

セール CFD 解析による AC 艇帆走性能評価 *1

学生会員 高野浩太郎 *2, 正会員 宮田秀明 *2

Sailing Performance Prediction of AC Boat by Use of CFD Analysis for Sails

By Kotaro TAKANO (*Student Member*) and Hideaki MIYATA (*Member*)

The optimization of the flying sail shape is performed for an International America's Cup sailing boat by use of CFD code for the sails. After grid test is made to confirm the degree of accuracy, highest lift/drag ratio is pursued by changing the parameter for sail shape. The obtained sail performance is put into the VPP (velocity prediction program) to find out the total system with highest VMG.

Keywords : *Sail, Velocity Prediction Program, International America's Cup Class, CFD*

1. 緒言

1.1 背景

アメリカズカップクラスヨットの設計・開発において、様々な性能評価法が使用されている。現在、その手法の中心は、CFD 解析と実験によるものである。実験は、水槽、風洞を使い、計測対象の流体力の推定を行う。しかし、セールなどの実験模型の製作、大規模風洞の必要性など困難な点が多いのが現状である。そのため、多くの形状やアイデアを評価するためには、CFD による解析が必要不可欠となる。

本研究で取り扱うセールに対しては、季によって開発された NSsail という CFD コードが開発されている^{1),2)}。しかし、一般のセール開発の現状としては、実際の製造を通しての、開発が主流であることが多い。つまり、経験豊かで優秀なセーラーが、自分の感覚と理論をもとにセールを開発し、自分が実際に扱ってみて改善点を見出し、それを繰り返し行うことによりセール開発を行っている。つまり、実物を作ってそれをもとに改良をして、性能向上を図ると言った形である。しかし、アメリカズカップのように、ヨットの中でも特殊なクラスのセールとなると、限られた開発期間などから、このような開発手法では微妙な性能差を

ものにすることができない。従来の多くの計算手法は、FEM とパネル法を組み合わせたものが用いられていることが多い。しかし、剥離と干渉を伴う場合は、NS 方程式ベースによる数値計算を利用した開発システムの方が信頼性が高い。本研究では、画像処理等で得られたフライング・シェープ（帆走時の形状）を CFD 解析し、形状最適化を行う。

一方、CFD や実験を利用した、ハル、キール、アペンデージなどの単体での性能評価は、CFD 解析や実験により、ある程度の精度での信頼性が確立されつつある。しかし、ヨット全体の性能の場合、それらを組み合わせただけでは全体性能を的確に評価できない。その評価を行うプログラムが VPP (Velocity Prediction Program)³⁾ である。VPP では、各部の力から、ヨット全体での力とモーメントの釣り合いを解き、ヨットの運動を評価するものである。これにセールの CFD による最適化結果を組み込んで、総合性能の評価を行うことができる。

1.2 目的

本研究では、NSsail によるセールの CFD 解析における格子依存性などの精度評価を行う。そして、セール形状差によるセール力の違いを NSsail により評価できるかどうか吟味する。また、その過程で得られた改良形状の特性を VPP に投入し、総合的なヨットの帆走性能評価が正しく行われることを確認する。

*1 平成13年11月15日 造船三学会秋季連合大会において講演、原稿受付平成13年11月30日

*2 東京大学大学院工学系研究科

2. セール CFD についての精度評価

2.1 CFD コードについて

本研究で、使用するセールの CFD コードは、李によって開発された、NSsail¹⁾ を用いることとする。NSsail では、非圧縮粘性流体の Navier-Stokes 方程式を有限体積法により離散化し、MAC 法のアルゴリズムにより時間発展的に解いている。格子については、様々なセール形状、船体姿勢によって計算を行うために、境界適合格子を採用している。また、jib sail と main sail がお互いに干渉するため、単一格子での格子生成は難しい。そこで、NSsail では、接合格子法を用いて、Fig.1 のように jib sail と main sail の間で二つの領域に分割し格子を生成する。それぞれの格子型は、H-H 型格子を用いる。

