければならない。また、造波機運転終了後には、やはりスイッチ切換によって運転状態を OFF にしておかなければならない。このためのプログラムがスイッチングプログラムである。

造波機は、アナログ信号によって運転されるが、アナログ信号には、A系列およびB系列の2通りの系列が存在する。B系列(一方向)は、1chだけのD/A変換をおこなう系列なので、データ数は比較的少なく、造波信号のシミュレーションに必要な計算時間も比較的短時間で済むので、ディスクファイルを用いず、造波するごとに造波信号を計算し、主メモリからD/A変換しアナログ出力をおこなうようにしている。一方、A系列(多方向)は、多チャンネルのD/A変換をおこなう系列なので、データ数が多く主メモリだけでは対処しきれないことが多い。そのため、主メモリから直接D/A変換する方式の他に、造波データを一旦ディスクファイルに記録し、ディスクファイルから直接D/A変換ができる方式がとられている。

3.3 スイッチング

図-6のフローに示されるように、造波機を運転する前および運転終了後には、スイッチングプログラム(プログラムNDI $\bar{O}$ )を起動させなければならない。

造波機を運転させるためのスイッチ切換の手順は、図-7に示されるように、以下の手順でおこなう。

(1) はじめにスイッチ状態をモニターして次の点を確認する。

(i) 非常停止信号が入力されていないこと。  
もし、非常停止が ON と表示されていれば、造波機はミニコンの指令に従わない。非常停止信号を解除するためには、コントロール盤内のリセットボタンを押す。

(ii) 各制御盤に異常信号が入力されていないこと  
異常信号が ON と表示されていれば、やはり造波機は運転できないので、異常の原因を究明し異常状態を解消させなければならない。

(iii) 操作場所がミニコンになっていること  
操作場所が手動になっていると造波機はミニコンからの指令に従わないので、制御盤内のスイッチをミニコン操作に切換えなければならない。

(2) 位置制御と推力制御の切換をおこなう。

(3) 各制御盤ごとにアナログ信号を受ける系列を指定する。

各制御盤ごとに、A系列から信号を受けるか、B系列から信号を受けるか、どちらからも信号を受けずに運転させないかを、指定することができる。このとき、以下

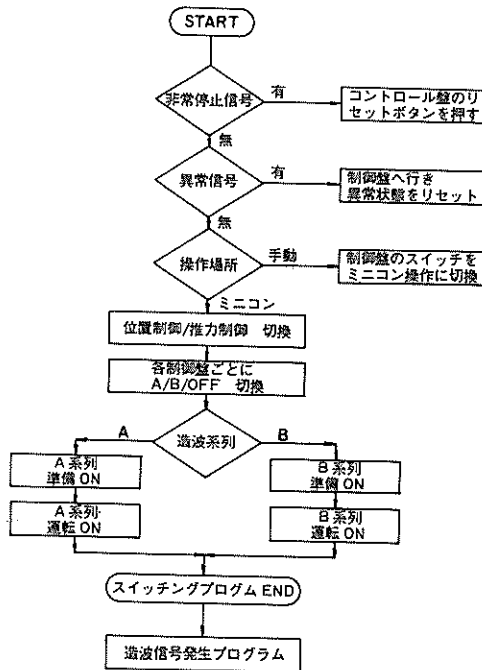


図-7 スイッチングの操作手順

NDIO (CR)

(\*DIO\* ケンサプログラム スタート)

- \*デジタル データ ニュウリョク (IN)
- \*デジタル データ シュツリョク (OT)
- \*プログラム シュウリョク (EO)
- \*キー イン (IN) (OT) (EO) ? IN (CR)

----- (DIW) INPUT DATA DISPLAY -----

```

*****IPNUT SIGNAL FROM CONTROLL UNIT*****
A- ジュネ OFF ウンテン OFF SIGNAL イチ          ****ヒジョウテイシ OFF
A- ジュネ OFF ウンテン OFF SIGNAL イチ          ****ヒジョウテイシ OFF
1--UNIT A      ON      ****イジョウ OFF      ソウサ ミニコン
2--UNIT A      ON      ****イジョウ OFF      ソウサ ミニコン
3--UNIT A      OFF     ****イジョウ OFF      ソウサ シュドウ
4--UNIT A      OFF     ****イジョウ OFF      ソウサ シュドウ
5--UNIT A      OFF     ****イジョウ OFF      ソウサ シュドウ
6--UNIT B      OFF     ****イジョウ OFF      ソウサ シュドウ
7--UNIT A      OFF     ****イジョウ OFF      ソウサ シュドウ
8--UNIT A      OFF     ****イジョウ OFF      ソウサ シュドウ
9--UNIT A      OFF     ****イジョウ OFF      ソウサ シュドウ
10--UNIT A     OFF     ****イジョウ OFF      ソウサ シュドウ
11--UNIT B     OFF     ****イジョウ OFF      ソウサ シュドウ

```

\*デジタル データ ニュウリョク エンド\*

\*\*\*\*\*プリント (OK) キー イン\*\*\*\*\* OK (CR)

図-8 スイッチングプログラムによるスイッチ状態のモニター例

のように2ビットの信号出力を要する。

A系列かB系列か	A/B
信号受けるか受けないか	ON/OFF

ここで、OFFは休止の場合を意味する。

本操作において、A系列あるいはB系列の準備がONになっている場合、切換を行うようにスイッチング操作しても機械的にこの操作ができないようになっている。したがって、造波機の系列切換は、他のどの1台の造波

機の準備がONであっても、おこなうことはできない。  
 (4) A系列を運転させるときは、A系列の準備および運転をONに切換え、B系列を運転するときには、B系列の準備および運転をONに切換える。

以上の手順によって造波機の運転をONに切換えた後、アナログ信号を発生させるプログラムを起動し、造波機を運転する。造波機運転終了後は、図-6に示すように、再びこのスイッチングプログラムを起動し、運転および準備をAB両系列OFFにしておかなければならない。

図-8は、プログラムNDIOを起動したときにCRT画面上にあらわれた表示の一例である。(IN)とキーインすることによって、図-8に示されるような、コントロール盤から送られるデジタル信号を画面に表示し、スイッチ状態を知ることができる。次に(OT)とキーインし、表-5に示される各チャンネルのデジタル出力を1つつ変えればよい。

## 4. 造波信号のシミュレーション法

### 4.1 緩起動と緩停止

造波機に過大な負荷を与えるのを防ぐため、造波信号のシミュレーションにあたっては、緩起動と緩停止が必要になる。緩起動とは、造波信号のD/A出力開始時に、数秒間程度の時間をかけて徐々にアナログ信号レベルをゼロから所要のレベルまで増加させることであり、緩停止とは、造波信号のD/A出力終了時に徐々にアナログ信号レベルをゼロに落とすことである。

緩起動および緩停止をさせるためには、造波信号のシミュレーションにおいて、それぞれ1行のIF文を挿入すればよい。(NDATA)個の造波信号を計算し、造波信号をIETA(NDATA)という行列に収納したとする。緩起動および緩停止のデータ数をそれぞれ100個とすると、以下のルーチンをシミュレーションプログラムに加えればよい。

D0 10 I=1, NDATA

IF (I. LT. 100) IETA (I) = IETA (I) \* I / 100

IF (I. GT. (NDATA - 100)) IETA (I) =

IETA (I) \* (NDATA - I) / 100

10 CONTINUE

なお、緩起動および緩停止は、規則波信号のシミュレーションに限らず、すべての造波信号に必要である。

運転ON/OFFの操作によって、コントロール盤内でも自動的に緩起動・緩停止の機構が電気的に働くようになっているが、運転をONにして、しばらくしてから信

号を出力する場合、あるいは運転を OFF にする前に計算された造波信号がすべて出力される場合にはこの緩停止機構が働かないので、造波信号の最初と最後に上記のようにソフト的に緩起動・緩停止の信号を入れておくのがよい。

緩起動や緩停止をソフトで実行する場合、緩起動や緩停止に要する時間は任意に設定できる。一方、本造波機にハード的に組み込まれている電気回路の緩起動や緩停止に要する時間は、3秒間に固定されている。

#### 4.2 一方向規則波

##### (1) 基礎式

規則波信号は、式(1)によって計算される。

$$\zeta(t) = \frac{H}{2} \frac{1}{F} \sin \sigma t \quad (1)$$

ここに、 $\zeta$ は造波板の変位、 $H$ は発生波高、 $F$ は造波効率、 $\sigma$ は角周波数 ( $2\pi/T$ )、 $t$ は時間である。ピストン型造波機の造波効率  $F$  は、水深  $h$  と  $\sigma$  との関数であり、式(2)によって計算される<sup>1)</sup>。

$$F = 4 \sinh^2 kh / \{ 2kh + \sinh 2kh \} \quad (2)$$

ここに、波数  $k$  は、次式の実数解である。

$$\sigma^2 = gk \tanh(kh) \quad (3)$$

ここに、 $g$ は重力加速度 ( $9.8 \text{ m/s}^2$ ) である。

##### (2) 必要な入力データ

###### (i) 造波時間 (s)

造波機を運転する時間

###### (ii) D/A 出力間隔 (s)

アナログ信号を発生させる時間間隔。造波信号の全データ数は、(造波時間) / (D/A 出力間隔) となる。

###### (iii) 発生させる波の波高 $H$ (cm)

###### (iv) 波の周期 $T$ (s)

###### (v) 水深 $h$ (cm)

#### 4.3 一方向不規則波

##### (1) 基礎式

一方向不規則波信号は、式(4)に示すように、 $N$ 個の正弦波の重ね合わせとしてシミュレーションできる。

$$\zeta(t) = \sum_{n=1}^N \frac{a_n}{F_n} \cos(\omega_n t + \epsilon_n) \quad (4)$$

