

小型直線翼垂直軸型風車の性能へ及ぼす周速比の影響

山田誠治^{*1}・田村智弘^{*1}・望月信介^{*2}

Effects of Tip Speed Ratio on the Performance of the Small Straight-bladed Vertical Axis Wind Turbine

Seiji Yamada^{*1}, Tomohiro Tamura^{*1} and Shinsuke Mochizuki^{*2}

In the present experimental study, effects of the tip speed ratio on temporal torque variation for a small straight-bladed vertical-axis wind turbine with symmetric airfoil and asymmetric airfoil blades were investigated in relation to the time mean torque characteristics. For both symmetric airfoil and asymmetric airfoil, regardless of the tip speed ratio, the maximum value of temporal torque variation that takes at an azimuth angle of the blade located in upstream increases with increasing tip speed ratio, and it takes the maximum value at a certain tip speed ratio. The maximum value of temporal torque variation has significant contribution to the mean torque, in higher tip speed ratio region, in addition to the reduction of the maximum value of temporal torque variation, the reduction of the torque in the area that direction of travel of the blade and the main flow direction is the same greatly influences the reduction of the mean torque. The mean torque reduction ratio with respect to the tip speed ratio after the maximum value of the mean torque of the asymmetric airfoil is smaller than that of the symmetric airfoil, because the temporal torque increase in the area which direction of travel of the blade is opposite to the main flow direction has contribution to the reduction of the mean torque.

1. 緒 言

エネルギー問題および地球環境問題に対する取組において、再生可能エネルギー利用への期待が高まる中、大型風車と比較して設置場所に制約の少ない小型風車の普及が望まれる。風向に対して回転軸が垂直な直線翼垂直軸型風車は、風向に対する姿勢制御が不要なこと^{1,2)}、回転速度が小さく低騒音であること²⁾、ブレード構造が比較的簡単なこと²⁾から、より身近な所で使用する小型風車として有望な風車の一つである。この風車は風向に対する姿勢制御が不要であるものの、ブレードのアジマス角によって相対風速およびそれに対する迎角が変動するため、風からブレードが受ける力による正味の回転トルクが変動する^{3,4)}。このアジマス角に対するトルク変動は風車の平均特性（トルク・出力特性）に影響を及ぼし⁴⁾、また風向変化に対する風車の応答性や風車支柱の振動への影響も考えられる。ところで、一般的に垂直軸型風車の平均トルクは周速比の増加と共に増加し、ある周速比で最大値をとった後、減少する傾向を示す（例えば、(4)）。この周速比に対する平均トルクの変化をトルク変動から調査することは垂直軸型風車の性能向上の観点から重要な課題の一つである。これまでアジマス角に対するトルク変動の計測を試みたもの⁴⁻⁷⁾がある。また、周速比によるトルク変動の変化が計算値により示されている^{8,9)}。しかし、周速比によるトルク変動の変化を平均トルク特性と関連づけて調べたものは見あたらない。そこで、本研究ではトルク変動に及ぼす周速比の影響を風洞実験により調べ、それらと周速比に対する平均トルクの変化とを関連づけて調査した。

2. 風車の力学モデル

図 2.1 に風車の力学モデルを示す。この図から風車の運動方程式は次式で表すことができる。

$$I_{wt} \frac{d\omega}{dt} = T_w - T_a \quad (1)$$

ここで T_w は風からブレードが受ける力による正味のトルク [N・m]、 T_a は風車の軸端トルク（≒ 計測トルク）[N・m]、 ω は風車の回転角速度 [rad/s]、 I_{wt} は風車の慣性モーメント [kg・m²] である。ところで図 4.1 に示すようにトルク変換器を介して風車とモータを接続し、インバータにより回転速度

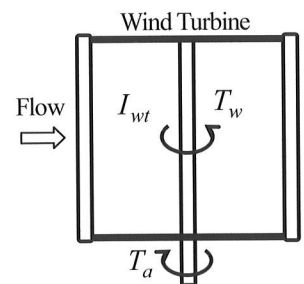


図 2.1 風車の力学モデル

一定の条件のもとでトルクを計測する場合、理想的には慣性力項はゼロとなるが、実際には T_w の変動により ω が変動するため、慣性力項を無視することができない。そこで本研究では風による正味のトルク T_w を求めるため、次式に従って慣性力項を考慮した。

$$T_w = T_a + I_{wt} \frac{d\omega}{dt} \quad (2)$$

3. 風車ブレードの迎角変化と回転トルク

3・1 迎角変化

図 3.1 にブレード周りの流れ場における速度三角形を示す。風車は一様流 U_0 中を周速度 $V_0 = r\omega$ で回転しており、他のブレードによる流れ場への影響を考慮しないとすると、 U_0 、 V_0 および W （相対風速）で作る速度三角形において、流入角（回転円周の接線方向に対して相対風速のなす角） γ は次式で表される。

