

重合格子法による船舶の波浪中 3 次元運動シミュレーション

3-dimensional motion simulation of a ship in waves using composite grid method

松尾博志, matsuo@triton.naoe.t.u-tokyo.ac.jp 朴鍾千, park@triton.naoe.t.u-tokyo.ac.jp
佐藤徹, sato@triton.naoe.t.u-tokyo.ac.jp 宮田秀明, miyata@triton.naoe.t.u-tokyo.ac.jp

東京大学 環境海洋工学専攻, 文京区本郷 7-3-1,

Hiroshi Matsuo, J.C.Park, Toru Sato, and Hideaki Miyata

Dept. of Environmental and Ocean Engineering, Univ. of Tokyo, 7-3-1 Hongo Bunkyo-ku Tokyo Japan

In this study, a computational fluid dynamics simulation technique has been developed for unsteady motion of a ship advancing in waves. Composite grid system is employed in order to deal with large amplitude motions of ship and wave generation separately. The governing equations, Navier-Stokes (N-S) and continuity equations, are discretized by a finite volume method, in the framework of inner grid (O-H type) and outer grid (rectangular) systems. The present method is applied to simulate flow around ship heading on calm water and in forced motions. Wave maker is also tested. The results show that composite grid can cope with 6 D.O.F motion of ship and wave maker.

1. 背景

従来、船舶の製品としての性能、安全性は主として、試運転状態での平水中推進性能、線形計算に基づく短期・長期予測結果、及びに規則で定められた波浪外力というもので評価されてきた。しかし、こうした設計手法では、船舶が就航する波浪条件下での性能や安全性が設計段階で殆ど評価されず、特に、航路海象条件下での波浪中推進性能や、荒天時、大波高中での船体の安全性が船舶設計に反映される事が少なかった。このため、平水中性能を偏重した、波浪推進性能の著しく劣る船舶や、大波高時の安全性の不十分な船舶が建造され、航路就航時の速力不足や、船体構造損傷事故の多発など、船舶の性能と安全性の両面で、製品品質の悪化を招いている。

2. 目的

このような背景から、本研究では、波浪中の船体運動、波浪荷重を定量的に予測するために、船舶の大振幅運動を取り扱う事が可能な CFD コードの開発を目的としている。具体的には、波浪条件の入力が容易で、波の減衰や反射の問題が少ない矩形格子系と、船体近傍での解析精度の良い物体適合格子との重ね合わせを行う。このことにより適合格子の特徴である物体周りの流体精度の高さを保ちつつ、Yaw 運動を含めた船体の多自由度・大振幅運動シミュレーションを実現する。この手法により、これまでは実船データに頼るしかなかった実海域での性能評価や、スラミング・ブローチング現象のような多自由度大振幅運動の定量的理解が可能となる。

3. 計算手法

本計算手法を概説する。流体計算では、非圧縮性流体 Navier-Stokes 方程式と連続の式を支配方程式としている。N-S 式は(1)のようになり、

$$\frac{du}{dt} + \nabla \cdot uu = -\nabla \phi + \frac{1}{Re} \nabla \cdot [\nabla u + (\nabla u)^T] - \overline{u'u'} + K \quad (1)$$

(1)の外力項 K は、内部格子系と外部格子系でそれぞれ(2)、(3)のようになる。

$$\text{内部} \quad K = -2\rho\bar{\omega} \times \vec{V} - \rho\bar{\omega} \times (\bar{\omega} \times \vec{r}) - \rho\bar{\omega} \times \frac{d\bar{\omega}}{dt} \times \vec{r} - \rho \frac{d\vec{V}_s}{dt} \quad (2)$$

$$\text{外部} \quad K = -\rho \frac{d\vec{V}_s}{dt} \quad (3)$$

支配方程式を有限体積法により離散化し、MAC 法のアルゴリズムで時間発展的に流場を解くことにより、各時間で支配方程式を満足する非定常解を求めている。格子系は、内部格子には船体表面に固定した O-H 型境界適合格子を、外部格子には矩形格子系を用いている。本研究で用いた格子系を Fig 1 に示す。ベクトル変数はすべてデカルト系で定義された成分を持ち、速度および圧力はスタッガード変数配置で定義している。対流項の離散化には 3 次上流差分を用い、その他の空間の離散化については 2 次精度中心差分を用いている。圧力解法には、SOR 法を用いている。時間の離散化には、非定常計算における計算効率を考慮して 1 次精度のオイラー陽解法を用いている。船体運動は、流場の計算から得られた圧力、摩擦力を船体浸水表面上で積分して計算される外力を用いて、剛体の運動方程式を各時間で解くことにより求める。自由表面の取扱いに関しては、非線形性の強い自由表面変形への対応を考慮して、密度関数法を用いている。Table.1 に本論文で用いた計算手法を表形式にまとめた。