ここに、 $n$ は各成分波を意味し、 $a_n$ は各成分波の振幅、 $\omega_n$ は各成分波の角周波数を示している。 $F_n$ は各成分波の造波効率であり、ピストン型の造波機に対しては式(2)によって求めることができる。 $\epsilon_n$ は位相角であり、0から $2\pi$ までの値をとるが、 $\epsilon_n$ の値は乱数を用いて決

定する。 $a_n$ は、周波数スペクトル  $S(f)$  から式(5)を用いて次式のように求めることができる。

$$a_n = \sqrt{2 \int_{f_1}^{f_2} S(f) df} \quad (5)$$

ここに、 $f_1$ と $f_2$ は、それぞれ、 $n$ 番目の正弦波が代表する周波数帯の下限と上限である。周波数分割数  $N$ としては、50以上が望ましいとされている。ここで、周波数成分の分割にあたっては各成分波の振幅がほぼ同程度になることが望ましいので、周波数スペクトル  $S(f)$  を等エネルギー分割する手法<sup>2)</sup>を用いている。

周波数スペクトル  $S(f)$  の形状は、式(6)で示されるプレットシュナイダー光易型<sup>3)</sup>、および式(7)~(10)で示される JÖNSWAP 型<sup>4)</sup>を選ぶことができる。

プレットシュナイダー光易型の周波数スペクトルは、有義波高  $H_{1/3}$  と有義波周期  $T_{1/3}$  とを用いて次式で示される。

$$S(f) = 0.257 H_{1/3}^2 T_{1/3} (T_{1/3} f)^{-5} \times \exp \{ -1.03 (T_{1/3} f)^{-4} \} \quad (6)$$

一方、JÖNSWAP 型の周波数スペクトルは、 $H_{1/3}$ 、ピーク周期  $T_p$ 、式(8)~(10)によって求まるパラメータ  $\alpha$ 、 $r$ 、 $\sigma$  によって次式で示される。

$$S(f) = \alpha H_{1/3}^2 T_p^{-4} f^{-5} \exp \{ -1.25 (T_p f)^{-4} \} \times r \exp \{ - (T_p f - 1)^2 / 2 \sigma^2 \} \quad (7)$$

ここに、

$$\alpha = 0.0624 / \{ 0.23 + 0.0336 r - 0.185 (1.9 + r)^{-1} \} \quad (8)$$

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_a & : f \leq f_p \\ \sigma_b & : f > f_p \end{cases} \quad (9)$$

$$r = 1 \sim 7, \sigma_a \doteq 0.07, \sigma_b \doteq 0.09 \quad (10)$$

である。

##### (2) 必要な入力データ

プレットシュナイダー光易型周波数スペクトルを有する一方向不規則波の発生には、以下の入力データが必要である。

###### (i) 造波時間 (s)

###### (ii) D/A 出力間隔 (s)

###### (iii) 有義波高 $H_{1/3}$ (cm)

###### (iv) 有義波周期 $T_{1/3}$ (s)

###### (v) 水深 $h$ (cm)



(vi) 周波数分割数  $N$

(vii) 初期位相乱数値  $j$

$j$ に同じ値を入力すると同じ波連が、異なる値を入力すると異なる波連が発生される。

JONSWAP型周波数スペクトルの場合には、以上の入力データに加えて  $r, \sigma_a, \sigma_b$  を入力すればよい。

(3) シミュレーションの方法

B系列で不規則波を発生させる場合、 $i$ 番目のタイムステップにおける造波板変位  $\zeta_i$  は、次式で示される。

$$\zeta_i = \sum_{n=1}^N \frac{a_n}{F_n} \cos(i \sigma_n \Delta t + \varepsilon_n) \quad (11)$$

式(11)をそのまま計算するためには、各タイムステップごとに  $N$ 回の三角関数の重ね合わせ計算をしなければならないが、以下に示すように加法定理を利用することによって、演算量を大幅に減少させることが可能である。

$$\eta_{n,i} = \frac{a_n}{F_n} \cos(i \sigma_n \Delta t + \varepsilon_n) \quad (12)$$

$$\beta_n = 2 \cos(\sigma_n \Delta t) \quad (13)$$

とおくと、式(14)が成り立つ。

$$\eta_{n,i+1} = \beta_n \eta_{n,i} - \eta_{n,i-1} \quad (14)$$

したがって、

$$\zeta_{i+1} = \sum_{n=1}^N (\beta_n \eta_{n,i} - \eta_{n,i-1}) \quad (15)$$

となり、式(15)を各タイムステップごとに計算すればよいことになる。

式(15)を用いてシミュレーションする場合、所要計算時間は、タイムステップ数と周波数分割数  $N$  とに比例する。本ミニコン(東芝: DS 600/40)を用いてシミュレーションを実施すると、300秒分の不規則波信号を得るのに  $\Delta t = 0.025$ 秒  $N = 100$ として約30秒間の計算時間でよい。

#### 4.4 斜め規則波

A系列の造波信号は、B系列とは異なり、各チャンネルごとに別々のデータを与えなければならないので、非常にデータ数が多くなる。このため、B系列と同様に主メモリーからただちにD/A出力する方法に加えて、いったん、ディスクファイルに記録されたデータを、CPUを介さずに直接D/A出力する方法がある。斜め規則波の発生は両者の方法でおこなうことができるようになっている。多方向不規則波の発生は、4.5で述べるようにシミュレーション時間が長くなるため、後者の方法だけ

でおこなうようにしている。

(1) 基礎式

斜め規則波信号は、式(16)によって計算される。

$$\zeta(t, l) = \frac{H}{2F} \sin(\sigma t - l k b \cos \alpha) \quad (16)$$

ここに  $l$  は造波板の番号(波進行方向に向かって左側から  $1, 2, \dots$ )、 $\zeta(t, l)$  は  $l$  番目の造波板の運動変位、 $H$  は波高、 $F$  は式(2)で求まる造波効率、 $\sigma$  は角周波数、 $k$  は波数、 $b$  は各造波板の幅、 $\alpha$  は波の進行方向を示している。この方法によって起された斜め規則波を写真-5および6に示す。

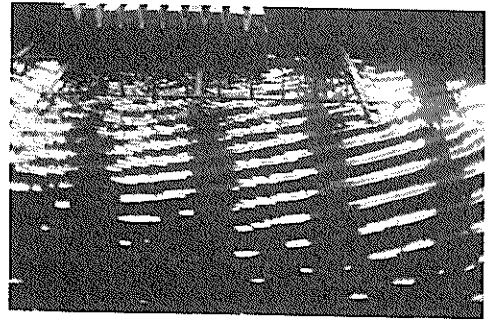


写真-5 一方向斜め規則波 (1)



写真-6 一方向斜め規則波 (2)

造波板の中心線に対して対称な2つの斜め規則波を重ね合わせると、三角波が造波板前面で発生することになる。このような波を起す場合の造波板の変位は次式で与えられる。

$$\zeta(t, l) = \frac{H}{2F} \{ \sin(\sigma t - l k b \cos \alpha) + \sin(\sigma t + l k b \cos \alpha) \} \quad (17)$$

式(17)によって計算・発生された2方向斜め規則波を写真-7に示す。

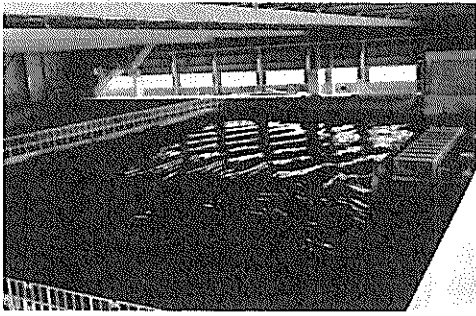


写真-7 二方向斜め規則波

(2) 必要な入力データ

必要な入力データを以下に示す。

(i) D/A 出力チャンネル指定

全部で55chのD/A出力が可能である中で、何チャンネルから何チャンネルにD/A出力をするのかを指定する。

- (ii) 造波時間 (s)
- (iii) D/A出力間隔 (s)
- (iv) 波高  $H$  (cm)
- (v) 周期  $T$  (s)
- (vi) 水深  $h$  (cm)
- (vii) 波向  $\alpha$  (deg)

$\alpha = 90^\circ$  とすると、すべての造波板が同じ位相で動くことになり、1つの造波信号で造波機を動かすB系列による駆動と同じになる。

4.5 多方向不規則波

(1) 基礎式

多方向不規則波は、式(18)のように  $N \times M$  個の正弦波の重ねあわせとしてシミュレーションすることができる。

$$\zeta(t, l) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \frac{a_{nm}}{F_n} \cos(\sigma_n t - l k_n b \cos \theta_m + \epsilon_{nm}) \quad (18)$$

ここに、 $\zeta(t, l)$  は、 $l$  番目の造波板の時刻  $t$  における変位を示す。ここに  $N$  は周波数分割数、 $M$  は方向分割数である。 $a_{nm}$  は各成分波の振幅、 $F_n$  は造波効率、 $\sigma_n$  は角周波数、 $k_n$  は波数、 $b$  は一枚当りの造波板の幅、 $\theta_m$  は成分波の波向、 $\epsilon_{nm}$  は乱数で与える位相角である。

