

鉛直軸直線翼型風車周りの3次元流れの数値シミュレーション  
Numerical simulation of three dimensional flows around SW-VAWT

お茶の水女子大学 大学院人間文化研究科 水上洋子(Yoko Mizukami)  
Graduate School of Humanities and Sciences, Ochanomizu University  
お茶の水女子大学 情報処理センター 佐藤祐子(Yuko Sato)  
Information, Media and Education Square, Ochanomizu University,  
お茶の水女子大学大学院人間文化研究科 河村哲也(Tetuya Kawamura)  
Graduate School of Humanities and Sciences, Ochanomizu University

Abstract

Three dimensional flows around straight wing vertical axis wind turbine (SW-VAWT) are investigated by numerical simulation. The flow field around one blade with NACA0012 aerofoil is analyzed, although usual turbine has two blades or more. Incompressible Navier-Stokes equations are solved by the fractional step method with rotating coordinate system. The number of computational grid points is  $96 \times 64 \times 64$ . The third order upwind finite difference scheme is chosen for the approximation of the non-linear terms. The torque and power coefficients are computed for various cases of the tip speed ratio. The effectiveness of the numerical method is shown and fundamental data for design are obtained.

1 緒言

近年、地球温暖化が問題視される中、二酸化炭素の排出量を抑制する取り組みが進んでいる。二酸化炭素の排出は石油・石炭などの化石燃料の燃焼が大きな一因であるとされるため、風力発電は化石燃料を使用しないクリーンな発電法として注目されている。

風力発電に用いる風車を設計する際、風車周りの流れを解析することは有用であるといえる。風車は回転の軸の性質によって鉛直軸型と水平軸型に分類される。鉛直軸型は回転軸が地面に垂直であるものをいう。水平軸型とはプロペラ型風車に代表されるように回転軸が地面に対して水平に取り付けられているものをいう。水平軸型は回転軸の向きが風向きに一致するように風向きの変化に応じて回転軸を制御する機構を持つ必要があるが、鉛直軸型の風車は風向きに関係なく回転することができる利点がある。また、風車は回転の動力の性質によって抗力型と揚力型に分類される。抗力型は風速以上の速さで回転できないのに対し、揚力型は風速以上の速さで高速回転することができるため、揚力型の風車は発電に適しているとされている。

そこで本研究では、風力発電に用いられる風車の中から鉛直軸揚力型の風車である、鉛直軸直線翼型風車(SW-VAWT: Straight Wing Vertical Axis Wind Turbine)を取り上げてその周りの流れを解析し、風車設計のための基礎的なデータを得ることを目的とする。鉛直軸直線翼型風車の研

究は実験的なものと数値シミュレーションを行ったものがいくつか発表されている[1][2][3][6]。実験や観測を行うことは実際の現象を把握するために重要であるが、実験設備の準備に経済的・時間的コストがかかる。そこで、実験を始める前に数値シミュレーションを行うことはこういった実験にかかるコストの削減につながる。

本研究では差分法を用いた数値シミュレーションにより、鉛直軸直線翼型風車周りの3次元流れの解析を行う。Fig. 1には本研究の対象とした、単翼の鉛直軸直線翼型風車を示す。

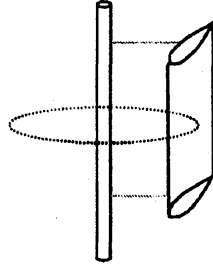


Fig. 1 One-blade SW-VAWT

## 2 計算手法

### 2.1 基礎方程式

静止座標系において問題を扱おうとすると風車の回転に伴ってブレード断面の翼型の座標値は変化する。そこで、基礎方程式を回転座標系を用いて解くと翼型の座標値が変化しないため単一の格子で計算が可能になる。

