帆走艇の斜め波中 3 自由度運動の数値シミュレーション

正員 朴 鍾 千*
大鋸 拓 海**

正員 宮 田 秀 明*
後藤田 公 仁***

Motion Simulation of a Sailing Boat in Oblique Waves with Three Degrees of Freedom

by Jong-Chun Park, *Member*
Takumi Ooga

Hideaki Miyata, *Member*
Koji Gotoda

Summary

A finite-volume method is developed for the motion simulation of a sailing boat in oblique waves. The solution procedure for the Navier-Stokes equation is connected with that for the motion equations in three degrees of freedom, that is, pitch, heave and roll motions. The O-H type boundary-fitted coordinate system is employed and the motion of the boat is represented by external forces in the Navier-Stokes equation. A unique technique is to rotate the free-surface in accordance with the pitch and roll motions of the boat. The availability of the present method is demonstrated by the simulation of America's Cup class sailing boat with and without keel and sail.

1. 結 言

計算機の進歩によってシミュレーション工学が進展している。このうち運動物体のシステムデザイン・バイ・シミュレーションは物理現象の理解をベースにするより有効なデザイン手法である。近年、コンピューター能力の急速かつ実質的な向上と数値シミュレーション技術の発達に伴い、低コストと高効率のシミュレーションによるアプローチは工学の多くのシステム設計分野においてその重要性が高まっている。特に、船舶という輸送システムは大規模で単価が高いため試作が許される場合は極度に限定されるのでシミュレーションによる設計の重要性は最も高いと言える。

凡そ 20 年前に、東大の宮田グループを中心にヴァーチャル空間における船の 3 次元造波シミュレーション^{1,2)}が可能となつて以来、多くのカスタマイズされた手法^{1,3,4)}が開発され順次実務的応用に供されてきた。しかし、これらのほとんどは一定速度で前進している船体に関

するものであり、船舶にとって重要な緒性能のうち主として抵抗性能と関連した流体现象だけを対象とするものである。

船舶は操縦や波などの外力によって時々刻々姿勢を変えたり複雑な 3 次元運動を行うものであり、このような運動性能の予測は安全性の確保を中心とした目的のために大変重要である。

2000 年のアメリカズカップ・レーシングヨットの設計・開発には PPS(Performance Prediction Simulation)⁵⁾というシミュレーターが上手く活用され、性能開発に大きな成果を挙げてきた⁶⁾。これはヴァーチャル・リアリティ技術を実現することに一歩踏み出した一例である。PPS は、非定常 CFD シミュレーションと運動方程式を連成させることにより姿勢変化の取扱いが可能な動的 CFD シミュレーターである。しかし、この手法では船体運動に伴う自由表面の表現に変形格子法を導入しており、6 自由度の運動が取り扱える反面、波浪中の大振幅運動や極端に非線形な船体運動を取扱うことはほぼ不可能である。

そこで、上述した PPS の短所を補うものとして、佐藤ら⁷⁾は船体固定格子系と密度関数法の組み合わせによって船体運動をシミュレーションすることに成功し、碎波を伴う非線形な船体大振幅運動のシミュレーションの

* 東京大学大学院工学系研究科

** モルガン・スタンレー・ディーン・ウィッター
(研究当時 東京大学大学院工学研究科)

*** ゴールドマン・サックス
(研究当時 東京大学大学院工学研究科)

可能性を示した。この手法では、船舶のスラミングやブローチング、転覆などの極端に非線形な運動を取り扱うために、自由表面の運動学的条件を密度関数法により満足させている。この方法はスラミングを起こす直前までの正面規則波中の商船（シリーズ 60 船型）の 2 自由度運動（ヒープ、ピッチ）に適用できることが示された。

本研究では、この手法を発展させ、波浪中 6 自由度問題に応用する一つの過程として、斜め波中の問題、ロールを含んだ 3 自由度問題への対応を主眼とした発展型の手法について述べる。造波法の工夫、自由表面の船体回転運動に従って回転させる方法の開発が主眼となる。この新手法を、アメリカズカップ艇の斜め波中運動に適用し、応用性を評価することとした。

Fig. 1 O-H type grid system.

