水波と浮体の強非線形相互作用に関する数値計算法と実験的検証*

Numerical Calculation Method on Extremely Nonlinear Wave-Body
Interactions and Experimental Validation柏 木 正**
KASHIWAGI Masashi胡 長 洪**
HU Changhong

Abstract At Research Institute for Applied Mechanics (RIAM) of Kyushu University, a Cartesian-grid method in combination with CIP-based interface capturing schemes is being developed for computing extremely nonlinear wave-body interactions. To confirm validity of this calculation method, careful and systematic experiments of both two- and three-dimensions are also carried out. In this paper, following a brief description of the calculation method, some recently obtained numerical results are shown for violent water-wave behavior around the ship's deck and resultant impulsive pressure and ship motions, which are compared with corresponding experiments.

Keywords: Wave-body interaction, Water on deck, CIP method, Experimental validation

1. 緒 言

大振幅波浪中で動揺する浮体には甲板上への青波による波浪衝撃が発生する。船舶の場合には船底や船首フレア部分が水面に衝突するスラミングという現象が発生して、上部構造物や船体そのものが損壊し、転覆・沈没に至ることさえある。このような水波と浮体の強非線形相互作用では砕波や飛沫、空気巻き込みなどを伴うため、これらに関する計算は、ポテンシャル理論に基づく従来の数値計算法では不可能であったが、最近では先進的な数値流体力学 (CFD) 的手法を用いることによって可能になりつつある。その中でも最も有望な計算方法は、水・空気・浮体を液相・気相・固相と見なした多相流体としての計算を直角格子での差分法で行い、時々刻々移動する水と空気の境界面 (自由表面) や浮体表面の位置は数値拡散の極力少ない界面捕捉法で追跡するという類のものであろう。

九州大学応用力学研究所でもその考え方に基く数値計算プログラムを独自に開発しており

[1]、そのコードを RIAM-CMEN (Research Institute for Applied Mechanics, Computational Method for Extremely Nonlinear hydrodynamics) と名付けている。この RIAM-CMEN では、移流方程式の解法や自由表面に対する界面捕捉法に Yabe et al. [2] が提案・開発した CIP 法をベースとして用いており、時々刻々移動する浮体表面の位置の追跡および浮体表面での境界条件式の課し方には、仮想粒子を用いた独自の方法を用いている。本論文の前半では、これらの方法の詳細について述べる。

また RIAM-CMEN による計算精度を確認し、改良すべき問題点を抽出するために、水波と浮体の強非線形相互作用に関する 2 次元問題、3 次元問題の水槽実験を実施しているが、その内容ならびに実験結果と計算結果の比較、考察、今後の課題などを本論文の後半に述べる。

2. 数値計算法の概要

本数値計算法の主な特徴は、(1) 空間固定の直角格子を用いていること、(2) 流体に対する差分

* 2006.11.12 受付

** 九州大学応用力学研究所 〒816-8580 福岡県春日市春日公園 6-1

TEL: (092)583-7747 FAX: (092)592-4832 E-mail: kashi@riam.kyushu-u.ac.jp

解法に C-CUP (CIP Combined Unified Procedure) 法[3]を用いていること、(3) 自由表面の捕捉に CIP 法をベースとして用いていること、(4) 動揺する浮体表面の境界条件を差分解法に組み入れるために仮想粒子法を用いていること、などである。これらの概要について以下に説明する。

2.1 流体に対する差分解法

RIAM-CMEN では、水波と浮体の相互作用を、液相 (水)、気相 (空気)、固相 (浮体) が存在する多相流れと見なし、それに対する差分解法として C-CUP 法を適用している。しかし RIAM-CMEN では各相の密度は一定の非圧縮性流体として取扱っている。粘性・非圧縮性流体の非定常流れに対する支配方程式は、流速を u_i ($i=1, 2, 3$)、圧力を p として次のように表される。