$a_{nm}$  は、式(19)によって求めることができる。

$$a_{nm} = \sqrt{2 \int_{f_1}^{f_2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} S(f, \theta) d\theta df} \quad (19)$$

ここに  $f_1 \sim f_2$  および  $\theta_1 \sim \theta_2$  は、それぞれ成分波

が代表する周波数および波向の範囲である。 $S(f, \theta)$  は方向スペクトルである。

波の方向スペクトル  $S(f, \theta)$  は、式(20)に示されるように周波数スペクトル  $S(f)$  と方向関数  $G(f; \theta)$  との積として一般に示される。

$$S(f, \theta) = S(f) G(f; \theta) \quad (20)$$

ここでは、 $S(f)$  には式(6)で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用い、 $G(f; \theta)$  には式(21)で示される光易型の方向関数を用いている。

$$G(f; \theta) = G_0 \cos^{2S} \left( \frac{\theta}{2} \right) \quad (21)$$

ここで、 $G_0$  は波向範囲における  $G(f; \theta)$  の積分値を1とするための係数なので、最大方向角  $\theta_{\max}$  と最小方向角  $\theta_{\min}$  を用いて、式(22)によって求めることができる。

$$G_0 = \left[ \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \cos^{2S} \left( \frac{\theta}{2} \right) d\theta \right]^{-1} \quad (22)$$

$S$  は方向集中度を示す値であり、方向分散パラメータ  $S_{\max}$  およびピーク周波数  $f_p$  から式(23)のように求められる。

$$S = \begin{cases} S_{\max} (f/f_p)^5 & f \leq f_p \\ S_{\max} (f/f_p)^{-2.5} & f \geq f_p \end{cases} \quad (23)$$

ただし、

$$f_p = 1 / (1.05 T^{1/3}) \quad (24)$$

(2) 多方向不規則波のシミュレーション手法

A系列で不規則波を発生させる場合、 $i$  番目のタイムステップにおける  $l$  番目の造波板変位  $\zeta(i, l)$  は、次式で示される。

$$\zeta(i, l) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \frac{a_{nm}}{F_n} \cos(i \sigma_n \Delta t - l k_n b \cos \theta_m + \epsilon_{nm}) \quad (25)$$

式(25)をそのまま計算すると、各タイムステップごとに  $\{N \times M \times (\text{造波機台数})\}$  回の三角関数の重ねあわせ計算をしなければならないが、加法定理を利用することによって、計算時間の大幅な短縮が可能である<sup>15)</sup>。

$$C_{n,l} = \sum_{m=1}^M \frac{a_{nm}}{F_n} \cos(\epsilon_{nm} - l k_n b \cos \theta_m) \quad (26)$$

$$S_{n,l} = \sum_{m=1}^M \frac{a_{nm}}{F_n} \sin(\epsilon_{nm} - l k_n b \cos \theta_m) \quad (27)$$

とくと、式(28)は式(29)のように示される。

$$\zeta_{i,t} = \sum_{n=1}^N \left[ C_{n,t} \cos(i \sigma_n \Delta t) - S_{n,t} \sin(i \sigma_n \Delta t) \right] \quad (28)$$

すなわち、式(28)および式(29)によって、あらかじめ  $C_{n,t}$  と  $S_{n,t}$  を求めておけば、方向分割の重ねあわせは、 $C_{n,t}$  と  $S_{n,t}$  に含まれることになるので、計算時間は大幅に短縮される。式(28)は、シミュレーション時間が方向分割個数  $M$  にほとんど影響されないことを示しているの、斜め不規則波の計算時間は、一方向でも多方向でもほぼ同じであり、シミュレーションプログラムも共通利用できる。

$$\cos(\sigma_n \Delta t) = CC_n \quad (29)$$

$$\sin(\sigma_n \Delta t) = SS_n \quad (30)$$

とくと、加法定理によって

$$\cos\{(i+1)\sigma_n \Delta t\} = CC_n \cos(i\sigma_n \Delta t) - SS_n \sin(i\sigma_n \Delta t) \quad (31)$$

$$\sin\{(i+1)\sigma_n \Delta t\} = SS_n \cos(i\sigma_n \Delta t) + CC_n \sin(i\sigma_n \Delta t) \quad (32)$$

となるので、式(28)の計算は、式(31)、(32)を用いることによって計算時間がさらに短縮される。

多方向不規則波のシミュレーション時間は、式(28)、(31)、(32)から明らかなように、タイムステップ数、周波数分割数  $N$ 、造波機運転台数にそれぞれ比例する。本ミニコンを用いてシミュレーションを実施すると、300秒分の不規則波信号を得るのに、 $\Delta t = 0.025$ 秒 間隔に造波板変位を求めるとして、周波数分割数  $N = 100$ 、造波機台数 55台として、約50分間の計算時間が必要であり、リアルタイムの10倍の計算時間が必要である。

### (3) 必要な入力データ

一方向斜め不規則波および多方向不規則波とも、式(28)で示すようにシミュレーションの方法は変わらないので、共通のプログラムを用いる。

一方向斜め不規則波をシミュレーションするために必要な入力データを以下に示す。

- (i) ディスクファイル名
- (ii) D/A 出力チャンネル数
- (iii) 造波時間 (s)
- (iv) 有義波高  $H_{1/2}$  (cm)
- (v) 有義波周期  $T_{1/2}$  (s)
- (vi) 水深  $h$  (cm)

(vii) 波向  $\alpha$  (deg)

(viii) 周波数分割数  $N$

(ix) 初期位相乱数値  $j$

写真-8~10にこのようにして起された一方向斜め不規則波を示す。

多方向不規則波の場合、以下の入力データが加わる。

(x) 方向分散  $S_{\max}$

(xi) 最大および最小波向角  $\theta_{\max}, \theta_{\min}$

(xii) 方向分割数  $M$

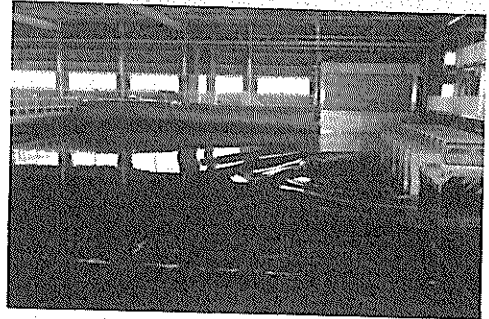


写真-8 一方向斜め不規則波 (1)

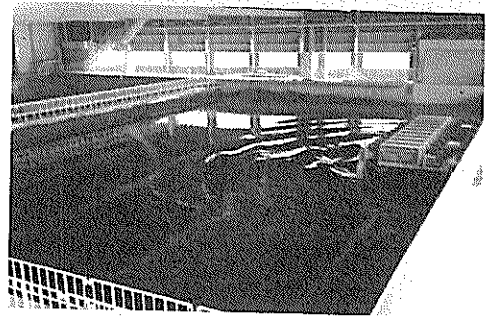


写真-9 一方向斜め不規則波 (2)

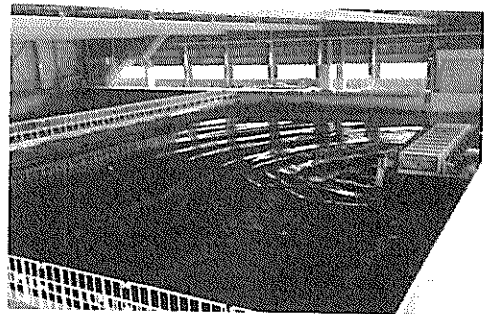


写真-10 一方向斜め不規則波 (3)

写真-11 および12 に実際に造波機によって起された多方向不規則波を示す。

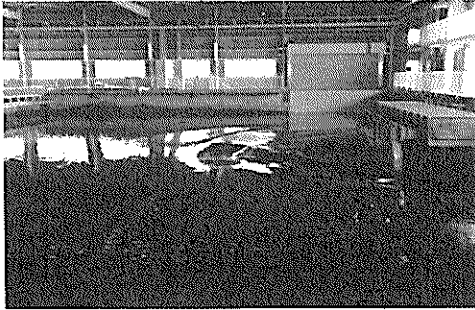


写真-11 多方向不規則波 (1)

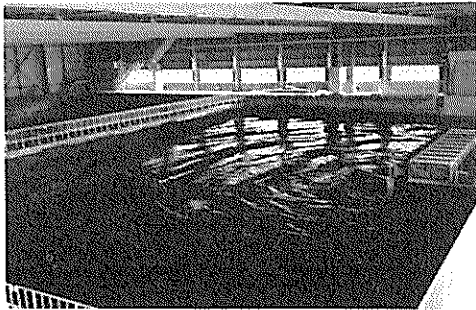


写真-12 多方向不規則波 (2)

## 5. サーペント型造波機の造波特性

### 5.1 造波板の運動応答特性に関する検討

入力アナログ信号および各造波板の変位は、制御盤

に備えつけてある BNC 端子から記録することができるようになっている。水槽内の水深を造波機的设计水深に等しい 120 cm とし、B 系列によるアナログ信号 (どのチャンネルにも同じ造波信号が送られる) を与え、2 ユニット 10 台の各造波板が入力信号通りに動くかを検討した。入力信号および各造波板の変位に関するデータは、ペン書きオシロに記録したのに加えて、データレコーダにも記録した。データレコーダに収録された記録は、パソコンを用いて A/D 変換され、図化処理された。