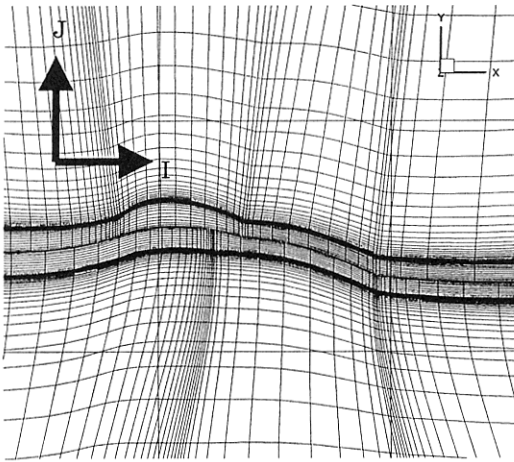


Fig. 1 Horizontal plane of the grid system.

2.2 計算条件

本研究では、AC 艇の帆走性能のうち、風上帆走状態での帆走性能について検証を行う。その為に、風上帆走状態でもっとも一般的な条件を Table2.2 のように設定した。風速 12knot の条件は、セールをデパワーせず使える風速である。その時の上り角は、TWA でおおよそ 35° であり、その時の艇速は一般に 9.5knot 程度と考えられる。また、横流れの角度を示す leeway を 2° とした。その結果、相対風向の AWA は、 18.7° となる。この AWA が、セールの実際の迎角に影響する。風上帆走状態では、ヨットは、heel モーメントの釣り合いを保つために、heel した状態で走る。その heel 角は、 25° として計算を行った。

Table1 Calculation condition.

TWS	12 knot
BSP	9.5 knot
TWA	35°
leeway	2°
heel	25.0°
AWA	18.72389°
Reynolds number	2.00E-05
wind shear	1/7 乗則

2.3 J 方向格子数変化による格子依存性の検証

J (横) 方向の格子数を増加させて計算を行った。まず、series1 として、main sail と jib sail の間の格子数を中心に J 方向の格子数を増やすシリーズを行った。series2 として、セール近傍での J 方向最小格子幅を series1 の値の 1/2 倍にして、series1 と同様に格子数を増やした計算を行った。

series1 については、Fig.2 に示すように、ほぼ安定な解を得ていることが分かる。ただし、セール表面上での圧力コンター図を書いてみると、格子数を増やすことによって、変化が見られる。格子数が最小の時のみ、圧力コンター図に違いが出ることから、この最小のケースでは、格子数が不十分であるといえる。

series2 においては、series1 よりも、sideforce で、10~20kgf、thrust で 3kgf 程度それぞれ増加した。しかし、この差は、全体の力に対して 2% 程度のものであり、全体を通して、ほぼ安定な解に達していると考えられる。ただし、圧力コンター図の変化から、jib sail 風上側をより精度良く解くためには、mainsail と jib sail の間の格子数を十分とる必要があることが分かった。

2.4 I 方向格子数変化による格子依存性の検証

J 方向の格子数は、先の検討を考慮して J 方向格子総数で 50 とした。次に、(縦) 方向格子数を増加させたときのセール力の変化から、NSsail の格子依存性を検証した。

Fig.4 に示すように、全体としては、定常な解の範囲に収まっていると考えられる。しかし、この計算を行う中で、jib sail と main sail の領域の接合部での格子幅の違いにより数値誤差が大きくなり、圧力分布などの解析に影響していることが分かった。特に、jib sail 風上側で main sail の上流部での格子幅の差が大きくなると流れ場の解析に大きな影響を持つ。そのため、2つの領域の接合面での格子幅が、大きく違わないように配慮する必要がある。

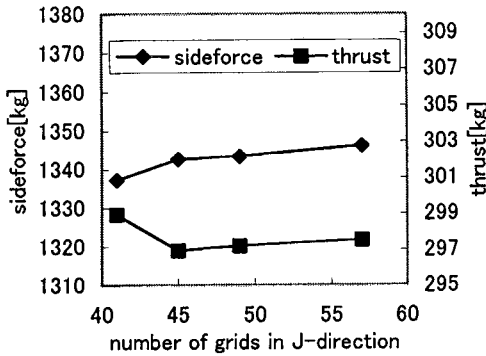


Fig. 2 Comparison of CFD result (sideforce and thrust) with variable grid numbers in J-direction, series1.

