

運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

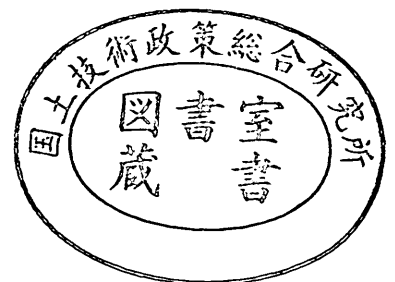
REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 22

NO. 3

SEPT. 1983

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第22巻 第3号 (Vol. 22, No. 3), 1983年9月 (Sept. 1983)

目 次 (CONTENTS)

1. A Unified Nonlinearity Parameter of Water Waves
..... Yoshimi GODA..... 3
(水面波の非線型性パラメーターの統一的表示について.....合田良実)
2. 無反射性造波方式の原理と推力制御式造波装置の特性
..... 谷本勝利・原中祐人・富田英治..... 31
(Principle and Performance of Non-reflective Wave Generator by Thrust Control
..... Katsutoshi TANIMOTO, Suketo HARANAKA and Eiji TOMIDA)
3. マイクロプロセッサ応用によるステップ式波高計の改良について
..... 佐々木 弘・高橋智晴..... 57
(Improvement of step-type recording wave gauge with application of micro-processor
..... Hiroshi SASAKI and Tomoharu TAKAHASHI)
4. 日本沿岸の波浪のスペクトル形について
..... 広瀬宗一・立花祐二・菅原一晃..... 83
(One-dimensional spectra of wind waves in coastal waters
..... Munekazu HIROSE, Yuji TACHIBANA and Kazuteru SUGAHARA)
5. 波力発電ケーソンの空気出力効率の解析
——波エネルギーに関する研究 第1報——
..... 小島朗史・合田良実・鈴木諭司..... 125
(Analysis of Efficiency of Pneumatic-type Wave Power Extractors Utilizing Caisson
Breakwaters—A Study on Development of Wave Power 1st Report—
..... Roushi OJIMA, Yoshimi GODA and Satoshi SUZUMURA)
6. 海域における物質循環数値モデルの水質支配要因について
..... 堀江 毅・細川恭史..... 159
(Water-quality controlling factors in an eutrophication model
..... Takeshi HORIE and Yasushi HOSOKAWA)

7. 深層混合処理工法による壁状改良地盤の耐震性に関する実験的研究
..... 稲富隆昌・風間基樹・今村俊博..... 207
(An Experimental Study on the Earthquake Resistance of Wall Type Improved Ground
by Deep Mixing Method
..... Takamasa INATOMI, Motoki KAZAMA and Toshihiro IMAMURA)
8. 川崎港海底トンネルでの地震応答観測と応答解析
..... 清宮理・西澤英雄・横田弘..... 253
(Field Observation and Response Analysis at Kawasaki Koh Submerged Tunnel
..... Osamu KIYOMIYA, Hideo NISHIZAWA and Hiroshi YOKOTA)
9. 港湾における空間設計手法の開発（第3報）
——入力方法の容易化と港湾計画への応用——
..... 奥山育英・梅山珠実・佐々木芳寛..... 301
(Development of Space Design of Port and Harbour (3rd Report)—Easy Input Methods
and Application to Port Planning—
..... Yasuhide OKUYAMA, Tamami UMEYAMA and Yoshihiro SASAKI)
10. 港湾経済効果の計測手法（第2報）
——付加価値モデルの汎用化と原単位の整備——
..... 竹内良夫・米澤朗・稲村肇..... 325
(Development and Application of Synthetic Economic Evaluation Model for Port
Planning (2nd Report)—Value Added Model—
..... Yoshio TAKEUCHI, Akira YONEZAWA and Hajime INAMURA)

2. 無反射性造波方式の原理と推力制御式造波装置の特性

谷本勝利*・原中祐人**・富田英治***

要 旨

水路における波浪実験においては、造波板からの再反射波が問題となる。特に、不規則波実験ではこれの影響が避け得ないので、無反射性造波装置の開発が強く望まれている。そのため、本研究ではピストンタイプの両面造波を対象として、無反射性造波方式の原理をポテンシャル理論によって提示し、これに基づいて新しく製作した推力制御式造波装置の特性を検討した。

無反射性造波方式の原理は、反射波を再反射させないで両面造波している場合の造波板に働く波力が、反射波の慣性波動圧が無視できるとき、本来造波すべき波の波力と変わらないことにある。したがって、造波板前後面に働く波力の合力を制御することによって、無反射性造波が可能となる。

しかし、こうした波力制御においてはこれを検出する特別な計器が必要となる。一方、低慣性直流電動機駆動の造波装置では造波機の推力が電機子電流に比例し、かつ通常の位置制御の場合であっても電流制御のマイナーループを有しているので、推力制御であれば特別な計器を要しない。ただし、この場合造波板の受ける波力のほか機械的慣性力や摩擦抵抗力などを考慮する必要があり、これらを実際の造波板運動を検知することにより補償できれば、推力制御によっても無反射性造波が可能となる。

そこで、当所の105 m大型造波水路の造波機新替えに際して推力制御方式を採用し、通常の位置制御方式にこれを付加した新しい造波装置を導入した。その規則波による特性試験の結果、機械力のうち反射波に対する補償を省略した方式であっても、直立壁前面に安定した重複波が維持され、位置制御に比べて再反射波の影響を非常に軽減できることが例証された。水路における不規則波の再反射波の影響は、造波板の再反射率が少しでも小さければ著しく軽減されるので、不規則波実験では充分実用に供すると考えられる。

* 水工部 防波堤研究室長
** 水工部 主任研究官 (水理計測担当)
*** 前水工部 波エネルギー研究室

2. Principle and Performance of Non-reflective Wave Generator by Thrust Control

Katsutoshi TANIMOTO*

Suketo HARANAKA**

Eiji TOMIDA***

Synopsis

Re-reflection from a wave paddle disturbs the incident waves to the model structure. In particular, it becomes problem in the irregular wave tests, since continuous action of several hundreds of waves must be realized in order to investigate the statistical properties. Therefore, the development of non-reflective wave generator is strongly expected. In the present study, the principle of non-reflective wave generation is established on the basis of potential theory of wave maker, and the performance of the thrust control wave generator which has been newly equipped in the large wave channel is investigated.

The principle of non-reflective wave generation is that the total wave forces acting on the both sides of wave paddle, which is operated in non-reflective motion, always equal to the wave forces to generate original waves, when the inertia component of the wave forces is disregarded. Therefore, the non-reflective wave generation can be realized by controlling the wave forces on the wave paddle which generates waves to the both sides.

In the wave force control, however, the special force transducer is required. On the other hand, the thrust of wave generator driving by a linear electric motor with low inertia is proportional to the armature current and a minor roop of the armature current control is already equipped in the ordinary position control. Consequently, the thrust control requires no special equipment from the position control wave generator. But, the mechanical inertia and frictional forces of wave generator must be considered in addition to the wave forces on a paddle. The non-reflective wave generation can be realized by the thrust control, if the mechanical forces corresponding to the change of motion due to the effect of reflected waves from the model structure are disregarded in comparison with the thrust required in the operation in the state of no wave reflection from the model structure.

After the considerations of non-reflective wave generation systems, the thrust control system has been adopted for the new irregular wave generator in the large wave channel of 105 m long, 2.5 m deep and 3.0 m wide. the performance tests by regular waves establish that the thrust control decrease considerably the re-reflection of waves and makes very stable standing waves in front of a vertical wall. It is concluded that the new wave generator by the thrust control is satisfactorily applied to the irregular wave tests in the flume, because the influence of re-reflection of irregular waves is greatly decreased by the slight reduction of reflection from a wave paddle.

* Chief of Breakwaters Laboratory, Hydraulic Engineering Division

** Senior Research Engineer, Hydraulic Engineering Division

*** Former Member of Wave Power Laboratory, Hydraulic Engineering Division

目 次

要 旨	31
1. ま え が き	35
2. 無反射性造波方式の原理とシミュレーション	35
2.1 無反射性造波方式の原理	35
2.2 数値シミュレーションによる確認	40
3. 105 m 大型造波水路不規則波造波装置の概要	43
3.1 推力制御方式の採用	43
3.2 造波装置	43
4. 流体力と機械力の特徴	45
4.1 流 体 力	45
4.2 機 械 力	48
5. 推力制御式造波装置の性能	50
5.1 試 験 方 法	50
5.2 試 験 結 果	51
6. む す び	53
参 考 文 献	54
主 要 記 号 一 覧 表	54

1. ま え が き

防波堤に働く波力や安定性など構造物への波の作用の問題では、模型実験による検討が非常に有力な手段となる。そのため、当所においても造波水路などの波浪実験施設を整備し、これを用いて各種の研究を実施している。しかしながら、実際の海では沖側に事実上無限の拡がりを持つ波に対して、実験水路などでは造波板によって有限であり、それからの再反射波が問題となる。この影響を避けるため、通常再反射波が到達する以前の有効時間内に測定を終了するか、平面水槽内に水路を設けて模型構造物からの反射波を分散させるなどの手法がとられている。しかし、前者は長時間の波の作用を要する実験では能率が著しく低下し、後者は利用できる施設の制約を受ける。また、不規則波実験では模型構造物と造波板の間の多重反射系における波が定常となるのを待って実験を行うという手法もあるけれども、反射率が高い場合にはかなりの待ち時間を要するばかり、実験の種類によっては定常となるまでの過渡状態における波の作用が問題である。

一方、模型構造物からの反射波を再反射させない造波方式も試みられている。そのよく知られている例は水路底面の縦溝孔にピストン装置を設けた鉛直振動流型造波装置²⁾である。これは構造物からの反射波はほとんど透過してしまうため、背後の消波工さえ充分であれば再反射波は非常に小さい。しかし、この方式は深水性の波に対して効率が著しく低いという短所がある。

ところで、Milgram³⁾は水路端での消波装置に可動板を用いて、前面での水位の情報から反射させないようにその動きを制御する方式を提案した。これに本来造波すべき動きを加えれば無反射性造波が可能となり、Gilbert⁴⁾がその考え方を示している。また、英国のEdinburgh大学では造波板に働く流体圧力を検出することによって、再反射波を減じる造波方式を試みている⁵⁾。

このように、反射波に応じて造波板運動を制御し、再反射させないで所定の波を造波することができればその効果は大である。筆者らも1981年に当所の105m大型造波水路の造波装置を新替えるのに際してこれを検討し、これまでの方式と違った推力制御式造波装置を新しく導入した。本報告はその無反射性造波方式の原理と新造波装置の概要および性能をとりまとめたものである。

2. 無反射性造波方式の原理とシミュレーション

2.1 無反射性造波方式の原理

(1) 基本的考え方

反射波を吸収しつつ所定の波を造波することは任意形状の造波板で片面造波の場合であっても原理的には可能であるけれども、ここでは実際への適用性を考慮してピストン式の両面造波を対象として議論を進める。

図-1に示しているように、静水面に x 軸、鉛直上向きに z 軸をとり、 $z=-h$ に水底、 $x=0$ に鉛直の造波板があるものとする。造波板は x の正方向に進む波 η_I を造波するが、それと同時に背後に x の負方向に進む波 η'_I を造波する。この造波板背後の領域の端には消波装置があって反射はないものと仮定する。そのため、理論的には無限に拡がっているものとして扱う。前方へ進む波は模型構造物によって反射され、 x の負方向に進む波 η_R が生じる。この前方領域も理論的には半無限域として扱い、 η_I と η_R が単に共存している領域と考える。

