

数値波動水路のリーフ上の波浪変形への適用

APPLICATIONS OF A NUMERICAL WAVE FLUME TO WAVE TRANSFORMATION ON A REEF

高橋 俊彦¹・池谷 毅²

Toshihiko TAKAHASHI and Tsuyoshi IKEYA

¹正会員 理修 鹿島建設株式会社 技術研究所 環境技術研究部 (〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1)

²正会員 工博 鹿島建設株式会社 技術研究所 環境技術研究部 (〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1)

With rapid progress of computer technology, direct wave simulation techniques based on CFD(Computational Fluid Dynamics) have been applied to practical problems in coastal and/or port and harbor engineering. A numerical wave flume, which is considered one of the representative direct simulation techniques, has been expected to substitute for hydraulic model tests.

In this paper, we consider characteristics of wave transformation on a reef, as one of the applications of the numerical wave flume to coastal structures. By observing its numerical results and comparing them with the experimental results previously obtained, we discuss its applicability to wave transformation on a reef.

Key Words : Numerical wave flume, wave transformation, irregular wave, wave setup, significant wave height, significant wave period

1. はじめに

計算機技術の飛躍的發展に伴って、CFD(数値流体力学)の海岸・港湾工学の実務への適用が試みられてきている。数値波動水路^{1),2)}はその代表的なもので、従来水理模型実験に用いられる波動水路とほぼ同じ機能を備えることによって、実験で現われる水理現象を数値的に再現することを目指す汎用コンピュータ・ソフトウェアである。特に近年では、自由表面の処理方法、造波境界の設定方法等が改善されてきており、非線形性の強い現象への適用も期待されている。

本論文では、数値波動水路の適用性研究の一環として、リーフ上の波浪変形に関して数値波動水路による計算結果と水理模型実験結果を比較・検討する。水理模型実験で見られる碎波変形、リーフ上のセットアップ等の現象が、数値波動水路を用いてどの程度再現できるかを考察する。

2. 数値波動水路の概要

(1) 基礎方程式

数値波動水路^{1),2)}は、ポーラスモデル³⁾に基づき、以下に示す2次元非圧縮流体の連続式及びNavier-Stokes方程式を基礎方程式としている。

$$\frac{\partial \gamma_x u}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \lambda_v \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u u}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z w u}{\partial z} \\ &= -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} - R_x \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma_x \nu_e \left[2 \frac{\partial u}{\partial x} \right] \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\gamma_z \nu_e \left[\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right] \right), \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \lambda_v \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u w}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z w w}{\partial z} \\ &= -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} - \gamma_v g - R_z \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma_x \nu_e \left[\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right] \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\gamma_z \nu_e \left[2 \frac{\partial w}{\partial z} \right] \right), \quad (3) \end{aligned}$$

ここで、 t : 時間, x, z : 水平, 鉛直座標, u, w : 流速の水平, 鉛直成分, ρ : 密度, P : 圧力, ν_e : 分子動粘性係数と渦動粘性係数の和, g : 重力加速度, γ_v : 空隙率, γ_x, γ_z : 水平, 鉛直方向面積透過率である。 $\lambda_v, \lambda_x, \lambda_z$ は C_M を慣性力係数とすると、次式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} \lambda_v &= \gamma_v + (1 - \gamma_v) C_M \\ \lambda_x &= \gamma_x + (1 - \gamma_x) C_M \\ \lambda_z &= \gamma_z + (1 - \gamma_z) C_M \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

多孔質体からの抵抗 R_x, R_z は、 C_D を抵抗係数として、以下に示す流速の2乗に比例する形でモデル化している。

$$\left. \begin{aligned} R_x &= \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta x} (1 - \gamma_x) u \sqrt{u^2 + w^2} \\ R_z &= \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta z} (1 - \gamma_z) w \sqrt{u^2 + w^2} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ここで、 $\Delta x, \Delta z$ はそれぞれ水平、鉛直方向の格子間隔である。

