CFD 航走シミュレーションによる帆走艇の設計法

(第2報)

学生員 片岡 秀太郎* 正員 宮田 秀明**
正員 金井 亮 浩**

Design Method for Sailing Boats by CFD Performance Simulation (Second Report)

By Hidetaro Kataoka, *Student Member* Hideaki Miyata, *Member*
Akihiro Kanai, *Member*

Summary

A new technique for PPS (performance prediction simulation) to design sailing boats is developed. The performance of a sailing boat with 6 degrees of freedom is predicted. The boat sails in the simulation with automatic steering to get steady state and with automatic sail trimming to get better VMG (Velocity Made Good). With this technique the steady performance of sailing boats is predicted with sufficient accuracy on various conditions. This system is applied to the design procedure for a IACC (International America's Cup Class) sailing boat for which the steady sailing attitude plays an important role for the sailing performance.

1. 序 論

水中翼船やプレジャーボート、ヨットのように、航走時に大きな姿勢変化を伴う船舶は、その姿勢変化に応じて航走性能が大きく変化する。このため、これらの船型開発には船体、水中翼などの付加物の流力特性や推進器の性能等の各要素性能だけでなく、それらのバランスによる航走時の状態、姿勢変化を正しく評価した上での総合性能予測を行うことが重要である。

特にレーシングヨットは、複雑なシステム構成を持ち、各要素が姿勢、状態変化を通して互いに密接に他の要素性能に影響を及ぼし合うため、システム全体のバランスが総合性能に与える影響は極めて大きい。

現在、ヨットの性能予測には、VPP (Velocity Prediction Program) が用いられている。VPP は模型実験や数値解析を用い、船体、キール、舵、セールといった各要素毎の姿勢別の特性データ求め、モデル化して釣り合い方程式を解

くことより全体としての性能の予測を行う。しかしながら航走時の姿勢が未知であるために、特性データを得るためには、膨大な点数の実験及び計算が必要であり、また、要素性能のモデル化を多用するため精度良く性能予測を行うのが難しい。これらの理由により、航走状態、姿勢の予測が非常に困難であるため、総合的な性能評価は極めて難しいのが現状であり、ヨットの新船型開発のためには、十分な精度と速度を持つ設計支援システムとしての新しい性能予測法の開発が待たれている。

新しい性能予測法の構築が可能となる大きな要因として、船体周りの流場解析を行う CFD 技術の発展がある。これまで、定常航走状態の船体周りの流場に関しては次のような取り組みが見られる。Miyata ら⁵⁾⁶⁾の TUMMAC-4 法は船体の造る非線形波を矩形格子系によって捕らえることを可能にし設計に多用されている。Zhu ら⁷⁾は物体適合格子と有限体積法による WISDAM-5 法を用いて船体の境界層の推定精度を向上させ、その他にも多数の方法が開発されてきた。また、移動変形する物体への対応としては、大森ら⁸⁾はタンカーの操縦問題を扱った。そして、レーシングヨットへの応用例としては、3 自由度運動を解析可能な PPS (Performance Prediction Simulation)^{2),3)}がある。前報³⁾では、この 3 自由度定常シミュレーション (PPS 1.0) の構築と、その CAD との結合による新しい設計開発法に

* 東京大学大学院工学系研究科船舶海洋工学専攻

** 東京大学大学院工学系研究科

について説明を行った。

本研究では、この PPS 1.0 に新しい技術を導入して、計算機内でヨットの運動自身を直接シミュレートし、操船を行うことにより 6 自由度の定常帆走状態を再現する、いわば一種のバーチャルリアリティの数値帆走シミュレーションを構築する。これにより、ヨットの姿勢、状態の変化を含めた総合的な性能予測を行う事が可能となる。また、実際の定常帆走状態を再現できるためポラダイアグラムを作成することができ、これまで、少数の代表的な状態の性能評価を基に行っていた設計法から、幅広い領域での性能評価を基にした設計法へとレベルアップすることができ、PPS を用いた新船型設計法に関しては前報で説明を行ったので本報では、性能評価の新しい解析手法を中心に説明を行う。

