

## 小型直線翼垂直軸型風車の性能へ及ぼす翼型の影響

## (トルク・出力特性およびトルク変動特性)

山田誠治\*<sup>1</sup>・田村智弘\*<sup>1</sup>・望月信介\*<sup>2</sup>

## Effects of wing section for a small straight-bladed vertical axis wind turbine

## (Torque and power characteristics and torque variation)

Seiji Yamada\*<sup>1</sup>, Tomohiro Tamura\*<sup>1</sup> 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 blade camber and thickness are important to determine the characteristics of the wind turbine. We have studied effects of the blade camber and thickness to the mean torque and power characteristics and temporal torque variation at any azimuth angle of the blade. The mean torque and power increases with the smaller camber and the larger blade thickness over relatively lower tip speed ratio. The maximum mean torque and power coefficient take the largest value at certain blade thickness. The maximum torque emerges at the azimuth angle of the blade located in upstream, and it has significant contribution to the mean torque. In particular, over relatively lower tip speed ratio, the maximum torque remarkably increases with the smaller camber and the larger blade thickness.

## 1. 緒 言

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<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、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<sup>(2)</sup>。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）、風向変化に対する風車の応答性、および風車支柱の振動へ影響を及ぼすと考えられる。以上のことから、この風車の性能を理解するためにはトルク変動特性を調査することが重要な課題である。ところで、この風車の平均特性はブレードの翼型、翼端形状、ソリディティなどブレードの形状によって大きく影響を受ける。これまで垂直軸型風車のブレードに関する研究はなされてきた<sup>(3)</sup>ものの、翼型パラメータについて風車性能への影響を系統的に調べたものは少なく、特にブレードのアジマス角に対するトルク変動特性に及ぼす影響について調べたものはほとんど見あたらない。そこで本研究では翼型パラメータの中で反り量および翼厚が平均トルク・出力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。

## 2. 風車の力学

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

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

と表すことができる。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数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  $\omega$  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。

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

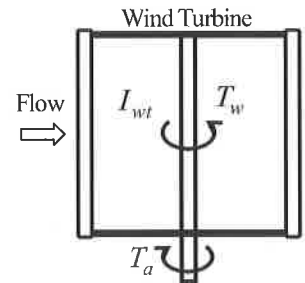


図 2.1 風車の力学モデル

## 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 1000mm×1000mm で、風車は風洞ノズル出口直後に設置されている。風車はひずみゲージ式トルク変換器（㈱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数（＝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、回転数信号、

\*<sup>1</sup> 企業支援部 設計制御グループ\*<sup>2</sup> 山口大学大学院

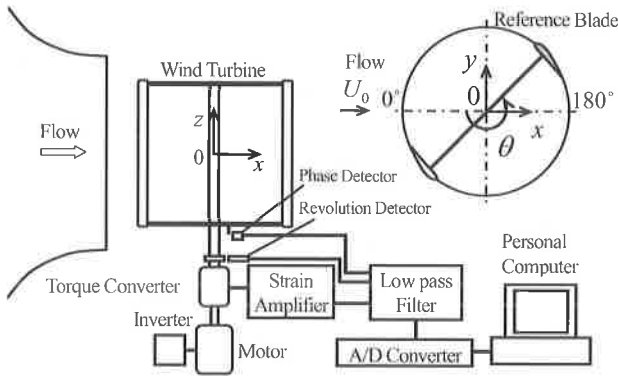


図 3.1 実験装置の概要および座標系

および位相信号を同期計測し、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採取した。採取した時系列データを用いて、平均トルク、平均回転数、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 30~180 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。

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

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

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<sup>3</sup>]、 $A$  は受風面積 [m<sup>2</sup>]、 $r$  は風車回転半径 [m] 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  $N=2$  枚あるいは 1 枚である (ソリディティ  $\sigma=Nc/(2\pi r)=0.16, N=2$ )。ブレードはその端を両端支持することにより固定した。ブレードの材質は発泡スチロールである。また、供試ブレードは、反り量  $f$  および翼厚  $t$  の影響を調べるため、NACA 4 字系列の設計パラメータに従って設計された。供試ブレード一覧を表 3.1 に示す。なお、実験は  $U_0=6\text{m/s}$  の条件で行われた。

表 3.1 供試ブレード一覧 ( $f$ : 反り量,  $t$ : 翼厚)

Wing section	$f/c$ [%]	$t/c$ [%]
NACA0020	0.00	20
NACA3520	3.00	20
NACA6520	6.35	20
NACA8520	8.00	20
NACA6518	6.35	18
NACA6525	6.35	25
NACA6530	6.35	30

#### 4. 結果および考察

##### 4.1 平均特性

##### 4.1.1 反り量の影響

図 4.1 に反り量の異なる四種類の翼型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 4.4 には最大平均トルクおよび出力へ及ぼす反り量の影響を示す。横軸は反り量  $f$  の翼弦長  $c$  に対する比を百分率 [%] で示し、縦軸は  $C_T$  の最大値  $(C_T)_{\max}$  および  $C_P$  の最大値  $(C_P)_{\max}$  を示す。図 4.1 から周速比  $\lambda < 1$  では反り量が小さいほど  $C_T$  は大きいことがわかる。また図 4.1 および 4.4 から  $(C_T)_{\max}$  は NACA0020 と NACA3520 において同程度の  $(C_T)_{\max} \approx 0.17$  で最も大きく、 $f/c > 0.03$  において  $f/c$  が大きくなるにつれて低下し、NACA8520 で著しく小さくなっている。また  $(C_T)_{\max}$  をとる  $\lambda$  は反り量が小さくなるほど小さくなる傾向があり、NACA0020 と NACA3520 で同程度の  $\lambda \approx 1.33$  である。 $(C_T)_{\max}$  をとった後の  $C_T$  の低下割合は反り量が大きいほど小さい。 $C_P$  は平均トルク特性を反映して  $\lambda < 1$  において反り量が小さいほど大きい。図 4.1 および 4.4 から  $(C_P)_{\max}$  は NACA8520 で著しく小さいが、その他はほぼ同程度の  $(C_P)_{\max} \approx 0.25$  である。また  $(C_P)_{\max}$  をとる  $\lambda$  は全ての反り量において  $\lambda = 1.57 \sim 1.72$  の範囲にある。

