セーリングヨットの二翼干渉の CFD シミュレーション

^{学生員} 李 永 雨* 正員 宮 田 秀 明** 正員 佐 藤 御***

CFD Simulation of Two-Sail Interaction about a Sailing Yacht

by Young-Woo Lee*, Student Member Hideaki Miyata**, Member Toru Sato***, Member

Summary

The three-dimensional viscous flow around a jib and main sails of a sailing yacht is simulated by using of finite-volume method and zonal boundary technique. For the generation of grid system of the complicated three-dimensional geometry of sails, an interface boundary technique is introduced at the narrow space between two sails. This simulation is applied to the sail system of a IACC class boat and studies are made on the detailed flow around jib and main sails, the influence of interaction on the performance, the effect of the wind angle and so on. It is demonstrated that this method can be used as a tool for sail design and performance prediction of sails.

1. 緒 言

セーリングヨットの前進力はセールによって発生される ので、セールは推進装置に相当する。従って、特にレーシ ングヨットにおいてはセールの設計は非常に重要な部分を 占める。セールの技術開発は素材、設計法、製作法の3つ の部分がそれぞれ相関をもって発展させなくてはならな い。最も最近開発されたセールはカーボン繊維を使った一 体成形セールである。素材と製作法において大きな進歩が あったと言える。

セールの設計法に対しては,経験的な知識が尊重される 一方でいくつかの数値計算法が採用されてきた。市販ソフ トに極く定性的な性能予測を可能にするものもあるが,本 格的なセール特性解析法に関する研究としては,揚力面理 論^{1)や} vortex lattice²¹³⁾法によったものがいくつか存在す る。セールは厚さのない薄膜であり,圧力分布と張力がバ ランスして形状が決まるフレキシブル翼である。更に帆走

原稿受理 平成9年1月10日 春季講演会において講演 平成9年5月15日 条件や風の条件によって人為的に形状が制御され、変更される(トリミング)。従って、この形状決定法と空力性能解 析法とが連結されて設計法となることがふつうである。構 造的応答と空気力学的応答を同時に考慮する空力弾性問題 となる。

しかし、一方では、上記のような粘性を考慮しない空気 力学的解析法に限界があることも事実である。風上帆走用 のジブセールやメインセールでは風上側先端部や風下側の 広い範囲において流れが剝離することも多く、また二翼間 の干渉に粘性効果も予想される。風下帆走用のセールに関 しては流れを剝離させて前進力を発生させている部分が大 きい。従って、粘性を考慮したナビエ・ストークス式に基 づいた解析法が開発されることが期待されてきた。

本研究はこのような背景で開発された有限体積法による セール特性の数値解析法に関するものである。IACC(アメ リカズカップ) 級を始めとする多くのレース艇で用いられ るスループ型帆装を対象とし、接合格子法を導入して構成 したものである。本論文の段階では構造応答を取り入れな いで、固定されたセール形状に対して数値シミュレーショ ンを行う方法とし、最終的な最適形状を求める設計作業に 使えるものとして開発した。

本論文は第2章で計算法の説明を行い,第3章で二翼干 渉の特性を詳しく解析する。次に第4章で設計法のごく初

^{*} 東京大学工学系研究科船舶海洋工学専攻

^{**} 東京大学工学部

^{***} 東京大学工学部

26

日本造船学会論文集 第181号

歩的な応用例として風向角変化がセール特性に与える影響 を検討する。

2. シミュレーション法

2.1 座標系

物理空間における座標軸として Fig.1 に示すように二 つの座標系を用いている。地面固定座標 x-y-z 軸は x 軸 を一様流方向(船尾方向), y軸をヒール方向, z軸を鉛直 上向きに取る。艇に合わせた船体固定座標 ξ - η - ζ 軸は ξ 軸を船のセンターライン方向、く軸をマスト方向に取る。し たがって、 ヒールは x 軸まわりの回転で、 ヨーは z 軸まわ りの回転である。見かけ風向角とヒール角がない場合、二 つの座標系は一致するようになる。この座標系と力との関 係の定義を Fig.2 に示す。図のように風はヨットの進行方 向のポートサイドから吹き,艇は n軸の正方向にヒールし た場面を考える。この時、セールに吹いてくる風速を見か けの風速と呼び、その角度を見かけ風向角と呼ぶ。抗力と 揚力は地面固定座標ベースで定義し、推力、横力、風圧中 心点は船体固定座標ベースで定義している。風圧中心を示 す CEx と CEz を定義すると、Fig.2のようにヒールモー メント(ブームまわりのモーメント)を横力に置き換えた 場合,その作用中心点の 2座標を CEz にし,ヨーモーメン ト(マストまわりのモーメント)を横力に置き換えたもの を CEx にする。すなわち、横力と Cez の積がヒールモーメ ントとなり、横力と Cex の積がヨーモーメントになる。

2.2 有限体積法

計算手法は船体まわり流場解析用の WISDAM-V 法⁴



Fig. 1 Coordinate system of sail.

