

水平軸風車ブレードの空力特性に関する研究

Study on the Aerodynamic characteristics by deformed horizontal axis wind turbine blade

○佐藤 拓朗¹, 安田邦男²

*Takuro sato¹, Kunio yasuda²

Abstract: Horizontal axis wind turbine blades have a high-aspect ratio, so that the aerodynamic characteristics change by gusts and the differences of the inflow velocity to the rotational plane due to the velocity gradient. This study figure out the aerodynamic characteristics about the blades before and after deformation, and computing variation of the thrust force and the torque as time advances. Then, the induced velocity to get the variance of the aerodynamic characteristics before and after deformation of the blades was derived by vortex theory using the rigid wake model that was separated the near wake and far wake.

1. はじめに

水平軸風車のブレードは、アスペクト比が大きいため、突風や速度勾配による回転面への流入速度の違いにより、ブレードが変形し空力特性が変化する。

本研究では、変形前後のブレードの空力特性を解明し、推力及びトルクが時間と共にどのように変動するのかを計算する。ブレードの変形前後における空力特性の変化を求めるための誘導速度の導出には、渦理論を用いた。後流渦モデルは、rigid wake model を用いた。

2. 理論

本研究では、ブレードを半径方向に N 個の翼素に分割し、各翼素に誘導される速度は、Z 軸方向に放出される後流渦を near wake と far wake に分けて考えた。更に、翼素ごとの局所推力 dt 及び局所トルク dq を導出し、ブレード全体について積分することで推力 T 、トルク Q を求めた。

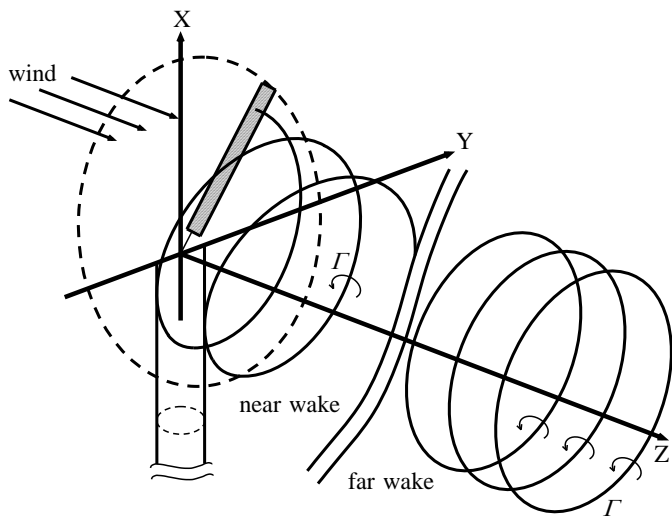


Figure1. Trailing vortex

ブレードの半径方向に $N+1$ 個の節点 r_i を与え、その接点から流れ出す螺旋渦強さを γ_i とする。また、それぞれの節点間の半径位置を r_{cp} 、その半径位置におかれる束縛渦の強さを Γ_{B_i} とする。翼根から i 番目における螺旋渦の強さ γ_i は、束縛渦強さ Γ_{B_i} を用いて、以下のように表せる。

$$\gamma_i = \Gamma_{B_i} - \Gamma_{B_{i-1}} \tag{1}$$

また、翼根と翼端から流れ出す束縛渦強さ γ_1, γ_{N+1} を求めるときは、 $\Gamma_{B_1}, \Gamma_{B_{N+1}}$ をゼロと置き、以下のように定める。

$$\gamma_1 = \Gamma_{B_1}, \gamma_{N+1} = -\Gamma_{B_N} \tag{2}$$

near wake については、 $N+1$ 本の螺旋渦 γ_j が半径位置 r_{cp_i} に与える誘導速度の軸方向成分 v_{near_i} は、以下のように表せる。

$$\left. \begin{aligned} v_{near_i} &= \sum_{j=1}^{N+1} \Delta v_{near_j} = \sum_{j=1}^{N+1} C_{near_j} \gamma_j \\ C_{near_{ij}} &= \frac{1}{4\pi} \frac{\cos \theta_1 + \cos \theta_2}{r_{m_j}} e_{3j} \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

far wake については、far wake により節点間の半径位置 r_{cp_i} へ誘導される速度の軸方向成分 v_{far_i} は、以下のように表せる。

$$\left. \begin{aligned} v_{far_i} &= \sum_{j=1}^{N+1} \Delta v_{far_j} = \sum_{j=1}^{N+1} C_{far_j} \gamma_j \\ C_{far_{ij}} &= \frac{1}{2\pi R \lambda} \frac{z_{2j}}{4k_j^{\frac{3}{2}}} \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

r_{cp_i} での全誘導速度の軸方向成分 v_{z_i} は、式(3),(4)より以下のように表せる。

$$v_{z_i} = v_{near_i} + v_{far_i} = \sum_{j=1}^{N+1} (C_{near_j} + C_{far_j}) \gamma_j = \sum_{j=1}^{N+1} C_{ij} \gamma_j \tag{5}$$

また、式(1), (2)を用いて、式(5)の γ_j を束縛渦強さ Γ_{B_j} で置き換えると、以下のように表せる。

1 : 日大理工・院(前)・航宇 2 : 日大理工・教員・航宇

$$\left. \begin{aligned} v_{z_i} &= \sum_{j=1}^{N+1} C_{ij} (\Gamma_{B_j} - \Gamma_{B_{j-1}}) = \sum_{j=1}^N C_{ij}^* \Gamma_{B_j} \\ C_{ij}^* &= C_{ij} - C_{i,j+1} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