以上より、 $\lambda < 1$  の比較的 low 周速比においては反り量が小さいほどトルクが大きく、効率が良い。このことは起動からの加速性がよいことを示しており、障害物の多い地上近くのような風速・風向変化が大きい風況下では重要な特性となる可能性がある。

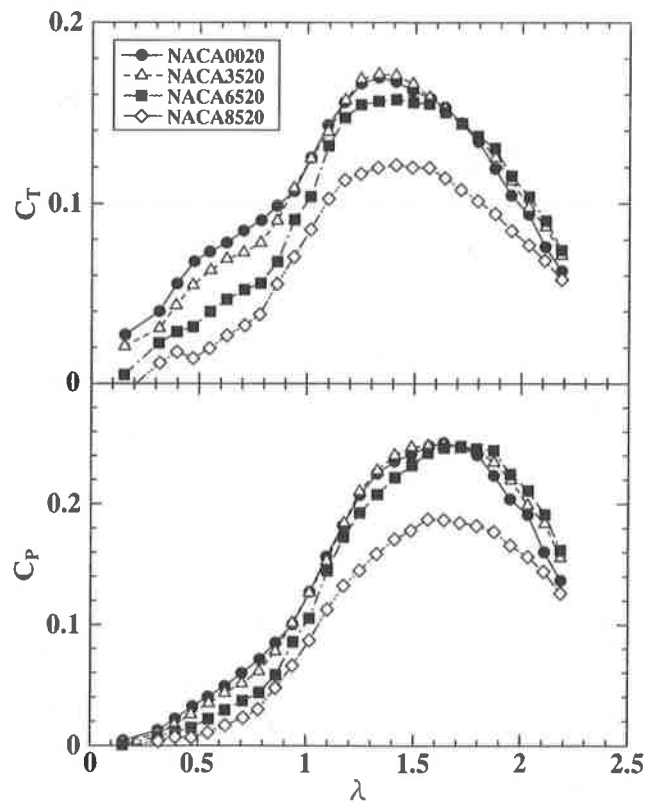


図 4.1 平均トルク・出力特性へ及ぼす反り量の影響

4・1・2 翼厚の影響

(1) 非対称翼型

図 4.2 に翼厚の異なる四種類の非対称翼型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。また図 4.5 に最大平均トルクおよび出力へ及ぼす翼厚の影響を示す。横軸は翼厚  $t$  の翼弦長  $c$  に対する比を百分率 [%] で示し

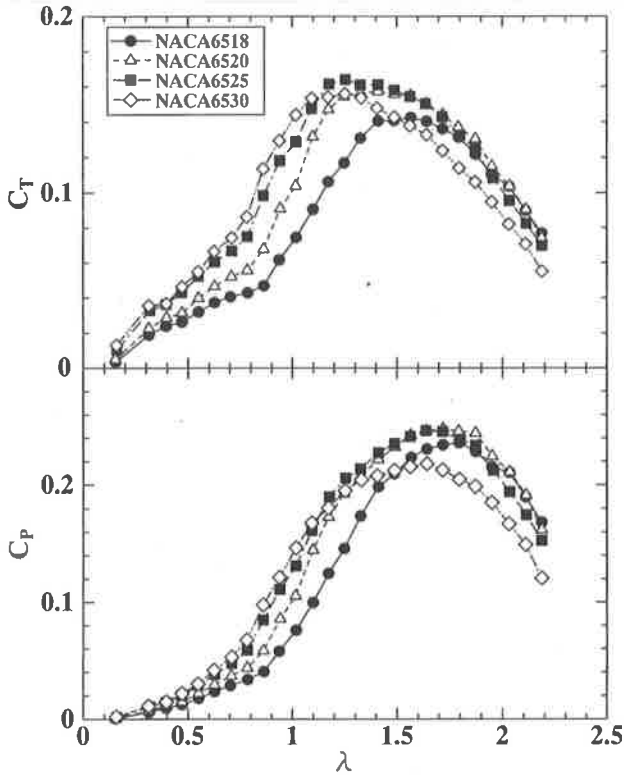


図 4.2 平均トルク・出力特性へ及ぼす翼厚の影響 (非対称翼型)

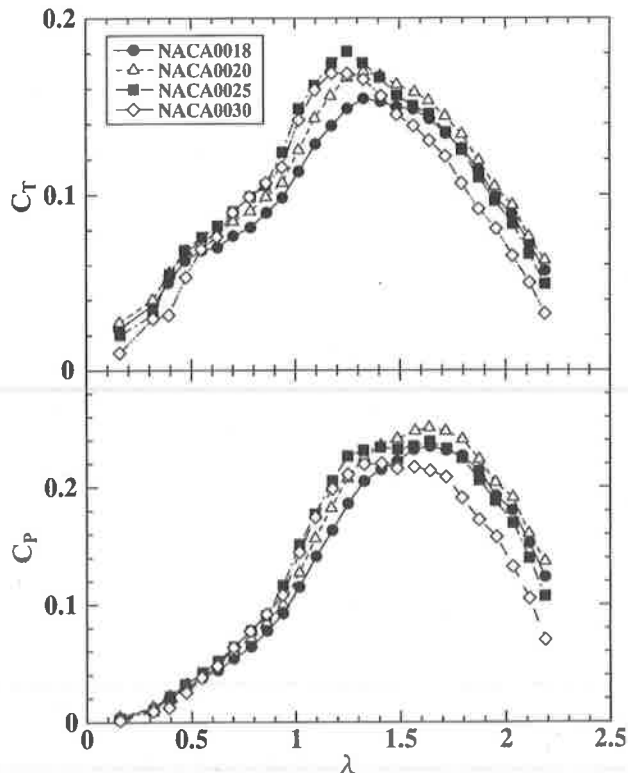


図 4.3 平均トルク・出力特性へ及ぼす翼厚の影響 (対称翼型)

