

数値流体解析による直線翼垂直軸型風車の空力特性

八戸高専 正会員 ○丸岡 晃 中央大学 正会員 平野 廣和
前田建設工業(株) 正会員 志村 正幸

1. はじめに

近年、風向の変化の激しい地域に適した風車として、揚力型の直線翼垂直軸型風車が注目されている。直線翼垂直軸型風車の場合、風車効率が風速と風車の回転速度の比や翼配置・翼形状などに大きく依存するため、風車効率の高い風車の開発にはこれらの最適化を図る必要がある。しかしながら、風車の翼に対する空力特性については、いまだ未知の部分が多い。そこで本研究では、数値流体解析により風車の翼に作用する空気力を求め、空力特性についての考察を行うことを目的とする。

2. 解析モデル

図-1 に本研究で扱った直線翼垂直軸型風車のモデルを示す。ここで、 B は翼弦長、 Z は翼スパン長、 R は風車の回転半径、 U は風速、 V は風車の回転速度である。また、 θ は翼の位相を説明するために便宜的に定義している。翼断面形状は NACA0018 を基に回転軌道円周に沿って湾曲させたものを用いる。

風車において重要となる無次元パラメータは、次式で示される回転円周に対する翼の占める割合を示すソリディティ λ および風速 U と回転速度 V の比を示す周速比 β である。

$$\text{ソリディティ: } \lambda = \frac{nB}{R} \quad (n: \text{翼枚数}) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{周速比: } \beta = \frac{V}{U} = \frac{R\omega}{U} \quad (\omega: \text{角速度}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

本研究では、 $\lambda = 1.5$ ($n = 3$, $\frac{B}{R} = 0.5$) としている。

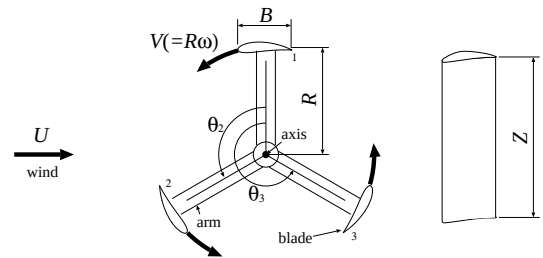


図-1 直線翼垂直軸型風車のモデル

各翼断面および風車全体に作用する空気力を図-2 のように定義する。風力エネルギーはトルク T によって得られるため、トルク T が最も重要な空気力である。トルク T は、次式のようにトルク係数 C_T として無次元化される。

$$C_T = \sum_{i=1}^n C_{Ti} = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{\frac{1}{2}\rho U^2 R^2 Z} \quad (T_i = -M_i - D_i R) \quad \dots\dots\dots (3)$$

トルク T が完全に電力に変換されたと仮定したときの風車効率 C_P は次式によって得られる。

$$C_P = \frac{P_G}{P_W A} = \frac{\omega \sum_{i=1}^n T_i}{\frac{1}{2}\rho U^3 2RZ} = \frac{1}{2}\beta C_T \quad \left(P_G = \omega \sum_{i=1}^n T_i, P_W = \frac{1}{2}\rho U^3, A = 2RZ \right) \quad (4)$$

ここで、 P_G は風車出力、 P_W は単位面積あたりの風エネルギー、 A は投影面積である。

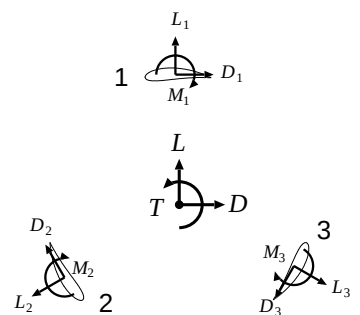


図-2 空気力の定義

3. 解析手法

解析は、Smagorinsky SGS モデルに基づく LES による 2 次元解析である。本来、LES は 3 次元解析を必要とするが、本研究では、第一段階として、大まかな空力特性をとらえることを主眼としたため 2 次元解析としている。解析手法は、有限要素法による IBTD/FS 法¹⁾を用いる。風車の回転は、風車の軸を中心とした円形の解析領域を用い、領域全体を風車の回転に合わせ剛体的に回転させることにより取り扱う。

