

## 波・浮体の強非線形相互作用に対する数値計算

九州大学・応用力学研究所 胡 長洪 (Changhong Hu)  
Research Institute for Applied Mechanics,  
Kyushu University

### 1. はじめに

大振幅波浪中で動揺する浮体あるいは前進しながら動揺する船舶には、甲板上への海水打ち込みやそれによる波浪衝撃力が働き、上部構造物や浮体そのものが破壊されたり、その結果浮体が転覆・沈没に至ることさえある。このような強非線形現象は、従来の理論計算では到底予測できないが、本研究の目的は最新の数値流体力学 (Computational Fluid Dynamics) の手法を用いてこのような波と浮体構造物との強非線形相互干渉問題に対する定量的な推定法の確立である。本稿では、この数値計算法の特徴、斬新さについて説明するとともに、現在行っている数値計算と水槽実験との比較を通じた数値計算法の妥当性の検証について論じる。

### 2. 数値計算法概要

本数値計算法の主な特徴は①ベースとなる差分スキームに CIP 法[1]を応用、②直交格子の採用である。Fig.1 に示すように、計算の対象となる物質は液体 (水)、気体 (空気) 及び固体 (浮体) であり、それぞれ密度関数  $\phi_1$ 、 $\phi_2$  と  $\phi_3$  で定義する。ただし、 $\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 = 1$ 。すべての物質を連続体と仮定して CCUP 法で提案された統一解法でも対応できるが、本計算法では、固体の計算について新しい開発された方法で行う。この方法では、固体を剛体と見なされ、固体境界をラグランジュ的に追跡する。二次元の問題では固体境界を Line-segments で近似することが可能だが[2]、三次元の問題に拡張しやすいため、最近の研究では、新しいアイデアとして物体表面に仮想粒子を均一に分布させ、これらの粒子を追跡することで物体の  $\phi_3$  を決める方法を考案した[3]。この方法では物体表面での速度境界条件は各粒子の位置で満足させることでより正確に与えるメリットがある。

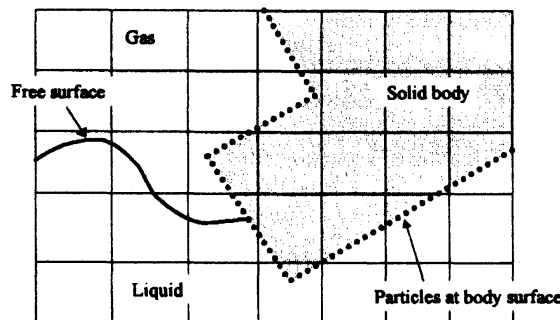


Fig. 1. Concept of multi-phase computation using Cartesian grid.

流体について圧縮性・非圧縮性共に扱えるが、ここで水と空気は非圧縮性流体と仮定する。これは、本研究対象となる問題について圧縮性の影響が重要な場合は短期間・局部的に限るのがほとんどで、その影響を圧縮性コードで計算するより非圧縮性コードに適当な局部的修正モデルを導入して計算したほうが合理的と考えられる。支配方程式は

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + F_i \quad (2)$$

になり、ただし、 $u_i$  は  $i$ -th 方向の流速成分 ( $i=3$  は鉛直方向)、 $p$  は圧力、 $\rho$  は密度、 $\sigma_{ij}$  は総応力である。現段階では乱流モデルは導入せず、さらに自由界面張力の影響は小さいと考えて無視する。圧力については CCUP 法により以下の Poisson 式で計算する。

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{1}{\rho} \frac{\partial p^{n+1}}{\partial x_i} \right) = \frac{1}{\Delta t} \frac{\partial u_i^n}{\partial x_i} \quad (3)$$

自由表面（水・空気の界面）を追跡するため、水に関する密度関数  $\phi$  を以下の方程式を CIP 法よって計算する。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u_i \frac{\partial \phi}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

ただし、計算された界面のシャープさを保持するために適切な処理が施している[4][5]。密度関数の計算手順はまずラグランジュ的な方法で固体の  $\phi_3$  を計算する。次に Eq.(4) によって  $\phi$  を計算する。最後に、空気に関して  $\phi_2 = 1 - \phi - \phi_3$  で求める。

### 3. 数値計算法の妥当性の検証

#### 3.1 2次元問題

Fig.2 に 2次元問題の実験に対応した数値計算の概略図を示している。実験に使った模型は、長さ 0.5m、喫水 0.1m、乾舷 0.023m の箱型浮体であり、上部構造物を想定した鉛直壁が取り付けられている。このような形状は、波が甲板上へ容易に打ち込み、鉛直壁によって反射・砕波する状況下での浮体動揺の計測を意図したものである。