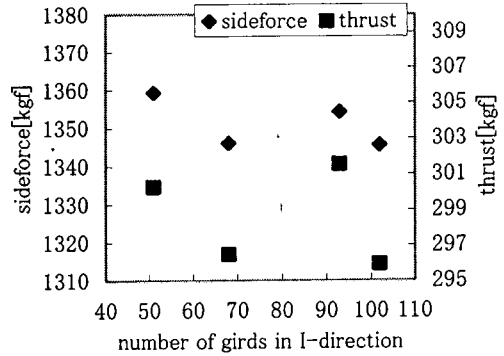


Fig. 4 Comparison of CFD result (sideforce and thrust) with variable grid numbers in I-direction.

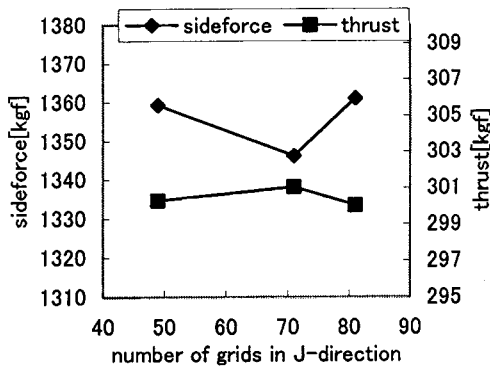


Fig. 3 Comparison of CFD result (sideforce and thrust) with variable grid numbers in J-direction, series2.

3. セール形状比較

3.1 比較形状について

本研究では、アメリカズカップ 2000 日本チームの開発段階でのデータ⁴⁾の中から3つの形状を選択し、計算を行った。main sail は、jib sail に比べて変形が小さいので、jib sail の形状差によるセール力の比較を目的とした。そのため、main sail の形状については、同一のものを使用した。比較対象の3形状を、Sail_A, Sail_B, Sail_C とする。

ここで、jib sail について3形状の違いを以下にまとめる。Sail_A は、Sail_B, Sail_C に比べて twist が大きく、entry が小さい。その為か、セール前部において、Sail_B, Sail_C よりも、平たいセール形状となっている。Sail_B と Sail_C では、draft の高さ方向の分布が違い、Sail_C の方が、セール上部で draft が小さいセール形状となっている。entry については、Sail_A では、高さ方向に勾配がついている。Sail_A のセール

下部の entry は、小さい。そのため、draft も小さくなっている。Sail_B のセール中央部の entry が大きく、draft も大きい。

Table2 Sail shape parameters.

	Height	Twist (deg)	Entry (deg)	draft position %	draft %
Sail_A	0	6	10	41.33	5.33
	1/5	8	15	40.88	8.03
	2/5	11	25	41.28	11.93
	3/5	16	30	42.03	15.94
Sail_B	0	5	27	40.00	6.00
	1/5	6	32	40.15	8.76
	2/5	9	41	40.37	12.84
	3/5	13	40	40.58	15.94
Sail_C	0	4	25	40.67	6.00
	1/5	5	29	41.18	8.09
	2/5	9	34	40.74	12.04
	3/5	13	38	41.18	13.24
	4/5	18	29	40.63	12.50

3.2 セール評価法

セール力の評価としては、sideforce と thrust の2つの力で評価する。Fig.5 のようにセールに生じる, lift と drag の合力を、船体軸方向とその法線方向に分解したものが、thrust と sideforce である。thrust が大きければ前進力が大きくなり、スピードが速くなる。また、sideforce は、アベンデージに生じる sideforce と釣り

