

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 30 日現在

機関番号：33302

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560839

研究課題名（和文） 大規模剥離を伴うセール周り流れの詳細計測と CFD 計算のバリデーション

研究課題名（英文） Flow field measurements and validation of CFD calculation of sails accompanied with large scale flow separation

研究代表者

増山 豊 (MASUYAMA YUTAKA)

金沢工業大学・工学部・教授

研究者番号：10101362

研究成果の概要（和文）：

セーリングヨットが風下帆走する際、セール周りの流れは大規模な剥離を起こしている。特にスピネカーと呼ばれるパラシュート状のセールの場合、剥離流れの詳細構造が明らかでないとともに、CFD との一致度も良くないことが知られている。本研究では、風洞実験によってこのようなセール周り流れの詳細を明らかにするとともに、実測されたセール形状をもとに CFD 計算を行って精度の高い数値計算法を提案し、セーリングヨットの高性能化手法を提案した。

研究成果の概要（英文）：

Large scale flow separation occurs around sails of a sailing yacht at the downwind sailing condition. In particular for the case of spinnaker, it is well known that the detailed feature of flow separation is not clear and CFD calculations do not coincide well with the measured data. In this research the detailed feature of flow separation around sails is revealed by wind tunnel tests, and the results are compared with the RANS-Based CFD calculation. The results of proposed CFD calculation method coincide well with the measured one.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2010 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：船舶工学、セール周り流れ、CFD、風洞試験、数値計算バリデーション、大規模剥離、模型セール、3次元形状解析

1. 研究開始当初の背景

セーリングヨットが風上へ向かって帆走する場合は、セール周り流れはほとんど剥離せず、セールは揚力を発生する性能の良い翼として作動することが知られている。この状態であれば数値流体力学（CFD）による計算

結果も、風洞実験などによる性能計測値とよく一致することが明らかにされている。

これに対して風下へ帆走する場合は、セール周り流れは大規模な剥離を起こしており、抗力が主であるが揚力も発生しているという複雑な流れとなっており、CFD による計算

結果との一致度も悪くなる。特に、スピネカーと呼ばれるパラシュート状のソフトセーラーは、セーラー面上に作用する圧力と、セーラー生地との張力とのバランスによって形状が決定されるため、微妙な調整によって形状が大きく変化する。このことは剥離領域の大きさにも影響を与えるため、CFD の計算精度を向上する上で大きな課題となっている。

このような大規模な剥離を伴うソフトセーラー周りの流れは、ヨット用のセーラーばかりではなく、ハンググライダーやパラシュートなどにも現れるものであり、研究成果はこれらの分野へも応用できるものと期待される。

2. 研究の目的

本研究では、大規模な剥離を伴うセーラー周りの流れを、風洞実験によって詳細に計測して流れ構造を明らかにするとともに、実測されたセーラー形状をもとに CFD 計算を行って比較検討を行う。これらを通して、CFD 計算の精度を向上するとともに、そのバリデーションを行う。

また、風下航時に使用されるスピネカーと呼ばれるパラシュート状のセーラー形状と、流体力、ならびに CFD による流れ情報をセットにして乗艇者に提供する。これによってセーリングヨットが、より高速で帆走できるようなセーラー調整の目安を提供することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 模型を用いた風洞試験の実施

① 対象とするセーラー

本研究では、国際 470 級と呼ばれる全長 4.7m の小型ヨットのセーラーを具体的な対象として解析を行った。同艇は現在オリンピック競技に用いられており、我が国の選手にとって最も金メダルに近い種目とされている。同艇の帆装図と主要諸元、ならびにセーラー面積をそれぞれ Fig.1、Table 1 に示す。

Table 1 Principal dimensions of International 470 class



	Full scale	1/6 model
Length [m]	4.70	0.783
L_{wl} [m]	4.40	0.733
Weight [kgf]	120	0.566
Mast height [m]	6.76	1.12
Sail area		
Mainsail [m ²]	9.12	0.253
Spinnaker [m ²]	13.0	0.361
(Jib [m ²])	3.58	0.0990