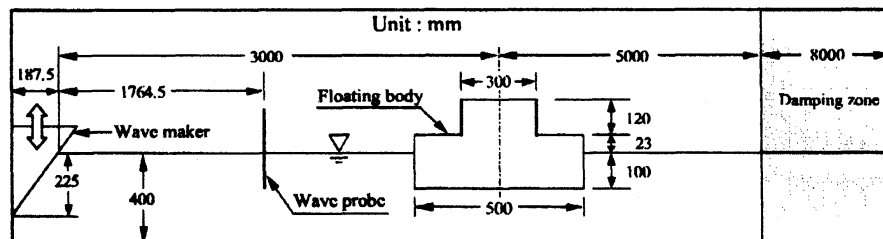


Fig.2 Schematic view of 2-D wave channel used in numerical computations

実験は九州大学応用力学研究所の造波水路（長さ 10 m、幅 0.3 m、水深 0.4 m）で行った。この造

波水路には、Fig.2 に示すように、三角形断面のプランジャー型造波機を備えており、反対側の端には波吸収装置（計算では Damping zone）を備えている。したがって、造波機と浮体の間では波の反射が行っているが、浮体を透過した波は殆ど反射しないと考えてよい。

計測は、造波機の変位、浮体の動揺（heave、roll、sway）、ならびに造波機と浮体の間に設置された波高計位置（Fig.2 参照）での水面変位である。

浮体の動揺のうち、heave、roll は自由としているが、sway は固定或いはばね定数  $7.6 \text{ N/m}^2$  のばねで比較的ゆるく拘束されている。

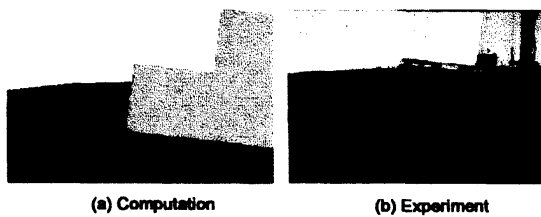


Fig.3 Snapshots at  $t/T_w = 17.3$  (at  $T_w = 1.0 \text{ sec}$ )

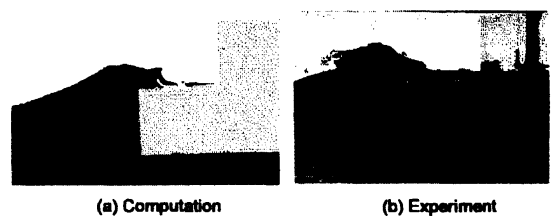


Fig.5 Snapshots at  $t/T_w = 17.3$  (at  $T_w = 0.7 \text{ sec}$ )

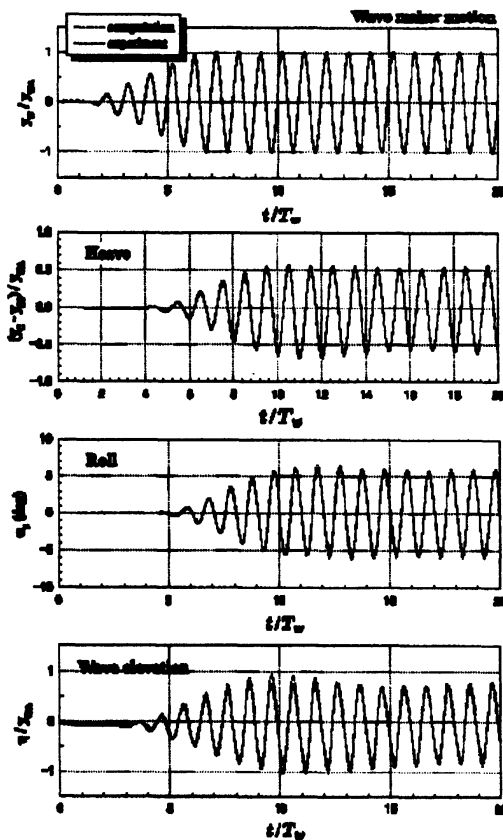


Fig.4 Time histories of body motions and wave elevation at  $T_w = 1.0 \text{ sec}$ , for sway fixed