ている。図 4.2 から  $\lambda < 1.1$  では翼厚が厚いほど  $C_T$  が大きい。図 4.2 および 4.5 から  $(C_T)_{max}$  は NACA6525 において最も大きく、翼厚に対して最大値をもつことがわかる。また  $(C_T)_{max}$  をとる  $\lambda$  は翼厚が厚くなるにつれて小さくなる傾向があり、 $t/c \geq 0.25$  では  $\lambda \approx 1.25$  である。 $C_p$  は平均トルク特性を反映して  $\lambda < 1.1$  において翼厚が厚いほど大きい。図 4.2 および 4.5 から  $(C_p)_{max}$  は NACA6520 と NACA6525 で同程度の  $(C_p)_{max} \approx 0.25$  で最も大きく、翼厚に対して最大値をもつことがわかる。また  $(C_p)_{max}$  をとる  $\lambda$  は翼厚が厚くなるにつれて小さくなる傾向があり、 $t/c \geq 0.25$  では同程度の  $\lambda \approx 1.64$  である。

以上より  $\lambda < 1.1$  の比較的低周速比においては翼厚が厚いほどトルクが大きく、効率が良いが、 $(C_T)_{max}$  および  $(C_p)_{max}$  は翼厚に対して最大値をもつ。

(2) 対称翼型

図 4.3 に翼厚の異なる四種類の対称翼型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。図 4.3 から  $0.6 < \lambda < 1.4$  において翼厚が最も薄い NACA0018 で  $C_T$  が最も小さく、 $0.6 < \lambda < 1.2$  においては大略翼厚が厚い方が  $C_T$  が大きい傾向にあるが、詳細に見ると  $0.9 < \lambda < 1.4$  では NACA0025 で最も大きい。一方、 $\lambda < 0.6$  では翼厚が最も厚い NACA0030 において  $C_T$  が最も小さくなっている。対称翼型においては前述の非対称翼型ほど低周速比での翼厚増加に対する  $C_T$  の増加傾向は顕著ではない。図 4.3 および 4.5 から  $(C_T)_{max}$  は NACA0025 で最も大きく、翼厚に対して最大

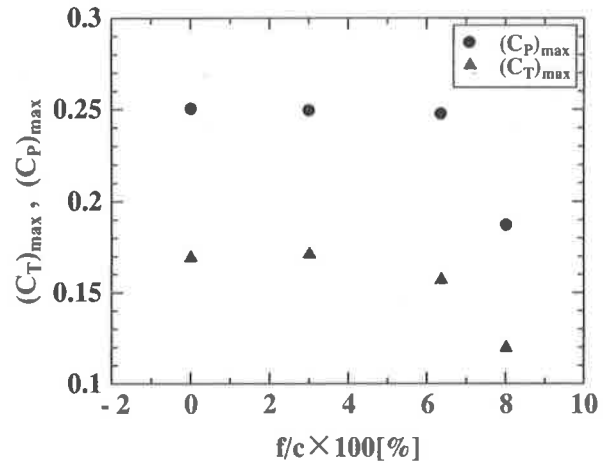


図 4.4 最大平均トルク・出力係数に及ぼす反り量の影響

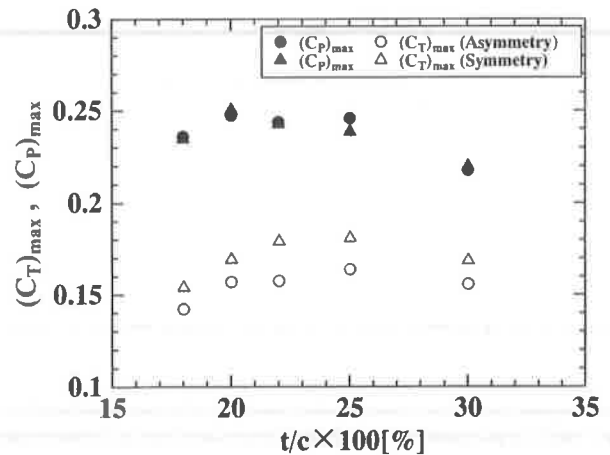


図 4.5 最大平均トルク・出力係数に及ぼす翼厚の影響

値をもつ。また  $(C_T)_{\max}$  をとる  $\lambda$  は翼厚が厚くなるにつれて小さくなる傾向があり、 $t/c=0.30$  において  $\lambda \approx 1.18$  である。 $C_p$  は平均トルク特性を反映して  $0.6 < \lambda < 1.2$  で大略翼厚が厚い方が大きい傾向にあるが、詳細に見ると  $0.9 < \lambda < 1.4$  では NACA0025 で最も大きい。図 4.3 および 4.5 から  $(C_p)_{\max}$  は NACA0020 において  $(C_p)_{\max} \approx 0.25$  で最も大きく、翼厚に対して最大値をもつ。また  $(C_p)_{\max}$  をとる  $\lambda$  は NACA0030 において  $\lambda=1.41$  で最も小さく、他は  $\lambda=1.64$  で同程度である。NACA0025 と NACA0030 では  $(C_p)_{\max}$  をとる  $\lambda$  の付近で  $C_p$  の変化は小さく、特性曲線は比較的平坦である。