このような性能評価システムは、性能向上のため非常に多様なバリエーションを検討しなくてはならないにもかかわらず、実船建造隻数に制限がある IACC (International America's Cup Class) 級ヨットの設計等に極めて有用である。このため、本研究ではこの数値帆走シミュレーションを IACC 級ヨットの開発に応用した例について述べる。

2. PPS

PPS は船体流体力の非定常 CFD 計算と 6 自由度の船体運動計算を連成して解く船舶設計用ソフトである。これにより非定常航走状態の再現、解析が可能で、実際の航走状態をシミュレートすることにより、船舶の流体力学的特性を総合的に評価可能となる。この PPS の基となる CFD ソフトには、WISDAM-7 法²⁾を用いる。

2.1 WISDAM-7 法

WISDAM-7 法は非定常非圧縮粘性流の Navier-Stokes 方程式を解くもので、空間に関する離散化に有限体積法を用い、非定常運動を MAC 法のアルゴリズムで解いている。さらに移動格子系を用いており、移動境界問題を取り扱うことが可能である。格子系は O-O 格子で、物体と自由表面の双方に適合した境界適合格子を用いる。本研究では、格子数 4 万 5 千、レイノルズ数 10 万で計算を行う。

また、WISDAM-7 では、6 自由度の船体運動を全て格子の変形によって表現するため、Navier-Stokes 方程式と連続の式は、コントロール・ボリュームが時間的に変化することを考慮して定式化される。コントロール・ボリュームの体積を $V(t)$ 、それを包む閉曲面を $S(t)$ 、流速ベクトルを $\mathbf{u}$ 、コントロール・ボリュームの表面の移動速度ベクトルを $\mathbf{v}$ とすると

$$\frac{d}{dt} \int_{V(t)} \mathbf{u} dV = \int_{S(t)} \bar{\mathbf{T}}' \cdot d\mathbf{S} \quad (1)$$

$$\frac{dV(t)}{dt} = \int_{S(t)} (\mathbf{u} - \mathbf{v}) \cdot d\mathbf{S} = 0 \quad (2)$$

ここで、 $d\mathbf{S}$ は、面積ベクトルで微小面積要素 dS に、閉曲

面 S の外向き法線ベクトル $\mathbf{n}$ を掛けたものである。また、 $\bar{\mathbf{T}}'$ は、コントロール・ボリュームの時間変化を考慮した場合の応力テンソルで移流項の移流速度の部分にのみ変更が加わる。 $\bar{\mathbf{T}}'$ は次式のように表される。

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{T}}' &= -(\mathbf{u} - \mathbf{v})\mathbf{u} - P\bar{\mathbf{I}} + \frac{1}{\text{Re}}[\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T] + \overline{\mathbf{u}'\mathbf{u}'} \\ &= \bar{\mathbf{C}} + \bar{\mathbf{P}} + \bar{\mathbf{D}} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $\bar{\mathbf{C}}$ は、移流項を、 $\bar{\mathbf{P}}$ は、圧力項を、 $\bar{\mathbf{D}}$ は、拡散項を、 $\overline{\mathbf{u}'\mathbf{u}'}$ は、乱流応力項を意味する。

これらの運動量と質量の保存則を満足させながら時間進行で MAC 法のアルゴリズムを用いて解く。

2.2 PPS の構成

PPS では、Fig. 1 に示すように、船体の CFD 計算から得られた力、モーメントとセイル、キール、舵に対するモデル式から得られた力、モーメントを運動方程式に入力する。この結果船体の運動、姿勢の時間変化が得られる。これらを基に、船体の姿勢変化による水面下の形状変化と自由表面の変形に伴う格子変形が行われ、新しい状態の船体流体力が計算される。この時、同様に、姿勢及び状態変化に対応した新しいアペンディジの流体力を計算する。これらの過程を繰り返し行うことによりシミュレーションを行う。

