

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

寛田博章*・水口 優**・森屋陽一***

1. はじめに

多方向造波装置は大きな水槽内に直線的に設置されることが多い。その場合、造波板の長さが有限であるために、たとえ単一方向規則波であっても、その波高、波向きともかなりの変動がある(Takayama, 1984)。その変動の大きさは、通常の使用条件下では2割を越え、実験精度を低下させ精密さが求められる実験を行うのが困難である。一様な波の場を実現するために、側壁部にも造波板を配置するなどの工夫もあるが、あまりうまくいっていないようである。

水口(1993)は、連続型(リンク型)と呼ばれる隣り合う造波板が連続である造波装置において、造波装置端部の何枚かの造波板の振幅を直線的に0まで減衰させるように制御することにより、従来方式の造波に不可避な波の場の変動を抑え、一様な波の場を作り得る可能性について理論的に検討している。

本研究では、この端部制御方式理論の概要を示し、その有効性について実験的に検討を行った。

2. 連続型造波装置の造波理論(水口, 1993)

2.1 単一ストロークの運動による波の場

単一ストロークの運動による造波の模式図、及び座標を図-1に示す。水口(1993)は微小振幅の仮定のもと、ポテンシャル理論を用いて、水面形 η をストロークの振幅 A で無次元化したものが次式で表されることを導いている。

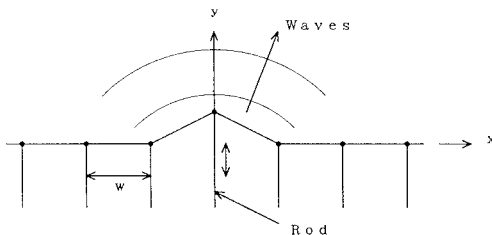


図-1 単一ストローク運動による造波の模式図

る。

$$\eta/A = \alpha \int_{-kw}^{kw} (1-|q'|) \{N_0(\theta') \sin \sigma t + J_0(\theta') \cos \sigma t\} dq \dots\dots\dots (1)$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \frac{2 \sin h^2 kd}{\sin h 2kd + 2kd} & q' &= \frac{q}{kw} \\ \theta' &= \sqrt{(kx-q)^2 + (ky)^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

N_0, J_0 は0次のノイマン関数およびベッセル関数、 k は波数、 σ はストロークの運動の角周波数、 d は水深、 w は造波板1枚の幅である。 α は断面水槽におけるピストン型の造波理論の応答関数の1/2である(Dean and Dalrymple, 1984)。 θ' が大きいとき、すなわち造波源から遠い地点では、次のベッセル関数の漸近展開式が成立する。

$$\left. \begin{aligned} J_n(z) &\rightarrow \sqrt{2/\pi z} \cos(z - 2n + 1)\pi/4 \\ N_n(z) &\rightarrow \sqrt{2/\pi z} \sin(z - 2n + 1)\pi/4 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

すなわち、(1)式は $\cos(kr - \sigma t)/\sqrt{r}$ 型になっており($r = \sqrt{(x-q/k)^2 + y^2}$, r は波源からの距離)、造波板の運動によって各部所($x=q/k$)から発生する円筒波の重ね合わせになっていることがわかる。

2.2 任意の地点にある単一ストローク運動による波の場

造波板からある程度離れた地点を考えると、 $x=x_0$ にある j 番目のストロークの運動による水面形 η_j は、(1)式において座標の原点をそこに移動したものと考えることにより、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \eta_j/A_j &= \alpha \left\{ \int_{-kw}^{kw} (1-|q'|) N_0(\theta^*) dq \sin(\sigma t + \varepsilon_j) \right. \\ &\quad \left. + \int_{-kw}^{kw} (1-|q'|) J_0(\theta^*) dq \cos(\sigma t + \varepsilon_j) \right\} \dots\dots (4) \end{aligned}$$

