

数値波動水槽による多方向不規則波の 3次元計算の検証と課題

NUMERICAL SIMULATIONS FOR MULTI-DIRECTIONAL WAVES AND TASKS USING 3D NUMERICAL WAVE TANK

榊山 勉¹・米山 望²

Tsutomu SAKAKIYAMA and Nozomu YONEYAMA

¹正会員 博(工) 電力中央研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

²正会員 博(工) 京都大学准教授 防災研究所 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

The fully nonlinear numerical simulation model was verified for 3D multi-directional waves. Inflow boundary conditions on a horizontal component of velocity of irregular wave were studied on superposition of linear wave components and mass transport. Propagation of unidirectional irregular waves in the uniform depth, 3D monochromatic wave refraction and diffraction due to a spherical shoal, an obliquely incident irregular wave, and multi-directional wave fields were simulated and compared with analytical solutions or experimental results. Effects of space sizes and time increment on simulated results were shown for the unidirectional irregular wave propagation. All the simulated results in the present work are not completely satisfied. The tasks to be solved for the next step are pointed about the inflow boundary condition and the space sizes.

Key Words: Numerical wave tank, multidirectional waves, VOF method

1. 結論

海岸, 港湾構造物の耐波設計に数値計算モデルが適用されている。著者らはこれまで断面2次元現象を対象として規則波の計算を適用してきた^{1), 2)}。また, 津波の遡上計算に対しては3次元モデルを適用した^{3), 4)}。今後は不規則波を対象とした実用計算が必要となってくる。また, 計算対象も断面2次元現象から3次元の計算へと展開する必要がある。これまで3次元波動場の数値計算は, 川崎⁵⁾, Kim et al.⁶⁾の計算例があるが, 多方向不規則波の計算を検証した例はない。そこで本研究では, 3次元の多方向不規則波を対象とした数値波動水槽の開発を目的にして, 先ず不規則波の入力条件の作成方法について検討し, 断面2次元不規則波の伝播計算, 3次元規則波計算, 斜め入射一方向波不規則波ならびに多方向不規則波の3次元計算の各段階で計算結果を検証し, 現状の計算方法の課題を抽出する。

2. 数値計算モデル

(1) 入射境界における水平流速の与え方

数値計算モデルは, 米山・松山⁴⁾の津波の遡上計算のモデルを踏襲している。津波を対象とする場合には入射境界で水位の時系列を与え内部で水平流速

を計算していたが, 鉛直方向に流速分布が変化する浅海波の場合には水平流速を与える必要がある。水位と水平流速の両者を与えると条件過多になるため, CADMAS-SURF⁷⁾と同じ以下の方法で水平流速分布を与える。造波境界で設定水位 $\eta_0(t)$, 設定流速分布 $U_0(z, t)$ の両者を用いて造波させようとする造波直後に想定している水位と計算上の水位 $\eta_s(t)$ にずれが発生するため, 造波位置での流入出量を以下のようにスケールリングして一致させる⁷⁾。

$$U(z, t) = U_0(z^*, t) \left(\frac{\eta_0 + h}{\eta_s + h} \right), \quad z^* = \frac{\eta_0 + h}{\eta_s + h} (z + h) - h \quad (1)$$

ここに, $U(z, t)$ は造波用流速の水平成分, h は造波位置での水深, z は鉛直座標, t は時間である。

(2) 不規則波の入力条件の作成

不規則波を対象とした入射境界の設定のうち, 多方向不規則波の水位 $\eta(x, y, t)$ の計算方法は, シングルサムメーション法⁸⁾にしたがって以下のように線形波の重ね合わせにより与える。

$$\eta(x, y, t) = \sum_{m=1}^M a_m \cos(k_m x \cos \theta_m + k_m y \sin \theta_m - \sigma_m t + 2\pi \varepsilon_m) \quad (2)$$

$$\sigma_m^2 = g k_m \tanh k_m h \quad (3)$$

ここに, (x, y) は平面座標, a_m は成分波の振幅, θ_m は波向き, k_m は波数, σ_m は角周波数, ε_m は初期位相

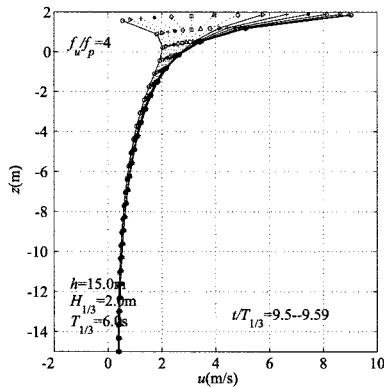
を表し、添え字 m は成分波の番号を示す。初期位相は0から 2π までの一様乱数で与える。シングルサマーション法では1周波数成分について1つの波向を方向分布関数に基づいてランダムに与える。

