# 数値解法を用いた直線翼垂直軸軸風車の流れ解析

A Flow Analysis on Straight Wing Vertical Axis Wind Turbine using Numerical Simulation Model

堀内健司*1	牛山泉*2	関 和市*3
Kenji HORIUCHI	Izumi USHIYAMA	Kazuichi SEKI

# Abstract

Researches about the aerodynamics of wind turbine with straight wing vertical axis (SW-VAWT) are very limited, in spite of a number of advantages such as low dependence on wind direction variation and easy constructible straight blades. For these reasons, we are researching the lift type SW-VAWT for many years. The elucidation of the behavior of the flow inside and neighborhood of the wind turbine during the rotation is very important because of the performance improvement of the vertical axis wind turbine. This research examined to the velocity characters around a SW-VAWT by using the numerical simulation technique and the precision of the prediction technique was confirmed as this result. Furthermore, we estimated flow behavior during the wind turbine rotation by using this numerical simulation technique, and evaluated the flow around the wind turbine. This paper presents outline and results of these calculations and evaluations.

キーワード: 風力発電, 流れ解析, 風車, 数値シミュレーション

Key Words : Wind power generation, Flow analysis, Wind turbine, Numerical simulation

# 1. 緒 言

クリーンであり無尽蔵なエネルギーとして風力エネルギ ーが代替エネルギーの一つとして着目されており、現在、各 方面で研究開発が進められている。風力エネルギー利用シス テムとして用いられている風車は、多くがプロペラ型を主体 とする水平軸風車であり、航空機開発の歴史とともにプロペ ラに関する知見の蓄積があることから大型の実用風力発電 システムとしての実用化がされている。垂直軸風車は、風向 変動に対する性能変化が少ないことやブレード構造が簡単 であることなどのいくつかの優れた特徴を有しているが空 気力学的な特性についての研究事例が水平軸風車に比較し て少ないのが現状である。

我々は、高性能翼型開発や高精度な性能予測、また、風 車に対する荷重等の検討に向けた研究に対する情報を得る ことを目的に、数値シミュレーション手法に着目し、風車の

- \*1 株式会社 千代田コンサルタント (〒102-0072 東京都千代田区飯田橋3-3-7) e-mail: k-hori@chiyoda-ec.co.jp
- **教**授 尼利丁業大学
- 東海大学総合科学技術研究所 教授 (原稿受付:2005年6月14日)

流れ解析を行っている。既に基礎検討として翼型に対する風 洞実験値と計算値の比較検討を行い、実用的な精度で予測で きることを確認している<sup>11</sup>。ここでは、直線翼垂直軸風車に 着目し、数値シミュレーション手法による予測値と風洞実験 値との比較を行い、予測手法の適用性を検討した結果、およ び、直線翼垂直軸風車内や周辺部の流れ解析を行った結果を 報告する。

2. 主な記号

本論文に用いる主な記号を以下に示す。

- ブレード弦長 (m) C:
- d: 風車直径 (m)
- ブレード枚数 n:
- 風車半径, r = d/2 (m) r:
- 相関係数 R:
- R<sup>2</sup>: 決定係数
- 風下軸(x 軸)方向風速 (m/s) u:
- 風下軸に直交する軸(y軸)方向の風速 (m/s) v:
- 風速の絶対値  $\sqrt{u^2 + v^2}$  (m/s) U.
- V.:: 一様流風速 (m/s)

#### 堀内健司·牛山 泉·関 和市

- x: 風車中心を原点とした風下軸距離 (m)
- y: x 軸に直交する軸の距離 (m)
- ω: 回転角速度 (rad/sec)
- $\lambda$ : 周速比,  $\lambda = r\omega/V_{\infty}$
- ♦: 風車回転角 (-)
- σ': ソリディティ, σ' = nc/r
- ψ: 一様流からの風の変位角 (-)

# 3. 数値シミュレーション手法の適用性に関する検討

本章では直線翼垂直軸風車に関する風洞実験結果に対し て数値シミュレーション手法の適用性について検討を行っ た。以下に風洞実験の概要、風洞実験結果との比較結果を示 した。

