

## 数値流体計算によるウィンドサーフィン用セイルの性能解析

鈴木 正己<sup>\*1</sup>

### Sail Performance Analysis of Windsurfing by CFD Simulation

Masami SUZUKI<sup>\*1</sup>

<sup>\*1</sup> University of the Ryukyus, Department of Mechanical Systems Engineering  
Senbaru 1, Nishihara, Okinawa, 903-0213 Japan

Windsurfing is a marine sport that combines elements of surfing and sailing, which started in the 1960s. The rig is connected to the board by a free-rotating universal joint and consists of a mast, boom and sail. A windsurfing sail is made of monofilm (clear polyester film), dacron (woven polyester) and mylar. Cambered sails have battens which help to hold a rigid aerofoil shape in the sail, better for speed and stability. This paper is performing analysis by a Computational Fluid Dynamics (CFD) to grasp the basic characteristic of two-dimensional sail sections. Although various airfoil profiles can be considered in the sail, arc wings are investigated because the wings are the most fundamental profiles. Three type airfoil profiles are analyzed in this paper. There are arc wings, arc wings attached to a mast, and the real sail shapes which are connected smoothly from a mast to an arc wing. Results show that arc wings are obtained the best performance among the three type wings.

**Key Words** : Sail, Windsurfing, CFD, Performance, Flow Visualization

### 1. 緒 言

ウィンドサーフingは1960年代後半に始まったヨットとサーフingを融合・発展させたマリンスポーツである。ウィンドサーフingの装備はボード部・リグ部・装具に大別され、ボード部はセイルボード、フィン、ユニバーサルジョイントによって構成されている。リグ部はセイル、ブーム、マスト、マストエクステンション、ハーネスラインからなり、装具は体に装着する道具類で、中・強風時におけるセーリング用のハーネス、ウェイトジャケット、防寒・怪我対策用のウェットスーツ、ドライスーツ、ウェットスーツブーツ、ウェットスーツグローブ、遊泳補助用にライフジャケットがある。セイルボードにはロングボードとショートボードがあり、横流れを防ぐためのダガーボードの有無により区別され、ロングボードにはダガーボードが装備されている。

ウィンドサーフingはセイルに風を受けて、ヨットと同様、風下から風上に至るまで走行可能な乗り物である。風によりセイルに働く揚力や抗力で走行するが、ボード中央部のダガーボードやボード後部のフィンで横流れを防ぐことで、風上側への走行を可能としている。また、ある程度のスピード(約25km/h)に達するとボード底面が水面まで浮上、水面を滑走する「プレーニング」が可能となり、容易に50km/h以上のスピードで滑走できることがこのスポーツの最大の魅力ともなっている。ウィンドサーフingはヨットと異なり、舵を有していない。この替りにマストはユニバーサルジョイントにより任意の方向に自由に傾けることができる構造となっている。これにより、マストを傾けることで、ボードに対するセイルの風圧中心位置が変化し、ダガーボードやフィンを中心とするモーメントの変化により進行方向がコントロールされる。

セイルの主要部分はフィルム素材で、マストやバテンを通す部分はクロス素材により製造されており、セイルの翼形状はバテンにより一定の形を維持しやすくなっている。本研究はセイルの基本特性を把握することを目的としてCFDによる解析を行っている。翼形状として、種々の形状が考えられるがここでは最も基本的な形状である円弧翼を対象に、マストの有無による性能への影響について検討した結果を示している。

<sup>\*1</sup> 正員, 琉球大学 (〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町字千原1)  
E-mail: m-suzuki@tec.u-ryukyu.ac.jp

## 2. 翼形状および数値計算方法

### 2・1 翼形状

翼形状は(1)円弧とし、(2)前縁に円形のマストを加えた形状、(3)実際に近いセイル形状の3種類についてCFDによる解析を行っている。実際のセイルはマスト直後が滑らかなになるように縫製された形状となっている。研究の主題はこれらセイルの前縁形状の影響を把握することである。形状の違いによる前縁はく離の影響と乱流促進効果により、セイル中央部の剥離抑制などの関連を明らかにし、前縁形状の扱い方に対する基礎データを収集することを目的としている。本論では今後、これら3種類の翼形状を円弧翼、マスト付円弧翼、セイル翼と呼ぶことにする。図1はこれら3種類の前縁翼形状と計算格子を示している。図1-aは全体翼形状、図1-bに円弧翼、図1-cにマスト付円弧翼、図1-dにセイル翼の前縁形状を表している。