2 つの格子間の圧力・速度の受け渡しは、セル中心に速度を内挿し、3 次元の線形補間を用いて行う。内部格子から外部格子への補間は、内部格子をセルの面積ベクトルを用いて矩形に変換し、線形補間係数を求め、内挿を行う。内部格子から外部格子への線形補間係数の求め方の模式図を Fig.2 にしめす。

計算の流れは、まず、ある時間 n ステップ目での外部格子系の流体計算を行い、つぎに内部格子系の外部境界に圧力・速度を内挿し、内部格子系の流体計算を行う。船体の運動は内部格子系では船体固定座標系で行われるため、速度の受け渡しに関しては、外部セルと内部セルの相対速度を加減した速度を受け渡す。計算された内部格子系の値を、内部格子系に含まれる、外部格子のセルに内挿し、次のタイムステップに移る。

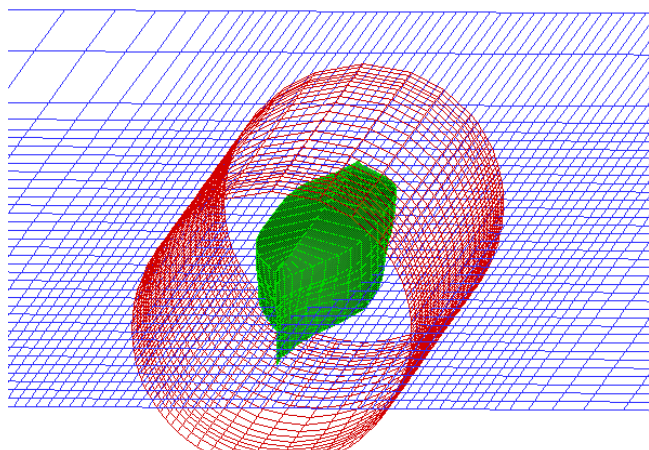


Fig 1 composite grid system

Table.1 Simulation Methods

Governing Eq..	N-S & Continuity Eqs.
Algorithm	MAC
Differencing Time	Euler
Differencing Space	3rd order upstream(advection term), 2nd order centered (others)
Variables Arrangement	Staggered Mesh
Turbulent Model	Dynamic SGS model
Free surface condition	Marker Density Function (DFM) method
Inner grid	(Fluid) Body fixed coordinate system (Ship motion) Ground fixed coordinate
Outer grid	(Fluid) Outer grid is fixed on the center of gravity without any rotating motions、 No Rotate

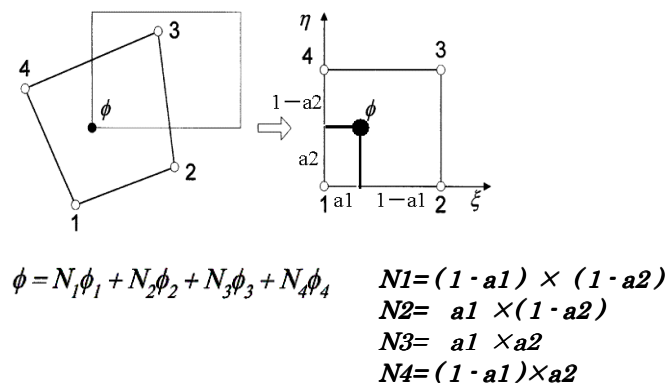


Fig2 Interpolation Coefficient

4. 定常航行テスト

まず静水中での定常航行計算を行った。船体には Series60 船型を用いた。船体の主要目を Table.2 に、計算条件を Table.3 に示す。Fig.3 に抵抗の時系列を、Fig.4 に船側波形を示す。Fig.4 の比較から、重合格子における計算が実験値と単一格子による計算と定性的に一致している事が分かる。

Table.2 Series 60 model

Block Coefficient	Cb	0.6
Midship Section Coefficient	Cm	0.9775
Length-breadth ratio	Lpp/ B	7.50
Length between pp	L [m]	1
Breadth	B [m]	0.1333
Draught	T [m]	0.0533
Wetted surface	S [m2]	0.1699
Volume of displacement	[m3]	4.252×10-3

Table.3 Condition of calculation for steadily heading ship

Grid Points	Inner 140 × 22 × 103 = 317420
	Outer 148 × 73 × 53 = 572612
Minimum grid space	0.001
Reynolds Number	1.0 × 10 ⁶
Froude number	0.316
Dt	0.001
Time of acceleration	3.0

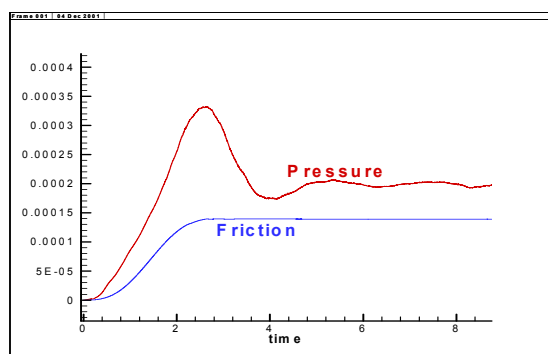


Fig.3 Time history of resistance (non-dimension)