回転座標系であらわした3次元の連続の式および非圧縮性 Navier-Stokes 方程式は以下のようになる。

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} + \frac{\partial W}{\partial Z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} + W \frac{\partial U}{\partial Z} - \omega^2 X + 2\omega V = -\frac{\partial p}{\partial X} + \frac{1}{\text{Re}} \left( \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Z^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} + W \frac{\partial V}{\partial Z} - \omega^2 Y - 2\omega U = -\frac{\partial p}{\partial Y} + \frac{1}{\text{Re}} \left( \frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Z^2} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + U \frac{\partial W}{\partial X} + V \frac{\partial W}{\partial Y} + W \frac{\partial W}{\partial Z} = -\frac{\partial p}{\partial Z} + \frac{1}{\text{Re}} \left( \frac{\partial^2 W}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial Z^2} \right) \quad (4)$$

ここで、(X,Y,Z)と(U,V,W)はそれぞれ回転座標系での座標値と速度を表す。また、 $\omega$ は風車の回転角速度である。

静止座標系での座標値を(x,y,z)、速度成分を(u,v,w)とすると静止座標系と角度 $\theta$ で回転した回転座標系の間には次の関係が成り立つ。

$$\begin{aligned} x &= X \cos \theta + y \sin \theta, & X &= x \cos \theta - y \sin \theta \\ y &= -X \sin \theta + Y \cos \theta, & Y &= x \sin \theta + y \cos \theta \\ z &= Z, & Z &= z \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} u &= U \cos \theta + V \sin \theta + \omega y, & U &= u \cos \theta - v \sin \theta - \omega Y \\ v &= -U \sin \theta + V \cos \theta - \omega x, & V &= u \sin \theta + v \cos \theta + \omega X \\ w &= W, & W &= w \end{aligned}$$

回転座標系の方程式を(1)~(4)式解くと、(5)式の関係を用いて静止座標系での解を得る。

## 2.2 数値解法

流れの基礎方程式は Fractional Step 法[4]を用いて計算を行った。Fractional Step 法の計算手順は以下の通りである。

$$\frac{\mathbf{v}^* - \mathbf{v}^n}{\delta t} = -(\mathbf{v}^n \cdot \nabla) \mathbf{v}^n + \frac{1}{\text{Re}} \nabla^2 \mathbf{v}^n - \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) - 2\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}^n \quad (6)$$

$$\nabla^2 p^{n+1} = \frac{1}{\delta t} (\nabla \cdot \mathbf{v}^*) \quad (7)$$

$$\mathbf{v}^{n+1} = \mathbf{v}^* - \delta t \nabla p^{n+1} \quad (8)$$

すなわち、ある時間ステップの速度を用いて式(6)から仮の速度 $\mathbf{v}^*$ を求め、次に式(7)のポアソン方程式から圧力を計算する。そして仮の速度と圧力から式(8)より次の時間ステップの速度 $\mathbf{v}^{n+1}$ を得る。この手順を繰り返し各時刻の速度と圧力を得る。

本計算では、空間微分項は2次精度の中心差分、時間微分項は1次精度の前進差分を適用し、圧力はSOR法で反復計算した。また、高 Reynolds 数の計算を行うため、基礎方程式の非線形項の近似に3次精度の風上差分法(式(9))を適用した。

$$\begin{aligned} \left( f \frac{du}{dx} \right)_i &\sim f_i \frac{-u_{i+2} + 8u_{i+1} - 8u_{i-1} + u_{i-2}}{12 \Delta x} \\ &+ |f_i| \frac{u_{i+2} - 4u_{i+1} + 6u_i - 4u_{i-1} + u_{i-2}}{12 \Delta x} \end{aligned} \quad (9)$$

## 3 計算結果

### 3.1 計算条件

Table1に本計算で設定したパラメータとその定義式を示す。通常、鉛直軸直線翼型風車には3~5枚程度のブレードが取り付けられているが、本計算では簡単のため風車のブレードの枚数を1枚とする。ソリディティ $\sigma$ と周速比 $\lambda$ は風車の特性に影響を及ぼす無次元パラメータである。周速比は2.4~8.1の間で変化させて計算を行った。コード長に基づく Reynolds 数は $4 \times 10^5$ で、実際の Reynolds 数( $10^5 \sim 10^6$ 程度)よりも小さい値で計算を行っている。また、風車は一様流中で回転しているものとし、風車の回転角速度 $\omega$ を一定とする。

Table 1 Calculation condition.