2.3 PPS のバージョン

現在、PPS のレーシングヨットの性能予測への応用として PPS 1.0³⁾が開発されている。PPS 1.0 は、ヒール、ピッチ、ヒープ運動の 3 自由度の船体運動を許した性能予測シミュレーションであり、比較的帆走状態に近いシミュレーションが行えるものの、ヨウ、サージ、スウェイ運動を拘束しており、また、舵角も固定であるために、実際の自由帆走状態を近似的にしか再現することができない。

本研究により開発された新バージョン PPS 1.1 は、舵角と上り角を制御することにより完全な 6 自由度の定常帆走状態を再現する数値帆走シミュレーションである。PPS 1.1 でのセイル力は 1995 年のアメリカズカップで使用された VPP のモデル式と同一のものをを用いているが、このモデルではセイルの空力中心の変化が考慮されておらず、様々な姿勢変化や、相対風向の変化等の状態変化に対応できない。

Fig. 1 Block diagram of PPS 1.0

このため第3のバージョンとして PPS 1.1 に VLM (Vortex Lattice Method) によるセールモデルを組み込むことでセールモデルを改良し、同時にセールの変形も行えるようにすることでトリミングなどセールの変形に対応した帆走状態を再現する数値帆走シミュレーション、PPS 1.2 を構築した。

3. 6自由度の姿勢変化を考慮した数値帆走シミュレーション法 (PPS 1.1)

PPS 1.1 は、ある与えられた風速に対して得られる船速と上り角との関係 (ポーラダイアグラム) を流体力学的なバランスにより求めるシミュレーション法である。

3.1 PPS 1.1 の計算法

IACC 級ヨットの定常自由帆走状態を再現するためには、IACC 級ヨットが自己不安定なシステムであるため、静的なバランス状態を作り出すように制御を行いながら完全な6自由度運動を行うシミュレーションを行わなければならない。このため PPS 1.1 では舵角、上り角および船体姿勢変化を制御し、静的なバランス状態を作り出すことにより6自由度の定常風上自由帆走状態を再現する。

また座標系は特に指定がない場合、第1報と同様に重心 G を中心とし、X 軸は船体進行方向後ろ向きを Z 軸は鉛直上向きをそれぞれ正とする右手系を用いる (ただし前報 Fig. 7 では、船体固定座標系を用いている)。このとき、Fig. 2 に示すように風は船体左舷側から吹き、その速度を風速 (TWS: True Wind Speed) とする。そしてこの風と船体進行方向が作る角を、上り角 (TWA: True Wind Angle)、さらに船体固定座標系から見た風を見かけの風、この速度を相対風速 (AWS: Apparent Wind Speed)、見かけの風と船体中心軸のなす角を相対風向 (AWA: Apparent Wind Angle) とする。

3.1.1 PPS 1.1 の構成

Fig. 3 に示すように PPS 1.1 では、船体の流体力は、CFD 計算により、セール、キール、舵の流体力は、それらのアスペクト比や面積、タブ角等を変数としたモデル式を用いて推定する。これらの流体力と重量、慣性モーメントなどを用いて6方向の運動方程式の定常解を求めることで、静的バランス状態を作り出す。この結果、最終的にバランス状態でのピッチ角、ヨウ角 (リーウェイ角)、ヒール角、沈下量、舵角、上り角が得られる。また、船速 (V_s) を変化させることで、船速別の上り角が得られポーラダイアグラムを作成できる。

3.1.2 付加物の流体力モデル

本研究では基本的に、付加物の流体力モデルとして 1995 年のアメリカズカップで使用された VPP 用のモデル式を用いる。ここでは例としてセールの流体力評価を示す。セールは船体の姿勢変化に応じて変形し、特にモーメントにおいて複雑な挙動を示す。しかしながら現時点ではそれを

