

# 小型直線翼垂直軸型風車の性能へ及ぼすソリディティおよびブレード枚数の影響

山田誠治\*・田村智弘\*・望月信介\*<sup>2</sup>

## Effects of Solidity and Number of Rotor Blades for a Small Straight-Bladed Vertical Axis Wind Turbine

Seiji Yamada\*, Tomohiro Tamura\* and Shinsuke Mochizuki\*<sup>2</sup>

The net rotor torque driven by a straight-bladed vertical axis wind turbine has temporal variation for the azimuth angle of the blade. The torque variation should be investigated to understand the performance of the wind turbine. The solidity is important to determine the characteristics of the wind turbine. We have experimentally studied effects of the ratio of the chord length for the rotor radius and number of rotor blades to the mean torque and power characteristics and temporal torque variation at any azimuth angle of the blade. The mean torque and power increase with the larger ratio of the chord length for the rotor radius over relatively lower tip speed ratio. The maximum mean power coefficient takes the largest value at certain the ratio of the chord length for the rotor radius. The mean torque and power of the wind turbine with 2 blades are larger than the turbine with 3 blades for the same solidity. The value of the torque variation at an azimuth angle of the blade located in both upstream and downstream affect the mean torque characteristics. These increase with the larger ratio of the chord length for the rotor radius. The maximal value of the torque variation emerges at the azimuth angle of the blade located in near the most upstream, and it has significant contribution to the mean torque. The maximal torque of the wind turbine with 2 blades is remarkably larger than the wind turbine with 3 blades for the same solidity.

### 1. 緒 言

エネルギー問題および地球環境問題への取組が急務となる中で、本研究では、より身近なところで再生可能エネルギーの利用が可能である小型風車に着目した。風車は大型風車に代表される回転軸が風向に対して平行な水平軸型風車とそれが風向に対して垂直な垂直軸型風車に大きく分類される。後者に分類される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<sup>1)</sup>、ブレード構造が比較的簡単なことから、今後有望な風車の一つになると考えられる。一方、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<sup>2)</sup>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し<sup>3-7)</sup>、このトルク変動は風車の平均特性（トルク・出力特性）に影響を及ぼす<sup>7)</sup>。ところで、この風車の性能はブレードの翼型、翼端形状、ソリディティ、枚数などブレードの仕様によって大きく影響を受ける。これまで翼型については、それがこの風車の性能へ及ぼす影響についての研究<sup>8, 9)</sup>や高性能翼型の開発研究<sup>10)</sup>など平均特性の観点から多数の研究がある。また、風車性能に対して最適なソリディティを選定することが重要であるため<sup>11)</sup>、渦法を用いた数値解析によるソリディティの影響<sup>12)</sup>、風車回転半径に対する翼弦長の比の影響<sup>13)</sup>、ブレード枚数の影響<sup>14)</sup>について調べられている。しかし、ソリディティやブレード枚数がトルク変動特性に及ぼす影響については調べられていない。著者ら<sup>7)</sup>はこれまでに翼型の反り量および翼厚が平均トルク・出力特性およびアジマス角に対するトルク変動へ及ぼす影響について実験的に調べ、その中で比較的low周速比において、反り量が小さいほど、あるいは翼厚が厚いほど平均トルク・出力が大きく、ブレードが上流側のアジマス角でとる時間変動トルクの最大値が平均トル

クに大きな影響を及ぼし、それは反り量が小さいほど、あるいは翼厚が厚いほど大きくなることなどを明らかにしてきた。本研究ではソリディティおよびブレード枚数に着目し、風車回転半径に対する翼弦長の比およびブレード枚数が風車の平均トルク・出力特性およびアジマス角に対するトルク変動へ及ぼす影響について実験的に調査し、それらに関連づけることを試みた。

### 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。

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

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]、 $\omega$  は風車の回転角速度 [rad/s]、

$I_{wr}$  は風車の慣性モーメント [kg・m<sup>2</sup>] である。ところで図 3.1 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