$$\tan \gamma = \frac{-\cos \theta}{\lambda - \sin \theta} \quad (3)$$

ここで、図 3.1 では $\gamma < 0$ のとなる。また、ブレードの取付角を β とすると、ブレードの相対風速に対する迎角 α は次式となる。

$$\alpha = \gamma + \beta \quad (4)$$

ここで、翼型後縁が回転軸側となる方向を $\beta > 0$ とする。

^{*1} 企業支援部設計制御グループ

^{*2} 山口大学大学院

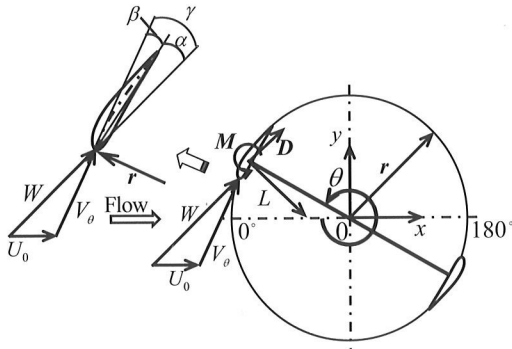


図 3.1 ブレード周りの流れ場における速度三角形

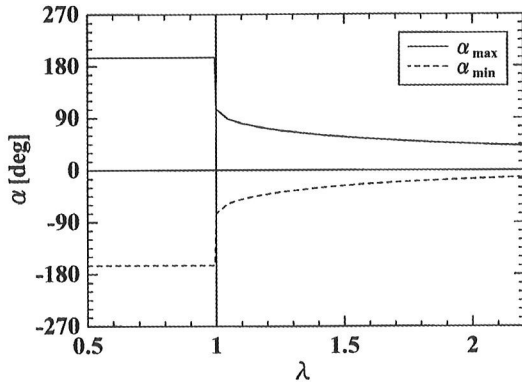


図 3.2 周速比に対する風車一回転中の最大および最小迎角

図 3.2 に取付角 $\beta=15\text{deg}$ として、式(3)および(4)により求められる迎角について、周速比に対する風車一回転中の最大および最小迎角の変化を示す。

3・2 風車の回転トルク

図 3.1 において、一枚のブレードに作用する空気力によるアジマス角に対する風車の回転トルク C_{tb} は次式のようになる。

$$C_{tb} = w[-C_L \cos \theta - C_D(\lambda - \sin \theta)] + w^2 \left(\frac{c}{r} \right) C_M \quad (5)$$

ここで

$$w = W / U_0 = \sqrt{\lambda^2 - 2\lambda \sin \theta + 1} \quad (6)$$

$$C_{tb} = \frac{T_q}{1/2 \rho U_0^2 c b r} \quad (7)$$

$$C_L = \frac{L}{1/2 \rho W^2 c b} \quad (8), \quad C_D = \frac{D}{1/2 \rho W^2 c b} \quad (9)$$

$$C_M = \frac{M}{1/2 \rho W^2 c^2 b} \quad (10)$$

であり、 L 、 D 、 M はそれぞれブレードに作用する揚力[N]、抗力[N]、モーメント[N・m]である。また ρ は空気密度[kg/m³]、 r は風車回転半径[m]、 c は翼弦長[m]、 b はブレード幅[m]である。なお、図 3.1 において、揚力が回転軸側を向いているとき $\alpha < 0$ 、 $L < 0$ である。

4. 実験装置および方法

図 4.1 に実験装置の概要および座標系を示す。 θ は基準となるブレード（以下、基準ブレード）の位相（アジマス角）[deg]である。風洞ノズル出口寸法は 1000mm×1000mm で、

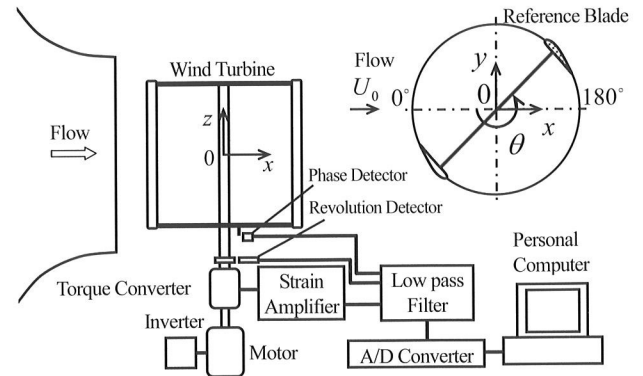


図 4.1 実験装置の概要および座標系

風車は風洞ノズル出口直後に設置されている。風洞ノズル出口と風車の回転中心との距離は 450mm である。座標の原点は風車の回転中心軸上の風車高さの中央であり、それは風洞の中心と一致する。このとき、風車は風洞の中央に位置し、風洞によって生成された流れのポテンシャルコア内にある。主流方向を x 方向、鉛直上方を z 方向、そして右手直交座標系となるように y 方向としている。アジマス角 θ は主流方向の最上流を 0[deg]とし、 z 方向に右ねじを回す方向を正としている。風車へ流入する流れの速度は風洞出口部分でピトー管を用いて測定された。また風車はひずみゲージ式トルク変換器（株式会社共和電業製、TP-1KMCB）を挟んでインバータモータに接続されており、インバータにより所定の回転速度（＝一定）となるように制御される。

計測においてはトルク信号、回転角度信号および位相検出信号を同期計測し、これらを 10kHz で 30 秒間 AD 変換することにより時系列データを取った。採取した時系列データを用いて、時間平均トルク $\bar{T}_w$ 、時間平均角速度 $\bar{\omega}$ 、位相平均計測トルク $\langle T_a \rangle_r$ 、位相平均角速度 $\langle \omega \rangle_r$ 、位相平均角加速度 $\langle d\omega/dt \rangle_r$ を算出した。ここで、 $\langle * \rangle_r$ は後に示す位相平均を表し、実際には 30～180 周期分の時系列データを用いて求めた。風による正味の位相平均トルク $\langle T_w \rangle_r$ は、位相平均計測トルク $\langle T_a \rangle_r$ および角加速度 $\langle d\omega/dt \rangle_r$ を用いて式(2)から算出した。ここで、任意の関数 $F(t)$ に対して時間平均および位相平均を次のように定義する。

$$\bar{F} = \lim_{\Delta T \rightarrow \infty} \frac{1}{\Delta T} \int_0^{\Delta T} F(t) dt \quad (11)$$

$$\langle F(t) \rangle_r = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} F(t + kT), \quad (0 \leq t \leq T, \quad T \text{ は周期}) \quad (12)$$

