風力発電用の直線翼垂直軸型風車の流れ解析

正 員 堀内 健司* 正 員 関 和市**

Flow Analysis of Straight Wing Vertical Axis Type Wind Turbine for Power Generation

Kenji Horiuchi*, Member, Kazuichi Seki**, Member

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 aerofoil characters 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，直線翼，風車，ソリディティ，数値シミュレーション

Keywords: wind power generation system, flow analysis, straight wing, wind turbine, solidity, numerical simulation

1. 緒 言

我が国の風力発電は 2001 年度末で 28.8 万 kW に達し、2010 年度末には 300 万 kW を達成目標として掲げ風力発電の導入に向けた支援や課題の克服等が各方面で進められている。

風力発電用風車としては水平軸型と垂直軸型に大別される。風力発電に多く用いられているのはプロペラ型の風車である。また、風車の作動原理や回転トルクの発生形態から風車のブレードに発生する揚力を利用するタイプと抗力利用のタイプがある。揚力型風車の方が抗力型風車よりも運用時の周速比を高く出来るため一般的に高出力となる。プロペラ型風車や本研究で対象としている直線翼垂直軸型風車も揚力型である。

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。

本研究では、垂直軸風車、特に、揚力型直線翼風車に着目し、数値シミュレーション手法を用いて垂直軸風車内及び周辺の流れについて解析し、考察した結果を報告する。

2. 記 号

本数値シミュレーションで用いる記号を以下に示す。

- c : 翼弦長 (m)
- C_D : 抗力係数
- C_{FX} : 風車抗力係数 (風下軸方向)
- C_{FY} : 風車抗力係数 (風下軸に直交する方向)
- C_L : 揚力係数
- d : 風車直径 (m)
- n : ブレード枚数
- r : 風車半径, $r=d/2$ (m)
- Re : レイノルズ数
- V_∞ : 一様流風速 (m/s)
- y^+ : 距離の無次元数 (壁関数)
- α : 迎え角 (deg)
- ω : 回転速度 (rad/s)
- λ : 周速比, $\lambda=r\omega/V_\infty$
- σ' : ソリディティ, $\sigma'=nc/r$

3. 翼型に対する予測手法の検討

数値シミュレーション手法の精度を確認するため NACA0012 の翼型に対する C_L , C_D を数値シミュレー

* (株) 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

Chiyoda Engineering Consultants Co., Ltd.

3-3-7, Iidabashi, Chiyoda-Ku, Tokyo 102-0072

** 東海大学総合科学技術研究所

〒259-1292 平塚市北金目 1117

Tokai University Research Institute of Science and Technology

1117, Kitakaname, Hiratsuka 259-1292

図1 翼型検討時の計算領域

Fig.1. Calculation area for flow field around aerofoil.

図2 C_L と C_D の計算結果と風洞実験値との比較

Fig.2. Comparison between calculation and wind tunnel experiment (C_L , C_D).

ションにより推定し、風洞実験値⁽¹⁾⁽²⁾と比較を行った。

〈3・1〉数値シミュレーション手法 解析の基礎方程式は質量保存則として連続の式、運動エネルギーの保存則として Navier-Stokes 式を、乱流再現は標準 $k-\epsilon$ モデルを用いた。数値解析手法は有限体積法による非構造メッシュによるモデル化を用いている。計算は非定常の計算とし計算が安定するか周期的な変動になるまで実行した。計算結果としては安定した時点の結果、周期的な結果となった場合はその周期内の平均値を求めて評価を行うものとした。

〈3・2〉数値シミュレーションの条件 計算対象とした範囲は、図1のように翼中心を原点として上流側 $5c$ 、下流側 $8c$ 、横方向に $\pm 5c$ とした2次元領域である。流入部境界条件は模型実験時の $Re=3 \times 10^5$ に合わせて風速を設定した。側面部はスリップ境界、流出部は圧力境界としている。また、翼表面付近では壁法則によるモデル化を行い、翼表面からの第1層の格子点是对数域 (y^+ の値として100以下) になるように配慮している。

〈3・3〉数値シミュレーション結果と風洞実験値の比較 翼型に対する流れの数値シミュレーションを実施し、翼型表面部の圧力分布を積分して C_L と C_D を求めた。その計算値と風洞実験結果との比較を行った。迎え角 α に対して図化した結果を図2に、計算値と実験値との一致状況を散布図として図3、図4に示した。また、計算した翼型周り

図3 C_L の計算結果と風洞実験値との比較

Fig.3. Comparison between calculation and wind tunnel experiment (C_L).