3.1 風洞実験の概要

対象とした風洞実験の概要は以下のとおりである<sup>2)</sup>。

- (1) 実験装置
  - 風洞装置:ゲッチンゲン大型低速風洞
- 測定部寸法、幅 5.5m×高さ 6.5m
- (2) 供試風車概要
  - 回転半径:1.25m
  - ブレード長:2m
  - ブレード翼弦長:0.15m
  - ブレード枚数:3
  - ブレード翼型:TWT11215
  - アーム本数:2本/ブレード



Fig. 1 SW-VAWT in wind tunnel

# 3.2 流れ解析手法の概要

解析の基礎方程式は、質量保存則として連続の式、運動量の保存則から導かれた Navier-Stokes 式を用いた。

乱流再現については、Detached Eddy Simulation (DES)<sup>3)</sup>を 用いた。乱流モデルとしては、レイノルズ平均 (Reynolds Averaged Navier-Stokes Equation: RANS) モデルが広く用い

Journal of JSES

られているが、近年ではより精度の高い Large Eddy Simulation (LES)モデルが用いられるようになってきてい る。しかしながら LES において高精度に計算するためには、 非常に多くの格子点を用いる必要があると言われている<sup>41,</sup> <sup>5),60</sup>。そこで、近年、壁面近傍領域は RANS を用いて、壁か ら離れた領域では LES で計算を行う DES に関心が寄せられ ており、DES での格子点数は LES よりも少なくてすむこと から有効な手段とされている<sup>3),7)</sup>。本研究においてもこのよ うな技術動向を考慮し、さらに、実務的な解析に用いるレベ ルとして一般的なコンピュータ資源(高性能なパーソナルコ ンピュータ、ワークステーション)において計算が可能な程 度(計算時間が一ヶ月程度以内)を想定し、乱流再現には DES を用いた。

DES としての RANS と LES の切り替えは次式に示される 条件によって <sup>2</sup>の値が切り替わり、乱流エネルギーの輸送方 程式中における D<sup>k</sup>の数値として考慮する方法としている。

- RANS と LES の切り替え方法  $\tilde{\ell} = \min(\ell_{k-\omega}, C_{DES}\Delta)$   $\ell_{k-\omega} = \frac{k^{1/2}}{\beta^* \omega}$   $\omega = \frac{k}{v_t}$   $D^k = \frac{\rho k^{2/3}}{\tilde{\ell}}$ ここで、 $C_{DES} : モデル定数$   $\Delta : 最大格子幅$   $k : 乱流エネルギ-v_t : 渦粘性係数$   $\rho : 流体の密度$  $\beta^* : 係数$
- 乱流エネルギーの輸送方程式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_{j}} \left[ \rho u_{j} k - \left( \mu + \frac{\mu_{t}}{\sigma_{\kappa}^{\omega}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_{j}} \right] = \mu_{t} P - D^{k}$$

$$\nu_{t} = \frac{k}{\omega}$$

$$P \equiv S_{ij} \frac{\partial u_{j}}{\partial x_{j}}$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_{i}}{\partial x_{j}} + \frac{\partial u_{j}}{\partial x_{i}} \right)$$

ここで、μ : 粘度 μ : 乱流粘度

 $\sigma_{\kappa}^{\omega}$ :係数

数値解析手法は有限体積法による非構造メッシュ(六面体)によるモデル化を用いている。本解析は、時間微分項を 考慮した非定常流れとして計算した。

#### 数値解法を用いた直線翼垂直軸軸風車の流れ解析

# 3.3 計算条件

計算対象は、風車中心を原点とした2次元領域として図2 のような範囲を設定した。風洞内のテストセクションについ て水平面に対して輪切りにした二次元空間を設定しており、 流れに直交するy軸方向は、テストセクションの幅としてい る。風車回転のモデル化は計算メッシュを移動する移動境界 問題として再現した。境界条件等は表1のとおりである。



Fig. 2 Calculation area and position of SW-VAWT



#### 3.4 風洞実験値と計算値の比較結果

風洞実験による風車下流部(x/r=1.6)の風速(u)測定結果と 数値シミュレーションによる計算値(回転中の平均値を算 出)を比較した結果を図 3~4 に示した。図 3 は測定点毎の比 較をしたものであり、図4 は計算値と測定値との整合性を全 体として評価するために示したものである。