断面2次元や3次元の不規則波の計算では、水平流速成分の与え方に2つの問題がある。1つは式(2)で求めた水位変動に対応して水平流速の鉛直分布を単純な線形波の重ね合わせで与えると微小振幅波理論を保存波の碎波限界をはるかに超えた条件にまで適用してしまうため、波峰付近の水平流速が過大になることである。他の1つは質量輸送による計算領域内の水位上昇が発生することである。

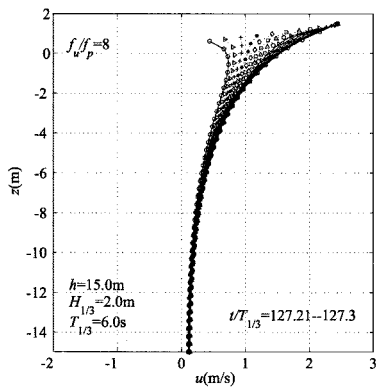
これらについて以下のように対処した。水平流速成分は、水位変動が静水深 h より低い場合には微小振幅は理論が適用できるので波数 k を静水深 h で求めた応答関数式(3)を適用する。不規則波の水位が静水深 h より高い場合には、全水深 $h' = h + \eta$ を静水深として成分波の波数 k' を求めて式(4)と(5)で示す応答関数を適用し水平流速成分を重ね合わせる。

$$u_m(x, y, z, t) = \sigma_m \frac{\cosh k_m(h+z)}{\sinh k_m h} \eta_m \quad -h \leq z \leq 0 \quad (3)$$

$$u_m(x, y, z', t) = \sigma_m \frac{\cosh k'_m(h'+z')}{\sinh k'_m h'} \eta_m \quad -(h+\eta) \leq z' \leq 0 \quad (4)$$



(a) 単純な応答関数による重ね合わせ



(b) 全水深による波数を用いた応答関数による重ね合わせ

図-1 応答関数の違いによる水平流速成分の鉛直分布の比較

$$\sigma_m^2 = gk'_m \tanh k'_m h' = gk'_m \tanh k'_m (h+\eta) \quad (5)$$

ここに、 $z' = z - \eta$ である。

全水深を静水深にして応答関数を適用する方法は、藤原⁹⁾による静水深の流速を線形的に波の峰まで鉛直方向に引き延ばした Wheeler の方法¹⁰⁾と大差はないが、計算上微小振幅波理論の適用が破綻しないので高周波成分の上限を任意に設定できる。

水平流速の鉛直分布について単純な線形重ね合わせによる方法と今回提案した方法により求めた結果の比較を図-1に示す。波浪条件は有義波高 $H_{1/3}=2.0\text{m}$ 、有義波周期 $T_{1/3}=6.0\text{s}$ 、水深 $h=15\text{m}$ である。図-1(a)に示す単純な重ね合わせによる方法では高周波数成分の上限としてピーク周波数 f_p の4倍までとしても最大流速が約9m/sに達する。一方、図-1(b)に示す式(2)の方法で上限 $8f_p$ とした最大流速は約2.5m/sである。この値は、波高3.5mと周期6sから有限振幅波理論で求めた波の峰での水平流速の最大値2.35m/sと概ね一致している。

3. 計算結果の検証

断面2次元の不規則波の計算体系を図-2に示す。計算領域は全体で8波長とし、そのうち3波長の領域に減衰帯を設け、進行波の比較を行った。計算条件は、有義波高 $H_{1/3}=1.0\text{m}$ 、有義波周期 $T_{1/3}=6.0\text{s}$ 、水深 $h=10\text{m}$ (有義波周期による波長 $L_{1/3}=48.57\text{m}$)である。計算時間は600s(約100波)とした。

線形波の重ね合わせにより水平流速を与えると質量輸送により計算領域内の水位が上昇する。図-3は不規則波による計算領域内に流入した水量の時間変化を示す。 $t/T_{1/3}=100$ での平均水位上昇量は0.15mである。図-4は、図-3の移動平均と図-3から移動平均値を差し引いた波動成分の変化を示したものである。移動平均の時間間隔は有義波周期6.0sとした。質量輸送量は時間により変動する。所¹¹⁾は計算時間内で一定の補正量を与えたが、図-4に示すように変動があるため、移動平均値の時間変化率を算出し、これを水深平均し質量輸送補正のための断面平均速度とした。この値は図-5に示すように最大でも0.03m/s未満で水粒子速度に比べて2オーダー小さい値であり、1次の波動運動量には影響しないものと思われる。当然のことであるが、平均水位上昇といった2次の波動運動量には影響する。