さて、反射波 η_R を再反射させないためには、造

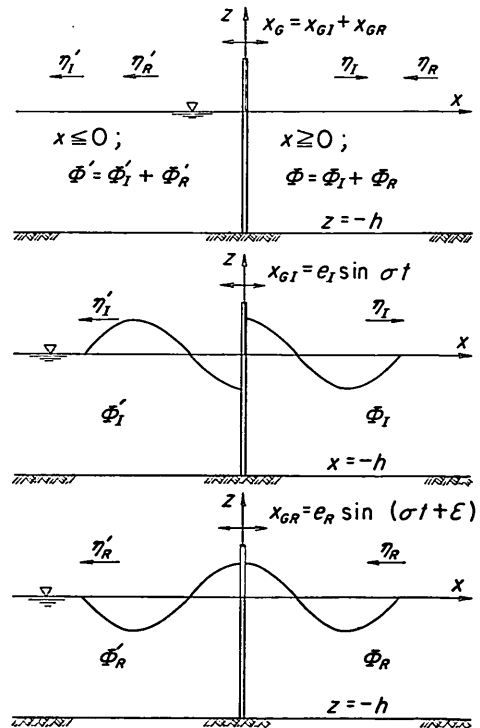


図-1 無反射性造波方式の原理

波板をどのように制御すればよいかということがここで
の課題である。そのためには本来の波 (η_I) は造波しつ
つ、反射波はあたかもそのまま通過するように制御して
やればよい。前出の 図-1 はこれを説明したもので、こ
のときの造波板の動き x_G (造波板変位) は本来の波を造
波する動き x_{GI} と反射波を通過させる場合の動き x_{Gn}
の和と考えることができる。つまり、前者は反射波がない
ときの通常の造波状態に対応するものであり、後者は
造波板が反射波によって自由に揺られている状態であ
る。以下、それぞれの定常状態における速度ポテンシヤ
ルを求め、無反射性造波方式の原理について考察する。

(2) 反射波がないときの造波理論

反射波がない場合については、既に Biésel・Suquet⁶⁾
などの理論がある。

造波板が次式のように正弦運動をするものとする。

$$x_{GI} = e_I \sin \sigma t \quad (1)$$

ここに、 e_I は造波板の片振幅、 σ は角周波数 ($=2\pi/T$, T : 周期)、 t は時間である。

このとき、前面および後面域での速度ポテンシヤル Φ_I
および Φ_I' は微小振幅を仮定してそれぞれ次のように表
される。

$$\begin{aligned} \Phi_I = & a_I \frac{g}{\sigma} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \sin(\sigma t - kx) \\ & - \frac{g}{\sigma} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} c_{In} \frac{\cos k_n(z+h)}{\cos k_n h} e^{-k_n x} \right\} \cos \sigma t \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Phi_I' = & -a_I \frac{g}{\sigma} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \sin(\sigma t + kx) \\ & + \frac{g}{\sigma} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} c_{In} \frac{\cos k_n(z+h)}{\cos k_n h} e^{k_n x} \right\} \cos \sigma t \quad (3) \end{aligned}$$

ここに、

$$a_I = \frac{4 \sinh^2 kh}{2kh + \sinh 2kh} e_I \quad (4)$$

$$c_{In} = \frac{4 \sin^2 k_n h}{2k_n h + \sin 2k_n h} e_I \quad (5)$$

であり、 g は重力の加速度である。また、波数 k ($=2\pi/L$, L : 波長) および k_n と σ との間には次の関係がある。

$$\left. \begin{aligned} \sigma^2 &= kg \tanh kh \\ &= -k_n g \tan k_n h \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

前面および後面域での水位 η_I , η_I' は次のようになる。

$$\eta_I = a_I \cos(\sigma t - kx) + \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} c_{In} e^{-k_n x} \right\} \sin \sigma t \quad (7)$$

$$\eta_I' = -a_I \cos(\sigma t + kx) - \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} c_{In} e^{k_n x} \right\} \sin \sigma t \quad (8)$$

この両式右辺の第1項は x の正あるいは負の方向に伝
播する振幅 a_I の進行波を表しており、第2項は距離と
ともに振幅が指数的に減じる定常波を表している。こう
した無限級数で表示される減衰定常波が生じるのは、造
波板の運動が進行波の水平水粒子運動と一致しないこと
による。

造波板の前面および背面に働く波動圧を p_{IJ} , p_{Ib} と
表記すると、それぞれ次のように表される。

$$p_{IJ} = p_{INJ} + p_{IIJ} \quad (9)$$

$$p_{Ib} = p_{INb} + p_{IIb} \quad (10)$$

ここに、

$$\begin{aligned} p_{INJ} &= -p_{INb} = p_{IN} \\ &= \rho g a_I \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \cos \sigma t \quad (11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p_{IIJ} &= -p_{IIb} = p_{II} \\ &= \rho g \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} c_{In} \frac{\cos k_n(z+h)}{\cos k_n h} \right\} \sin \sigma t \quad (12) \end{aligned}$$

であり、 p_{IN} は正規波動圧、 p_{II} は慣性波動圧と呼ばれ
る。 ρ は流体の密度である。

造波板の前面および背面に働く全波動圧 P_{IJ} , P_{Ib} は次
のようになる。

$$P_{IJ} = p_{INJ} + p_{IIJ} \quad (13)$$

$$P_{Ib} = p_{INb} + p_{IIb} \quad (14)$$

ここに、

$$\begin{aligned} P_{INJ} &= -P_{INb} = P_{IN} \\ &= \rho g a_I h \frac{\tanh kh}{kh} \cos \sigma t \quad (15) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{IIJ} &= -P_{IIb} = P_{II} \\ &= \rho g h \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} c_{In} \frac{\tan k_n h}{k_n h} \right\} \sin \sigma t \quad (16) \end{aligned}$$

であり、 P_{IN} を全正規波動圧、 P_{II} を全慣性波動圧と呼
ぶ。

図-2 は以上の式を用いて造波板運動と前面での水位
や全波動圧の位相の関係を示したものである。 \dot{x}_G , \ddot{x}_G
は造波板の運動速度および加速度、 η_{INJ} および η_{IIJ} は
式(7)の右辺第1項および第2項の $x=0$ での値を表し
ている。これから、正規波動圧は造波板速度に、慣性波
動圧は造波板加速度に同位相であることが知られる。

図-3 は $t/T=0$ での p_{INJ} および $t/T=1/4$ での p_{IIJ}
の鉛直分布を示したもので、 $h/L=0.478$ と深水波の条

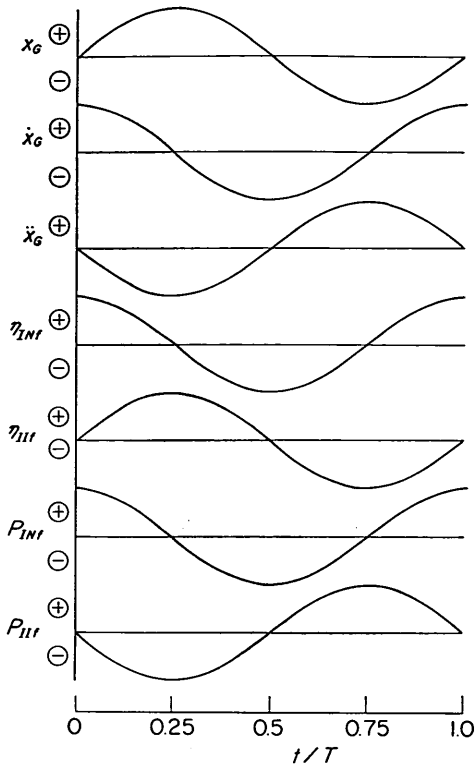


図-2 造波板運動と水位、波動圧の位相関係

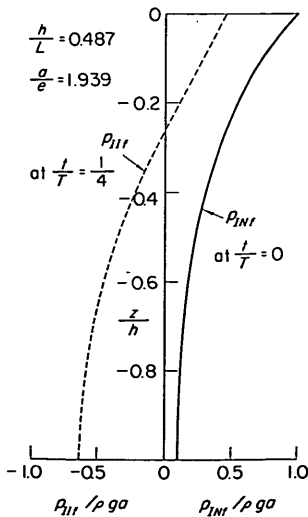


図-3 正規波動圧と慣性波動圧の分布 ($h/L=0.487$)

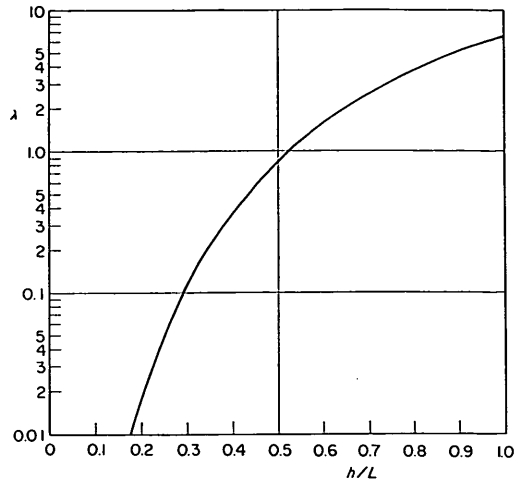


図-4 全正規波動圧と全慣性波動圧の比

件に近いときの例である。正規波動圧が静水面で最大値をとり、水深方向に同符号で漸減するのに対し、慣性波動圧は水面と水底で符号が異なる分布を示す。この慣性波動圧は h/L が小さくなるにつれて急減する。図-4 は全慣性波動圧と全正規波動圧の振幅の比 λ を次のように定義してこれを示したものである。

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{[P_{II}]}{[P_{IN}]} \\ &= \frac{2kh + \sinh 2kh}{4 \sinh^2 kh} (kh)^2 \\ &\quad \cdot \left| \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(knh)^2} \frac{4 \sin^2 knh}{2knh + \sin 2knh} \right| \quad (17) \end{aligned}$$

これによると、 $h/L \leq 0.29$ では $\lambda \leq 0.1$ 、 $h/L=0.52$ で $\lambda=1.0$ となり、 $h/L > 0.52$ では全慣性波動圧が卓越することが知られる。

(3) 反射波による造波板の運動

反射波 (x の負の方向に進行する波) によって造波板が鉛直姿勢を保持しながら自由に運動するときの速度ポテンシャルを考える。

$x = \pm \infty$ で x の負の方向に進行する波を次式で与える。

$$\eta_R = a_R \cos(\sigma t + kx + \epsilon) \quad (18)$$

このとき、 $x \geq 0$ での速度ポテンシャル Φ_R 、 $x \leq 0$ での速度ポテンシャル Φ_R' は造波理論と同様な扱いによってそれぞれ次のように求まる。

$$\begin{aligned} \Phi_R = & a_R \frac{g}{\sigma} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \sin(\sigma t + kx + \varepsilon) \\ & + \frac{g}{\sigma} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} c_{Rn} \frac{\cos k_n(z+h)}{\cos k_n h} e^{-k_n x} \right\} \cos(\sigma t + \varepsilon) \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \Phi_{R'} = & a_R \frac{g}{\sigma} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \sin(\sigma t + kx + \varepsilon) \\ & - \frac{g}{\sigma} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} c_{Rn} \frac{\cos k_n(z+h)}{\cos k_n h} e^{k_n x} \right\} \cos(\sigma t + \varepsilon) \end{aligned} \quad (20)$$

ここに、

$$c_{Rn} = \frac{4 \sin^2 k_n h}{2k_n h + \sin 2k_n h} e_R \quad (21)$$

$$e_R = \frac{2kh + \sinh 2kh}{4 \sinh^2 kh} a_R \quad (22)$$

造波板の変位 x_{GR} は次式で与えられる。

$$x_{GR} = -e_R \sin(\sigma t + \varepsilon) \quad (23)$$

$x \geq 0$ および $x \leq 0$ での水位 $\eta_R, \eta_{R'}$ は次のようになる。

$$\begin{aligned} \eta_R = & a_R \cos(\sigma t + kx + \varepsilon) \\ & + \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} c_{Rn} e^{-k_n x} \right\} \sin(\sigma t + \varepsilon) \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \eta_{R'} = & a_R \cos(\sigma t + kx + \varepsilon) \\ & - \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} c_{Rn} e^{k_n x} \right\} \sin(\sigma t + \varepsilon) \end{aligned} \quad (25)$$

すなわち、造波板前後面で同じ逆行波が存在していることが確認される。ただし、減衰定常波は前後面で逆位相である。

造波板の前面および背面に働く波動圧 p_{Rf}, p_{Rb} は次のように表される。

$$p_{Rf} = p_{RNf} + p_{RIf} \quad (26)$$

$$p_{Rb} = p_{RNb} + p_{RIb} \quad (27)$$

ここに、

$$\begin{aligned} p_{RNf} = & p_{RNb} = p_{RN} \\ = & \rho g a_R \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \cos(\sigma t + \varepsilon) \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} p_{RIf} = & -p_{RIb} = p_{RI} \\ = & -\rho g \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} c_{Rn} \frac{\cos k_n(z+h)}{\cos k_n h} \right\} \sin(\sigma t + \varepsilon) \end{aligned} \quad (29)$$