ここで、

$$\theta^* = \sqrt{(kx^* - q)^2 + (ky)^2}, \quad x^* = x - x_0 \dots\dots (5)$$

であり、 A_j, ε_j は j 番目のストロークの振幅および位相差である。 x_0 は

* 中央大学大学院土木工学専攻
 ** 正会員 工博 中央大学教授 理工学部土木工学科
 *** 学生会員 工修 中央大学大学院土木工学専攻

$$x_0 = jw, j = -N, N \dots\dots\dots (6)$$

で与えられる。ここで、 N は整数で、造波板の枚数の1/2である。また連続型(リンク型)では、端部のストロークに対しては、積分範囲を $[0, kw]$ または $[-kw, 0]$ と取る必要がある。

2.3 多ストローク運動の造波による波の場

$2N+1$ 個のストロークによる連続型における波の場の水面形 η は、(4)式の重ね合わせとして次のように書ける。

$$\eta = \sum_{j=-N}^N A_j \{ N_{0j} \sin(\sigma t + \epsilon_j) + J_{0j} \cos(\sigma t + \epsilon_j) \} \dots\dots\dots (7)$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} N_{0j} &= \int_{-kw}^{kw} (1-|q'|) N_0(\theta^*) dq \\ J_{0j} &= \int_{-kw}^{kw} (1-|q'|) J_0(\theta^*) dq \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

である。 x 軸の原点は造波装置中央のロッドの位置にある。斜め造波にあたっては、直角造波の場合のストローク運動の振幅を A とすると、

$$A_j = A \cos \beta, \epsilon_j = jkw \sin \beta, j = -N \sim N \dots (9)$$

とすればよい。ただし、 x 軸から波峰線への角度を波向き角 β と取っている。

3. 端部制御方式について

水口(1993)は、端部制御の方法として図-2のように造波装置の端部側の数本のストロークの振幅を、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ということを理論的に示している。減衰させる造波板の枚数は、波長 L と波向き β により決定できるとしている。直角造波($\beta=0$)の場合においては、造波装置の両端部に一波長程度の調整長を取ることで、一様な波の場が得られるとしている。ただし、調整長がちょうど一波長の時が最も良いとしており、これを式で表すと、

$$\frac{N_p w}{L} = 1.0 \dots\dots\dots (10)$$

となる。ここで、 N_p は最適な造波板の制御枚数である。

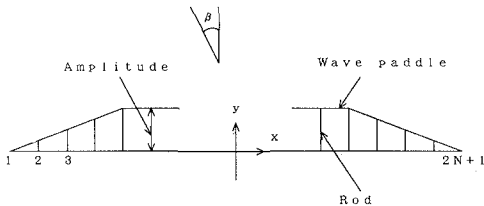


図-2 端部制御方式による振幅の模式図

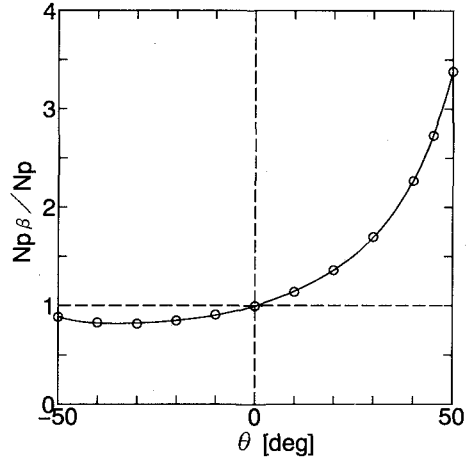


図-3 斜め造波の場合の調整長の補正係数

斜め造波の場合は、造波装置端部での回折の影響領域の大きさが角度によって異なるため、調整長を角度に応じて変える必要があるとしている。必要な制御枚数 $N_{p\beta}$ は、図-3に示すような補正係数 $N_{p\beta}/N_p$ (直角造波の場合と斜め造波の場合の回折の領域の大きさの比でもある) を直角入射の場合の調整長に乗じて求める。造波板と波向線のなす角度が鋭角側 ($\theta < 0$) では直角造波に比べわずかに少ない調整長で十分であるのに対して、鈍角側 ($\theta > 0$) ではかなりの調整長が必要である。