Number of blade	1
Shape of blade	NACA0012
Solidity: $\sigma = Nc/R$	0.2
Tip speed ratio: $\lambda = \omega R/u_\infty$	2.4-8.1
Reynolds number: $Re = 2cu_\infty/\nu$	$4 \times 10^5$

N: number of the blade R: radius of turbine

c: aerofoil chord length  $\nu$ : kinetic viscosity of the air

$u_\infty$ : velocity of uniform flow

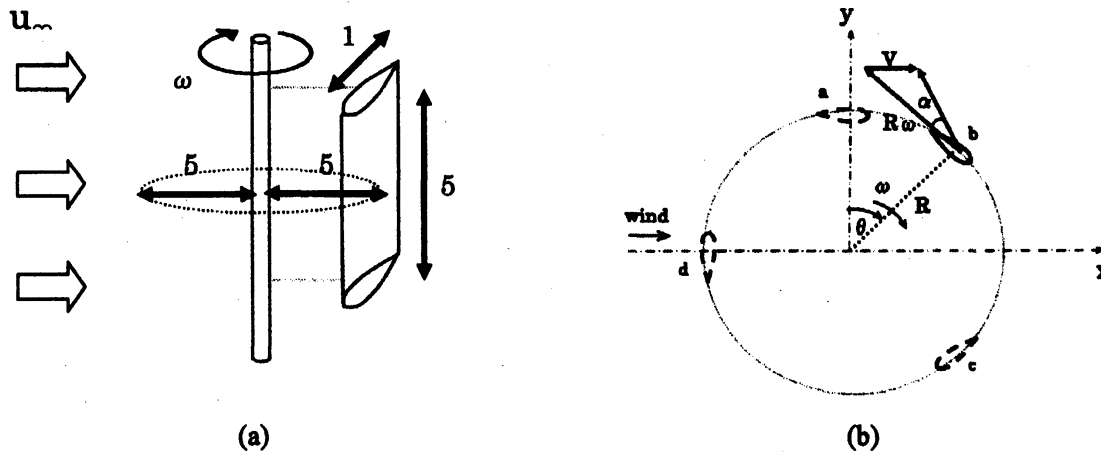


Fig. 2 Schematic figure of the SW-VAWT.

### 3.2 計算格子

Fig. 3-(a)にブレード翼型の格子、Fig. 3-(b)に計算領域全体を示している。今回扱う問題は回転する風車であり、翼に対する風向は時間ごとに変化すると考えられる。そこで、本計算ではあらゆる方向からの風を考慮し、翼周りの格子の位相はO型を用いる。格子の外部境界は半径が風車回転直径の4倍(翼弦長の20倍)の円としている。総格子点数は $96 \times 64 \times 64$ 点で、翼周りを96点、半径方向に64点、スパン方向を64点でそれぞれ表現している。また、翼の境界付近に格子が集

中するように生成している。翼面に垂直な方向の最小格子幅は翼弦長の 0.0025 倍とした。

なお、計算時の境界条件についてはブレード表面ではすべりなし条件とし、外部境界では圧力 0、速度は一様流を設定した。また、スパン方向には周期境界条件を設定している。