図-6と図-7に計算領域の $x/L_{1/3}=5$ における水位変動の比較を示す。計算時間内全体にわたって概ね一定に平均水位が維持されている。藤原⁹⁾はストークスドリフトの解の重ね合わせにより質量輸送量を

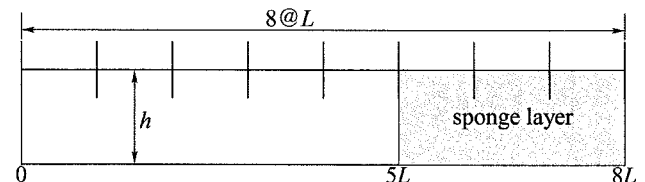


図-2 不規則波の計算体系

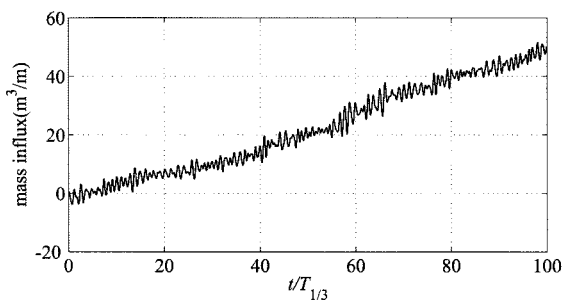


図-3 計算体系内への不規則波の質量輸送量

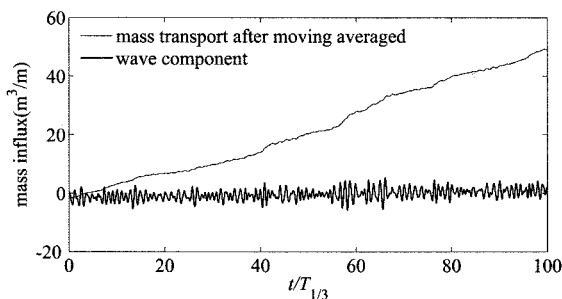


図-4 質量輸送量の移動平均と時間変動成分

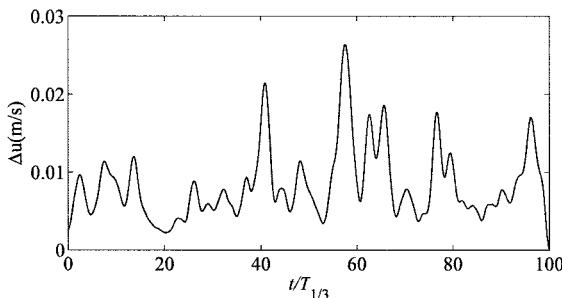


図-5 質量輸送補正用の断面平均流速の時間変化

補正しているが、Wheeler の方法を適用しているため流入量と補正量の収支は一致していない。

規則波の計算では波長，水位が与えられると，計算格子間隔の目安が提案されている⁷⁾。不規則波の計算ではピーク周波数より高い周波数帯の成分波の伝播計算を対象とするため，計算格子間隔の設定に具体的な目安がない。そこで，規則波の目安を基準にして，水平格子サイズと時間間隔を変えた計算結果を比較し，格子サイズの計算結果への影響を調べた。規則波の目安と同じ格子サイズである $\Delta x = L_{1/3}/80$ ， $\Delta t = T_{1/3}/400$ を基準に， $\Delta x/4$ ， $\Delta t/3$ まで変化させて計算した。 $x/L_{1/3}=5$ における水位変動の比較を図-8 に示す。図中の実線は線形波の重ね合わせの解である。 $\Delta x/4 = L_{1/3}/320$ としても著しい改善はみられない。 $\Delta t/4 = T_{1/3}/1200$ とした結果は Δt の結果との差はほとんどなく，時間ステップの影響は小さい。 $\Delta x/4 = L_{1/3}/320$ は 2 倍周波数成分波 3.0s の波長 14.0m の 1/92，3 倍周波数成分波 2.0s の波長 6.23m の 1/41 に相当する。3 倍周波数成分波には充分な解像度ではないがさらに格子サイズを小さくすることは実用的でないと考えられる。水理実験のように対象地点の波高を所定値になるよう入射条件を変更することが現実的な対応と考えられる。鉛直方向の