2. 数値シミュレーション法

2.1 格子系

本研究では、Fig.1 に示すように、一般適合座標系において、レーシングヨットのハルの形状に適合する O-H 型境界適合格子を使用する。これは波を生成するための造波機を計算格子上に配置するのに有利であるからである。計算空間における座標 (ξ, η, ζ) として、 ξ は船の長手方向に、 η はラジアル方向に、 ζ はガース方向に設定する。レーシングヨット周りの流体計算と 6 自由度の運動方程式の計算は船体固定座標系で行い、船体重心の軌跡、船体の姿勢、入射波の生成条件の導出には空間固定座標を用いる。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。

自由表面運動の表現には非線形性の強い自由表面変形への対応を考慮して後述する密度関数を用いるが、密度関数の輸送方程式を精度良く解くために、水面付近に常に密な格子を配置することが要求される。このため、

毎タイムステップにおいて格子の自由表面クラスタリング (clustering) をラジアル方向に対して施している。これは、レーシングヨットが ± 30 度ほどのヒール運動を行うとき、船体固定座標系の格子に対して水面が大きく変化することとなり、 ξ 方向の格子数を増加させず、精度良く計算するためである。格子の自由表面クラスタリング (clustering) には、移動格子法を導入する。Fig.2 にはヒール角が 0 度と 20 度の場合における格子の自由表面クラスタリングの一例を示す。

Fig.2 Grid clustering in the vicinity of water surface and hull, on the upright condition (above) and the heeled condition with 20 degree (below).

2.2 運動シミュレーション法

本計算手法は、非圧縮粘性流体運動と剛体運動の連成問題を取り扱うものであり、WISDAM- V_{motion} と名付けられている。

計算格子が移動する場合、船体固定座標系における非圧縮性流体の Navier-Stokes 方程式 (運動量保存則) と連続の式は、次式で定義される。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u} - \mathbf{v}) \mathbf{u} = -\nabla \phi + \frac{1}{\text{Re}} \nabla \cdot [\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T] - \overline{\mathbf{u}' \mathbf{u}'} + \mathbf{K} \quad (1)$$

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

ここで、 $\mathbf{u}$ は船体固定座標における流体の速度ベクトル、 $\mathbf{v}$ は計算格子の移動速度、 ϕ は圧力から静水圧を差し引いたものの $\phi = P + g\zeta$ として定義し、 Re はレイノルズ数、

$\overline{\mathbf{u}'\mathbf{u}'}$ はレイノルズ応力である。また、 $\mathbf{K}$ は次式のような慣性力 $\mathbf{F}_V$ を含んだ外力であり、本研究では $\mathbf{K}=\mathbf{F}_V$ としている。

$$\frac{\mathbf{F}_V}{\rho} = -2\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{u} - \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) - \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} \times \mathbf{r} - \frac{d\mathbf{V}_s}{dt} \quad (3)$$

上式右辺の項は順にコリオリの力、遠心力、角加速度による慣性力、並進加速度による慣性力を表す。なお、 $\mathbf{V}_s$ は船体固定座標の中心における船速ベクトル、 $\boldsymbol{\omega}$ は角加速度、 $\mathbf{r}$ は流体の位置ベクトルを意味する。

上記の支配方程式は有限体積法により離散化され、改良 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。

対流項の離散化には 3 次精度の MUSCLE 型上流差分を用い、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。

船体運動と連携した流体流場の解を求める一連の計算手順を Fig.3 に示す。船体運動は、N-S 方程式を解く流場の計算から求めた圧力、摩擦力を船体浸水表面上で積分しそこから得られる外力を用いて、剛体の運動方程式を毎時間ステップにおいて解くことにより求める。

Fig.3 Block diagram for the motion simulation in waves.

