数値波動水槽における波浪環境再現装置の開発

学生員 宇野 雄哉* 正員 朴 鍾千*
正員 宮田 秀明*

Development of Simulation Equipment of Marine Environments in Numerical Wave Tank

by Yuya Uno, *Student Member* Jong-Chun Park, *Member*
Hideaki Miyata, *Member*

Summary

The fully-nonlinear multi-directional waves are reproduced using by a 3D viscous Numerical Wave Tank (NWT) simulation technique. The governing equations, Navier-Stokes (N-S) and continuity equations, are discretized by a finite-difference method in the framework of a rectangular coordinate system, and the boundary values are updated at each time step in a time-marching procedure. The fully-nonlinear kinematic free-surface condition is satisfied by the marker-density function technique. The directed incident waves are generated by multi-segmented wavemaker on the basis of the so-called "snake-principle", and the outgoing waves are numerically dissipated inside an artificial damping zones located at the opposite side of wavemaker.

In this study, we present results for the generation of regular waves including numerical convergence tests, irregular waves, and multi-directional random waves including the Bull's eye wave.

1. 緒 言

実際の海域での波浪は、一方向の規則的なものではなく、不規則であり多方向の成分を持ったものである。これは、主に風によって発達したものであるが、沿岸などにおいては、長期的に発達したうねりに対して、短期的に（一時的に）発達した風波が干渉することによって、2つの中心的な波成分を持った多方向不規則波にもなりうる。このような、実海域の波浪の不規則かつ多方向の性質は、海洋構造物や船舶、または沿岸環境などに大きな影響を与えると考えられる。

水槽実験において実海域の波浪の再現は、サーペントタイプの造波装置を用いて実現されている。この造波装置とは、多数の造波板が直線上に配列されたものであり、各パネルに適当な位相差を分布させ方向波を再現する。しかし、この造波装置の設置には多大な費用がかかる上、

水槽幅の有限さによる方向波の不均一性や側面からの波の反射などを誘起し実験の精度を低下させる原因となる。

一方、計算機による数値シミュレーション技術は、近年のコンピューター性能の急速な向上とシミュレーション技術の発達により、現象を再現し解析を行う範囲を広げるとともに、設計における重要度を一層高めている。このシミュレーション技術を用いた3次元数値波動水槽技法により、線形及び2次精度の多方向波の数値造波法^{1,2,3,4)}と、ポテンシャル理論による非線形性の強い2次元不規則波の研究^{5,6)}が行われているが、非線形性の強い波の数値造波は計算機への負荷が大きく、多くは2次元において行われている。しかし、非線形性の強い波と3次元構造物との非線形な相互干渉問題を取扱うための3次元数値波動水槽法もいくつか提案されており^{7,8)}、非線形性の強い波の造波も実現されている。

著者らは Navier-Stokes 方程式を解く CFD ベースの3次元粘性数値波動水槽シミュレーション法を確立し、非線形性の強い波と3次元構造物との相互干渉⁹⁾、波一潮流一構造物の相互干渉¹⁰⁾、方向波の生成法¹¹⁾などの研究を進めてきた。本研究では、この手法をベースにし、

* 東京大学大学院工学系研究科
環境海洋工学専攻

原稿受理 平成 14 年 1 月 10 日
春季講演会において講演 平成 14 年 5 月 15, 16 日

数値波動水槽のより多様な工学的応用のために、多方向不規則波の生成を含む波浪環境再現装置の開発を目的としている。

本研究で用いた3次元数値波動水槽法は、MAC法に基づいて有限差分法でNavier-Stokes式を解くことによって実現されている。自由表面の条件として、力学的条件には粘性圧力と表面張力を無視し、運動学的条件は密度関数法によって満足させている。この3次元数値波動水槽においては波の砕波のシミュレーションも可能である。

本研究では、まず2次元規則波の造波において、数値造波装置の格子依存性に対する精度検証を行った。引き続き、2次元の不規則波、3次元の方向波、多方向不規則波の造波の順で拡張を行った。また、波浪環境再現装置の応用的利用の例として、集中波(Bull's eye wave)の数値的再現を行った。