(2) 自由表面解析モデル

自由表面解析モデルには、汎用性が高く、複雑な表面形状を取り扱えるVOF (Volume of Fluid) 法を用いている。VOF法では、各計算セル毎に流体の占める割合を表すVOF関数 F の移流方程式と「流体である、表面である、気体である」というフラグを逐次計算することによって、自由表面の挙動を解析している。VOF関数 F に関する移流方程式は、以下の通りである。

$$\gamma_v \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_x u F}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w F}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

(3) 造波境界

造波境界は、目標とする波の流速を流速指定境界条件として設定する。なお、条件過多となることを防ぐために、VOF関数 F および圧力に関しては、勾配ゼロを設定している。

ここでは、水理模型実験結果との比較、検討を目的としているので、できる限り整合性を保つために線形不規則波造波境界を設定した。線形不規則波は、以下に示すJONSWAPのスペクトルを用いて、成分波200波を重ね合わせることによって生成した⁴⁾。

$$\begin{aligned} S(f) &= \beta_J H_{1/3}^2 T_p^{-4} f^{-5} \exp[-1.25(T_p f)^{-4}] \\ &\quad \times \gamma \exp[-(T_p f - 1)^2 / 2\sigma^2], \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \beta_J &= \frac{0.0624}{0.230 + 0.0336\gamma - 0.185(1.9 + \gamma)^{-1} \\ &\quad \times [1.094 - 0.01915 \ln \gamma]}, \\ T_p &= T_{1/3} / [1 - 0.132(\gamma + 0.2)^{-0.559}], \end{aligned}$$

$$\sigma \approx \begin{cases} 0.07 & f \leq f_p, \\ 0.09 & f > f_p, \end{cases}$$

$$1 \leq \gamma \leq 7$$

3. 水理模型実験

(1) 実験モデル

水理模型実験は、鹿島技術研究所海洋水理実験場大型平面水槽 (幅20m、長さ58m、深さ1.6m) で池谷ら⁵⁾が行ったものである。水槽内にリーフ地形の模型を設置して、容量式波高計で各点の水面変動を計測した。水面変動は、それぞれ岸沖方向に

15点、横断方向に17点の合計255点で計測した。

図-1は、その時のセットアップ状況を示している。波高計の岸沖(x)方向の設置位置は、リーフクレストを原点として、それぞれ $x = -5.97, -3.97, -1.75, -0.75, -0.5, -0.25, 0.0, 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0$ (m)である。

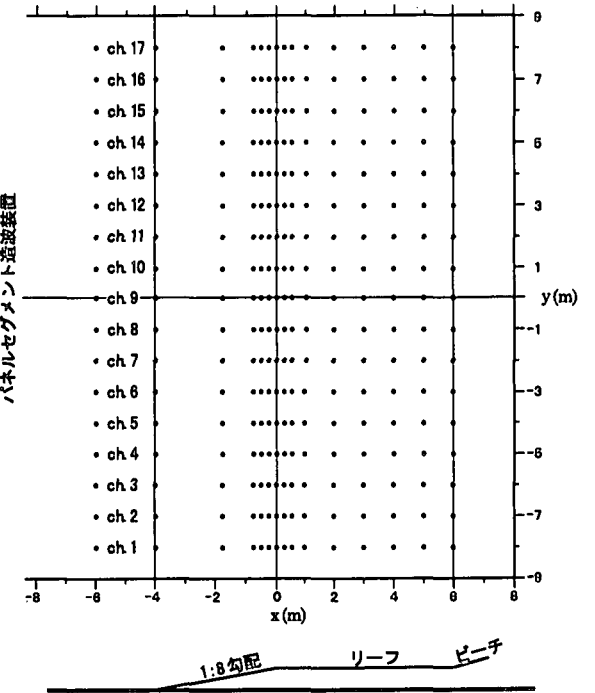


図-1 実験セットアップ状況

表-1は、波浪条件を示している。換算沖波波高 H_0' は、一様水深部の有義波高 H_0 および浅水係数より算定している。

表-1 一定水深部の波浪条件

波浪条件	リーフ上水深 (cm)	H_0' (cm)	H_0 (cm)	T_0 (s)	γ
1	2.0	16.8	15.9	2.11	1
2	2.0	17.4	16.3	2.08	7

