

波力発電装置高出力化への種々の検討

山口大学大学院理工学研究科
種浦 圭輔

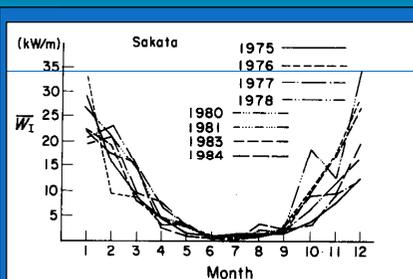
0. 波力発電技術の研究背景

波エネルギーのポテンシャル

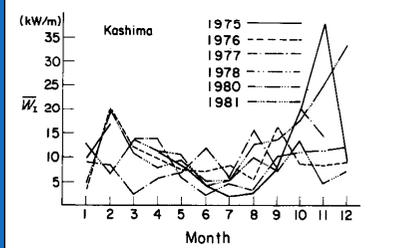
- 海の波が風により発生して、風のない海域までエネルギーを輸送すること。
- 水の密度は空気に比べて遥かに大きい。
- 日本海側では暖房用エネルギーの需要期に波エネルギーが大きい。



日本沿岸の波パワー(kW/m)



酒田(日本海側)
の月別の波パワー(kW/m)



鹿島(太平洋側)
の月別の波パワー(kW/m)

日本沿岸季節別波パワー(kW/m)

1. 本研究の概要

日本近海波浪調査等の基礎研究

室内実験

力学モデルの構築

多自由度力学モデルの構築
高出力化に関する検討

- □共振特性解析
- □遊水室の検討



写真-1 実験風景

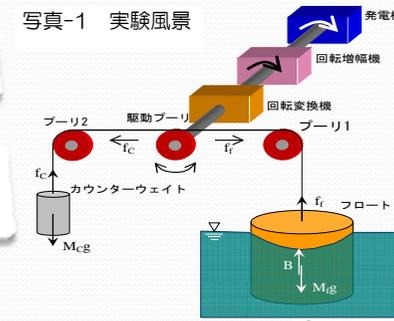


図-1 本システムのモデル図

2. 高出力化への取り組み

● 共振特性解析

☛ 装置の固有周期を求め、装置の諸元の最適化を図る。

● 遊水室効果

☛ 遊水室によって、外海にさらされているフロートを保護し、室内の水面の上下振幅を大きくする。

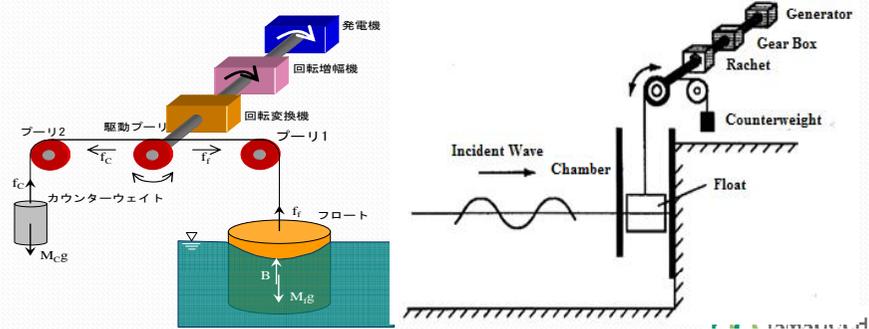


図-1 本システムのモデル図

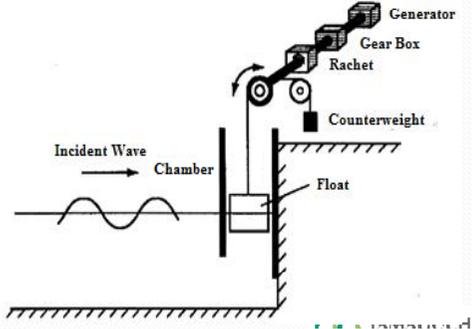


図-2 遊水室設置の装置概略図

3. 共振理論の構成

3.1 力学モデル

➤ 無負荷・静止状態での釣合式

➤ 発電機関連の力学

➤ フロートの運動方程式

➤ カウンターウェイトの運動方程式

➤ 回転体の運動方程式

➡ 駆動プーリーの回転角を支配する式

➡ 様々な力学諸量が求められる。

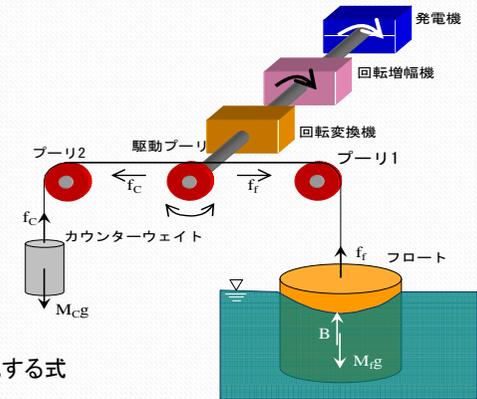


図-1 本システムのモデル図

フロートの運動方程式 (流体力を考慮する)