図4 C_D の計算結果と風洞実験値との比較

Fig.4. Comparison with the calculation and the experimental value (C_D).

の流れを流線として図化した結果の一例を図5に示した。

C_L について見ると $\alpha = 15^\circ$ 、 50° を中心として計算値が実験値よりも大きくなる傾向となっている(図2)。この迎え角付近は、はく離現象が顕著になる角度であり、本計算に用いた乱流モデル($k-\epsilon$ モデル)は、はく離現象の再現に一部課題があると指摘されており、この特徴がこれらの迎え角において顕著に表れたものと考えられる。

C_L の散布図(図3)について見ると、実験値の C_L が1付近の値について計算値の一部が過大予測傾向となっている。回帰式の傾きが1になることが望ましいのに対し、傾きが1を下回る結果となっている。過大予測となっているデータは、 $\alpha = 15^\circ$ を除けば、 $\alpha = 50^\circ$ 付近以上の大きな迎え角のときである。風力発電用垂直軸風車は、周速比が比較的高い時が運用状態となるため迎え角は必ずしも大きくない範囲となる。このようなことから迎え角 $\alpha = 45^\circ$ 付近以下を比較の主体とすると、計算値と実験値について良好な整合性が得られていると考えられる。

C_D については、 $\alpha = 60^\circ$ 以上の大きな迎え角(図2)のとき、実験値の C_D が2以上となる(図3)ときに計算値の方が高くなる傾向となっている。大きな迎え角時は、はく離現象が顕著に表れており、本計算で使用した乱流モデルのはく離現象の再現精度が計算値と実験値の差異に対する一要因であると考えられる。本検討対象の垂直軸風車の

図5 翼型周りの流れの計算結果（流線）

Fig.5. Calculation results of flow field around aerofoil (stream line).

運用状態では迎え角は必ずしも大きくない範囲であることから、 C_L と同様に、迎え角 $\alpha = 45^\circ$ 付近以下を比較の主体とすると計算値と実験値について良好な整合性が得られていると考えられる。

上記のような C_L と C_D についての計算値と実験値の比較結果を基に、垂直軸型風車に関する流れ解析について数値シミュレーション手法の適用が可能であると判断した。

4. 直線翼垂直軸型風車の流れ解析

翼型周りの流れ場計算において数値シミュレーションにより検討が可能であることが分かったことから、直線翼垂直軸風車について、数値シミュレーション手法により風車部の流れ解析を行った。

〈4・1〉数値シミュレーションの条件 計算対象とした範囲は、図6のように風車中心を原点として上流側 $5d$ 、下流側 $15d$ 、横方向に $\pm 5d$ とした2次元領域である。

風車回転は計算メッシュを移動する移動境界問題としてモデル化した。境界条件、検討区分等は表1に示す。

〈4・2〉風車周りの流れ場計算結果 数値シミュレーション手法により風車回転時の流れ場計算を行った。風車周りの流れの状況を流線として図化した結果を図7に示した。

ソリディティ $\sigma' = 0.3$ の結果によると周速比 λ が小さい領域では風車内を風の向きが大きく変化することなく通過している様子が現れている。周速比が高くなると風車後流側では風車の影響により流線が広がる傾向になっている。

ソリディティが大きい $\sigma' = 0.6$ の結果では、 $\sigma' = 0.3$ の時よりも風車による風車内の流れの方向変化が大きくなっており、一様流への影響が顕著になっている。また、風車後流部において風下軸に直交する流れの方向変化が現れている。周速比が高くなるとこの傾向は顕著になっている。

〈4・3〉風下軸上の流速変化 風車回転中の回転角毎の風下軸（ x 軸）上の風速 u 、 v について、1回転中の平均値

図6 直線翼垂直軸風車の計算領域

Fig.6. Calculation area for flow field around VAW.