なお風による正味の時間平均トルク、時間平均出力および正味の位相平均トルクに対する係数を次式のように定義する。

$$C_T = \frac{\bar{T}_w}{1/2 \rho U_0^2 A r} \quad (13), \quad C_P = \frac{\bar{T}_w \bar{\omega}}{1/2 \rho U_0^3 A} \quad (14)$$

$$\langle C_T \rangle_r = \frac{\langle T_w \rangle_r}{1/2 \rho U_0^2 A r} \quad (15)$$

ここで A は受風面積[m²]である。

供試風車は回転半径 $r=0.3\text{m}$ 、ブレード幅 $b=0.6\text{m}$ 、翼弦長 $c=150\text{mm}$ 、ブレード枚数 $N=2$ 枚、ソリディティ $\sigma = Nc/(2\pi r) = 0.16$ である。 r は平均反り線上の翼弦長 0.3 c 位置と風車回転中心の間の距離である。また、図 4.2 に示

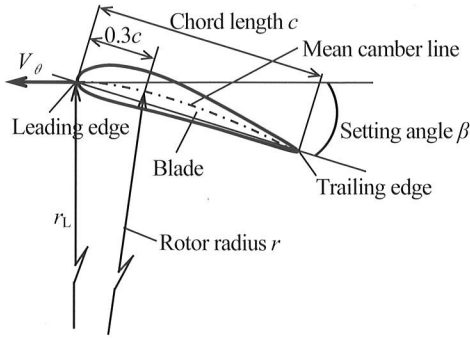


図 4.2 ブレードの取付角

すように、前縁と回転中心を通る半径 r_L に直交する直線と翼弦線のなす角をブレードの取付角 β とし、それは出力係数の最大値が最も大きくなる角度とした。ブレードはその端を両端支持することにより、風車回転軸に接続するアームに固定されている。供試ブレードの翼型は NACA4 字系列の設計パラメータに従って設計された NACA0020 および NACA6520 であり、その平面形状は長方形である。なお、ブレード材質は発泡スチロールである。

本研究においては、風車性能へ及ぼす周速比の影響を調べるため、風速を $U_0=6\text{m/s}$ 一定として、回転速度を 30～420rpm まで変化させて実験を行った。このときのレイノルズ数は、 $Re_r=2rU_0/\nu=2.4\times 10^5$ である。

5. 結果および考察

5・1 平均特性

図 5.1 に対称翼型 NACA0020 および非対称翼型 NACA6520 をもつ二枚ブレード風車に対する平均トルク・出力特性を示す。横軸は時間平均周速比 λ ($=r\omega/U_0$)、縦軸は時間平均トルク係数 C_T および時間平均出力係数 C_P である。二つの翼型の C_T はともに λ の増加につれて増加し、

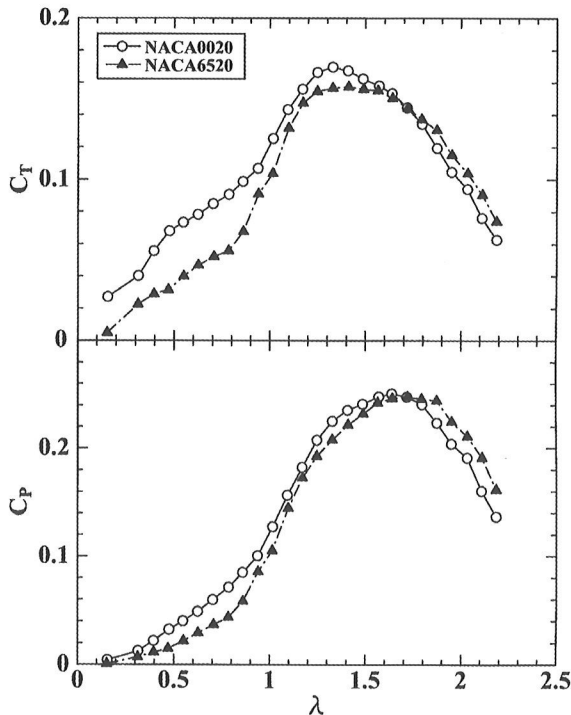


図 5.1 平均トルク・出力特性

NACA0020 では $\lambda=1.33$ でその最大値 $(C_T)_{\max}=0.17$ 、NACA6520 では $\lambda=1.41$ で $(C_T)_{\max}=0.16$ をとった後、減少している。後述のトルク変動との関係を調査するときに代表とする周速比 λ が、1 よりも小さい 0.63 と 0.94、および 1 よりも大きい 1.41 と 1.88 においては、 $\lambda=0.63, 0.94, 1.88, 1.41$ の順序で C_T が大きい。NACA0020 と NACA6520 を比較すると、 $\lambda \leq 1.72$ においては NACA0020 の方が C_T が大きく、特に低周速比側においてその傾向は顕著である。また、平均トルクの最大値をとった後の λ の増加に対するトルク低下割合は NACA6520 の方が小さく、 $\lambda > 1.72$ において、NACA0020 と比べて C_T が大きくなっている。 C_P については、平均トルク特性を反映し、二つの翼型はともに λ の増加につれて増加し、NACA0020 では $\lambda=1.64$ で最大値 0.25、NACA6520 では $\lambda=1.72$ で最大値 0.25 をとった後、減少している。NACA0020 と NACA6520 の比較においても、 $\lambda \leq 1.72$ において NACA0020 の方が C_P が大きく、特に低周速比側においてその傾向は顕著である。また、平均出力の最大値をとった後の λ に対する出力の低下割合は NACA6520 の方が小さく、 $\lambda > 1.72$ において、NACA0020 と比べて C_P が大きくなっている。