$$M_f \frac{d^2 x_f}{dt^2} = f_f - M_c g + \frac{1}{4} \pi D_f^2 \rho_w x_w g - \frac{1}{4} \pi D_f^2 \rho_w x_f g \quad (1)$$

$$+ \frac{1}{8} C_D \rho_w \times \left| \frac{dx_w}{dt} - \frac{dx_f}{dt} \right| \left(\frac{dx_w}{dt} - \frac{dx_f}{dt} \right) \pi D_f^2$$

$$- \frac{1}{4} C_M D_f^2 \rho_w (h + x_w - x_f) \frac{d^2 x_f}{dt^2}$$

条件:

① 流体抗力は無視
⇒ 代わりに造波減衰力 $C \frac{dx_f}{dt}$ を導入。

② 付加質量力は Ma にまとめる。

③ 式中の右辺第3項は波強制力 F_w として考慮。

M_c, M_f : カウンターウェイトとフロートの質量
 ρ_w : 水の密度
 f_f : ワイヤ張力
 D_f : フロートの直径
 h : 無負荷・静止時のフロートの喫水深
 x_f : フロート上昇量
 C_M, C_D : 付加質量係数と抗力係数
 g : 重力加速度

以上まとめると、

$$(M_f + M_a) \frac{d^2 x_f}{dt^2} + C \frac{dx_f}{dt} + \frac{1}{4} \pi D_f^2 \rho_w g x_f + M_c g - f_f = F_w \quad (2)$$

➤ 発電機関連の力学

➤ カウンターウェイトの運動方程式

➤ 回転体の運動方程式

➡ 駆動プーリーの回転角を支配する式

$$\left(\frac{I}{R_m} + (M_f + M_c + M_a) R_m \right) \frac{d^2 \theta}{dt^2} + \frac{1}{R_m} \left(C R_m + C' + \frac{G^2}{r} k_t k_e \right) \frac{d\theta}{dt} + \frac{1}{4} \pi D_f^2 \rho_w g R_m \theta = F_w \quad (3)$$

I : 駆動プーリーの慣性モーメント
 R_m : 駆動プーリーの半径
 C : 機械系の粘性減衰係数
 C' : 造波減衰係数
 G : ギア比
 k_t : トルク係数
 k_e : 誘導発電係数
 r : 発電機の負荷抵抗

波強制力 F_w , 付加質量 M_a , 造波減衰係数 C を三次元特異点分布法によって算出。
 フロートの諸元は表-1のように設定。
 無限水深, 水深10m, 水深5mの場合で, 各波の周期でそれぞれ算出。

表-1 フロート諸元

フロートの諸元									
半径(m)	高さ(m)	比重	重量(t)	喫水率	喫水(m)	K G(m)	排水重量(t)	ウェイト重量(t)	
1.50	3.00	0.90	19.085	0.60	1.80	1.50	13.042	6.044	
重心			メタセンター			慣性モーメント			
X(m)	Y(m)	Z(m)	GM-x(m)	GM-y(m)	復元力(t/m)	$I_x(t^4m^2)$	$I_y(t^4m^2)$	$I_z(t^4m^2)$	
0	0	-0.300	-0.288	-0.288	7.25	2.505E+01	2.505E+01	2.147E+01	

※KG:浮体中央から重心までの距離
 ※メタセンター:初期段階の浮力作用線と傾斜後の浮力作用線との交点M

付加質量と造波減衰力

M_i :無限水深の場合の付加質量
 C_i :無限水深の場合の造波減衰力
 $M_{\text{pari}_{10}}$:水深10mの場合の付加質量
 $C_{\text{pari}_{10}}$:水深10mの場合の造波減衰力
 $M_{\text{pari}_{5}}$:水深5mの場合の付加質量
 $C_{\text{pari}_{5}}$:水深5mの場合の造波減衰力