表-6 は、データレコーダに収録された記録を、パソコンを用い A/D 変換し解析した結果である。表の左側には入力信号の振幅を示し、表の右側には各造波板の運動振幅を示しており、入力信号の振幅に対する運動の振幅の比も表中にあわせて示している。

一般に、造波板は短周期の入力信号に対しては、運動振幅が小さくなる。しかし、表-6 からわかるように、水深 120 cm、波高 4 cm、周期 0.5 秒といった設計条件の限界に近く、モータにも負担が大きくなる短周期波の入力信号に対しても、造波板の変位は入力信号の 92~99% であった。

図-9 および図-10 は、それぞれ波高 4 cm、周期 0.5 秒、および波高 25 cm、周期 1.14 秒の波を発生させる造波信号を与えたときの、入力信号と造波板の変位の記録を示したものである。このときの D/A 出力時間間隔は 0.01 秒である。これらの波の諸元は、造波能力の限界に近い値である。横軸には時間を、縦軸には入力信号の電圧および造波板の変位を示している。制御盤に取り付けられた造波板の変位信号は、最大値  $\pm 35$  cm が  $\pm 10$  V になるように出力されるので、縦軸の電圧と変位は、図-9 および図-10 の縦軸に示されるような対応をしてい

表-6 造波機性能試験結果

入力波形信号			入力信号の両振幅		各造波板の運動両振幅 (cm, 上段) および入力信号に対する比率 (%、下段)									
波高 (cm)	周期 (s)	水深 (cm)	(mv)	(cm)	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5
4	0.5	120	560	1.96	1.92 98.0	1.93 98.5	1.90 96.9	1.93 98.5	1.93 98.5	1.82 92.9	1.80 91.8	1.84 93.7	1.89 96.4	1.87 95.4
14	0.88	120	2007	7.02	6.82 97.2	6.81 97.0	6.89 98.1	6.85 97.6	6.84 97.4	6.84 97.4	6.84 97.4	6.87 97.9	6.88 98.0	6.86 97.7
25	1.14	120	3594	12.6	12.6 100	12.4 98.4	12.6 100	12.5 99.2	12.6 100	12.5 99.2	12.4 98.4	12.6 100	12.5 99.2	12.3 97.6
30	1.6	120	5100	17.9	18.0 100.6	17.9 100	18.1 101.1	17.9 100	18.1 101.1	17.9 100	18.0 100.6	18.0 100.6	18.0 100.6	17.9 100

る。造波板の変位としては、図中に一定の範囲を示しているが、これは、10台の造波板の変位がすべてこの範囲内にあらわれたことを意味している。

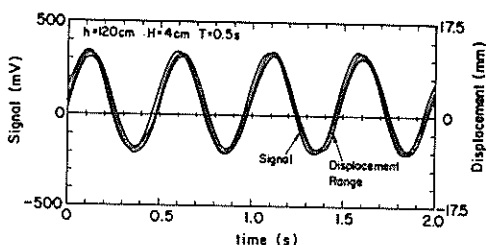


図-9 造波信号と造波板変位  
( $H = 4 \text{ cm}$ ,  $T = 0.5 \text{ S}$ )

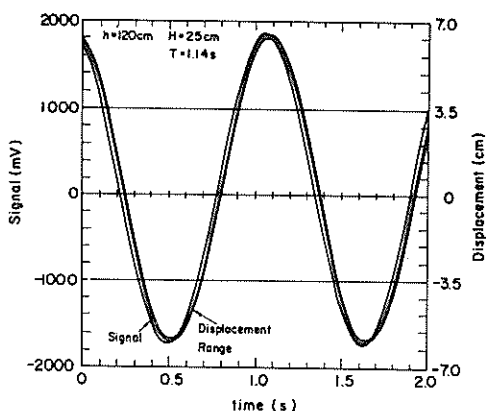


図-10 造波信号と造波板変位  
( $H = 25 \text{ cm}$ ,  $T = 1.14 \text{ S}$ )

図-9を見ると、各造波板の運動のずれ範囲は狭く、造波板間の変位のずれは、きわめて小さいことがわかる。造波板の変位の振幅は、入力信号の振幅よりは若干小さいものの、両者はほぼ一致しており、運動振幅の減少もほとんど見られない。造波板の運動は、入力信号よりも0.03秒程度遅れているが、この遅れ角は、位相角にして $20^\circ$ 程度にすぎない。

図-10は、図-9より入力信号の周期が長いいため、入力信号と造波板の変位の一致はさらによくなっている。造波板の運動は、入力信号よりもやはり0.03秒程度遅れているが、この遅れは位相角にするとわずか $10^\circ$ 弱である。

## 5.2 D/A 出力時間間隔に関する検討

アナログ信号の出力時間間隔は造波板の運動がスムーズである限り、できるだけ長くとるのがよい。この理由としては、計算点の数が少なくなり、記憶容量も少なくて済むと同時に造波信号のシミュレーション時間を短縮

することができるからである。

図-11は出力時間間隔を0.025秒、0.05秒、0.1秒としたときの入力信号と造波板変位のペンオシロの記録を重ねたものである。このときの入力信号としては、最も条件の悪い場合を考えて、水深120cmで波高4cm周期0.5秒の波を発生させた場合のものを用いている。

$\Delta t = 0.025 \text{ s}$ では、造波板の変位・信号ともなめらかに変化しているが、 $\Delta t = 0.05 \text{ s}$ では、造波板の変位はほぼなめらかになっているもの入力信号は、若干ステップ状に変化している傾向が読み取られる。 $\Delta t = 0.1 \text{ s}$ では、入力信号および造波板の変位もステップ状になっている。

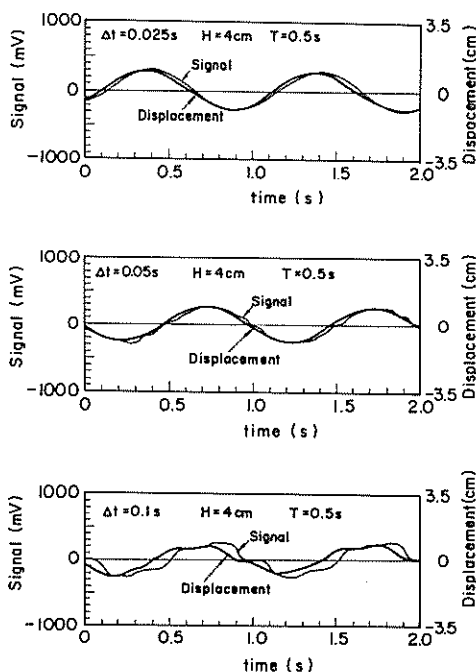


図-11 D/A 出力時間間隔に関する検討

造波機運転時の音は、出力時間間隔  $\Delta t$  を大きくするほど大きくなる傾向にあった。これは、入力信号の変化が階段状になると、モータに過大な負荷がかかることによると考えられる。図-11の造波板の変位を見る限りでは、 $\Delta t = 0.05 \text{ s}$ でも造波板はほぼ所要の動きを示すが、入力信号がステップ状でありモータに過大な負荷をかけていることを考えあわせると  $\Delta t = 0.05 \text{ s}$  は必ずしも十分短い間隔とは言えない。そこで、本システムの運転における  $\Delta t$  としては0.025秒を採用した。

## 5.3 斜め波の波高・波向測定実験

### (1) 斜め波の造波理論<sup>6)</sup>

サーベント型造波機によって発生する斜め波の波高お

よび波向については、著者の1人によって理論解析がすでに行われ、理論式が示されている。以下にその概要を示す。

この解析では、造波板の運動が微小であるという仮定のもとに、線型ポテンシャル理論が適用されている。まず、1枚の造波板によって起される波の速度ポテンシャルを求め、サーベント型造波機のように多数の造波板が並んでいる場合は、上記の速度ポテンシャルを重ね合わせることによって、サーベント型造波機による発生波の速度ポテンシャルを求めている。ただし、1枚の造波板に対する速度ポテンシャルを重ね合わせる場合、各造波板の運動の位相のずれを考慮している。サーベント型造波機によって起される斜め波の速度ポテンシャルは次式のようになる。

$$\begin{aligned} \Phi = & \frac{\sigma}{k} F \zeta \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh kh} \sum_{l=L_-}^{L_+} \left[ \cos(\sigma t - lkb \cos \theta) \right. \\ & \times \int_{-kb/2}^{kb/2} N_0 \left( \sqrt{(kx - lkb - q)^2 + (ky)^2} \right) dq \\ & - \sin(\sigma t - lkb \cos \theta) \\ & \left. \times \int_{-kb/2}^{kb/2} J_0 \left( \sqrt{(kx - lkb - q)^2 + (ky)^2} \right) dq \right] \end{aligned} \quad (33)$$

ここに、

- $x$ : 平面座標で、ある造波板の中央に原点を取り、造波板に沿った方向の座標
- $y$ : 平面座標で、造波板の面に直交する座標を示し、造波板から前方に離れる方向を正とする。
- $z$ : 鉛直座標で、静水面上に原点を持ち、鉛直上方が正である。
- $l$ : 造波板の番号で、 $x$ 軸正方向の造波板の数が $L_+$ で、 $x$ 軸負方向の造波板の数が $L_-$ で、全造波板数は $(L_- + L_+ + 1)$ となる。
- $\sigma$ : 造波板の運動角周波数 ( $= 2\pi/T$ )
- $T$ : 造波板の運動周期
- $k$ : 波数 ( $2\pi/L$ )
- $L$ : 波長
- $h$ : 水深
- $b$ : 各造波板の幅
- $F$ : 式(2)に示されるピストン型造波機の造波効率
- $\zeta$ : 造波板の運動振幅
- $N_0(x)$ : 0次のノイマン関数
- $J_0(x)$ : 0次のベッセル関数