#### 4・2 トルク変動特性

##### 4・2・1 反り量の影響

###### a. 二枚ブレード

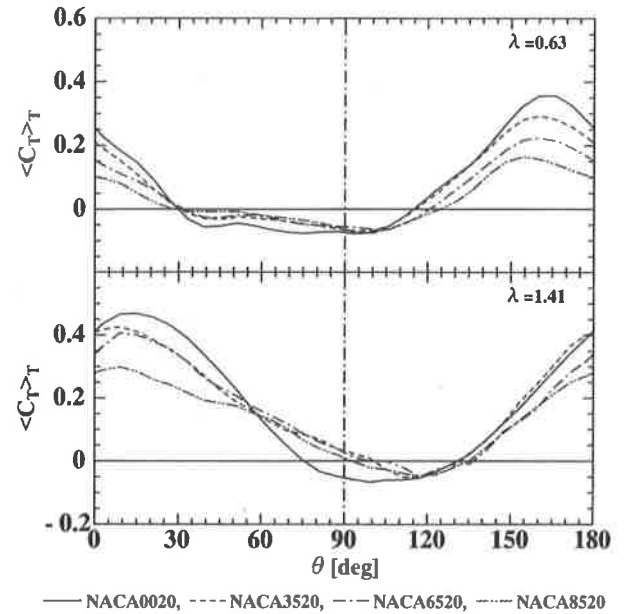
平均トルク特性の特徴を理解するためにトルク変動特性について調べる。図 4.6(a)に反り量の異なる四種類の翼型をもつ二枚ブレード風車におけるアジマス角  $\theta$  に対するトルク変動を示す。縦軸は風による正味の位相平均トルク係数  $\langle C_T \rangle_T$  である。二枚のブレードは  $180^\circ$  の位相差で取り付けられているため、 $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$  の範囲を示す。代表として  $\lambda=0.63 < 1$  と  $\lambda=1.41 > 1$  について示す。まず  $\lambda=0.63$  において基準ブレードのアジマス角が  $155^\circ \leq \theta \leq 165^\circ$  の範囲で  $\langle C_T \rangle_T$  は最大値  $(\langle C_T \rangle_T)_{\max}$  をとっている。このとき、もう一方のブレードは  $335^\circ \leq \theta \leq 345^\circ$  で上流側にある。ここで上流側とは  $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ 、あるいは  $270^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$  の領域を、下流側とは  $90^\circ < \theta < 270^\circ$  の領域のことをいう。この  $(\langle C_T \rangle_T)_{\max}$  は反り量が小さいほど顕著に大きい。一方、 $90^\circ \leq \theta \leq 105^\circ$  での  $\langle C_T \rangle_T$  の最小値  $(\langle C_T \rangle_T)_{\min}$  は反り量によらず同程度である。以上のことは  $\lambda < 1$  において反り量が小さいほど  $C_T$  が大きいことと対応している。またトルク変動  $(\langle C_T \rangle_T)_{\max} - (\langle C_T \rangle_T)_{\min}$  は反り量が小さいほど大きい。

次に  $\lambda=1.41$  において、基準ブレードが上流側の  $10^\circ \leq \theta \leq 15^\circ$  で  $(\langle C_T \rangle_T)_{\max}$  をとる。 $\lambda=0.63$  と同様に反り量が小さいほど  $(\langle C_T \rangle_T)_{\max}$  は大きい。NACA3520 と NACA6520 との差は  $\lambda=0.63$  ほど大きくない。また  $100^\circ \leq \theta \leq 115^\circ$  での  $(\langle C_T \rangle_T)_{\min}$  は反り量によらずほぼ同程度であるが、NACA0020 のトルクは  $60^\circ < \theta < 120^\circ$  で他と比べて著しく小さくなっている。このことは  $(\langle C_T \rangle_T)_{\max}$  は NACA0020 で最も大きい。また  $C_T$  は NACA3520 より若干小さくなっている原因と考えられる。

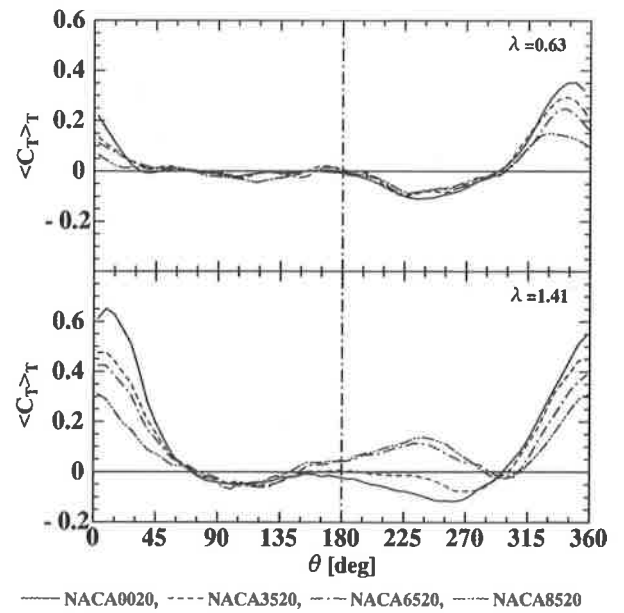
以上のことから  $\lambda < 1$  の比較的低周速比では反り量は特に  $(\langle C_T \rangle_T)_{\max}$  の大きさに影響を与え、それが  $C_T$  に大きく影響を与えることがわかる。また周速比が大きくなると反り量の減少は、特に対称翼の NACA0020 において、 $(\langle C_T \rangle_T)_{\max}$  の増加に加えて  $60^\circ < \theta < 120^\circ$  のトルク低下として影響を与える。