に準拠している。このコードは保存系の非圧縮性流体の Navier-Stokes 方程式を有限体積法によって離散化し, MAC 法のアルゴリズムにより時間発展的に解く方法であ る。

諸物理量はデカルト座標系で定義されており,スタッガ ード変数配置が採用されている。スキームとして,移流項 には3次精度の上流差分,拡散項には部分陰解法を用い, 圧力解法は SOR 法によっている。乱流モデルには SGS モ デルの簡易型を用いる。

非圧縮性粘性流における支配方程式は運動量保存の式 (1)と質量保存の式(2)である。

$$\frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial t} + \operatorname{div} \boldsymbol{T} = 0$$
 (1)

$$\operatorname{div} \boldsymbol{u} = 0 \tag{2}$$

応力テンソル T は次のように定義する。

$$T = \phi I + uu - \frac{1}{Re} \{ \text{grad } u + (\text{grad } u)^T \} \overline{u'u'} \quad (3)$$

ここで、Iは単位メトリックスで、 $\overline{u'u'}$ は SGS レイノルズ 応力、 ϕ は無次元化された圧力で次のように定義する。

$$\phi = \frac{P}{\rho} \tag{4}$$

SGS レイノルズ応力は次のように定義する。

$$\overline{\boldsymbol{u}'\boldsymbol{u}'} = \frac{2}{3}k\delta^{ij} - 2\nu_s \overline{e^{ij}} \tag{5}$$

ここで、 δ はクロネッカーのデルタで、kは乱流エネルギー、 ν_s は SGS 渦粘性係数、 e^{ij} は歪テンソルである。

$$2^{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u^i}{\partial x^m} \delta^{mj} + \frac{\partial u^j}{\partial x^n} \delta^{in} \right)$$
(6)

(5)式で定義した SGS レイノルズ応力中の渦粘性係数



Fig. 2 Definition sketch of the aerodynamic forces and angles in the close-hauled condition.

$$\nu_s をスマゴリンスキーの仮定により次のように定義する。
$$\nu_s = L_s^2 (2\overline{e^{ij} e_{ij}})^{\frac{1}{2}}$$
(7)$$

ここで, *Ls* は SGS モデルの格子間隔ベースの長さスケー ルで,次のように取る。

$$L_s = C_0 \min(\varDelta x^1, \varDelta x^2, \varDelta x^3)$$
(8)

ここで、 $C_0 = 0.2 とする。$

また、壁面近くで次式で示される減衰関数を与える。

$$L_s = L_s \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{y^+}{26}\right) \right\} \tag{9}$$

2.3 接合格子法

格子については基本的には Fig. 3 のような H-H タイプ の 3 次元境界適合格子を用いるが,セールは Fig. 4 のよう にジブセールとメインセールがオーバーラップする部分が あり,しかも上下方向にも一定ではないため,単一格子で 全体を歪まないように構成させるのは非常に難しいことで ある。又,ジブセール・メインセールのオーバーラップ部



Fig. 3 Grid system for sail.



Fig. 4 Zonal boundary grid and overlapped shape of the chords of two sails.

が変化したり,船体のセンターラインとなすセールの角度 が変わっても簡単に対応できるようにする必要がある。し たがって,メインセールとジブセールのそれぞれに対して H-H型格子を生成し,その二つの領域を接合格子法によ ってつき合わせる方法を用いている。この時セールのスパ ン方向の格子線は両者で一致するように生成させる。こう すると,接合境界で格子線が一致しない方向はコード方向 (長手方向)のみとなり,補間の次元も1次元的になって保 存性への悪影響も軽減される。