$\theta$ :  $x$ 軸の正方向から測った波向角

厳密な解析では、式(33)に定在波の項が含まれることとなるが、この定在波は造波板から0.5波長も離れた場所では非常に小さくなるため、この項は省略している。

水面波形 $\eta$ は次式で求めることができる。

$$\eta = -\frac{1}{g} \frac{\partial \Phi}{\partial t} \Big|_{z=0} \quad (34)$$

また、 $x$ 方向および $y$ 方向の水粒子速度 $u$ および $v$ は、次式のように求まる。

$$u = \frac{\partial \Phi}{\partial x}, \quad v = \frac{\partial \Phi}{\partial y}$$

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

$$\alpha = \pi/2 - \arctan \left\{ (u)_{\max} / (v)_{\max} \right\} \quad (35)$$

ここで、 $(u)_{\max}$ および $(v)_{\max}$ はそれぞれ、 $V$ が最大となるときの $u$ と $v$ である。

## (2) 実験手法

実験においては、水槽内に図-12に示すように、造波板から1m, 3m, 5m離れた直線上に9台の容量式波高計を配置し、波形を同時記録した。実験波の波向 $\theta$ は、 $x$ 軸の正方向から反時計回りに測って、 $90^\circ, 105^\circ, 120^\circ, 135^\circ$ の4通りに変化させた。実験水深は、波高計の設置台の高さを考慮して70cmとした。実験波の周期としては、0.8, 1.15, 1.79秒の3通りを与えた。これは、

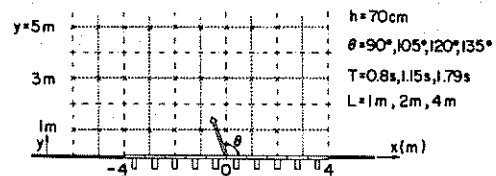


図-12 実験条件および波高測定点

それぞれ波長1m, 2mおよび4mに相当する。実験波としては、非線型性のあまり強くない波を用いることにして、周期0.8秒については波高5cm, 周期1.15秒および1.79秒については波高10cmとした。造波板の両側には図-12に示すように3.8mと1.8m長さの板を取り付け、造波板の背後の波の影響を除くようにしている。写真-13および14に実験状況を示す。

測定された波高は、ペンオシロに記録すると同時に14ch用データレコーダにも同時記録された。データ解析

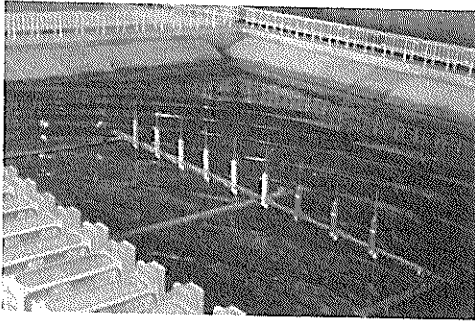


写真-13 波高・波向測定実験状況 (1)

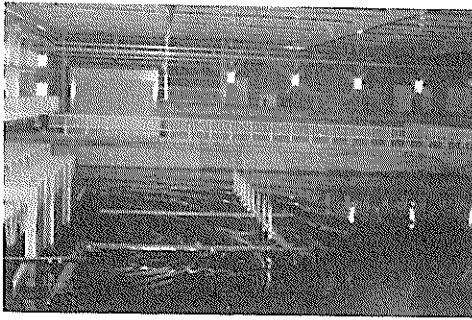


写真-14 波高・波向測定実験状況 (2)

においては、ペンオシロの記録から反射波によって波高の変動していない区間を設定し、この区間においてデータレコードの波高記録を3周期分A/D変換した。A/D変換はパソコンを用いて9ch同時に同時刻において行った。データ個数は各チャンネルにおいて270データである。これによって、ペンオシロの記録よりさらに高い精度で、波高と波向を読み取ることができる。

図-13は、波向の測定原理を示したものである。本節

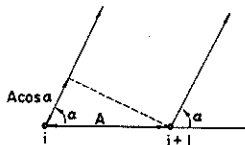


図-13 波向の測定原理

(1)で示した理論解析では、波向は水平流速の最大値の方向として定義しているが、本実験では、水粒子速度は測定していないので水位の同時記録から波向を推定した。図-13に示すように、波向が $\theta$ の様な斜め波が来襲した場合、 $i$ 番目の波高計から距離 $A$ だけ $x$ の正方向に離れた $(i+1)$ 番目の波高計で測定される波の位相は、

$i$ 番目の波高計で測定される波の位相より、 $A \cos \theta$ の距離に対応する位相分遅れていることになる。波の波長を $L$ とすると、この位相差は位相角にして $2\pi (A/L) \cos \theta$ となる。しかし、造波板の全幅が有限であるサーベント型の造波機で起された波は場所的に波向が異なる。そこで、実際の波の波向としては以下のように求めた。

$(i+1)$ 番目の波高計によって測定された波形の位相は、 $i$ 番目の波高計によって測定された波形の位相より位相角 $\beta$ だけ遅れていたとして、 $i$ および $(i+1)$ の点の波向を $\alpha$ とすると、

$$\beta = 2\pi (A/L) \cos \alpha \quad (37)$$

となる。式(37)から波向 $\alpha$ は次式で与えられる。

$$\alpha = \cos^{-1} [\beta L / 2\pi A] \quad (38)$$

ただし、 $A \cos \alpha > L$ の場合、 $\beta > 2\pi$ となって、1波形以上位置がずれる場合があるので注意を要する。

式(38)で与えられる波向は、2点間で一樣な斜め波が発生されることを前提にしたものであり、2点間の平均的

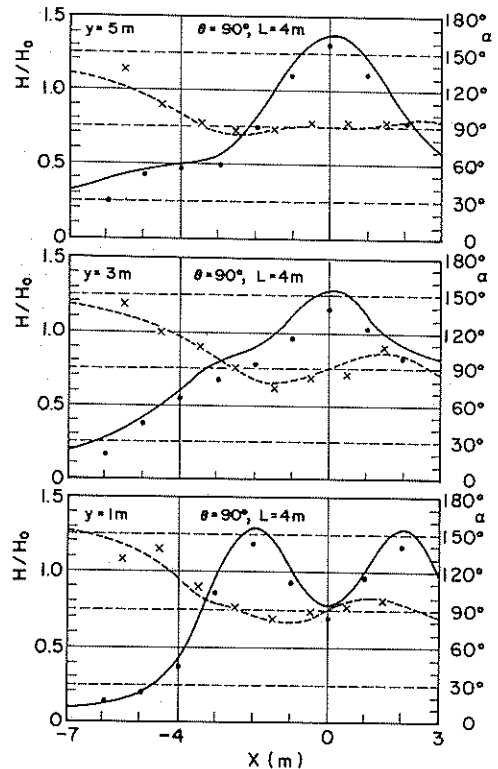


図-14 波高・波向分布の比較  
( $\theta = 90^\circ$ ,  $L = 4\text{m}$ )

な波向を示すものである。そのため、式(8)で計算して求めた波向は測点の中心の波向として示している。式(8)の解析では、上述のように一様波向を前提にしているため、2点間の波向が異なる場合には、波向推定精度が落ちることに注意を要する。

(3) 実験結果および計算結果の比較

図-14から21に実験結果と計算結果の比較を各実験ケースごとに示す。これらの図では横軸には波高測定点の $x$ 座標を示し、縦軸には波高比  $H/H_0$  および波向  $\alpha$  を示している。ここに  $H_0$  は2次元断面水路のピントン型造波機の造波効率から計算によって求まる波高であり、 $H$  は、実験においては、測定された波高であり、計算では式(4)の水面変動の式から求まる波高である。波高比の計算値を実線で、実験値を黒丸で示し、式(8)で求めた波向の計算値を点線で、式(8)で求めた波向の実験値を $\times$ で示している。

図-14～21が示すように、波高比および波向の計算値はどちらも $x$ 軸方向に大きく変動している。波高比の

計算値の変動は大きな変動と細かい変動とが重なっており、特に、波長の短い波、つまり  $L=1\text{m}$  の波では細かい変動が非常に顕著になる。また、波向についても計算値は波高と同じような変動特性を示す。このような、波高および波向の変動は造波板の全幅が8mと、また、各造波板の幅が80cmと、有限値であることによるものであるが、特に、短い波長での細かい変動は各造波板の幅が有限であることによって起される。つまり、各造波板と波長の比が大きくなると、細かい変動が起る。

波高比に関して、実験値は計算値より全体的に少し小さい傾向を有するが、計算値の変動傾向と非常によく一致した変動傾向を示している。実験値と計算値の差は波高比の絶対値で最大0.2程度であり、両者はよく一致すると考えることができる。ただし、波長が短く、波向角の大きい図-21の場合、計算における波高比の変動が細かく、実験値が計算値の変動をよく表わしているかどうかは判断できない。もう少し短い距離間隔での測定が必要である。