合い、横流れしない風上帆走が実現される。つまり、sideforceが大きくなると、アベンデーのsideforceも大きくなり、アベンデーの抵抗が増加する。その為、sideforceは、小さい方が性能がよいセール形状であると言える。つまり、thrust-sideforceグラフ上では、左上に向かう方向が性能向上になると言える。

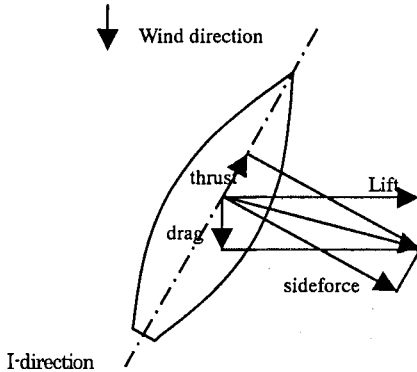


Fig. 5 Definition sketch of sideforce and thrust.

3.3 セール形状評価

まず、AWA=18.72の時について、3形状を比較する。Fig.6を見ると、Sail_Cが最適な形状であると考えられる。しかし、thrustの差は非常に小さいものと考えられる。そこで、これをjib sailとmain sailに分けて考えると、Fig.7よりjib sailでは、Sail_B、Sail_CがSail_Aに比べて大きな力を生みだしている。これは、twistを小さくしていることが影響しているものと考えられる。しかし、Fig.8よりmain sailは、その逆にSail_Aが他の2つに比べて大きな力を生んでいる。これは、jib sailのtwistを小さくすることは、jib sailとmain sailの間のスロットを狭めていることでもあるので、jib sailのmain sailに対する干渉が大きくなり、main sailのセール力を小さくしていると考えられる。結果として、jib sailとmain sailの合計での評価では、相殺されてあまり大きな差につながっていなかったと考えられる。

次に、AWAを先の条件から、約 $\pm 2^\circ$ 変化させて同じようにセール力を評価してみる。Fig.9を見ると、Sail_BとSail_Cは、ほぼ同じ変化をしている。Sail_Aは、他の二つに対して、AWAが大きいく所では、thrustが大きいのに対して、AWAが小さい所では、小さくなっている。このことから、Sail_Aは、他の二つに比べて、AWAを大きくとってフッティングの走りに有利な形状と考えることができる。逆に、Sail_C、Sail_Bの方がAWAを小さくとったポイントの

走りに向いた形状と考えることができる。

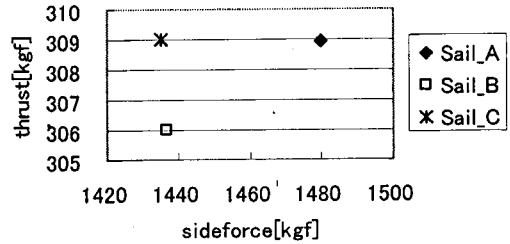


Fig. 6 Result for thrust-sideforce, jib & main sail.

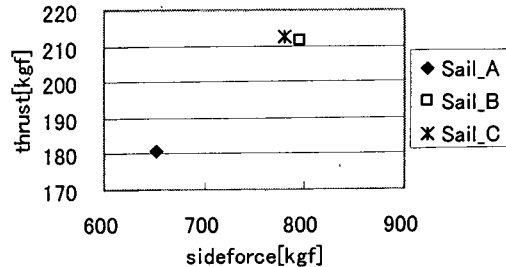


Fig. 7 Result for thrust-sideforce, jib sail.

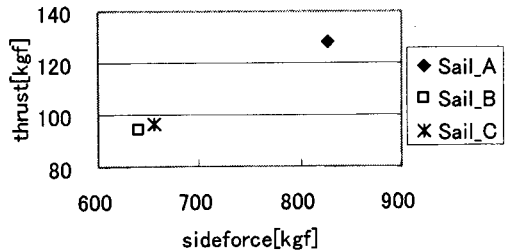


Fig. 8 Result for thrust-sideforce, main sail.