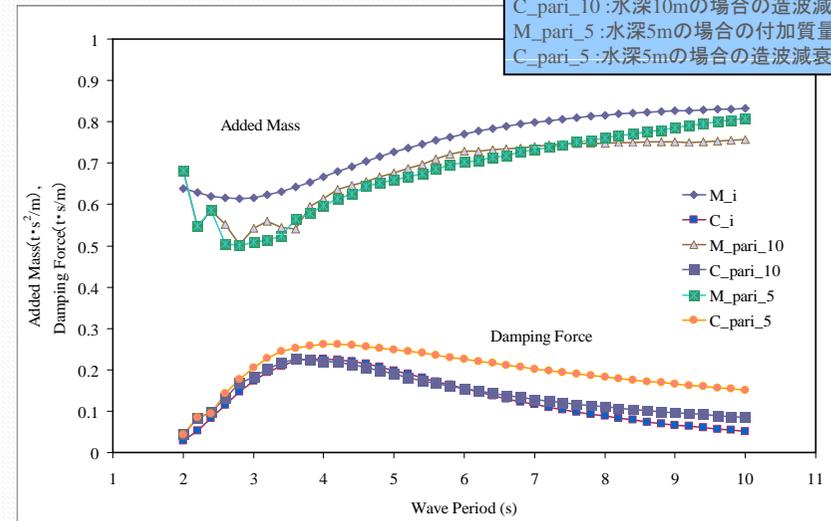


図-3 各周期における付加質量と造波減衰

波強制力 F_w

規則波の場合:

$$F_w = A \cos(\omega t + \theta) \quad (4)$$

A : 波強制力の振幅(tf)

ω : 波の角振動数(rad/s)

θ : 位相(rad)

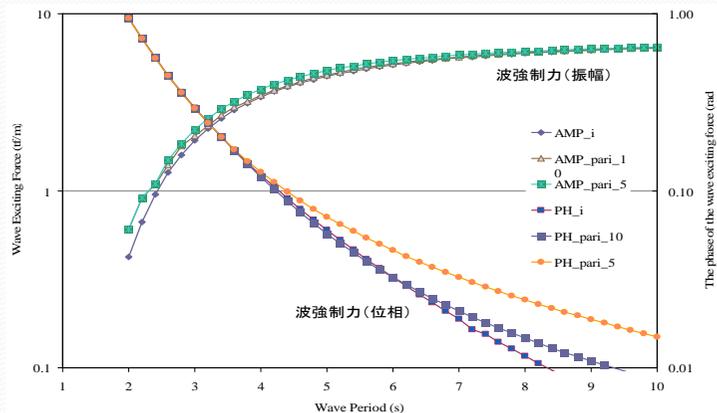


図-4 各周期における波強制力

3.2 共振特性解析

以上, 各周期の場合の付加質量 M_a と造波減衰係数 C が算出されているので, 式(3)を用いて, 共振特性解析を行う。

$$\left(\frac{I}{R_m} + (M_f + M_c + M_a)R_m \right) \frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{1}{R_m} \cdot \left(C \cdot R_m + C' + \frac{G^2}{r} k_e k_c \right) \frac{d\theta}{dt} + \frac{1}{4} \pi D_f^2 \rho_w g R_m \theta = F_w \quad (3)$$

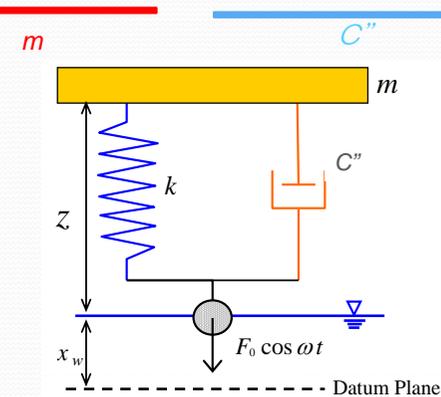


図-5 エネルギー変換系の共振解析の図

代表される評価式

不減衰固有振動数 $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{\rho_w g \pi D_f^2}{4 \left\{ \frac{I}{R_m^2} + (M_c + M_f + M_a) \right\}}} \quad (5)$

減衰比 $\zeta = \frac{C'}{2\sqrt{mk}} = \frac{\left(C \cdot R_m + C' + \frac{G^2 k_\tau k_e}{r} \right)}{2\sqrt{\left(I \cdot R_m^2 + (M_c + M_f + M_a) R_m^4 \right) \frac{\rho_w g \pi D_f^2}{4}}} \quad (6)$