2. 数値波動水槽シミュレーション法

2.1 支配方程式

流体が2つの層からなり、それぞれの流体層が非圧縮かつ均一である場合、支配方程式は以下のNavier-Stokes式と連続の式で与えられる。

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -\frac{\nabla p}{\rho^{<k>}} + \mathbf{a}^{<k>} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

ここで、 $k=1, 2$ で、

$$\mathbf{a} = -(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f} \quad (3)$$

このとき、 $\mathbf{u}=(u, v, w)$ は、速度ベクトルを表し、 p は圧力を、 t は時間を、 ν は動粘性係数を、 $\mathbf{f}$ は重力を含む外力を表す。また、上付きの<1>と<2>は、2つの流体層をそれぞれ表す(本研究では、水と空気である)。密度 ρ は、それぞれの流体層において一定であると見なす。

支配方程式は、有限差分法によって領域毎に分離し、時間発展的に解かれる。2つの層のインターフェースに関しては、非線形性の強い自由表面条件にも対応できるように決定する。自由表面において、非線形性の強い運動を行う場合には粘性圧力と表面張力は無視でき、

$$\frac{D(\eta - z)}{Dt} = 0 \quad (4)$$

$$\rho^{<1>} = \rho^{<2>} \quad (5)$$

となる。ここで、 η は自由表面の高さを表し(波高関数)、 D は全微分を表し、 z は鉛直方向の座標を表す。式(4)は、自由表面上の粒子は、自由表面とともに移動することを表している。しかし、この条件では、自由表面の相互作用の大きい、波の回り込みや砕波を表せない。そこで、本研究では、式(4)の代わりに、以下のような密度関数法を用いる。

$$\frac{\partial M_\rho}{\partial t} + u \frac{\partial M_\rho}{\partial x} + v \frac{\partial M_\rho}{\partial y} + w \frac{\partial M_\rho}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

このとき、密度関数 M_ρ は、 $\rho^{<1>}$ と $\rho^{<2>}$ の間の値をとり、この値は1つのセル内での2つの流体の比率を表す。式(6)はタイムステップごとに計算され、自由表面の位置は密度関数が以下の値をとるところで与えられる。

$$\bar{M}_\rho = \frac{\rho^{<1>} + \rho^{<2>}}{2} \quad (7)$$

波の回り込みや砕波を考慮しない場合には、自由表面の位置は式(4)での波高関数に一致する。自由表面位置が決まった後には、2つの流体層は独立して扱い、支配方程式をそれぞれの密度を用いて計算する。

2.2 アルゴリズムと差分法

数値解法のアプローチの本質的な部分は、NS-MAC NWT (Park ら)^{9,10,11,12)}と同様であり、速度の値と圧力の値は完全直交格子系の各セルに対してスタッガード型に配置する。タイムステップにおいては、まず式(6)で密度関数の分布を計算して、Navier-Stokes式で速度場を更新する。新しい圧力場は以下のPoisson式をそれぞれの流体層において、Richardson法を用いた繰り返し計算によって得られる。

$$\nabla \cdot \nabla P = \nabla \cdot \left(\mathbf{a} + \frac{\mathbf{u}^{(n)}}{\Delta t} \right) = \nabla \cdot \mathbf{b} \quad (8)$$

$$p^{m+1} = p^m + \bar{\omega} (\nabla \cdot \nabla P - \nabla \cdot \mathbf{b}) \quad (9)$$

ここで、 $P = p / \rho$ で、 $\bar{\omega}$ は緩和係数である。上付きの n は、タイムステップを表し、 m は繰り返し計算の繰り返し回数を表す。また、 $\mathbf{b}$ は、対流、拡散その他の外力項を含む。Navier-Stokes式は双曲線関数であり、初期値問題であるのに対して、Poisson式は楕円関数であり、境界値問題であるため、各タイムステップにおいてPoisson式は繰り返し計算によって解く。

対流項に対する数値解法スキームは、結果に大きな影響を及ぼすので、慎重に決定する必要がある。この数値シミュレーションではflux-split法をバリエーションとともに用いている。拡散項には2次中心スキームを用い、時間微分項評価には2次精度のAdams-Bashforth法を用いる。

自由表面上での圧力は、第<2>流体の圧力を自由表面の位置に外挿する事によって求められるが、 x, y 方向にはゼロ勾配、 z 方向には静水圧を考慮して外挿される。