Fig.1 Sail Plan of International 470 class

② セーラー模型と風洞装置

本研究に用いたセーラー模型は 1/6 スケールであり、メインセーラーとジブ、ならびにスピネカーを組み合わせて試験を行った。これらのセーラー模型は、セーラーメーカーであるノースセーラー・ジャパン (株) が、実艇に合わせて正確に製作したものである。

実験に用いた風洞装置は吹き出し形であり、通常は収縮ノズルが取り付けられており、吹き出し口が 0.5m 角の測定部となっている。本実験ではセーラー模型が比較的大きいため、収縮ノズルを取り外して 1.5m 角の測定部として用いた。この場合、最大風速は約 6m/s であり、測定部断面における速度分布は最大 5%程度である。風洞試験のセッティングの様子を Fig.2 に示す。

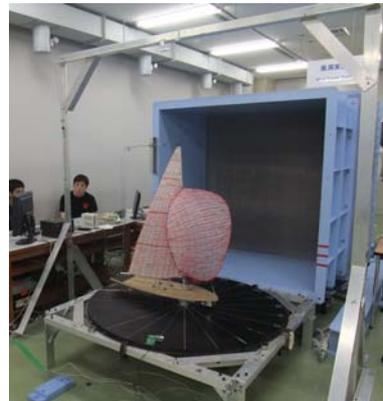


Fig.2 Set up of wind tunnel test

③ 実験方法と実験条件

セーラーはマストを含む船体模型に取り付けた状態で、3 分力計を用いて流体力を測定した。このため測定値には船体模型に作用する流体力も含まれている。CFD 計算ではセーラーのみに作用する力を求めているので、これと比較するため、測定値から船体模型のみに作用する力を差し引いて示すことにする。

セーラー形状は、船体模型に取り付けた小型モータを、リモートコントロールで回転させてシートを巻き取って調整できるようにした。基本的に、推進力が最大になるように調整したときの流体力とセーラー形状を採取した。セーラー形状の測定には、デジタルカメラの複数の画像データから 3 次元形状を求めるソフトウェアを用いた。流体力の測定時は、風速を 5.6m/s として実験を行った。この時のレイノルズ数は、相当弦長を 0.8m とすると 2.9×10^5 である。一方、煙を用いた流れの可視化実験では撮影の都合上、風速を 4m/s として行った。なお、模型の投影面積と風洞測定部断面積との比である閉塞率は約 27% とかなり大きい。一般に測定部が開放型の場合は、閉塞率修正量はそれほど大きくないとされているが、これを確認するため、あらかじめ較正試験を行った。その結果、この範囲ではほとんど問題

がないことが分かったので、抵抗係数に閉塞率修正を加えないで示すことにする。一方、揚力係数は流れの偏向の影響を受けるために、通常の境界修正を加えている。

(2)セール形状の測定

セール形状の測定は写真 3 次元化ソフト SolidFromPhoto を用いて行った。これは、複数枚の画像データから 3 次元モデルを作成するソフトウェアであり、エピソード幾何を用いて 3 次元座標を計算し、CSV ファイルとして出力することができる。1 つの対応点に対し、複数の画像上でクリックする際に多少の手間はかかるが、撮影時はカメラ位置を気にせず、多方面から手早く撮影すればよいので、形状が安定しづらいセール形状の計測などには使いやすいものと考えられる。同ソフトウェアで、写真上の対応点をプロットした状態を Fig.3 に、3 次元座標の出力結果を Fig.4 に示す。

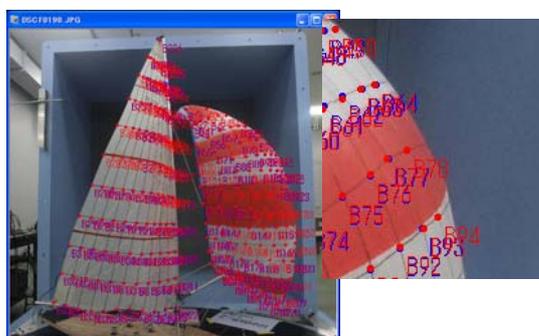


Fig.3 Processed image of SolidFromPhoto

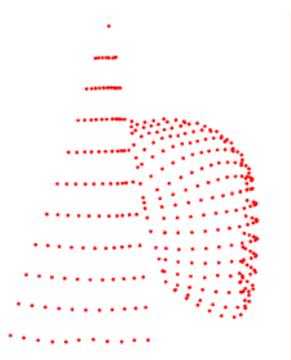


Fig.4 Output result of SolidFromPhoto

(3)数値流体力学計算手法

①FLOWPACK

数値流体力学の解析手法として、田原が開発したレイノルズ平均ナビエ・ストークス方程式 (Reynolds-averaged Navier-Stokes Method: RANS 法) を用いたソルバーである FLOWPACK を用いた。FLOWPACK は主に船舶設計の分野に適用することを目的として、マルチブロック NS/RaNS 法を用いて構築された総合数値流体計算ツールである。流場の

