

非定常回転風車の最適化のための数値シミュレーション

Bai Xueyan* 桑名杏奈 (群馬大学)

小林春夫 Yao Dan (群馬大学)

Numerical Simulation for Optimization of Unsteady Rotating Wind Turbine

Bai Xueyan*, Anna Kuwana(Gunma University)

Haruo Kobayashi, Yao Dan (Gunma University)

The research aimed at the development of a small wind turbine simulator which considers complex wind conditions in Japan. In this study, the characteristics of the unsteady rotating Savonius wind turbine were verified by simulation.

キーワード：非定常回転風車，最適化，数値シミュレーション，風力発電，分散型エネルギーシステム，垂直軸型風車，サボニウス風車

(Unsteady rotating wind turbine, optimization, numerical simulation, wind power generation, vertical axis wind turbine, distributed energy system, Savonius wind turbine)

1. はじめに

公共施設の屋上に容易に設置できる太陽光発電や、農業用水などを活用できる小規模水力発電、風力発電など、小規模なエネルギー源を組み合わせた分散型エネルギーシステムに期待が集まっている。分散型エネルギーシステムの構築には、以下のメリットがある：

- (1) 地域産業の活性化
- (2) 災害時、大規模電源からの電力供給にトラブルが起こった場合でも、各地域において電力供給を確保できる。
- (3) 発電地と需要地が比較的近くにある。そのため、集中型エネルギーシステムに比べて送電系統が小規模で済む。

風力発電に用いられる風車には、図 1 に示すようにいくつかの種類がある。大型ウィンドファームや洋上風力発電では、図 1(a)のような大型のプロペラ型風車が主に用いられている。対して分散型エネルギーシステムには、図 1(b)(c)のような小型の垂直軸型風車が用いられることが多い。垂直軸型風車は電力需要地（住宅地）付近に建設するのに適しているが、想定より回らない、発電量が得られないなど、問題も多い。日本は国土が狭く、風況が複雑であるため、欧州など風力発電先進国において開発された風車、蓄積された風車運用ノウハウを適用できない場面が多い。特に小型の垂直軸型風車は導入数も少なく、経済的に安定し

た事業化に至らないのが現状である。

我々は、分散型エネルギーシステムにおける小型風車の利用を目指して、日本の複雑な風況を考慮した風車シミュレータの開発を目的としている。本研究では、非定常回転するサボニウス風車の特性をシミュレーションで検証し、最適形状を調べた。

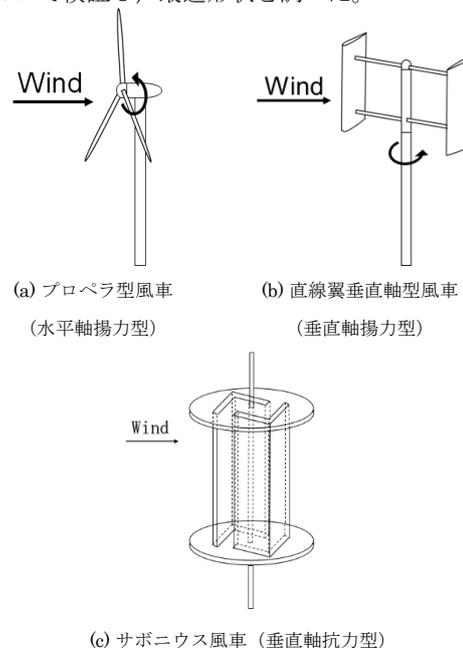


図 1 風車の種類

Fig. 1. Types of wind turbines.

多くの場合は、風車の基本的な特性を測定するために、風車を一定の角速度で回転させる。しかし、風速の変化に対する応答特性も重要である。特に風向・風速が安定しない市街地付近に風車を設置する場合、風速の変化に対する風車の起動・停止・加速・減速などの特性を調べる必要がある。最近では、いくつかの研究が複数の風車を近接して設置することを提案している⁽¹⁾。複数の風車を作る流れ場の相互作用により、風車の効率が高められる。

本研究では風車回転時の特性を研究し、最適翼形状を調べるために、時間変動回転の数値シミュレーションを行った。図2は、図1(c)に示したサボニウス風車の断面図である。今回は5つのパラメータ（ブレード長さ、風車半径、オーバーラップ、ギャップ、ブレード厚さ）を最適化した。

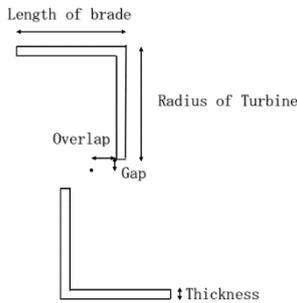


図2 図1(c)のサボニウス風車の断面図

Fig. 2. Cross section of Savonius wind turbines (in Fig.1(c)).