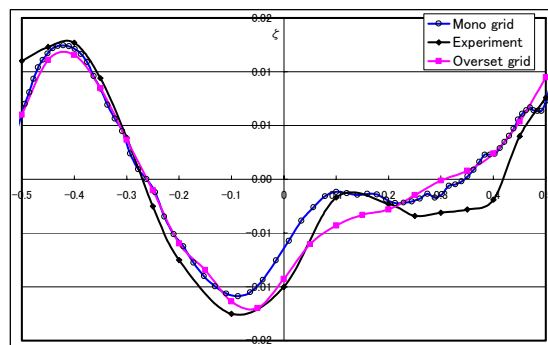


Fig.4 Wave elevation on Series60 hull

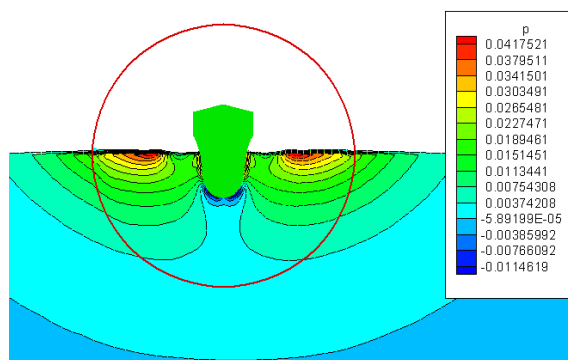


Fig.5 Pressure contour at section=1.5

5. 強制運動させた船体周りの計算

実際に強制運動シミュレーションを行う事により、本論文で用いた数値計算法が、船体の運動の6自由度すべてに対して応用が可能である事を示す。運動を強制して大振幅 Roll 運動、Roll, Yaw 運動、Surge, Sway 運動、Heave, Pitch 運動を行った。

5.1 強制大振幅 Roll 運動シミュレーション

船体の回転運動 (Roll, Pitch, Yaw) のうち、一般的に Roll 運動がもっとも大振幅運動の発生の可能性が大きい。船体の大振幅の回転運動に対して本計算手法が応用できる事を確認するために、Roll = 20° の大振幅 Roll 強制運動計算を行った。タイムステップごとに内挿すべき点の検索を行い、補間係数を求める。計算条件を Table.4 に、計算結果を Fig.6 ~ Fig.11 に示す

Table.4 Condition of calculation for enforced roll motion simulation

Grid Points	Inner	140 × 22 × 103 = 317420
	Outer	148 × 73 × 53 = 572612
Minimum grid space		0.001
Reynolds Number		1.0 × 10 ⁶
Froude number		0.316
Dt		0.001
Time of acceleration		3.0
Roll angle		20°
Period of Rolling		2.0

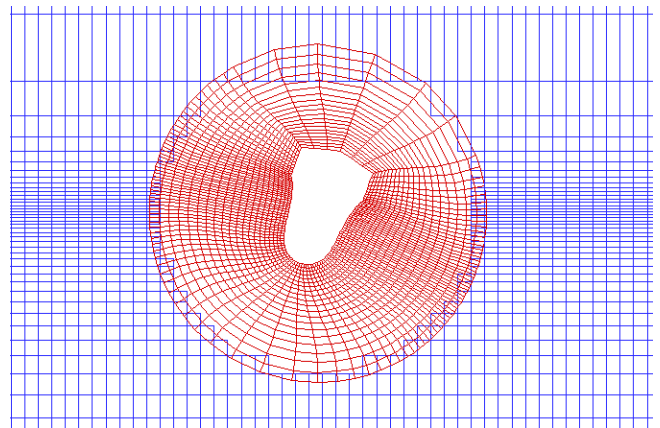


Fig.7 Grid distribution at section=1.5. Roll amplitude is 20 degree.