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

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} (\mu S_{ij}) + F_i \quad (2)$$

ここで ρ は流体の密度、 μ は粘性係数、 $S_{ij} = \partial u_i / \partial x_j + \partial u_j / \partial x_i$ は剪断応力、 F_i は重力を含めた体積力である。本論文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している。

式 (1) および (2) は、1) 移流項の計算 ($q^n \rightarrow q^*$)、2) 拡散項および体積力の計算 ($q^* \rightarrow q^{**}$)、3) 圧力項の計算 ($q^{**} \rightarrow q^{n+1}$)、の 3 段階に分ける Fractional Step Method で計算する。ここで q は未知数の u_i 、 p を表し、 n は時間ステップ数で時間刻みは $\Delta t = t^{n+1} - t^n$ である。

まず第 1 段階の移流項の計算では、Yabe et al [2] が提案した CIP 法を適用している。次に第 2 段階の拡散項および体積力の計算では、中心差分を用いたオイラーの陽解法を適用している。第 3 段階の圧力項の計算では、 p と u_i の連成を陰解法によって取扱い、その結果、圧力は次に示すポアソン方程式を解くことによって求める。

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

式(3)は、原理的には、液相、気相、固相のすべてに適用することができ (C-CUP 法)、異なる相の界面において圧力に関する境界条件を課す必要がない。

2.2 自由表面の捕捉法

水と空気の境界面である自由表面が大変形する強非線形流体問題では、自由表面の位置、形状を如何にしてシャープに捕捉するかが重要である。本研究では、異なる相を数値的に認識するために密度関数 ϕ_m を定義する。 $m=1, 2, 3$ はそれぞれ液相、気相、固相を表し、直角格子で作られた各セル内では $\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 = 1$ を満たすものとする。

自由表面の捕捉は、液相すなわち水に関する密度関数 ϕ_1 が移流方程式

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial t} + u_j \frac{\partial \phi_1}{\partial x_j} = 0 \quad (4)$$

を満足するものとして、これを CIP 法で解き、 $\phi_1 = 0.5$ の界面を自由表面とみなす。

CIP 法はもともと数値拡散が少なくなるように工夫されたスキームではあるが、界面のシャープさを更に高めるためにいくつかの方法が提案されている。ここでは関数変換 $\Phi = \Phi(\phi_1)$ を用い、界面のごく近傍における密度関数の変化を早め、オーバーシュートを抑える方法を用いる。このとき Φ が満たす移流方程式は式(4)と同じ形となり、

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + u_j \frac{\partial \Phi}{\partial x_j} = 0 \quad (5)$$

である。本論文では比較的簡単に適度な効果をもたらす関数変換式として

$$\Phi(\phi_1) = 0.5 + \alpha(\phi_1 - 0.5) \quad (6)$$

を用いている。ただし $\alpha > 1$ はシャープさを高めるためのパラメータであり、本論文の数値計算では $\alpha = 1.2$ としている。

2.3 浮体表面境界条件

浮体に働く流体力を圧力積分によって求める必要性から、浮体表面の位置すなわち液相あるいは気相と固相の界面の位置は特にシャープに求めなければならない。また差分法による流体の計算においては、浮体表面での流速に関する境界条件を精度良く満足させなければならない。

そこで本論文における RIAM-CMEN の計算では、Fig.1 に示すように、浮体表面に仮想粒子を置き、各粒子位置での法線ベクトル、局所面積の情報を保持させる。また各粒子点での圧力は、各時間ステップごとに直角格子を用いて計算される各セルの圧力の値から内挿することによって

Fig. 1 Body surface represented by virtual particles.