4. 端部制御方式による波の場の一様性の実験

4.1 実験の概要

実験は、図-4に示すような平面水槽内で連続型多方向造波装置(30 cm×28枚)を用いて行った。まず単一ストローク運動による造波理論の正しさを検討し、ついで多ストローク運動において、直角造波の場合と斜め造波($\beta=20^\circ$)の場合において、従来(制御しない)方式と端部制御方式での造波により実験を行った。実験条件はすべてのケースにおいて、周期 $T=1.2$ s、水深 $d=15.0$ cm、ストロークの全振幅 $S(=2A)=2$ cmである。この条件では波長は135 cmとなり、多ストロークにおける端部制御方式の必要制御枚数は、直角造波の場合においては両端それぞれ5枚、斜め造波($\beta=20^\circ$)の場合においては、図-4から読みとって、左端部4枚、右端部6枚となる。なお、相対水深は0.11で、ピストン型造波理論の適用範囲内である。計測には、新容量式水位計(正豊工学製)を用い、電気的なデータの取得は、ノート型パソコンにAD変換ボードを装備して行った。サンプリング間隔は50 Hzである。データの収録時間は、造波開始直前から20 s間である。データの解析には、端部からの影響が現れてから壁面からの反射波が返ってくるまでの時

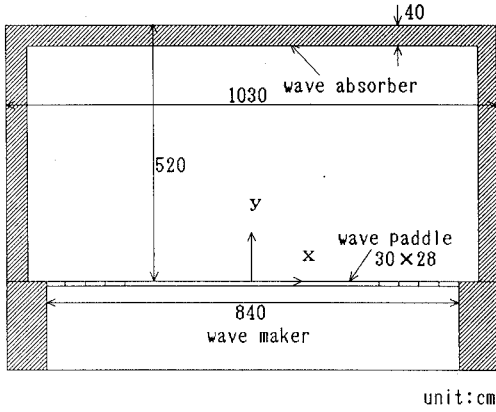


図-4 実験装置

間帯のものを使った。

単一ストローク運動における波の場の検証として、 y 方向に $x=0, 30, 60, 90$ cm の線上で $y=10\sim 250$ cm を 10 cm 間隔で水位を計測した。

多ストローク運動の波の場の検証については、従来方式と端部制御方式との比較実験を行った。直角造波、斜め造波共に、 $x=0$ cm の測線上を 10 cm 間隔で $y=10\sim 250$ cm 間、 $y=100$ cm の測線上を 10 cm 間隔で $x=-150\sim 150$ cm 間の水位の測定を行った。

4.2 実験結果

図-5(a)~(d)は、単一ストローク運動での $x=0, 30, 60, 90$ cm の各測線上の無次元化した波高の y 方向の分布図である。4 ケースとも理論値と非常に良く一致している。単一ストローク運動の理論(1)式が非常に正しいことを、実験結果が証明している。図-6, 7は、直角造波の場合 ($\beta=0^\circ$) の多ストローク運動における無次元化した波高の y 方向および x 方向の分布図である。理論値において、端部制御方式を行ったものは、従来方式に比べて波高分布が非常に一様になっていることが両図共に明らかである。実験結果も、多少ばらつきがあるものの、理論値との一致は良く、端部制御方式により明らかに変動が抑えられ、波高分布が一様になっていることがわかる。

図-8, 9は、斜め造波の場合 ($\beta=20^\circ$) の多ストローク運動における無次元化した波高の y 方向および x 方向の分布図である。端部制御方式を行った場合の理論値は、直角造波の場合と比べると多少変動が残るが、従来方式に比べれば十分に一様になっていることがわかる。実験値も理論値にまず一致している。実験値のばらつきの原因としては、隣り合う造波板同士のつなぎ目から発生する散乱波や水槽の壁での反射波などが考えられる。