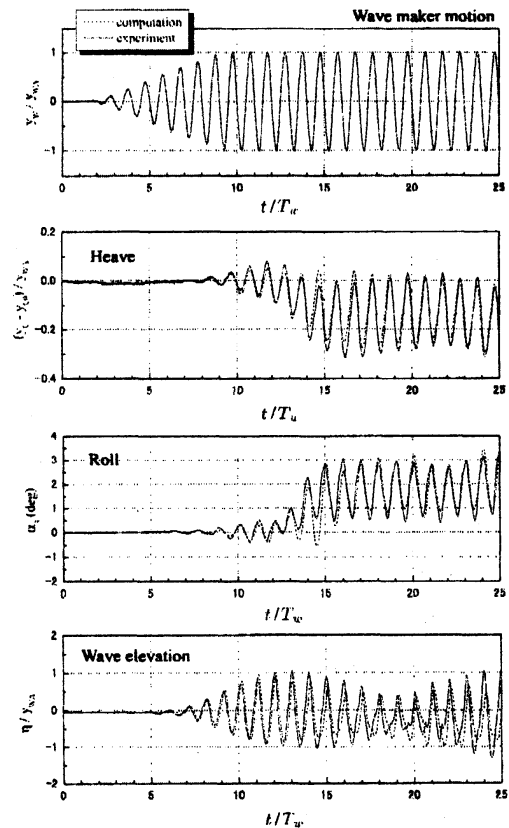


Fig.6 Time histories of body motions and wave elevation at  $T_w = 0.7 \text{ sec}$ , for sway fixed

2次元の実験に対応する数値計算は、 $x$ 軸方向、 $y$ 軸方向それぞれに  $525 \times 183 (=96,075)$  個のグリッドを用いて行った。格子は直交格子ではあるが、浮体と造波機の近傍が密となるような不等間隔であり、このときの最小グリッド幅は  $\Delta x = \Delta y = 3\text{mm}$  であった。また時刻幅は、 $\Delta t/T_w = 10^{-3}$  (ただし  $T_w$  は入射波すなわち造波機の周期) とした。

実験は数多くの場合について行ったが、本稿では計算法の妥当性を検証する上で代表的な sway を完全に固定される2つの場合について示す。

数値計算では、入力である造波機の変位として実験における計測値を与え、それ以外はすべて計算によって求めている。造波機の振幅は以下に示す2つの例ではすべて  $25\text{mm}$  であり、周期は、 $T_w = 1.0\text{sec}$  と  $T_w = 0.7\text{sec}$  である。

周期が  $T_w = 1.0\text{sec}$  での実験と計算の結果は、 $t/T_w = 17.3$  でのスナップ画像を Fig.3 に、時刻歴を Fig.4 に示している。

これからわかるように、 $T_w = 1.0\text{sec}$  の場合には顕著な波の打ち込みは見られず、浮体の動揺は規則的であり、線形理論でも十分推定可能な現象である。本数値計算法による計算結果も実験結果とよく一致していることがわかる。

これに対し周期を  $T_w = 0.7\text{sec}$  とした場合には、Fig.5 および Fig.6 に示しているように、非線形な現象が浮体動揺だけでなく自由表面の水位変動にも現れている。具体的には、heave の平均値は大きく負の値 (沈下) となっており roll の平均値は正の値 (波上側に傾斜) となっている。これらは明らかに甲板上に留まっている打ち込み水の影響である。このような強非線形な現象に対しても、本数値計算法による計算結果は計測値と全体的に良く一致していると言えよう。

### 3.2 3次元問題

3次元問題の実験は、九州大学応用力学研究所の深海機器力学実験水槽 (長さ  $65\text{m}$ 、幅  $5\text{m}$ 、水深  $7\text{m}$ ) において実施した。供試模型は、その形状が次式で表される modified Wigley モデルである。

$$\eta = (1 - \zeta^2)(1 - \xi^2)(1 + a_2 \xi^2 + a_4 \xi^4) + \zeta^2(1 - \zeta^4)(1 - \xi^2)^4 \quad (5)$$

ただし  $\xi = 2x/L$ 、 $\eta = 2y/B$ 、 $\zeta = z/d$  であり、 $a_2$ 、 $a_4$  は肥大度に関するパラメータであるが、本実験で用いた模型では  $a_2 = 0.6$ 、 $a_4 = 1.0$  としている。