2. 計算方法

〈2・1〉 基礎方程式

風車まわりの流れ場を、風車とともに回転する回転座標系で表す。基礎方程式は連続の式(1)、非圧縮性 Navier-Stokes 方程式(2)(3)となる。今回は2次元計算を行っている。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

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

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

ω は風車の回転角速度で、非定常値となる。 p は圧力、 Re は風車半径と遠方の一様流速に基づいたレイノルズ数で、本研究では $\text{Re} = 10^5$ に設定した。 (X, Y) , (U, V) は回転座標系における位置と速度である。 (x, y) , (u, v) を静止座標系における位置と速度とすると、式(4)-(7)と図3のような関係がある。 θ は静

止位置からの回転角度である。

$$X = x \cos \theta - y \sin \theta \dots\dots\dots (4)$$

$$Y = x \sin \theta + y \cos \theta \dots\dots\dots (5)$$

$$U = u \cos \theta - v \sin \theta - \omega Y \dots\dots\dots (6)$$

$$V = u \sin \theta + v \cos \theta + \omega X \dots\dots\dots (7)$$

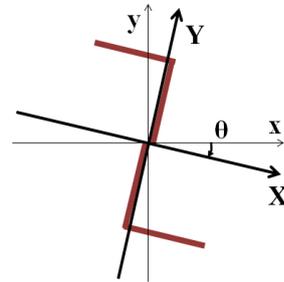


図3 静止座標系と回転座標系

Fig. 3. Static coordinate system and rotational coordinate system.

〈2・2〉 数値解法

式(1)-(3)をフラクショナルステップ法⁽²⁾によって解く。移流項には式(8)に示す三次精度の上流差分を用いた。三次精度の上流差分は、高レイノルズ数流れを安定して解けるといわれている⁽³⁾。

$$f \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=x_i} = f \frac{-u_{i+2} + 8(u_{i+1} - u_{i-1}) + u_{i-2}}{12\Delta x} + \frac{|f|\Delta x^3}{12} \frac{u_{i+2} - 4u_{i+1} + 6u_i - 4u_{i-1} + u_{i-2}}{\Delta x^4} \dots\dots\dots (8)$$

〈2・3〉 計算領域, 境界条件

計算には図4に示す格子を用いた。風車付近で細かく、遠方ほど粗い。格子は風車に固定されており、風車とともに非定常回転する。境界条件は表1に示す。

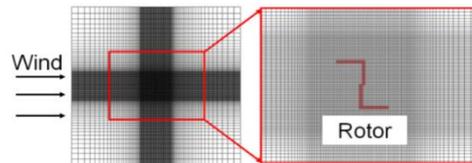


図4 計算格子

Fig. 4. Computational grid.

Table 1. Boundary conditions.

	遠方境界	風車ブレード上
速度	一様流 $u = 1.0, v = 0.0$	回転座標系における滑り無し条件 $U = 0.0, V = 0.0$
圧力	$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial y} = 0$	近傍点の圧力値の平均

〈2・4〉 トルクの計算と風車の運動方程式

式(9)は風車の運動方程式である。

$$I \frac{\partial \omega}{\partial t} = N - B \dots\dots\dots (9)$$

I は慣性モーメント, N は風車を回転させる力 (トルク) で, 流れ場 (圧力) から計算する。 B は回転軸から受ける摩擦等, 風車を停止させる力で, ω に比例する。式(9)をルンゲ・クッタ法で計算し, 得られた ω に従って風車を回転させる。