同様に、全波動圧 P_{Rf}, P_{Rb} は次のように書かれる。

$$P_{Rf} = p_{RNf} + p_{RIf} \quad (30)$$

$$P_{Rb} = p_{RNb} + p_{RIb} \quad (31)$$

ここに、

$$\begin{aligned} P_{RNf} = & P_{RNb} = P_{RN} \\ = & \rho g a_R h \frac{\tanh kh}{kh} \cos(\sigma t + \varepsilon) \end{aligned} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} P_{RIf} = & -P_{RIb} = P_{RI} \\ = & -\rho g h \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} c_{Rn} \frac{\tan k_n h}{k_n h} \right\} \sin(\sigma t + \varepsilon) \end{aligned} \quad (33)$$

(4) 造波板に働く波力を制御する方式

以上の結果を用いて、無反射で造波しているときの $x \geq 0$ での速度ポテンシャル Φ および $x \leq 0$ での速度ポテンシャル Φ' はそれぞれ次のように表される。

$$\Phi = \Phi_I + \Phi_R \quad (34)$$

$$\Phi' = \Phi_I' + \Phi_{R'} \quad (35)$$

また、このときの造波板運動の変位 x_G は次式で与えられる。

$$x_G = x_{GI} + x_{GR} \quad (36)$$

したがって、反射波が既知で定常状態に達している場合には、式(36)で造波板変位を制御してやればよいことになる。しかし、実際には反射波は未知であり、これを既知として造波板を制御することはできない。そのため、一般には何らかの情報を用いる必要があり、Milgramの研究⁷⁾は造波板前面での水位を検知してこれが可能であることを示唆している。この場合には背面での造波は無関係で、片面造波であってもよい。ただし、後述する推力制御Ⅱと同様原理的には2点入力が必要と考えられる。そこで、両面造波の場合の特長的な方式として造波板に働く波力を制御することを考える。

無反射造波時の造波板に働く波力 F_W は、前・後面での波動圧の差をとって次のように与えられる。ただし、 F_W は x の正方向に働くときを正と定義する。

$$\begin{aligned} F_W = & -P_{If} + P_{Ib} - P_{Rf} + P_{Rb} \\ = & -P_{INf} - P_{IIf} + P_{INb} + P_{I Ib} \\ & - P_{RNf} - P_{RIf} + P_{RNb} + P_{RIb} \end{aligned}$$

式(15)、(16)、(32)、(33)の関係から、

$$F_W = -2(P_{IN} + P_{II}) - 2P_{RI} \quad (37)$$

このうち、 $(P_{IN} + P_{II})$ は造波目標の波の諸元から既知であるが、 P_{RI} は反射波による全慣性波動圧であり未知である。しかし、慣性波動圧は前出の図-4でみたように h/L がある程度小さければ正規波動圧に比べて著しく小さい。しかも、模型構造物による反射率は1.0以

下であり、 $a_R \leq a_I$ であるから、 $[P_{RI}] \leq [P_{II}]$ である。ここに、 $[a]$ は a の振幅を表す。そのため、大低の場合式(37)は次のように近似される。

$$F_W \approx F_{IW} = -2(P_{IN} + P_{II}) \quad (38)$$

すなわち、反射波がある場合でも造波板の受ける波力が目標の波を造波するときの波力のままであるように造波板を制御してやればよいことになる。これが両面造波の場合に特長的な無反射性造波の原理であり、全波力ではなく局所的な差圧を制御しても同じである。

反射波の慣性波動圧が無視できない場合には、再反射波が生じる。これがどの程度になるか次に評価してみる。

簡単のため、反射波のみがあるときを考える。このとき、造波板の受ける波力 F_W が 0 となるように制御される。再反射、すなわち反射波の慣性波動圧が残留することによって造波してしまう波による全正規波動圧を P_{RRN} 、全慣性波動圧を P_{RRI} とすると、式(37)の P_{IN} 、 P_{II} を P_{RRN} 、 P_{RRI} に置き換えて次式を得る。

$$P_{RRN} + P_{RRI} + P_{RI} = 0 \quad (39)$$

一方、造波板の再反射率 K_{RR} を次式で定義する。

$$K_{RR} = \frac{a_{RR}}{a_R} = \frac{[P_{RRN}]}{[P_{RN}]} = \frac{[P_{RRI}]}{[P_{RI}]} \quad (40)$$

ここに、 a_{RR} は再反射波の振幅である。

式(36)から、

$$P_{RRN} + P_{RRI} = -P_{RI}$$

したがって、

$$[P_{RRN} + P_{RRI}] = [P_{RI}]$$

P_{RRN} と P_{RRI} は位相が 90° 異なるので次式を得る。

$$[P_{RRN}]^2 + [P_{RRI}]^2 = [P_{RI}]^2$$

よって、再反射率は次式のように表される。

$$K_{RR} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 + \lambda^2}} \quad (41)$$

ここに、

$$\lambda = \frac{[P_{RRI}]}{[P_{RRN}]} \quad (42)$$

であり、前出の式(17)に等しい。

図-5 は式(41)による K_{RR} を h/L に対して示したもので、 $h/L < 0.3$ では $K_{RR} < 0.1$ 、 $h/L = 0.5$ で $K_{RR} = 0.65$ であり、 h/L が大きくなるにつれて $K_{RR} = 1.0$ に近づいていく。

以上は反射波に対する再反射率であり、本来の造波振幅 a_I に対する a_{RR} の比は次式のようになる。

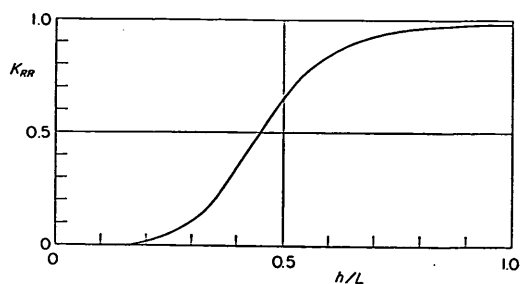


図-5 反射波の慣性波動圧による再反射率

$$\frac{a_{RR}}{a_I} = K_R K_{RR} \quad (43)$$

ここに、

$$K_R = \frac{a_R}{a_I} \quad (44)$$

実際の水路においては、 h/L が大であればたとえば波装置などによって K_R を小さくすることができる。したがって、そうしたくふうを払えば一般に前出の式(38)のように近似でき、これによる再反射の影響は小さいといえる。

(5) 造波機推力を制御する方式

以上の方式では造波板に働く波力を計器で測定する必要がある。しかし、低慣性直流電動機駆動の造波装置では、造波機推力が電動機の電機子電流にほぼ比例し、しかも通常の位置制御の場合であっても電流制御のマイナーループが付いているので、造波機推力を制御する方式であれば特別な計器を要しない⁸⁾。ただし、この場合これまでに述べた流体力のほか、機械的な力を考慮しなければならない。

いま、こうした機械力が造波板加速度に比例する慣性力と速度に比例する摩擦抵抗力の和で近似できるものとする、造波機を駆動するのに要する推力 F_T は反射波による慣性波動圧を無視して次のように表される。

$$F_T = 2(P_{IN} + P_{II}) + \frac{W_e}{g} \ddot{x}_G + q_e \dot{x}_G \quad (45)$$

ここに、 W_e 、 q_e は機械力を表すための等価な重量および抵抗係数であり、駆動部と造波板は直結されているものとする。

式(45)において \ddot{x}_G 、 \dot{x}_G は未知であるので、これらの項を実際の造波板運動を検出することによって補償することができれば、推力制御による無反射性造波が可能となる。その場合、指令信号としての入力項を F_{T0} 、補償項を F_{T8} と表記して、次の二通りの方法が考えられる。

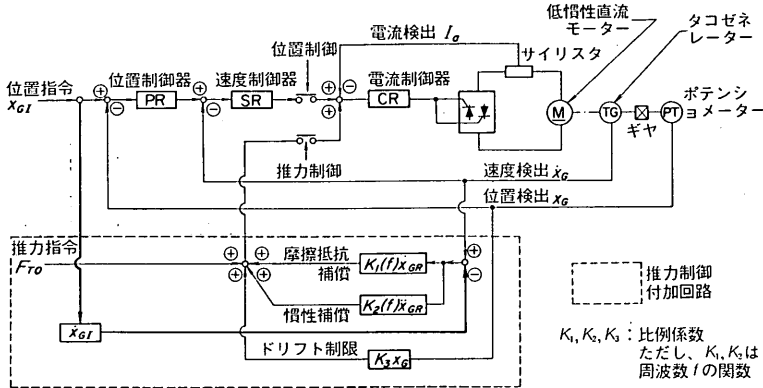


図-6 推力制御IIの原理図

推力制御 I :

$$F_{T0} = 2(P_{IN} + P_{II}) \quad (46)$$

$$F_{Ts} = \frac{W_e}{g} \ddot{x}_G + q_e \dot{x}_G \quad (47)$$

推力制御 II :

$$F_{T0} = 2(P_{IN} + P_{II}) + \frac{W_e}{g} \ddot{x}_{GI} + q_e \dot{x}_{GI} \quad (48)$$

$$F_{Ts} = \frac{W_e}{g} (\ddot{x}_G - \ddot{x}_{GI}) + q_e (\dot{x}_G - \dot{x}_{GI}) \quad (49)$$

つまり、推力制御 I は流体力だけを入力して、機械力はすべて補償によるものであり、推力制御 II は流体力と本来の波を造波するのに要する機械力の和を入力して、反射波に対する機械力成分のみ補償するものである。ただし、後者の場合 F_{T0} と同時に補償項に対し x_{GI} を入力するか、あるいは F_{T0} から演算する回路を組む必要がある。この点は短所となるけれども、少なくとも反射波がないとき推力制御によって所定の波をほぼ完全に造波できるという長所がある。

図-6 はこうした推力制御 II の制御原理を示したものである。推力制御では位置については何も制御しないため造波板の零位置は必ずしも一定とならず、ドリフトが生じる危険性がある。そのため、以上述べた補償回路のほか、向心力を与えるドリフト防止回路が不可欠である。

2.2 数値シミュレーションによる確認

(1) 計算の方法

2.1 において定常造波理論に基づき無反射性造波方式の原理について考察したが、ここではそのうち造波板に働く波力を制御する方式について高山⁹⁾ によるタンク理論を用いて検討してみる。この理論は振動するタンク内

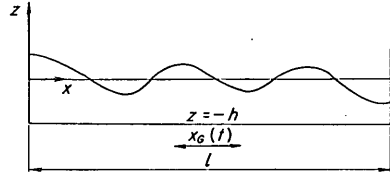


図-7 タンクモデル

の発生波に関して非定常解を求めたもので、既にピストンタイプの造波板によって起こされる波の伝播現象にも応用されている。

図-7 に示しているように長さ l 、水深 h のタンクが水平方向に $x_G(t)$ で振動したとき、タンク内の発生波は次式で与えられる¹⁰⁾。

$$\eta = \sum_{n=0}^{\infty} A_n(t) \cos \frac{n\pi}{l} x \quad (50)$$

ここに、

$$A_n(t) = \frac{2}{n\pi} \left\{ 1 - (-1)^n \right\} \tanh \frac{n\pi h}{l} \left\{ x_G(t) + \omega_n \int_0^t \sin \omega_n(t - \tau) x_G(\tau) d\tau \right\} \quad (51)$$

$$\omega_n^2 = g \frac{n\pi}{l} \tanh \frac{n\pi h}{l} \quad (52)$$

また、 $x=0$ での鉛直壁に働く前面合波力 $P(t)$ は、

$$P(t) = \rho \sum_{n=1}^{\infty} \left[\left\{ \frac{h}{\tanh(2\pi h/l)} - \frac{l}{n\pi} \right\} \frac{l}{n\pi} A_n''(t) + gh A_n(t) \right] \quad (53)$$

ここに、 $A''(t)$ は $A_n(t)$ を時間に関し 2 回微分したものである。 $x=l$ での鉛直壁に働く合波力は式 (53) の逆符号で与えられる。