(2) データ処理

得られた水面変動時系列データに対して、ゼロダウンクロス法による統計処理を行った。統計量としては、平均水位、有義波高、有義周期等に関して整理した。ここでは、数値波動水路による計算結果との比較のため、水槽中央の岸沖方向断面 (図-1におけるch. 9) のデータのみを引用する。

4. 数値解析

(1) 解析モデル

図-2は、解析モデルを示している。実験セットアップ状況に基づいて、水平方向25m、鉛直方向0.8mを対象領域としている。格子分割(間隔)は、それぞれ水平方向に250分割($\Delta x=0.1\text{m}$)、鉛直方向に32分割($\Delta z=0.025\text{m}$)としている。

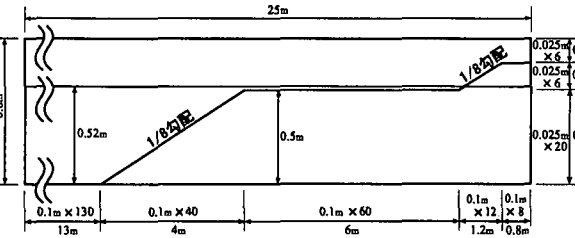


図-2 解析モデル

(2) 解析条件

現段階では、数値波動水路には造波境界において反射波を吸収するような機能が入っていない。そこで、反射の影響があまり現われない造波開始後100秒間をシミュレーション時間とした。時間刻み(時間ステップ数)は、0.001s(100000ステップ)で一定とした。リーフ地形に関する境界条件は、実験セットアップ状況を考慮して、スリップで不透過とした。

5. 実験結果と解析結果の比較

(1) 時系列の比較

図-3～17は、波浪条件1に対する水槽中央の岸沖方向断面の各点における水面変動の時系列を示している。各図において、それぞれ左側が実験結果、右側が解析結果である。実験では造波開始後1500秒間をデータ収集時間としたが、解析結果との比較のため、対応する100秒間を抜き出している。

これらの図より、以下のことが考察される。

- ・ 解析結果を見ると、沖での振幅が少し小さ目ではあるものの概ね良好な不規則波形が生成されていることがわかる。これは、数値波動水路に組み込まれた線形不規則波造波境界がうまく機能していることを意味している。
- ・ 解析結果は実験結果に比して、沖での平均水位が時間とともに少しずつ上昇しているが、これは造波境界で反射波の吸収を考慮していないために、VOF関数 F 値 $\times$ セル面積がシミュレーション時間100秒間で10%程度増加したこと起因している。
- ・ 解析結果では、リーフ部で最初に水位が海底面近くまで急激に落ちる時刻が見られる。これは、碎波の影響のためリーフ部で水が分離されることに起因しているが、瞬間的な現象で実用上はほとんど問題ないと考えられる。

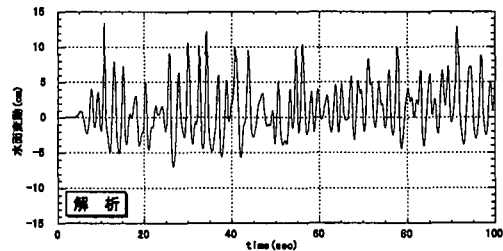
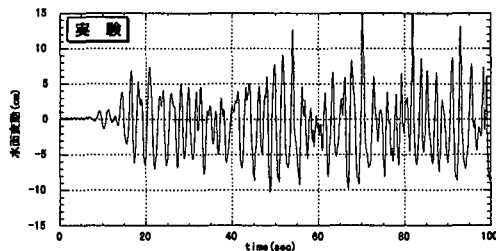