###### b. 一枚ブレード

図 4.6(b)に上記で用いた反り量の異なる四種類の翼型をもつブレードを一枚だけ取り付け付けた風車のアジマス角  $\theta$  に対するトルク変動を示す。 $\lambda=0.63$  では基準ブレードのアジマス角が上流側の  $330^\circ \leq \theta \leq 350^\circ$  にあるときに  $(\langle C_T \rangle_T)_{\max}$  をとり、それは反り量が小さいほど大きい。一方、 $30^\circ \leq \theta \leq 300^\circ$  の広範囲にわたって  $\langle C_T \rangle_T$  は反り量によらず同程度となっている。



(a) 二枚ブレード



(b) 一枚ブレード

図 4.6 トルク変動に及ぼす反り量の影響

次に  $\lambda=1.41$  について見てみる。 $\lambda=0.63$  と同様に基準ブレードが上流側の  $0^\circ \leq \theta \leq 10^\circ$  で  $(\langle C_T \rangle_T)_{\max}$  をとり、それは反り量が小さいほど大きい。また、 $150^\circ < \theta < 300^\circ$  において、反り量が 3%以下 (NACA0020, 3520) の場合と 6%より大きい (NACA6520, 8520) 場合とでトルク波形の傾向が二分しているのが特徴的である。反り量が 3%以下の NACA0020 および NACA3520 では  $255^\circ \leq \theta \leq 270^\circ$  で極小値をとるのに対して、反り量が 6%より大きい NACA6520 および NACA8520 では  $\theta=240^\circ$  付近で極大値をとっている。このことは  $\theta > 180^\circ$  において反り量の大きい翼型を有するブレードではトルクが増加することを示している。

ここで一枚ブレード風車においてブレードが上流側でとる  $(\langle C_T \rangle_T)_{\max}$  は反り量が小さいほど大きいこと、および  $150^\circ < \theta < 300^\circ$  において反り量が大きい翼型をもつブレードではトルクが増加することについて考察する。一枚ブレード風車の  $(\langle C_T \rangle_T)_{\max}$  をとる位相はブレードに作用する

揚力が最も回転に寄与する領域にあり、翼型の吸引側の面が回転軸側の面である<sup>(4)</sup>、つまり翼型は負の迎角をとるため、反り量が小さいほど回転に寄与する揚力が大きくなり、 $\langle C_T \rangle_T$ が最大となるものと推測される。また  $150^\circ < \theta < 300^\circ$  においては、 $\langle C_T \rangle_T$ が極大値をとる  $\theta = 240^\circ$  付近に着目して見てみる。この位相では翼型の吸引側の面は回転軸と反対側の面である<sup>(4)</sup>。つまり翼型は正の迎角をとる。ところで翼型は反り量が大きいほど最大揚力係数が大きくなる<sup>(5)</sup>ため反り量が大きいブレードで回転トルクが増加すると考えられる。ただし、この領域では抗力およびモーメントの寄与についても考慮する必要がある。

さらに、ソリディティが異なるため直接的な比較は難しいが、二枚ブレード風車のトルク波形の特徴を一枚ブレード風車のトルク波形から定性的に解釈することを試みる。代表として  $\lambda = 1.41$  について見てみる。一枚ブレード風車においてブレードが上流側にあるとき  $\langle C_T \rangle_T$  をとり、それは反り量が小さいほど大きい。一方、 $150^\circ < \theta < 300^\circ$  においては、反り量が小さいとトルクが低下する傾向がある。これらの一枚ブレード風車の特徴を考慮すると、二枚ブレード風車のトルク波形において、基準ブレードが上流側の  $10^\circ \leq \theta \leq 15^\circ$  にあるときにとる  $\langle C_T \rangle_T$  が反り量の小さいほど大きいのは、一枚ブレード風車の  $\langle C_T \rangle_T$  が反り量の小さいほど大きいことが寄与している。また対称翼型である NACA0020 の二枚ブレード風車において  $60^\circ < \theta < 120^\circ$  で著しくトルク低下しているのは、一枚ブレード風車の  $240^\circ < \theta < 300^\circ$  の著しいトルク低下が寄与しているとも考えられる。

#### 4・2・2 翼厚の影響

##### (1) 非対称翼型

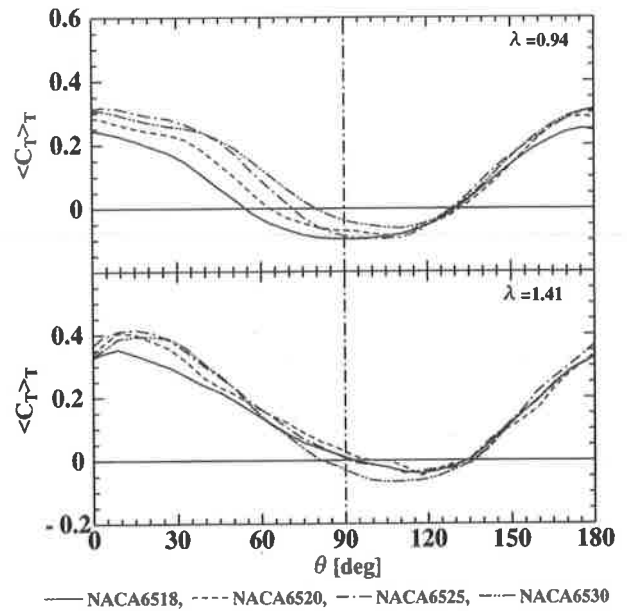
##### a. 二枚ブレード

図 4.7(a)に翼厚の異なる四種類の非対称翼型を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。代表として  $\lambda = 0.94 < 1$  と  $\lambda = 1.41 > 1$  について示す。まず  $\lambda = 0.94$  においては、基準ブレードが  $\theta = 0^\circ$  あるいは  $180^\circ$  付近、つまり一方のブレードが上流側にあるとき  $\langle C_T \rangle_T$  をとる。これらは翼厚が厚いほど大きい傾向があり、NACA6525 と NACA6530 では同程度の値をとっている。また  $0^\circ \leq \theta \leq 120^\circ$  において翼厚が厚いほど  $\langle C_T \rangle_T$  が大きい領域が比較的広い範囲で存在している。一方、翼厚によらず  $90^\circ \leq \theta \leq 110^\circ$  で  $\langle C_T \rangle_T$  をとり、NACA6530 で最も大きく、他は同程度の値をとっている。これらは  $\lambda < 1$  で翼厚が厚いほど  $C_T$  が大きいことと対応している。