自由表面上での速度は、第<1>流体の速度場から自由表面の法線方向に勾配がゼロになるように、近似的に外挿される。このとき、外挿される点の位置からもっとも近距離における物理量の挙動が支配的になるように、速度の長さ重み付き外挿法を用いている。

2.3 数値造波と波スペクトルの入力

数値造波は、流入境界において、第<1>流体に対して、速度プロファイルを与えることにより行う。ここで、与える速度プロファイルは線形波（あるいは Stokes 波の 2 次成分までを含むもの）で、フラップタイプの造波機で造波を行った際の速度プロファイルと同様のものである。方向波の造波に対しては、線形重ね合わせ理論¹³⁾に基づいて、サーベントタイプの造波装置を用いた際の速度プロファイルと同様のものを用いる。流体に与える速度プロファイルは、以下の式で表される。

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \sum_{n=1}^N A_n \omega_n \frac{\cosh[k_n(z+h)]}{\sinh(k_n h)} \begin{pmatrix} \cos \theta_n \\ \sin \theta_n \end{pmatrix} \cos(k_{nx}x + k_{ny}y - \omega_n t - \varepsilon_n) \quad (10a)$$

$$w = \sum_{n=1}^N A_n \omega_n \frac{\sinh[k_n(z+h)]}{\sinh(k_n h)} \sin(k_{nx}x + k_{ny}y - \omega_n t - \varepsilon_n) \quad (10b)$$

ここで、x 方向および y 方向の波数 k_x 、 k_y は、波数に対して、 $k_x = k \cos \theta$ 、 $k_y = k \sin \theta$ とする。 A 、 k 、 ω 、 θ 、 ε は、波の振幅、波数、角周波数、方向、位相差をそれぞれ表す。 N は波の成分数をあらわす。

手順として、波のエネルギースペクトルより、各成分に対して A 、 k 、 ω 、 θ を決める。ただし、 ε は 0 から 2π の乱数を与える。これらを式(10)に代入することにより、数値造波領域に与える速度プロファイルが決定される。

実海域の波浪などの多方向不規則な波は、エネルギースペクトルによって表すことができる。エネルギースペクトルは、周波数スペクトルと方向スペクトルを用いて、以下のように表される。

$$s(f; \theta) = s(f) \cdot G(\theta, f) \quad (11)$$

ここで、 $s(f)$ は周波数スペクトルを表し、 $G(\theta, f)$ は方向スペクトルを表す。実海域の波浪に対しては、様々なモデル化が行われており、本研究では、周波数スペクトルに対しては、合田¹⁴⁾によって沿岸域モデルに改良された Bretschneider-光易型の周波数スペクトルを用いた。周波数スペクトルは以下の式によって表される。

$$s(f) = 0.205 H_{1/3}^2 T_{1/3}^{-4} f^5 \exp[-0.75(T_{1/3} f)^4] \quad (12)$$

ここで、 f は周波数を表し、 $H_{1/3}$ 、 $T_{1/3}$ はそれぞれ有義波高、有義周期をあらわす。得られたエネルギーの値に対して、 $A = \sqrt{2S(f)df}$ によって各波成分に対する波高を計算する。ここで、 df は波成分間の周波数間隔である。方向スペクトルに関しては、以下の式で表される光易型の方向スペクトルを用いる。

$$G(\theta, f) = G_0 \cos^{2s}[(\theta - \theta_p)/2] \quad (13a)$$

$$G_0 = \left[\int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \cos^{2s}(\theta/2) d\theta \right]^{-1} \quad (13b)$$

$$s = \begin{cases} S_{\max} (f/f_p)^6 & : f \leq f_p \\ S_{\max} (f/f_p)^{-2.5} & : f > f_p \end{cases} \quad (13c)$$

ここで、 θ は方向を表し、基準となる方向からのなす角度として表す。 θ_p および f_p はそれぞれ、方向のピーク値と周波数のピーク値（ $f_p = 1/T_{1/3}$ ）を表す。 G_0 は、 $G(\theta, f)$ を正規化するための定数であり、 $S_{\max}$ は方向スペクトルの集中度¹⁵⁾を表している。