翼形状はそり比(翼弦長に対する最大そり)、マスト半径、マスト中心から平滑化位置までの距離により表している。そり比は0, 5, 10, 15, 20%の5種類、マスト半径は翼弦長の2%, マスト中心からの平滑化区間はマスト径の2倍とし、合計15種類の翼型について、迎え角 $0^{\circ} \sim 15^{\circ}$ まで $1^{\circ}$ 刻みで計算を行っている。翼厚比は0.004としている。計算はO型格子を用いて計算を行っているため、実用上影響がでない程度の翼厚を確保する必要がある点、および流れを可視化の際、翼を識別可能とすることが主な理由である。

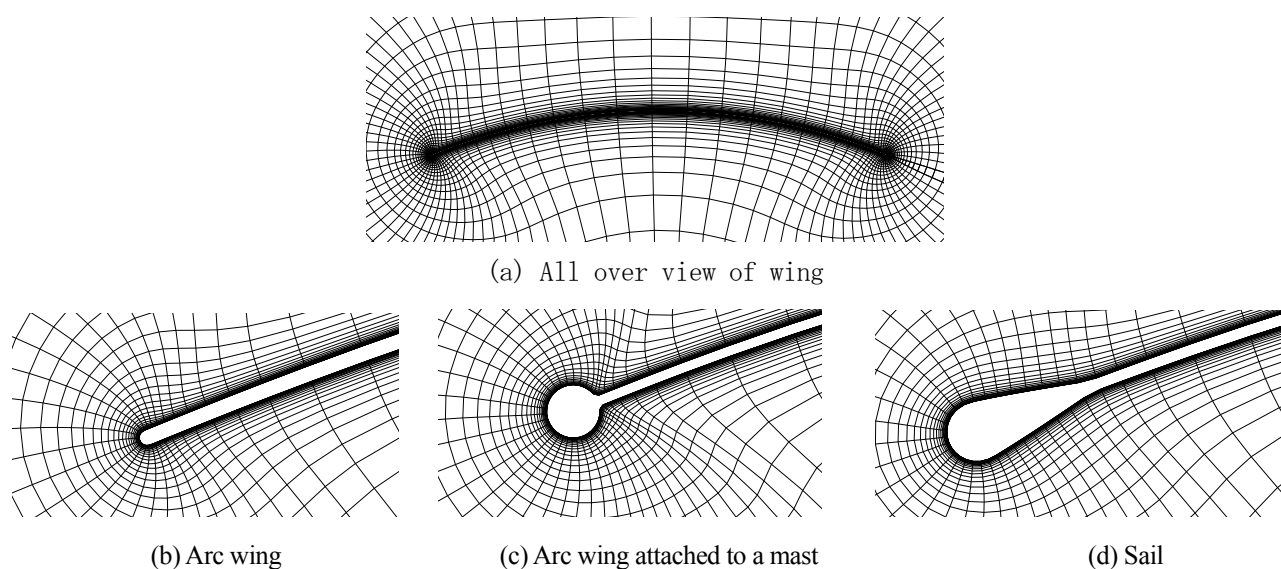


Fig.1 Wing configurations

### 2・2 計算格子

計算格子は翼面上に多くの格子が配置できるように、図1に示したO型格子を用いている。通常、セイルの翼厚は非常に薄いため、H型格子を用いた計算が大半となっているが、前縁や後縁の影響をより正確に捉えることと、翼面以外に無駄な細かい格子を配置せずにするため、O型格子としている。格子はSteger-Chausseeに倣って双曲型偏微分方程式<sup>(1)</sup>を解く方法で生成しているため、非常に滑らかな格子が形作られている。翼厚は翼弦長の0.4%として、翼面法線方向の格子幅は翼弦長の $5 \times 10^{-6}$ であり、翼面上の全ての格子点で $y^+$ は1以下に収まっている。

### 2・3 数値計算方法

数値流体計算は著者が開発を行っている非圧縮性粘性計算コードで実施している。この計算コードはCollocated Gridによる有限体積法<sup>(2),(3)</sup>で構成され、連続の式を満たすためにSIMPLEアルゴリズム<sup>(4)</sup>を用いた圧力補正がなされている。対流項は数値流束が3次精度風上補間となるQUICKスキーム<sup>(5)</sup>を用い、これ以外の項は2次精度の中心差分で離散化されている。乱流モデルはLaunder-Sharmaの低レイノルズ数型 $k-\epsilon$ モデル<sup>(6)</sup>を導入している。ここでは、実際の応用面を重視し、計算処理時間が短い定常計算で解析を行っている。

### 3. 解析結果

翼性能評価の大きな指針として、揚抗比が挙げられる。第一に揚抗比が広範囲な迎え角に対して高い翼形を選定することが考えられる。更に、ボードの抵抗や翼面積なので制約条件が課されれば、揚力係数が大きいことも重要な評価因子ともなる。本論では、基本的な翼性能を把握することを目的としているため、種々の評価因子の中で揚抗比を翼性能の評価基準として議論を進める。