また  $L$ 、 $B$ 、 $d$  はそれぞれ船の長さ、幅、標準喫水を表すが、これらの値は、他の関連するデータと一緒に Table 1 に示している。

実験水槽の曳航台車に設置された modified Wigley モデルの写真を Fig.7 に示している。この写真からわかるように、船首甲板上に鉛直壁を取り付けているが、これは打ち込み水 (青波) を反射させるとともに、打ち込み水による圧力変動を計測するためである。圧力は Fig.8 に示すように、船首の水平甲板上に4箇所、鉛直壁面上に2箇所を計測した。

実験は、正面向い波中で行ったが、船の動揺を完全に固定した場合と自由にした場合の両方について行った。Fig.9 には船の動揺を自由にした場合の概念図を示している。

Table 1 Principal dimensions of the ship model

Length: $L$ (m)	2.500
Breadth: $B$ (m)	0.500
Standard draft: $d$ (m)	0.175
Draft at experiment: $d_E$ (m)	0.205
Freeboard at experiment: $f$ (m)	0.045
Displacement volume: $\nabla$ (m <sup>3</sup> )	0.16877
Gyrational Radius in pitch: $\kappa_y/L$	0.244

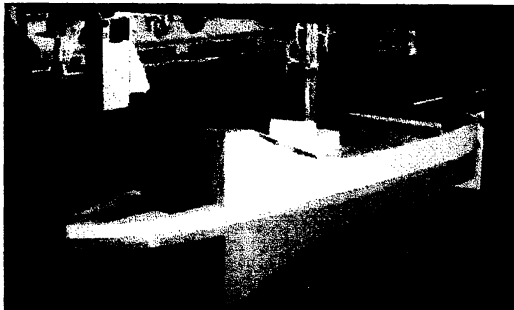


Fig.7 Modified Wigley model set in the towing tank (for motion-free condition)

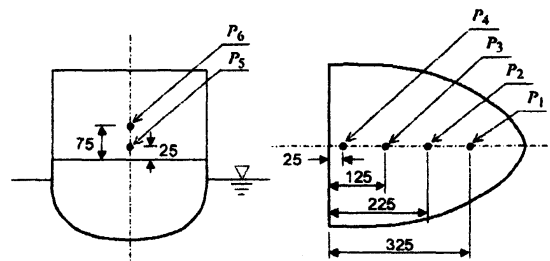


Fig.8 Locations of pressure measurement

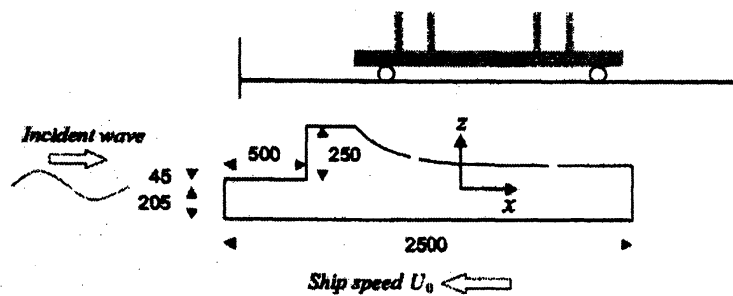


Fig.9 Setup for motion-free experiment

実験計測では、圧力計による圧力の計測だけではなく、船首付近における水波の挙動を高速ビデオカメラで撮影するとともに、船の動揺を固定した場合には、検力計によって模型船全体に働く surge、heave、pitch 方向の流体力を、また動揺を自由にした場合には、ポテンシオメータによって surge、heave、pitch の運動を計測した。ただし Fig.9 に示しているように、surge は非常に強いばね（ばね定数 2、800 N/m）で拘束したので、本論文における比較では、heave と pitch の

みについて論じている。

3種類の波長の入射波を発生させたが、その周期 ( $T_w$ )、波長 ( $\lambda$ )、波高 ( $H$ ) に関するデータは Table 2 に示している。またそれぞれの入射に対し、Table 2 に示す3種類の船速で計測を行った。

Table 2 Experimental conditions

Incident waves			
$T_w$ (sec)	1.096	1.266	1.415
$\lambda/L$	0.75	1.0	1.25
$H/\lambda$	1/15.6	1/19.2	1/22.2
Forward speeds			
$U_0$ (m/s)	0.0	0.7425	0.9899
$Fn$	0.0	0.15	0.20