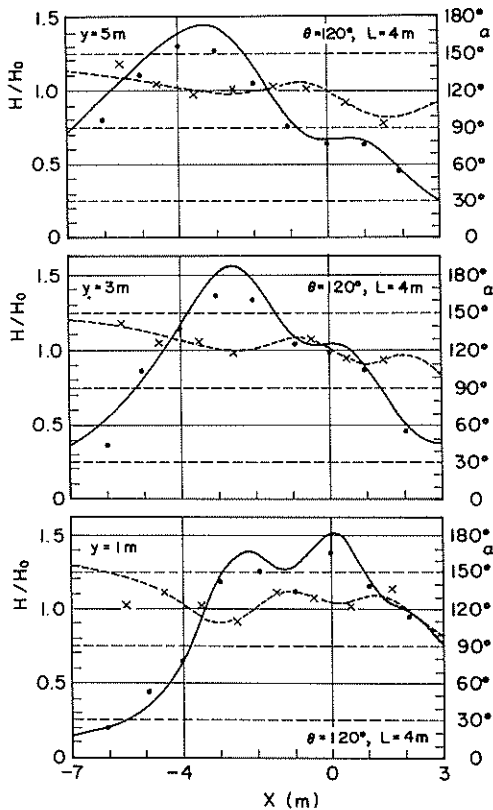


図-15 波高・波向分布の比較  
( $\theta = 120^\circ$ ,  $L = 4\text{m}$ )

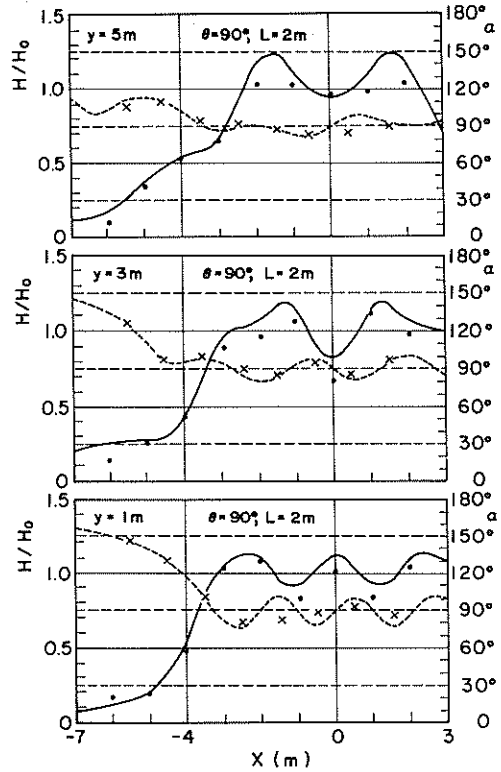


図-16 波高・波向分布の比較  
( $\theta = 90^\circ$ ,  $L = 2\text{m}$ )



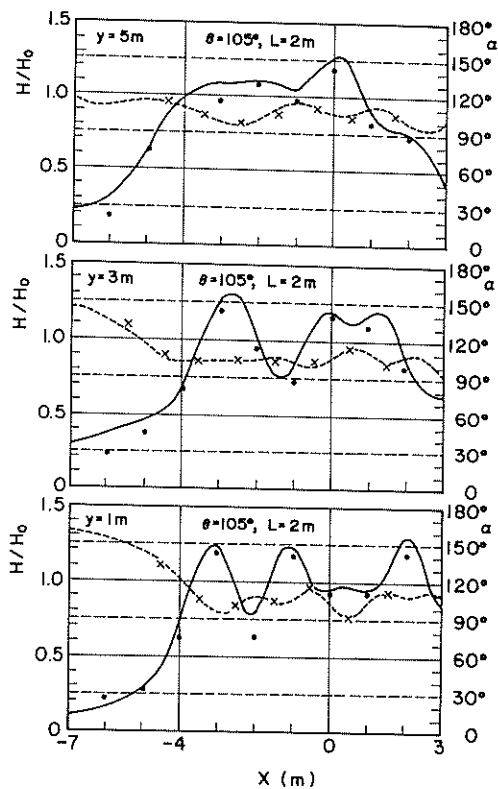


図-17 波高・波向分布の比較  
( $\theta = 105^\circ$ ,  $L = 2\text{m}$ )

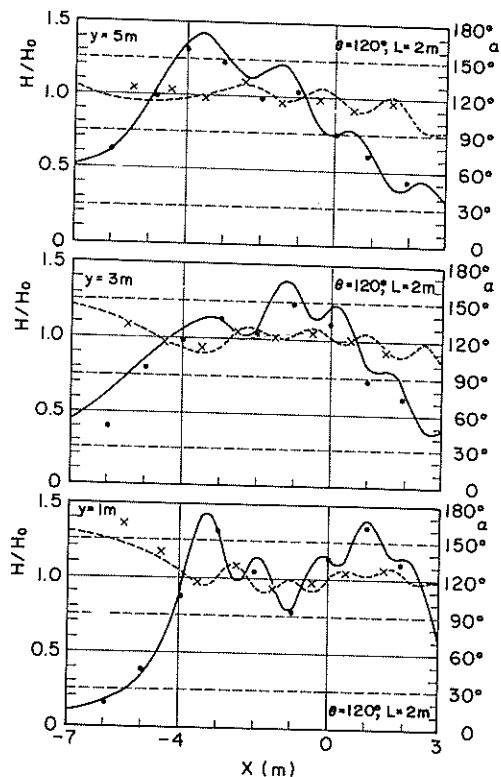


図-18 波高・波向分布の比較  
( $\theta = 120^\circ$ ,  $L = 2\text{m}$ )

波向についても、計算値と実験値とは非常によく一致している。ただし、波長が短く、波向の大きい図-21では、実験値は計算値とよく一致しているように見えるけれども、計算値そのものではなく、測点間における計算波向の平均値に一致しているようである。

波高に関しても、波向に関しても理論計算値が実験値に一致していることは、理論計算によって各造波板の幅の選定を行ったことが誤りでなかったことを示している。また、このことは、造波機を増設して、造波板の全幅を広くした場合における斜め波の特性の検討に理論計算が利用できること、さらには、サーベント型造波機で起した多方向不規則波の特性の検討にも理論計算が応用できることを示している。

#### 5.4 多方向不規則波発生可能領域に関する検討

5.3で述べたように、サーベント型造波機によって発生される波の波高や波向は、局所的に大きな変動を示す。このため、図-14～21に示されるように、80cm幅の10枚だけの造波板では、局所的波高変動の少ない領域を水

槽内に確保することはきわめて困難である。このため、将来において造波機を増設したときに本水槽内にどの程度の波高安定領域を確保できるかを、数値計算によって検討してみた。

図-22に計算条件を示す。これは、図-1に示される大水深実験棟内の仕切壁で仕切られた36m×24mの水槽内に、幅80cmのサーベント型造波機を30台並べたものである。図中に示すように、 $y = 5, 10, 15, 20\text{m}$ の各測線に沿って $x = -12\text{m}$ から12mまでの間で40cmごとに波高と波向を検討した。検討対象とした波向 $\theta$ は、 $105^\circ, 120^\circ, 135^\circ$ の3ケースとした。波の波長 $L$ は、2m, 4m, 6m, 8mに関して検討した。これは、図-20～21から明らかなように、幅80cmの造波板で波長1mの波を発生させると波高の局所の変動がきわめて大きくなること、および、図-14～15から明らかなように、造波板の全幅の1/2程度の波長の波を発生させると、造波板の全幅の有限性の影響が非常に強くなり、中央の造波板の前面においても波高が大きく変動していること、を考

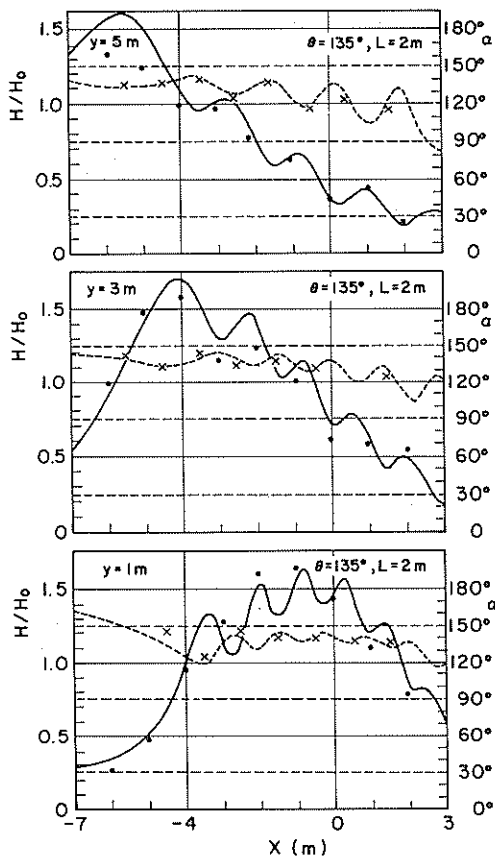


図-19 波高・波向分布の比較  
( $\theta = 135^\circ$ ,  $L = 2\text{ m}$ )