表-2 装置の諸元

フロート比重	ρ_f	0.9
フロート喫水率		0.6
フロート質量 (t)	M_f	19.085
フロート直径 (m)	d_f	3.000
フロート高さ (m)	l	3.000
カウンターウェイト質量 (t)	M_c	6.044
駆動プーリ半径 (m)	R_m	0.420
慣性モーメント (kg・m)	I	10.002
ギア比	G	14
誘導電圧係数 (V/rpm)	k_e	0.135
トルク定数 (Nm/A)	k_τ	1.284
負荷抵抗 (Ω)	r	0.260
水の密度 (kg/m ³)	ρ	1025
機械系の粘性減衰係数 (N・m・s)	C'	567

周波数応答

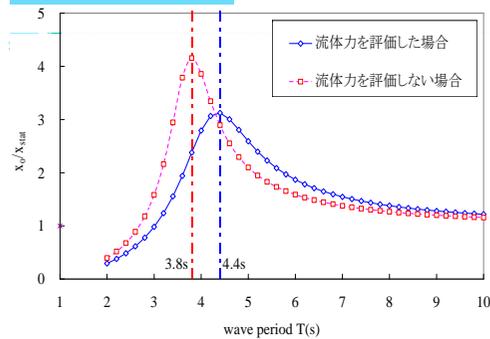


図-6 各波の周期における周波数応答

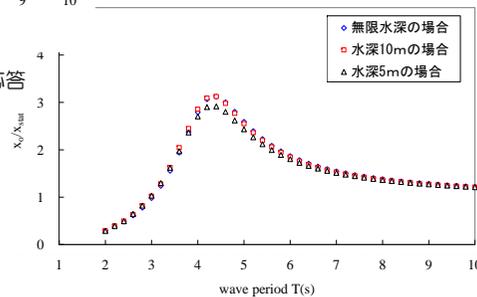


図-7 水深変化による周波数応答の変化

各波高における平均発生電力 (無限水深の場合)

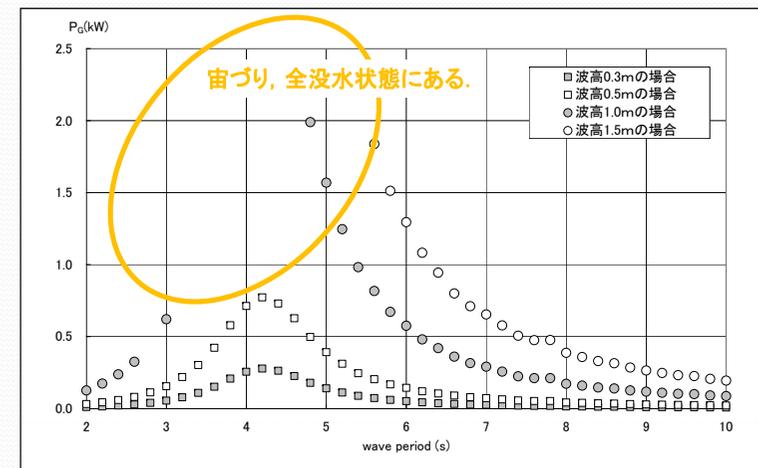


図-8 各波高におけるP₀ (無限水深の場合)

以上、平均発生電力、最大ワイヤ張力を各水深で評価すると、

	平均発生電力の最大値 (kW)	最大ワイヤ張力の最大値 (kN)	その時の波の周期 (s)
無限水深	0.278	74.10	4.2
水深10m	0.283	74.12	4.2
水深5m	0.250	73.84	4.2

水深10mの場合で、今後検討する。

装置の安全性を重視し、**共振現象がなるべく起こらず**、かつ**平均発生電力をある程度確保できる**最適な装置の諸元を探っていく必要がある。

減衰比 ζ は大きく...