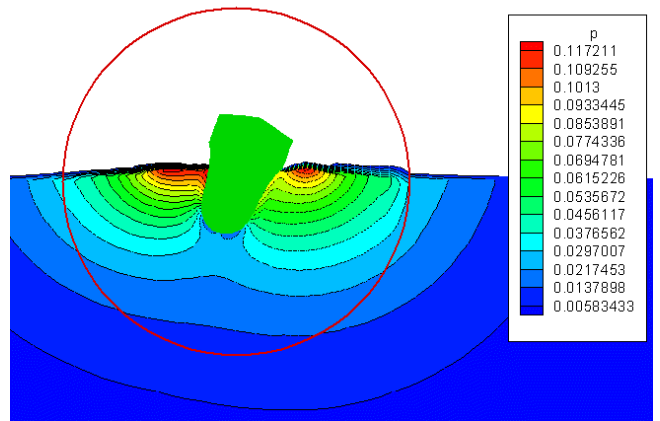


Fig.7 Pressure contour at section=1.5. Fn=0.316

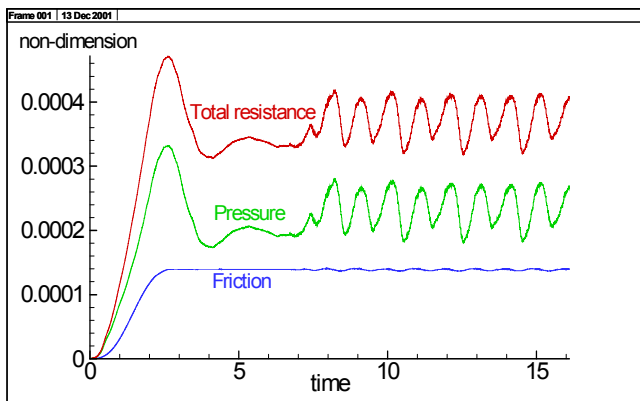


Fig.6 Time history of resistance. Fn=0.316

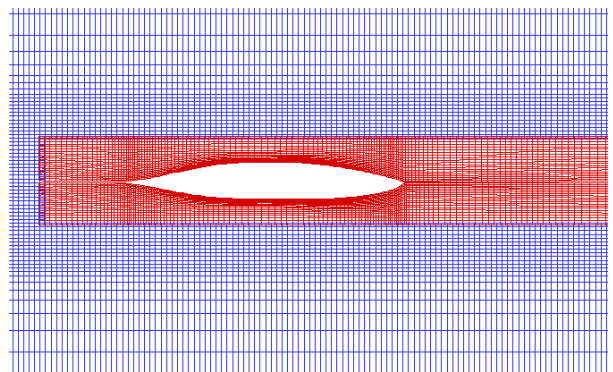


Fig.10 Grid distribution on horizontal plane.

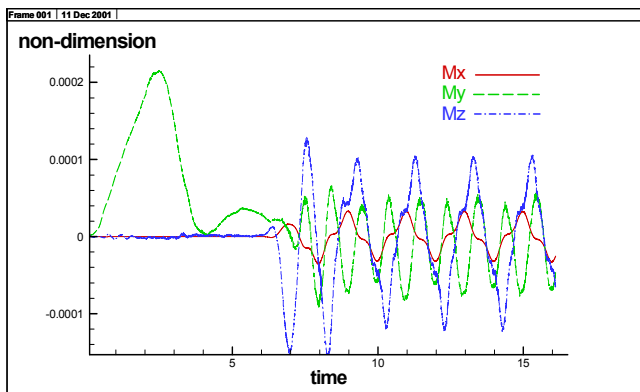


Fig.7 Time history of moment. Fn=0.316

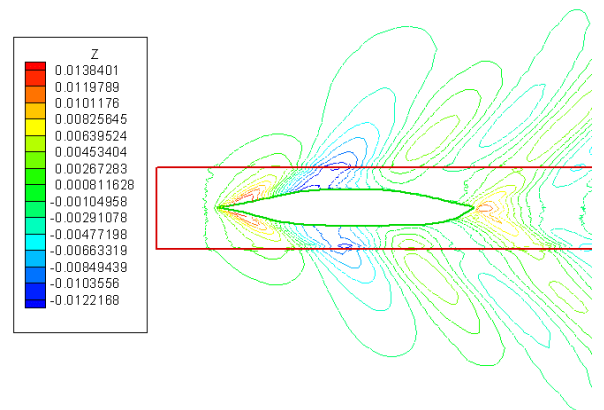


Fig.11 Instantaneous wave height contour map

5.2 強制 Roll、Yaw 運動シミュレーション

進行する船の方向は舵によって制御されている。舵は一般的に船の重心よりも低い位置に取り付けられており、そのために舵が生み出す Yaw モーメントは同時に Roll モーメントも発生させている。また、波浪中では舵の Roll モーメントを利用して Roll 角を制御することも可能である。この事から分かるように Roll 運動と Yaw 運動は互いに連成していると考えられる。

本論文で用いた計算手法が Roll 運動と Yaw 運動の連成問題に応用できることを示すために、Roll 振幅 10° 、Yaw 振幅 5° 、周期 2 で強制運動させた船体の周りの流場計算を行った。計算条件を Table.5 に、Roll 角と Yaw 角の時系列を Fig.12 に、計算結果を Fig.13 ~ 16 に示す。

Table.5 Condition of calculation for enforced roll and yaw motion

Grid Points	Inner 140 × 22 × 103 = 317420
	Outer 148 × 73 × 53 = 572612
Minimum grid space	0.001
Reynolds Number	1.0×10^6
Froude number	0.24
Dt	0.001
Time of acceleration	3.0
Roll angle	10°
Yaw angle	5.0°
Period of Rotation	2.0