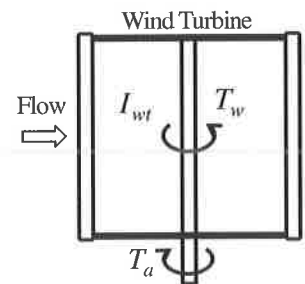


図 2.1 風車の力学モデル

の変動により  $\omega$  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。

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

\* 企業支援部設計制御グループ

<sup>2</sup> 山口大学大学院

### 3. 実験装置および方法

図 3.1 に実験装置の概要および座標系を示す。\$U\_0\$ は風速 [m/s]、\$\theta\$ は基準となるブレード（以下、基準ブレード）の位相 [deg]（アジマス角）である。風洞ノズル出口寸法は \$1000\text{mm} \times 1000\text{mm}\$ で、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 \$450\text{mm}\$ である。このとき、風車は風洞によって生成された流れのポテンシャルコア内に位置する。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。風車はひずみゲージ式トルク変換器（株式会社電業製、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）となるように設定される。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 \$10\text{kHz}\$ で \$30\$ 秒間 AD 変換することにより時系列データを採取した。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\_T\$、位相平均角速度 \$\langle \omega \rangle\_T\$、位相平均角加速度 \$\langle d\omega/dt \rangle\_T\$ を算出した。ここで、\$\langle \* \rangle\_T\$ は後に示す位相平均を表し、実際には \$30 \sim 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\_T\$ は、位相平均計測トルク \$\langle T\_a \rangle\_T\$ および角加速度 \$\langle d\omega/dt \rangle\_T\$ 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。

$$\bar{F} = \lim_{\Delta T \rightarrow \infty} \frac{1}{\Delta T} \int_0^{\Delta T} F(t) dt \quad (3)$$

$$\langle F(t) \rangle_T = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} F(t+kT), \quad (0 \leq t \leq T, \quad T \text{ は周期}) \quad (4)$$

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。

$$C_T = \frac{\bar{T}_w}{1/2 \rho U_0^2 A r} \quad (5), \quad C_P = \frac{\bar{T}_w \bar{\omega}}{1/2 \rho U_0^3 A} \quad (6)$$

$$\langle C_T \rangle_T = \frac{\langle T_w \rangle_T}{1/2 \rho U_0^2 A r} \quad (7)$$

ここで、\$\rho\$ は空気の密度 [kg/m\$^3\$]、\$r\$ は風車回転半径 [m]、\$A\$ は受風面積 [m\$^2\$] 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}\$、である。\$r\$ は平均反り線上の翼弦長 \$0.3c\$ 位置と風車回転中心の間の距離である。本研究ではソリディティ \$\sigma=Nc/2\pi r\$ (\$c\$ : 翼弦長 [m]、\$N\$ : ブレード枚数) とブレード枚数に着目し、風車回転半径に対する翼弦長の比 \$c/r\$、およびブレード枚数 \$N\$ の影響について調べた。まずブレード枚数 \$N=2\$ 枚（一定）として \$c/r=0.4, 0.5, 0.6\$ について調べた。このときの翼型パラメータは、前縁と後縁を回転円周上に設置したとき、反り線が回転円周とほぼ一致するように反り量 \$f\$ と最大反り位置 \$x\_j\$ (\$=0.5c\$) を選び、翼厚 \$t\$ は \$t/c=0.2\$ として NACA4 字系列の設計パラメータに従って設計した。次に、