Fig. 4 のように接合境界でコード方向の格子線は一致し ないため、速度・圧力を補間して用いている。具体的な解 法として、各時間ステップにおいてある領域のインターフ ェース境界での速度と圧力はもう一方の領域の速度と圧力 を補間し、その値をディリクレ条件として与え、それぞれ の領域を時間発展的に解く。補間法としては古典的なラグ ランジュ補間式(10)の N=2の線形補間を用いている。

$$P(x) = \frac{(x - x_2)(x - x_3)\cdots(x - x_N)}{(x_1 - x_2)(x_1 - x_3)\cdots(x_1 - x_N)}y_1 + \frac{(x - x_1)(x - x_3)\cdots(x - x_N)}{(x_2 - x_1)(x_2 - x_3)\cdots(x_2 - x_N)}y_2 + \cdots$$
(10)
$$+ \frac{(x - x_2)(x - x_3)\cdots(x - x_{N-1})}{(x_N - x_2)(x_N - x_2)\cdots(x_N - x_{N-1})}y_N$$

このように領域を分割した場合,保存性の問題を解決し なければならない。検証に使える実験データがないため, 簡単な二次元の数値計算テストで接合格子法の保存性の満



Fig. 5 Grid system of zonal boundary grid and single grid in two dimension.

足度を検証する。すなわち,単一格子系の計算と接合格子 系の計算それぞれの計算を行う。その格子系を Fig.5 に示 し,結果を Fig.6 に示す。検証の計算に用いられた格子数 は,単一格子系の計算に約 23000 セルで,接合格子系の計 算に約 19000 セルで行った。Fig.6 を見ると,圧力コンター の連続性など単一格子系の結果とよく一致しており,保存 性は満たされていると考えられる。

2.4 境界条件

セール表面では、滑りなしの条件を課し、表面でのすべ ての速度成分はゼロで、圧力はゼロ垂直勾配条件を与える。 流入境界ではシアーのない定常状態の見かけ風速を与え、 見かけ風向角はセールを回転させて作る方法を用いる。流 出境界、側面境界、上部境界では速度、圧力ともに単純な ゼロ垂直勾配条件を課する。計算領域の底部境界は動かな い海面を考えており、フリースリップ条件を与える。ジブ セールの下端からその面までの距離を乾舷高さとした。



(b) zonal boundary grid system

Fig. 6 Comparison of pressure (a) computed by single grid system (b) computed by zonal boundary grid system マスト, ブーム, ラフワイヤは物体境界に含まれてない。 又, リーウェイアングルは特別に考慮せず, 見かけ風向角 に含まれている。

3. 二翼干渉のシミュレーション

3.1 計算条件

IACC 級ヨット (スループリグ形式)の風上帆走状態 (close-hauled 状態)をシミュレーションの対象とする。ヨ ットにとって最も重要な帆走状態であるからである。セー ルは前方のジブセールと後方のメインセールによって構成 されている。Fig.2のように風はヨットの進行方向のポー トサイドから吹き,艇は η 軸の正方向にヒールした場面を 考える。

計算に使われたセールの主要目を Table 1 に示す。本論 文では弾性応答を取り入れないで、剛体セールに対して数 値シミュレーションを行う。セール形状は最も典型的な実 艇帆走状態を考慮し,第 29 回アメリカズカップレース中の 日本艇のセールを撮影し、セール形状解析ソフトウェア、 SSA-2 D でデータを取り、平滑化して作成したものであ る。実形状でのセール特性の評価を行うのが目的である。

計算条件を Table 2 に示す。流入境界ではシアーのない 定常状態の見かけの風速を与え,見かけ風向角はセールを 回転させて作る方法を用いる。船体は考慮しないで,セー ルはフリースリップ条件の与えられた平面上にヒールして 立っている状態とする。計算領域の大きさは,流入境界か らジブセールの前縁までは無次元長さの2倍,メインセー ルの後縁から流出境界までは8倍,側面境界までは2.5倍 にした。用いた格子数は,単独状態の計算に約7万セルで, 二翼状態の計算に約12万セルで行った。無次元長さはジブ セールの下端長さとし,時間1はこの長さを見かけの風速 が通過する時間である。一般的な帆走状態を考慮し,見か け風向角は20°で,ヒールも20°を選択し,リーウェイアン グルは見かけ風向角に含まれているとする。

Table 1 Dimension of jib and main sail.

	jib sail	main sail
foot-length of sail	11.1996 (m)	9.96044 (m)
sail height	26.1(m)	30.5(m)

Table 2Conditions for calculation of two-sailinteraction.