2.3 密度関数法

本研究では船舶のスラミングやブローチング、転覆などの極端に非線形な大振幅運動を取り扱うために、自由表面の運動学的条件を密度関数法により満足させる。つまり、自由表面上も含めた全計算領域で定義される密度関数 M_ρ について、自由表面を挟む流体での密度関数値をそれぞれ $M_{\rho(1)}$, $M_{\rho(2)}$ と定義したときの $M_\rho=0.5(M_{\rho(1)}+M_{\rho(2)})$ で与えられる等値面を自由表面とする。運動学的条件の取扱いのために用いた密度関数法は、基本的に Kawamura et. al.⁸⁾ の用いた方法と同様である。本研究では、 $M_{\rho(1)}=1$ を水、 $M_{\rho(2)}=0$ を空気として定義している。

非圧縮流体非定常流の場合には、密度関数 M_ρ の輸送方程式は次式となる。

$$\frac{DM_\rho}{Dt} = \frac{\partial M_\rho}{\partial t} + \nabla \cdot [M_\rho(\mathbf{u} - \mathbf{v})] = 0 \quad (4)$$

各時間ステップでの自由表面位置は(5)式を時間と空間で積分して得られる密度関数 M_ρ の分布を用い、 $M_\rho=0.5$ の等値面として陰的に与えられる。(5)式を離散化すると次式となる。

$$\frac{\partial M_\rho}{\partial t} = \sum_i [M_\rho(\mathbf{u} - \mathbf{v}) \cdot \mathbf{S}^i] \quad (5)$$

ここで、 $\mathbf{S}^i$ はコントロールボリュームの各境界の面積ベクトルを示す。また、密度関数流束 $M_\rho(\mathbf{u} - \mathbf{v}) \cdot \mathbf{S}^i$ の算出には MUSCLE 型の 3 次上流差分を、時間微分項の評価には 2 次精度の Adams-Bashforth 法を用いている。

一方、自由表面の動力学的条件については自由表面上への速度の外挿と“irregular star”法を用いて圧力のポアソン方程式の境界条件によって満足される。自由表面上における表面張力と粘性条件が無視できると仮定する場合自由表面上の圧力 P は 0 となるので、自由表面上に定義された静水圧分を除いた圧力 ϕ は、

$$\phi = gz \quad (6)$$

と定義される。なお、 z は静水面から ϕ が定義されている自由表面までの距離である。

2.3 その他の境界条件

物体表面における速度の境界条件については、no-slip 条件を与える。圧力および密度は、物体法線方向のゼロ勾配として等値外挿する。

乱流モデルとしては、Takada et. al.⁹⁾ が採用したダイナミック SGS モデルを用い、船体表面における摩擦応力の評価には壁法則を適用している。Germano et. al.¹⁰⁾ により提案されたダイナミック SGS 乱流モデルでは、計算格子に応じて仮定されるグリッドフィルタに対して、それよ

り大きなサイズのテストフィルタを導入して時々刻々変化するSGSモデル定数を評価している。

外部境界の場合、O-H型境界適合格子系では円筒部に相当し、その境界の圧力は深水中(静水面より距離0.5以上深い境界)ではディリクレ的に0と置き、浅水中(静水面より距離0.5以下の境界)ではノイマンの条件として等値外挿とする。速度は、1つ内側のセルから等値外挿を行う。

流出境界においては、波の反射などによる影響を最小化するために、数値減衰領域¹¹⁾を付加している。

流入境界においては一様流と入射波条件を施す場合とで異なる取扱いをする。前者の場合、圧力に関しては静水压を差し引いた圧力 ϕ は一様流なので0となる。密度は、静水面の高さと同じとなるようにディリクレ的に与え、流体速度 $\mathbf{u}(\mathbf{r}_0)$ は、次式のように与える。

$$\mathbf{u}(\mathbf{r}_0) = -\mathbf{V}_s - \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}_0 \quad (7)$$