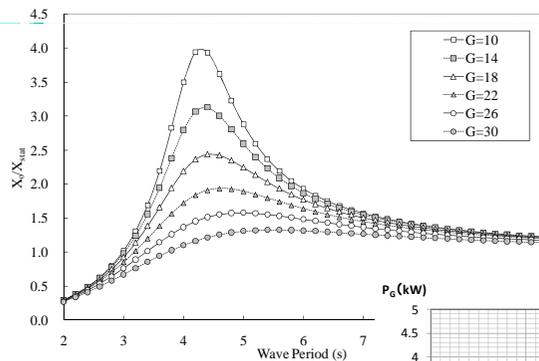
$$\zeta = \frac{C'}{2\sqrt{mk}} = \frac{\left(C \cdot R_m + C' + \frac{G^2 k_e k_e}{r} \right)}{2\sqrt{\left(I \cdot R_m^2 + (M_c + M_f + M_a) R_m^4 \right) \frac{\rho g \pi D_f^2}{4}}}$$

平均発生電力 P_G は大きく...

$$P_G = r \cdot i^2 = r \left(\frac{-Gk_e}{r} \cdot \frac{d\theta}{dt} \right)^2$$

➡ 簡易的に考えると、ギア比Gを任意に変化する。

3.3 装置の最適化検討 (ギア比) ...水深10mの場合



最適なギア比は22程度であり、その時の応答倍率≒2.0程度と分かる。

装置の諸元を検討する際、応答倍率≒2.0程度を目安。

図-9 ギア比別の波の周期における周波数応答

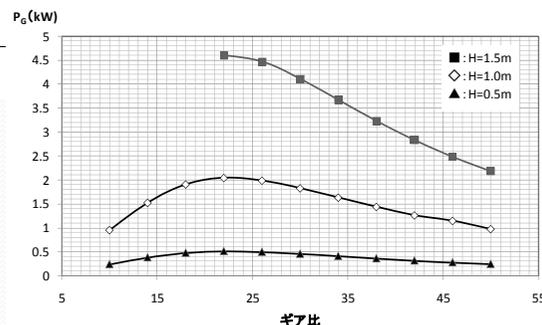


図-10 各波高におけるギア比と平均発生電力の関係

4. ここまでのまとめ (流体力を考慮した共振理論解析)

- 波強制力、造波減衰力、付加質量を導入し、様々な水深、波の周期におけるそれらの値を求め、共振特性を評価することができた。
- 共振周期周辺では、フロートが宙づり、全没水を繰り返す、安全面に問題があり、程よくフロートが上下運動し、発生電力を十分に獲得できる諸元をさぐる最適な手法を見出した。(応答倍率≒2.0程度になるよう、種々諸元を変化させる。)

5. 遊水室の設置

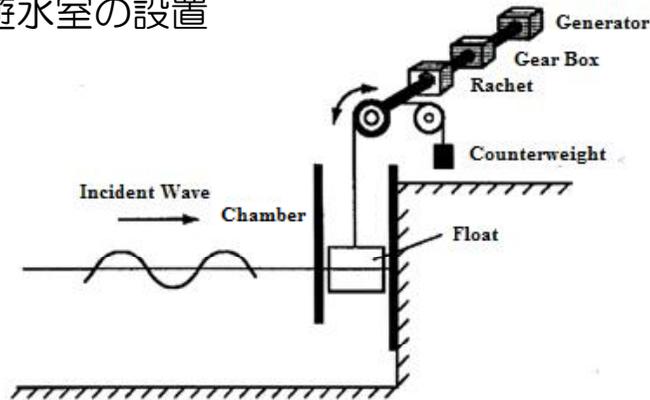


図-2 つるべ式波力発電装置の概略図(遊水室設置の側面図)

遊水室設置の目的:

- ✓フロートの保護
- ✓遊水室内の水面上下振幅を大きくする。

5.1 遊水室内の水の挙動の調査

岸壁の前に部屋を設け、波の進行方向に対して垂直方向に一部没水の壁を設ける。

- その部屋の上部をノズル形状にし、タービンをセットしたのがOWCである。
- 部屋の上部をオープンにし、つるべ式波力発電用浮体が室内に浮いているのが、遊水室設置型のつるべ式波力発電である。

どちらの場合も遊水室内の水面が一樣に変動する方が望ましい。

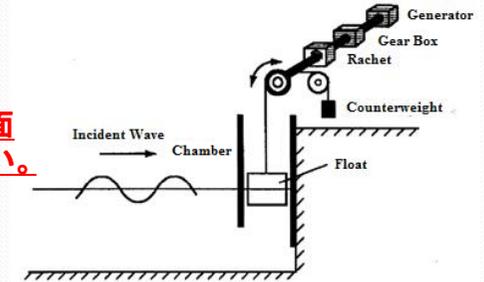


図-2 つるべ式波力発電装置の概略図

5.2 研究目的

遊水室内の水面が一樣に振幅することを目的とし、基礎的実験を行った。



1) 遊水室を設置

(波浪条件, 隔壁没水深D, 遊水室奥行Wを変化)