表1 計算条件

Table 1. Calculation conditions.

inlet	uniform(5m/s)
outlet	pressure boundary
side wall	slip surface
rotation model	sliding mesh interface
number of blades	3
tip speed ratio: λ	4 patterns(1.0, 2.0, 3.0, 4.0)
solidity: σ'	2 patterns(0.3, 0.6)

を求め、 x 軸成分 u と y 軸成分 v の風速を一様流 V_∞ を基準にして図化を行った（図8）。

ソリディティが小さい $\sigma' = 0.3$ のケースでは、周速比が小さいときに風車後流における風速 u が回復せず $x/r=18$ （ $x/d=9$ ）において風速が一様流よりも10%程度低くなっている。周速比が高くなると後流部の風速 u の回復が早くなる傾向であり、 $x/r=10$ （ $x/d=5$ ）においてはほぼ一様流風速になっている。流線を図化した図7では周速比が小さいときには流線の変化が少なく、周速比が高くなると流線への影響が大きくなっていた。この流線（流れの方向）と風速 u の変化の状況は、一様流中に一種の金網のような抵抗物体を置いた場合のような挙動に類似していると考えられる。すなわち、金網が粗いとき（風車では周速比が小さいとき）には、流線の変化は少ないが風速は抵抗体があるため低減する。金網が密になる（風車では周速比が高くなる）と金網中を通過する割合が低下し、主流から流れが大きく変化する現象になっているものと考えられる。

$\sigma' = 0.6$ になると風車内風速の低下傾向が顕著であり、 $\lambda = 4$ においては風下軸方向風速（ u/V_∞ ）が0.2~0.3程度の値となっている。風車後流部の風速回復傾向は、 $\sigma' = 0.3$ のケースと同様に低い周速比においては一様流風速に回復する距離が長く、高い周速比ではその距離が短くなっている。

風車の発電時の運転状況を想定した周速比を3~4程度とすると、風車後流は $x/r=10$ （ $x/d=5$ ）程度以上離れれば概ね一様流に回復しているものと考えられる。

また、直交する風速成分 v のピークが風車後流に現れており、まず、 y 軸の正方向に出現し、以降、 y 軸の負方向成分となり、減衰していく様子が見られる。 $\sigma' = 0.6$ のとき

図 7 直線翼垂直軸風車周りの流れ場計算結果 (流線)

Fig. 7. Calculation results of flow field around vertical axis wind turbine (stream line).

図 8 風車中心を通る風下軸上の風の変化

Fig. 8. Flow distribution longitudinal to wind direction.

にこの変化がより明確に現れている。風車後流の風速 v のピークは高い周速比ほど風車に近い位置になり、そして、 v の変動周期が短くなっている。

〈4・4〉 風下軸に直交する軸上の流速変化 風下軸に直交する y 軸に沿った線上の風速 u について 1 回転中の平均値を求め、風車中心位置、後流部の結果を整理した (図 9)。

風車内の風速 ($x/r=0$) は、特に周速比の小さい場合にはブレードが一樣流に正対する位置側 (y が正の領域) の風速低下が顕著となっている。風車から離れた軸上 ($x/r=2$, $x/r=4$) では風車中心よりも少し y の正方向に離れた位置において風速が最小となる正規分布に近い風速変化となっている。また、高ソリディティ、高周速比になると風車に近接した位置 ($y/r>1$ or $y/r<-1$) 付近の風速が一樣流を超える風速となっている。

〈4・5〉 風車回転中の風車抗力の変化 風車のブレードに働く圧力分布をブレード面について積分し、風車の風下軸方向 (x 軸) と直交する方向 (y 軸) の成分の変動を風車回転角毎に求め図化した (図 10)。

本検討ではブレード枚数 n を 3 枚としているため風車抗力係数 C_{FX} , C_{FY} は、高周速比になると 120 度毎の周期的な変化になる傾向があるが、低周速比では回転角に対する抗力係数は乱れの大きい変化になっている。

また、低ソリディティ、低周速比の場合には、直交する成分の抗力係数 C_{FY} は平均値として負の値になっている。

図 9 風車中心軸に直交する軸上の風の変化
Fig. 9. Flow distribution lateral to wind direction.