3. 結果

図 5~7 にシミュレーションの結果を示す。縦軸はトルク係数 (風車の動力) を示す。この値が大きいほど, 風車の効率が良いことを意味する。

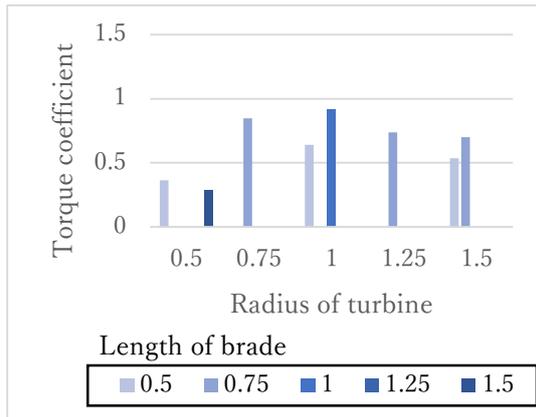


図 5 ブレード長さ and 風車半径の解析
(厚さ=0.2, オーバーラップ・ギャップ=0.0)
Fig. 5. Blade length and wind turbine radius.

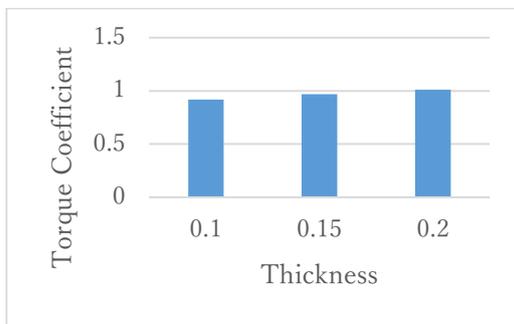


図 6 ブレード厚さの解析
Fig. 6. Blade thickness analysis.

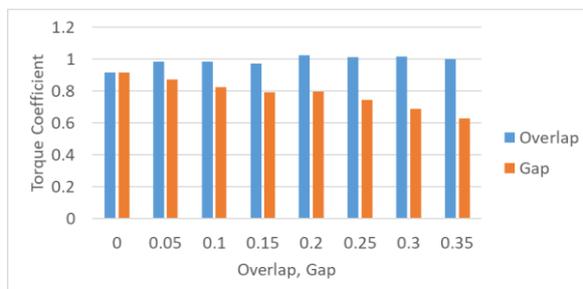


図 7 オーバーラップ・ギャップの解析
Fig. 7. Analysis of overlap and gap.

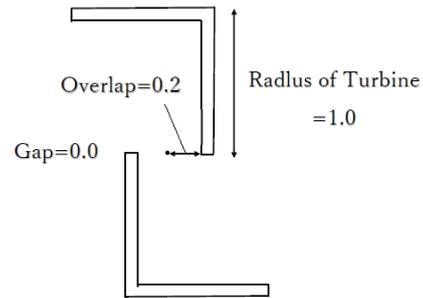


図 8 最高のトルク係数を発生する風車
Fig. 8. Wind turbine with the highest torque coefficient.

他の風車と比較して, 図 8 に示す風車はトルク係数が最も高い。図 7 より, ギャップが大きくなるほど, トルク係数が低くなる。これらの傾向は定常回転する風車に対する実験⁽⁴⁾とも定性的に一致する。

4. まとめ

本研究では風車回転時の特性を研究し, 最適翼形状を調べるために, 時間変動回転の数値シミュレーションを行った。5 つのパラメータ (ブレード長さ, 風車半径, オーバーラップ, ギャップ, ブレード厚さ) を変更し, その中で最適形状を得た。シミュレーション結果の傾向は, 定常回転する風車に対する実験結果とも定性的に一致した。

今後は, 風車の効率をより高めることを目指して, 複数の風車を近接して設置する場合のシミュレーションを行う。

文 献

- (1) A.R.El-Bazac, K.Youssef, M.H.Mohamed, "Innovative improvement of a drag wind turbine performance", Renewable Energy, 86, pp. 89-98, (2016).
- (2) N.N. Yanenko, "The method of fractional steps", Springer-Verlag, (1971).
- (3) T.Kawamura and K. Kuwahara, "Computation of high Reynolds number flow around a circular cylinder with surface roughness", AIAA Paper, 84-0340, 1984.
- (4) I. Ushiyama, H Nanagi and J Shinoda, "Experimentally Determining the Optimum Design Configuration for Savonius Rotors", Bulletin of JSME, 29(258), pp.4130-4138, (1986).