また、3 次元の 2 方向規則波および、3 次元の多方向不規則波の造波においては、数値水槽の隣り合う 2 面に造波領域をもうけた。これは、実験の水槽で用いられているデュアルフェース型の造波装置と同様に、有効造波領域を拡大することを目的とするものである。

2.4 その他の境界条件

流出境界には数値減衰領域¹⁶⁾を設けており、数値減衰領域においては、鉛直方向の速度成分を強制的に抑える数値散逸項¹⁶⁾を適用する。

1 面のみ数値造波装置をもうけた場合の、側壁部分に対しては、3 つの異なる境界条件を使い分けて用いた。具体的には、free-slip の流失なしの境界条件、流出ありの開放境界条件、また、方向波の造波など波の反射が起こる場合には数値減衰領域をもうけた。

2 面に数値造波領域を設けた場合には、それぞれの数値造波領域に向かい合う面（残る 2 面）に数値減衰領域を設けた。

計算量域の上下の境界に対しては、流体間のインターフェースからの垂直方向の距離が波の高さより十分に大きくなっていることを考慮しながら、速度および圧力が法線方向に対してゼロ勾配となるように定めている。

3. 数値造波シミュレーション結果と考察

3.1 2 次元規則波の数値造波シミュレーション

数値造波法の精度検証と格子依存性の検証のために、2 次元の規則波の造波シミュレーションを行った。波の周期を $T = 2s$ 、波長を $L = 6.24m$ として、数値造波シミュレーションを行った。波高は、 $H = 0.2m$ とし、このとき、勾配は $H/L = 1/31$ である。数値水槽の 1 面に数値造波装置をもうけ、向かい合う 1 面に減衰領域を設けた。減衰領域の長さは、波長の 3 倍とした。計算領域のサイズは、長さを 18.7m、幅を 1m、深さを 5.8m とした。このとき、幅方向に対しては、格子間隔を一定にとり、5 格子とした。波高計は、数値造波装置から 1 波長の距離と 2 波長の距離に設置した。

Fig.1 Results of convergence tests for:(a)horizontal cell size, (b)vertical cell size, and (c)sampling time.

Fig.1 にシミュレーションの結果を示す。ここで、 N_x は波長に対する分割数、 N_z は波高に対する分割数、 N_t は周期に対する分割数を表す。すべてのケースにおいて、波が十分に発達した後の 10 波長の平均値を用いている。水平方向の格子幅、および垂直方向の格子幅に対するテストでは、波高計で得られた波高を示し、時間間隔に対するテストでは、 $N_t=1250$ のシミュレーションを基準として、波高計の位置に波の波頂が到達する時間差を示している。それぞれのケースにおいて結果として示す波高および位相差は、入力した波の波高および周期で無次元化している。

ここで、すべてのケースにおいて、分割数を増やすほど正確なシミュレーション結果が得られていることが分かる。しかし、分割数の増加に対する結果の収束が見られ、結果として、波長に対しては 50 分割以上、波高に対しては 20 分割以上、周期に関しては 1000 分割以上が必要であると言える。

3.2 2次元不規則波の数値造波シミュレーション

2次元の不規則波の数値造波シミュレーションには、前述した Bretchenider-光易型の周波数スペクトル (式 (12)) を使い、エネルギー Spektral から 64 の成分波を取り出して数値造波を行った。このとき、有義波高は $H_{1/3}=0.05m$ とし、有義周期は $T_{1/3}=1.33s$ とした。

ここで、格子間隔およびタイムステップの時間間隔の異なる 2 つのケースのシミュレーションを行った。2 つのケースでの格子間隔および時間間隔を Table 1 に示す。

Fig.2 は、数値造波装置から 3.8m の位置に設置した波高計で測定した波高の時系列データを示している。このシミュレーションでは、数値波動水槽は長さ 10m、幅 1m、深さ 2.8m に設定している Fig.2 に示した結果から、不規則波の高周波成分に関しては、格子間隔の小さい CASE2 の方が、短周期成分の波が良く再現されている。

Table 1 Condition of calculation for 2D irregular wave

	CASE1	CASE2
Δx	$L_{1/3}/50$	$L_{1/3}/50$
Δz	$H_{1/3}/20$	$H_{1/3}/20$
Δt	$T_{1/3}/800$	$T_{1/3}/2000$

Fig.2 Time history of simulated wave elevation for irregular waves, which are probed at $x=3.8m$, using the coarser grid (above) and the finer grid (below).