図 10 風車抗力係数の変化

Fig. 10. Variation of drag coefficient.

高ソリディティ、高周速比になると C_{FY} 変化（正弦波）の中心がゼロに近づく傾向となっている。

5. 結 論

風力発電用の直線翼垂直軸型風車の流れ解析を行った結果、以下の結論を得た。

(1) 数値シミュレーションを用いた流れ解析により翼型の揚力係数、抗力係数を求め風洞実験値と比較した結果、良好な整合性が得られ数値シミュレーション手法による風車用翼型の揚力、抗力特性を把握できることが分かった。

(2) 数値シミュレーション手法により風車回転時の流れ解析を行った結果、風車後流部において円柱後流のような振動現象があることが明らかとなった。高ソリディティ、高周速比時ほどこの現象が顕著であることが分かった。

(3) 風車後流部の風速について、一様流風速に回復する距離が、高ソリディティ、高周速比の場合には、低ソリディティ、低周速比のときよりも短くなることが分かった。さらに、高ソリディティ、高周速比のときには風車近傍の流れが一様流よりも早くなることが分かった。

(4) 風車抗力は、回転中周期的に変化していること、風下軸方向と直交する方向の抗力係数のピークとブレード枚数による位相差があることが分かった。直交する方向の抗力係数の平均値は、低ソリディティ、低周速比時には負になり、高ソリディティ、高周速比時にはゼロに近づくことが分かった。

(平成 15 年 3 月 3 日受付、平成 15 年 6 月 2 日再受付)

文 献

- (1) D. Le Gouieres: Wind Power Plants—Theory and Design—, Pergamon Press (1982)
- (2) T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins, and E. Bossanyi: Wind Energy Handbook, John Wiley & Sons, Ltd. (2001)
- (3) I.A. Abbot and A.E. von Doenhoff: Theory of Wing Sections, Dover Publications, New York (1959)
- (4) H.C. Larsen: Summary of a Vortex Theory of the Cyclogiro, Proceedings of the 2nd U.S. National conference on Wind Engineering Research, Colorado State University, V-8-1 (1975-8)
- (5) K. Seki and I. Otani: "Performance of Straight Blade Non-Articulated Vertical Axis Wind Turbine", *J. JSES*, Vol.16, No.3 (1990) (in Japanese)
関 和 市・大谷 勇:「直線翼垂直軸風車の性能」, 太陽エネルギー, 16, No.3 (1990)
- (6) H. Tokuyama, I. Ushiyama, and K. Seki: "The Performance and Wind Turbine Test of Aerofoils for Small Wind Turbine Generation Systems", *IEEJ Trans. PE*, Vol.123-B, No.2, pp.208-215 (2003-2) (in Japanese)
徳山榮基・牛山 泉・関 和 市:「小型風力発電システム用翼型の実験と性能に関する研究」, 電学論 B, 123, 2, pp.208-215 (2003-2)

堀 内 健 司 (正員) 1955 年 4 月 12 日生。1978 年 3 月東海大学工学部航空宇宙学科卒業。同年株式会社千代田コンサルタント入社。流体解析業務、気象・大気拡散予測・評価等の環境アセスメント業務に従事。

関 和 市 (正員) 1963 年東京大学宇宙航空研究所航空力学部、1976 年 3 月東海大学産業科学研究所、1991 年東海大学開発技術研究所、1997 年東海大学総合科学技術研究所、超音速空気力学、応用空気力学、大気拡散、有人飛行機に関する研究、エネルギー変換工学、風車工学、風力発電システムおよび新エネルギー利用工学に関する研究を行っている。教授。工学博士。

電力・エネルギー部門大会座長のコメントと回答

——B24 風力発電 I——

質 疑

座長 関 和市

騒音および振動がない。ブレード構造が簡単であり、直線翼のため製作が容易である。

(2)

Q：計算方法は一般的なものか？

A：計算は流れの数値計算に一般的に用いられている方法を採用している。計算の基礎式は N-S 方程式や連続の式、乱流モデルは $k-\epsilon$ モデルを使用している。

1. 同セッションでの対象論文への質疑応答

(1)

Q：垂直軸風車の優位性は？

A：無指向性であるため、風向変動による性能変化がなく、