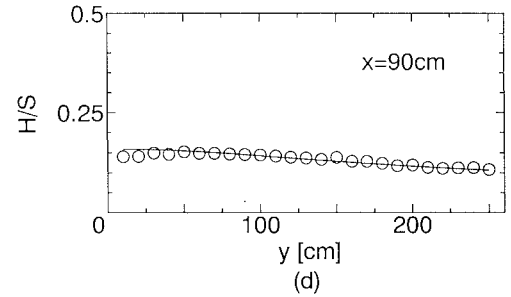
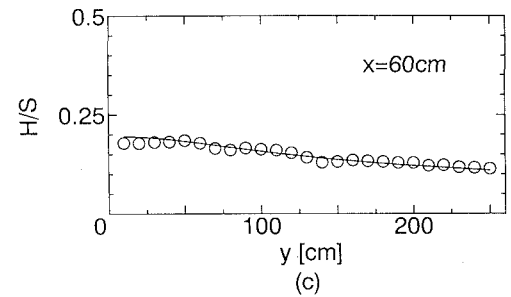
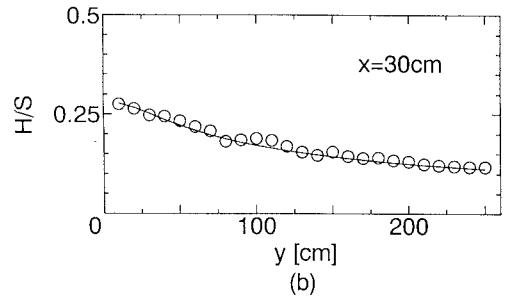
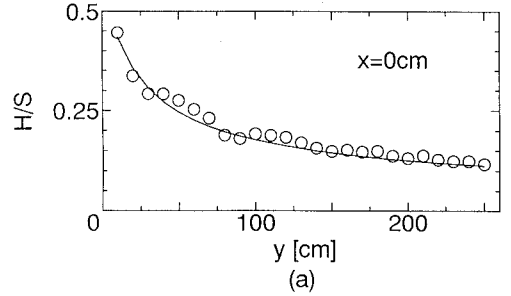


図-5 単一ストローク運動での各測線上における造波板に直角な方向の波高分布図 ($T=1.2$ s, $S=2.0$ cm, $d=15.0$ cm)

5. おわりに

水口 (1993) が提案した、連続型多方向造波装置において一様な波の場を得る方法について具体的に検討を行った。造波装置端部の造波板の振幅を直線的に減衰させるいわゆる「端部制御方式」において、造波する波の条件に応じて適切な制御長を与えることにより波の場が一様になるということが、実験的に確認できた。このこと

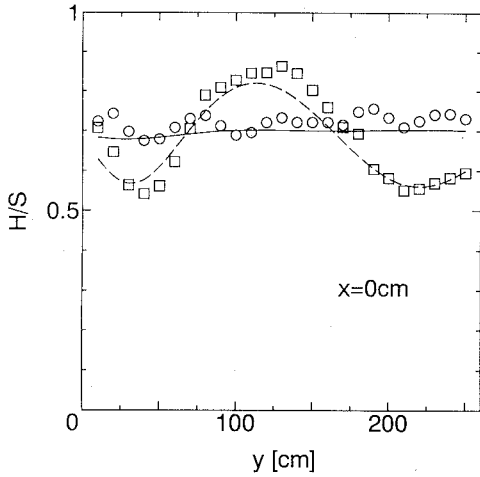


図-6 多ストローク運動(直角造波 $\beta=0^\circ$)での造波板に直角な方向の波高分布図 ($T=1.2$ s, $S=2.0$ cm, $d=15.0$ cm, 実線および○は端部制御方式, 破線および□は従来方式)