ここで、得られた波高の時系列データに対して FFT を行い、波をエネルギー Spektral で表し、入力した Spektral との比較を行った。その結果を Fig.3 に示す。

このとき、Fig.3 に示した結果は、各波成分に対して与える位相差を異なる乱数列とした 5 ケースのシミュレーションを行い、FFT により得られた Spektral の平均をとったものである。結果を見ると、CASE2 においては、入力した Spektral がよく再現されている。ただし、1.5Hz を越える高周波数成分に対しては、得られた Spektral は入力した Spektral よりもエネルギーが低くなっているが、これは高周波数成分に対しては波長に対する格子サイズが大きくなるため、数値的散逸が生じたためだと考えられる。このことは、前章に示したコンバ

ージェンテストの結果からも言える。一方、CASE1については、全般的に再現性が悪くなっているが、これも格子サイズが大きいことによる数値的散逸によるものであるといえる。

Fig.3 Comparison of target and simulated wave spectra for 2D irregular wave.

3.3 3次元方向波の数値造波シミュレーション

3次元方向波のシミュレーションとして、2方向の規則波の造波シミュレーションを行った。このとき、数値波動水槽の2面に数値造波装置をもうけ、それらに向かい合う2面に数値減衰領域をもうけた。また、2カ所に波高計を設置した。シミュレーションの条件および波高計位置を Table 2 に示す。数値波動水槽の長さ、幅および深さは、それぞれ、18m、12m、2.8m である。また、波の方向 θ は、x 軸（数値波動水槽の長さ方向）とのなす角を表す。

Table 2 Condition of calculation for bi-directional wave.

Cell Size	Δx	$L/60$
	Δy	$L/60$
	Δz	$H/16$
Time Increment	Δt	$T/1000$
Wave	Wave1	Wave2
H	0.1m	0.1m
L	6.0m	6.0m
θ	0.0deg.	45.0deg.
ε	0.0deg.	0.0deg.
Wave Gauge	Probe1	(x=0.0m, y=0.0m)
	Probe2	(x=3.0m, y=3.0m)

Fig.4 に、時間 $t=20s$ での波面のコンター図をしめし、Fig.5 に設置した波高計において得られた波高の時系列データを示す。ただし、Analytic は線形重ね合わせ理論から得られたものである。

Fig.4 Wave contours of bi-directional wave at $t=20s$, which are generated by present (above) and Analytic (below).

Fig.5 Time-history of wave elevation for bi-directional wave at 2 wave probes.

結果を見ると、Fig.4 において数値波動水槽によって造波された2方向波の波面の形状は Analytic とよく位置しており、数値波動水槽において方向波が精度良く造波できていることが分かる。また、2面に数値造波装置を設

けたことにより、数値波動水槽の計算領域全体で方向波が再現されていることが分かる。一方、Fig.5を見ると、数値造波装置からすぐのところに位置する Probe1 では、波高の時系列データは数値波動水槽と Analytic で非常に良く位置しているのに対し、Probe2 では波高の時系列データの形状が、数値波動水槽によるものと Analytic で若干異なっている。これは Analytic では線形波の重ね合わせであるのに対して、数値波動水槽では数値造波装置では線形波のプロファイルを与えるが、数値水槽内を波が伝播していくことで Stokes 波の2次成分以降の高次成分も表現されるため、高次成分が2つの波成分によって増幅され、非線形な波が再現されたためだと考えられる。

3.4 3次元多方向規則波の数値造波シミュレーション

3次元多方向不規則波の数値造波シミュレーションにおいては、3次元方向波の場合と同じく、数値波動水槽の2面に数値造波装置を設け、それぞれに向かい合う2面に数値減衰領域を設けた。また、入力する波のスペクトルには、前述した式(12)の周波数スペクトルと式(13a,b,c)の方向スペクトルを用いた。計算条件を Table 3 に示す。