図-3 水面変動時系列 ($x=-5.97\text{m}$)

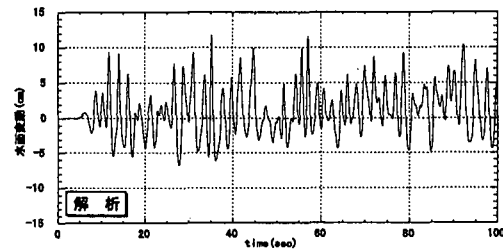
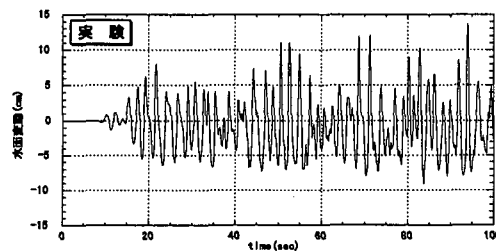


図-4 水面変動時系列 ($x=-3.97\text{m}$)

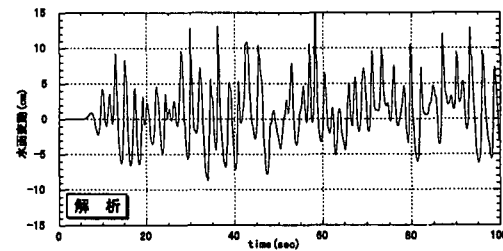
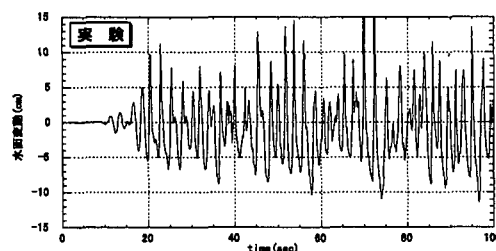


図-5 水面変動時系列 ($x=-1.75\text{m}$)

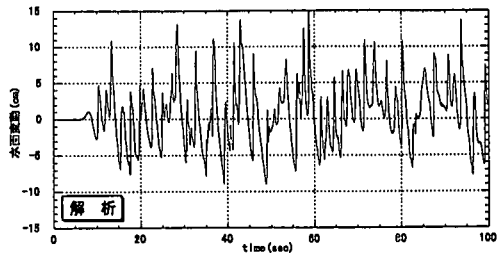
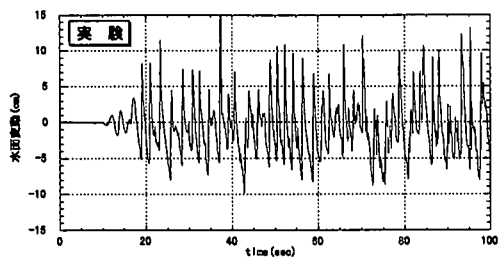


図-6 水面変動時系列 ($x=-0.75\text{m}$)

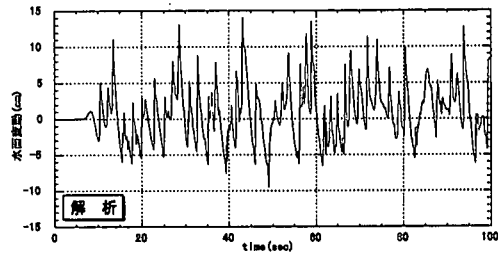
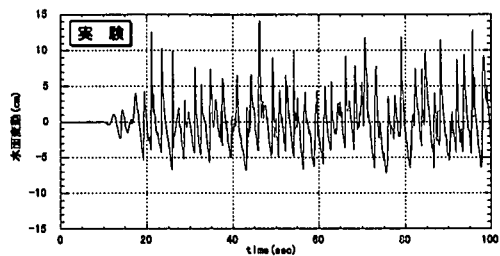