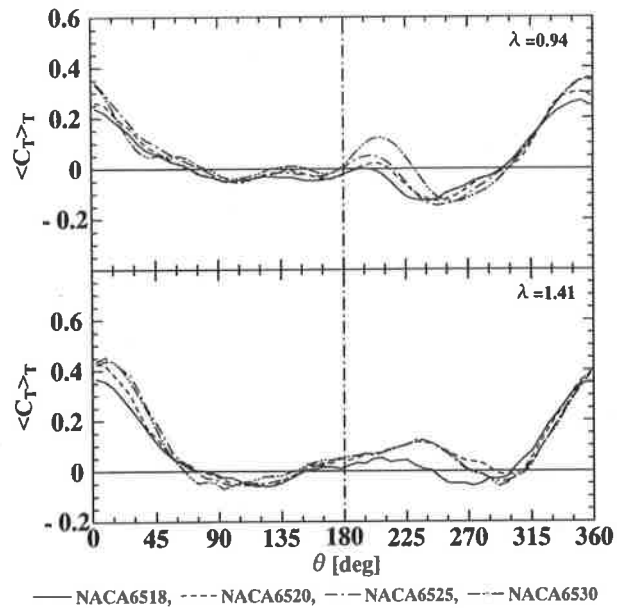
次に  $\lambda = 1.41$  においては、 $\lambda = 0.94$  と比べると翼厚によるトルク波形の差異は小さくなっている。このことは  $C_T$  の翼厚による差異が  $\lambda = 0.94$  に比べ  $\lambda = 1.41$  で小さくなっていることと対応する。詳しく見ると、基準ブレードが上流側の  $10^\circ \leq \theta \leq 15^\circ$  で  $\langle C_T \rangle_T$  をとり、NACA6518 で最も小さく、他は同程度である。また翼型によらず  $105^\circ \leq \theta \leq 120^\circ$  で  $\langle C_T \rangle_T$  をとり、それと  $70^\circ \leq \theta \leq 130^\circ$  における  $\langle C_T \rangle_T$  は NACA6530 で最も小さい。

##### b. 一枚ブレード

図 4.7(b)に上記で用いた翼厚の異なる四種類の非対称翼



(a) 二枚ブレード



(b) 一枚ブレード

図 4.7 トルク変動に及ぼす翼厚の影響 (非対称翼型)

型をもつブレードを一枚だけ取り付け付けた風車のアジマス角  $\theta$  に対するトルク変動を示す。  $\lambda = 0.94$  においては、上流側の  $350^\circ \leq \theta \leq 355^\circ$  で  $\langle C_T \rangle_T$  をとり、翼厚が厚いほど  $\langle C_T \rangle_T$  は大きい傾向があり、NACA6525 と NACA6530 では同程度である。また  $\theta > 180^\circ$  でトルクが上昇し、 $195^\circ \leq \theta \leq 210^\circ$  で極大値をとっている。その極大値は翼厚が厚いほど大きく、特に NACA6530 で著しく大きい。このことは翼厚が厚いほど下流側の  $\theta > 180^\circ$  でトルクが増加することを示す。一方、翼厚によらず  $240^\circ \leq \theta \leq 260^\circ$  で  $\langle C_T \rangle_T$  をとるが、それらはほぼ同程度である。ところで二枚ブレード風車において、基準ブレードが上流側でとる  $\langle C_T \rangle_T$  および  $0^\circ \leq \theta \leq 120^\circ$  の比較的広い範囲での  $\langle C_T \rangle_T$  は翼厚が厚いほど大きいのは、一枚ブレード風車において上流側でとる  $\langle C_T \rangle_T$  および  $\theta > 180^\circ$  における  $\langle C_T \rangle_T$  の極大値が翼厚の厚いほど大きいことによるものと考えられる。これは特に  $\lambda < 1$  において翼厚が厚いほど  $C_T$

が大きいことに寄与する。

次に  $\lambda=1.41$  においては、 $0^\circ \leq \theta \leq 10^\circ$  で  $\langle C_T \rangle_T$  の最大値  $\langle C_T \rangle_{T, \max}$  をとり、NACA6518 で最も小さく、他は同程度である。  $\theta < 180^\circ$  と  $\theta > 180^\circ$  でとる  $\langle C_T \rangle_T$  の極小値は翼厚によらず同程度であるが、 $165^\circ < \theta < 285^\circ$  において NACA6518 のトルクが著しく小さくなっている。このことは二枚ブレード風車において基準ブレードが  $0^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$  (もう一方のブレードが  $180^\circ \leq \theta \leq 240^\circ$ ) で NACA6518 のトルクが小さくなっていることに寄与していると考えられる。