一方、流入境界において入射波条件を与える場合、入射波は深水波理論の仮定に基づいた正弦波として造波させる。空間固定座標 (x, y, z) において、波高 ζ および速度 (U_{iw}, V_{iw}, W_{iw}) は次のように定義される。

$$\zeta = \zeta_a \cos[k(x - y \tan \theta) - \sigma t] \quad (8)$$

$$U_{iw} = c \zeta_a k e^{kz} \cos[k(x - y \tan \theta) - \sigma t] \cdot \cos(\theta) \quad (9a)$$

$$V_{iw} = c \zeta_a k e^{kz} \cos[k(x - y \tan \theta) - \sigma t] \cdot \sin(\theta) \quad (9b)$$

$$W_{iw} = c \zeta_a k e^{kz} \sin[k(x - y \tan \theta) - \sigma t] \quad (9c)$$

ここで、 ζ_a は振幅、 k は波数、 σ は角速度、 c は波の位相速度($c^2 = g/k$)である。また、 θ は波の入射角であり、向波は 180° となる。空間座標上で定義した(8)式と(9)式を船体固定座標に座標変換し、計算領域内に定めた造波領域に導入する。速度に関してはベクトル量であるので、座標変換には空間固定座標からみた船体固定座標の原点の速度と角速度が必要になる。船体固定座標上での流体の速度を $\mathbf{u}$ 、(9)式で定義した (U_{iw}, V_{iw}, W_{iw}) を船体固定座標と空間固定座標のオイラー角で回転したものを $\mathbf{U}_{iw}$ 、流体の速度定義点の位置を船体固定座標上で $\mathbf{r}$ 、空間固定座標からみた船体固定座標の原点の速度と角速度をそれぞれ $\mathbf{V}_0$ と $\boldsymbol{\omega}_0$ とすると、座標変換は

$$\mathbf{u} = \mathbf{U}_{iw} - \mathbf{V}_0 - \boldsymbol{\omega}_0 \times \mathbf{r} \quad (10)$$

となる。

2.5 セールとキールのモデル

より実船に近い状態でのレーシングヨットの性能評価には、セールやアペンデージなどをハルと同時に数値計算で解くことが望ましい。マルチブロック法による複雑な形状の表現も可能ではあるが、現在の段階では精度

の確保に技術的困難を伴い、数値計算に要するCPU時間などを考えれば応用を考えた現実性に欠けるだろう。そこで、本研究においてはセールやアペンデージについて、最新の実験より得られたモデル式を外力として与えることとした。キール、ラダーの揚力係数と抗力係数のモデル式をそれぞれ(11)式、(12)式に、セールの揚力係数曲線、揚抗比曲線のグラフをFig.5に示す。

$$\begin{cases} C_{L|_k} = A \cdot f(\alpha, \beta) \cdot f(\phi) \\ C_{D|_k} = A \cdot f(C_{L|_k}) + f(C_{L|_k}, R_k) \cdot f(\phi) \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} C_{L|_r} = A \cdot f(\delta, \alpha, \beta) \cdot f(\phi) \\ C_{D|_r} = A \cdot f(C_{L|_r}) + f(C_{L|_r}, R_r) \cdot f(\phi) \end{cases} \quad (12)$$

上式において、 A は定数、 β はリーウエイ角、 α はタブ角、 δ はラダー角、 ϕ はヒール角、 R_k と R_r はそれぞれキールとラダーのアスペクト比を表す。キールやラダーなどのアペンデージについては、二次元翼のモデルに三次元影響を考慮し、実験による修正を加えている。セールについては、時間ステップ毎にFig.4の実測データから相対風向に対する揚力係数と揚抗比を求めるようになっており、計算の際にはヒール角の姿勢変化による影響も考慮するようになっている。

Fig. 4 C_L and L/D of sail vs. apparent wind angle [deg.].