2) 遊水室内の底部に一樣勾配の傾斜板を設置

(波浪条件, 隔壁没水深D, 遊水室奥行Wを変化)

評価方法:

- a) 遊水室全体反射率の算定・・・分離推定法によって算出
- b) 遊水室内の各点の振幅評価・・・高速フーリエ変換法によって算出
- c) 遊水室周辺の速度分布

5.3 実験概要(遊水室内の水位変動調査)

全長4m、幅0.5m、高さ0.5mの水槽で実験を行った

遊水室の反射率の評価は水路および構造物による多重反射を考慮した分離推定法によって評価を行った。したがって、隔壁の外に2点の波高計を設置している。その間隔は合田¹⁾に従っている

遊水室内は遊水室内幅を4等分し、隔壁前方 H_1 、中央 H_2 、後方 H_3 の3点に波高計を設置した。また隔壁から波の進行方向に対しての距離をx、水底からの距離をzとし、様々な評価を行った。

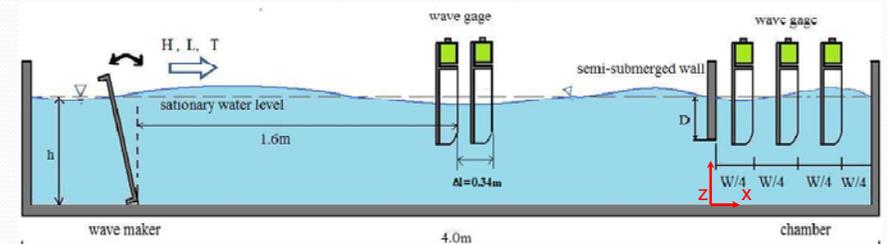


図-11 実験水槽の概略図

b)遊水室内の各点の振幅評価

算出方法)

- 隔壁前方, 中央, 後方それぞれの水位変動の時系列から, 高速フーリエ変換法によって, 水面変動の周波数評価を行った(図-5参照).
- 図のように卓越周波数が存在する. この振幅のピーク値の二乗和を振幅とする(注)この手法は合田らの分離推定法にならった).

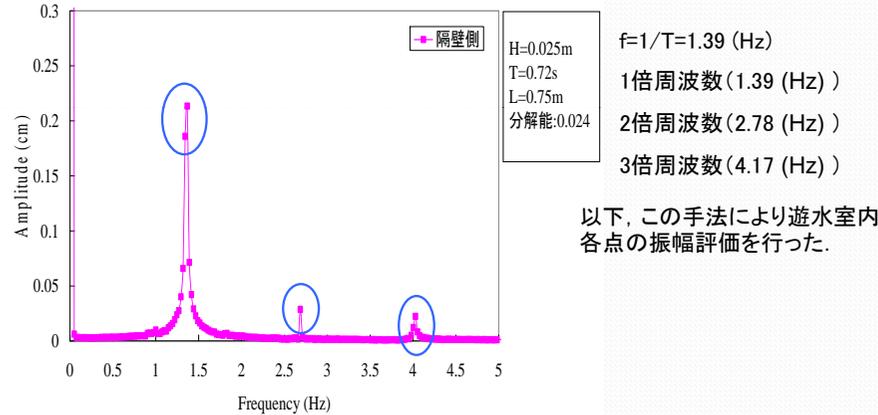


図-13 隔壁前方の水面変動の周波数評価の一例

以下, この手法により遊水室内各点の振幅評価を行った.

b)遊水室内の各点の振幅評価(隔壁没深D=0.1m)