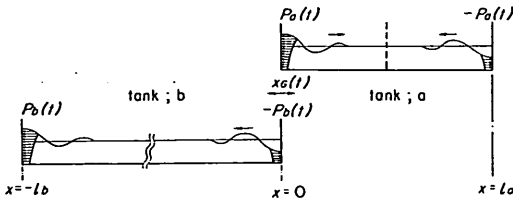


図-8 両面造波のタンクモデル

このタンク理論を 図-8 に示しているように両面造波の水路に応用する。すなわち、長さ l_a のタンク a と長さ l_b のタンク b の二つのタンクを考え、 $x=0$ において造波板に相当する鉛直壁を共有させる。その長さは、計算時間内に $x=-l_b$ で発生した波が $x=0$ に到達しないように $l_a \ll l_b$ とする。一方、 $x=l_a$ で発生した波は x の負の方向に伝播するが、これはタンク a の中央に鉛直壁があるとしたとき、 $x=0$ で発生した波を逆位相にして完全反射させた波に相当する。したがって、 $x=l_a/2$ の地点は定常状態においては常に重複波の節となる。

以上のようなタンクモデルを設定して、 $x=0$ での造波板の受ける合波力(x の負の方向を正と定義する)が次式の指令波力 P_0 となるように、造波板の運動速度 $\dot{x}_G(t)$ を数値的に制御する。

$$P_0(t) = 2\rho g a h \frac{\tanh kh}{kh} \cos \sigma t \quad (54)$$

これは、両面造波の場合の定常理論による全正規波動圧を与えたものである。

さて、造波板の運動速度をどのように制御するかということが問題となるが、これについては以下のように考える。

まず、反射波がないときの定常造波理論によると、造波板が

$$x_G = e \sin \sigma t \quad (55)$$

で運動しているとき、全波力は次式で与えられる。

$$P_s(t) = 2\rho g h \frac{\tanh kh}{kh} \frac{4 \sinh^2 kh}{2kh + \sinh 2kh} (e \cos \sigma t + \lambda e \sin \sigma t) \quad (56)$$

式(55)と(56)から次式を得る。

$$\dot{x}_G(t) = A P_s(t) - A \lambda x_G(t) \quad (57)$$

ここに、

$$A = \frac{1}{\frac{2\rho g h}{k\sigma} \frac{\tanh kh}{kh} \frac{4 \sinh^2 kh}{2kh + \sinh 2kh}} \quad (58)$$

これより、造波板の運動速度は造波板の受ける波力と変位に関係していることがわかる。ただし、 h/L がある程度小さければ λ の値は小さく、変位の項は無視できる。そこで、計算時間間隔 Δt ごとの造波板運動速度を次のように制御する。

$$\dot{x}_G(t + \Delta t) = \dot{x}_G(t) + \Delta \dot{x}_G(t) \quad (59)$$

ここに、

$$\Delta \dot{x}_G(t) = \alpha \Delta P \quad (60)$$

$$\Delta P(t) = P(t) - P_0(t) \quad (61)$$

であり、 α は試行錯誤によって設定する係数、 $P(t)$ はタンク理論から計算される合波力で次式で与えられる。

$$P(t) = P_a(t) + P_b(t) \quad (62)$$

式(62)の $P_a(t)$ 、 $P_b(t)$ は式(63)で与えられる造波板変位に対し、式(53)で計算されるタンク a、タンク b での波力である。

$$x_G(t) = x_G(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2} \{ \dot{x}_G(t - \Delta t) + \dot{x}_G(t) \} \quad (63)$$

以上、式(59)で与えられる速度は式(57)の第1項に相当するものであり、このままでは造波板にシフトが生じる。そのため、式(59)で得られる $\dot{x}_G(t)$ をさらに次のように補正する。

$$\dot{x}_G(t) = \dot{x}_G(t) - \beta \frac{1}{T^2} \int_{t-T}^t x_G(\tau) d\tau \quad (64)$$

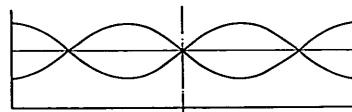
ここに、 β は平均位置補正のための係数であり、試行錯誤的に設定する。

(2) 計算結果

水路の水深 $h=1.7$ m、指令波力の周期 $T=2.0$ s としたときの計算例を示す。このとき、指令波力の周期に対応する波長 L は 5.912 m となり、式(54)の指令波力 $P_0(t)$ は無次元化して次のように与えられる。

$$\frac{P_0(t)}{\rho g a h} = 1.049 \cos 2\pi \frac{t}{T} \quad (65)$$

case I $l_a = 1.5L$



case II $l_a = 2.0L$

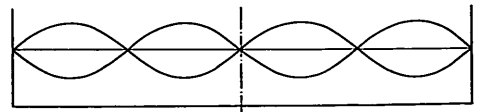


図-9 定常波の波形

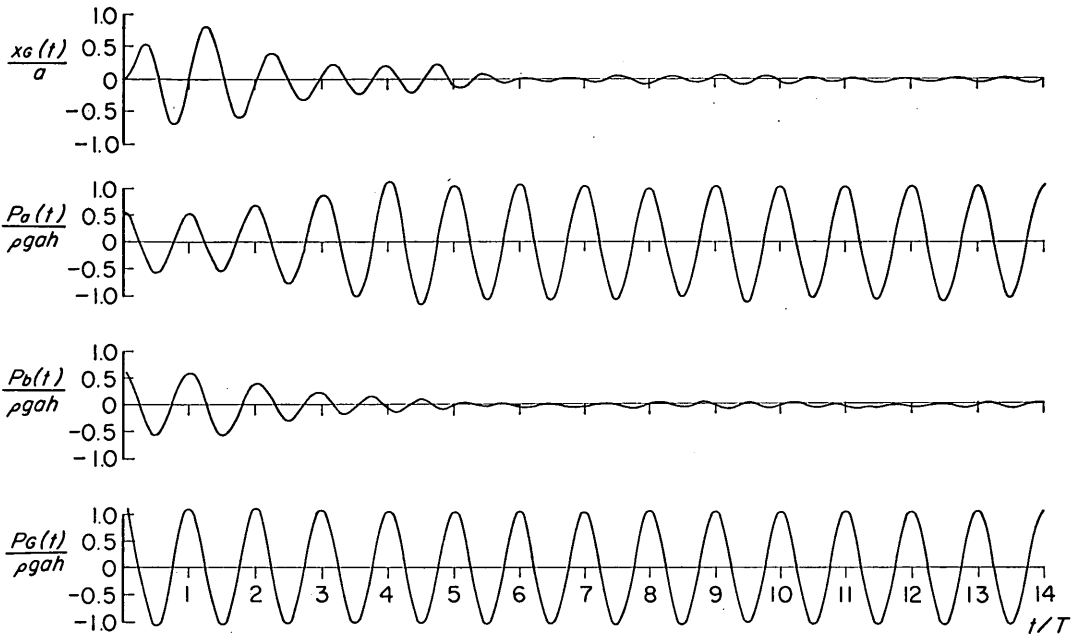


図-10 無反射性造波のシュミレーション計算結果 (ケース I)

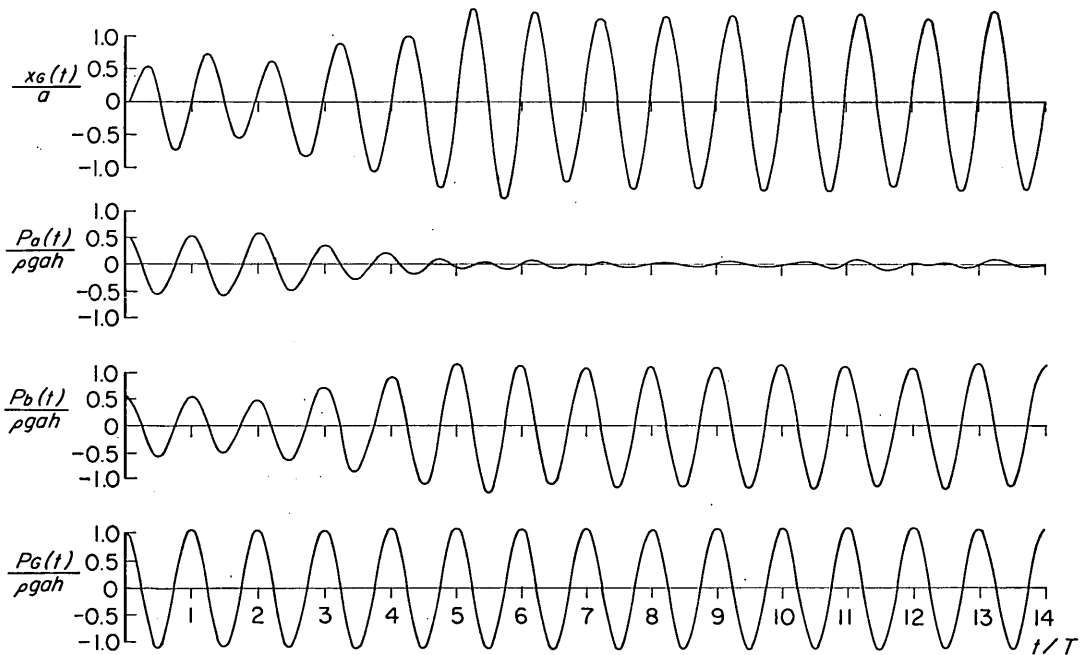


図-11 無反射性造波のシュミレーション計算結果 (ケース II)

無反射性造波方式の原理と推力制御式造波装置の特性

この場合、全慣性波動圧と全正規波動圧の比 λ は 0.09 で、慣性波動圧はほとんど無視できる条件である。

水路の長さは次の 2 種類を対象とする。

ケース I :

$$l_a/L=1.5, \quad l_b/L=30.0$$

ケース II :

$$l_a/L=2.0, \quad l_b/L=40.0$$

ケース I は 図-9 に示しているように定常状態において $x=0$ が重複波の腹となる条件であり、ケース II は節となる条件である。このように壁面位置で節となる条件があるのは両端が振動境界であることによる。したがって、造波板の消波が完全であれば、ケース I の場合造波板は静止することになり、ケース II の場合は 2 倍の振幅で運動することになる。なお、計算時間間隔 Δt は $T/200$ にとり、比例係数 α, β は試行計算によってそれぞれ 0.016, 0.01 に設定した。

図-10, 11 はその計算結果を示したもので、それぞれ上から造波板変位 $x_a(t)$ 、前面での波力 $P_a(t)$ 、後面での波力 $P_b(t)$ 、および合波力 $P_G(t) (=P_a(t)+P_b(t))$ を示している。この合波力 $P_G(t)$ は式(65)の指令波力 $P_0(t)$ にほぼ一致し、よく追従していることがわかる。また、反射波(タンク a において x の負の方向へ進む波)到達後、ケース I の場合は造波板がほぼ静止状態となり、前面で重複波力を受け、ケース II では造波板運動がほぼ 2 倍となり前面でほとんど 0、後面で 2 倍の波力を受けているのが認められる。

こうした例によって、造波板の受ける波力が一定の指令波力に一致するように造波板の動きを制御することによって、過渡状態を含めて無反射性造波が可能であることが確認される。

3. 105 m 大型造波水路不規則波造波装置の概要

3.1 推力制御方式の採用

無反射性造波を行うためには、造波板に働く波力あるいは前後面の差圧を制御するのが原理的に最も簡明であ

るけれども、それには前述したように特別な計器を必要とする。そのため、当所の 105 m 大型造波水路(長さ 105 m, 深さ 2.5 m, 幅 3.0 m)¹¹⁾ の造波機を新替えるに際して、低慣性直流電動機駆動の造波機とし、推力制御方式を採用することにした。これは通常の位置制御方式に加えて、切り換えによって推力制御を可能とする回路を付加したものである。

ただし、推力指令と同時に位置指令を入力できるようにはしておらず、前出の 図-6 で位置指令から始まる太線部分の回路を削除したものに相当する。また、機械力補償回路は一応つけてあるけれども、これによって機械力補償を完全に行うことを意図したのではなく、必要によりこれを作動し得るように付加したものである。これはあらかじめ当該造波機の機械力の特性を知ることが困難であったこと、および推力制御による無反射性造波方式は初めての試みで不明な点が多く、最初から完璧な機構を期すには危険性があったことによる。そのため、ここで採用した推力制御方式は 2.1 で述べた推力制御 II に基づいているけれども、反射波に対する機械力補償は無視したものに相当する。