	case1	case2	case3
	(jib only)	(main only)	(main+jib)
nondim. length	foot-length of jib sail		
Rn	1.0×10^{5}		
Grid	56 ×	31×41	$(56 \times 26 \times 41) \times 2$
dymin	1.0×10^{-3}		
turb. model	SGS model		
Heel	20 (deg)		
見かけ風向角	20 (deg)		

まず単独翼のシミュレーションをジブセールのみの場合 (case 1) とメインセールのみの場合 (case 2) をそれぞれ に対して行い,次にメインセールとジブセールの二翼のシ ミュレーション (case 3)を行い,その流場と流体力に基づ いて二翼の干渉効果と剝離の構造を調べる。ここで、単独 翼の計算に使われたジブセールとメインセールの形状は、 二翼での帆走状態での形状そのままで用いている。

計算は停止時より風を無次元時間1で加速し,無次元時間5でほぼ定常に達する。すべての計算結果は無次元時間5での流場に基づいている。

3.2 **二翼**干渉の流場

ジブセール単独の場合(case 1)は, Fig. 7(a)と Fig. 8(a) に見られるように見かけ風向角がジブセール前縁のエント ランスアングルより大きいため,流れが風下側前縁に当た り,風上側前縁で剝離が発生する。風上側前縁ではこの剝 離で圧力が低下し,風下側前縁では流れが直接当たるため, よどみ点になって正の圧力領域になって揚力の損失にな る。ジブセール単独の場合の表面圧力分布を Fig. 9(a)に示 す。この剝離による風上側前縁での負の圧力はスパン方向 全体で見られる。また,ツイスト角を持つために z/span= 0.6 位置から上端まで翼の全領域が剝がれ,負の圧力領域 が発生している。

メインセール単独の場合(case 2)は Fig. 7(b)と Fig. 8(b)に見られるように平板の流れに似た様子を見せてい る。風上側での順調な流れに対し,風下側では激しい剝離



Fig. 7 Velocity vector on the xy-plane at z/span= 0.5(a) case 1 (jib only) (b) case2 (main only)

が見られ,このような単独状態での揚力発生が望ましくないことが判る。



Fig. 8 Contours of pressure on the xy-plane at z/span=0.5, the contour interval is 0.05 (a) case 1 (jib only) (b) case2 (main only)



Windward side



Leeward side





(b) case2(main only)

Fig. 9 Contours of pressure on the sail surface for the single sail condition, the contour interval is 0.05 (a) case 1 (jib only) (b) case2 (main only)

日本造船学会論文集 第181号

二翼の場合(case 3)のシミュレーション結果で z/ span=0.5 位置の断面での速度ベクトルと圧力コンターを Fig. 11(a),(b)にそれぞれ示す。圧力コンター Fig. 11(b) を見ると、二翼の場合は、圧力の絶対値が単独状態よりジ ブセールでは大きく、メインセールでは小さくなっている ことが判る。Fig. 10のように二翼干渉の2次元的なメカニ ズムを考えてみると、ジブセール前縁での循環は単独状態 より大きくなり、アップウォッシュの流れが加速され、ジ



Fig. 10 Circulation and Upwash-downwash effects between the two sails.







Fig. 11(a) Velocity vector on the xy-plane at z/ span=0.5 for case3 (main+jib) (b) Contours of pressure on the xy-plane at z/ span=0.5, the contour interval is 0.05. for case3 (main+jib)

ブセールの有効迎角が増加されることになる。従って, Fig. 11(a),(b)のようにジブセールの風上側前縁での剝離は小 さくなり,負圧力も消えるようになる。ジブセールの風下 側では加速された流れが剝離を後ろに遅延させ,最低圧力 領域がコードの中間と後縁のほうに位置し,風下側全体が 単独状態より低い圧力領域になっている。

Fig. 11(a),(b)のメインセールを見ると,風下側での剝 離はオーバーラップされたジブセールの後縁から加速され た流れの影響でなくなっている。いわゆるスロット効果で, 風下側での負圧力増加が期待されるが,Fig. 8(b)で分かる ようにジブセールの存在により単独状態の絶対値より小さ くなっている。したがって,オーバーラップ部の最適割り 合い長さとジブセールのツイスト角,メインセールのキャ ンバーとコードは重要な設計パラメータになる。またメイ ンセールの風下側前縁での圧力は単独と比べ,正圧力にな っている。これは,ピークサクション速度が減少した結果 で,風下側前縁での圧力は大きくなって揚力の損失が生じ る。