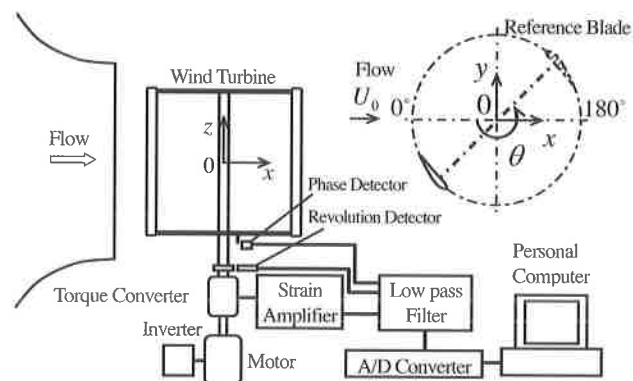


図 3.1 実験装置の概要および座標系

ブレード枚数の影響については、\$\sigma\$ の等しい (\$=0.16\$ (\$N=2\$ 枚、\$c/r=0.5\$)) \$N=2\$ と \$N=3\$ 枚の風車について比較を行った。このときの翼型パラメータも上記と同様にして設計した。供試ブレード一覧を表 3.1 に示す。以上より、\$c/r\$ の影響については NACA5520, 6520, 7520 の翼型を用い、\$N\$ の影響については NACA6520 (\$N=2\$), 4520 (\$N=3\$) の翼型を用いた。ブレードの材質は発泡スチロールである。なお、ブレードはその端を両端支持することにより固定した。実験は \$U\_0=6\text{m/s}\$ の条件で行われた。本研究では、\$3\text{m/s}\$ のような低風速における実際の小型風車の性能に着目しており、レイノルズ数は、\$r=0.6\text{m}\$、\$U\_0=3\text{m/s}\$ のとき \$\text{Re}=2rU\_0/\nu=2.4 \times 10^5\$ である。同じ \$\text{Re}\$ のとき \$r=0.3\text{m}\$ では \$U\_0=6\text{m/s}\$ である。また、他のレイノルズ数について、周速比 \$\lambda(=r\bar{\omega}/U\_0)=1.41\$ のとき、\$\text{Re}\_c=Wc/\nu=2.5 \times 10^4 \sim 1.4 \times 10^5\$ である。ここで、\$\nu\$ は空気の動粘性係数 [m\$^2\$/s] である。

表 3.1 供試ブレード一覧

Wing section	\$c\$ [mm]	\$f/c\$ [%]	\$t/c\$ [%]	\$c/r\$
NACA5520	120	5.05	20	0.40
NACA6520	150	6.35	20	0.50
NACA7520	180	7.68	20	0.60
NACA4520	100	4.20	20	0.33

## 4. 結果および考察

### 4.1 平均特性

#### 4.1.1 ソリディティの影響

図 4.1 に \$c/r\$ の異なる三種類の翼型をもつ二枚ブレード風車に対するトルク・出力特性を示す。横軸は周速比 \$\lambda(=r\bar{\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。また、図 4.2 に最大平均トルク・出力係数へ及ぼす回転半径に対する翼弦長の比 \$c/r\$ の影響を示す。横軸は \$c/r\$、縦軸は最大時間平均トルク係数および最大時間平均出力係数である。図 4.1 において、\$C\_T\$ について見てみると、\$\lambda < 1.41\$ の低周速比側の領域では \$c/r\$ が大きいほど \$C\_T\$ は大きい。\$\lambda \ge 1.41\$ では \$c/r=0.6\$ の \$\lambda\$ の増加に対する \$C\_T\$ の低下割合が大きく、その \$C\_T\$ は \$\lambda \ge 1.79\$ で最も小さくなっている。また、\$1.41 \le \lambda < 2.03\$ では \$c/r=0.5\$ の \$C\_T\$ が最も大きくなっている。図 4.2 からわかるように、\$C\_T\$ の最大値 \$(C\_T)\_{\text{max}}\$ は \$c/r\$ が大きいほど大きく、\$c/r=0.6\$ において最も大きな値 \$(C\_T)\_{\text{max}} \cong 0.17\$ をとり、\$c/r=0.4\$ で \$(C\_T)\_{\text{max}} \cong 0.12\$ と著しく小さい。\$(C\_T)\_{\text{max}}\$ をとる \$\lambda\$ は \$c/r\$