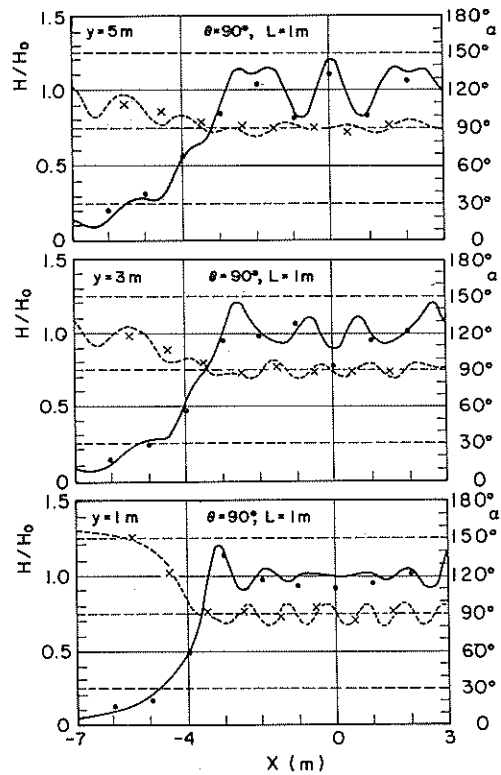


図-20 波高・波向分布の比較  
( $\theta = 90^\circ$ ,  $L = 1\text{ m}$ )

慮したものである。なお、水深を1mと仮定すると、波長2m, 4m, 6m, 8mに対応する波の周期は、それぞれ1.14S, 1.67S, 2.22S, 2.8Sに対応する。

図-23から図-25に計算例として波長2mの場合における波高と波向の変動を示す。各図において波高と波向の計算値はそれぞれ実線と点線で示されている。造波機が10台の場合の図-14～図-21にくらべて、波高の局所の変動がかなり小さくなっていることがわかる。

図-26～28は、図-23～25に示すような図を各条件に関して計算して求め、それらの図を読み取って作成した20%波高安定推定領域を示したものである。 $\theta = 105^\circ$ と $75^\circ$ ,  $120^\circ$ と $60^\circ$ ,  $135^\circ$ と $45^\circ$ は、それぞれ $x = 0$ に対して対称な波向分布となるので、図-26から28では、波高安定推定領域は $x = 0$ に対して対称となっている。20%波高安定領域とは、基準波高の80～120%の間に波高が分布している領域として定義されている。ここでは、基準波高としては、図-23から25の縦軸

$H/H_0$ を $\sin \theta$ で除した値を採用した。

式(23)における $S_{\max}$ の値は、海洋の風波で10程度になるが、 $S_{\max} = 10$ とすると波浪のエネルギーの65%は、 $\pm 30^\circ$ 以内の方向に集中することになる。図-27を見ると、20%波高安定領域は波長が長くなるほど狭くなる傾向にはあるものの、 $L = 2 \sim 8\text{ m}$ の範囲で水槽内にある程度の領域が確保されていることがわかる。すなわち、造波板を30台に増設すると、水深1mとして周期1.14～2.8秒の周期帯においては、方向スペクトルを有する不規則波を水槽内に発生させ、ある程度の範囲の波高安定領域を水槽内に確保しうることが示唆される。

## 6. あとがき

港湾技術研究所は、新しく建設した大水深海洋構造物実験場に設置する造波装置として、多方向不規則波が発生できるサーペント型造波装置を製作した。本装置は、多方向不規則波が発生できる造波装置としては、我国初

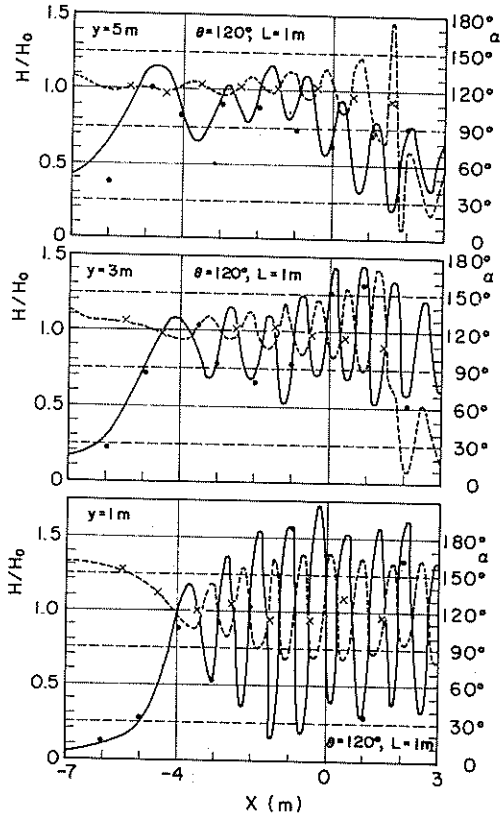


図-21 波高・波向分布の比較  
( $\theta = 120^\circ$ ,  $L = 1\text{m}$ )

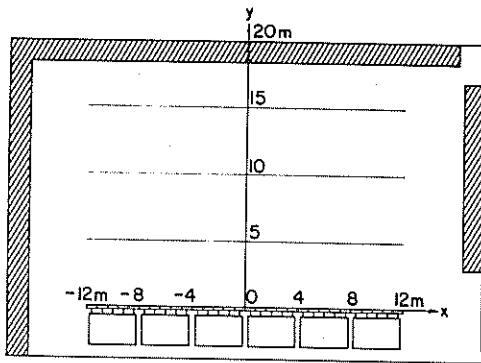


図-22 計算条件2

の装置であるばかりでなく、制御方式としても、従来の操作盤方式ではなく、ミニコンによるデジタル制御方式を取り入れている。本資料においては、この造波装置の特徴についてとりまとめるとともに、造波信号のシ

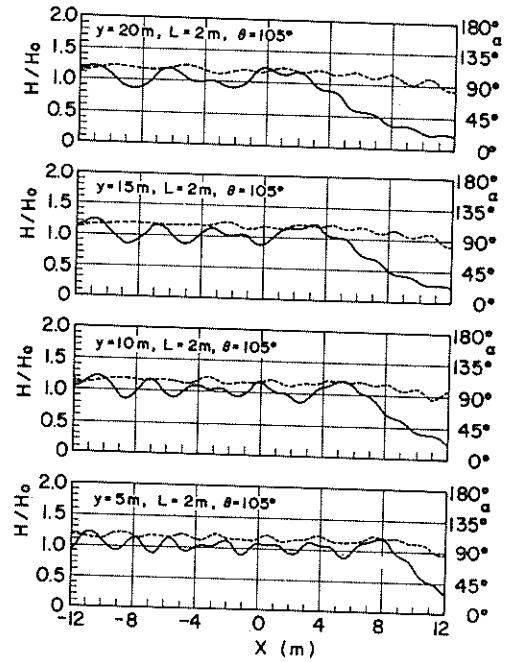


図-23 波高・波向分布 ( $\theta = 105^\circ$ ,  $L = 2\text{m}$ )

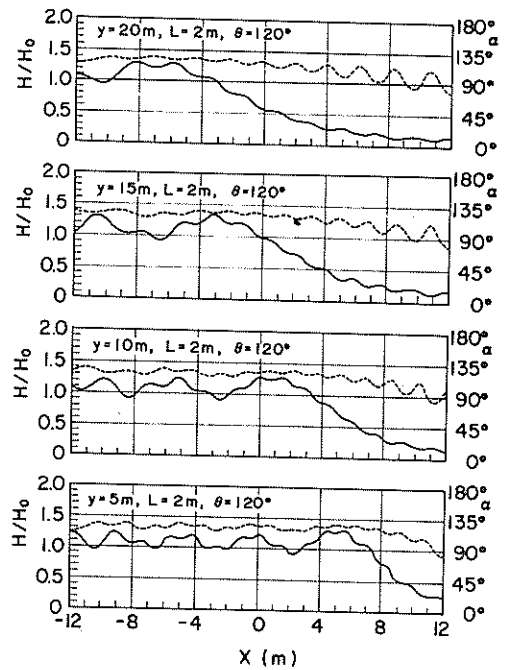


図-24 波高・波向分布 ( $\theta = 120^\circ$ ,  $L = 2\text{m}$ )

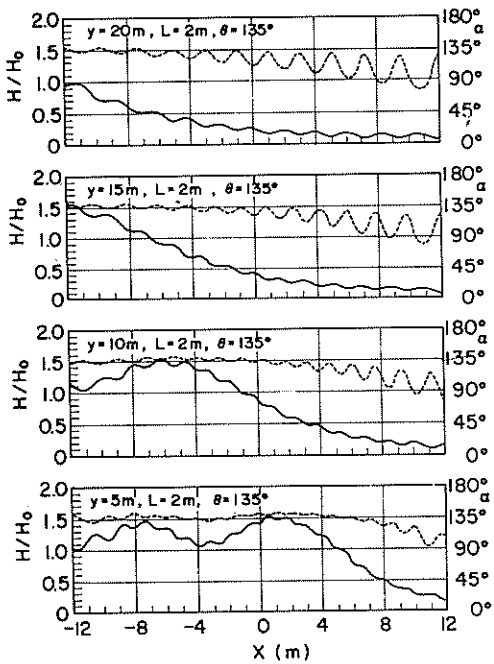


図-25 波高・波向分布 ( $\theta = 135^\circ$ ,  $L = 2\text{m}$ )

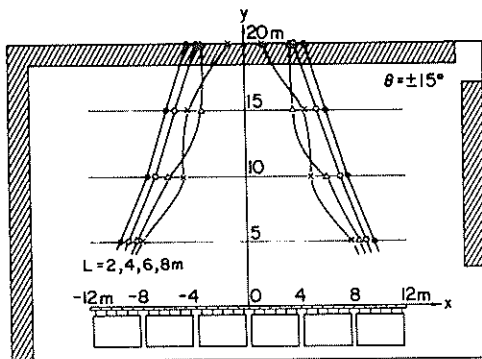


図-26 20%波高安定推定領域 ( $\theta = \pm 15^\circ$ )