Fig. 2 Coordinate system of PPS 1.1 and configuration of sailing condition

Fig. 3 Block diagram of PPS 1.1

表現するに十分な実験結果および計算結果を得ることができない。このため本研究では SF を船体の進行方向に垂直な力、T を船体の進行方向の力とする時、基準となる相対風速時の迎角毎の SF, T の実験及び実測値により、補間を行って迎角 α に対応する $SF_{0(\alpha)}$, $T_{0(\alpha)}$ を求め、さらに相対風速の変化の効果を加えた次式でセールの簡単なモデル化を行う。この力に着力点を定点として与えることによりモーメントを求める。

$$SF = SF_{0(\alpha)} \times \left(\frac{V_a}{V_{a0}} \right)^2 \quad (4)$$

$$T = T_{0(\alpha)} \times \left(\frac{V_a}{V_{a0}} \right)^2 \quad (5)$$

ここで

V_a : 相対風速

V_{a0} : 基準となる相対風速

α : 迎角 (船体中心軸と相対風向のなす角)

である。

3.1.3 制御の手順

風速 9 kt でのポーラダイアグラムを作成するルーチンとして、制御の手順の説明を行う。PPS 1.1 では、Fig. 4 に示すように、ある予定の船速を設定し、この船速においてバランスが得られる上り角を舵による操船と姿勢変化を行いながら見つけ、拘束力が 0 となる静的なバランス状態を作り出し定常自由帆走状態を再現させる。このため、以下に示すような手順で制御を行う。Fig. 5 に示すように、ヨーモーメントが 0 になるような舵角とサージ力が 0 になるような上り角を繰り返し計算により見つける。次に、スウェイ力が 0 になるようにヨウ角を変更する。この間、ヒープ、ヒール、ピッチに関しては自由運動を行う。このような過程を繰り返し行うことによって最終的に定常解に達した

Fig. 4 Schematic sketch for the procedure of obtaining polar curve of steady upwind sailing

Fig. 5 Flow chart of move operation in PPS 1.1

時、6 方向の静的バランス状態が同時に達成され、自由帆走状態が再現される。次に設定船速を変化させたのち、同じ事を繰り返し、その船速によるバランス点を得る。これを数回繰り返すことによってポーラダイアグラムが作成される。この過程をブロック図にしたものが Fig. 6 である。図中の A~D は Fig. 5 のそれぞれ A~D の過程に対応する。

このようにしてポーラダイアグラムを作成する方法では、同一船速に対して 2 種類以上の上り角が存在する場合に、解が一つしか求まらない可能性があるが、本研究では VMG (Velocity Made Good) が最大となるような上り角付近の狭い範囲の性能予測を目的としており、さらに上り角の変化量に制限を設けているため単一の解を求めるだけで充分であると考えられる。

3.1.3 姿勢状態変化の取り扱い

下記のように上り角、舵角、ヨウ角の制御を行う。

(1) 上り角の制御

船速を固定し上り角を変化させると AWA が変化する。これに伴うセール力変化によりそのサージ力成分も変化する。これを用いてサージ運動を拘束することにより発生するサージ方向の不釣り合い力が常に 0 となるように、上り角を繰り返し計算によって変化させる。ただし、上り角の 1 ステップ当たりの最大変化量を規定しているため、不釣り合い力が大きい時は、0 に漸近していく。

Fig. 6 Block diagram for the treatment of the movement of boat attitude in PPS 1.1

(2) 舵角の制御

舵角は、ヨーモーメントが常に0になるように舵角を繰り返して計算により変化させる。ただし、舵角の1ステップ当たりの最大変化量を規定しているため、不釣り合い力が大きい時は、0に漸近していく。