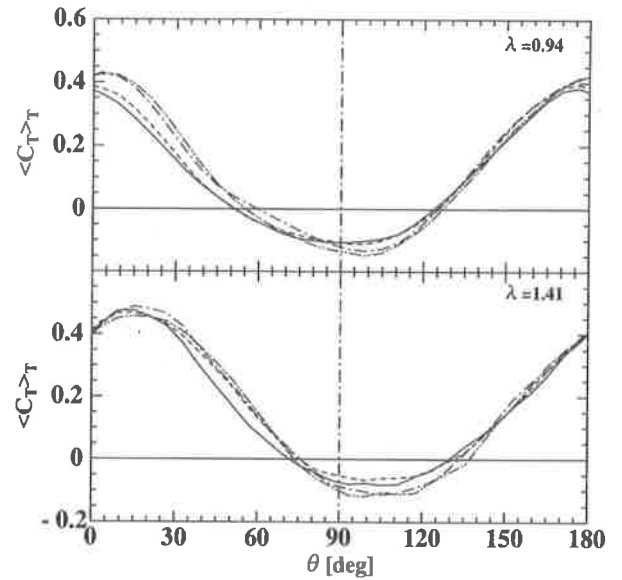
ここでトルク波形へ及ぼす翼厚の影響に関して、代表として  $\lambda=0.94$  について考察する。まずブレードが上流側でとる  $\langle C_T \rangle_{T, \max}$  は翼厚が厚いほど大きいことについて考える。上述したように、この位相では揚力の回転への寄与が大きく、翼型の吸引側の面が回転軸側の面である<sup>(4)</sup>。このとき翼型は負の迎角をとるが、翼厚が厚いほど負の迎角が大きい範囲までは離が抑制されるため、最小揚力  $< 0$  の絶対値は大きくなり、 $\langle C_T \rangle_{T, \max}$  が大きくなるものと推測される。次に  $\langle C_T \rangle_T$  が  $195^\circ \leq \theta \leq 210^\circ$  でとる  $\langle C_T \rangle_T$  の極大値は翼厚が厚いほど大きいことについて、この位相では翼型の吸引側の面は回転軸と反対側の面である<sup>(4)</sup>、翼型は正の迎角をとるが、翼厚が厚いほど最大揚力係数は大きくなるためトルクの極大値が大きくなるものと推測される。

## (2) 対称翼型

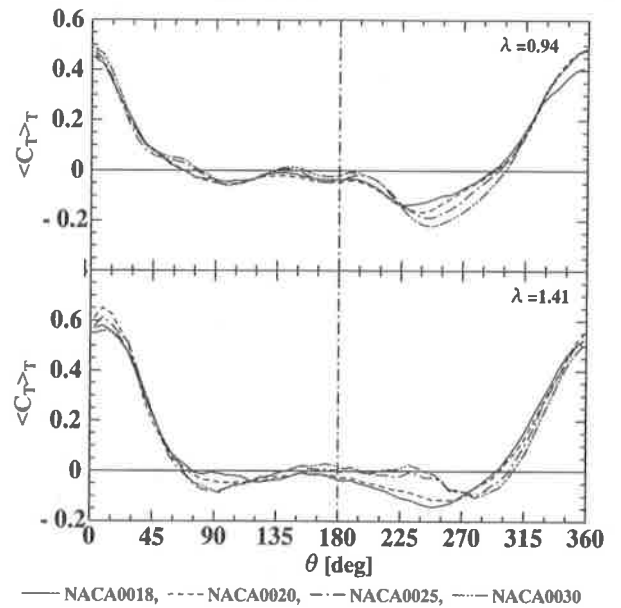
### a. 二枚ブレード

図 4.8(a)に翼厚の異なる四種類の対称翼型を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。代表として  $\lambda=0.94 < 1$  と  $\lambda=1.41 > 1$  について示す。まず  $\lambda=0.94$  においては、基準ブレードが  $\theta=180^\circ$  (NACA0018, 0020), あるいは  $\theta=0^\circ$  付近 (NACA0025, 0030) のどちらか一方のブレードが上流側にあるとき  $\langle C_T \rangle_{T, \max}$  をとる。これらは翼厚の厚い方が大きい傾向があり、NACA0025 と NACA0030 は同程度である。また  $85^\circ \leq \theta \leq 130^\circ$  における  $\langle C_T \rangle_T$  および  $90^\circ \leq \theta \leq 100^\circ$  でとる  $\langle C_T \rangle_{T, \min}$  は翼厚が厚いほど小さいが、その差異は  $\langle C_T \rangle_{T, \max}$  ほど大きくない。NACA0025 と NACA0030 のトルク波形は比較的類似しているが、詳細に見ると  $45^\circ \leq \theta \leq 165^\circ$  の広範囲にわたって全体的に NACA0025 の方が  $\langle C_T \rangle_T$  は若干大きい。以上のことは  $\lambda=0.94$  のとき NACA0025 で  $C_T$  が最も大きくなることを説明する。ところで対称翼型のトルク波形は非対称翼型ほど翼厚による差異は顕著には現れていない。

次に  $\lambda=1.41$  においては、翼厚によらず基準ブレードが上流側の  $\theta=15^\circ$  付近で  $\langle C_T \rangle_{T, \max}$  をとり、それらの翼厚による差異は大きくないが、詳しく見ると NACA0025 で最も大きく、NACA0030 で最も小さい。また翼厚によらず  $95^\circ \leq \theta \leq 105^\circ$  で  $\langle C_T \rangle_{T, \min}$  をとり、翼厚の厚い NACA0025 および NACA0030 で  $\langle C_T \rangle_{T, \min}$  は小さくなっている。  $\lambda=0.94$  と比べると翼厚によるトルク波形の差異は小さくなっており、このことは  $C_T$  の翼厚による差異が  $\lambda=0.94$  に比べて  $\lambda=1.41$  で小さくなっていることと対応する。ところで  $C_T$  において NACA0018 と NACA0030 が他と比べて小さいのは、NACA0018 については  $30^\circ \leq \theta \leq 70^\circ$  で他と比べて  $\langle C_T \rangle_T$  が小さいこと、NACA0030 については  $\langle C_T \rangle_{T, \max}$  が最も小さく、 $75^\circ \leq \theta \leq 145^\circ$  で他と比べて  $\langle C_T \rangle_T$  が小さいこ