ドリフト防止機構は中心位置に向かうような力を電気的に与えるようにしたものである。

3.2 造波装置

図-12 に 105 m 大型造波水路における新造波装置の配置を示している。造波機は約 75 m 離れた制御室内から遠隔操作できる。

図-13~15 は造波機の側面図、平面図、正面図を示したものである。造波機は 74 kW の低慣性直流電動機駆動のピストン式で、造波板は両面对称である。電動機に直結したボールネジの有効最大ストロークは ± 500 mm であるが、造波板最大ストロークは拡大機構により ± 1000 mm となる。表-1 に電動機およびボールネジの仕様をまとめて示しておいた。

なお、造波板運動範囲の水路両側壁および底面にはステンレス鋼板を張り付け、かつ造波板周辺には硬質ゴム

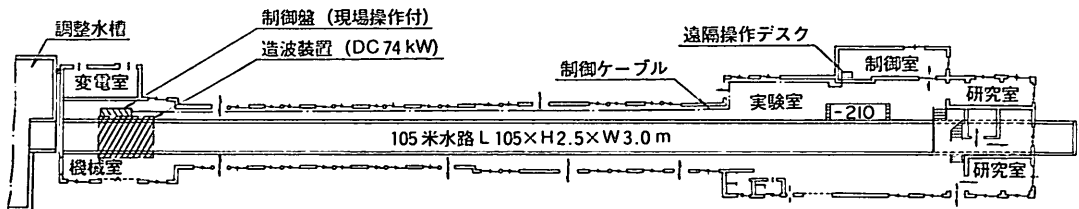


図-12 105 m 大型造波水路造波装置の配置図

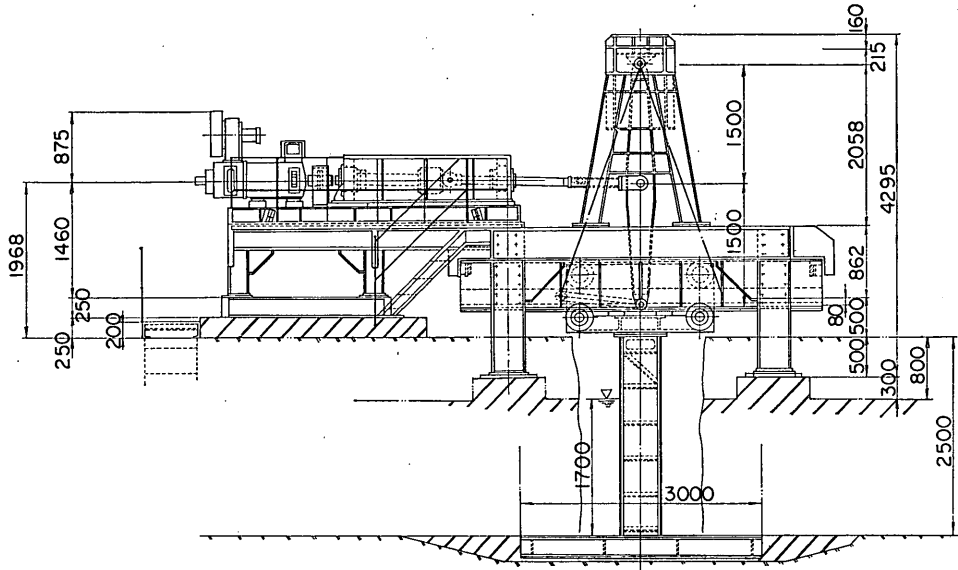


図-13 造波機側面図

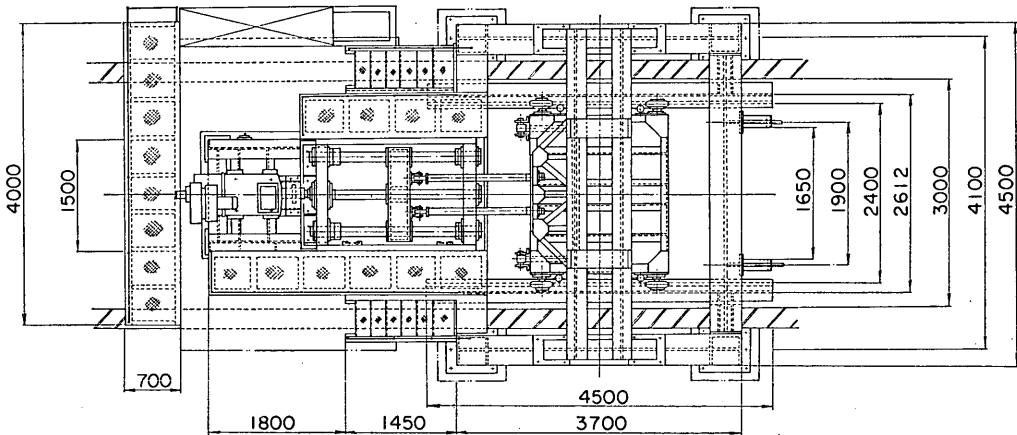


図-14 造波機平面図

板を取り付けて、造波板と水路側壁等との間からの漏水が小さくなるようにしてある。また、図-15の正面図に認められるように造波板中央の前後面に波圧計取り付け孔を設けている。ただし、これは必要により造波板に働く波圧を測定するもので、制御に用いるものではない。

図-16は遠隔操作盤のパネルを示したもので、前述したように切り換えによって位置制御あるいは推力制御による運転が可能である。造波信号はデータレコーダ、発

振器あるいはミニコンピュータから入力することができる。また、入力信号（位置あるいは推力）および造波板位置、速度、電機子電流、電圧の5種の信号をモニターできるようにしてある。

無反射性造波方式の原理と推力制御式造波装置の特性

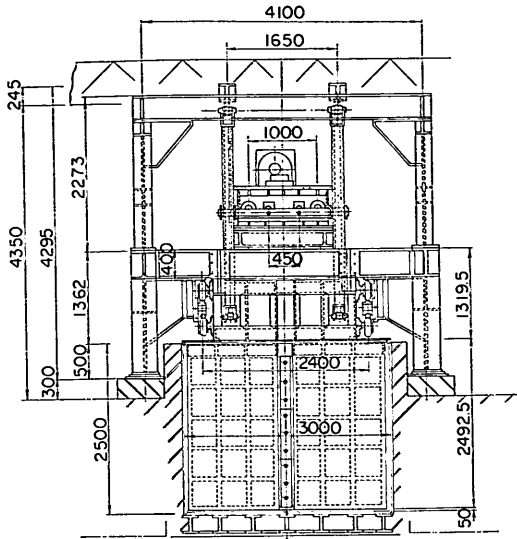


図-15 造波機正面図

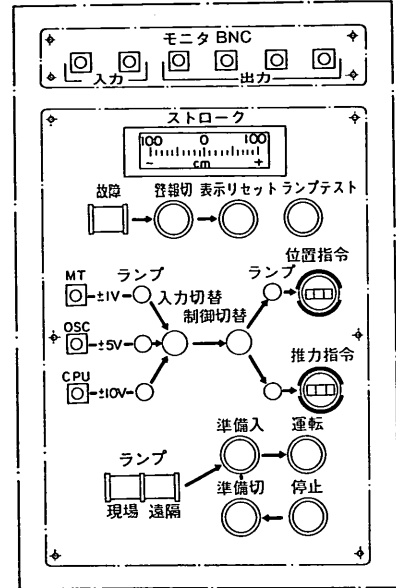


図-16 遠隔操作パネル

表-1 電動機およびボールネジ仕様

直流電動機 (安川電機 GBDR-K)
 倍電圧仕様 DC 440 V, 74 kW, 1150 rpm
 電機子電圧 440 V
 サイリスタレオナード方式による可逆運転方式
 冷却ファン AC 200 V, 1.5 kW
 励磁巻線分巻 DC 220 V 一定
 速度検出器(TG), 位置検出器(PM)装備

ボールネジ (NKS-BS 10032)
 直径 ϕ 100 mm, リード長 32 mm
 最大有効ストローク ± 500 mm
 (造波板最大ストローク ± 1000 mm)

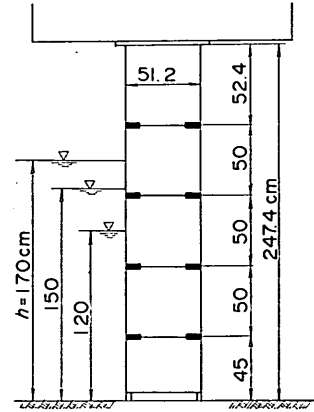


図-17 造波板波圧計取り付け位置

4. 流体力と機械力の特性

4.1 流体力

(1) 測定の手法

本章では 3. で述べた造波装置に働く流体力および機械力の測定結果を示す。

まず、造波板に働く流体力すなわち波力について、造波板両面に働く波圧を測定することにより調べた。図-17はその波圧計取り付け位置を示したものである。用いた波圧計は定格 200 gf/cm^2 、受圧面の直径 D が 2.45 cm の圧力変換器 (共和電業製) である。造波水深 h を 120 ,

150 , 170 cm の 3 種に変化させ、位置制御により周期 T は $1.0 \sim 6.0 \text{ s}$ の範囲、造波板ストロークは $\pm 60 \text{ cm}$ までの範囲で変化させた。

ただし、この測定においては波圧計を加速度運動する造波板に取り付けているため、空気中であっても受感部の慣性力を検出してしまい、これを補正しなければならない。そのため、空気中で波圧計を加速度運動させその慣性力を調べた。図-18はその結果を圧力換算値 p_0 として示したもので、次式で表される。

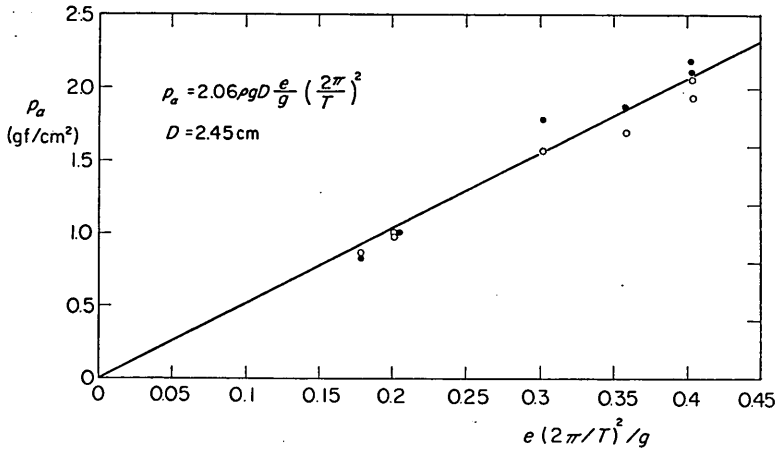


図-18 波圧計の慣性力

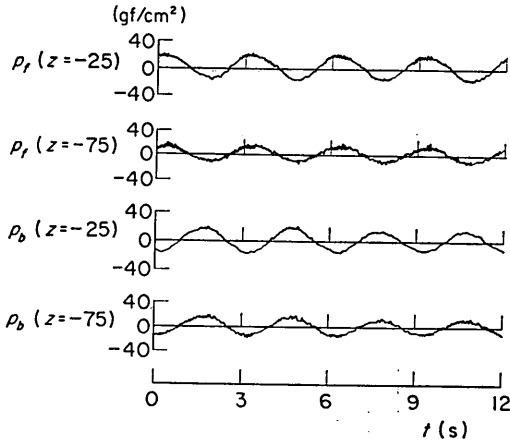


図-19 波圧記録の例 ($h=120 \text{ cm}$, $T=3.0 \text{ s}$, $e=20 \text{ cm}$)

$$p_a = 2.06\rho g D \frac{e}{g} \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \quad (66)$$

波圧のピーク値 p_p は造波板加速度に比例する成分(慣性波動圧)に対しこれを補正して、次式のように近似できる。

$$p_p \doteq p_m \left\{ 1 - \frac{\lambda_z}{\sqrt{1+\lambda_z^2}} \frac{p_a}{p_m} \right\} \quad (67)$$

ここに、 p_m は波圧計の慣性力を含めた測定波圧強度のピーク値、 λ_z は造波理論より計算される波圧計位置での正規波動圧と慣性波動圧の比である。

(2) 波圧波形の記録例

図-19, 20 は $h=120 \text{ cm}$, $T=3.0 \text{ s}$ で、 $e=20 \text{ cm}$ および 60 cm のときの波圧記録の例を示したものである。図中 p_f , p_b はそれぞれ造波板前面および後面での圧力、