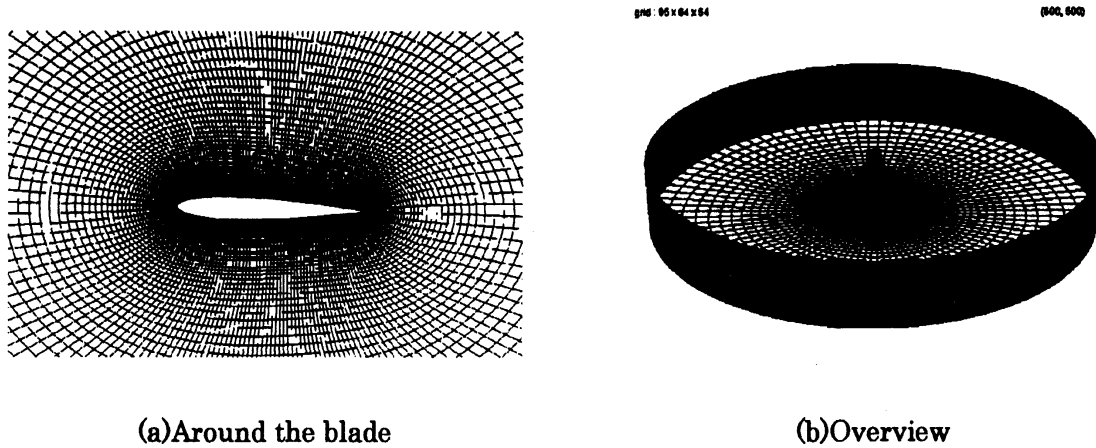


Fig. 3 Computational grid

### 3.3 流れ場

鉛直軸直線翼風車ではブレードの回転に伴い、ブレードに対する流れの迎角が周期的に変化する。鉛直軸直線翼型風車における各時点の迎角の算出式[5]は次の通りである。

$$\alpha = \frac{\cos \theta}{\sqrt{(\lambda - \sin \theta)^2 + \cos^2 \theta}} \quad (10)$$

参考のため、Fig. 4 に各周速比ごとの迎角の変化を示す。周速比 2.0 では $-30 \sim 30$ [deg]、周速比 8.1 では $-7 \sim 7$ [deg]程度で迎角が変化する。

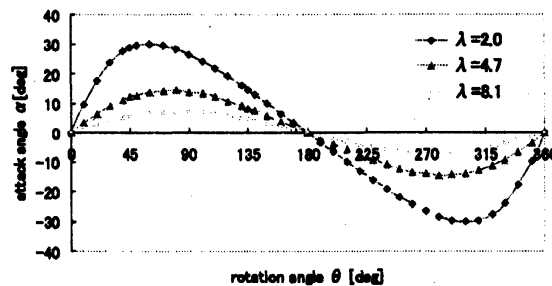


Fig. 4 Change of attack angle.

迎角の変化に伴う失速の発生と渦の様子を捉えるため、ブレード周りの速度場と圧力場を可視化し、Fig. 5 に周速比 4.7 での  $\theta = 10, 36, 48, 64, 88, 208, 236, 250, 348$ [deg]における結果を各時点の

迎角とともに示す。渦はまず、翼の前端から発生し始め、翼の背面を伝わるうちに拡大し、翼端から放出される。図より、周速比 4.7 では  $-12 \sim 12[\text{deg}]$  の間で迎角が変化するが、Fig. 5 の結果を見ると、迎角がピーク値を取るとき ( $\theta = 64, 250[\text{deg}]$  時など) に大きな剥離が発生している。また、迎角の増加とともに剥離渦が拡大する様子がわかる。