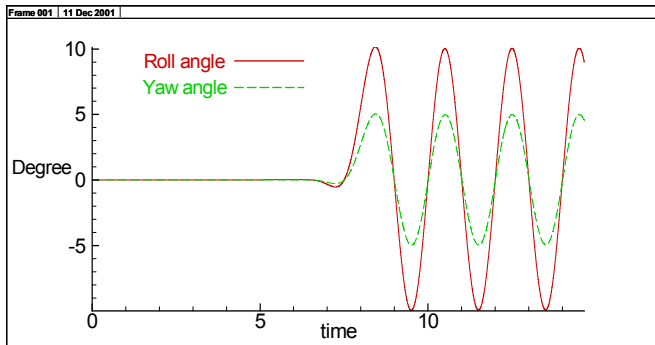


Fig.12 Time history of Roll and Yaw angle. $Fn=0.24$

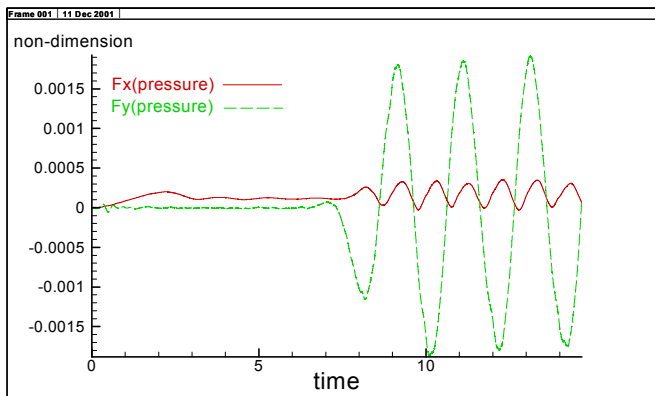


Fig.13 Time history of F_x F_y . $Fn=0.24$.
Roll amplitude is 10 degree. Pitch amplitude is 5.0

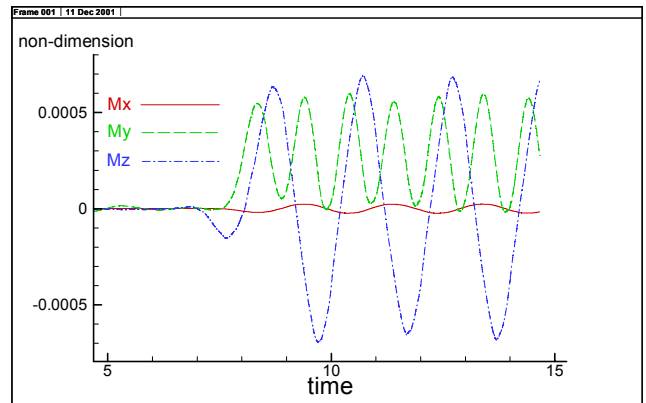


Fig.14 Time history of moment. $Fn=0.24$
Roll amplitude is 10 degree. Yaw amplitude is 5.0

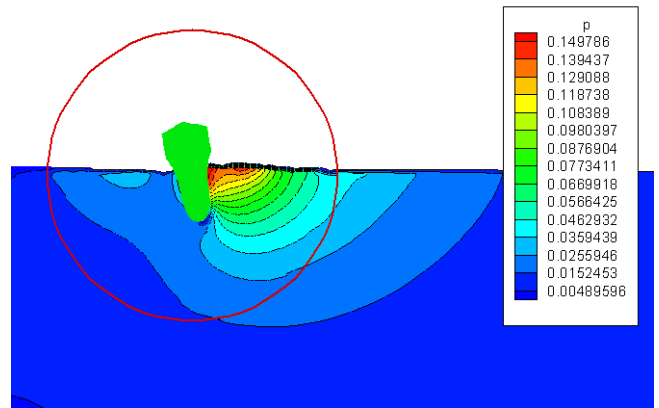


Fig.15 Pressure contour at Section=1.0. $Fn=0.24$
Roll amplitude is 10 degree. Yaw amplitude is 5 degree

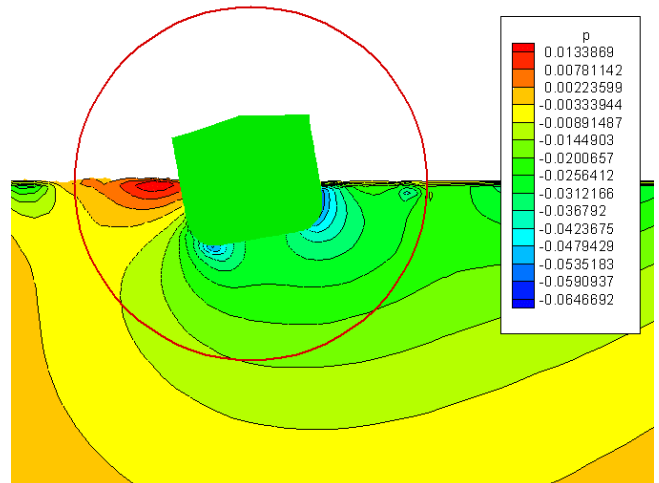


Fig.16 Pressure contour at section=6.0. $Fn=0.24$
Roll amplitude is 10 degree. Yaw amplitude is 5 degree