3. 船体単独のシミュレーション

3.1 シミュレーションの条件

アペンデージもセールもないヨット(naked hull)が直立状態で斜め波中(150°)を進行しながら3自由度運動するシミュレーションを行った。但し、スウェーとヨー、サージ運動は拘束してある。計算条件をTable 1に示す。波の波長別に3種類の計算を行った。Case Iは波長・船長比が0.77、Case IIは1.15、Case IIIは1.54である。Case Iについては船体運動モードの1つの周期が非常に長かったため、計算時間を59までとした。Case II、IIIについては33まで計算を行った。船体は静止状態から無次元時間1まで加速され、最終的にフルード数0.366

(9.5knots) に達する。無次元時間2から船体の運動を開始し、無次元時間3からは造波を開始する。シミュレーション対象船型は2000年のアメリカズカップのために設計開発されたものの、デストロイヤーバウ形状の船型を用いる。船型の特徴はTable 2に示し、使用した格子系をFig. 5に示す。

Table 1 Condition of computation.

Length of wave, $L_{\text{wave}}/L_{\text{ship}}$	0.77	1.15	1.54
Height of wave, H [mm]	700		
Incidence wave angle, θ [deg.]	150		
Grid points	100×30×64 (=192,000)		
Computational domain	L=4.1, Radius=1.8		
Minimum grid space, ξ^2	1.5×10^{-2}		
Minimum grid space, ξ^1	3.0×10^{-3}		
Reynolds number	1.0×10^6		
Froude number	0.366		
Total time of simulation	59	33	33
Starting time for acceleration	1		
Starting time for motion	2		
Starting time for wave making	3		
Maximum of Δt	1.0×10^{-3}		
CFL number	0.5		
Z coordinate of the C.G.	-1.9		

Table 2 Principles of the IACC yacht

Bow shape	Destroyer
LWL [m]	19.17
BWL [m]	3.407
Draft [m]	0.785
Wetted surface [m ²]	57.73

Fig. 5 Grid systems on a vertical plane (left) and a horizontal plane (right).

3.2 結果と討論

密度関数法による多方向波の数値造波シミュレーションの精度については Park et. al.^{12,13)}によって十分検証

されており、本研究の波浪条件においても Fig.6 に示すように妥当な結果が得られている。但し、Fig.6 の A,B,C,D はそれぞれ造波板付近、船首、ミッドシップ、船尾における波高計の位置をあらわす。

Fig.7 と Fig.8 には Case I, II, III について、波の波長別にロールとピッチ角の時系列をそれぞれ示す。また、それぞれの時系列のフーリエ変換から得られた固有周期を Table.3 に示す。ただし、それぞれの周波数における振幅の割合は括弧の中に示す。Case I ではピッチ運動に3種類の周期が、Case II ではロール運動に2種類の周期がそれぞれ見られ、Case III ではロール、ピッチ運動に1つの周期が見られる。これらの周期は波の周期に比べほぼ整数倍になっていることが分かる。

Fig.9 には、Case I, II, III の船体運動の鳥瞰図とそれに対応するロールとピッチ運動のポアンカレ写像図を示す。全ての場合において、ポアンカレ曲線はある範囲に収まっており、それにより異なる波浪条件下における船体の運動特性が理解できる。これらの数値シミュレーションによって正面斜め波中の運動モードが波長によって著しく異なることが良く理解できる。

Table 3 Periods of roll and pitch.

L_{ship} [m]	T_{wave} [s]	T_{heel} [s]	T_{pitch} [s]
14	0.39	0.78	0.40(16.1%), 0.79(12.4%), 40.5(71.6%)
21	0.53	1.00(20.0%), 0.53(80.0%)	0.54
28	0.65	0.65	0.65

Fig.6 Numerical results of oblique wave generation test.

Fig.7 Time history of simulated roll angles for Case I (top), Case II (middle), and Case III (bottom).

Fig.8 Time history of simulated pitch angles for Case I (top), Case II (middle), and Case III (bottom).