境界条件として、 r_{cp} での全誘導速度の軸方向成分 v_{z_i} を Kutta-Joukowski の定理より求める。 i 番目の r_{cp} における局所揚力 dl_i は、以下のように表せる。

$$dl_i = \frac{1}{2} \rho (\Omega r_{cp})^2 c C_l dr = \frac{1}{2} \rho (\Omega r_{cp})^2 c a_0 (\theta + \phi_i) dr \quad (7)$$

ここで C_l は局所揚力係数、 θ はピッチ角、 ϕ_i は局所流入角、 a_0 は揚力傾斜である。ここで、局所流入角 ϕ_i が小さいと仮定すると、以下のように近似できる。

$$\phi_i = \tan^{-1} \left(\frac{V_0 - v_{z_i}}{r_{cp} \Omega} \right) \cong \frac{V_0 - v_{z_i}}{r_{cp} \Omega} \quad (8)$$

また、Kutta-Joukowski の定理より、局所揚力 dl_i は以下のように表せる。

$$dl_i = \rho (\Omega r_{cp}) \Gamma_{B_i} dr \quad (9)$$

式(7),(8),(9)より、全誘導速度の軸方向成分 v_{z_i} は以下のように表せる。

$$v_{z_i} = \frac{-2\Gamma_{B_i}}{ca_0} + V_0 + (\Omega r_{cp}) \theta \quad (10)$$

分割した N 個の節点 r_{cp} に式(6)をあてはめ、境界条件の式(10)を適用すると、 Γ_{B_i} に関する連立一次方程式として以下のように表せる。

$$\sum_{j=1}^N C_{ij} \Gamma_{B_j} = (\Omega r_{cp}) \theta + V_0 \quad (11)$$

ここで、

$$i \neq j \text{ の時 } C_{ij} = C_{ij}^* \quad i = j \text{ の時 } C_{ij} = C_{ij}^* + \frac{2}{a_0 c}$$

この連立一次方程式を、掃きだし法を用いて解くことにより、 Γ_{B_i} が得られる。それを再び式(6)に代入し、全誘導速度の軸方向成分 v_{z_i} を得る。

3. 計算結果

計算に用いた値を Table1 に示す。また計算によって求めたトルク係数 K_Q 、推力係数 K_T とアジマス角 Ψ の関係を Figure2, Figure3 に示す。

Table1 Calculation conditions

ブレード枚数, b	3
ローター直径, D m	61.4
回転数, n rpm	15.0
カットオフ半径, CR m	1.2
後流収束回転数, NE	20
空気密度, ρ kg/m ³	1.205

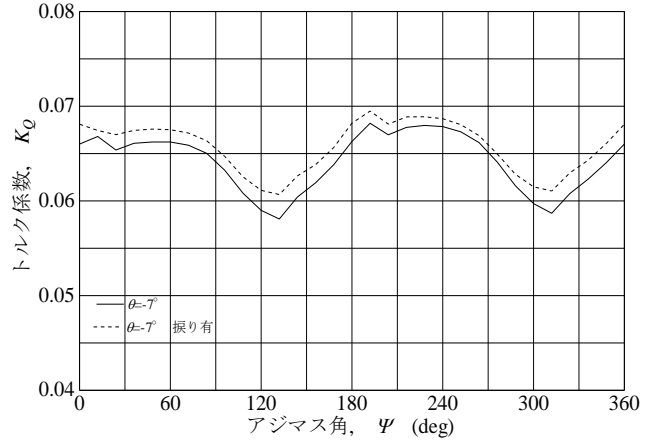


Figure2. Torque coefficient

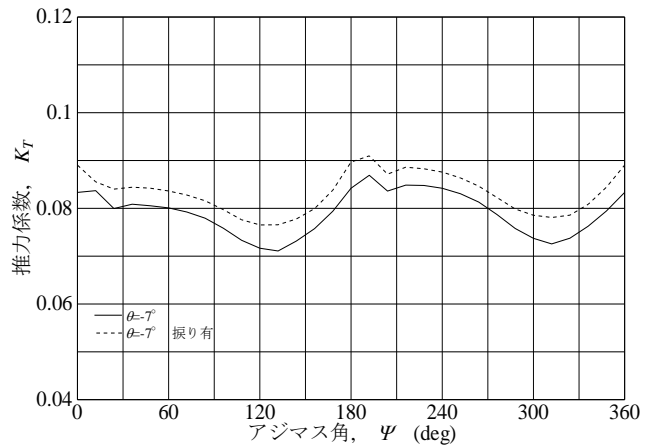


Figure3. Thrust coefficient

ブレードの振れは、翼根から半径の75%の位置を基準とし、線形に10° 振じられており、ピッチ角 θ は、翼根に近づくほど振りは大きく、翼端側では小さくなる。

4. 結論

水平軸風車のブレードに誘導される速度を、渦理論を用いて導出することが出来た。また、ブレードに発生する推力、トルクを時間変化に応じて得られた。本研究では、ブレード枚数を3枚としているため、先行するブレードによる影響によって、推力及びトルクが変動したと考えられる。今後は、ブレードに変形が生じることで振じりが発生した際に推力及びトルクがどのように変化するのかを明らかにする。

5. 参考文献

- [1] 東 昭 : 「航空工学(1)」, 裳華房, 1989
- [2] Wayne Johnson : “*Helicopter Theory*”, Dover Publications, 1946
- [3] Walter Castles, Jr. , and Henri de Leeuw : “*THE NOMAL COMPONENT OF THE INDUCED VELOCITY OF A LIFTING ROTOR AND SOME EXAMPLES OF ITS APPLICATION* ”, NACA Rep.1319