図-7 水面変動時系列 ($x=-0.5\text{m}$)

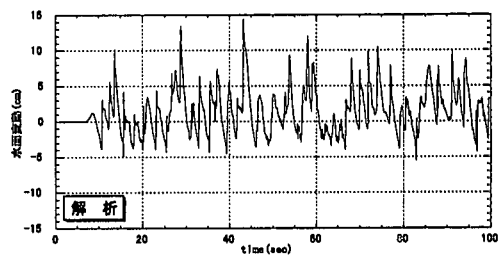
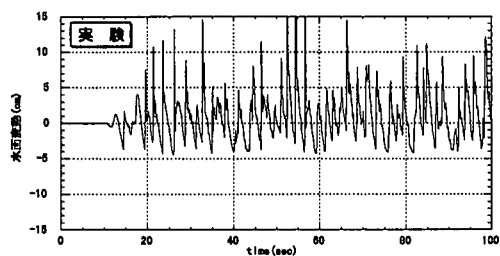


図-8 水面変動時系列 ($x=-0.25\text{m}$)

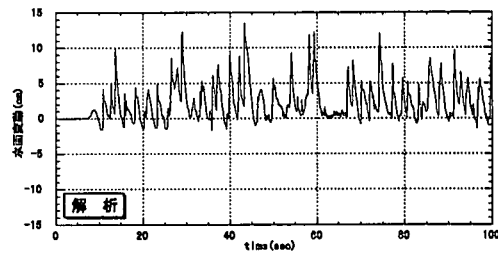
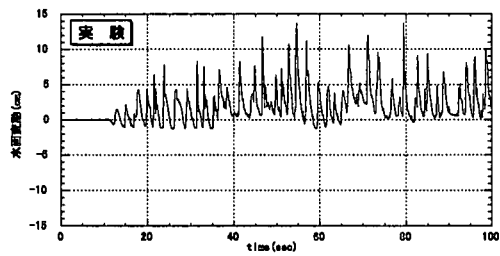


図-9 水面変動時系列 ($x=0.0\text{m}$)

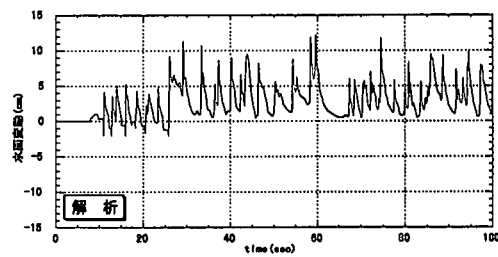
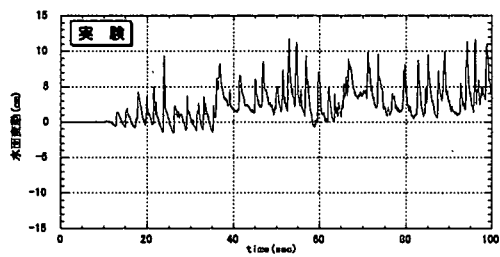


図-10 水面変動時系列 ($x=0.25\text{m}$)

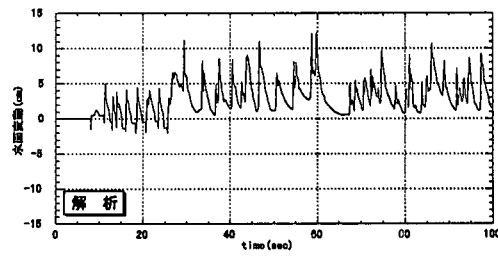
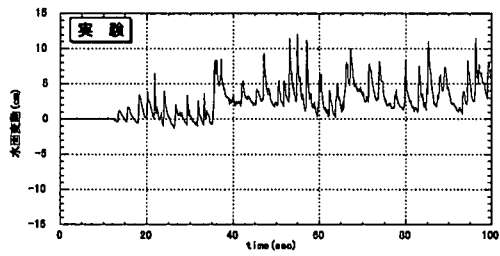