次に剝離の様子に対して述べる。二翼のセール表面での 速度ベクトルを Fig. 12 に示す。風上側ではメインセール よりジブセールのほうが 3 次元性の強い流れを見せてい る。一方,風下側を見るとメインセールとジブセール共に 剝離が見られるが,メインセールの上部での流れは非常に 複雑な剝離パターンになっている。これをもっと詳しく調 べるため,xy-断面での速度ベクトルのスパン方向の変化 様子を Fig. 13 に示す。ここで(b) k=22 番はジブセールの 上端の番号で,Iポイントと呼ぶ。特徴的なのはIポイント の断面を示す Fig. 13(b)で非常に複雑な渦が発生している ことである。これはジブセールから発生した翼端渦がメイ ンセールの流れに影響を与え,メインセールから発生する 翼端渦と干渉し合って複雑ないくつかの渦を作った結果で ある。メインセールに入ってくる有効迎角はツイストだけ ではなく二枚翼干渉とジブセールの後縁とメインセールの



Fig. 12 Velocity vector on the sail surface for case 3 (main+jib)



(a) k=19



(b) k=22, I-point



(c) k=27

Fig. 13 Velocity vector on the xy-plane for case 3 (main+jib)

前縁の位置関係によって上下方向各断面でそれぞれ違う値 を持つ。この剝離に伴うメインセールの風下側での圧力は 高くなり,メインセールの性能を悪化させる結果になる。

上記のように、ジブセールの風上側での正の圧力回復と 風下側での負の圧力増加のため、メインセールを設けたジ ブセールの性能は上がる結果になる。z/span=0.5 での Cp のコード方向分布をメインセールとジブセールそれぞれ Fig. 14 に示す。図の縦軸の上側は風下側で、下側は風上側 である。単独の状態より二翼状態で、両面の圧力差はジブ セールのほうが大きく、メインセールのほうは小さくなっ





Fig. 14 Cp distribution on the xy-plane for three cases (z/span=0.5)





ている。Fig. 15 に揚抗比の時間変化を示す。ジブセールは 単独状態と比べ,かなり大きな揚抗比を得ていることが判 るが,メインセールの揚抗比は単独状態より少し小さくな っている。これは,揚力を出している割合はメインセール よりジブセールのほうが大きいことを語っている。Fig. 16 32



Fig. 16 Distribution of thrust and side force in the spanwise direction for case3.

に推力と横力のスパン方向分布を示す。図の縦軸の値,1は Iポイントのスパン方向の位置を示す。横力を出す割合は メインセールとジブセール両方大きな差は見られないが, 推力を出す割合はジブセールがメインセールより約2.3倍 である。又,特徴的な現象は I ポイント付近のメインセール の推力と横力は急に落ち、面積を持っているにもかかわら ず、力を出せないのは望ましくないことが判る。

メインセールとジブセール間の相互干渉の特徴をまとめ ると以下になる。

- (i) ジブセールの前縁でのアップウォッシュの増加によ りジブセールのよどみ点は風上側のほうに移動し、 ジブセールのリーチでの速度は単独状態より早くな り、負圧力が大きくなる。
- (ii) メインセールではジブセールの存在によりよどみ点 が風下側のほうに移動する。この結果、メインセー ルの風下側前縁でのピークサクション速度は減少さ れ、逆圧力勾配も減少される。
- (iii) (i), (ii)の関係でジブセールは大きな風向角でも 剝離しにくくなり, また, メインセールは単独状態 より剝離が遅延されることになる。
- (iv) 二翼が重ならないメインセールの上部は翼端渦の影 響と、ジブセールと独立な流入角によって揚力の発 生が主要下部と不連続になる。

4. 風向角変化のシミュレーション

4.1 計算条件

セールの機能は推進力を得ることであるが、これと同時 に発生するヨーモーメントやヒールモーメントが艇全体と しての抵抗と密接な関係を持つため、力の大きさと風圧中

Table 3 Conditions for calculation of a relations of apparent wind angle and center of effort.

	case3 (main+iib)	case4 (main±iib)	
	(mani jib)	(mam jib)	
nondim. length	foot-length of jib sail		
Rn	1.0×10^{5}		
Grid	$(56 \times 26 \times 41) \times 2$		
dy_{min}	1.0×10^{-3}		
turb. model	SGS model		
Heel	20 (deg)		
見かけ風向角	20 (deg)	25 (deg)	





(c) case4(AWA=25),jib sail



Fig. 17 Contours of pressure on sail surfaces for case 3 and case4, the contour interval is 0.05.