求められる。

それらを用いると、浮体に働く流体力・モーメントが計算でき、浮体の運動方程式を時間積分すると、浮体の直線運動の速度、回転運動の角速度が求められる。したがって浮体表面上に置かれたすべての仮想粒子の新しい時間ステップにおける速度および位置（すなわち計算領域内における固相の密度関数 ϕ_3 の値）が求められる。

時刻 $t = t^{n+1}$ における仮想粒子位置での速度成分を V_{pi}^{n+1} と表すことにすると、浮体境界面を含む計算セルの格子点における速度成分は

$$U_i^{n+1} = \phi_3 V_i^{n+1} + (1 - \phi_3) u_i^{**} \quad (7)$$

によって与えることができる。ここで u_i^{**} は、C-CUP 法における第 3 段階で計算される各格子点での流速成分であり、 V_i^{n+1} は仮想粒子点での速度 V_{pi}^{n+1} から内挿によって求めた各格子点での速度成分である。

以上のようにすれば、浮体表面の境界条件式として、いわゆる non-slip 条件を課したことになる。しかしポテンシャル理論のときのように、流体と浮体の法線方向速度だけが等しいとする free-slip

(no-flux) 条件を課した方が計算解像度の整合性から考えてもっともらしい解が得られる場合がある。この free-slip 条件を式(7)と同じようにして満足させるためには、浮体境界面近傍における流体の速度を用いて仮想粒子点での速度 V_{pi}^{n+1} を修正すればよいが、現段階ではあまり精度は良くなく、今後改良の余地がある。

いずれにしても、固相の密度関数 ϕ_3 は上記のように算出できるため、気相（空気）での密度関数 ϕ_2 は $\phi_2 = 1 - \phi_1 - \phi_3$ を用いて求められる。また、計算領域内の任意のセルにおける物理量（ q と表す）は、各相での物理量 q の値 q_m と密度関数の値 ϕ_m を用いることによって次式で計算できる。

$$q = \sum_{m=1}^3 \phi_m q_m \quad (8)$$

3. 数値計算法の妥当性の検証

3.1 2次元問題の実験

2次元問題の実験に使った模型は、長さ 0.5 m、喫水 0.1 m、乾舷 0.023 m 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 (Fig.2 参照)。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・碎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。

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、三角形断面のプランジャー型造波機を備えており、反対側の端には能動型の波吸収装置を備えている。したがって、造波機と浮体の間では波の反射は生じているが、浮体を透過した波は造波水路の端から殆ど反射しないと考えることができる。

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

計測項目は、造波機の変位、浮体の動揺（水平方向をsway、上下方向をheave、回転運動をroll）、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が、本論文ではswayを拘束している場合の結果のみを示す。

3.2 2次元実験結果との比較

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 525×183 ($=96,075$) 個のグ

Fig.3 Snapshots at $t/T_w = 17.3$ (at $T_w = 1.0$ sec).

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

リッドを用いて行った。格子には、浮体と造波機の近傍が密となるような不等間隔の直角格子を用いた。このときの最小グリッド幅は $\Delta x = \Delta y = 3\text{mm}$ であった。また時間刻み幅は、 $\Delta t/T_w = 10^{-3}$ (ただし T_w は入射波すなわち造波機の周期) とした。

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

Fig.5 Snapshots at $t/T_w = 17.3$ (at $T_w = 0.7$ sec).

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

算によって求めている。造波機の振幅は 25 mm であり、周期は、以下に示す最初の例では $T_w = 1.0$ sec、2 番目の例では $T_w = 0.7$ sec である。

周期が $T_w = 1.0$ 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、造波機の変位、浮体動揺、水面変位の時間変化を Fig.4 に示している。これらからわかるように、 $T_w = 1.0$ 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。本論文で示した RIAM-CMEN による計算結果も実験結果と非常に良く一致していることがわかる。

これに対し周期を $T_w = 0.7$ 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（定常沈下）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打ち込んだまま甲板上に留まっている水波の影響である。このような強非線形な現象に対しても、RIAM-CMEN による計算結果は計測値と全体的に良く一致している。