#### 3・1 揚力係数, 抗力係数, 揚抗比

図2は円弧翼の揚力係数, 抗力係数, 揚抗比を示している。そり比が小さいほど, 迎え角と揚力係数との比例関係が強くなり, そり比の増加により最大揚力係数は増加する。揚力係数の失速角は $6^{\circ}\sim 8^{\circ}$ で, そり比が大きな0.15, 0.20では迎え角の小さな領域( $0^{\circ}$  または $3^{\circ}$ 以下)で圧力面の前縁から大きくはく離し, 急激な揚力低下が表れる。そり比0.2は迎え角 $4^{\circ}$ で最も抗力係数が小さくなり, 前縁はく離のない無衝突流入となっている。揚抗比はそり比が0.1で最大( $C_L/C_D=105$ ), 0.15で $C_L/C_D=95$ となり, 迎え角はそれぞれ $1^{\circ}$ ,  $2^{\circ}$ となっている。そり比0.1以下の抗力係数は迎え角 $2^{\circ}$ まで, ほぼ一致し, 0.018以下の小さな抗力係数である。そりにより, 大きな揚力を得ているにもかかわらず, 無衝突流入に近い迎え角であるため, 抗力係数が小さく, 高い揚抗比が生じている。これ以外は $C_L/C_D=66$ 以下と揚抗比は大きく低下することになる。

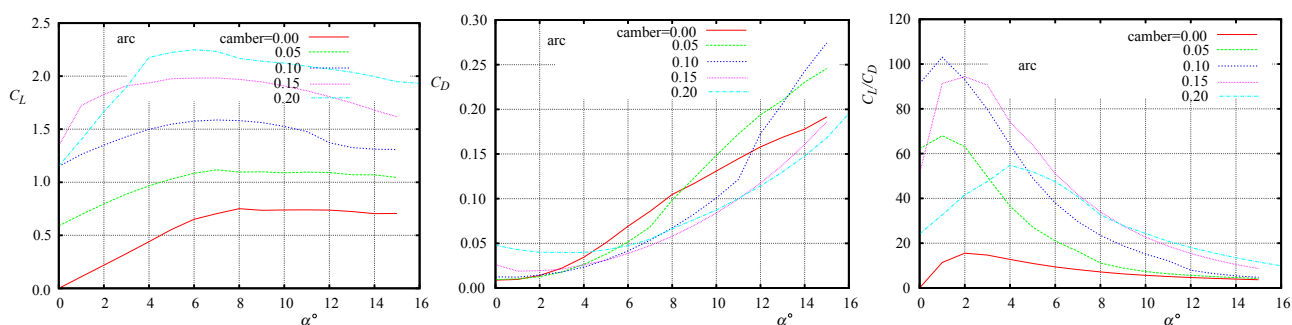


Fig.2 Lift coefficient, drag coefficient and lift-drag ratio for arc wings.

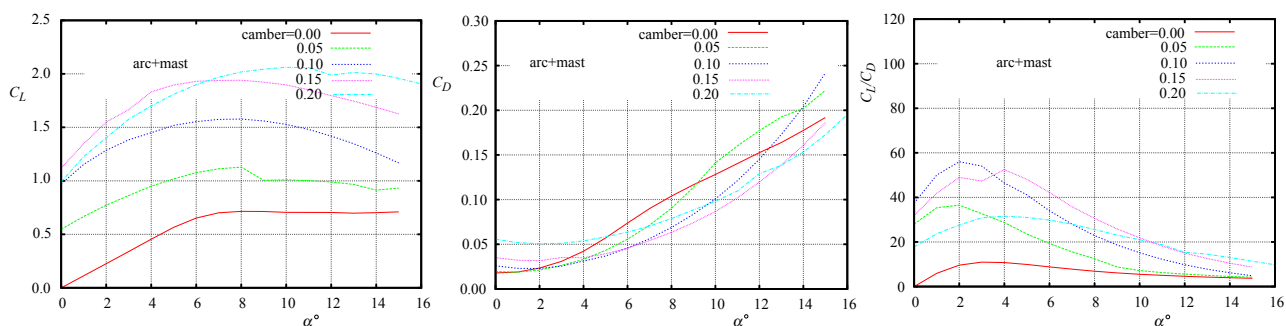


Fig.3 Lift coefficient, drag coefficient and lift-drag ratio for arc wings attached to a mast.