図3によると、周速比入=2.8、3.3ともy座標が負の領域 (y/r=-1.0 ~0.0)では計算値と実験値は差異があるものの、 y座標が正の領域(y/r=0.0 ~1.0)では良い一致となってい る。全体としての計算値と測定値の整合性は、図4のように、 回帰直線の勾配が概ね1程度であり、y切片となる回帰係数 が0に近く、決定係数も0.918と1に近いことから概ね良好 であると考えられる。

本研究は、垂直軸風車の空気力学的特長や、性能向上に向 けた改良のために、数値シミュレーション手法の適用性を評 価することを一つの目的としており、より現実的なコストあ るいは計算時間の範囲でそれらの結果を得ることを目標に している。このような観点から、上記のような風速比の計算 値と実験値の比較結果に対して考察すると、直線翼垂直軸風 車に対する流れ解析に対して数値シミュレーションは適用 性があるものと考えられる。





(b)  $\lambda = 3.3$ 

Fig. 3 Comparison between calculated values and wind tunnel test results for the velocity at x/r=1.6.





#### 堀内健司·牛山 泉·関 和市

#### 4. 流れ解析

数値シミュレーション手法を基に一様流中の直線翼垂直 軸風車の流れ解析を行った。

# 4.1 解析条件

数値シミュレーションによる流れ場の解析モデルや初 期条件、境界条件等は、風洞実験結果との検討時と基本的に 同じとした。計算対象範囲は図5に示すとおりとした。解析 条件を表2に示した。



Fig. 5 Calculation area and position of SW-VAWT

Table 2	Calculation conditions	
inlet	uniform(8m/s)	
outlet	pressure boundary	
side wall	slip surface	
rotation model	sliding mesh interface	
number of blades:n	3	
tip speed ratio: $\lambda$	4 patterns(1. 8,2.8, 3. 8,4. 8)	
solidity: $\sigma$ '	0.36	

#### 4.2 流れ解析結果(その1)

風車回転中の流れ場の性状について風速の絶対値 Uの計 算値と一様流風速 V。を基に風速比として図化した結果を図 8に示した。なお、回転角Φの定義は、図6のとおりとして いる。



Fig. 6 Definition of rotation angle  $\phi$ 

垂直軸風車において、ブレードの回転位置による特性変化 を把握することは重要である。特に、ブレードが下流側(φ =90°~270°)となる位置においては、その上流側のブレード

(上流側位置、 φ=-90°~90°)の影響を受けた風が下流側のブ レードにあたることになる。このため、ブレードが下流側位 置、 φ=180°付近の風速比 U/V。の変化を見ると、周速比が低 い条件(λ=1.8)のときには、U/V。は 0.4~0.6の範囲である。 これに対し、周速比が高くなると U/V。は 0.2~0.4の範囲 に低下しており、また、この 0.2~0.4の範囲が回転角位置 Φ について広がる傾向である。

次に、ブレードが回転中に通過する円周上の位置における 風速 u,v の計算値について、回転角 φ が 360°/n=120°変化す る間の 5°間隔のデータを基に平均し、一様流からの変化角 度ψを求めた。この風向・風速を図9と10に示した。図10 は特定の1枚のブレード回転位置における計算値である。な お、ブレード回転位置付近における一様流からの変化角度Ψ は図7のように定義した。





ブレード通過付近の風は、図8のように低周速比ではx 軸方向からの大きな変化は見られないが、高周速比になると 一種円柱周りの流れのように迂回する流れの成分が大きく なる傾向が顕著になっている。変化角度ψは図 10 のように 周速比λ=1.8のときに-9~+10°の範囲であるのに対し、周速 比λ=4.8のときに-15~+20°の範囲まで広がっている。また、 図3のように v<0の領域では u/V.が過大予測の傾向がある ことから実際の風車ではさらに変化角度ψは大きくなって いるものと考えられる。この風向変化は、ブレード性能に影 響を及ぼすため、ブレード弦長と回転半径の比率 c/r が大き いときにはとくに注意が必要であると考えられる。

さらに、風速比 u/V。の変化を特定の1枚のブレード回転 円周位置における平均値として示したのが図 11 である。全 体的に、回転角 =-90°と90°付近においては風速比低減がほ とんど見られない結果である。周速比が低いλ=1.8のときに はばらつきが大きく、また、下流側となる回転角位置におい ても風速比の低減は少なく u/V.は 0.7程度である。しかし、 周速比が高いときには、上流側位置での風速比低減はさほど 大きくないが、下流側位置では u/V。が 0.3程度まで低下して いる。