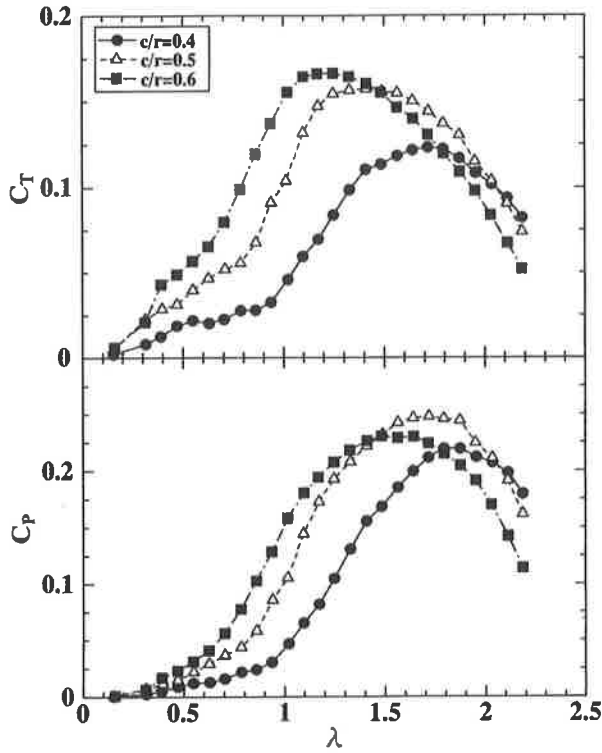


図 4.1 平均トルク・出力特性へ及ぼす  $c/r$  の影響

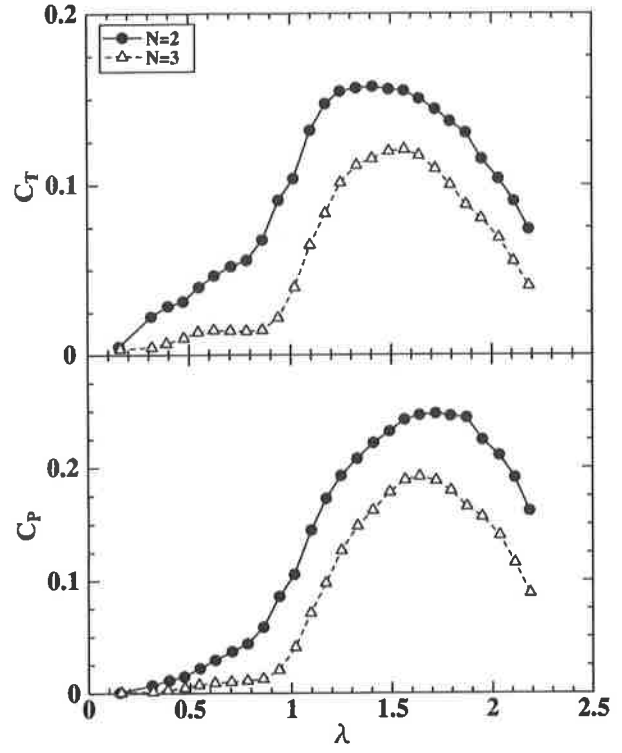


図 4.3 平均トルク・出力特性へ及ぼすブレード枚数の影響

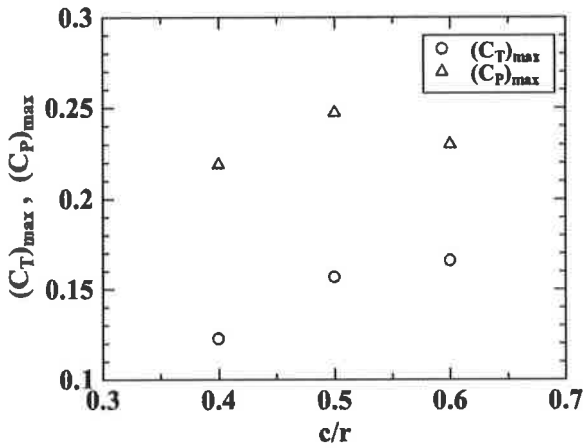


図 4.2 最大平均トルク・出力係数に及ぼす  $c/r$  の影響

が大きいほど小さく、 $c/r=0.6$  で  $\lambda \cong 1.25$  である。

次に  $C_p$  について見てみる。 $C_p$  はトルク特性を反映して、 $\lambda < 1.41$  の低周速比側の領域において  $c/r$  が大きいほど大きい。 $1.41 \leq \lambda < 2.03$  では  $c/r=0.5$  の  $C_p$  が最も大きく、 $\lambda \geq 1.79$  では  $c/r=0.6$  の  $\lambda$  の増加に対する  $C_p$  の低下割合が著しく大きく、その  $C_p$  は最も小さくなっている。図 4.2 からわかるように、 $C_p$  の最大値  $(C_p)_{max}$  は  $c/r=0.5$  のとき  $(C_p)_{max} \cong 0.25$  で最も大きく、 $c/r$  に対して最大値をもつ。 $(C_p)_{max}$  をとる  $\lambda$  は  $c/r$  が大きいほど小さくなり、 $c/r=0.6$  で  $\lambda \cong 1.48$  である。

以上より、本実験の  $c/r$  の範囲において、 $\lambda < 1.41$  の低周速比側の領域では  $c/r$  が大きいほど平均トルクおよび出力が顕著に大きい。また  $(C_T)_{max}$  は  $c/r$  が大きいほど大きい、 $(C_p)_{max}$  は  $c/r$  に対して最大値をもつ。