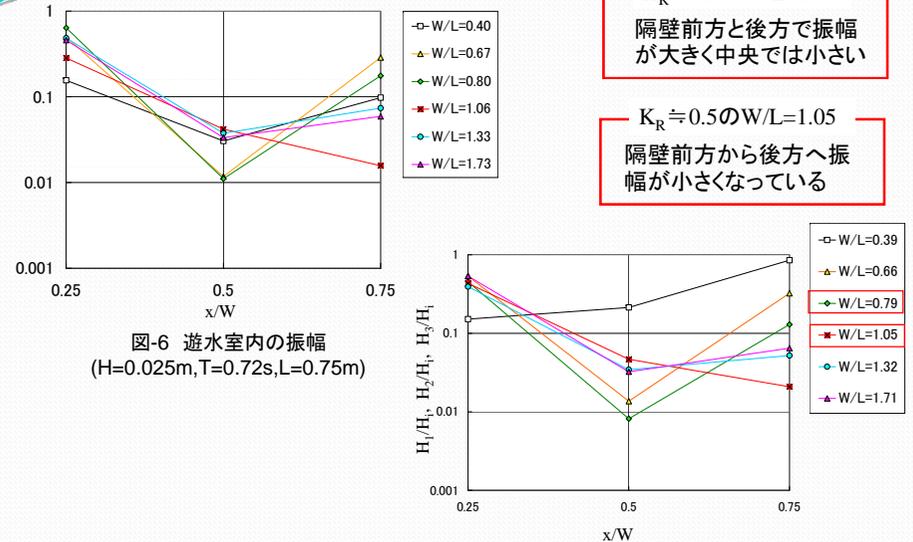


図-6 遊水室内の振幅 (H=0.025m, T=0.72s, L=0.75m)

図-7 遊水室内の振幅 H=0.037m, T=0.75s, L=0.76m

c)遊水室内の速度分布(cm/s)

H=0.037m, T=0.75s, L=0.76m

遊水室内は緩やか

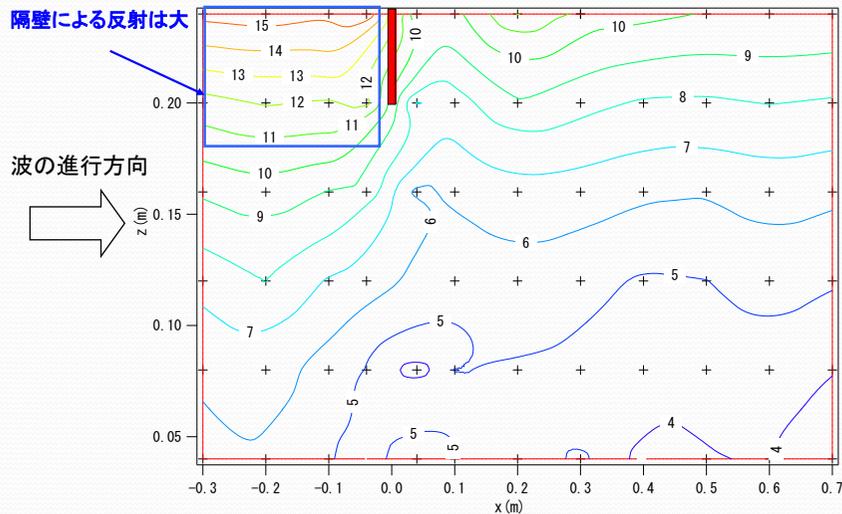


図-8 速度分布($K_R \approx 0.5$ のW/L=1.05)

c)遊水室内の速度分布(cm/s)

H=0.037m, T=0.75s, L=0.76m

隔壁による反射は小

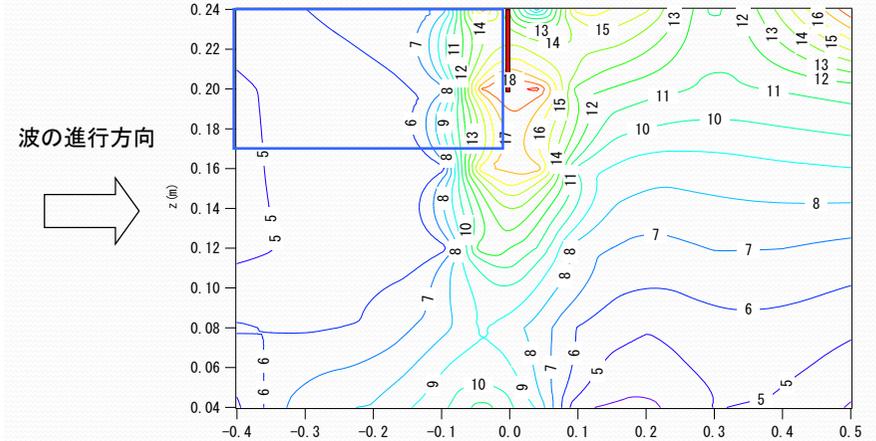
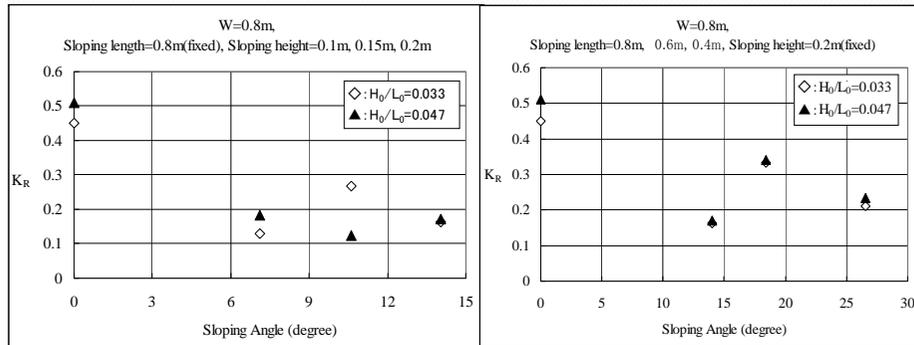