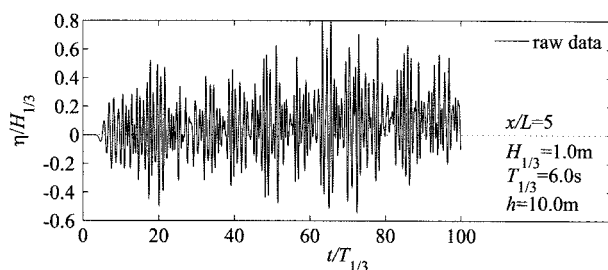


図-6 質量輸送補正前の水位変動の時系列

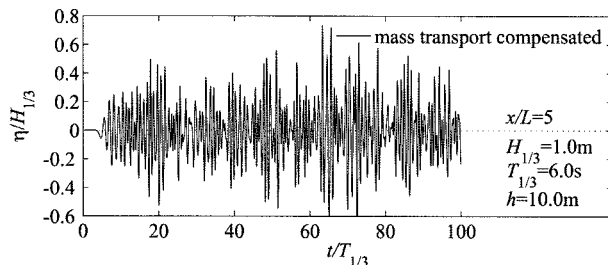


図-7 質量輸送補正後の水位変動の時系列

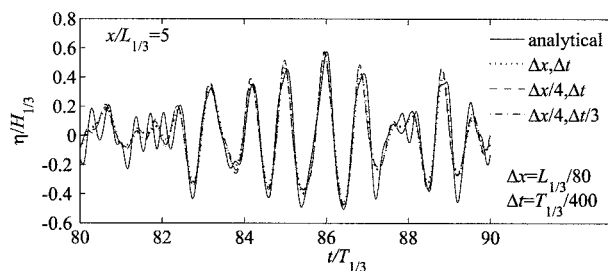


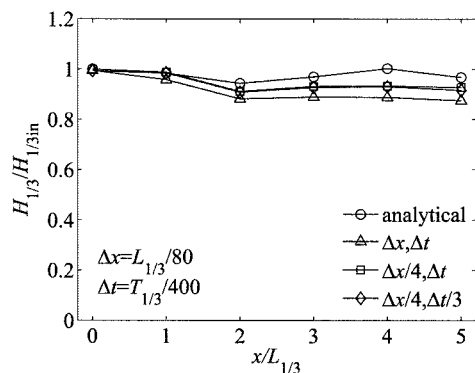
図-8 水平格子サイズ Δx ，時間ステップ Δt の水位変動の計算結果への影響

格子サイズは $h/25$ の一定とし，この影響は今回検討していない。

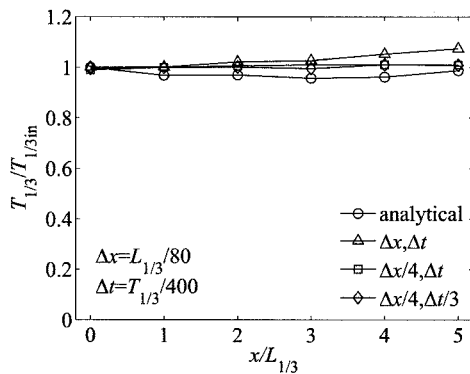
有義波高，有義波周期，波の数の変化を図-9 に示した。図-9(a)の凡例 analytical は線形解の重ね合わせの水位変動の波別解析の結果であり，この解にも若干の空間的な変動が認められる。基準とした Δ の計算結果の有義波高が最も小さい。波の数が減少しているのは波の伝播に従い，入射境界より遠くなると有効な波の数が減少する影響も含まれている。有義波周期は若干増加している。図-9(a)により計算格子を細かくすると有義波高の低下が抑えられる効果が確認できた。

3 次元計算では先ず伊藤・谷本¹³⁾による球面浅瀬による規則波の浅水，屈折変形の実験結果との比較を行った。計算領域は現象の対称性を考慮して図-10 に示すように半分の領域とした。入射境界から球面浅瀬までの距離ならびに背後の領域は実験条件と一致させ，その背後に減衰帯を 3 波長分設定した。

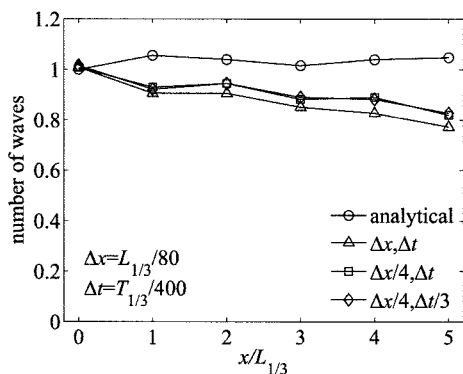
図-11(a)に波の進行方向の波高分布の計算結果と実験結果との比較を示す。計算結果のほうが球面浅瀬背後での波高増加が緩やかな傾向を示している。図-11(b)は $x/L=7$ での横断方向の波高分布の比較を示したものである。計算結果は $y/L=3$ で対称性を考慮して折り返して表示した。概ね良好に再現できているものと判断できる。