Fig. 8 Calculated flow patterns of SW-VAW













(d) λ=4.8

Fig. 9 Average flow velocity at circumference of blade rotation



Fig. 10 Variation of average flow angle  $\psi$  at circumference of blade rotation



Fig. 11 Variation of average wind velocity u at circumference of blade rotation

# 4.3 流れ解析結果(その2)

風車回転中の風速比 u/V<sub>∞</sub>計算値について平均し、風車中 心を通過する風速の変化(風下軸方向:x 軸方向、風下軸に 直交する方向:y 軸方向)について図化した結果を図 12、13 に示した。

x 軸方向の風速比 u/V<sub>o</sub>の変化は図 12 のとおりとなってお り、風車下流側の風速比は、周速比が低い $\lambda$ =1.8 のときには 0.7 程度であり、x/r=10(x/d=5)に至ってもほぼ横ばい状態で ある。周速比が $\lambda$ =2.8 以上の条件では、風車下流側の x/r=4(x/d=2)までは周速比により多少の差異があるが、x/r=4 ~10(x/d=2~5)の範囲では、風速比はほぼ横ばい状態であり、 約 0.4 となっている。

一方、y 軸上における風速比 u/V。の変化を図 13 に示した。 y/r=2(y/d=1)の位置における u/V。は 1.1 程度であり、一様流 風速よりも高くなっているが、y 軸方向位置における風速影 響は小さいと考えられる。



Fig. 12 Variation of flow velocity  $(u/V_{\infty})$  downstream from rotor center



Fig. 13 Variation of flow velocity  $(u/V_\infty)$  perpendicular to downstream from rotor center

# 5. 結 言

風洞実験による直線翼垂直軸風車下流部における風速の 計測値と DES 法を用いた数値シミュレーションによる計算 値との比較を行った結果、良好な整合性であり、数値シミュ レーションによる直線翼垂直軸風車特性検討の妥当性を確 認できた。また、数値シミュレーションにより直線翼垂直軸 風車の内部や周辺部の流れ解析を行い、以下の結論を得た。

- (1)風車回転中のブレード通過付近の風速は風車の上流側 位置においては周速比の高低によらず一様流風速から の低減は大きくないが、風車の下流側位置では周速比が 高くなると急激に低下することが分かった。
- (2) 風車回転中のブレード通過付近における風が、一様流の

方向(x軸方向)から変化する傾向が明らかとなった。この傾向は、ブレード性能に影響を及ぼすため、ブレード 弦長と回転半径の比率 c/r が大きいときにはとくに注意 が必要であると考えられる。

(3)風車下流部における風速比は x/d=5 においても低下しており、風速比は 0.4~0.7 程度となっていた。風車を多数設置する場合には配置に注意が必要であることが分かった。

今後は、ソリディティに対する影響や翼型による風車特性 変化について数値シミュレーション手法を用いた流れ解析 を実施し、研究していく予定である。

## 参考文献

- ・ 堀内健司、関和市、風力発電用の直線翼垂直軸型風車の流れ解 析、電気学会論文集 B、Vol.123, No.12, 2003
- 2) 関和市、清水良夫、直線翼垂直軸風車の風洞実験、日本機械学 会第73期通常総会講演会講演論文集、1996年4月
- 3) G. S. Constantinescu and K.D. Squires: LES and DES Investigations of Turbulent Flow over a Sphere, 38<sup>th</sup> Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV, USA (2000)
- 4) 社団法人日本機械学会、流れの数値シミュレーション、株式会社コ ロナ社、1990年7月
- 5) 荒川忠一、数値流体力学、財団法人東京大学出版会、1994 年 1 月
- 6) 義江龍一郎、流体数値計算による風環境予測の現状・課題、風環 境フォーラム 一風環境(ビル風)評価の現状と課題ー、日本風工 学会風環境評価研究会、2005年3月
- 7) 新宮康弘、飯田誠、荒川忠一、風車翼型を対象とした DES と LES の比較、第 18 回数値流体力学シンポジウム、2004 年 12 月