5.3 強制 Surge、Sway 運動シミュレーション

海洋を航行する船舶が旋回を行う場合や停止をする場合、必ず Surge 運動と Sway 運動を行う。ここでは、Surge と Sway の2つの方向に対して強制振動運動を行い船体周りの流場計算を行った。Surge を船長の1%の振幅、Sway を船長の1.2%の振幅、周期2で強制振動運動させた船体の周りの流場計算を行った。Table.6 に計算条件を、Fig.17 に X 方向の速度と Sway 方向の速度の時系列を、Fig.18~20 に計算結果を示した。

Table.6 Condition of calculation for forced Surge and Sway simulation

Grid Points	Inner 140 × 22 × 103 = 317420
	Outer 148 × 73 × 53 = 572612
Minimum grid space	0.001
Reynolds Number	1.0×10^6
Froude number	0.24
Dt	0.001
Time of acceleration	3.0
Amplitude of Surge	0.01
Amplitude of Sway	0.012
Period of oscillation	2.0

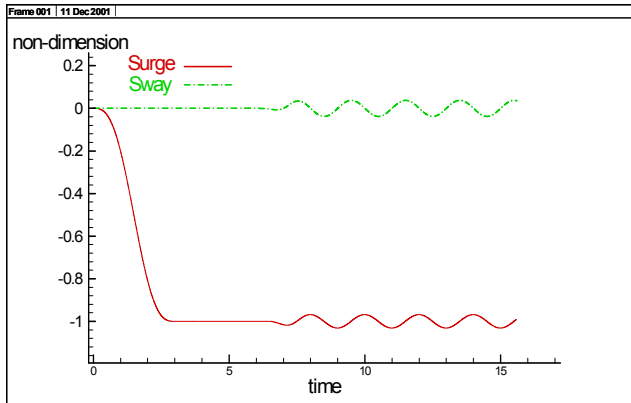


Fig.17 Time history of enforced surge and sway velocity. $F_n=0.24$

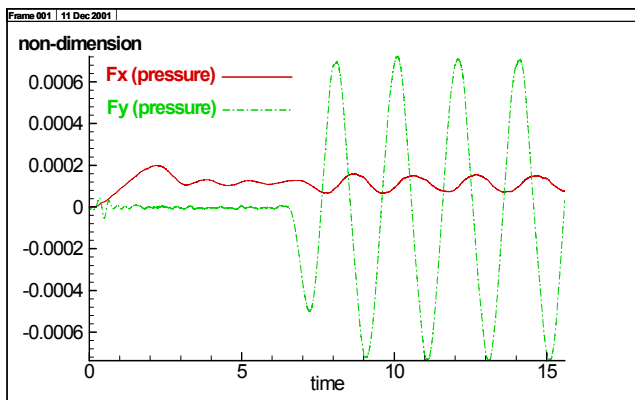


Fig.18 Time history of Fx and Fy. (Pressure)

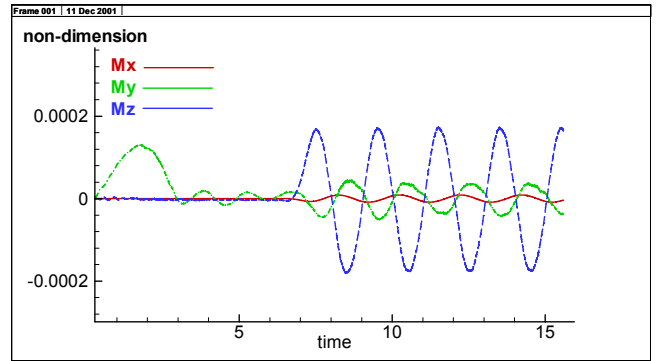


Fig.19 Time history of moment. $F_n=0.24$
Roll amplitude is 10 degree. Pitch amplitude is 5.0

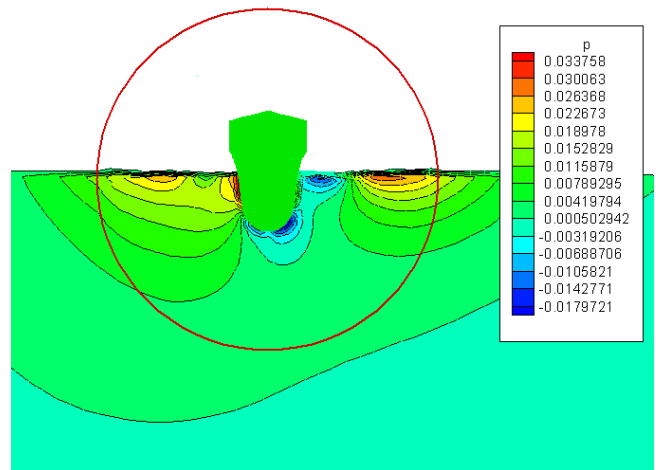


Fig.20 Pressure contour at section=1.5.