(a) 有義波高 $H_{1/3}$ の変化 ($H_{1/3in}=0.96\text{m}$)



(b) 有義波周期 $T_{1/3}$ の変化 ($T_{1/3in}=5.51\text{s}$)



(c) 波数の変化 ($n_{in}=128$)

図-9 格子サイズと時間間隔による有義波高 $H_{1/3}$, 有義波周期 $T_{1/3}$, 波の数の変化

不規則波の3次元計算では、直交格子の計算領域内を任意の方向に波が伝播することを確認する必要がある。この基本的な現象の確認のために、図-12に示すように計算領域に斜めの水路を設定し、一方向不規則波の斜め入射の計算を行った。計算格子間隔は波の進行方向に格子の対角線長が $L_{1/3}/80$ になるように $\Delta x = \Delta y = L_{1/3}/(80\sqrt{2})$ とした。 $x/L_{1/3} > 3$ の領域に減衰帯を設定した。 $y=0$ 上の $0 < x/L_{1/3} < 1$ の範囲に入射境界を設定した。図-12は $t/T_{1/3}=20$ における水位の平面分布のコンターを示したものである。波峰線は斜めの水路の直角方向に向いており設定の45度方向に波が伝播していることがわかるが、水路横断方向に水位は完全には一様になっていない。

水路幅方向の水位の空間波形を図-13に示す。図

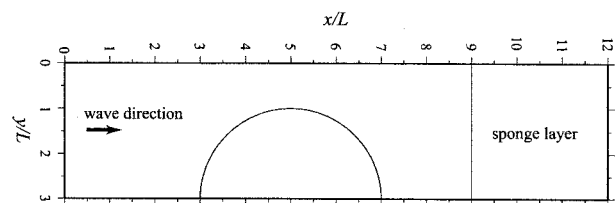
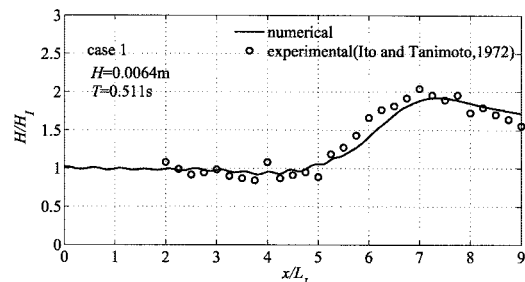
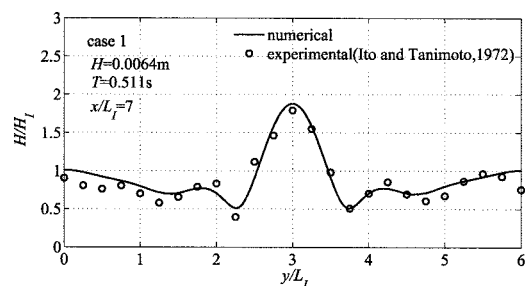


図-10 球面浅瀬による規則波の屈折と浅水変形計算



(a) $y/L_1=3$ 上の波高変化



(b) $x/L_1=7$ の波高変化

図-11 球面浅瀬による規則波の屈折と浅水変形の波高分布の計算結果と実験結果との比較

中の凡例の $i=1,3,4$ などとは $y=0$ の線上における x 方向の格子番号で、横軸の s は水路に沿って定義した座標である。計算結果はほぼ一致し、平面分布の波峰線で見ると空間波形が一致しており、斜め入射波の伝播が再現できていることが確認された。しかし線形解を重ね合わせた水面波形と比較すると、全体的な波形の位相は一致するものの、断面2次元計算結果と同様に高周波成分の再現は良くない。