Table 3 Condition of calculation for 3D random wave

Cell size	Δx	$L_{1/3} / 20$
	Δy	$L_{1/3} / 20$
	Δz	$H_{1/3} / 20$
Time Increment	Δt	$T_{1/3} / 2000$
Wave Spectrum	$H_{1/3}$	0.05m
	$T_{1/3}$	1.33s
	$S_{\max}$	5
	θ_p	0°
Wave Gauge	Probe1	(x=10.0m,y=10.0m)
	Probe2	(x=10.0m,y=9.5m)
	Probe3	(x=10.5m,y=10.5m)
	Probe4	(x=9.5m,y=9.5m)

ここで、入力する波成分は、波のスペクトルを周波数と方向でそれぞれ16分割した、 16×16 成分の波成分として入力した。数値波動水槽のサイズは、長さ30m、幅20m、深さ2.8mとした。ここで、x軸方向およびy方向の格子のサイズは、2方向不規則波で良い結果を得られたケースほど細かい値ではないが、これは計算機の性能を考慮したことによるものである。今回の造波シミュレーションでは、減衰領域も含めたすべての格子数は約150万で、およそ400Mbのメモリを占有する。今回のシ

ミュレーションを行った際の計算時間は、1.2GHzのAthronプロセッサ、512Mbのメモリのマシンで、およそ5.5日間である。しかし、現在の計算機の性能向上は著しく、将来的に最適な格子サイズで3次元の多方向不規則波のシミュレーションを行うことが可能であると見える。

Fig.6 3D snap-shot of wave configuration for multi-directional waves at t=50s, which are generated by NWT.

数値波動水槽によって再現された多方向不規則波の t=50s での波面形状を Fig.6 に示す。Fig.6 を見ると、数値波動水槽において、実海域の波浪での、細かい波が立つ様子が良く再現されている。しかし、数値造波装置から離れた領域では、数値造波装置から近い領域に比べ波が穏やかになってしまっているが、これは、格子サイズが大きいことにより数値的散逸が生じたためだと考えられる。

数値波動水槽によって再現した多方向不規則波の方向スペクトルの解析のために、波高計を4つセットとして、Fig.7のように配置した。波高計の設置位置の細かい値については、Table 3 に示している。

Fig.7 Arrangement of wave gauge array to analyze directional wave spectrum.

Fig.8 に、各波高計で得られた波高の時系列データを示す。これらの波高計の時系列データから得られた、波の方向スペクトルを Fig.9 に示す。波の方向スペクトルの解析には、Hashimoto ら¹⁷⁾ による、拡張最大エントロピー原理法 (the extended maximum entropy principle : EMEP) を用いた。

Fig.8 Time-history of wave-elevation at 4 wave probes

Fig.9 Comparison of target and simulated directional spectrum in energy contour map

Fig.9 を見ると、数値波動水槽によって再現された多方向不規則波のスペクトルは、1つのピークを持ち、入力

したスペクトルの性質をよく表している。また、ピークの方成分の値は、 0° で入力した波の方向スペクトルが再現されている。このことは、数値波動水槽において3次元多方向不規則波の再現が可能であることを示している。また、スペクトル解析によって得られたスペクトルには、ノイズのような小さなピークがいくつかできてしまっていることから、方向スペクトルの解析においても、2次元不規則波におけるFFTと同様に、異なる乱数列で位相差を与えた、いくつかのケースを行い、それらの解析結果を平均したものを全体の解析結果とするべきであるといえる。

Fig.10 Analyzed directional function at peak frequency.

Fig.10 に、入力したスペクトルとシミュレーションによって得られたスペクトルの、周波数のピーク値 f_p での方向スペクトルを示す。Fig.10を見ると、方向のピーク値は入力したスペクトルから少しずれるが、全体的に見れば、非常に良く再現されているといえる。シミュレーションによって得られた方向スペクトルは非対称となっているが、これは2面に造波装置を設けた場合に、ある1面で造波した波が、もう一方の造波装置で反射されてしまうためだと思われる。このことは、Hiraishi ら¹⁸⁾ によって、紹介されている。

3.5 集中波 (Bull's eye wave) の造波シミュレーション

数値波動装置の応用的利用の例として、集中波(Bull's eye wave)の数値造波シミュレーションを行った。集中波は、同じ周期をもち方向の異なる波が焦点に集中することにより、焦点で非常に高い波高が生じる波である。このような波の数値シミュレーションを行うことは、船舶及び海洋構造物のサバイバルコンディションのひとつの再現を行うことに当たり、非常に有用であると考えられる。