セーリングヨットの二翼干渉の CFD シミュレーション



Fig. 18 Integrated hydrodynamic force distribution of the two sails in the spanwise direction.

心位置が重要になる。又, セールの風圧中心の位置関係は 艇が帆走する時全体のバランスを左右し, 艇全体の性能を 予測する時,非常に重要な変数である。従って, 風圧中心 点の微妙な変化は艇の性能に大きな影響を及ぼすため,ト リミングあるいは風向角変化に伴う力と風圧中心点の変化 を正確に求めるのは非常に重要である。本章では, 風上帆 走時の性能に最も大きな影響を与える見かけ風向角を変え た2種類の計算を行ない,その流場,力および風圧中心の 変化などを調べた。Table 3 に計算条件を示す。見かけ風 向角を 20°と 25°にして計算し,他の条件は全く同じ条件で あり,弾性応答を取り入れないで,固定された形状に対し て数値シミュレーションを行う。

4.2 流場と力の変化

見かけ風向角=20°(case 3)と見かけ風向角=25°(case 4)の表面の圧力分布をFig. 17に示す。

風向角が大きくなると,風上側に発生した剝離は少なく なりその結果,最大圧力位置も前縁のほうに移動する。Fig. 17のジプセールとメインセールの風上側表面圧力分布を 見ると,最大圧力部は前縁のほうに移動していることが判 る。

スパン方向の流場の変化もセールの3次元的な幾何形状 に依存する。コード方向の圧力係数を積分して求めた値の スパン方向分布を Fig. 18 に示す。図の横軸の原点から右 側は風上側でのセールの動流体力で、左側は風下側でのセ ールの動流体力を示す。これを見ると、上端より下端のほ うの圧力変化が大きいことが判る。

二つの風向角のケースに対して,風圧中心位置のスパン 方向座標 CEz とコード方向座標 CEx の時間変化を Fig. 19 に示す。風向角=25°の状態は風向角=20°の状態より風 圧中心点が下方に約 0.4 m,前方に約 0.17 m 移動してい る。

揚力と抗力,揚抗比の時間変化を Fig. 20 に示す。風向









Fig. 20 Time history of Cl, Cd and L/D.

角=25°の状態は風向角=20°の状態より揚力と抗力がそれ ぞれ 21%と 56%大きくなり,揚抗比は 22.5%減少してい ることが判る。

5. 結 言

有限体積法と接合格子法を用い,3次元セールまわりの 流場解析プログラムを開発し,比較的単純なスループ帆装

NII-Electronic Library Service

の二翼問題へ応用した。実験結果との比較検証など,すぐ 行わなければならない課題も多いが,次の結果が得られた。

- 1) 有限体積法と接合格子法の組み合わせがスループリグ の場合,適当な CFD 手法であることが判った。
- 2) 単独性能と二翼による性能は流れの干渉、剝離などの 複雑なメカニズムによって構成されており、粘性を考 慮した解析法によってそれらが明らかになった。本法 は設計法に最もふさわしい計算法の一つであることが 判った。
- 風向角変化などの設計パラメータまたは帆走パラメー タの変化に対する剝離を含む特性の変化が判り、形状 設計を含む各種のセール設計への応用可能性を示すことができた。

参考文献

- 1) J. H. Milgram, "Sailing vessels and sails", SNAME, 1972.
- Jackson, P. S., "Numerical analysis of threedimensional elasticmembrane wings", AIAA Journal, Vol. 25, No. 5, 1987, pp. 676-682.
- Fukasawa, T., Katori, M., "Numerical Approach to Aeroelastic Responses of Three-dimensional Flexible Sails", The 11th Chesapeake Sailing Yacht Symposium, 1993.
- Zhu, M., Miyata, H. and Kajitani, H.: A Finite Volume Method for the Unsteady Flow About a Ship in Generalized Coordinate System, 日本造船 学会論文集, 第 167 号 (1990), pp. 9-15
- 5) Rai, M., "A Conservative Treatment of Zonal Boundaries for Euler Equation Calculations", J. of Comput. Physics 62, 472-503, 1986

³⁴