図-11 水面変動時系列 ($x=0.5\text{m}$)

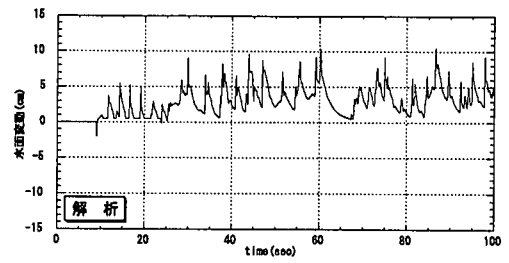
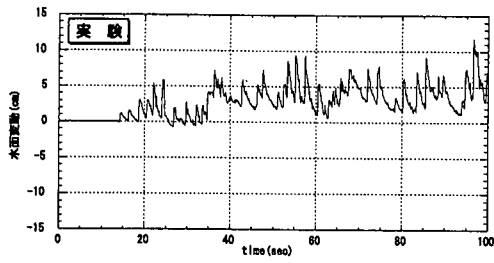


図-12 水面変動時系列 ($x=1.0\text{m}$)

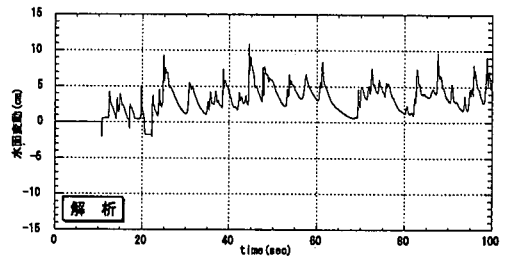
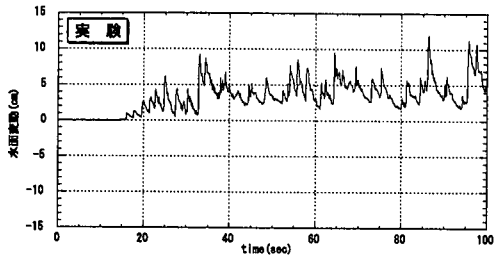


図-13 水面変動時系列 ($x=2.0\text{m}$)

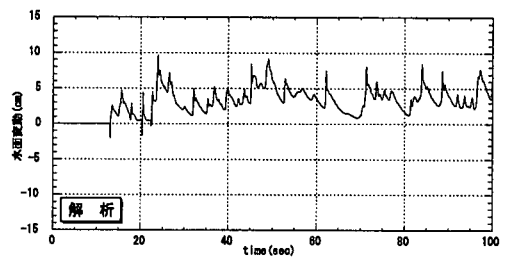
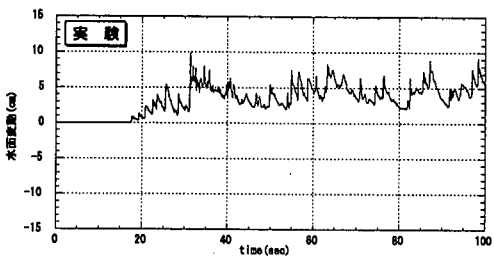


図-14 水面変動時系列 ($x=3.0\text{m}$)

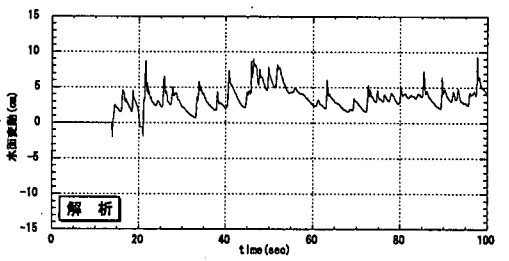
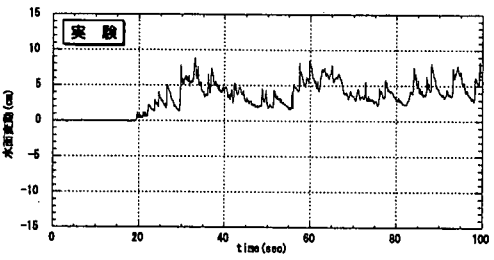