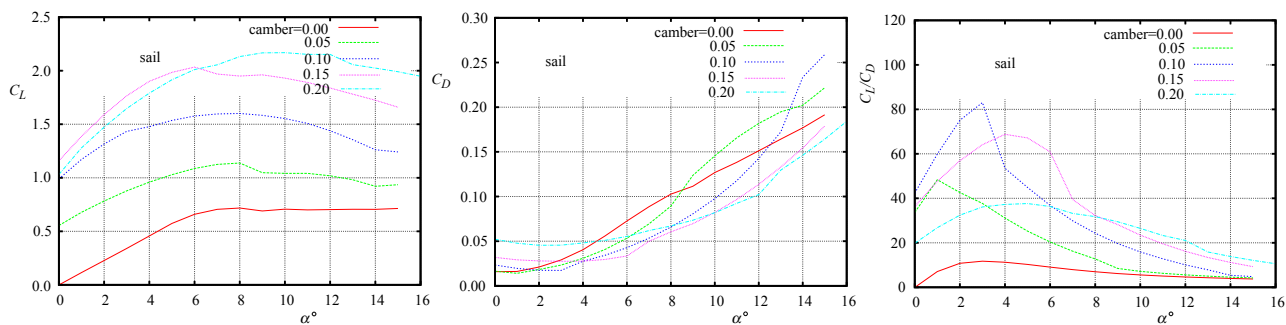


Fig.4 Lift coefficient, drag coefficient and lift-drag ratio for sails.

次に実際のセイル形状に近い翼特性を把握するため、マスト付円弧翼およびセイル翼についても解析を行う。図3はマスト付円弧翼の特性を示しており、マストが付くことで揚抗比が60以下と性能低下が著しいことがわかる。図4に示すセイル翼特性はマスト下流が滑らかな形状になるようにセイルが縫製されているため、揚抗比は80と揚抗比の低下が抑えられていることがわかる。図5は揚抗比の高いそり比0.1、図6はそり比0.15に対し、形状の違いによる揚力係数、抗力係数、揚抗比への影響を表している。全般的に、円弧翼、セイル翼、マスト付円弧翼の順に性能が低下する。揚力係数は円弧翼が最も高く、抗力係数は円弧翼が最も小さく、揚抗比は円弧翼が最も高くなっておる。そり比0.1では迎え角 $3^\circ$ 、そり比0.15では迎え角 $4^\circ$ で、揚力係数、抗力係数ともに実際のセイル形状を表すセイル翼と円弧翼ではほぼ一致する結果となっている。

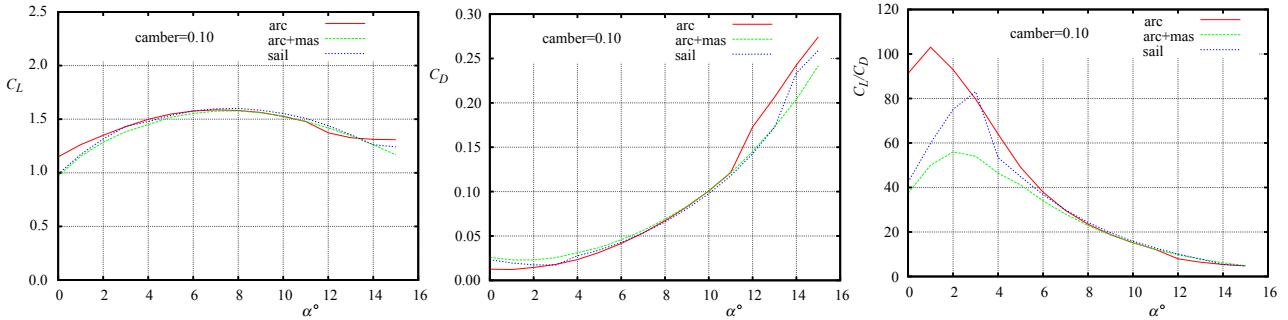


Fig.5 Lift coefficient, drag coefficient and lift-drag ratio for a camber ratio of 0.1.

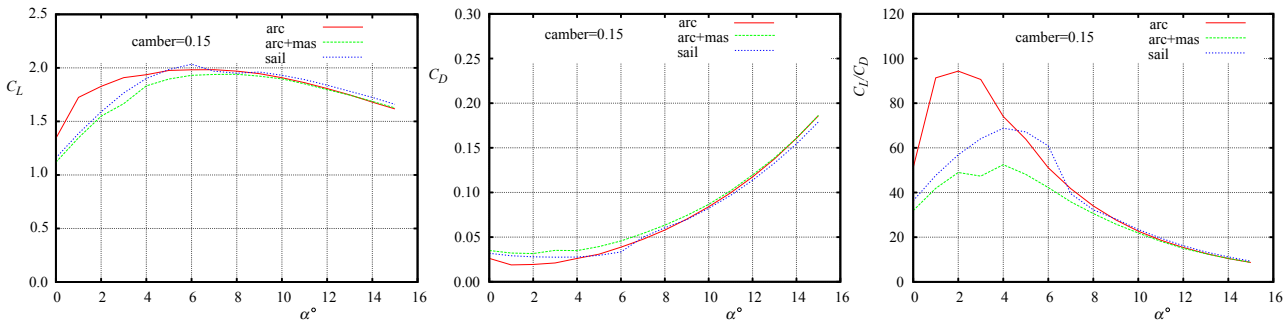


Fig.6 Lift coefficient, drag coefficient and lift-drag ratio for a camber ratio of 0.15.