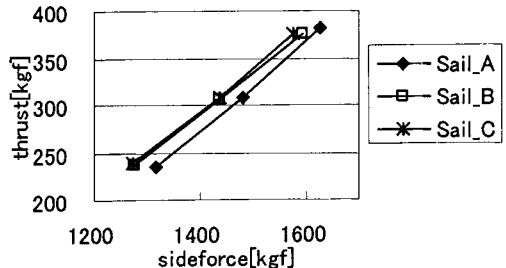


Fig. 9 Result for thrust-sideforce, jib sail.

4. 帆走性能評価

4.1 帆走性能評価法

前節までに、セール力のみでの評価を行ってきた。一方で、ヨットの帆走性能を評価する際には、ハル、ラダー、キール、セールと大きく分けても4つの要素の出す力とモーメントの釣り合いを考える必要がある。

現状の解析手法としては、以下の2つのことが行われている。

1つは、実艇での評価である。実船テストでは、2艇を並べて走らせて同じ海象条件で、艇速計、風向計、風速計、舵角計、GPS、Heel計などの計測器具のデータをもとに解析をする。しかし、各要素の出している力を正確に把握する事は困難である。従って、どちらが高速かという比較はできても、その要因を特定することは困難である。

2つ目としては、数値計算により帆走性能を推定する方法である。これには、VPP(Velocity Prediction Program)と呼ばれるプログラムを用いて行われる。この場合、実艇は必要でないために、設計段階での評価に使用することができる。また、各要素の出している力も推定することができるため、設計のためのツールとして、非常に重要である。ただし、それぞれの要素についてモデル化が行われるために、正しいモデルを用いて実艇テストの結果を取り入れないと実際の帆走性能を評価することができない。

4.2 VPPについて

VPPで帆走状態を表すパラメーターは、BSP(艇速)と、heel, rudder angle, leewayの4つである。この4つの未知数を求めるために、X方向の力、Y方向の力、X軸周りのモーメント、Z軸周りのモーメントの釣り合いから4つの方程式を作る。この中で用いられる各要素の出す力は、BSP, heel, rudder angle, leewayのいずれかの関数となっている。そのために、ニュートン法を用いて収束計算を行っている。

4.3 VPPによる性能評価

3章で計算した、セール形状をもとに、セールのデータベースを作成した。ハルについては、幅の違うシリーズで、Boat_Aを基準として、Boat_Bで6%、Boat_Cで14%幅が狭いハルである。また、その他のアベンデージについては、同一のものを採用し、ハルとセールの組み合わせで9ケースの計算を基に以下の評価を行った。

評価の基準としては、VMGにより評価する。VMGとは、風上帆走状態における艇速の風向成分である。このVMGで目的地までの風の高さを割ることにより、そのレグの所要時間が求められる。つまり、VMGが大きいほど風上レグにかかる時間は、短くて済むと言うことが言える。よって、VMGの大きさにより風上帆走の性能を比較することができる。

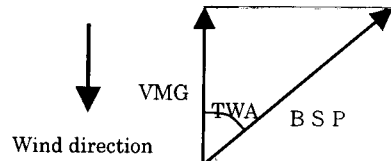


Fig. 10 Definition sketch of VMG.

4.4 帆走性能比較

Fig.11は、セール形状による帆走性能の違いを示している。これからすると、最大VMGの値が一番大きいのは、Sail_Cと言うことになり、同じハルであれば、Sail_Cが最適なセールと言うことができる。これを、一番幅の狭いBoat_Cで比較したものが、Fig.12である。これも幅の広いBoat_Aで比較したFig.11と全く同じ傾向を示しており、この3形状の中ではSail_Cが、最適な形状であることが分かる。