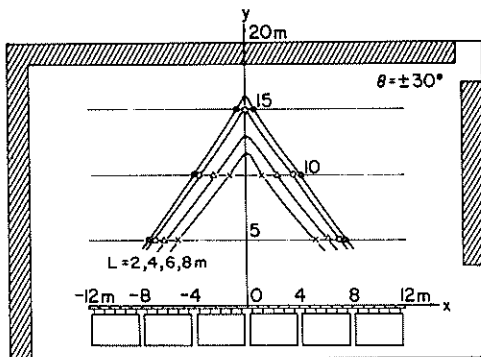


図-27 20%波高安定推定領域 ( $\theta = \pm 30^\circ$ )

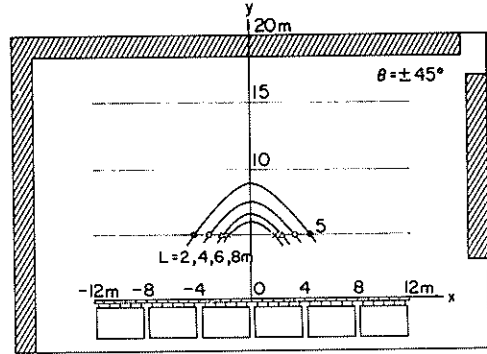


図-28 20%波高安定推定領域 ( $\theta = \pm 45^\circ$ )

ミュレーション法およびサーベント造波機で起した波の特性についても検討した。

本資料に述べたことを要約すると、以下ようになる。

- 1) 本造波装置は、各造波板幅が80cmのサーベント型造波装置で、造波板はピストン型運動をする。造波板間の隙間は5mmと非常に狭くし、造波板相互間の運動位相のずれによる渦の発生を抑えるように造波板の側板の幅を20cmにしている。
  - 2) 本造波機は、低慣性直流電動モータで駆動されるものであり、ボールネジで回転運動が前後運動に変換される。走行ビームは、1本のリニアガイド上をローラベヤリングによってスライドするようになっている。
  - 3) 造波装置は、造波信号発生装置でもあるミニコンピュータによってデジタル制御されている。ミニコンピュータは2台の端末器を有し、同時に2つの実験ができるようになっている。
  - 4) 造波信号発生用プログラムとしては、一方向の規則波および不規則波、斜め規則波および多方向不規則波に対するものが整備されている。特に、多方向不規則波の信号発生に関しては計算時間を短縮する工夫がされている。
  - 5) 各造波機に同一信号を与えた場合、造波板相互の運動のずれは小さく、造波信号に対する位相遅れは条件の最も悪い、運動周期0.5sの場合でも $20^\circ$ 以内である。
  - 6) 造波信号のD/A変換時間間隔は0.025sにするのがよい。
  - 7) 1台の造波板幅の決定に用いた理論解析手法は、斜め波の実験によってその妥当性が確められた。
- 最後に、本造波機は石川島播磨重工が製作し、本ミニコンシステムは東芝から購入したことを付記するとともに、ハードおよびソフトの両面で、両社の担当者か

ら多くの御指導をいただいた。また、サーペント型造波装置の特性実験においては、当所海洋水理部波浪研究室員 関口忠志技官および高山 優技官の全面的な協力を得た。ここに記して謝意を表する次第である。

(1984年9月29日 受付)

#### 参考文献

- 1) 光易 恒・水野信二郎・本多忠夫・力石国男：海洋波の方向スペクトル形について，昭和49年度日本海洋学会秋季大会講演要旨集，1970，p. 110.
- 2) Cote, L. J. J. et al. : The directional spectrum of a wind generated sea as determined from data obtained by the Stereo observation project, Meteorological press, Vol. 2, No. 6, New York Univ., pp. 1960, 88p.
- 3) 合田良実・鈴木康正：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 230, 1975, 45p.
- 4) 高山知司：波の回折と港内波高分布に関する研究，港湾技研資料，No 367, 1981, 140p.
- 5) Huntington, S. M. and D. M. Thompson: Forces on a large vertical cylinder in multi-directional random waves, OTC 2539, 1976.
- 6) Salter, S. H. : Absorbing wave-makers and wide tanks, Proc. of Conf. on Directional Wave Spectra Application, Univ. of California, Berkeley, 1981, pp. 185 ~ 202.
- 7) Kjeldsen, S. P. : Whitecapping and wave crest lengths in directional seas, Proc. of the Symposium Description and Modelling of Directional Seas, Technical Univ., Denmark, 1984, B 6-1 ~ B 6-17.
- 8) Aage, C. and E. Sand : Design and construction of the DHI 3-D wave basin, Proc. of the Symposium on Description and Modelling of Directional Seas, Technical Univ., Denmark, 1984, pp. B2-1 ~ B2-20.
- 9) Outlaw, D. G. : A portable directional irregular wave generator for wave basins, Proc. of the Symposium on Description and Modelling of Directional Seas, 1984, pp. B3-1 ~ B3-8.
- 10) Takayama, T. . Theoretical properties of oblique waves generated by serpent-type wavemakers, Rept. of the Port and Harbour Res. Ins., Vol. 21, No 2, 1982, pp. 3 ~ 48.
- 11) Biesel, F., F. Suquet and Others: Les appareils generateurs de hoale en laboratoire, La Houille Blanche, Vol. 6, Nos 2, 4, et 5, 1951 (translated by St. Anthony Falls, Hyd. Lab., Univ. Minnesota, Rept. No 39.)
- 12) 永井康平：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, 1972, pp. 47 ~ 119.
- 13) 光易 恒：風波のスペクトルの発達(2)，第17回海岸工学講演会論文集，1970，pp. 1 ~ 7.
- 14) 合田良実：港湾構造物の耐波設計，鹿島出版会，昭和52年，p. 20.
- 15) 合田良実：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，第19巻，第3号，1980，pp. 37 ~ 70.
- 16) 前出文献 10)

#### 記号表

- $A$  : 波高測定間距離  
 $a_n$  : 単一方向不規則波の成分波の振幅  
 $a_{nm}$  : 多方向不規則波の成分波の振幅  
 $b$  : 1台の造波板幅  
 $C_{n,l} = \sum_{m=1}^M \frac{a_{nm}}{F_n} \cos(\epsilon_{nm} - l k_n b \cos \theta_m)$   
 $F$  : ピストン型造波機の造波効率  
 $F_n$  : 各成分波に対するピストン型造波機の造波効率  
 $f$  : 周波数  
 $f_p$  : スペクトルのピーク周波数  
 $G(f; \theta)$  : 方向関数  
 $g$  : 重力加速度  
 $H$  : 波高  
 $H_{1/3}$  : 有義波高  
 $h$  : 水深  
 $J_0(x)$  : 0次のベッセル関数  
 $k$  : 波数  
 $k_n$  : 成分波の波数  
 $L$  : 波長  
 $L_+$  :  $x$ 軸正方向の造波板の数  
 $L_-$  :  $x$ 軸負方向の造波板の数  
 $l$  : 造波板の番号  
 $M$  : 波向分割数  
 $N$  : 周波数分割数  
 $N_0(x)$  : 0次のノイマン関数  
 $S(f)$  : 周波数スペクトル

- $S(f, \theta)$  : 方向スペクトル  
 $S_{\max}$  : 波向集中度パラメータ  
 $S_{n,l} = \sum_{m=1}^M \frac{a_{nm}}{F_n} \sin(\epsilon_{nm} - l k_n b \cos \theta_m)$   
 $T$  : 周期  
 $T_{1/2}$  : 有義波周期  
 $t$  : 時間  
 $u$  :  $x$  軸方向の水粒子速度  
 $(u)_{\max}$  : 最大水粒子速度  $V_{\max}$  の  $x$  成分  
 $V$  : 合成水粒子速度  
 $V_{\max}$  :  $V$  の最大値  
 $v$  :  $y$  軸方向の水粒子速度  
 $(v)_{\max}$  : 最大水粒子速度  $V_{\max}$  の  $y$  成分  
 $x$  : 平面座標軸 (造波板に平行方向)  
 $y$  : 平面座標軸 (造波板に直角方向)  
 $z$  : 鉛直座標 (鉛直上方正)  
 $\alpha$  : 各点の波向  
 $\beta = 2\pi (A/L) \cos \alpha$   
 $\beta_n = 2 \cos(\sigma_n \Delta t)$   
 $\gamma$  : JONSWAP型スペクトルのパラメータ  
 $\epsilon$  : 位相ずれ  
 $\epsilon_n$  : 成分波位相ずれ (単一方向不規則波)  
 $\epsilon_{nm}$  : 成分波の位相ずれ (多方向不規則波)  
 $\zeta$  : 造波板の変位  
 $\zeta_i$  : 成分波数における造波板の変位  
 $\eta$  : 水面変動量  
 $\eta_i$  : 成分波の水面変動量  
 $\theta$  : 目標波向  
 $\theta_m$  : 成分波の波向  
 $\sigma$  : 角周波数  
 $\sigma_a$  : JONSWAP型スペクトルのパラメータ ( $f < f_p$ )  
 $\sigma_b$  : JONSWAP型スペクトルのパラメータ ( $f \geq f_p$ )  
 $\Phi$  : 速度ポテンシャル

港湾技研資料 No.509

1984・12

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 伊東印刷株式会社

Published by the Port and Harbour Research Institute  
Nagase, Yokosuka, Japan.