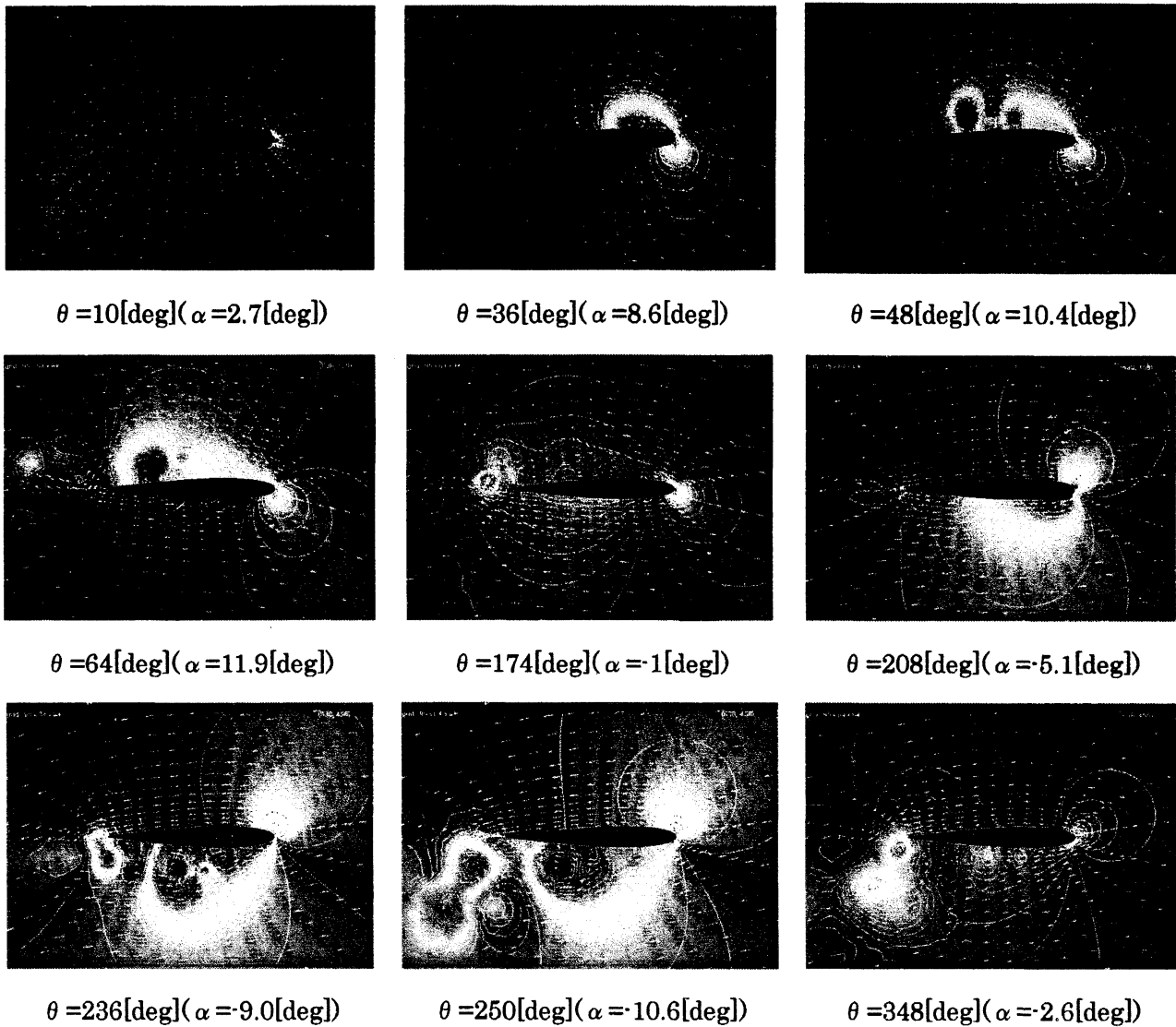


Fig. 5 Typical pressure and velocity fields ( $\lambda = 4.7$ ).

また、渦の発生の傾向は周速比による違いはほとんど見られなかったが、発生する渦の大きさは周速比が小さいほど拡大する傾向を捉えた。これは、Fig. 4 に示したように、周速比が小さいほど迎角の変化が大きいことが原因である。

### 3.4 トルク係数・出力係数

回転中にブレードに発生するトルクの値  $T$  を測定し、トルク係数と出力係数を算出した。

風車のトルク係数  $C_t$  の定義は以下の通りである。

$$C_t = \frac{T}{0.5 \times \rho A u_\infty^2} \quad (11)$$

また、トルクの計算結果より、出力係数が算出できる。出力係数は自然風が持つエネルギーの中から風車によって取り出すことができるエネルギーの割合を示す値で、発電用風車の場合には発電効率に相当する。風車の出力係数は次のように定義される。

$$C_p = \frac{\omega T}{0.5 \times \rho A u_\infty^3} \quad (12)$$

今回扱う揚力型の風車においてトルクは主に揚力によって生じる回転方向成分の力である。計算によって求めた  $T$  の値から各周速比ごとのトルク係数・パワー係数を算出し、Fig. 4・Fig. 5 に示すような周速比・トルク係数・周速比・出力係数特性を得た。 $T$  の値は各周速比ごとに風車が 10 回転するうちの 5~10 回転中の平均値を用いた。グラフより、周速比が低下すると出力係数が低下することがわかる。しかし、実験結果[6]などによると実際の風車では出力係数は Fig. 5 の結果のように周速比の増加に比例して上昇しつづけることはなく、ある周速比(鉛直軸直線翼型風車の場合周速比 2~6 程度)でピーク値をとった後低下することが知られている。