(3) ヨウ角 (リーウェイ角) の制御

ヨウ角は、式(6)に示すように1次関数を用いて、 F_y が0となるように変化させる。

$$\theta_3^n = d\theta_3 \times F_y^n + \theta_3^{n-1} \quad (6)$$

$$d\theta_3 = \frac{\theta_3^n - \theta_3^{n-1}}{F_y^n - F_y^{n-1}} \quad (7)$$

ここで、添え字nは前ステップの値をn-1は前々ステップの値を示す。また、 F_y は、スウェイ方向の不釣り合い力、 θ_3 は、z軸周りの回転角を示す。この時 F_y は10ステップ毎の平均値を用いる。さらに $|d\theta_3|$ の最大値を $|F_y|$ によって制限する。また、 $d\theta_3$ の符号は、 $|F_y|$ が大きいときは(各要素の力のy方向成分中の最大値の0.5%程度以上)、常に F_y の符号と同一とする。また、ヨウ角の変更は50ステップ連続してヨーモーメントが収束した場合に行う。

3.2 PPS 1.1の応用例

このようにして構築されたPPS 1.1の応用例として、本研究では、船型差の評価と最適システム設計の2つの例の計算を行った。ここでは、船型差の評価の応用例として1995年のアメリカズカップに使用されたYA, YBの2艇のPPS 1.1による計算を行い、結果をFig. 7に示す。Fig. 7が示すようにYAとYBでは、VMGの最大値はYAの方が高い。しかしながら、YAの性能変化は急激でその最大値を保持するのが極めて難しいことが予想される。これに対しYBはVMG最大値では劣るものの全体的に性能変化が緩やかで、非常に操船しやすい船であると考えられる。これらの結果は実際のレース結果に合致している。これに対し、Fig. 8に、同様の船型の性能予測をVPPにより行った例を示す。この結果はPPS 1.1によるものと異なり、全領域でYAの方が性能が優れている。これは実際のレース結果に合致しない。また、PPS 1.1により、同時に出力される舵角、ヨウ角やヒール角の速度別変化の様子は実際のセーリング中に計測した結果に合致している。このように、PPS 1.1は、従来予測することのできなかった、舵角や姿勢変化も評価可能である。

3.3 PPS 1.1の評価

6自由度運動をシュミレートする場合、制御が極めて複雑であり、また収束時間が長い等の問題点が予想されるが本研究では、手順を工夫することにより制御を簡略化した。さらに、サージ、スウェイ運動を固定し、ヨウ運動は強制運動にするために流場の急激な変化を押さえることができ、定常解への収束が早く、また舵角と上り角の制御をPIDなどの制御理論によらず、繰り返して計算により漸近的に解を求めるため、汎用性が高いと考えられる。

Fig. 7 Polar Diagram by PPS 1.1 (YA and YB are Yachts built for 1995 America's cup race)

Fig. 8 Polar Diagram by VPP built for 1995 America's cup (YA and YB are Yachts built for 1995 America's cup race)

これらの結果、運動は無次元時間2~3で定常に達しており、これ以上の高速化は物理的意味を失う恐れがあるため、これ以上の制御の最適化を行っていない。また、PPS 1.1による計算結果の精度、妥当性の評価には、更に模型実験や実船実験による検証が必要であるが、YA, YB, 2艇の本研究による評価と実際のレース結果を比べる限り、充分妥当性があるといえる。また、本研究に使用したCFDソフトであるWISDAM-7法の精度は広嶋ら³⁾の研究により妥当性が認められている。

このようにして本研究により構築されたPPS 1.1は自由帆走状態を再現することにより、従来、評価が難しかったシステム評価や新船型開発のための船型評価を十分な精度で行うことができる。

PPS 1.1に残された改良点は、セールやアペンディジの特性に関する精度が不十分であることである。このため、現時点では、セールやアペンディジの位置関係や面積の大幅な変更を伴う性能評価は精度上問題がある。これは特にセールのモデル化による問題によるものが多い。したがって本研究の第二段階では、セールモデルにパネル法を用いるPPS 1.2の開発を行った。