本研究で用いている数値波動水槽のように、サーペント型の造波装置を用いている場合には、各パネルにおいて適当な位相差を与えることで、集中波の造波が可能で

ある。各パネルに与える位相差 ε の関係を式(14)に示す。

$$\varepsilon = k \sqrt{(x_i - x_f)^2 + (y_i - y_f)^2} \quad (14)$$

ここで、 x_i と y_i は、造波領域内のセルの x 座標、y 座標を表し、 x_f と y_f は、集中波の焦点の x 座標、y 座標を表す。 k は波の波数を表す。

集中波の数値造波シミュレーションでは、数値波動装置の1面に数値造波装置をもうけ、それに向かい合う面を減衰領域とした。計算条件を Table 4 に示す。また、今回のシミュレーションでの数値水槽のサイズは、長さ 20m、幅 30m、深さ 2.8m とした。

Table 4 Condition of calculation for Bull's Eye wave.

Cell Size	Δx	0.25m
	Δy	0.25m
	Δz	0.005m
	Δt	0.004s
Wave Condition	H	0.01m
	L	3.234m
Wave Gauge	Probe1	(x=2.5m, y=15.0m)
	Probe2	(x=5.0m, y=15.0m)
	Probe3	(x=7.5m, y=15.0m)

Fig.11 に、集中波の発達の様子を示し、Fig.12 に各波高計で得られた波高の時系列データを示す。

Fig.11 を見ると、数値造波装置から円弧状に造波された波が、焦点に向かって集中しながら発達していくよく様子がよく再現されていることが分かる。Fig.12 に示した波高の時系列データを見ると、焦点に設定した $x=7.5m$ の位置での波高は、数値造波領域で設定した波高のおよそ 10 倍もの大きさになっていることが分かる。

Fig.13 に、焦点を通る断面での波形を、OTRC(Texas A & M Univ.)での実験値と比較したものを示す。

Fig.13 を見ると、波高の値は実験値とよく一致しており、数値波動水槽において集中波の焦点で高い波高が生じる様子がよく再現されていることが言える。

Fig.11 Time-sequential of wave configuration for Bull's-Eye wave at $t = 5.0s, 10.0s$ and $15.0s$.

Fig.12 Time-history of wave elevation for Bull's Eye wave at 3 probes.

Fig.13 Comparison of wave profile between experiments and NS-simulation at cross-section of focused point.

しかし、Fig.11 において集中波が発達していく様子を見ると、波はダイヤモンド状の波を含んでいる。これは、y 方向の流出境界に減衰領域を設けなかったために、側壁での波の反射が起こったためだと考えられる。そこで、y 方向の流出境界に減衰領域を設けて、集中数値造波シミュレーションを行った。波が十分に発達した状態での、自由表面の形状の y 方向両側の減衰領域を設けた場合と設けていない場合との比較を Fig.14 に示す。

Fig.14 Comparison of free-surface between with side damping zone (above) and without it (below).

Fig.14 を見ると、y 方向の流出境界に減衰領域を設けたことにより、波の反射がなくなっていることが分かる。

このことは、数値波動水槽がシミュレーションに応じて、非常にフレキシブルに装置を変えられ、様々なシミュレーションを短時間かつ低コストで行えることを示している。

4. 結 言

1. 数値波動水槽において、実海域の多方向不規則波の数値的な再現が可能な波浪環境再現装置の開発を行った。
2. 数値波動水槽の精度検証と格子依存性検証を行い、精度の確認と最適な格子間隔および時間ステップ間隔を得ることができた。
3. 2次元不規則波、3次元方向波および集中波(Bull's eye wave)の造波を行うことで、数値波動水槽が様々な波を造波できることを示すと同時に、数値波動水槽が装置の仕様の変更が容易であることを示した。

謝 辞

本研究の一部は(社)日本造船工業会の造船学術研究推進機構(REIDAS)の援助のもとに行われた。また、多方向不規則波の方向スペクトル解析にあたり、(独)港湾空港技術研究所海洋水理部海象調査研究室の橋本室長にEMEPプログラムをいただくとともに、解析結果の評価に対するアドバイスをいただいた。関係者各位にお礼申し上げる。