#### 4・1・2 ブレード枚数の影響

図 4.3 にブレード枚数が  $N=2$  および 3 枚の二種類の風車に対するトルク・出力特性を示す。これらの風車のソリディティは、共に  $\sigma=0.16$  であり、これは上記の結果において  $(C_p)_{max}$  が最も大きい  $c/r=0.5$  での値である。 $C_T$  について見てみると、 $C_T$  は  $\lambda$  の全域にわたって  $N=2$  枚の方が著しく大きく、 $(C_T)_{max}$  は  $N=2$  枚で 0.16、 $N=3$  枚で 0.12 であり、 $N=2$  枚の方が著しく大きい。また、 $(C_T)_{max}$  をとる  $\lambda$  は  $N=2$  枚では  $\lambda \cong 1.41$ 、 $N=3$  枚では  $\lambda \cong 1.57$  であり、 $N=3$  枚の方が大きい。

次に  $C_p$  について見てみる。 $C_p$  はトルク特性を反映して、 $\lambda$  の全域にわたって  $N=2$  枚の方が著しく大きく、 $(C_p)_{max}$  は  $N=2$  枚で 0.25、 $N=3$  枚で 0.19 であり、 $N=2$  枚の方が著しく大きい。また、 $(C_p)_{max}$  をとる  $\lambda$  は  $N=2$  枚では  $\lambda \cong 1.72$ 、 $N=3$  枚では  $\lambda \cong 1.64$  で  $N=2$  枚の方が大きくなっている。これは  $(C_T)_{max}$  をとった後の  $\lambda$  の増加に対する  $C_T$  の低下割合が  $N=2$  枚の方が小さいためである。

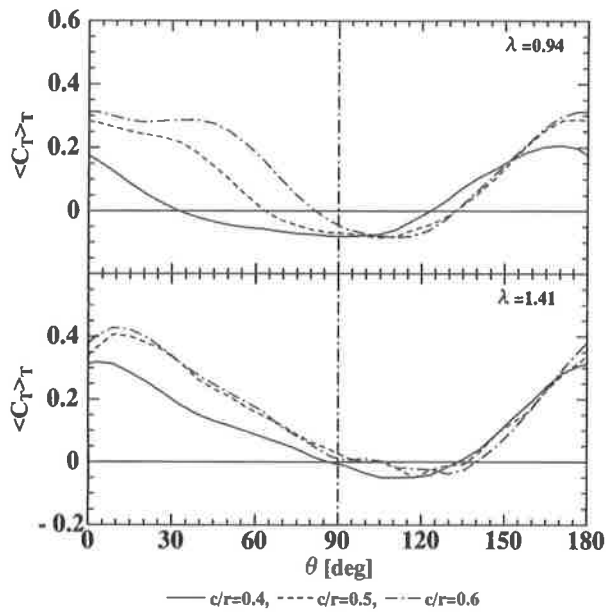
以上より、ソリディティが等しい場合、平均トルクおよび出力は  $N=2$  枚の方が  $N=3$  枚より大きくなる。

#### 4・2 トルク変動特性

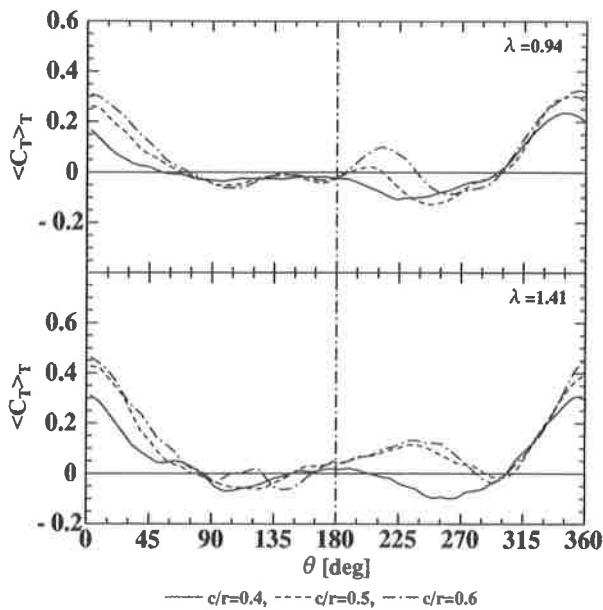
##### 4・2・1 ソリディティ ( $c/r$ ) の影響

###### a. 二枚ブレード

図 4.4(a)に  $c/r$  の異なる三種類の翼型もつ二枚ブレード風車におけるアジマス角  $\theta$  に対するトルク変動を示す。縦軸は風による正味の位相平均トルク係数  $\langle C_T \rangle_\theta$  である。二枚のブレードの位相差は  $180^\circ$  であるため、 $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$  の範囲を示す。代表として 1 より小さい  $\lambda=0.94$  と 1 より大きい  $\lambda=1.41$  について示す。まず  $\lambda=0.94$  では、全ての条件にお