図-15 水面変動時系列 ($x=4.0\text{m}$)

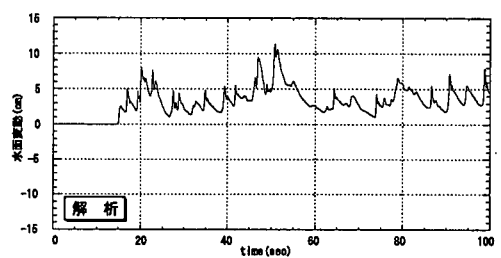
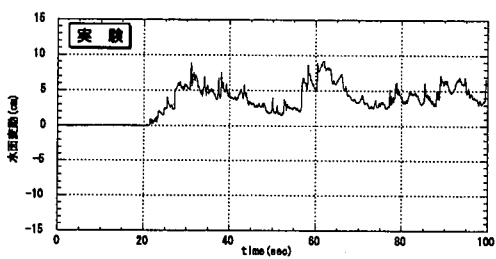


図-16 水面変動時系列 ($x=5.0\text{m}$)

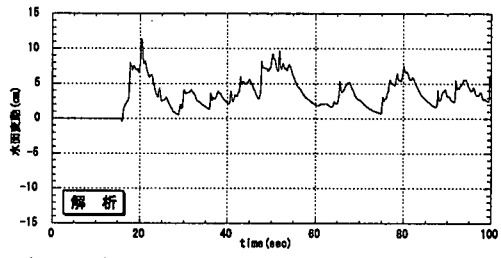
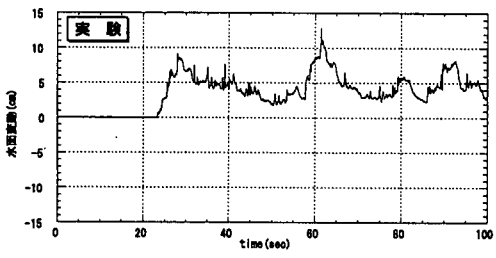


図-17 水面変動時系列 ($x=6.0\text{m}$)

(2) 統計量の比較

図-18～20は、それぞれ波浪条件1, 2に対する平均水位上昇量, 有義波高, 有義周期の分布を示している。各図において、それぞれ○が実験結果, ●が解析結果である。