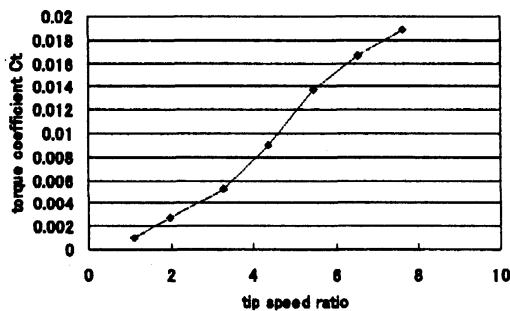


Fig. 4 The effect of tip speed ratio on torque coefficient.

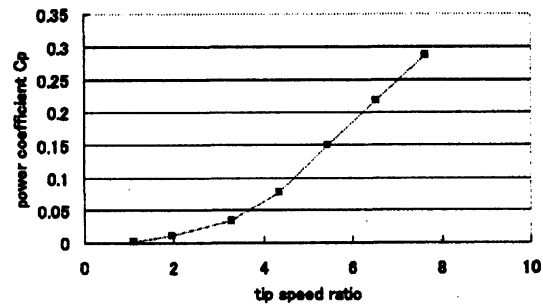


Fig. 5 The effect of tip speed ratio on power coefficient.

#### 4 結言

本研究では、一様流中に設置された鉛直軸直線翼型風車周りの流れの解析を行い、翼型の特性を示した。

ブレードからの渦の放出を確認し、風車周りに発生する流れ場の傾向を捉えた。また、トルク

係数・パワー係数のデータを得た。周速比が低下すると風車の効率が低下することを示した。

今後の課題としては次の点が挙げられる。今回の計算ではトルク係数・出力係数などの特性を再現することができていないため、特性を再現するための方法を再度検討する必要がある。また、鉛直軸直線翼型風車には通常はブレードが複数枚(3~5枚程度)取り付けられているため、ブレード枚数を増やした場合の計算が必要である。この場合の計算を実現する方法として重合格子法が考えられる[3][7][8]。

#### 参考文献

- [1] K. Horiuchi, I. Ushiyama and K. Seki : Straight wing vertical axis wind turbines: A flow analysis, *Wind Engineering*, vol.29, (2005), pp.243-252.
- [2] A. Allet, S. Halle and I. Paraschivoiu, Unsteady Turbulent Flow Solver for the Aerodynamic Analysis of VAWTs, *Wind Engineering*, vol.22, (1998), pp.63-79.
- [3] 高橋俊, 文珠川一恵, 中橋和博: 重合非構造格子法を用いた非定常流れの数値計算, 第19回数値流体力学シンポジウム.
- [4] Yanenko, N. N., *The Method of Fractional Steps*, (1971), Springer-Verlag.
- [5] I. Paraschivoiu : *Wind Turbine Design With Emphasis on Darrieus Concept*, (2002).
- [6] 関和市, 相良啓太, 山本直樹: 直線翼垂直軸型風力発電システムの性能実験, 日本機械学会2000年度年次大会講演論文集.
- [7] Y. Sato, Y. Mizukami, T. Ito and T. Kawamura : Numerical simulation of flows around a straight-wing-vertical-axis wind turbine using a overset grid method , *Proc. of 37th Fluid Dynamics Conf.*, (2005), pp.207-208.
- [8] J. Steger, F. Carroll and J. Benek : A CHIMERA GRID SCHEME , *ASME FED*, vol.5, (1983), pp.59-63.