3.3 3次元問題の実験

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 m、幅 5 m、水深 7 m）において実施した。供試模型は、水面下の表面形状が以下の数式で表される modified Wigley モデルである。

$$\eta = (1 - \zeta^2)(1 - \xi^2)(1 + a_2 \xi^2 + a_4 \xi^4) + \zeta^2(1 - \xi^8)(1 - \xi^2)^4 \quad (9)$$

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ともに Table 1 に示してある。

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の変動を計測するためである。

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: ∇ (m ³)	0.16877
Gyrational Radius in pitch: κ_{yy}/L	0.244

圧力は（株）三計エンジニアリング製の水圧計（P306V-05S）を 6 個用い、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 箇所取り付けて計測した。この圧力計は温度補償回路を備えているが、圧力計を銅板に取り付け、計測を始める前に銅板に水槽の水を掛けることによって銅版の温度を水の温度と同じにし、圧力計の受圧面が水中・空中を出たり入ったりすることによって発生するゼロ点のドリフトを極力少なくするように努力した。

実験は、正面向い波中で、船の動揺を完全に固

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

Fig.8 Locations of pressure measurement.

定した場合と自由にした場合の両方について行った。実験計測では、圧力計による圧力の計測だけでなく、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した。また、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。

Table 2 Experimental conditions

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

3種類の波長の入射波を発生させたが、その周期 (Tw)、波長 (λ)、波高 (H) に関するデータは Table 2 に示してある。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い、現象の再現性を確認するために、計測は各ケースについて必ず2回以上行った。

3.4 3次元実験結果との比較

3次元の実験に対応する RIAM-CMEN による計算領域は、 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上とし、 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 x 軸、 y 軸、 z 軸方向のメッシュ数は、それぞれ $165 \times 80 \times 100 (= 1,320,000)$ 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、 Tw を入射波の周期として $\Delta t/Tw = 5 \times 10^{-4}$ とした。

既に Table 2 で示したように、数多くのケースについて実験計測を行っているが、本節では船の前進速度 (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、船の動揺を固定した場合と自由にした場合の結果を比較することにより、水波と船の強非線形相互

作用における船の動揺の影響について論じることとする。

(1) 船の動揺を固定した場合

Fig.9 は、船首近くならびに甲板上での水波の挙動に関する実験と計算の比較を示している。1周期 (前進速度があるときは出会い周期となるので Te と表している) 間の代表的な2コマに対して示しているだけだが、これによって定性的な傾向は判断できる。RIAM-CMEN による数値計算ではまだ解像度が十分ではなく、飛沫などが再現されていないが、全般的な水の打ち込み現象は捉えられている。

Fig.10 は $P_1 \sim P_5$ における圧力の時間変化の比較を示している。全般的な変化の傾向は一致しているが、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。また水平甲板と鉛直壁の交線近くにある P_3 と P_4 での圧力には、1周期間に顕著な2つのピークが存在しているが、これに関する数値計算結果も不十分である。1周期間の圧力変動に2つのピークが存在するという現象は、矩形タンク内での液体のスロッシングにおいても観察されており、これに対しては、自由表面捕捉法として CIP-CSL3 法を適用した RIAM-CMEN による数値計算[4]で比較的良好に再現されていた。したがって今回の実験に対応する数値計算においても、より精密な界面捕捉が可能な計算手法を用いて数値計算の精度を上げれば、圧力における計算値と実験値の一致度は改善されると期待できる。

(2) 船の動揺を自由とした場合

船の動揺を固定した場合と同様に、出会い周期 Te 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 Fig.11 に示している。

Fig.9 と比較すれば明らかのように、船の動揺の影響によって、甲板上への打ち込み水の量ならびに鉛直壁を上昇する水の量は増加しており、水が飛び散る現象も激しくなっていることがわかる。これらに関する RIAM-CMEN の計算結果は、定性的には実験と一致しているものの、広範囲に水が飛び散り分裂する様子は殆ど再現されていない。これも界面捕捉に起因する数値計算の解像度の不足に原因があると考えられる。

Fig.12 は $P_1 \sim P_5$ における圧力の時間変化を示している。動揺を固定した場合の結果と比較する

Fig.9 Free-surface profiles at $\lambda/L=1.0$ and $Fn=0.15$ for motion-fixed case (Left: experiment, Right: computation).