4. セール変形を考慮した数値帆走シミュレーション法 (PPS 1.2)

セールが作り出すモーメントは、ヨットの姿勢や舵角に大きな影響を及ぼし、ヨット全体としての性能と密接な関係を持つ。したがって、セールの姿勢変化や相対風向の変化に伴う空力の着力点の変化はヨットの性能に大きな影響を及ぼすため、様々な状態に対応する性能予測を行うためには着力点の変化を考慮する必要がある。さらに、実際にはセールは状態に応じて変形（トリミング）を行っているため、単一のモデル化は極めて困難である。したがって、本研究ではセールのモデル化に数値計算を用いることにより、着力点の変化及び簡単なセールの変形に対応できるようなシミュレーションを構築する。本来は CFD 計算によるセールモデル⁹⁾を PPS 1.1 に組み込むことが望ましいが、現在の計算機的能力等を考慮すると問題が多いため、本研究では、計算時間が短く、剥離を伴わない範囲で良好な精度を持っている VLM によるセールモデルを採用する。

4.1 揚力面プログラムの概要

本研究では、この VLM によるセールモデルの計算法として江口⁹⁾によるセール用 VLM プログラムを用いた。このプログラムは、変形を考慮しない剛体翼でキャンバーのみの薄翼を計算対象とする。また、ジブセールの上端とメインセールの上下端とそれぞれの後縁から自由渦を放出させ、渦は初期には翼の無い場合の流向（一般に一樣流の方向）を向いており時間ステップを追って流れに任せて移動させる。このとき、渦の軸方向の伸びは 0 とする。

また、流体は非粘性、非圧縮で流体の運動は非回転の定常状態を仮定し、境界条件として、翼の表面上で、これを垂直に突き抜ける流速は 0、後縁とジブセールの下端部の渦強さを 0、静水面を鏡像面とするといった条件を与える。このような仮定、境界条件の下で、各セールのコード、スパン各方向に 6 分割して、 $6 \times 6 = 36$ 枚のパネルを用いて計算を行う。

また本モデルは粘性の影響や剥離等が考慮されていないため、本研究ではこの VLM プログラム法から得られる値に実験値や実測値を用いて修正を行うことにより用いる。

4.2 揚力面プログラムの導入法

本研究では揚力面プログラムを、Fig. 9 に示すように PPS 1.1 から求める姿勢や相対風向、風速をもとに揚力面プログラムによりセール力を計算しこれを運動方程式の外力項に取り入れるという形で、PPS 1.1 に組み込む。また、セール力の更新は無次元時間で 0.03 程度 (50 ステップ) 毎に行い、必要に応じて、姿勢や舵角等をもとにセール形状の更新を行う。これにより全体の計算時間は 7 割程度の増加となる。

4.3 PPS 1.2 の応用例

Fig. 9 Block diagram of PPS 1.2 with sail model by vortex lattice method

Fig. 10 Examples of sail geometry (original: no trimming, chsail: with trimming)

応用例として、風速 9 kt の時、セールの変形を行いながら風上帆走する IACC 級ヨットのシミュレーションを行った。

4.3.1 セールの変形法

一般にヨットは、上り角を大きくしていくと、ラダー角が増加し、その結果、ヨウ角が過剰に減少し、ストラット、舵の効率がともに減少する。また、同時にヒール角も増加し、船体の抵抗増加やストラット、舵、セールの効率低下を招く。このため、実際のセーリングでは、トリミング（セールの形状を変化させること）により、ヒール角の増加や舵角の過剰な増加、ヨウ角の過剰な減少等を押さえている。セールのトリミング法としては種々の方法が考えられるが、本研究ではトリミングの例としてセールのツイスト角を関数的に変形させることでこのようなトリミングを擬似的に再現する。変形の様子を Fig. 10 に示す。変形法を以下に示す。式 (8) に示すように、ヒール角が 26 度に近づくにつれてメインセールの R_{twist} が増加し、式 (9) に示すように各 z 断面でのツイスト角が増加する。また、ジブセールに関しては、舵角が大きくなると式 (11) に示すように R_{twist} が減少して、式 (12) に示すようにジブセールの各 z 断面でのツイスト角が減少する。このような変形を行うことで、ヒール角や舵角の増加を防ぐトリミングを行う。