図-9 速度分布($K_R \approx 0.3$ のW/L=0.79)

遊水室に傾斜版を据えた場合

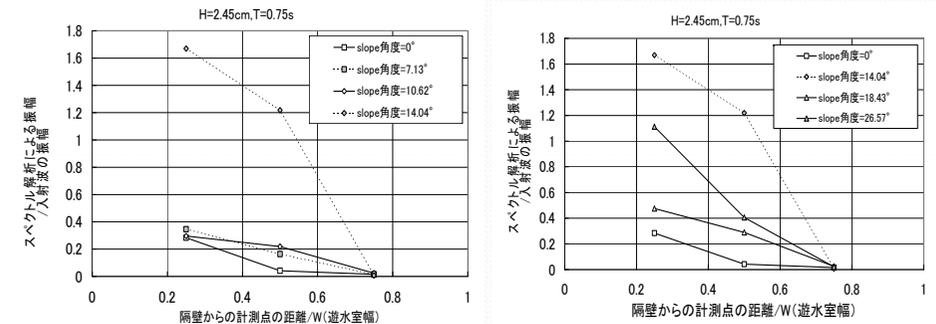
a) 反射率の算定



傾斜版を設置することで、反射率 K_R は減少している。

遊水室に傾斜版を据えた場合

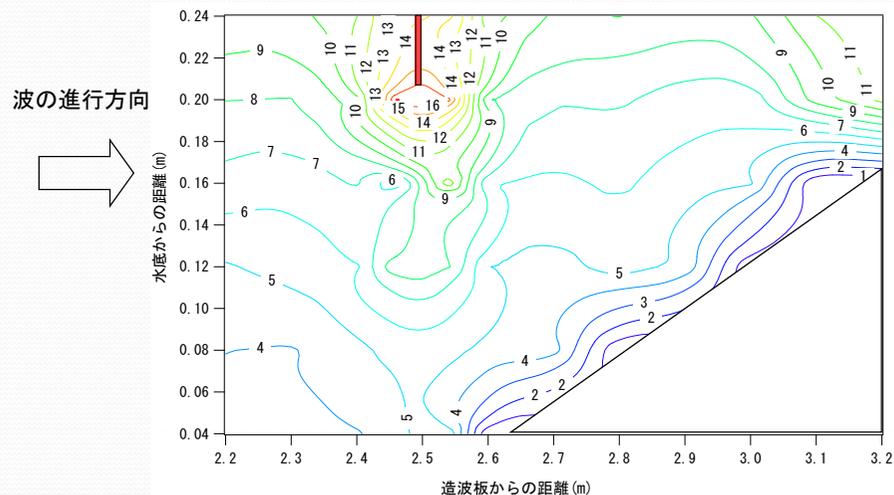
b) 遊水室内の各点の振幅評価



遊水室中央部での水面変動は大きくなっている。

c) 傾斜版有の遊水室内の速度分布(cm/s)

H=0.037m, T=0.75s, L=0.76m



まとめ

- 隔壁のみの遊水室全体の反射率は0.2~0.5の間にある。
- $W/L=1.0$ 以外は、隔壁中央の振幅は小さい。
- 傾斜版を設けた遊水室全体の反射率は隔壁のみの反射率に比べて、小さくなった。
- 傾斜版を設けた遊水室は隔壁のみの場合に比べて増幅する条件が見受けられた。