参 考 文 献

- 1) Isaacson, M. (1995), "Wave Field in a Laboratory Wave with Partially Reflecting Boundaries", *J. of Offshore and Polar Engineering*, 5, No.1, 1-9.
- 2) Scourup, J. and Schaffer, H.A. (1998), "Simulations with a 3D Active Absorption Method in a Numerical Wave Tank", *Proc. ISOPE '98 Conf.*, Montreal, 248-255.
- 3) Williams, A.N. and Crull, W.W. (1996), "Analysis of Directional Waves in a Laboratory Basin by a Nonsingular Integral Equation Approach", *Proc. ISOPE '96 Conf.*, Los Angeles.
- 4) Li, W. and Williams, A.N. (1998), "Second-order 3D Wavemaker Theory with Side Wall Reflection", *Proc. ISOPE '98 Conf.*, Montreal 235-241.
- 5) Clement, A. (1996), "Coupling of Two Absorbing Boundary Conditions for 2D Time Domain Simulations of Free Surface Gravity Waves", *J. of Comp. Physics*, 126, 139-151.

- 6) Tanizawa, K. and Naito, S. (1998), "An Application of Fully Nonlinear Numerical Wave Tank to the Study on Chaotic Roll Motions" *Proc. ISOPE'98 Conf.*, Montreal, 280-287.
 - 7) Celebi, M.S., Kim, M.H. and Beck, R.F. (1998), "Fully Nonlinear 3D Numerical Wave Tank Simulation", *Journal of Ship Research*, **42**, No.1, 33-45.
 - 8) Ferrant, P. (2001), "Runup on a Cylinder Due to Waves and Current: Potential Flow Solution with Fully Nonlinear Boundary Conditions", *Int. J. Offshore and Polar Engineering*, **11**, 33-41.
 - 9) Park, J.C., Kim, M.H. and H. Miyata (1999), "Fully Non-linear Free-Surface Simulations by a 3D Viscous Numerical Wave Tank", *Int. J. for Numerical Methods in Fluids*, **29**, 685-703.
 - 10) Park, J.C. M.-H. Kim & H. Miyata (2001), "3D Numerical Wave Tank Simulations on the Fully Nonlinear Wave-Current-Body Interactions", *J. Marine Science and Technology*, **6**, 70-82.
 - 11) M.H. Kim, J.M. Niedzwecki, J.M. Roesset, J.C. Park, S.Y. Hong & A. Tavassoli (2001), "Fully Nonlinear Multidirectional Waves By a 3D Numerical Wave Tank", *J. of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, **123**, 124-133.
 - 12) Park, J.C. and Miyata, H. (1994), "Numerical Simulation of the Nonlinear Free-Surface Flow Caused by Breaking Waves", *ASME FED-vol.181*, Free-Surface Turbulence, 155-168, Lake Tahoe.
 - 13) Dean, R.G. and Dalrymple, R.A. (1991), "Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists", *World Scientific Publ.*
 - 14) Goda, Y. (1987), "Standard Spectra and Statistics of Sea Waves Derived by Numerical Simulation", *34th Japanese Conf. on Coastal Engineering*, 131-135.
 - 15) Goda, Y. and Suzuki, Y. (1975), "Computation of Refraction and Diffraction of Sea Waves with Mitsuyasu's Directional Spectrum", *Technical Note of Port and Harbor Research Institute*, No.230, 1-45.
 - 16) Park, J.C., Zhu, M. and Miyata, H. (1993), "On the Accuracy of Numerical Wave Making Techniques", *J. Soc. Naval Architecture of Japan*, **173**, 35-44.
 - 17) Hashimoto, N., Nagai, T. and Asai, T. (1994), "Extension of Maximum Entropy Principle Method (MEP) for Estimating Directional Wave Spectrum", *24th Int. Conf. Coastal Engineering*, **1**, 232-246.
 - 18) Hiraishi, T., Hirayama, K. and Maruyama, H. (1998), "Applicability of Dual Face Serpent-type Wave Generator", *Report of the Port and Harbor Research Institute (PHRI), Japan*, **37**, No.4, 3-35.
-