Fig.9 Motion and wave pictures and Poincare mapping of pitching and rolling for three wave-length conditions 0.77, 1.15 and 1.54 from above. The wave incident angle is 150 degree.

4. セールとキールを考慮したシミュレーション

4.1 シミュレーションの条件

計算対象船型として 2000 年アメリカズカップで開発された日本艇の中で船型が同一で幅の異なる二種類の船型 (Yacht-A と Yacht-B) を用い、セール・キールによる力とモーメントを考慮した (2.5 のモデルを船体外力として付加した) 風上帆走シミュレーションを行った。両船型共にスプーンバウで、Yacht-B の方が Yacht-A よりおよそ 8.0%幅が細い船型である。ただし、運動に関してはロール、ピッチ、ヒープの 3 自由度運動を仮定している。二つの船型の主要目を Table 4 に、計算条件を Table 5 に示す。基本的な計算条件は前章の船体単独の場合と同様である。

Table 4 Principles of the IACC racing yachts.

Yacht-A	Principles	Yacht-B
Spoon	Bow shape	Spoon
18.398	LWL [m]	18.568
3.705	BWL [m]	3.407
0.825	Draft [m]	0.888
56.96	Wetted surface [m²]	54.777

Table 5 Condition of computation.

Length of wave, L_{wave} [m]	14	21	28
Height of wave, H [mm]	400		
Incidence wave angle, θ [deg.]	150		
Leeway angle [deg.]	2		
Angle of trim-tab [deg.]	6		
Angle of rudder [deg.]	6		
True wind velocity [knots]	10		
True wind angle [deg.]	36		

4.2 結果と討論

ロール角の平均値および振幅をそれぞれ Fig.10 と Fig.11 に、ピッチ角に対してはそれぞれ Fig.12 と Fig.13 に示す。また、二つの運動の位相差を Fig.14 に示す。いずれの場合も、ロール角、ピッチ角ともに幅の狭い Yacht-B の方が Yacht-A に比べて平均値や振幅とともに大きくなっていることが分かる。ロールとピッチ運動の連成という観点からみると、二つの運動の位相差には船型差はほとんど見られず、波の波長すなわち波との出会い周期に依存していることが分かる。

Fig.15 は波長 28.0[m]の条件下でセール・キール力を考

慮することにより得られたロール角の時間変動を一例として示す。船体運動が開始する $t=2$ からは船体単独のシミュレーションに比べてセール・キールによる力のバランスによって徐々にロール角が発生し、 $t=5$ 以降よりもはや準定常状態の運動をしている様子が見られる。これは船体単独のシミュレーション結果に現れた長周期の運動モードが現れず、より実際のヨットの運動に近い結果となっている。セール、キール、舵の三つの揚力面が船体運動に強い減衰効果を与えていることが分かる。

Fig.16 には波長 28.0[m]での船体に働く抵抗とヨー・モーメント係数の時系列から得られた平均値の比較を示す。抵抗は幅の細い Yacht-B の方が小さく、回頭モーメントも Yacht-B の方が大きくなっていることが分かる。すなわち、それは舵角を大きく取るにつながら、ラダー抵抗の増加が予測されることになり、総合性能の評価は難しい。

Fig.17 は船体運動の準定常状態のある 1 周期間の様子をアニメーションしている。ロールとピッチ運動の連成が上手くシミュレーションされていることが分かる。

以上のことから、セール・キール力を考慮した斜め波中ヨットの運動シミュレーションを行うことにより、平水中における性能の優劣評価は波浪中においては逆転の可能性があると考えられ、このようなシミュレーションの有効性が理解できる。

Fig.10 Averages of rolling angle.

Fig.11 Amplitudes of rolling angle.

Fig. 12 Averages of pitching angle.

Fig. 13 Amplitudes of pitching angle.

Fig. 14 Phase differences between roll and pitch motions.