### 3・2 翼面上の圧力分布

翼形状の影響を詳細に把握するため、翼面上の圧力分布を主要な箇所について示す。図7は揚抗比が最も高いそり比0.1について、揚力、抗力に大きな違いが表れている迎え角 $0^\circ$ とセイル翼の揚抗比が最も高くなる迎え角 $3^\circ$ の圧力分布を示している。図8はそり比0.15について、迎え角 $0^\circ$ とセイル翼の揚抗比が最も高くなる迎え角 $4^\circ$ の圧力分布を示している。迎え角 $0^\circ$ ではそり比0.1、0.15ともに、円弧翼とマスト付円弧翼およびセイル翼は前縁から後縁まで、全域に亘って圧力分布に違いが表れているが、マスト付円弧翼およびセイル翼は前縁付近を除き、良く一致した分布となっている。半翼弦長付近の正圧および負圧は円弧翼が最も大きく、これにより大きな揚力が生じている。迎え角が小さな $0^\circ$ 付近ではマストの有無により圧力分布は前縁から後縁まで、全域に亘って影響を受けることがわかる。この後、迎え角の増大とともに、前縁付近を除き、マストの有無による違いは小さくなる。特に無衝突流入となる迎え角 $3^\circ$  (図7) や $4^\circ$  (図8) では円弧翼とセイル翼の圧力分布は良く一致する結果となっている。

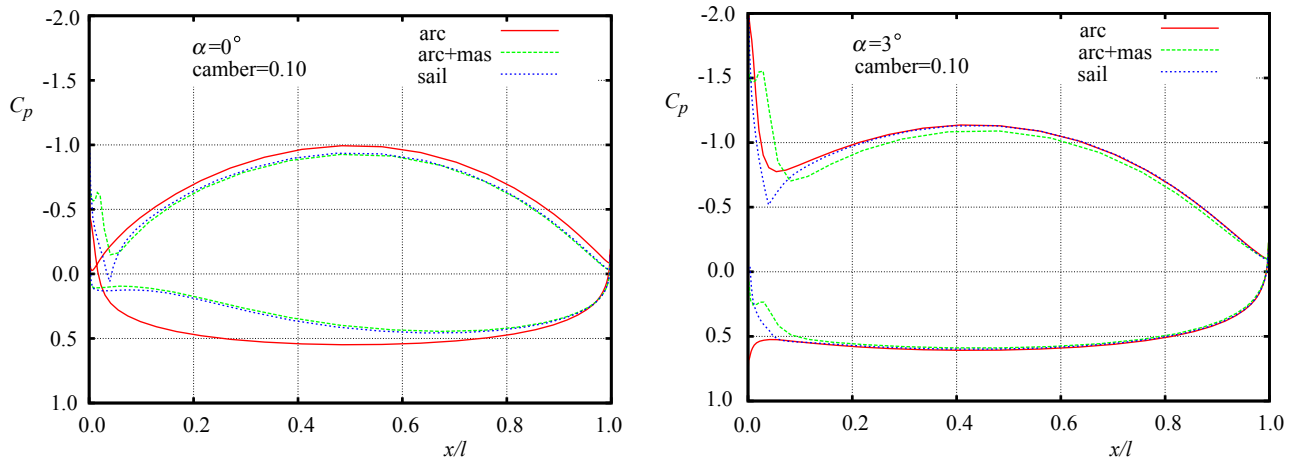


Fig.7 Pressure coefficients for a camber ratio of 0.10.