(a) 二枚ブレード



(b) 一枚ブレード

図 4.4 トルク変動に及ぼす  $c/r$  の影響

いて基準ブレードのアジマス角が  $\theta = 3^\circ$ ,  $170^\circ$ ,  $177^\circ$  といずれか一方のブレードが最上流 ( $\theta = 0^\circ$ ) 近くにあるとき  $\langle C_T \rangle_T$  は最大値  $\langle \langle C_T \rangle_T \rangle_{\max}$  をとっており、それは  $c/r$  が大きいほど大きい。また、 $0^\circ \leq \theta \leq 100^\circ$  および  $155^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$  の広範囲にわたって  $c/r$  が大きいほど  $\langle C_T \rangle_T$  が著しく大きくなっている。一方、 $90^\circ \leq \theta \leq 110^\circ$  でとる  $\langle C_T \rangle_T$  の最小値  $\langle \langle C_T \rangle_T \rangle_{\min}$  は  $c/r$  によらず同程度であるが、 $\langle C_T \rangle_T < 0$  となる領域は  $c/r$  が大きいほど小さい。以上のことは  $\lambda < 1.41$  における  $C_T$  は  $c/r$  が大きいほど著しく大きいことに対応する。

次に  $\lambda = 1.41$  では、 $c/r = 0.5$  と  $0.6$  のトルク変動は比較的類似しているが、 $c/r = 0.4$  では  $0^\circ \leq \theta \leq 120^\circ$  の広範囲にわたって  $\langle C_T \rangle_T$  が顕著に小さくなっている。詳しく見ると、全ての条件において、基準ブレードが最上流近くの  $\theta = 3^\circ \sim 9^\circ$  で  $\langle \langle C_T \rangle_T \rangle_{\max}$  をとり、それは  $c/r$  が大きいほど大きく、

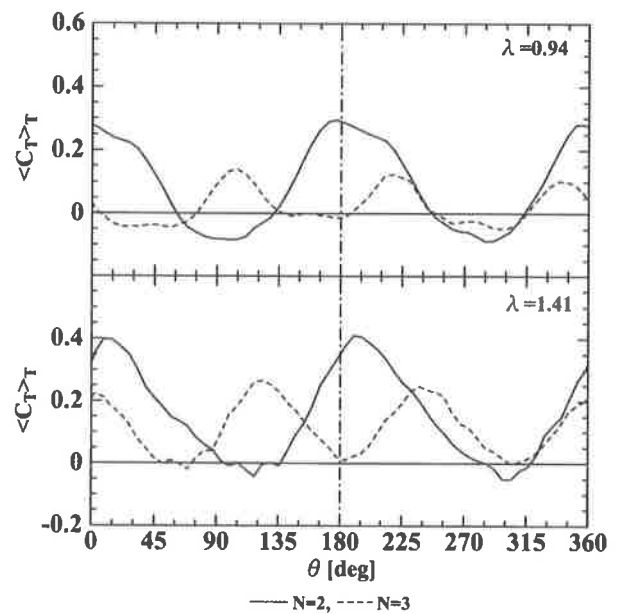


図 4.5 トルク変動に及ぼすブレード枚数の影響

$c/r = 0.4$  で著しく小さい。一方、 $110^\circ \leq \theta \leq 130^\circ$  でとる  $\langle \langle C_T \rangle_T \rangle_{\min}$  は  $c/r$  によらず同程度であるが、 $c/r = 0.4$  では他と比べて  $\langle C_T \rangle_T < 0$  となる領域が広がっている。以上のことは、 $C_T$  において  $c/r = 0.5$  と  $0.6$  で同程度であるが、 $c/r = 0.4$  で著しく小さくなっていることに対応する。