多方向不規則波の計算では、図-14に示す幅5波

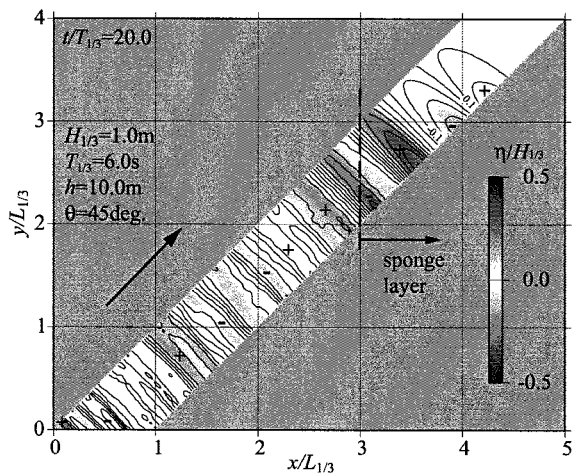


図-12 斜め入射一方向不規則波の水位分布

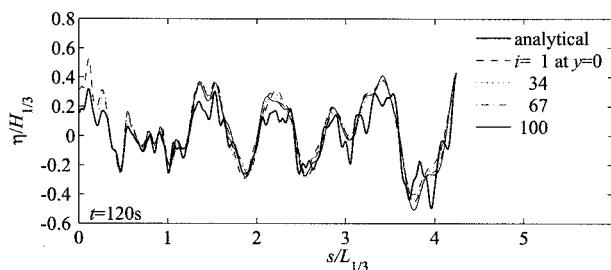


図-13 斜め入射一方向不規則波の空間波形の比較

長×長さ4波長を計算領域とした。波浪条件は有義波高 $H_{1/3}=1.0\text{m}$ ，有義波周期 $T_{1/3}=6.0\text{s}$ ，水深 $h=10.0\text{m}$ ，方向集中度の最大値 $S_{\max}=10$ ，主波向 90 度の多方向不規則波である。減衰帯幅は $y/L_{1/3}>2$ の範囲で2波長の領域に設定した。また，側方は不透過境界とした。星型波高計アレイを21カ所に設定し水位時系列から方向スペクトル，周波数スペクトルを求め，設定値と比較するとともに波動場の統計量の空間的な変化を調べた。図-14で明らかなように $y/L_{1/3}>3.5$ の範囲では水位はほとんど0になっており，2波長の幅の減衰帯でも反射波が発生していないことが確認できる。また， $x/L_{1/3}=2.5$ に関して左右対称にはなっていない。

図-15に代表点の方向スペクトルを，図-16に方向分布関数を示す。図-15(a)，(b)と図-16(a)，

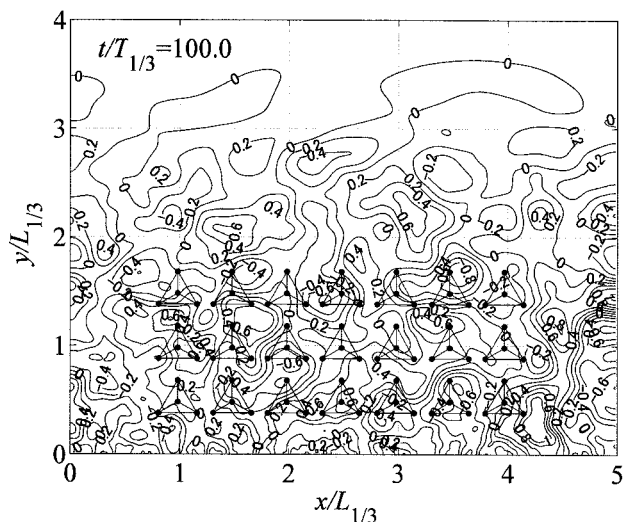


図-14 多方向不規則波の水位分布の計算結果 ($t/T_{1/3}=100.0$)と星型アレイの配置

(b)は $(x/L_{1/3}, y/L_{1/3})=(2.5, 1.0)$ と $(2.5, 1.5)$ を中心とする星型波高計アレイによる数値計算結果の水位変動，(c)は式(2)にしたがって $(x/L_{1/3}, y/L_{1/3})=(2.5, 1.5)$ を中心とする線形波の重ね合わせの不規則波の水位変動を対象に解析した方向スペクトルであり，目標とする方向スペクトルである。方向スペクトル解析には600sの波のデータを使用した。図-15の図中の波線