3次元の実験に対応する数値計算は、Fig.10 に示しているような数値水槽で行った。計算領域は、 $x$  軸方向に  $-2.6L \sim 4.9L$ 、 $y$  軸方向に  $-2.1L \sim 2.1L$ 、 $z$  軸方向に  $-1.3L \sim 1.3L$  とした。(ただし座標系の原点は、模型船の中央で静止水面に置かれ、 $x$  軸の正方向は船の進行方向としている。) この計算領域内でのメッシュ数は、 $x$  軸、 $y$  軸、 $z$  軸方向それぞれに  $165 \times 80 \times 100$  ( $=1,320,000$ ) とした。格子は不等間隔としており、最小のグリッド幅は、 $x$  軸方向では船首近傍で  $\Delta x = 0.006L$ 、 $y$  軸方向と  $z$  軸方向では、船体表面ならびに自由表面近傍で  $\Delta y = \Delta z = 0.005L$  であった。また時間刻み幅は、 $T_w$  を入射波の周期として  $\Delta t / T_w = 5 \times 10^{-4}$  とした。

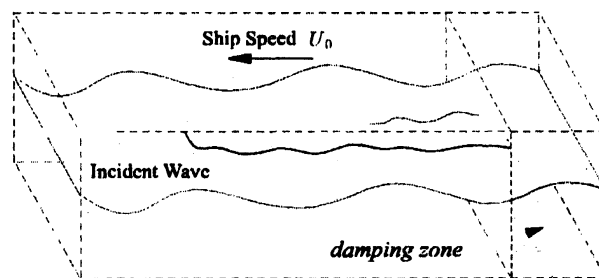


Fig.10 3-D numerical wave tank

既に述べたように、数多くのケースについて実験計測を行っているが、本稿では船の前進速度 (フルード数) が  $Fn = U_0 / \sqrt{Lg} = 0.15$ 、入射波の波長が  $\lambda/L = 1.0$  の場合を例にとり、船の動揺を自由にしたときの結果を比較することにより、水波と浮体の強非線形相互作用における船体運動の影響について論じることとする。

Fig.11 には出会い周期  $T_e$  での1周期間における代表的な2コマに対して、船首甲板周りの水波の挙動に関する実験と計算の比較を示している。実験について、水が甲板上へ打ち込み、鉛直壁を駆け上がり、激しく飛び散る現象がわかる。対応する数値計算結果は、定性的には良いとしても、広範囲に飛沫が飛び散る様子は殆ど再現されていない。これは数値計算における解像度の不

足に原因があると考えられる。

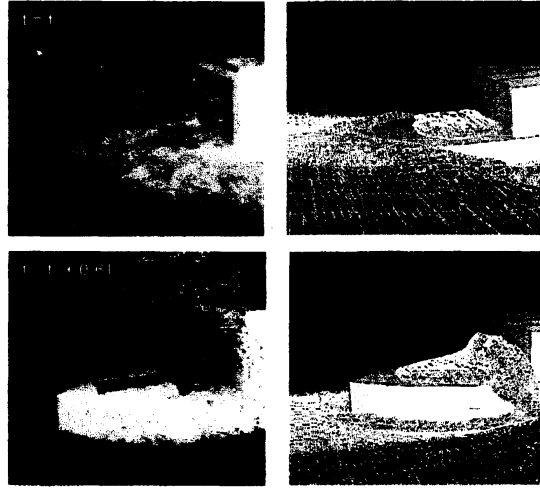


Fig.11 Free-surface profiles at  $\lambda/L=1.0$  and  $Fn=0.15$  for motion-free case (Left: experiment, Right: computation)

Fig.12 は船体運動の比較であり、pitch と heave の結果を示している。Pitch はよく一致しているが、heave においては平均値すなわち定常沈下量に差が見られる。

Fig.13 は  $P_1 \sim P_3$  における圧力の時刻歴を示している。一致度に関する全般的な傾向は悪くないが、詳細に関しては違いが見られる。特に、圧力の最大値は明らかに計算値の方が小さい。これも格子解像度や界面捕捉におけるシャープさの不十分さに原因があると考えられ、更なる研究が必要である。

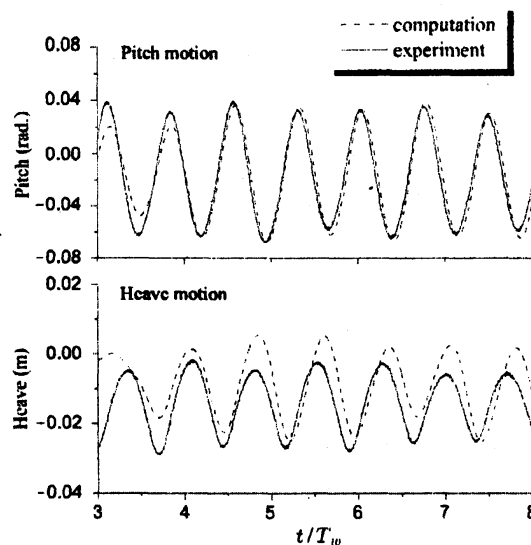


Fig.12 Wave-induced ship motions at  $\lambda/L=1.0$  and  $Fn=0.15$  for motion-free case