#### b. 一枚ブレード

図 4.4(b)に上記で用いた  $c/r$  の異なる三種類の翼型をもつブレードを一枚だけ取り付けた風車のアジマス角  $\theta$  に対するトルク変動を示す。まず、 $\lambda = 0.94$  では、全ての条件においてアジマス角が最上流近くの  $\theta = 343^\circ \sim 355^\circ$  で  $\langle \langle C_T \rangle_T \rangle_{\max}$  をとり、それは  $c/r$  が大きいほど大きい。また、 $0^\circ \leq \theta \leq 75^\circ$ ,  $180^\circ \leq \theta \leq 230^\circ$ ,  $315^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$  の大半の領域で  $c/r$  が大きいほど  $\langle C_T \rangle_T$  が大きい。特に  $180^\circ \leq \theta \leq 230^\circ$  において、 $c/r$  が大きいほど  $\langle C_T \rangle_T$  が大きく、 $c/r = 0.4$  ではトルク低下し、 $\theta = 225^\circ$  付近で極小値をとるのに対して、 $c/r = 0.5$  および  $0.6$  ではトルクが上昇し、それぞれ  $\theta = 206^\circ$  および  $212^\circ$  で極大値をとる、それは  $c/r = 0.6$  において著しく大きいことが特徴的である。以上のことは、二枚ブレード風車において基準ブレードが最上流近くで  $\langle \langle C_T \rangle_T \rangle_{\max}$  をとり、それは  $c/r$  が大きいほど大きいこと、また  $0^\circ \leq \theta \leq 100^\circ$  および  $155^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$  において  $\langle C_T \rangle_T$  が、 $c/r$  が大きいほど大きいことに対応する。

次に  $\lambda = 1.41$  では、 $c/r = 0.5$  と  $0.6$  のトルク変動は比較的類似しているが、 $c/r = 0.4$  では  $0^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$ ,  $165^\circ < \theta < 300^\circ$ ,  $330^\circ < \theta < 360^\circ$  の広範囲にわたって  $\langle C_T \rangle_T$  が顕著に小さくなっている。詳しく見ると、全ての条件において最上流付近で  $\langle \langle C_T \rangle_T \rangle_{\max}$  をとり、それは  $c/r$  が大きいほど大きく、 $c/r = 0.4$  で著しく小さくなっている。また  $180^\circ \leq \theta \leq 285^\circ$  において、 $c/r$  が大きいほど  $\langle C_T \rangle_T$  が大きく、 $c/r = 0.4$  ではトルク低下し、 $\theta = 260^\circ$  付近で極小値をとるのに対して、 $c/r = 0.5$  および  $0.6$  ではトルクが上昇し、ともに  $\theta = 230^\circ$  付近で極大値をとることが特徴的である。以上のことは、二枚ブレード風車において基準ブレードが最上流近

くで  $\langle C_T \rangle_r$  をとり、それは  $c/r$  が大きいほど大きいこと、また  $0^\circ \leq \theta \leq 120^\circ$  において  $c/r=0.4$  の  $\langle C_T \rangle_r$  が著しく小さくなっていることに対応する。

以上のことから、最上流近くでとる  $\langle C_T \rangle_r$  および上流側の  $\langle C_T \rangle_r$  に加えて、下流側の主流方向と逆向きにブレードが進む領域  $180^\circ \leq \theta \leq 270^\circ$  における  $\langle C_T \rangle_r$  が  $C_T$  に影響を与え、それらは  $c/r$  が大きいほど大きい。

#### 4・2・2 ブレード枚数の影響

図 4.5 に  $\sigma(=0.16)$  が等しいブレード枚数が  $N=2$  および 3 枚の二種類の風車におけるアジマス角  $\theta$  に対するトルク変動を示す。代表として 1 より小さい  $\lambda=0.94$  と 1 より大きい  $\lambda=1.41$  について示す。まず、 $\lambda=0.94$  について、 $N=2$  枚では、基準ブレードのアジマス角が  $\theta=0^\circ, 177^\circ$  付近で、 $N=3$  枚では、 $\theta=105^\circ, 218^\circ, 338^\circ$  付近で  $\langle C_T \rangle_r$  は極大値をとっている。したがって、 $N=2$  および 3 枚の風車のブレードがそれぞれ  $180^\circ$  および  $120^\circ$  の位相差で取り付けられていることを考慮すると、いずれかのブレードが最上流近くにあるときに  $\langle C_T \rangle_r$  は極大値をとる。 $N=2$  枚における  $\langle C_T \rangle_r$  の極大値は  $N=3$  枚の約 2 倍で著しく大きい。また、 $N=2$  枚では、 $\theta=100^\circ, 285^\circ$  付近で  $\langle C_T \rangle_r$  は極小値をとる、 $N=3$  枚では、 $\theta=40^\circ, 160^\circ, 280^\circ$  付近を中心として比較的平坦な低トルク領域が存在している。この  $N=2$  枚の極小値は、 $N=3$  枚の低トルク領域の値よりも若干小さい。以上のことは  $N=2$  枚において  $C_T$  が著しく大きいことに対応している。