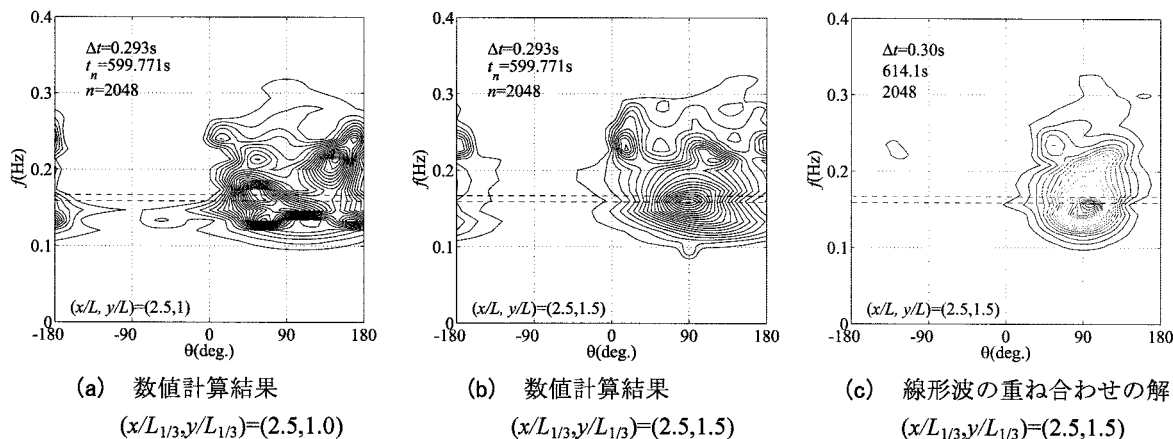


図-15 方向スペクトルの解析結果

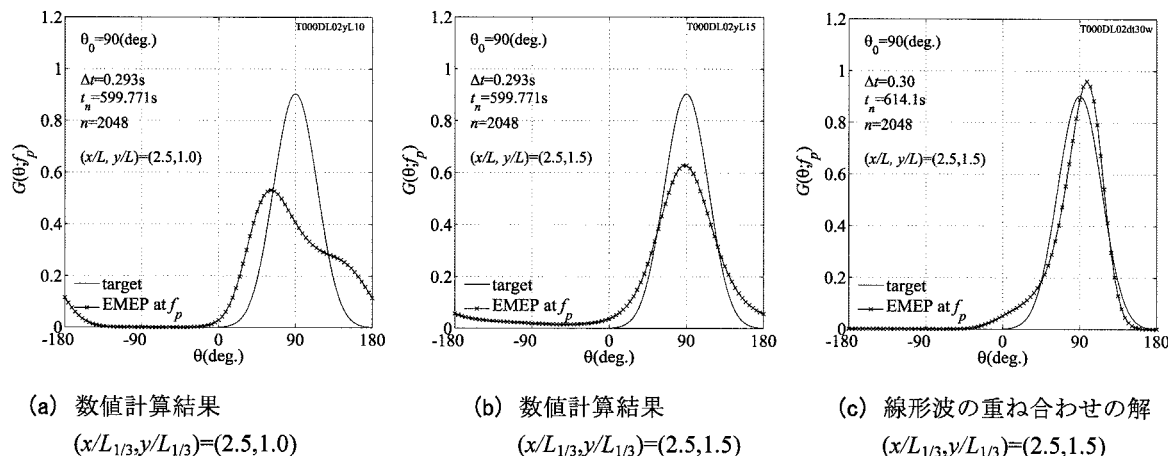
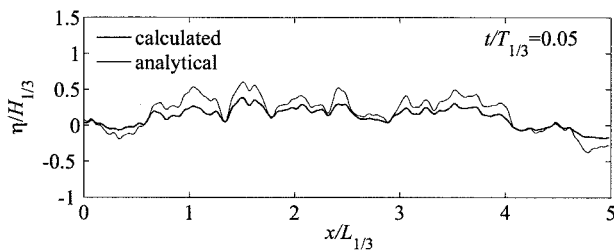
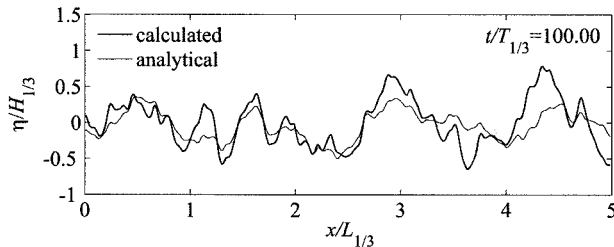