5・2 トルク変動特性

ここではトルク変動へ及ぼす周速比の影響を調べ、それらと 5・1 節で示した周速比に対する平均トルクの変化とを対応づける。

5・2・1 二枚ブレード

図 5.1 の平均特性を示す二つの翼型をもつ二枚ブレード風車における異なる周速比のアジマス角 θ に対するトルク変動を図 5.2 に示す。縦軸は風による正味の位相平均トル

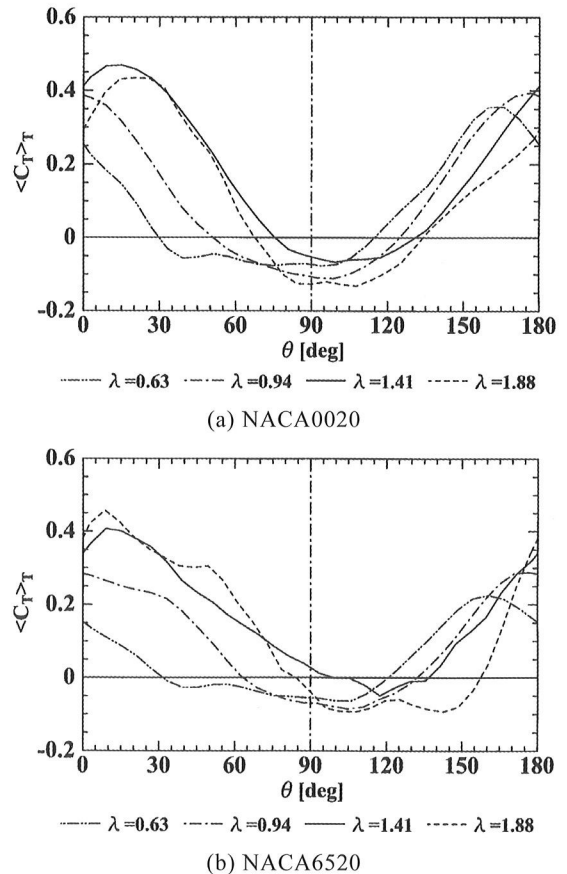


図 5.2 トルク変動へ及ぼす周速比の影響（二枚ブレード）

ク係数 $\langle C_T \rangle_T$ である。二枚のブレードの位相差は 180° であるため、 $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ の範囲を示す。代表として $\lambda < 1$ の $\lambda = 0.63$, 0.94 と $\lambda > 1$ の $\lambda = 1.41$, 1.88 について示す。まず、NACA0020 について見てみる。基準ブレードが $\theta = 166 \sim 176^\circ$

($\lambda = 0.63, 0.94$), $\theta = 15 \sim 20^\circ$ ($\lambda = 1.41, 1.88$) と一方のブレードが最上流 ($\theta = 0^\circ$) 近くにあるときに、 $\langle C_T \rangle_T$ は最大値 ($\langle C_T \rangle_{T, \max}$) をとる。 θ のこの領域は、式(5)より、風車回転トルクに対して、揚力の寄与が最も大きい領域である。 $\langle C_T \rangle_{T, \max}$ の値は $\lambda = 0.63, 0.94, 1.88, 1.41$ の順序で大きく、 λ の変化に対して極大値をもつ。この大きさの順序は、時間平均トルク係数 C_T の大きさの順序と一致しており、 $\langle C_T \rangle_{T, \max}$ が C_T に大きく影響していることがわかる。 $\langle C_T \rangle_{T, \max}$ をとるときの上流側ブレードの位相は $\theta = 346^\circ$ ($\lambda = 0.63$), 356° ($\lambda = 0.94$), 15° ($\lambda = 1.41$), 20° ($\lambda = 1.88$) であり、 λ が大きくなるにつれてブレードが進む方向に移動している。また、 $\theta = 94 \sim 108^\circ$ で $\langle C_T \rangle_T$ は最小値 ($\langle C_T \rangle_{T, \min}$) をとり、それは $\lambda = 1.41$ で最も大きく、 $\lambda = 1.88$ で最も小さい。 $\langle C_T \rangle_{T, \min}$ の λ による差異は $\langle C_T \rangle_{T, \max}$ の差異に比べて小さい。 $\lambda = 1.88$ の $\langle C_T \rangle_T$ は $80^\circ \leq \theta < 180^\circ$ の広範囲にわたって他と比べて小さくなっている。以上より、高周速比 $\lambda = 1.88$ における C_T の低下は、 $\langle C_T \rangle_{T, \max}$ に加えて、 $80^\circ \leq \theta < 180^\circ$ の広範囲にわたる $\langle C_T \rangle_T$ の低下によるものと考えられる。

次に NACA6520 について見てみる。基準ブレードが $\theta = 160 \sim 177^\circ$ ($\lambda = 0.63, 0.94$), $\theta = 9^\circ$ ($\lambda = 1.41, 1.88$) と一方のブレードが最上流近くにあるときに $\langle C_T \rangle_T$ は最大値 ($\langle C_T \rangle_{T, \max}$) をとり、それは λ が大きいほど大きい。 $\langle C_T \rangle_{T, \max}$ をとるときの上流側ブレードの位相は、 $\theta = 340^\circ$ ($\lambda = 0.63$), 357° ($\lambda = 0.94$), 9° ($\lambda = 1.41, 1.88$) であり、 λ が大きくなるにつれてブレードが進む方向に移動する傾向がある。また、基準ブレードが $\theta = 105 \sim 117^\circ$ で $\langle C_T \rangle_T$ は最小値 ($\langle C_T \rangle_{T, \min}$) をとる。 $\langle C_T \rangle_{T, \min}$ は $\langle C_T \rangle_{T, \max}$ と比べて λ による差異は小さいが、詳しく見ると $\lambda = 1.41$ で最も大きく、 $\lambda = 1.88$ で最も小さい。 $\lambda = 1.88$ では $95^\circ \leq \theta \leq 175^\circ$ の広範囲にわたって他と比べて $\langle C_T \rangle_T$ が顕著に小さく、 $\theta = 105^\circ$ および 140° 付近の 2 箇所で極小値を、 $\theta = 125^\circ$ 付近で極大値をとっている。 $\lambda = 1.41$ と $\lambda = 1.88$ の比較においては、 $72^\circ < \theta < 175^\circ$ の広範囲で $\lambda = 1.88$ の $\langle C_T \rangle_T$ は $\lambda = 1.41$ に比べて著しく小さくなっている。 $\langle C_T \rangle_{T, \max}$ は λ が大きくなるにつれて増加し、 $\lambda = 1.88$ で最も大きくなるが、 $\langle C_T \rangle_{T, \min}$ は $\lambda = 1.88$ で最も小さく、 $72^\circ < \theta < 175^\circ$ の広範囲にわたって $\lambda = 1.88$ の $\langle C_T \rangle_T$ が $\lambda = 1.41$ に比べて著しく小さくなっていることは、低周速比領域では λ の増加につれて C_T は増加し、 $\lambda = 1.41$ で最大値をとった後に低下することに寄与すると考えられる。