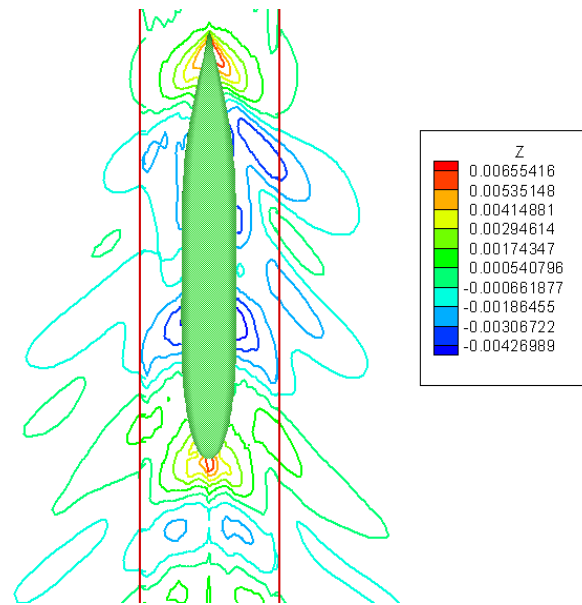


Fig.21 Instantaneous wave height contour map

5.4 強制 Heave、Pitch 運動シミュレーション

船舶が向かい波中を航行する場合、ある条件が重なるとスラミングと呼ばれる、Heave 運動と Pitch 運動が同時に起こる状況に陥ることがある。このスラミング状態では船首付近の船底に衝撃圧がかかり、船体の損傷を引き起こす事もある。ここでは、スラミング運動と密接に関連する Heave と Pitch の強制運動を行う。Table. 7 に計算条件を、Fig.22~24 に計算結果を示した。

Table.7 Condition of calculation for heave and pitch motion

Grid Points	Inner 140 × 22 × 103 = 317420
	Outer 148 × 73 × 53 = 572612
Minimum grid space	0.001
Reynolds Number	1.0×10^6
Froude number	0.24
Dt	0.001
Time of acceleration	3
Amplitude of Heave	0.006
Amplitude of Pitch	1.5degree
Period of oscillation	1

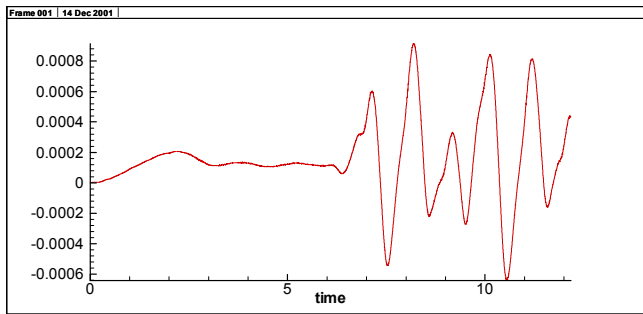


Fig.22 Time history of resistance due to pressure.

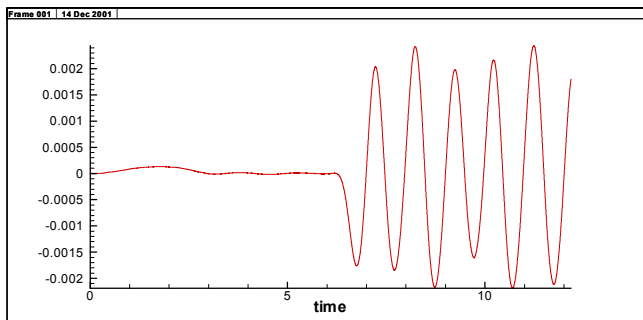


Fig.23 Time history of My(pitching) moment.

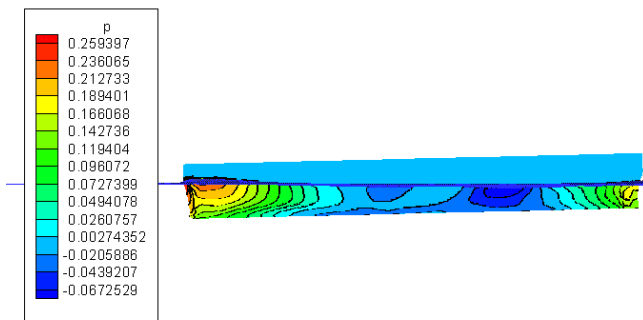


Fig.24 Pressure contour on hull surface. Pitch=-1.5

波浪中の船体運動シミュレーションを行う準備として、造波シミュレーションを行った。本論文では速度造波板を用いた。密度関数法を用いた自由表面を含む流体の造波機シミュレーションは Park et al⁽¹¹⁾⁽¹²⁾により、波崩れを伴う計算においても十分な精度があることが確かめられている。本研究では重合格子を用いており、格子の境界で波のエネルギーが伝播されているか、波の反射はないか確認した。計算条件を Table.に、計算結果を Fig.25,26 にしめす。

Fig の結果から、造波板で生成された規則波が内部格子に伝播された事が確認された。今後船体無しの状態での造波テストを行い、波が減衰することなく後方まで伝播されるかを確認する予定である。