支配方程式は 3 次元非定常、非圧縮流体に関する NS/RaNS 方程式と連続の式であり、数値計算では支配方程式から得られた輸送方程式を非直交曲線座標系に変換して離散化している。速度場/圧力場結合には PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operators) タイプ/1 ステップ法を用いている。また、マルチブロック格子に対応するためのブロック間インターフェース機能を有している。

②Advanced Aero Flow

プリ・ポスト処理には鹿取が作成した Advanced Aero Flow (AAF) を用いた。AAF は主にセールの計算を念頭に開発された流体解析ツールであり、CFD の専門家でなくても容易に計算を実行することができるようになっている。セール形状の 3 次元座標から得られた IGES ファイルを入力することによって自動的にメッシュが生成され、FLOWPACK を用いて計算を行った後、流線などの結果を表示する一連の処理を行うことができる。本研究では、模型セールの寸法と風速にあわせて計算を行った。乱流モデルはゼロ方程式モデル (Baldwin-Lomax モデル) を用い、メッシュ分割数は約 80 万である。これらの数値計算を行った出力結果の例を Fig.5 に示す。

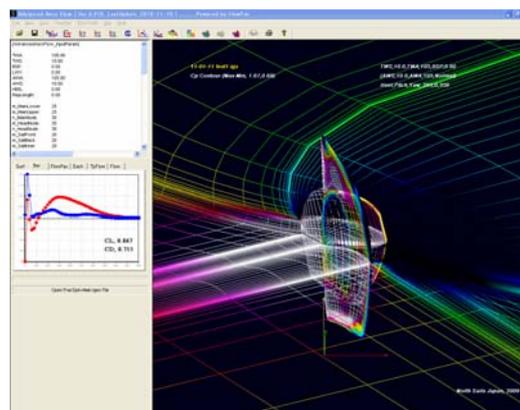


Fig.5 Output result of numerical calculation

4. 研究成果

(1)セール表面流れの比較

セール表面にタフトをつけて流れの様子を見たものと、数値計算結果との比較を Fig.6 に示す。風向が 90° の例で、スピネカーの風下側の様子を示している。風は右側から流れており、実験では右側のタフトが表面に沿って流れているが、左側や上部へ行くに従って舞い上がっており、剥離していることがわかる。計算結果では白くなっている部分が流れが剥離していない領域を表しており、実験のタフトが流れている領域とほぼ一致していることがわかる。

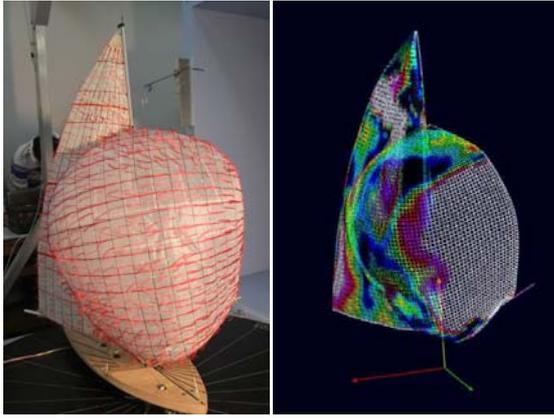


Fig.6 Comparison of flow pattern on sail surface between experiment and calculation (wind angle 90 degrees)

(2) 流線の比較

煙を用いて流れを可視化した結果と、計算による流線の比較を Fig.7 に示す。風向が 120° の例で、上から見た様子を示している。風は左側から吹いており、スピネカーによって大きく流れが曲げられていることがわかる。スピネカーの背面側の剥離の様子や、腹面側の流れがメインセールからの流れとクロスしている様子が、実験結果と計算結果で良く一致していることがわかる。