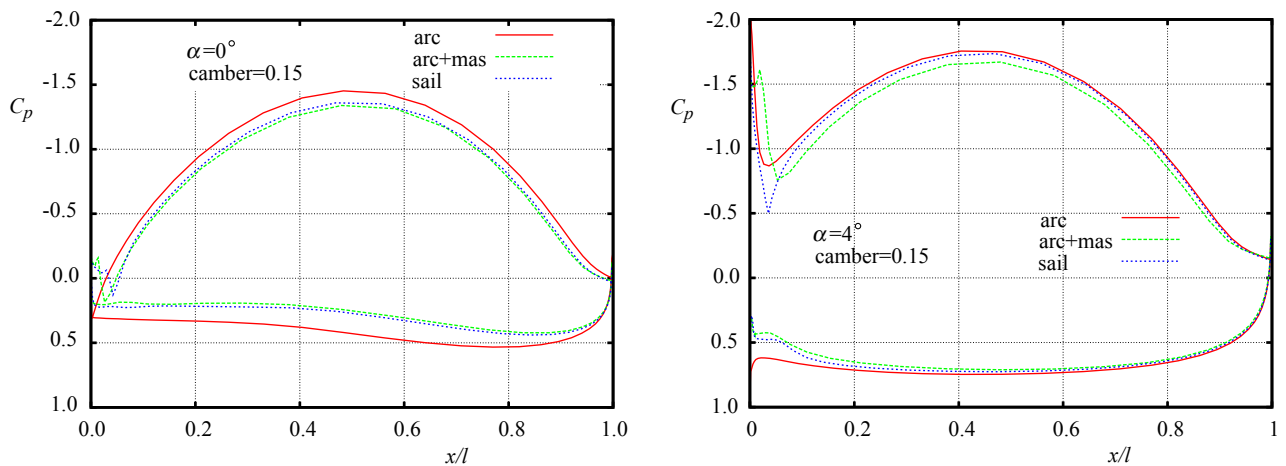


Fig.8 Pressure coefficients for a camber ratio of 0.15.

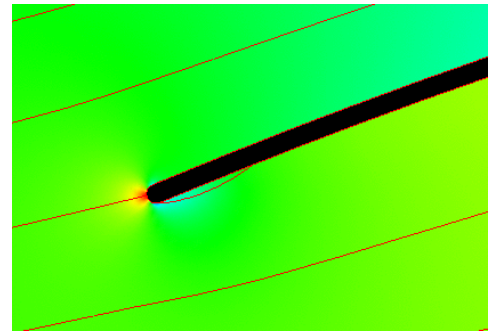
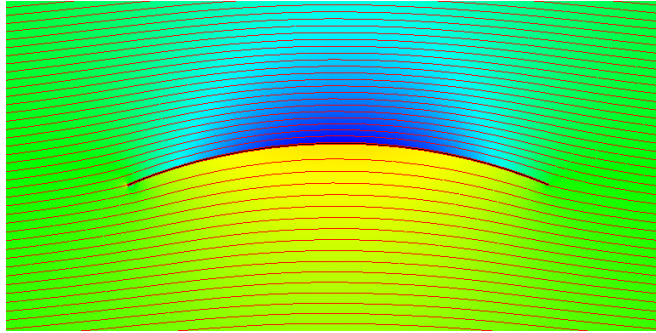
### 3・3 翼まわりの流れ

翼面上の圧力分布とともに、翼特性を詳細に検討するため、翼まわりの流れ場を示す。最も揚抗比が高いそり比 0.1 について 3 種類の翼形状の違いによる流れ場への影響について考察を行う。

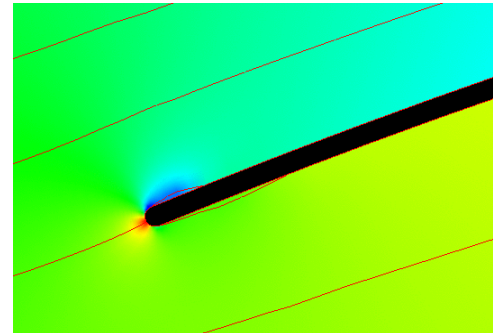
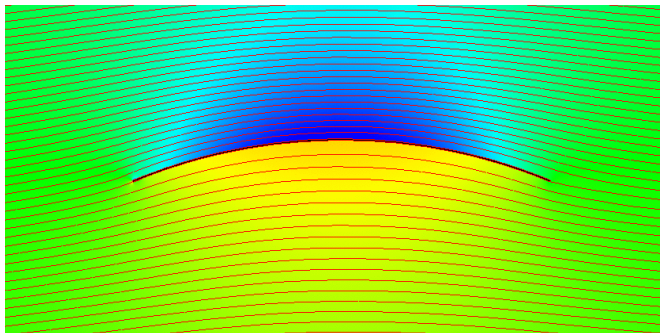
図 9 は円弧翼まわりの流れを表している。迎え角  $1^\circ$  は揚抗比が最も高い状態にあり、図 9-b に示すように無衝突流入の状態になっていることがわかる。前縁の正圧、負圧の両側に小さくて薄い離れバブルが生じ、すぐに再付着し、その後は翼面に沿った流れが形成されている。この離れバブルは翼厚比が 0.004 と薄いことを考えると非常に小さいことがわかる。迎え角が  $0^\circ$  では前縁正圧面側に小さな離れバブルが生じている。迎え角が  $0^\circ$  と  $1^\circ$  の抗力係数に大きな差はないが、図 5 に示す揚力係数に違いが表れるため、迎え角  $1^\circ$  で揚抗比が最大となっている。