更に、NACA0020 と NACA6520 を比較する。 $\lambda = 0.63, 0.94$ の低周速比領域では、 $\langle C_T \rangle_{T, \max}$ は NACA0020 の方が顕著に大きい、 $\langle C_T \rangle_{T, \min}$ は $\langle C_T \rangle_{T, \max}$ と比べると両者の差異は小さい。高周速比領域では、平均トルク係数 C_T が最大値をとった後の λ の増加に対するトルク低下割合は NACA6520 の方が小さく、 $\lambda > 1.72$ で NACA6520 の方が C_T が大きくなっていることに着目して、 $\lambda = 1.88$ について両者を比較すると、 $\langle C_T \rangle_{T, \max}$ の差は小さいが、基準ブレードが $42^\circ \leq \theta \leq 127^\circ$ の広範囲にわたって NACA6520 の $\langle C_T \rangle_T$ が大きく、このことが C_T に大きく影響を与えていると考え

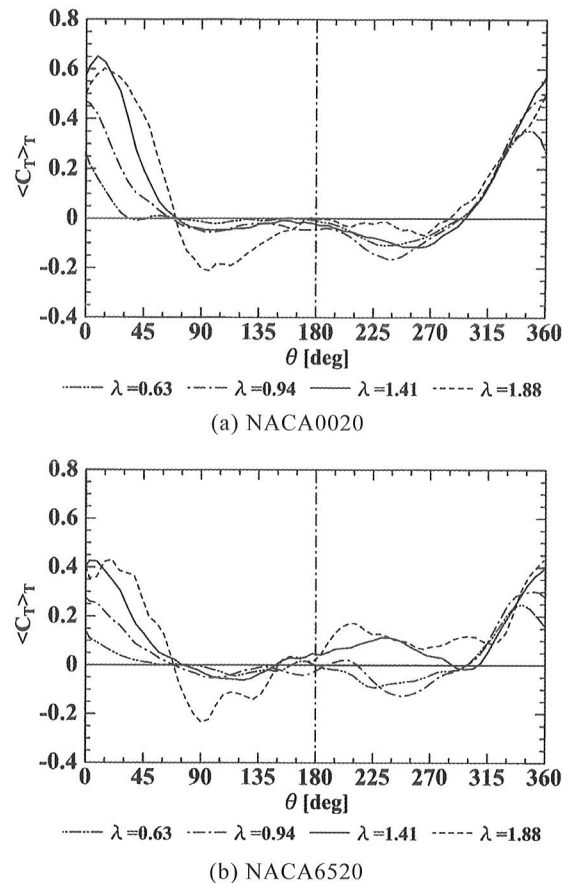


図 5.3 トルク変動へ及ぼす周速比の影響 (一枚ブレード)

られる。以上より、NACA0020 と NACA6520 の C_T の差異について、低周速比領域では、 $\langle C_T \rangle_{T, \max}$ が大きく影響を与え、高周速比領域では、それに加えて、例えば $\lambda = 1.88$ では、基準ブレードが $42^\circ \leq \theta \leq 127^\circ$ にある時の $\langle C_T \rangle_T$ が大きく影響を与えると考えられる。

5・2・2 一枚ブレード

図 5.3 に上記で用いた翼型 (NACA0020 および NACA6520) をもつブレードを一枚だけ取り付け付けた風車における異なる周速比のアジマス角 θ に対するトルク変動を示す。まず、NACA0020 を見てみると、基準ブレードが $\theta = 349^\circ$ ($\lambda = 0.63$), $\theta = 2 \sim 15^\circ$ ($\lambda = 0.94, 1.44, 1.88$) と最上流近くで $\langle C_T \rangle_{T, \max}$ をとっている。 $\langle C_T \rangle_{T, \max}$ の値は $\lambda = 0.63, 0.94, 1.88, 1.41$ の順序で大きく、 λ の変化に対して極大値をもつ。 $\langle C_T \rangle_{T, \max}$ をとる位相は $\theta = 349^\circ$ ($\lambda = 0.63$), 2° ($\lambda = 0.94$), 9° ($\lambda = 1.41$), 15° ($\lambda = 1.88$) であり、 λ が大きくなるにつれてブレードが進む方向に移動している。これらは、二枚ブレード風車のトルク変動の傾向と一致している。また、 $\lambda \leq 1.41$ では、基準ブレードが $\theta = 234 \sim 261^\circ$ のブレードの進む方向と主流の方向が反対の領域 ($\theta > 180^\circ$) で $\langle C_T \rangle_T$ は最小値 ($\langle C_T \rangle_{T, \min}$) をとっているが、より大きな周速比 $\lambda = 1.88$ では、 $\theta = 96^\circ$ のブレードの進む方向と主流の方向が同じ領域 ($\theta < 180^\circ$) で $\langle C_T \rangle_{T, \min}$ をとっており、 $70^\circ \leq \theta \leq 160^\circ$ において他の周速比と比べて $\langle C_T \rangle_T$ が著しく低下している。ところで、二枚ブレード風車では、一方のブレードがこの位相にあるとき、もう一方のブレードは $250^\circ \leq \theta \leq 340^\circ$ にあるが、この範囲において、 $\lambda = 1.88$ のトルク変動は他の周速比のものとは大きな差