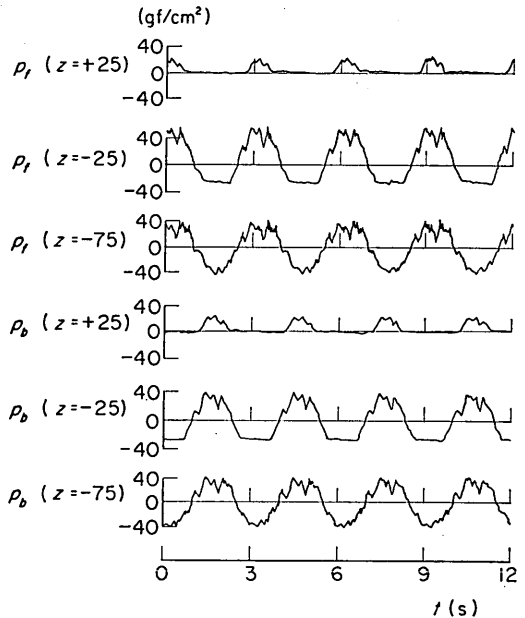


図-20 波圧記録の例 ($h=120 \text{ cm}$, $T=3.0 \text{ s}$, $e=60 \text{ cm}$)

() 内は静水面を原点として上向きを正とした z 軸の座標(cm)を表している。

この例から、前後面での波圧の位相が半周期ずれていることが確認される。また、ストロークの小さい条件では比較的正弦的な波圧波形であるのに対し、ストロークが大きくなると波形の乱れが著しくなるのが認められる。これは造波板のがたや振動によるほか、水面近くで部分的砕波が生じることによるものと推測される。その

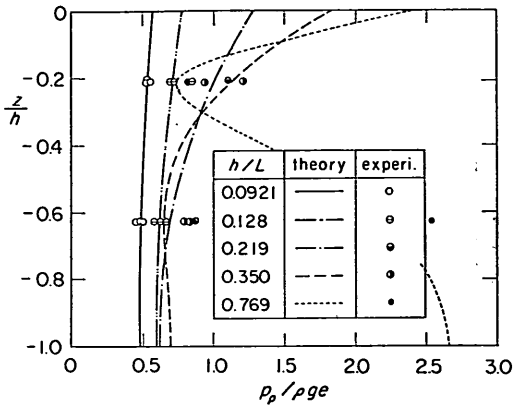


図-21 波圧ピーク値の鉛直分布 ($h=120$ cm)

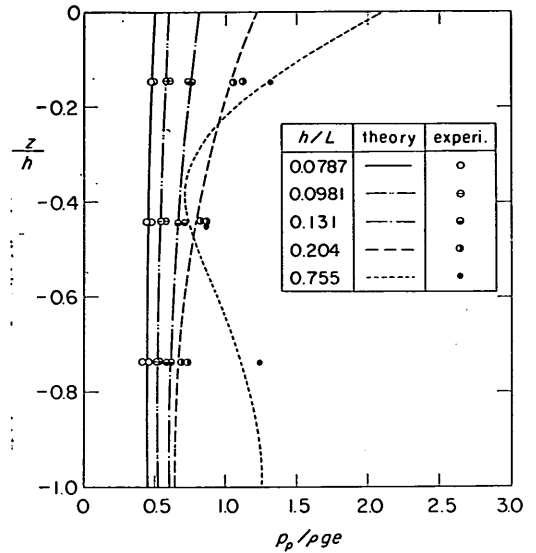


図-23 波圧ピーク値の鉛直分布 ($h=170$ cm)

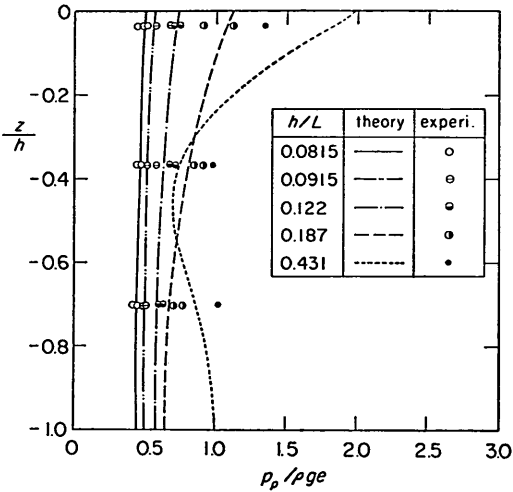


図-22 波圧ピーク値の鉛直分布 ($h=150$ cm)

ため、波圧ピーク値の読み取りに際してはこうした変動を平滑化している。

(3) 波圧ピーク値の鉛直分布

図-21~23 に前面波圧のピークの鉛直分布を示す。測定値は波圧計が露出しないものについては波圧波形の全振幅を読み取って 1/2 を乗じ、露出するものについては露出線からのピーク値を読み取って波圧計の深さに相当する水圧を補正して求めたものである。

図には造波理論から計算した鉛直分布も併せて示している。特に、 h/L が小さい条件で両者はよく一致している。 h/L が大きくなるにつれて違いがやや大きくなるものもあるけれども、その場合でも理論値は鉛直分布の傾

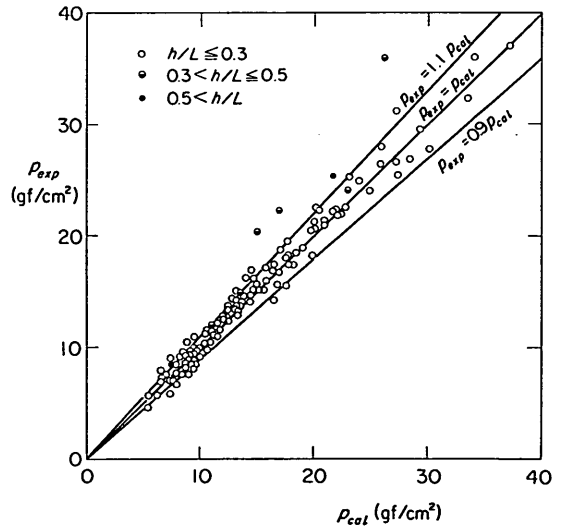


図-24 造波板前面での波圧ピーク値の測定値と理論値の相関

向をよく表している。

(4) 理論値と測定値の相関

図-24, 25 は波圧ピーク値の理論値 (p_{cal}) と測定値 (p_{exp}) の相関を示したものである。ただし、波圧計が露出しない場合のデータに限っている。これによると、前面波圧の測定値は $h/L \leq 0.3$ の条件では理論値のほぼ土

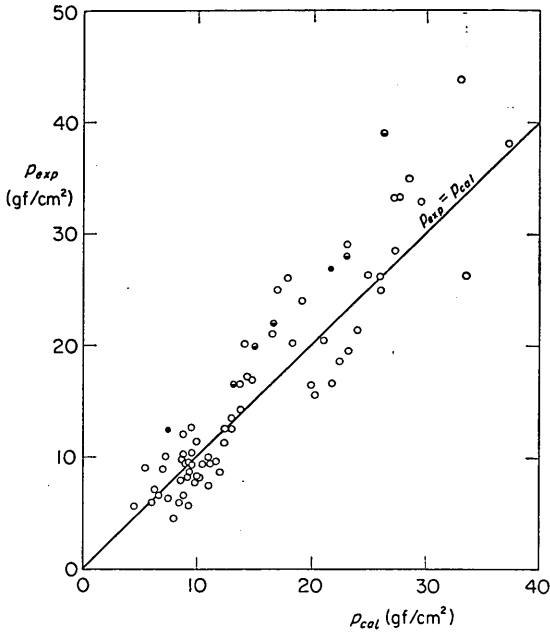


図-25 造波板後面での波圧ピーク値の測定値と理論値の相関

10% の範囲に入っている。しかし、 $h/L > 0.3$ の条件では測定値が理論値よりやや大きい傾向にある。これは慣性波動圧が正規波動圧より卓越する条件であり、波圧計の慣性力補正が充分でなかったのかもしれない。

これに対し、図-25 に示している後面での波圧の測定値はばらつきが全体にやや大きい。これは造波板背後の消波斜面との距離が短いので、そこからの反射波の影響が現れたものと推測される。このように背後での反射波の影響があると推力制御による無反射性造波の誤差となるので、背後の消波を充分に行うことが必要となる。

4.2 機械力

(1) 測定の方法

推力制御では機械力がどの程度になるかということが非常に重要である。そのため、水なしの状態でも位置制御により造波機を運転してこれを調べてみた。その測定原理は以下のとおりである。

当該造波機の電動機電機子電流 I_a (A) とトルク T_r (tf·m) は 図-26 に示しているように直線性がよく、次式で表される。

$$T_r = 3.36 \times 10^{-4} I_a \quad (68)$$

一方、トルクとボールネジ推力 F_B (tf) との間には摩

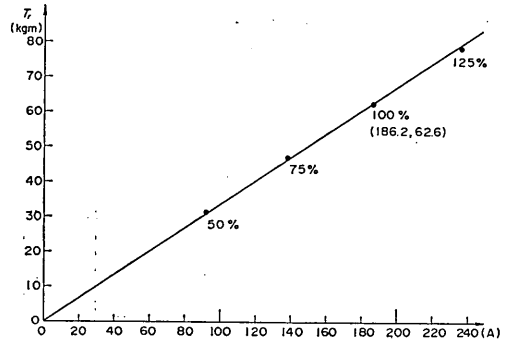


図-26 電機子電流とトルクの関係

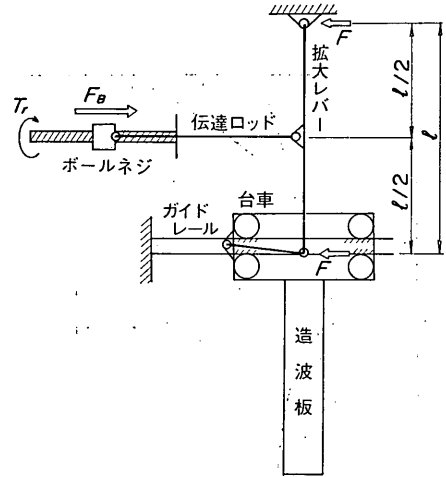


図-27 拡大機構による推力の関係の説明図

擦力を無視すると次の関係がある。

$$F_B = \frac{2\pi}{l_B} T_r \quad (69)$$

ここに、 l_B はボールネジのリード長で、この場合 0.032 m である。

今、機械力 F_M (tf) を流体力と同じく造波板に働く力として定義する。このとき、当該造波機では 図-27 に説明しているように 2 倍の拡大機構を有しているため、 F_M と F_B の関係は次のようになる。

$$F_M = \frac{1}{2} F_B \quad (\text{空中}) \quad (70)$$

したがって、式(68)~(70) から F_M と I_a の関係として次式を得る。

$$F_M = 0.0330 I_a \quad (71)$$

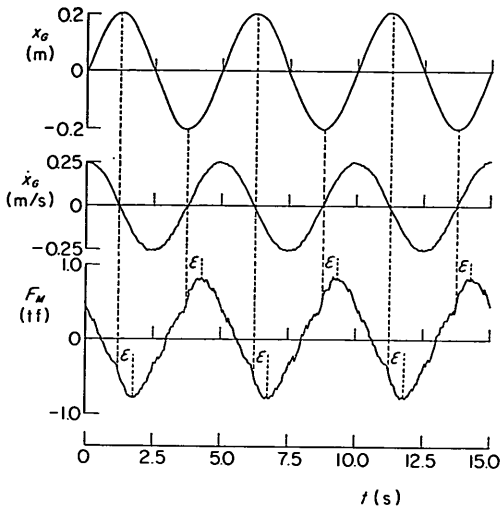


図-28 機械力測定記録の例 ($T=5.0\text{ s}$, $e=0.2\text{ m}$)

(2) 測定記録の例および機械力のピーク値

図-28 は $T=5.0\text{ s}$, $e=0.2\text{ m}$ のときの造波板変位 x_g , 速度 \dot{x}_g および機械力 F_M に換算した電機子電流の記録を例示したものである。 x_g や \dot{x}_g が綺麗な正弦変化をするのに対し、電機子電流にはフィードバックに際して生じる細かな不規則変動が加わっている。また、速度の符号が逆転するとき電機子電流にややジャンプが認められる。これは造波板の加速度や速度に比例する機械力のほか、符号は速度に一致するけれどその絶対値はほぼ一定の摩擦力があることを示唆している。