つまり、ハル幅の影響は、最大VMGの絶対値には影響するが、上り角への影響はない。セール形状が、上り角に関して影響を持っていることが分かる。また、このVPPによる解析の結果は、3章でセール単体での評価で、Sail_B, Sail_Cの方が、より上れるセール形状であるという結果とも、その特徴について一致している。そのことから、本研究で用いたVPPでの評価が妥当であることが分かった。

また、上の検証から最適な形状と考えられるSail_Cを用いて、ハルの幅差による影響を検証する。Fig.13に示すように、幅の広い順に最大VMGが大きいことが分かる。この幅変化のうちでは、幅の広いBoat_Aが最適な幅であるといえる。これは、Sail_A, Sail_Bについて比較しても同様の結果が得られた。

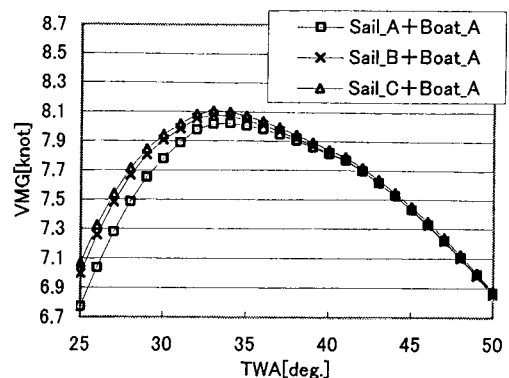


Fig. 11 VPP result, TWS=12knot, with Boat_A.

5. 結論

NSsail の格子のチューニングを行い、NSsail の流体力への格子影響の範囲を確認することができた。また、セール形状の比較と最適化を行い、セール形状差によるセール力の違いから性能評価できることを確認した。具体的な形状についての特長としては、jib sail の twist が main sail への干渉を支配するパラメーターとして考えられ、twist の小さいセールの方が、上り角を取って走ることができ、現在の AC 艇にはこの帆走状態にメリットがあることが分かった。セール CFD 解析結果を使った VPP 評価により、VPP によるセール評価が正しく機能していることが確認できた。

参考文献

- 1) 李 永雨：帆走艇セール設計への CFD シミュレーションの応用に関する研究，東京大学博士論文，1998.
- 2) Y.W.Lee H.Miyata：Application of CFD simulation to design of sails, Journal of Marine Science and Technology,4:163-172,1999.
- 3) James C.Oliver, John S.Letcher, Nils Salvesen: Performance Predictions for Star & Stripes, the Society of Naval Architects and Marine Engineers,1990.
- 4) 武田 貴志：レーシングヨットの総合設計システムの構築，東京大学修士論文，2000.

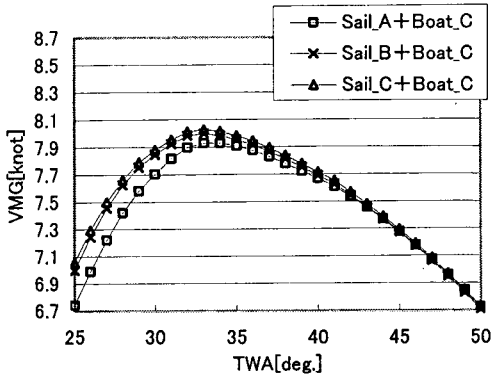


Fig. 12 VPP result, TWS=12knot, with Boat_C.

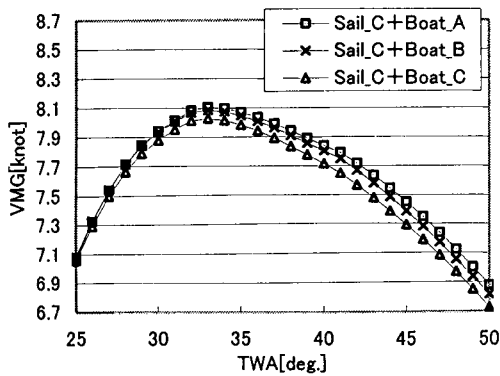


Fig. 13 VPP result, TWS=12knot, with Sail_C.