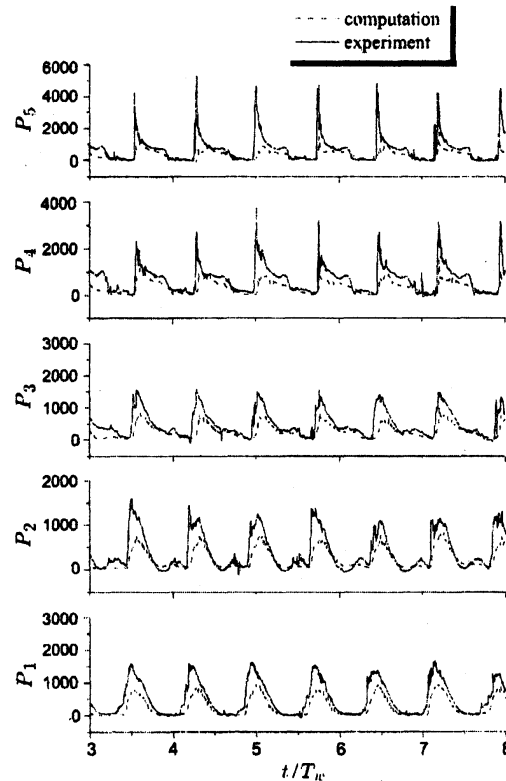


Fig.13 Pressures at  $\lambda/L=1.0$  and  $Fn=0.15$  for motion-free case

#### 4. 結 言

水波と浮体の強非線形相互作用には、スラミングや海水打ち込み、青波による波浪衝撃、スロッシングなど工学的にも重要な問題が数多くある。これらを精度良く数値計算するために、差分法を基本とした独自の数値計算法を開発している。この計算方法は直交固定格子を用いて、水、空気、浮体の相互作用を多相流体としてC-CUP法で計算し、界面捕捉法としてCIP法を採用するとともに、浮体表面の追跡やそこでの境界条件の課し方に独自の工夫を行っている。本稿ではこの計算法の概要を述べるとともに、計算法の妥当性を検証するために計算結果と実験結果の比較を行った。

まず2次元問題では、乾舷の小さい箱型浮体を用いて、甲板への打ち込み水の挙動や浮体の波浪中動揺への影響について調べた。水の打ち込みがある場合、ない場合ともに、計算結果は計測値と十分な精度で一致しており、計算法の妥当性が検証されたと言える。

次に波浪中を船が一定速度で前進する3次元問題について実験し、船首の水平甲板上ならびに鉛直壁面上における圧力計測や、水波の挙動の高速ビデオカメラ撮影、船に働く流体力や船の動揺の計測を行って、対応する数値計算結果と比較した。全般的には妥当性が確かめられたと考えているが、飛沫の再現性、圧力の最大値、heave方向の沈下量の定常値などに差が見られた。これ



らを改善するためには、よりシャープな界面捕捉や格子解像度の向上などについて研究が必要と考えられる。

#### 参考文献

- [1] Yabe, T., Xiao, F. and Utsumi, T., The Constrained Interpolation Profile Method for Multiphase Analysis, *Journal of Computational Physics*, Vol. 169, pp.556-569 (2001).
- [2] Hu C. and Kashiwagi, M., A CIP-based Method for Numerical Simulation of Violent Free-Surface flows, *Journal of Marine Science & Technology*, Vol.9, No.4, pp.143-157 (2004).
- [3] Hu, CH, Kashiwagi, M, Kishev, Z, Sueyoshi, M and Faltinsen, O.: Application of CIP Method for Strongly Nonlinear Marine Hydrodynamics, *Ship Technology Research*, 53 (2), pp 74-87(2006).
- [4] Kishev, R.Z., Hu C. and Kashiwagi, M., Numerical Simulation of Violent Sloshing by a CIP-based Method, *Journal of Marine Science & Technology*, Vol.11, No.2, pp.111-122 (2006).
- [5] 胡 長洪、柏木 正、 THINC スキームを応用した 3 次元スロッシングの数値計算、日本機械学会年次大会講演論文集 (熊本) pp.97-98 (2006).