こうした電機子電流の波形から細かな不規則変動を平滑化してピーク値を求め、機械力 F_M に換算して示したのが図-29である。横軸にストローク e をとって、周期をパラメータとして示してある。これから、機械力は周期が短いほど、また、ストロークが大きいほど大となることが明らかである。

(3) 等価重量および抵抗係数

機械力には前述したようにその絶対値がほぼ一定の摩擦抵抗力がある可能性があるけれども、これを無視して加速度に比例する成分と速度に比例する成分の和で近似したときの等価な重量 W_e および抵抗係数 q_e を求めてみる。この分離は次のような簡便法によった。ただし、ボールネジ推力 F_B に対するものではなく、(1) で定義した機械力 F_M に対応するものである。

まず、機械力を次式のように振幅 A の正弦変化で近似する。

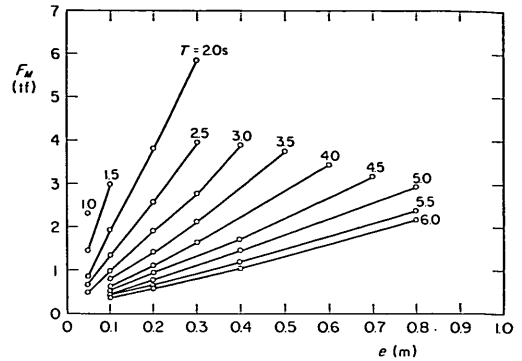


図-29 機械力のピーク値

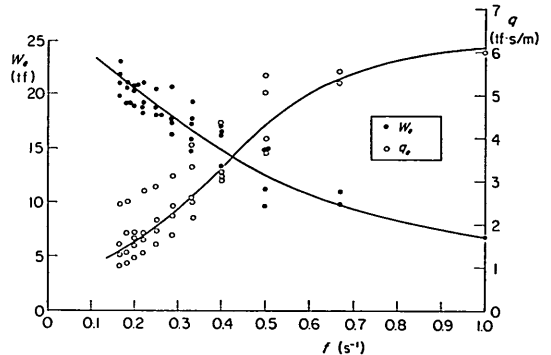


図-30 等価重量と抵抗係数

$$F_M = \frac{W_e}{g} \ddot{x}_g + q_e \dot{x}_g = -A \sin\left\{\frac{2\pi}{T}(t-\epsilon)\right\} \quad (72)$$

造波板運動を、

$$x_g = e \sin \frac{2\pi}{T} t$$

としたとき、これを式(72)に代入し簡単な計算を行うことによって W_e と q_e が次のように表される。

$$W_e = \frac{1}{(2\pi)^2} \frac{gT^2}{e} A \cos \frac{2\pi}{T} \epsilon \quad (73)$$

$$q_e = \frac{1}{2\pi} \frac{T}{e} A \sin \frac{2\pi}{T} \epsilon \quad (74)$$

これにより、機械力のピーク値 A および造波板変位との位相差 ϵ を知れば W_e と q_e を求めることができる。

図-30 はこうして求めた W_e (tf) と q_e (tf·s/m) を周波数 f ($=1/T$) に対してプロットしたものである。結果はストロークによりばらついているけれども、 W_e は周

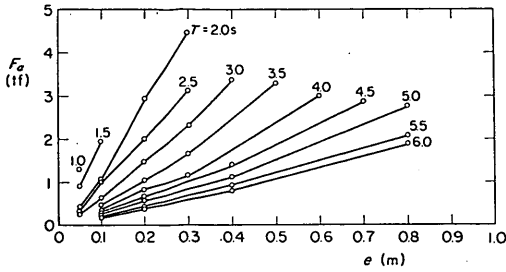


図-31 加速度に比例する機械力のピーク値

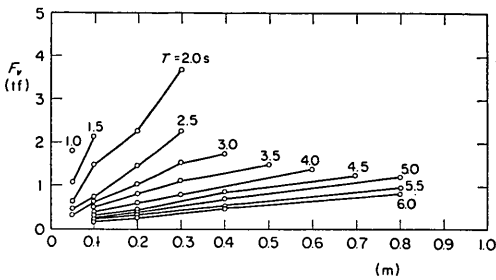


図-32 速度に比例する機械力のピーク値

波数が大きくなるにつれて減少、 qe は逆に増大する傾向にある。図中の曲線はこれらの平均的な関係を表している。これらがなぜ周波数の関数となるかは不明であるが、機械力補償回路にはこうした周波数特性を有したフィルターを用いる必要がある。

図-31, 32 は加速度および速度に比例する機械力のそれぞれのピーク値 F_a , F_v をストロークに対してプロットしたものである。これから、周期が大きいほど、またストロークが大きいほど加速度や速度に比例する機械力が卓越するのが知られる。

なお、図-30 に示した We は機械力を表すための等価な重量であり、造波機の実重量とは当然異なるものであるけれども、可動部の重量を参考のため示すと以下のとおりである。

造波板	2,400 kgf
台車部	2,500 kgf
リンク部	1,100 kgf
合計	6,000 kgf

このほか、ボールねじ、モータおよびカップリング等の振動モーメントを考慮する必要があり、これらの GD^2 の値は約 8.6 kgf・m である。

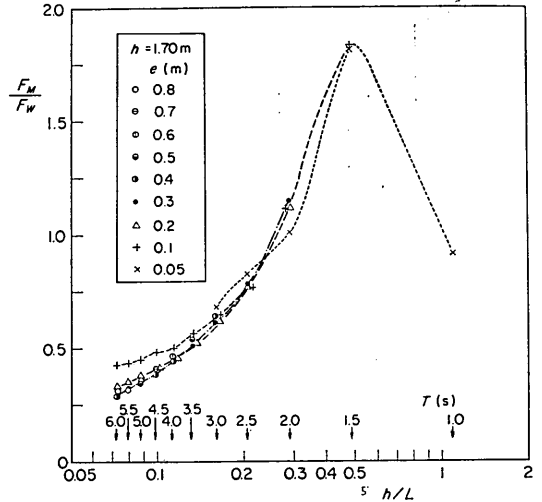


図-33 流体力と機械力の比

(4) 流体力と機械力の比較

次に、造波板に働く波力と機械力を比較してみる。ただし、波力は水深によって異なるので、105m 大型造波水路における代表的造波水深 $h=1.7\text{ m}$ としたときの例である。また、造波板に働く波力は造波理論による値と平均的にはほぼ一致するので、ここでは理論値を用いる。

図-33 はそうした波力のピーク値 F_w (両面造波の合波力) と機械力のピーク値 F_M の比を相対水深 h/L に対して示したものである。これによると、 h/L がたとえば 0.1 のとき機械力はストロークにより波力の 0.4~0.5 倍と小さいが、 h/L が 0.25 以上では機械力が卓越するようになり、 $h/L=0.5$ では 1.8 倍程度となる。しかし、 h/L が 0.5 以上になると慣性波動圧が著しく大きくなるため、逆に低下する傾向が認められる。

5. 推力制御式造波装置の性能

5.1 試験方法

水路に模型構造物を設置しない場合すなわち反射波が無視される場合には、推力制御で運転しても位置制御の場合と同様な発生波が得られる。ここでは、水路に反射壁を設置した多重反射系において、位置制御と推力制御で造波したときの発生波を測定した結果を述べる。ただし、推力制御の場合でも反射波に対する機械力補償を省略した状態 ($K_1=K_2=0$) で行った試験である。

試験は 図-34 に示しているように造波板前方 66.9 m

無反射性造波方式の原理と推力制御式造波装置の特性

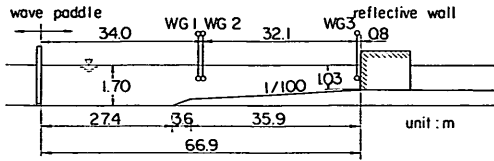


図-34 性能試験

地点に直立壁を設置して実施した。造波板位置での水深は 1.7m であるが、途中から水路床勾配をつけてあるため、直立壁位置での水深は 1.03m と浅くなる。入力信号としては位置制御、推力制御ともに正弦波を与えたもので、発生波は容量式波高計により沖側 2 点 (WG1, WG2)、直立壁直前で 1 点 (WG3) の計 3 点で測定した。周期の試験範囲は 2.0~5.0s で、0.5s ごとに 7 種である。

5.2 試験結果

(1) 測定記録の例および波高の安定性

図-35, 36 は位置制御および推力制御の場合の測定記録を例示したものである。それぞれ上から、造波板変位 (x_G)、電機子電流 (I_G)、沖側 (WG1) および直立壁直前

(WG3)での水位 (η)の波形である。周期はいずれも 4.0s で同じである。これを比較すると両制御方式の特徴がよくわかる。すなわち、位置制御では直立壁からの反射波が到達しても造波板運動は同じであるため、電機子電流が変動し、かつ水位波形も著しく変動している。これに対し、推力制御では反射波が到達するとそれに応じて造波板運動が変化している。その結果、比較的安定した水位変動が得られており、推力制御の特長を非常によく示している。

しかし、細かく見れば推力制御の場合であっても水位波形に変動が認められる。そのため、WG3 での再反射波到達以降約 60 波の記録から波高の最大値 H_{max} 、最小値 H_{min} を読み取り、その差を再反射波の影響を受ける以前の重複波高 H_1 で割った値をプロットしたのが図-37 である。この値が 0 であれば変動が全くないことを表している。結果は、位置制御では 0.8~1.3 であるのに対し、推力制御では 2 例を除き 0.3 以下と変動が非常に小さいことが知られる。ただし、推力制御でも $h/L = 0.16$ および 0.29 の条件では 1.0 を超えている。これは、たとえば特に変動の大きい $h/L = 0.29$ の場合は機械力が流体力よりやや卓越しているのにもかかわらず、反

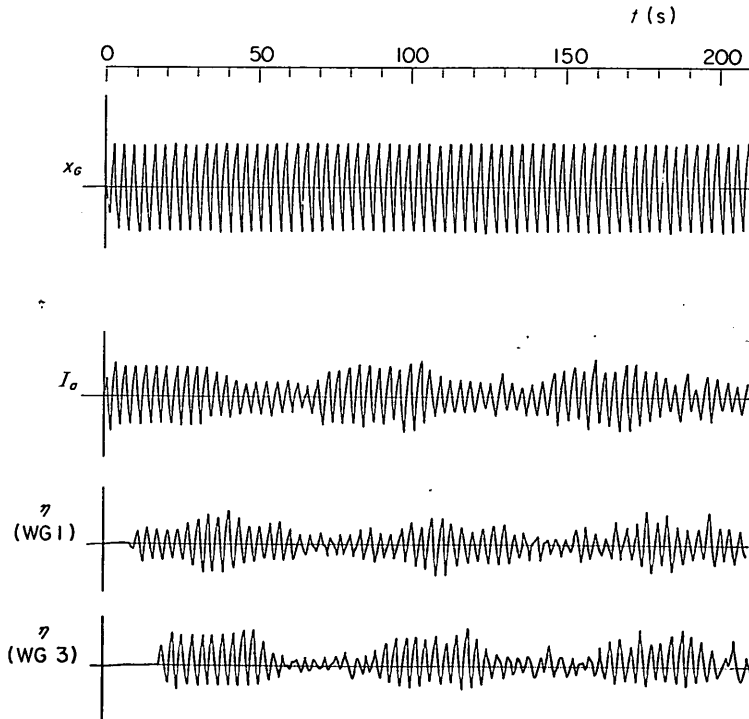


図-35 位置制御による記録 ($h=1.7\text{ m}$, $T=4.0\text{ s}$, $e=140$)