次に  $\lambda=1.41$  では、 $N=2$  枚では  $\theta=9^\circ, 190^\circ$  付近、 $N=3$  枚では  $\theta=3^\circ, 123^\circ, 237^\circ$  付近といずれかのブレードが最上流近くにあるときに  $\langle C_T \rangle_r$  は極大値をとっている。 $N=2$  枚における  $\langle C_T \rangle_r$  の極大値は  $N=3$  枚より約 1.5 倍で著しく大きい。また、 $N=2$  枚では  $\theta=117^\circ, 304^\circ$  付近で、 $N=3$  枚では  $\theta=69^\circ, 183^\circ, 303^\circ$  付近で  $\langle C_T \rangle_r$  は極小値をとっている。この極小値は  $N=2$  枚の方が若干小さい。以上のことは、 $\lambda=1.41$  においても  $N=2$  枚の方が  $C_T$  が大きいことに対応している。

以上より、 $\lambda=0.94, 1.41$  共に、いずれかのブレードが最上流近くにあるときに  $\langle C_T \rangle_r$  は極大値をとる、それは  $N=2$  枚において著しく大きく、そのことが  $N=2$  枚において  $C_T$  が著しく大きいことに寄与する。

## 5. 結 言

小型直線翼垂直軸型風車の回転半径に対する翼弦長の比およびブレード枚数が平均トルク・出力特性およびアジマス角に対するトルク変動へ及ぼす影響について調べた。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1)  $\lambda < 1.41$  の低周速比側の領域では  $c/r$  が大きいほど平均トルクおよび出力が大きい。
- (2) 最大平均出力は  $c/r$  に対して最大値をもつ。
- (3) ソリディティが等しい場合、平均トルクおよび出力は  $N=3$  枚より  $N=2$  枚の方が大きい。

- (4) 最上流近くでとる  $\langle C_T \rangle_r$  および上流側の  $\langle C_T \rangle_r$  に加えて、下流側の主流方向と逆向きにブレードが進む領域における  $\langle C_T \rangle_r$  が  $C_T$  に影響を与え、それらは  $c/r$  が大きいほど大きい。
- (5) ソリディティが等しい場合、いずれかのブレードが最上流近くでとる  $\langle C_T \rangle_r$  の極大値は、 $N=3$  枚に比べて  $N=2$  枚の方が著しく大きく、そのことが  $N=2$  枚において  $C_T$  が著しく大きいことに寄与する。

#### 参考文献

- 1) 牛山泉 著, 風車工学入門, 森北出版, p.55(2002).
- 2) 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.141-143(2007).
- 3) B. Kirke and L. Lazauskas, "Variable Pitch Darrieus Water Turbines" *Journal of Fluid Science and Technology*, **3**, No.3, pp.430-438(2008).
- 4) 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).
- 5) 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).
- 6) 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).
- 7) 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*, **6**(6), pp.875-886 (2011).
- 8) 鈴木良幸, 落合薫, "直線翼垂直軸型風車の性能に及ぼす翼型の影響", 東京工業高等専門学校研究報告書, 第 17 号, pp.47-52(1985).
- 9) 浅生利之, 他 6 名, "低周速比における垂直軸型風車の空気力学的性能", 第 31 回風力エネルギー利用シンポジウム, pp.325-328 (2009).
- 10) 関和一, "低レイノルズ数で高性能を示す垂直軸風車用翼型の開発研究", 日本機械学会論文集, **57**(536), B, pp.1297-1304(1991).
- 11) 関和一・牛山泉 共著, 垂直軸型風車, パワー社, pp.261-262(2008).
- 12) 福留桂子, 飯田明由, 水野明哲, "渦法による縦軸風車の性能評価 (ソリディティ・設置角の影響)", 第 25 回風力エネルギー利用シンポジウム, pp.276-279(2003).
- 13) 西沢良史, 他 3 名, "垂直軸型風車の実験的研究", 機械学会論文集, **75**(751), B, pp.164-166(2009).
- 14) Takao, M., et al, "A Straight-bladed Vertical Axis Wind Turbine with a Directed Guide Vane Row", *Journal of Fluid Science and Technology*, **3**(3), pp.379-386(2008).