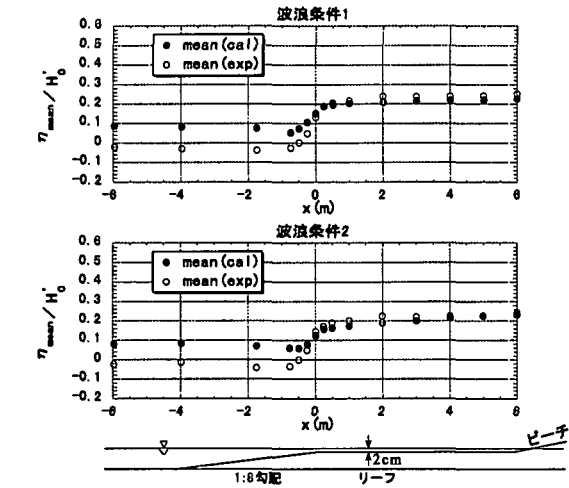


図-18 平均水位上昇量分布

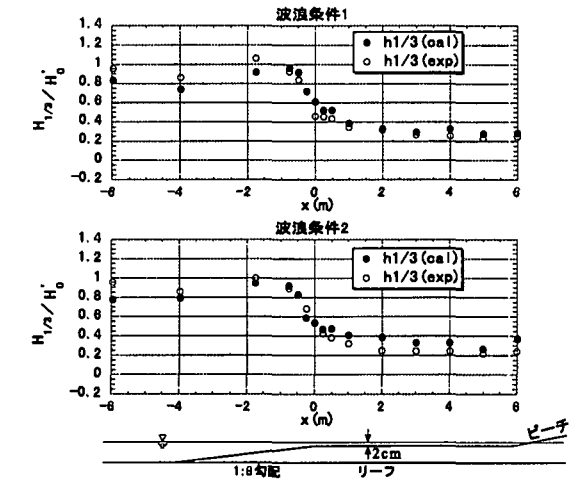


図-19 有義波高分布

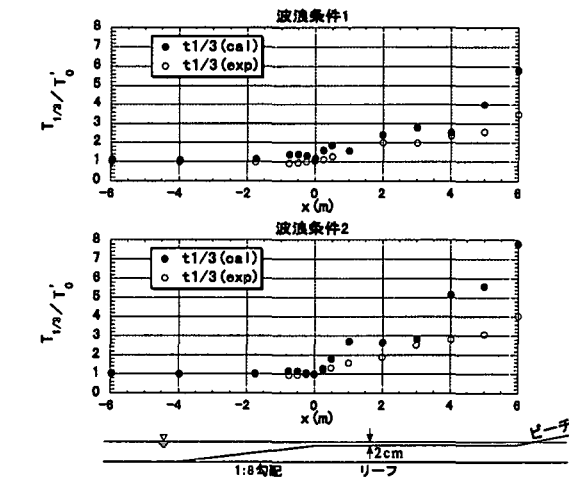


図-20 有義周期分布

これらの図より、実験結果と解析結果は全般的によく一致していることがわかる。「リーフ内の有義周期が汀線に近づくにつれて増大すること」、「 γ が大きいほどその割合が大きいこと」等の特性もよく表現されている。ただ平均水位に関しては、斜面から沖にかけて解析結果は、実験結果より大きくなっている。これは、前述したように、造波境界で反射波の吸収を考慮していないために、シミュレーション時間が進むにつれてVOF関数F値×セル面積が増加したことに起因している。

6. おわりに

水理模型実験結果との比較を通して、数値波動水路のリーフ上の波浪変形への適用性を検討した。その結果、実験で見られる碎波変形、リーフ上のセットアップ等の現象が、数値波動水路でもかなり精度良く再現できることが判明した。しかし、造波境界における反射波の吸収機能がないために、シミュレーション時間が進むにつれて解析対象領域内のVOF関数F値×セル面積が増加し、平均水位が上昇する現象も確認された。

今後の課題は、このような問題点を改善して、解析精度を向上させていくとともに、他の実構造物への適用性を検討していくことである。

謝辞：本研究で用いた数値波動水路は、「数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会」（代表：東京大学磯部雅彦教授）で開発、改良されてきているものである。ここに記して関係各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) 磯部雅彦, 高橋重雄, 余 錫平, 榊山 勉, 藤間巧司, 川崎浩二, 蔭 勤, 秋山 実, 大山洋志: 数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究-VOF法基本プログラムの作成-, 海洋開発論文集, 第15巻, pp.321-326, 1999.
- 2) 磯部雅彦, 余 錫平, 梅村幸一郎, 高橋重雄: 数値波動水路の開発に関する研究, 海岸工学論文集, 第46巻, pp.36-40, 1999.
- 3) 榊山 勉, 阿部宣行, 鹿島遼一: ポーラスモデルによる透水性構造物周辺の非線形波動解析, 海岸工学論文集, 第37巻, pp.554-558, 1990.
- 4) 合田良實: 港湾構造物の耐波設計-波浪工学への序説-, 鹿島出版会, 1977.
- 5) 池谷 毅, 岩瀬浩二, 漆山 仁, 滝本邦彦, 秋山義信: リーフ海岸における多方向不規則波の波浪変形実験, 海岸工学論文集, 第46巻, PP.201-205, 1999.