異はない。したがって、二枚ブレード風車において、 $\lambda=1.88$ の $\langle C_T \rangle_T$ が、 $80^\circ \leq \theta < 180^\circ$ の広範囲で他と比べて小さく、 $\theta=90^\circ$ 近くで最小値をとることは、一枚ブレード風車の $70^\circ \leq \theta \leq 160^\circ$ で $\langle C_T \rangle_T$ が低下し、 $\theta=96^\circ$ で $\langle C_T \rangle_T$ の最小値をとることから定性的に説明できる。なお、基準ブレードの $70^\circ \leq \theta \leq 160^\circ$ の領域は、式(4)による迎角 α が負から正となり、その最大値 $\alpha_{\max}$ に向かって増加する位相にある。以上より、最上流近くでとる $\langle C_T \rangle_T$ の最大値が C_T に大きく影響しており、また、高周速比における C_T の低下は、 $\langle C_T \rangle_T$ の低下に加えて、 $\theta < 180^\circ$ における $\langle C_T \rangle_T$ の低下が大きく影響していることがわかる。

次に NACA6520 について見てみる。基準ブレードが最上流近く ($\theta=342^\circ$ ($\lambda=0.63$), 349° ($\lambda=0.94$), 3° ($\lambda=1.44$), 20° ($\lambda=1.88$)) で $\langle C_T \rangle_T$ の最大値をとる位相は λ が大きくなるにつれてブレードが進む方向に移動している。これらは、二枚ブレード風車のトルク変動の傾向と一致している。 $\lambda < 1$ では、基準ブレードがブレードの進む方向と主流の方向が反対 ($\theta > 180^\circ$) の $\theta=227^\circ$ ($\lambda=0.63$), 248° ($\lambda=0.94$) で、 $\lambda > 1$ では、ブレードの進む方向と主流の方向が同じ ($\theta < 180^\circ$) の $\theta=123^\circ$ ($\lambda=1.44$), 90° ($\lambda=1.88$) で $\langle C_T \rangle_T$ の最小値をとっている。 $\lambda=1.88$ の $\langle C_T \rangle_T$ の最小値は著しく小さく、 $70^\circ < \theta < 150^\circ$ の比較的広範囲にわたって、 $\langle C_T \rangle_T$ が顕著に小さくなっている。このことは、二枚ブレード風車における $\lambda=1.44$ と 1.88 の比較において、 $72^\circ < \theta < 175^\circ$ の広範囲で $\lambda=1.88$ の $\langle C_T \rangle_T$ が著しく小さくなっていることに対応する。また、 $\theta > 180^\circ$ の $\langle C_T \rangle_T$ において、 $\lambda < 1$ ではトルク低下し極小値をとるのに対して、 $\lambda > 1$ においてはトルク上昇し極大値をとっている。

更に、NACA0020 と NACA6520 を比較する。 $\lambda=0.63, 0.94, 1.41, 1.88$ の全てにおいて、NACA0020 の方が、 $\langle C_T \rangle_T$ の最大値が大きい。両者の特徴的なトルク変動の差異は、 $\lambda \geq 1.41$ の高周速比において、 $180^\circ < \theta < 300^\circ$ のブレードが進む方向と主流の方向が反対の領域において、NACA0020 ではトルク低下しているのに対して、NACA6520 ではトルク上昇し、極大値をとっていることである。この θ の領域は、二枚ブレード風車の $\lambda=1.88$ において、NACA6520 の $\langle C_T \rangle_T$ が NACA0020 のそれと比較して著しく大きくなる時の基準ブレードの領域 $42^\circ \leq \theta \leq 127^\circ$ に対して、もう一方のブレードが存在する領域 ($222^\circ \leq \theta \leq 307^\circ$) と大略対応している。このことから、二枚ブレード風車の $\lambda=1.88$ で、基準ブレードが $42^\circ \leq \theta \leq 127^\circ$ にある時に NACA6520 の $\langle C_T \rangle_T$ が NACA0020 のそれと比較して著しく大きくなるのは、 $180^\circ < \theta < 300^\circ$ の領域にあるもう一方のブレードによるトルク上昇の寄与と考えられる。

ここで、ソリディティが異なるので一枚ブレード風車と二枚ブレード風車の場合の直接的な比較は難しいが、一枚ブレード風車のトルク変動特性から二枚ブレード風車のトルク変動特性を定性的に解釈することを試みる。そこで、一枚ブレード風車のトルク変動データを用いて 180° の位相差で取り付けられている二枚ブレード風車のトルク変動を算出してみる。図 5.4 に一枚ブレード風車のトルク変動データを用いて算出した二枚ブレード風車のトルク変動