Table.8 Condition of calculation for mechanical wave generating simulation

Grid Points	Inner 140 × 22 × 103 = 317420
	Outer 148 × 73 × 53 = 572612
Minimum grid space	0.001
Reynolds Number	1.0×10^6
Dt	0.001
Wave Length	1.1
Wave Height	0.022

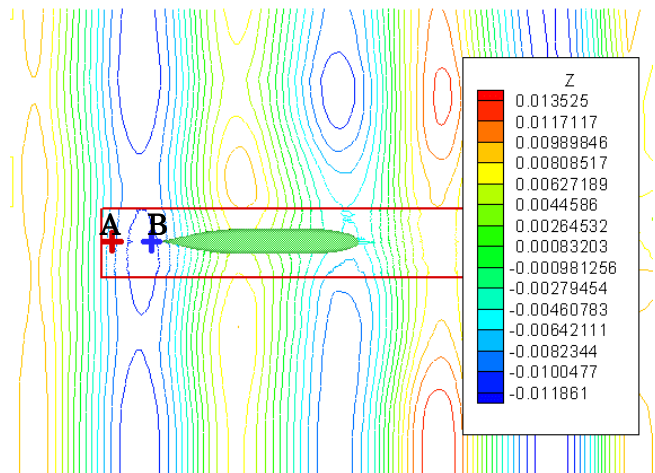


Fig.25 Instantaneous wave height contour

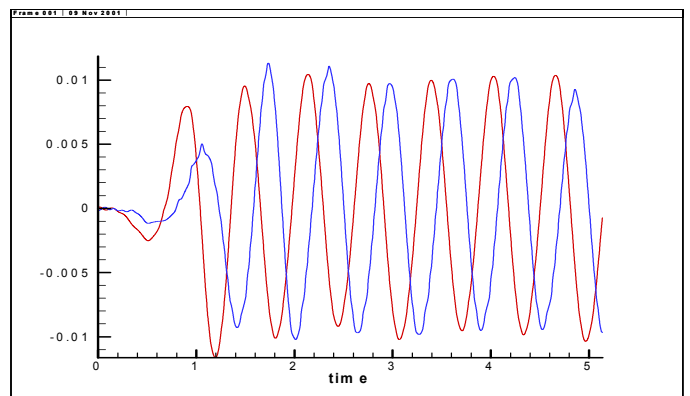


Fig.26 Time history of wave height at point A and B in Fig.25

6. 造波シミュレーション

7. 本研究の成果

本研究での成果を述べる。多重格子系を用いることにより、船体の6自由度すべての運動を取り扱う事が出来ることを示した。また、密度関数法を用いた自由表面を含む流体の造波機シミュレーションを行い、本造波法が複合格子系にも適用できることを示した。

8. 今後の展望

今後、流体計算と船体運動方程式のカップリングを行うことにより、波浪中船体運動を解析することの出来る CFD コードの開発を行っていく。

参考文献

- 1) Aerodynamics of High Speed Trains Passing by Each other
Kozo Fujii and Takanobu OGAWA
- 2) 船舶粘性流計算における、複合格子法の応用シミュレーション)
日本造船学会論文集 第174号 増子章
(第2報 船尾水平フィン付船体まわりの粘性流シミュレーション) 日本造船学会論文集 第180号 増子章
- 3) Chimera RANS Simulation of Nonlinear Waves Induced by a Heaving Cylinder
PRAHORO YULIJANTO NURTJAHYO, TEXAS A&M University
- 4) B-Spline Method and Zonal Grids for Simulations of Complex Turbulent Flows
Journal of Computational Physics 1999
G.Kravchenko, Parvis Moin and Karim Shariff
- 5) 3次元運動を行う船体の CFD シミュレーション技術の開発と応用
博士論文 1995年 東大 秋元博路
- 6) CFD シミュレーションによるレーシングヨットの波浪中運動性能評価法
修士論文 2000年 東大 後藤公仁
- 7) CFD による船舶の波浪中運動シミュレーション法
修士論文 1999年 東大 佐藤陽平
- 8) ブローチング現象発生機構に関する考察
日本造船学会論文集 1981年11月 元良誠三、藤野正隆、小柳雅志郎、石田茂資、島田和彦、牧岳彦
- 9) 小型船のブローチングに関する実験的研究
日本造船学会論文集 1981年11月 不破健、吉野泰平、山本徳太郎、菅井和夫
- 10) 多重格子法を用いた振動する円柱周りの流れの解析
第14回流体力学シンポジウム 小笠原和也 黒田成昭 電通大
- 11) Jong-Chun Park, Ming Zhu, Hideaki Miyata : On the Accuracy of Numerical Wave Making Techniques, J. Soc. Naval Arch. Japan, Vol. 173, pp.35-44 (1993)
- 12) Jong-Chun Park, Hideaki Miyata, : Numerical Simulation of the 2D and 3D Breaking Waves by Finite-Difference Method., J. Soc. Naval Arch. Japan, Vol. 175, pp.11-24 (1994)