(a) 二枚ブレード



(b) 一枚ブレード

図 4.8 トルク変動に及ぼす翼厚の影響 (対称翼型)

とが寄与しているものと考えられる。

### b. 一枚ブレード

図 4.8(b)に上記で用いた翼厚の異なる四種類の対称翼型をもつブレードを一枚だけ取り付け付けた風車のアジマス角  $\theta$  に対するトルク変動を示す。  $\lambda=0.94$  において、翼厚によらず  $\theta=0^\circ$  付近で  $\langle C_T \rangle_{T, \max}$  をとり、それは NACA0018 で最も小さく、他は同程度である。また  $\theta > 195^\circ$  で著しくトルク低下しており、 $225^\circ \leq \theta \leq 315^\circ$  における  $\langle C_T \rangle_T$  および  $225^\circ \leq \theta \leq 250^\circ$  でとる極小値は翼厚が厚いほど小さい。このことは二枚ブレード風車において基準ブレードが  $85^\circ \leq \theta \leq 130^\circ$  (もう一方のブレードが  $265^\circ \leq \theta \leq 310^\circ$ ) で翼厚の厚い方が  $\langle C_T \rangle_T$  が小さくなっていることと定性的に対応する。

ところで二枚ブレード風車において上流側で  $\langle C_T \rangle_{T, \max}$  をとり、NACA0025 と NACA0030 が同程度で大きいことは、

一枚ブレード風車の上流側でとる  $\langle C_T \rangle_T$  は NACA0018 を除いて同程度であるが、 $180^\circ \leq \theta \leq 225^\circ$  で NACA0025 および NACA0030 のトルクが若干大きくなっていることと定性的に対応する。また二枚ブレード風車において  $45^\circ \leq \theta \leq 165^\circ$  において全体的に NACA0030 より NACA0025 の方が  $\langle C_T \rangle_T$  が大きいことは、一枚ブレード風車において  $225^\circ \leq \theta \leq 315^\circ$  での  $\langle C_T \rangle_T$  が NACA0030 より NACA0025 で大きいことが寄与しているためと考えられる。

次に  $\lambda=1.41$  においては、 $10^\circ \leq \theta \leq 15^\circ$  で  $\langle C_T \rangle_T$  をとり、その値は NACA0020 で最も大きく、NACA0030 で最も小さい。このことは二枚ブレード風車において NACA0030 の  $\langle C_T \rangle_T$  が最も小さいことに寄与していると考えられる。また  $165^\circ \leq \theta \leq 270^\circ$  においては翼厚が薄いほどトルクが小さく、特に NACA0018 の  $210^\circ \leq \theta \leq 250^\circ$  のトルク低下は、二枚ブレード風車において  $30^\circ \leq \theta \leq 70^\circ$  で NACA0018 の  $\langle C_T \rangle_T$  が他と比べて小さいことに寄与していると考えられる。

ところで低周速比  $\lambda < 1$  における  $C_T$  の翼厚による差異について、対称翼型は非対称翼型ほど大きくない。これは  $\lambda < 1$  でのトルク波形へ及ぼす翼厚の影響が対称翼型では非対称翼型ほど顕著ではないことから解釈できる。この翼厚のトルク波形への影響については、前述のように上流側ブレードの翼型の吸引側の面は回転軸側<sup>(4)</sup>であるが、対称翼の場合、翼厚が薄い場合においても吸引側に発生する揚力が比較的大きいため、翼厚の増加に対する揚力増加の寄与が小さく、逆に抗力増加の影響が寄与してくるためと推測される。

## 5. 結 言

小型直線翼垂直軸型風車におけるブレードの翼型の反り量および翼厚が風車の平均トルク・出力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査した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1)  $\lambda < 1$  の比較的 low 周速比においては反り量が小さいほど、また非対称翼型において翼厚が厚いほど平均トルクが大きく、効率が良い。
- (2) 対称翼型においては非対称翼型ほど低周速比での翼厚増加に対する  $C_T$  の増加傾向は顕著ではない。
- (3)  $(C_T)_{\max}$  および  $(C_P)_{\max}$  は翼厚に対して最大値をもつ。
- (4) 反り量の影響に関しては、上流側ブレードの  $\langle C_T \rangle_T$  が  $C_T$  に影響を与え、反り量が小さいほど  $\langle C_T \rangle_T$  は大きい。その傾向は低周速比において顕著である。また、周速比が大きくなると  $\theta > 180^\circ$  にあるブレードの  $\langle C_T \rangle_T$  の  $C_T$  への影響も現れ、特に対称翼型において  $C_T$  低下の原因となる。
- (5) 非対称翼型の翼厚の影響に関しては、 $\lambda < 1$  の比較的 low 周速比において、上流側ブレードの  $\langle C_T \rangle_T$  に加え、 $\theta > 180^\circ$  にあるブレードの  $\langle C_T \rangle_T$  の極大値も  $C_T$  に影響を与え、それらは翼厚が厚いほど大きい傾向がある。
- (6) 対称翼型のトルク波形へ及ぼす翼厚の影響は、非対称翼型ほど顕著には現れない。

## 参考文献

- 1) 牛山泉 著, 風車工学入門, 森北出版, p55(2002).
- 2) B. Kirke and L. Lazauskas, "Variable pitch darrieus water turbines" *Journal of Fluid Science and Technology*, 3, No.3, pp.430-438(2008).
- 3) 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).
- 4) 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).
- 5) 西山哲男 著, 翼型学, 日刊工業新聞社, pp.22-23 (1992).