Fig. 15 Time history of computed roll motion for Yacht-A (above) and Yacht-B (below) in the wave condition of $L_{\text{wave}}=28[m]$, $H=400[mm]$ & $\theta=150[\text{deg.}]$.

5. 結 言

1. 斜め波中の3自由度運動シミュレーション法を開発した。ロールを含む大角度運動を可能にした点が大々的な特徴である。

2. 本法をアメリカズカップ艇に応用し、船型差、波長さ、アペンデージの有無が運動に与える影響を知ることができることを証明した。多様な応用が期待されることが考えられる。

Fig. 16 Averages of resistance and yaw-moment.

謝 辞

本研究の一部は文部省科研費と LINEC 研究グループの援助のもとに行われた。関係者各位にお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Miyata, H., Nishimura, S. and Masuko, A., "Finite difference simulation of nonlinear waves generated by ship of arbitrary three-dimensional configuration", J. Comput. Physics, Vol.60, No.3, pp.391-436, 1985.
- 2) Miyata, H. and Nishimura, S., "Finite-Difference Simulation of Nonlinear Ship Waves", J. Fluid Mech., Vol.157, 1985.
- 3) Godama, Y., "Computation of 3-D Incompressible Navier-Stokes equations for flow around a ship hull using an implicit factor method", Osaka International Colloquium on Ship Viscous Flow, Osaka, 1985.
- 4) Miyata, H., Zhu, M. and Watanabe, O., "Numerical Study on a Viscous Flow with Free-Surface Waves About a Ship in Steady Straight Course by a Finite-Volume Method", J. Ship Research, Vol.36, No.4, pp.332-345, 1992.
- 5) Akimoto, H., "Finite-Volume Simulation of the Flow Around a Sailing Boat with Unsteady Motion", J. Soc. Naval Arch. of Japan, Vol.181, pp.35-44, 1997. (in Japanese)
- 6) Miyata, H. and Gotoda, K., "Hull Design by CAD/CFD Simulation", The 23rd Symposium on Naval Hydrodynamics, pp.83-92, Val de Reuil, France, 2000.
- 7) Sato, Y., Miyata, H. and Sato, T., "CFD Simulation of 3D Motion of a Ship in Waves: Application to an Advancing Ship in Regular Heading Waves", J. Marine Science and Technology, Vol.4, 108-116., 1999.
- 8) Kawamura, T. and Miyata, H., "Simulation of Nonlinear Ship Flow by Density-Function Method (Second Report)", J. Soc. Naval Arch. of Japan,

- Vol.178, pp.1-7, 1995.
- 9) Takada, N., Miyata, H. and Sato, T., "CFD Simulation of 3-dimensional Motion of a Vehicle with movable wings (Application to the keel of a racing yacht)", J. Soc. Naval Arch. of Japan, Vol.184, pp.37-45, 1998. (in Japanese)
 - 10) Germano, M. et al., "A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model", Phys. Fluids A, Vol.3, No.7, pp.1760-1765, 1991.
 - 11) Park, J.C. and Miyata, H., "On the Accuracy of Numerical Wave Making Techniques", J. Soc. Naval Arch. of Japan, Vol.173, pp.35-44, 1993.
 - 12) Park, J.C., Kim, M.H. & Miyata, H., "Fully Nonlinear Free-Surface Simulations By a 3D Viscous Numerical Wave Tank", Int. J. for Numerical Methods in Fluids, vol.29, pp.685-703, 1999.
 - 13) Kim, M.H., Niedzwecki, J.M., Roesset, J.M., Park, J.C., Hong, S.Y. & Tavassoli, A., "Fully Nonlinear Multidirectional Waves By a 3D Numerical Wave Tank", J. of Offshore Mech. and Arctic Eng., Transactions of ASME, Vol.123, pp.1-10, 2001.

Fig.17 Front view of hull motion in oblique waves for Yacht-A (left) and Yacht-B (right), in the wave condition of $L_{\text{ship}}=28[m]$, $H=400[mm]$ & $\theta=150[\text{deg.}]$.