図 10 はマスト付円弧翼を示している。迎え角  $2^\circ$  の無衝突流入時はマストではなく離れ、マスト直径の 7 倍（前縁から  $1/8$  翼弦長）付近で再付着する。このため、円弧翼に比較すると抗力係数は大きくなっている。迎え角  $0^\circ$  では、更にマストではなく離れ後、半翼弦長付近で再付着する流れとなるため、迎え角  $2^\circ$  に比較して抗力係数は更に大きくなっている。

図 11 はセイル翼まわりの流れを示している。迎え角  $3^\circ$  で、前縁正圧面に小さな離れバブルが生じ、直後で再付着し、再付着後は翼面に沿って流れている。このため、円弧翼に匹敵した低い抗力係数となっている。迎え角  $0^\circ$  では、前縁正圧面ではなく離れ、 $0.6$  翼弦長付近で再付着し、再付着後は翼面に沿って流れている。このため、迎え角  $0^\circ$  では、無衝突流入時（迎え角  $3^\circ$ ）の 2 倍程度の抗力係数となる。

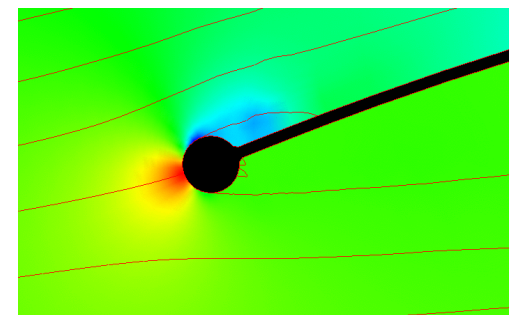
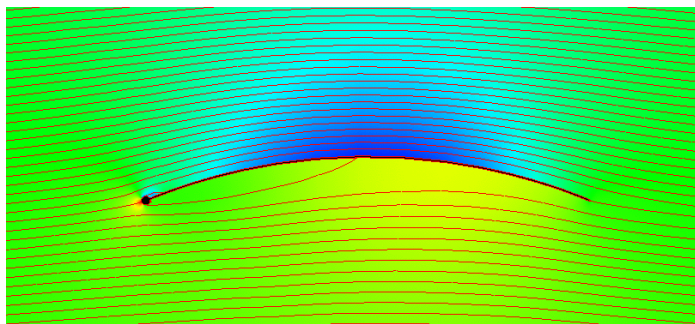


(a) Angle of attack of  $0^\circ$ .

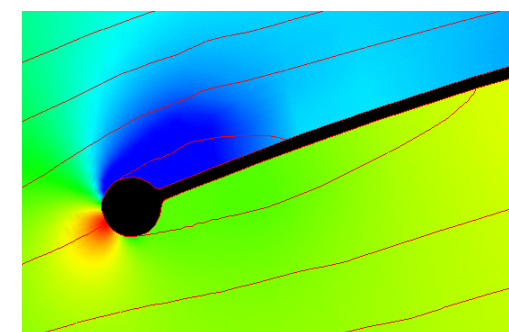
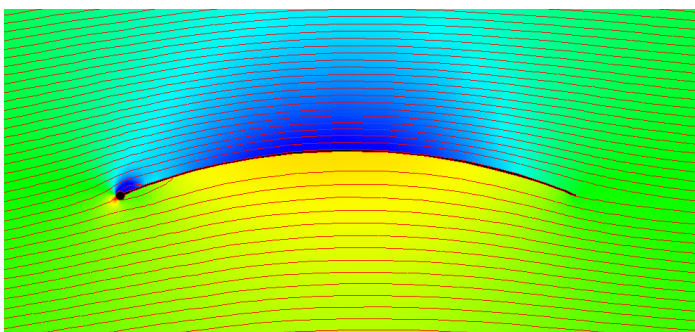


(b) Angle of attack of  $1^\circ$ .

Fig.9 Streamlines and pressure distributions (color contour) around an arc wing (camber ratio=0.1).

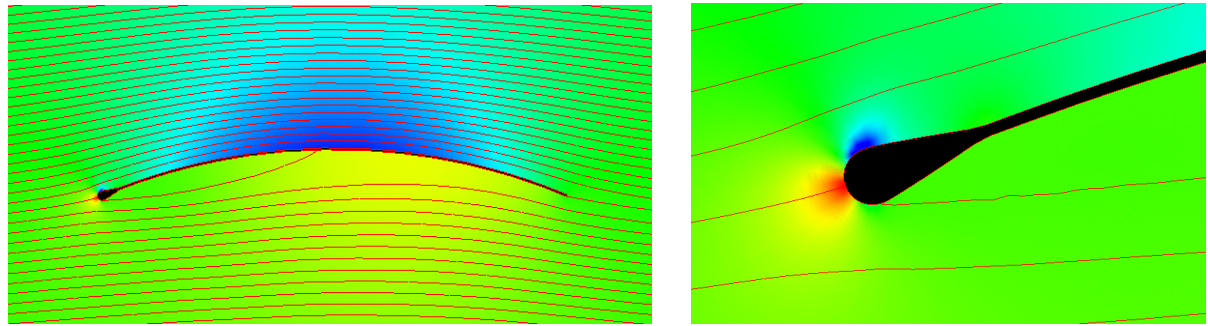


(a) Angle of attack of  $0^\circ$ .