図-16 方向分布関数の解析結果



(a) $t/T_{1/3}=0.05$



(b) $t/T_{1/3}=100.00$

図-17 入射境界での水位の設定値と計算結果との比較

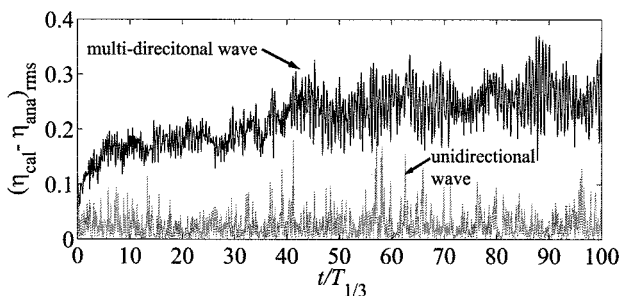


図-18 入射境界の水位の設定値と計算値の自乗平均誤差の時間変化

はピーク周波数 $f_p=0.17\text{Hz}$ と方向スペクトルの最大値の周波数を示す。これらはわずかにずれている。

図-15(c)の目標値に比べて数値計算結果のコンター図は主波向 90 度とピーク周波数 f_p を中心に分布が広く、複数のピークが見られ、方向分散性が高くなった。一方、図面は省略するが総エネルギーは過大になった。これらは側壁の不透過境界条件の設定による多重反射波の影響と考えられる。

図-17 に入射境界における水位の空間分布を示す。上述のように流量を設定値と一致させるために水位を補正する。断面 2 次元計算の場合にはこの影響はほとんど現れないが、3 次元計算では境界に沿った方向に設定値からのずれが変動する。

図-18 に設定値と計算値の自乗平均誤差の時間変化を示す。一方向不規則波の場合には変動はあるものの増加することはないが、多方向不規則波の場合には変動を繰り返しながら増加する。この設定値からのずれが方向スペクトル解析の結果の目標値と解析結果の差にも現れているものと考えられる。

4. 結論

入射境界で水位と水平流速の 2 つの物理量を設定

するため、数値計算上条件過多になり入射境界で水位の計算結果と設定値に差が生じる。流量を一致させた水位に補正する方法では 3 次元計算の入射境界の幅方向に設定値との差が変動するため、計算精度が低下することが明らかになった。多方向不規則波の計算では 100 周期の計算に約 2 ヶ月要した。3 次元の波浪場の計算には膨大な時間がかかるために上記の課題を今後検討していくためには高速化が不可欠である。

謝辞：方向スペクトルの計算には橋本典明九州大学大学院教授からいただいた EMEP のプログラムの入力部分を修正して使用しました。また、計算には(株)電力計算センターの田口(富)さん、大西さん、須賀さんに協力していただきました。全水深を使った波数の応答関数の適用は当所木原君との議論から考えられたものです。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 柳山 勉・鈴木一宏, 数値波動水路による放水口ケーソンマウンド内の底質の吸い出し評価, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp.566-570, 1998.
- 2) 柳山 勉, 圧力抜き開口部を有する護岸の遮水シート作用波圧に関する研究, 電力中央研究所報告, 研究報告: N05062, 22p. 2006.
- 3) 米山 望・松山昌史, 1993 年北海道南西沖地震津波における局所遡上の数値解析, 電力中央研究所報告, 研究報告, U01002, 17p. 2001.
- 4) 米山 望・松山昌史・田中寛好, 1993 年北海道南西沖地震津波における局所遡上の数値解析, 土木学会論文集, No.705/II-59, pp.139-150, 2002.
- 5) 川崎浩司, 潜水構造物による碎波変形と再生過程に関する基礎的研究, 名古屋大学博士学位論文, 86p. 1998.
- 6) Kim, M.H., J.C. Park, and A. Tavassoli, Fully nonlinear multi-directional wave simulations by 3D numerical wave tanks, *Proceedings of the Fourth International Conference on Hydrodynamic*, Vol.1, pp.119-204, 1999.
- 7) (財)沿岸開発技術研究センター, 数値波動水路の研究・開発, 沿岸開発技術研究センターライブラリー, No.12, 296p. 2001.
- 8) 石井敏雅, 緩勾配不規則波動方程式を用いた平面波浪場の解析手法に関する研究, 東京大学学位論文, 189p. 1995
- 9) 藤原隆一, 数値波動水路内で線形理論を用いて発生させた不規則波の特性および適用限界に関する一考察, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp.41-45, 2005.
- 10) Wheeler, J.D. 1970. Method of calculating forces produced by irregular waves, *Journal of Petroleum Technology*, pp. 359-367, March 1970.
- 11) 所 良晃, 不規則波の越波現象における数値波動水路の適用性, 電力土木, 315 号, pp.101-105, 2005.
- 12) 伊藤善行・谷本勝利, 波向交差領域での波の屈折—数値波動解析法の応用(2)—, 第 19 回海岸工学講演会論文集, pp.325-329, 1972.
- 13) 橋本典明・永井紀彦・浅井 正・菅原一晃, 海洋波の方向スペクトルの推定における最大エントロピー原理(MEP)の拡張, 港湾技術研究所報告 第 32 巻第 1 号, pp.3-25, 1993.