ここでは船体中心軸後ろ向きに x 軸をマスト方向上向きに z 軸を取る。このとき $twist_{(z)}$ は、各 z 断面でのツイスト角を表し、 $twist_{new(z)}$ は変更後のツイスト角を表す。また、 ϕ はヒール角、 λ は舵角、 β は、ヨウ角を表す。

メインセール

$$R_{twist} = 1.0 + \frac{R_{twist \max}}{\max[1.0, (\text{heel max} - \phi)]} \quad (8)$$

$$Rtw_{(z)} = 1.0 \times \frac{1-z}{z \max} + Rtwist \times \frac{z}{z \max} \quad (9)$$

$$twistnew_{(z)} = twist_{(z)} \times Rtw_{(z)} \quad (10)$$

ここで, $Rtwist \max = 1.3-1.0$, $heel \max = 26(\text{deg})$ とし, ジブセール

$$Rtwist = 1.0 + (\text{attack} \max - \beta - \lambda) \times 0.3 \quad (11)$$

$$Rtw_{(z)} = 1.0 \times \frac{1-z}{z \max} + Rtwist \times \frac{z}{z \max} \quad (12)$$

$$twistnew_{(z)} = twist_{(z)} \times Rtw_{(z)} \quad (13)$$

ここで, $Rtwist \max = 0.8-1.0$, $\text{attack} \max = 8.5$ とした。

4.3.2 応用例

応用例として, セールの変形行わないまま船速 9~9.54 kt の範囲で 0.18 kt 毎に定常解を得た後, ヒール角, 舵角の関数としてジブ, メイン各セールのツイスト角を関数的に変化させ, 9.72 kt までの定常解を得るシミュレーションを行った。

式(11)に示すように, $Rtwist$ は, ジブセールのツイスト角の変化の割合を表す。この $Rtwist$ の変化の様子を Fig. 11 に示す。このように PPS 1.2 では姿勢や舵角に応じたト

Fig. 11 Time history of $Rtwist$ ($Rtwist$: coefficient of twist for jib sail)

Fig. 12 Polar Diagram by PPS 1.2 (original: no trimming, chsail: with trimming)

リングを計算機内で行うことができる。

また, Fig. 12~Fig. 15 に計算結果を示す。

式(11)に示すように舵角がある一定値より増加すると, ジブセールのツイスト角も増加し, セールの発生するヨーモーメントが減少する。このため, Fig. 13 に示すように舵角が減少し, キールの負担すべき横力配分が増加し, Fig. 15 に示すようにヨウ角が増加した。また, 式(8)に示すよ

Fig. 13 Relation between rudder angle and ship velocity (original: no trimming, chsail: with trimming)

Fig. 14 Relation between heel angle and ship velocity (original: no trimming, chsail: with trimming)

Fig. 15 Relation between yaw angle and ship velocity (original: no trimming, chsail: with trimming)

うにヒール角の増加に伴い、メインセールのツイスト角が増加しセール力によるヒーリングモーメントが減少した結果、Fig. 14 に示すようにヒール角が減少している。この結果、各要素の効率が微増し最終的に Fig. 12 に示すように全体の性能は、トリミングを行うことで微少ながら向上したものと考えられる。

4.4 PPS 1.2 の評価

4.3 節に示したように PPS 1.1 のセールモデルとして揚力面プログラムを組み込み、セール形状を関数的に変化させることにより、トリミングを行いながらの帆走を計算機内で再現可能なシミュレーション、PPS 1.2 を構築した。これにより、姿勢や状態変化に伴うトリミングを考慮した性能を解析することが可能となった。