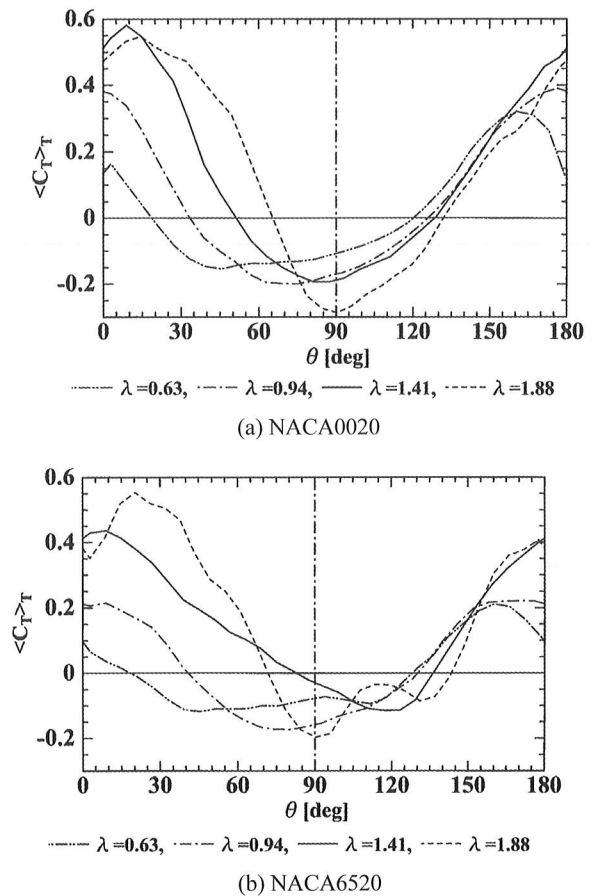


図 5.4 一枚ブレード風車のトルク変動から求めた二枚ブレード風車のトルク変動

を示す。まず、NACA0020 について見てみる。一方のブレードが最上流 ($\theta=0^\circ$) 近くにある時に $\langle C_T \rangle_T$ の最大値をとる位相は λ が大きくなるにつれてブレードが進む方向に移動している。また、 $\lambda=1.88$ のとき、 $76^\circ \leq \theta < 166^\circ$ で他と比べて $\langle C_T \rangle_T$ が顕著に小さく、 $\theta=90^\circ$ 付近で最小値をとっている。これらは、実際の二枚ブレード風車の $\langle C_T \rangle_T$ の傾向と定性的に一致する。

次に、NACA6520 について見てみる。一方のブレードが最上流 ($\theta=0^\circ$) 近くにある時に $\langle C_T \rangle_T$ の最大値をとる位相は、 λ が大きくなるにつれてブレードが進む方向に移動している。また、 $\lambda=1.88$ では、他の周速比と比較して $85^\circ \leq \theta \leq 153^\circ$ ($100^\circ \leq \theta \leq 130^\circ$ を除く) における $\langle C_T \rangle_T$ が小さく、 $\theta=90^\circ$ および 130° 付近の 2 カ所で極小値を、 $\theta=115^\circ$ 付近で極大値をとっている。これらは、実際の二枚ブレード風車の $\langle C_T \rangle_T$ の傾向と定性的に一致する。ただし、一枚ブレード風車のトルク変動特性から見積もった $\langle C_T \rangle_T$ の方が、トルク変動が大きく、極値が顕著に現れている。以上のことから、一枚ブレード風車のトルク変動特性から二枚ブレード風車のトルク変動特性を定性的に解釈することができる。

5.3 周速比に対する $\langle C_T \rangle_T$ の変化

図 5.5(a) に二枚ブレード風車の周速比に対する $\langle C_T \rangle_T$ の最大値および $\langle C_T \rangle_T$ の最小値の変化を示す。NACA0020 と NACA6520 の $\langle C_T \rangle_T$ の最大値および $\langle C_T \rangle_T$ の最小値の変化傾向は類似している。 $\langle C_T \rangle_T$ の最大値は λ が大きくなるにつれて増加し、 $\lambda=1.41$ で極

大値をとり、その後、低下する傾向を示す。また、 $\langle C_T \rangle_T$ は、 $\lambda < 1$ において、 λ の増加につれて徐々に低下し、 $\lambda = 0.94$ で極小値をとる。 $\lambda > 1$ において、 $\langle C_T \rangle_T$ は一度増加し、その後、 λ の増加とともに低下し、 $\lambda = 1.88$ で極小値をとった後に再び増加する傾向にある。 λ に対する $\langle C_T \rangle_T$ の変化の大きさは、 $\langle C_T \rangle_T$ のそれと比べて小さい。NACA0020 と NACA6520 の差異について詳しく見てみる。 λ のほとんどの領域で $\langle C_T \rangle_T$ は NACA0020 の方が大きい、高周速比側の領域 ($\lambda > 1.41$) では、NACA0020 と NACA6520 の $\langle C_T \rangle_T$ の差異は λ の増加とともに小さくなり、 $\lambda = 2.2$ でほぼ 0 となっている。 $\langle C_T \rangle_T$ については、 $\langle C_T \rangle_T$ と比較して NACA0020 と NACA6520 の差異は小さいが、詳しく見ると、 λ の大半の領域で、NACA0020 の方が $\langle C_T \rangle_T$ が小さい。

図 5.5(b) に一枚ブレード風車の周速比に対する $\langle C_T \rangle_T$ および $\langle C_T \rangle_T$ の変化を示す。 $\langle C_T \rangle_T$ について、NACA0020 では二枚ブレード風車と同様に、 λ が大きくなるにつれて増加し、 $\lambda = 1.41$ で最大値をとり、その後、低下する傾向を示す。一方、NACA6520 では λ の増加につれて $\langle C_T \rangle_T$ は増加している。また、 $\langle C_T \rangle_T$ については、NACA0020 と NACA6520 は類似の変化傾向を示し、 λ の増加とともに徐々に低下し、 $\lambda = 1.33$ で極小値をとる。 $\lambda > 1.33$ では、 $\lambda = 1.41$ で極大値をとった後、 λ の増加と共に減少する傾向を示す。 λ に対する $\langle C_T \rangle_T$ の変化の大きさは、 $\langle C_T \rangle_T$ のそれと比べて小さい。NACA0020 と NACA6520 の差異を詳しく見てみる。 λ のほぼ全領域において $\langle C_T \rangle_T$ は、NACA0020 の方が大きい。 $\langle C_T \rangle_T$ の