また同じ状態を、横から見た場合の比較を Fig.8 に示す。スピネカーの背面側と腹面側、ならびにメインセールの腹面側からの、3つの流れがねじれている様子がよくわかり、実験結果と計算結果も良く一致していることがわかる。

(3) 流体力係数の比較

セーラーに作用する流体力を無次元化した結果を Fig.9 に示す。Fig.9(a) は揚力係数 C_L 、(b) は抗力係数 C_D 、(c) はヨーモーメント係数 C_{Mz} である。横軸は船体中心線と風向とのなす角度である。それぞれ、中実点の実験値、中空点の計算値を示している。

C_L の実験値は、風向が大きくなるとともに低くなり、 165° では大きく低下している。計算値は $75^\circ \sim 120^\circ$ で実験値とよく一致しているが、 135° 以上では実験値よりも低い値になっている。これはこの領域での剥離の影響が、計算値で大きめに示しているためと考えられる。一方、 C_D 値に関しては全体に計算値が実験値を下回っている。セーラー模型は、薄いセーラークロスを張り合わせて製作しており、実際には合わせ面に微妙な凹凸がある。このようなセーラークロス表面の粗さが、抗力係数に与える影響は未だはっきりしていない。これらを含めて、数値計算手法の今後の課題としたい。

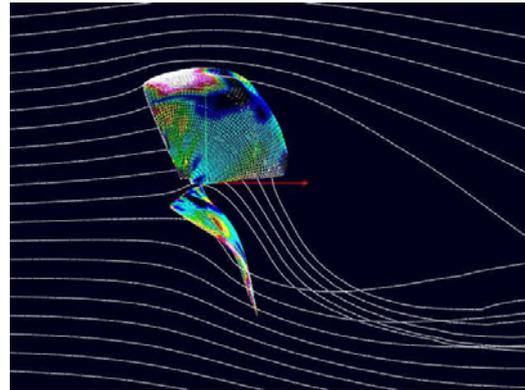


Fig.7 Comparison of stream line around sail between experiment and calculation (Top view, 120 degrees)

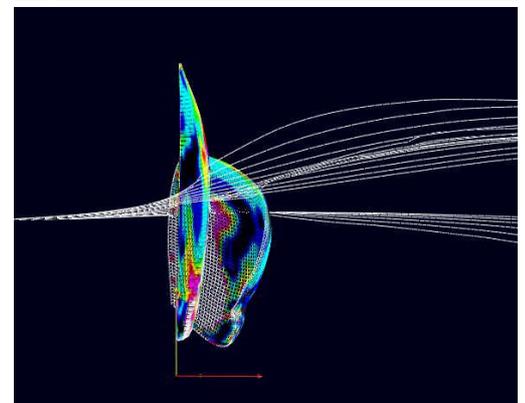


Fig.8 Comparison of stream line around sail between experiment and calculation (Side view, 120 degrees)

また、 C_{Mz} 値はマスト周りのヨーモーメント係数を表しているが、実験値と計算値はかなりよく一致していることがわかる。これは着力点がほぼ一致していることを意味しており、計算結果がセール表面全体の流れの様子をよく表しているものと考えられる。