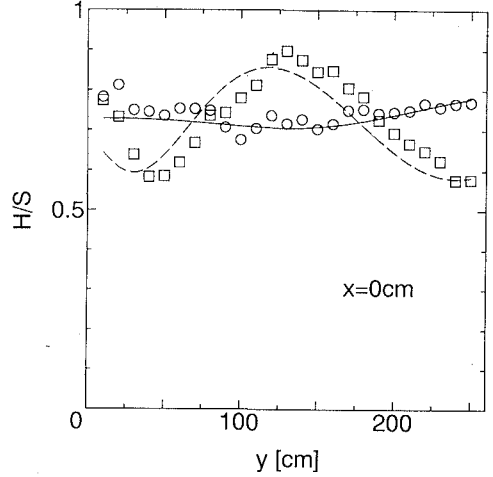


図-8 多ストローク運動(斜め造波 $\beta=20^\circ$)での造波板に直角な方向の波高分布図(図の説明については図-6を参照)

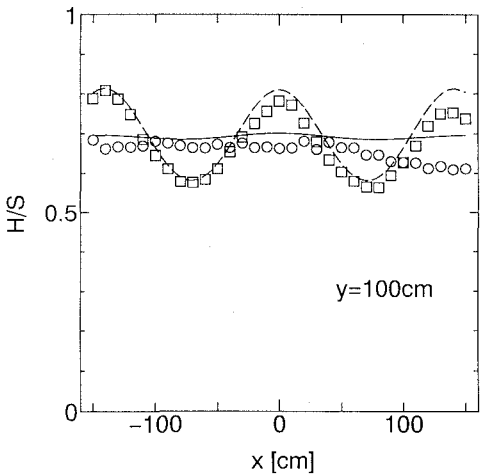


図-7 図-7 多ストローク運動(直角造波 $\beta=0^\circ$)での造波板に沿う方向の波高分布図(図の説明については図-6を参照)

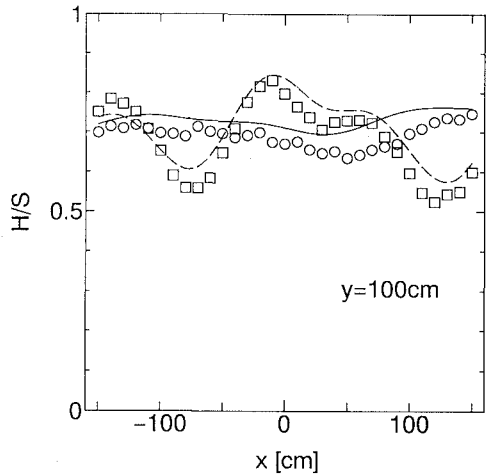


図-9 多ストローク運動(斜め造波 $\beta=20^\circ$)での造波板に水平な方向の波高分布図(図の説明については図-6を参照)

から端部制御方式は、精密な実験を行う上で非常に有効な方法であると言えよう。しかしながら、造波装置の端部付近の領域においては、端部制御方式による造波装置端部での振幅の減少により、水槽全体としてみると、造波有効範囲はやや狭くなる。なお連続型多方向造波においては、(9)式で振幅を与えると β が大きくなるにつれて発生する波の波高は、わずかながら小さくなる(水口, 1993)。

なおこの端部制御方式は、多成分波においても用いることができる。具体的には、各成分波の条件に対してそれぞれ適切な制御長をあたえて、その重ね合わせとすればよい。

今後の課題としては、端部制御方式による波向きの一様性についての実験的検証と斜め造波の場合の一様性をさらに高めることについて検討を行うことである。

参考文献

- 水口 優 (1993): 連続型多方向造波装置の造波理論と一様な波の場, 中大理工紀要, 第36巻, pp. 21-37.
- Takayama, T. (1984): Theory of oblique waves generated by serpent-type wave-maker, Coastal Eng. in Japan, JSCE, Vol. 27, pp. 1-19.
- Dean, R. G. and R. A. Dalrymple. (1984): Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists, Prentice Hall, p. 177.