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

Fig.10 Pressures at $\lambda/L=1.0$ and $Fn=0.15$ for motion-fixed case.

Fig.12 Pressures at $\lambda/L=1.0$ and $Fn=0.15$ for motion-free case.

と、船体運動の影響によって、圧力の最大値が非常に大きくなっていること、水平甲板と鉛直壁の交線近くにある P_3 と P_4 における圧力変動の様子が異なっていること、などがわかる。これらの圧力に対する船体動揺の影響は、RIAM-CMEN による数値計算によって再現されているが、圧力の最大値は実験結果より小さい。これも格子がまだ十分に小さくないことや界面捕捉における精度の不足に原因があると考えられる。

4. 結 言

水波と浮体の強非線形相互作用には、スラミング、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。これらを高い精度で数値計算するために、差分法を基本とした独自の計算プログラムが開発されている。この計算コードは RIAM-CMEN と名付けられているが、直角固定格子を用いて、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を満たす方法に独自の工夫を行っている。本論文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の水槽実験、ならびに実験結果と計算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その波浪中浮体動揺への影響を調べた。水の打ち込みがある場合、ない場合ともに、RIAM-CMEN による計算結果は計測値と十分な精度で一致しており、2 次元問題に関しては、強非線形流体現象が生じている場合でも RIAM-CMEN の妥当性が検証された。

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、高速ビデオカメラによる水波の挙動の撮影を行って、対応する数値計算結果と比較した。全般的には RIAM-CMEN の妥当性が確かめられたと考えているが、飛沫の再現性、圧力の最大値などに有意な差が見られた。これらを改善するためには、より精密な界面捕捉の実現や格子数の増加、浮体表面での free-slip 境界条件の適用における計算精度の向上などが必要と考えられる。

Nomenclature

B	: breadth of a ship
d	: draft of a ship
f	: freeboard of a ship
F_i	: body force
Fn	: Froude number
L	: length of a ship
p	: pressure
S_{ij}	: shear stress tensor
t	: time
Te	: period of encounter
Tw	: period of incident wave
u_i	: velocity of fluid
U_i	: velocity at a cell containing body boundary
U_0	: forward speed of a ship
V_{pt}	: velocity at virtual particles

Greek letters

α	: coefficient of interface sharpness
ϕ_m	: density function for liquid, gas, and solid
λ	: wave length
μ	: viscosity coefficient
ρ	: density of fluid
ξ, η, ζ	: nondimensional variables
	$\xi = 2x/L, \eta = 2y/B, \zeta = z/d$

Subscripts

i	: x ($i=1$), y ($i=2$), z ($i=3$) directions of Cartesian coordinates
j	: the same as i
m	: liquid ($m=1$), gas ($m=2$), solid ($m=3$) phases, used for the density function

参考文献

- [1] Hu, C. and Kashiwagi, M., A CIP-based Method for Numerical Simulation of Violent Free-Surface flows, *Journal of Marine Science & Technology*, 9(4), 143-157 (2004).
- [2] Yabe, T., Xiao, F. and Utsumi, T., The Constrained Interpolation Profile Method for Multiphase Analysis, *Journal of Computational Physics*, 169, 556-569 (2001).
- [3] Yabe, T. and Wang, P.Y., Unified Numerical Procedure for Compressible and Incompressible Fluid, *Journal of the Physical Society of Japan*, 60, 2105-2108 (1991).
- [4] Kishev, R.Z., Hu, C. and Kashiwagi, M., Numerical Simulation of Violent Sloshing by a CIP-based Method, *Journal of Marine Science & Technology*, 11(2), 111-122 (2006).