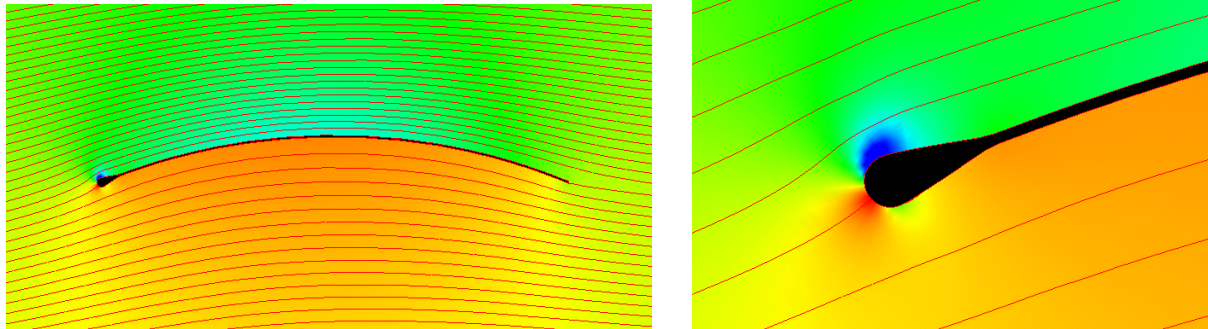


(b) Angle of attack of  $2^\circ$ .

Fig.10 Streamlines and pressure distributions (color contour) around an arc wing attached to a mast (camber ratio=0.1).



(a) Angle of attack of 0°.



(b) Angle of attack of 3°.

Fig.11 Streamlines and pressure distributions (color contour) around an sail (camber ratio=0.1).

#### 4. 結 言

ウインドサーフィン用セイルへのマスト影響を中心に解析を行い、基礎的なセイル翼特性の性能把握がなされた。当初、マストからのはく離による乱流促進による性能向上の可能性も期待したが、これによる下流側のはく離防止効果は特になく、マストによる性能低下のみが表れることがわかった。このため、マストのない円弧翼の性能が最も優れた結果となって表れている。以下に、本研究により得られた知見を列挙する。

- (1) そり比の増加とともに揚力係数、抗力係数が大きくなり、揚抗比はそり比が 0.1~0.15 付近で最も高くなる。このため、最適なそり比は 0.1~0.15 で、大きな揚力係数も得られる。
- (2) セイル翼はマスト下流を滑らかな形状としているため、円弧翼には劣るが高い揚抗比が得られ、そり比 0.1 で迎え角 3° のとき、揚抗比は 82 と高い値が得られている。そり比 0.15 では迎え角 4° で揚抗比 68 と多少低い結果となっている。
- (3) 揚抗比が高い迎え角では、無衝突流入に近く、円弧翼は前縁はく離が生じない状態となり、高い性能が現れている。マストがある場合は迎え角が 1° ~2° 大きいところで最も抗力係数が小さくなり、揚抗比も最大となる。

なお、本研究は科学研究費補助金 (21500095) の助成により実施されたことを記して謝意を表す。

## 文 献

- (1) Steger, J. L. and Chaussee, D. S., Generation of Body Fitted Coordinates Using Hyperbolic Partial Differential Equations, *SIAM Journal Sci., Stat. Comput.*, 1(4) (1980) , pp.431-437.
- (2) Perić, M. , Kessier, R and Scheuerer, G., Comparison of finite-volume numerical methods with staggered and collocated grids, *Computers & Fluids*, Vol. 16, No.4 (1988) , pp.389-403.
- (3) Rhie, C. M. and Chow, W. L., Numerical Study of the Turbulent Flow Past an Airfoil with Trailing Edge Separation, *AIAA J.*, Vol. 21, No. 11 (1983) , pp.1525-1532.
- (4) Patankar, S. V., *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw-Hill, New York (1980).
- (5) Leonard, B. P., A Stable and Accurate Convective Modeling Procedure Based on Quadratic Upstream Interpolation, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 19 (1979), pp.59-98.
- (6) Launder, B.E and Sharma, B.I., *Letters in Heat Mass Transfer*, 1(1974), pp.131-138.