PPS 1.2 の応用法としては、異なるセールによる、全体性能の変化の評価や、姿勢変化やトリミングによる性能変化の評価、最適トリミングの評価、広範囲における船体性能の総合評価等への応用等が可能と考えられる。これらは、従来の技術では全く解析不可能であったものである。

本法では、船体の流体力に関しては CFD 計算を行っており、この結果十分な精度が得られている。しかしながら、セールに関しては揚力面プログラムによるモデル化を行ったものの計算時間等の問題でパネル数が充分であるとはいえず、また剥離が考慮されていないといった問題もあり精度の面で、まだ残された改善点がある。アベンディジに関しては VPP と同様のモデル式をそのまま使っている。このため、現時点では、セール形状やキール、舵の位置関係、面積等の大幅な変更は精度上問題を残す。また、セールに対するせん断流影響の問題や、アベンディジのヒール影響等の問題もあるため将来的には各要素の性能解析も CFD 計算に切り替えていくべきであろう。

5. 結 論

本研究では、レーシングヨットの新船型開発のための性能予測法として、上り角、舵角、ヨウ角を制御して静的バランス状態を作り出すことにより定常自由帆走状態を数值的にシミュレーションすることができる数値帆走シミュレーション、PPS 1.1 を構築した。これにより、任意の風速によるポーラダイアグラムを描くことを可能にし、設計支

援システムに必要な、汎用性、速度及び精度を持つ新しい PPS による性能予測法を開発した。さらに、PPS 1.1 にセールモデルとして揚力面解法を組み込むことにより、トリミングを行いながらの数値帆走が可能なシミュレーション、PPS 1.2 を構築した。これにより、姿勢変化や形状変化に伴うセールの性能も考慮した、レーシングヨットの風上帆走状態に対するポーラダイアグラムの作成を中心とした総合性能を予測することが可能となった。

本研究で用いた、セール用 VLM 法計算コードは三井造船昭島研究所江口辰哉氏によるものである。また、本研究は、日本チャレンジ・アメリカズカップ技術委員会と文部省科学研究費からの援助を受けている。関係各位に厚くお礼申し上げる。

参 考 文 献

- 1) 江口辰也：帆走性能の推定法について、西部造船学会会報, 第 88 号 (1994), pp. 39-56
- 2) 秋元博路：非定常運動を行う帆走艇の有限体積法によるシミュレーション, 日本造船学会論文集, 第 181 号 (1997), pp. 35-44
- 3) 広嶋文哉, 宮田秀明, 秋元博路：CFD 航行シミュレーションによる帆走艇の設計法, 日本造船学会論文集, 第 181 号 (1997), pp. 25-34
- 4) 宮田秀明：アメリカズ・カップ, 岩波科学ライブラリー 40
- 5) Miyata, H., Nishimura, S. and Masuko, A.: Finite-Difference Simulation of Nonlinear Waves Generated by Ships of Arbitrary Three-dimensional Configuration, J. Computaional Phys., 60 (1985), pp. 391-436
- 6) Miyata, H., Nishimura, S.: Finite-Difference Simulation of Nonlinear Ship Waves, J. Fluid Mech., 157 (1985), pp. 327-357
- 7) Zhu, M., Yoshida, O., Miyata, H. and Aoki, K.: Verification of the Viscous Flow-Field Simulation for Practical Hull Forms by a Finite-Volume Method, Numerical Ship Hydrodynamics, (1993), pp. 469-488
- 8) 大森拓也：計算流体力学的手法による船体操縦シミュレーション, 東京大学博士論文 (1994)
- 9) 李永雨, 宮田秀明, 佐藤徹：セーリングヨットの二翼干渉の CFD シミュレーション, 日本造船学会論文集, 第 181 号 (1997), pp. 25-34