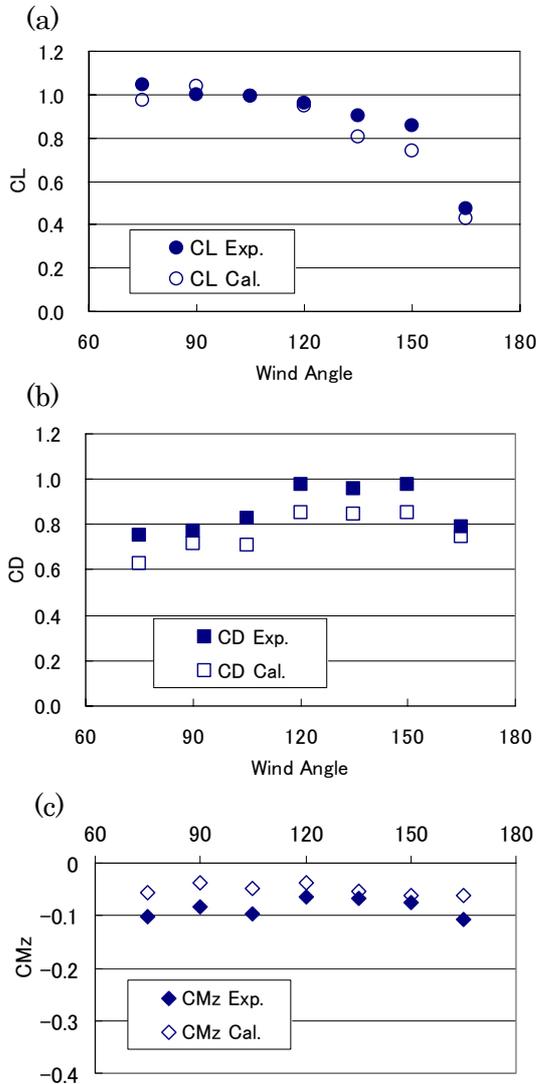


Fig.9 Comparison of sail force coefficients between measured and calculated

(4)研究成果のまとめ

風洞試験とこれをもとにしたCFD計算によって、大規模な剥離を伴うセール周りの流れ構造について明らかにするとともに、これらを予測することができるCFD計算手法を確立することができた。RANS法による計算では、乱流モデルとしてゼロ方程式モデル(Baldwin-Lomaxモデル)を用いればよく、またマルチブロック格子を用いているため、メッシュ分割数も80万程度でよいことが確認された。これによって、通常のパソコンで

も容易に精度の高い計算結果を得ることができる手法が確立されたものといえる。

これらの研究成果は日本機械学会と日本船舶海洋工学会の講演会、ならびにニュージーランドで開催されたシンポジウム(HPYD4)において発表した。また、学術専門誌(JMST、FDCMA)に掲載し、研究成果の公表に努めて本研究のまとめとした。

今後、本計算手法をハンググライダーやパラシュートなどの、ソフトセールにも適用して応用範囲を広げていきたい。また、セール形状と、流体力、ならびにCFDによる流れ情報をセットにして広く乗艇者に提供し、我が国のセーリングヨットの高性能化に貢献していきたい。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

- ① Y. Tahara, Y. Masuyama, T. Fukasawa and M. Katori, Sail Performance Analysis of Sailing Yachts by Numerical Calculations and Experiments, FLUID DYNAMICS, COMPUTATIONAL MODELING AND APPLICATIONS, 査読有, 1巻, 2012, 91-118, <http://www.intechopen.com/books/fluid-dynamics-computational-modeling-and-applications/sail-performance-analysis-of-sailing-yachts-by-numerical-calculations-and-experiments>
- ② Y. Masuyama, Y. Tahara, T. Fukasawa and N. Maeda, Database of sail shapes versus sail performance and validation of numerical calculations for the upwind condition, Journal of Marine Science and Technology, 査読有, Vol.14 No.2, 2009, 137-160.

[学会発表] (計4件)

- ① Y. Tahara, Y. Masuyama, T. Fukasawa and M. Katori, CFD Calculation of Downwind Sail Performance Using Flying Shape Measured by Wind tunnel Test, 4th High Performance Yacht Design Conference (HPYD4), 2012年3月13日, Auckland (New Zealand).
- ② 水藤秀彦, 増山 豊, 田原裕介, 鹿取正信, 大規模剥離を伴う追風時のセール周り流れの風洞試験とCFD計算比較, 日本船舶海洋工学会, 2011年11月8日, 神戸.
- ③ 池尻真樹, 増山 豊, 風洞試験と数値計算によるセール流体力解析, 日本機械学

会北陸信越支部、2011年3月5日、上田。

④ Y. Masuyama, H. Yagi and Y. Terao,
Sailing Performance and Maneuverability
of a Traditional Ryukyuan Tribute Ship,
Asia Navigation Conference 2009, 2009年
11月19日、静岡。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

増山 豊 (MASUYAMA YUTAKA)

金沢工業大学・工学部・教授

研究者番号：10101362

(2) 研究分担者

深沢 塔一 (FUKASAWA TOICHI)

大阪府立大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：80143171

田原 裕介 (TAHARA YUSUKE)

海上技術安全研究所・CFD研究開発セン
ター・上席研究員

研究者番号：10264805