NACA0020 と 6520 の差異は λ の増加とともに大きくなり、 $\lambda = 1.41$ で最大となった後、小さくなり、 $\lambda = 2.04$ ではほぼ 0 となっている。 $\langle C_T \rangle_T$ については、二枚ブレード風車と同様に $\langle C_T \rangle_T$ と比較して NACA0020 と 6520 の差異は小さいが、詳しく見ると、 λ の大半の領域で、NACA0020 の方が $\langle C_T \rangle_T$ が小さい。

6. 結 言

二枚ブレード風車について、各周速比における風による正味のトルク変動を計測し、周速比に対する平均トルク特性と関連づけることを試みた結果、NACA0020 および NACA6520 の両者に対して以下のようにまとめることができる。

NACA0020 および NACA6520 とともに、

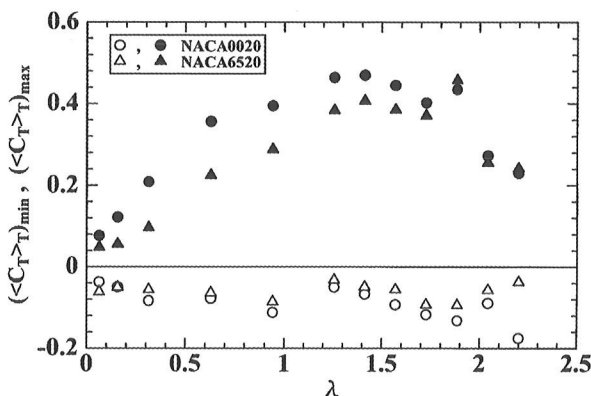
- (1) 周速比 λ に関わらず、一方のブレードが最上流 ($\theta = 0^\circ$) 近くにあるときに $\langle C_T \rangle_T$ をとる。
- (2) 周速比 λ の増加とともに $\langle C_T \rangle_T$ は増加する傾向があり、 $\lambda = 1.41$ で極大値をとる。
- (3) $\langle C_T \rangle_T$ をとる位相は λ の増加とともにブレードが進む方向に移動する傾向がある。
- (4) 一方のブレードが最上流近くでとる $\langle C_T \rangle_T$ が平均トルク C_T に大きく影響する。また、高周速比領域においては $\langle C_T \rangle_T$ の低下に加えて、 $\theta < 180^\circ$ における $\langle C_T \rangle_T$ の低下が C_T の低下に大きな影響を及ぼす。

NACA0020 と NACA6520 の比較において、

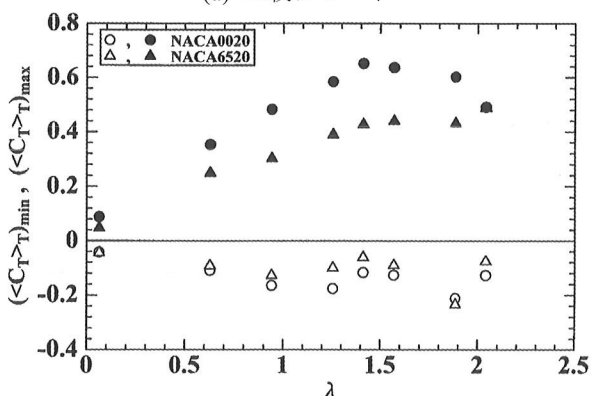
- (5) 高周速比領域で C_T が最大値をとった後の λ に対するトルク低下割合は NACA6520 の方が小さいのは、ブレードが進む方向と主流の方向が反対の領域にあるブレードによるトルク上昇が寄与するためである。

参考文献

- 1) 牛山泉 著, 風車工学入門, 森北出版, p.55(2002).
- 2) 水野明哲, “直線翼縦軸風車のスケール効果”, 第 24 回風力エネルギー利用シンポジウム, pp.195-197(2002).
- 3) B. Kirke and L. Lazauskas, *Journal of Fluid Science and Technology*, Vol. 3, No.3, pp.430-438(2008).
- 4) Yamada, S., Tamura, T. and Mochizuki, S., “Effects of Wing Section on Mean Characteristics and Temporal Torque Variation for Small Straight-Bladed Vertical Axis Wind Turbine”, *Journal of Fluid Science and Technology*, Vol.6, No.6, pp.875-886(2011).
- 5) 奥林豊保, 鹿毛一之, 石松克也, “ダリウス風車に関する研究 (1 枚翼に働く変動トルク)”, 日本機械学会講演論文集, No.018-2, 九州支部, 中国四国支部合同企画熊本地方講演会, pp.127-128 (2001).
- 6) 林農, 他 4 名, “直線翼垂直軸風車のトルク特性に関する研究”, 第 25 回風力エネルギー利用シンポジウム, pp.319-322(2003).
- 7) 前田太佳夫, 他 5 名, “直線翼垂直軸型風車のトルク変動解析”, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, 1206(2009).
- 8) 関和一・牛山泉 共著, 垂直軸型風車, パワー社, pp.172-173, pp.301-302(2008).
- 9) イオン パラシキブイユ 著, 林農, 他 3 名 訳, 風車の理論と設計, インデックス出版, pp.188-190(2007).



(a) 二枚ブレード



(b) 一枚ブレード

図 5.5 周速比に対する最大トルクおよび最小値トルクの変化

○, △: $\langle C_T \rangle_T$, ●, ▲: $\langle C_T \rangle_T$