表-1 に解析パラメータを示す。風車を等速に強制回転させた状態で、周速周期 T を変化させた全 8 ケースの解析を行っている。解析領域の大きさは、回転半径 R の 20 倍の半径 R_D の円形領域であり、境界条件は外円周および翼表面上で風速および風車の回転運動に合わせたディレクレ条件を与えている。なお、本解析とはほぼ同様の条件で風洞実験²⁾が行われている。

表-1 解析パラメータ

回転周期	$T = 2.5, 3.0, 3.3, 3.5, 3.7, 4.0, 4.5, 5.0 R/U$
周速比	$\beta = 1.047 \sim 2.513$
レイノルズ数	$Re = \frac{UR}{\nu} = 4.0 \times 10^5$
解析領域の半径	$R_D = 20.0R$
翼断面の分割数	240 分割
総要素数	99900
境界層分割	$h_{min} = 0.0001R$
時間増分	$\Delta t = 0.00025T$
モデル定数	$C_s = 0.1$

Key Words: 風車, 垂直軸型風車, 数値流体解析, CFD, LES

〒039-1192 青森県八戸市田面木字上野平 16-1, TEL:0178-27-7304, FAX:0178-27-7316

4. 解析結果

図-3に風車効率 C_P の風洞実験と数値流体解析結果の比較を示す。ここで、数値流体解析の風車効率は、時間平均によって得ている。風洞実験によれば、周速比 β が約 1.5 において風車効率 C_P が最大となる。また、約 1.8 付近においても若干のピークが見られる。本解析結果は、周速比 β が約 1.8 で風車効率 C_P が最大となり、1.5 付近では、実験値より低めの値となっていたが、特定の周速比 β において風車効率 C_P が最大ピークを持つ大まかな特性をとらえていると考えられる。周速比 β が小さいところでは、相対的な風向変動が大きく、急変するという特徴がある。この現象を LES による 2 次元解析では、十分に再現できていないことが周速比 β が小さいところで、風車効率 C_P の実験値との差が生じた一つの要因であると考えられる。

図-4に風車 1 回転分の $\beta = 1.795$ における個々の翼によるトルク係数 C_{Ti} の時刻歴を示す。トルク係数 C_{Ti} は、位相 θ が約 30° の位置に翼があるときに負の最小ピークとなり、約 90° の位置で最大ピークとなる。トルク係数の変動は、翼の風上側の回転範囲 ($0^\circ < \theta < 180^\circ$) の方が支配的であり、風下側の回転範囲 ($180^\circ < \theta < 360^\circ$) での変動は小さく、ほぼ 0 である。図-5に風車効率 C_P の時刻歴を示す。風車効率 C_P は、風車 1 回転中に翼枚数分の波数変動が生じ、最小・最大のピークは、図-4の個々の翼によるトルク係数 C_{Ti} の最小・最大のピークに対応している。

図-6に図-5のトルク係数 C_{T1} の最小および最大ピークに対応する翼の位相 θ が 30° および 90° における翼断面近傍での圧力分布を示す。トルク係数 C_{T1} が最小となる位相 ($\theta = 30^\circ$) では、翼の前面が正圧となり、上下面では、均衡した状態の負圧になっている。よって、翼に作用する正の抗力 D_1 が主として作用することになり、トルク係数 C_{T1} を最小の負値とする要因となっている。トルク係数 C_{T1} が最大となる位相 ($\theta = 90^\circ$) では、上面前方側が正圧となり、下面前方側が負圧となっている。よって、負 (反時計周り方向) のピッチングモーメント M_1 が作用することになり、トルク係数 C_T を最大とする要因となっている。