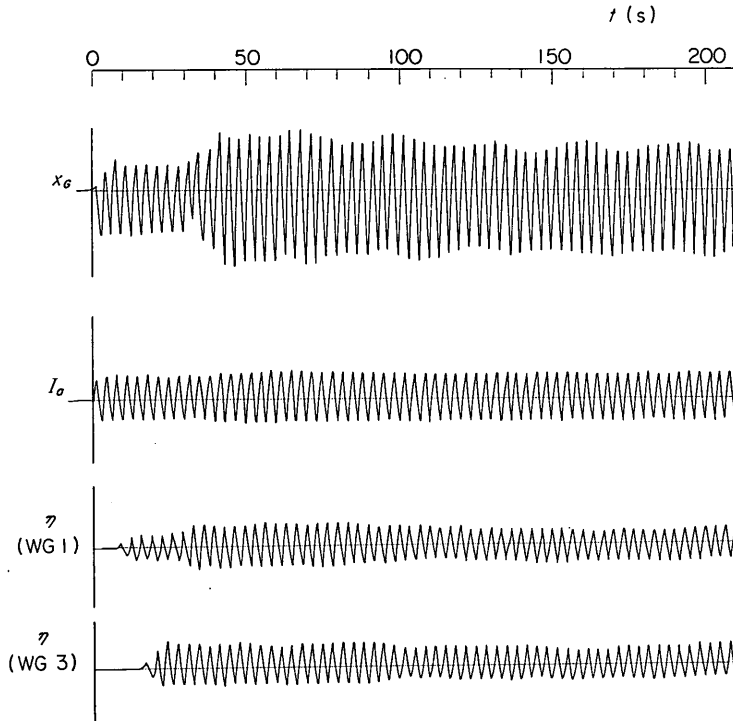


図-36 推力制御による記録 ($h=1.7$ m, $T=4.0$ s, $e=110$)

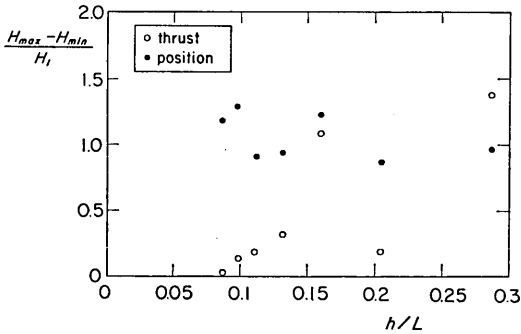


図-37 波高の安定性

射波に対してこれを補償していないこと、および造波板と直立壁間の距離と波長の相対関係によって反射波に対する造波板の応答が著しく異なり、厳しい周期条件で機械力補償省略の誤差が大きくなることなどによると推測される。

(2) 最初の再反射波による重複波高の変動

(1) で多重反射系における水位記録期間全体での波高の安定性をみたが、さらにその中での第1回の再反射波

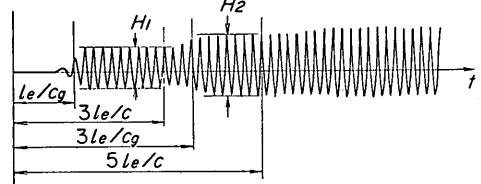


図-38 波高の読み方

だけに限った場合の変動を調べてみる。これは図-38に説明しているように、再反射波が到達する以前の重複波高 H_1 と最初の再反射波が到達してから第二回めの再反射波が到達するまでの間の重複波高 H_2 の比を求めたものである。

図-39にその結果を示している。横軸に h/L をとり、上が位置制御の場合、下が推力制御の場合である。再反射がなければ H_2/H_1 は 1.0 に一致するはずであるが、位置制御では 0.2 から 1.6 の範囲に、推力制御では 0.4 から 1.5 の範囲に分布している。推力制御によって変動が小さくなるものの、前述した機械力補償を省略してい

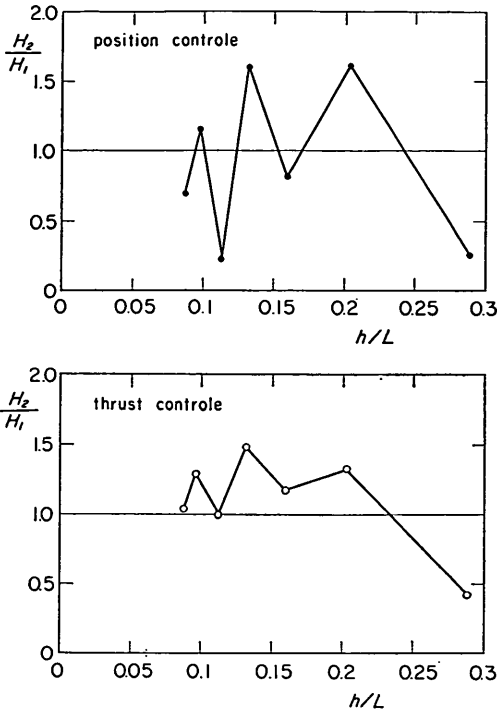


図-39 最初の再反射波による重複波高の変化

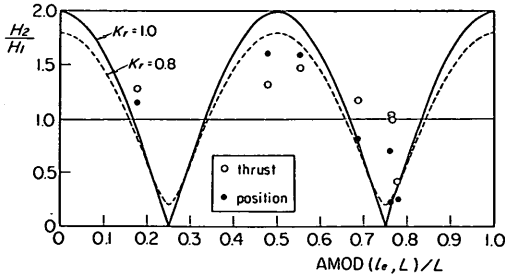


図-40 波長と造波板直立壁間距離の比による変化

ることなどによって、無反射性造波が完全でないことを表している。

なお、図-40の曲線は位置制御により造波した場合の直立位置での H_2/H_1 の理論曲線を示したものである¹²⁾。ここに、横軸中の $AMOD(l_0, L)$ は l_0 を L で割ったときの余りを意味している。また、 l_0 は造波板と直立壁との間の距離を水深 1.7 m での波長 L に対し等価となるように換算した値である。したがって、 $AMOD(l_0, L)/L=0$ および 1.0 は造波板と直立壁の間の距離が波長の

整数倍であることを表す。 K_r は造波板の反射率であり、 $K_r=0.8$ と 1.0 の 2 例を示してある。これから見てわかるように、たとえば $K_r=1.0$ の場合 H_2/H_1 の値は 0 から 2.0 の範囲で変化し、 $AMOD(l_0, L)/L=0.17, 0.33, 0.67, 0.83$ の条件では位置制御の場合であっても $H_2/H_1=1.0$ となり、再反射がないのと同じ結果となる。これは造波板による再反射波の位相がもともと造波している波と $\pm 90^\circ$ ずれているときに生じる現象で、造波板の再反射率が 0 であることを意味するものではない。

同図には位置制御による測定値 H_2/H_1 を●印で、推力制御による測定値を○印でそれぞれプロットしてある。位置制御による結果は 1 例を除き理論曲線の傾向によく合っている。これに対し、推力制御では無反射性造波が完全であれば 1.0 となるはずであるが、前述したように 0.4 から 1.5 の範囲にばらついている。しかし、 $AMOD(l_0, L)/L=0.75$ 付近の 2 例に認められるように、位置制御では 0 近くになるはずのものがほとんど 1.0 となっており、推力制御とすることによって再反射波を相当程度減じていることは明らかである。

6. むすび

以上、無反射性造波方式の原理を提示し、当所に導入した新しい推力制御式造波装置の概要およびこれまでに得られた性能試験の結果について述べた。そのうち、性能試験の結果では反射波に対する機械力を補償しない状態であっても、位置制御に比較して相当程度安定した重複波が得られることが確認された。この試験は水路に直立壁を設けて比較的波高の小さい範囲でほぼ完全反射が生じる条件で行ったものである。実際には模型構造物の反射率は 1.0 以下であり、反射率が小さい場合にはさらに安定した波が得られると推測される。

また、特に造波板の再反射波が問題となるのは不規則波実験においてである。水路における不規則波の再反射波の影響は、別に報告¹³⁾しているように、造波板の再反射率が少しでも小さければ著しく軽減される。そのため、特に不規則波実験においては充分実用に供するものと考えている。この点については、今後実際に不規則波による性能試験を行って確認する予定である。

最後に、無反射性造波方式の検討および推力制御式造波方式の導入に際しては合田良実水工部長から終始貴重な御教示、御助言を頂いた。ここに記して深謝の意を表します。なお、当該推力制御式不規則波造波装置は安川

電機(株)が製作・納入したものであることを付記する。
(昭和58年6月30日受付)

参 考 文 献

- 1) 谷本勝利・富田英治・村永 努: 水路における不規則波の再反射波の影響について, 港湾技研資料, No. 467, 1983, 23 p.
- 2) たとえば, 広本文泰・阿部淑輝・須藤 茂: 鉛直振動流型造波装置の設計とその造波特性について, 港湾技研資料, No. 32, 1967, pp. 81~97
- 3) Milgram, J. H.: Active water-wave absorbers, *J. Fluid Mech.*, Vol. 43, Part 4, 1970, pp. 845~859
- 4) Gilbert, G.: Absorbing wave generators, *Hydraulic Research Station Note* 20, 1978, pp. 3~4
- 5) Salter, S. H.: Absorbing wave-makers and wide tanks, *Proc. of the Conf. on Directional Wave Spectra Applications*, 1981, pp. 185~202
- 6) Biésel, F. and F. Suquet: Les appareils générateurs de houle 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)
- 7) 前出 3) に同じ
- 8) 山本道正・河野一博: 推力制御式不規則波造波装置, 安川電機, Vol. 177, '82 No. 4, 1982, pp. 361~364
- 9) Takayama, T.: Theory of transient fluid waves in a vibrated storage tank, *Rept. of the Port and Harbour Research Institute*, Vol. 15, No. 2, 1976, pp. 3~53
- 10) 高山知司・神山 豊: 実験水路における波の伝播について, 第23回海岸工学講演会論文集, 1976, pp. 381~385
- 11) 鶴田千里・久田安夫: 大型造波水路の設計について, 運輸技術研究所報告, 第7巻 第11号, 1957, 62 p. (港研参考資料 No. 20, 1965 に再版)
- 12) 前出 1) に同じ
- 13) 前出 1) に同じ

主 要 記 号 表

- a_I : 反射波がないときの造波板で発生する進行波の振幅
 a_R : 反射波の振幅
 a_{RR} : 造波板による再反射波の振幅
 c_{In} : 反射波がないときの減衰定常波成分の係数
 c_{Rn} : 反射波により造波板が自由に運動しているときに生じる減衰定常波成分の係数
 e_I : 反射波がないときの造波板運動の片振幅
 e_R : 反射波による造波板運動の片振幅

- F_B : ボールネジに働く推力
 F_M : 空中で造波機を駆動するのに要する推力を造波板に働く力に置き換えた機械力
 F_T : 水中で造波機を駆動するのに要する推力
 F_{T0} : 推力制御における指令信号の入力成分
 F_{Ts} : 推力制御における指令信号の補償成分
 F_v : 造波板運動速度に比例する機械力成分
 F_w : 造波板に働く流体力(全波力)
 F_a : 造波板運動加速度に比例する機械力成分
 f : 周波数
 g : 重力の加速度
 H_1 : 再反射波が到達する以前での重複波高
 H_2 : 最初の再反射波が到達したときの重複波高
 H_{max} : 多重反射系における変動波高の最大値
 H_{min} : 多重反射系における変動波高の最小値
 h : 水深
 I_a : 電動機の電機子電流
 K_R : 模型構造物の反射率
 K_{RR} : 造波板の再反射率
 k : 波数
 k_n : 減衰定常波の成分の波数
 L : 波長
 l_e : 造波板と直立壁間の等価距離
 l_B : ボールネジのリード長
 P : 造波板片面に働く全波圧
 p : 造波板に働く波圧強度
 P_{II} : 反射波がないときの造波板片面に働く全慣性波動圧
 P_{IN} : 反射波がないときの造波板片面に働く全正規波動圧
 P_{RI} : 反射波により造波板が自由に運動しているときの片面に働く全慣性波動圧
 P_{RN} : 反射波により造波板が自由に運動しているときの片面に働く全正規波動圧
 q_c : 造波板速度に比例する機械力を表す等価な摩擦抵抗係数
 T : 周期
 t : 時間
 W_e : 造波板加速度に比例する機械力を表す等価な重量
 x : 静水面にとった水平座標
 x_G : 造波板変位
 x_{GI} : 反射波がないときの造波板変位

無反射性造波方式の原理と推力制御式造波装置の特性

x_{GR} : 反射波によって造波板が自由に運動している ときの変位	λ : 全慣性波動圧と全正規波動圧のピーク値の比
z : 静水面上向きを正とした鉛直座標	ρ : 流体の密度
ε : 位相	σ : 角周波数
η : 波による水位	Φ : $x \geq 0$ の領域での速度ポテンシャル
	Ψ : $x \leq 0$ の領域での速度ポテンシャル