5. おわりに

本研究では、直線翼垂直軸型風車の LES による 2 次元解析を行い、空力特性についての考察を行った。風洞実験との比較により、周速比に対する風車効率の大まかな特性をとらえることができた。また、個々の翼断面に作用する空気力や圧力分布から、風車の回転の要因となるトルクの発生機構を明らかにした。しかし、周速比が小さいところで、風車効率をよく再現できない部分も見られるため、この点については、今後の検討が必要である。

参考文献

- 1) 丸岡 晃, 太田 真二, 平野 廣和, 川原 睦人: 同次補間を用いた陰的有限要素法による非圧縮粘性流れの解析, 構造工学論文集, Vol.42A, pp.383-394, 1997.3
- 2) Maruyama, Y., Shimura, M., Yoshie, R., Wei, R. and Seki, K.: Development of Vertical Axis Wind Turbine with Straight Blades Suitable for Buildings, Proceedings of APCWE V (J. of Wind Eng., No.89), pp.265-268, 2001.10

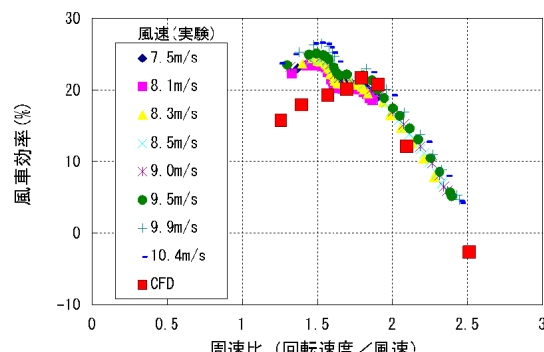


図-3 風車効率 C_P の風洞実験と数値流体解析結果の比較

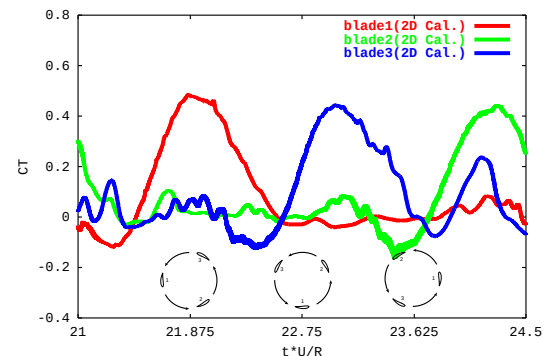


図-4 トルク係数 C_{Ti} の時刻歴 ($\beta = 1.795$)

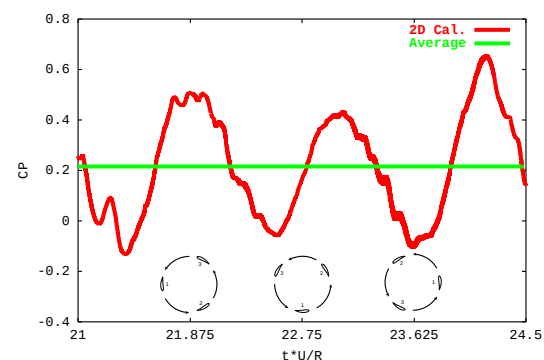
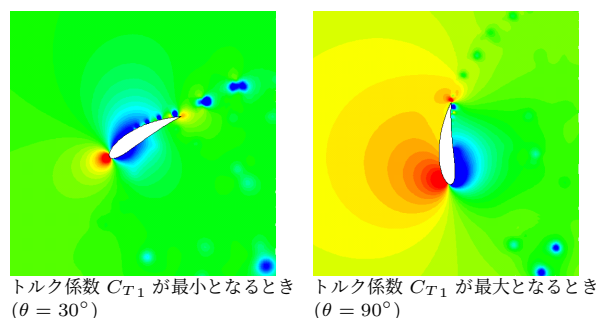


図-5 風車効率 C_P の時刻歴 ($\beta = 1.795$)



トルク係数 C_{T1} が最小となるとき ($\theta = 30^\circ$) トルク係数 C_{T1} が最大となるとき ($\theta = 90^\circ$)

図-6 翼断面近傍での圧力分布 ($\beta = 1.795$)