

小型直線翼垂直軸型風車の性能へ及ぼす翼端板の効果

山田誠治*・田村智弘*²・望月信介*³

Effects of End Plates on Performance of
a Small Straight-Bladed Vertical Axis Wind Turbine
Seiji Yamada*, Tomohiro Tamura* and Shinsuke Mochizuki*²

The mean characteristics and the torque variation characteristics of the straight-blade vertical axis wind turbine attached with various end plates were examined by wind tunnel experiments, and they were associated for the effect of the wing tip shape on the performance of the wind turbine. In the low tip speed ratio region the mean torque coefficient and the mean power coefficient are reduced by attaching wing end plates. In the high tip speed ratio region the mean torque coefficient and the mean power coefficient are increased by attaching wing end plates except wing tip plates attached horizontally toward the opposite side of the rotating axis. In low tip speed ratio region, it is contributes to the mean torque coefficient of the wind turbine without wing end plates being largest that the phase averaged torque coefficient of the wind turbine without wing end plates in the region which the blade moves from the most upstream toward the downstream side is largest. In the high tip speed ratio, it is contributes to the mean torque coefficient region becoming larger by attaching wing end plates that the maximum phase averaged torque coefficient to take near the most upstream increases by attaching wing end plates, and the phase averaged torque coefficient is larger in a relatively wide region of around two of the minimum value of the phase averaged torque coefficient to take two of the azimuth angle which is located upstream and downstream of the boundary.

1. 緒 言

再生可能エネルギー利用への期待が高まる中、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⁾、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³⁾から、今後有望な風車の一つとなると考えられる。この風車の平均特性（トルク・出力特性）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仕様によって大きく影響を受けるため、これまで多数の研究がなされてきている（例えば3)）。三次元翼においては、翼端で生成される翼端渦が翼性能へ大きな影響を及ぼす⁴⁾ため、翼端形状は特に重要な仕様の一つである。このことに関しては、異なる翼端形状について、翼端渦の発達やその強さについて調査したもの⁵⁾や垂直軸型風車の翼端形状の風車性能に及ぼす影響について平均特性を調査したものがある⁶⁾。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^{7,8)}。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）に影響を及ぼすため⁸⁾、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は重要な課題の一つである。

そこで本研究では、翼端形状が直線翼垂直軸型風車の性能に及ぼす影響について調べるために、種々の翼端板を取り付けた直線翼垂直軸型風車の平均特性およびトルク変動特性を風洞実験により調査し、それらを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。

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

ここで T_w は風からブレードが受ける力による回転トルク（風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下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り、 $T_w = T_a$ となる。しかし、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回転トルク 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. 実験装置および方法

図3.1に実験装置概要および座標系を示す。 U_0 は風速[m/s]、 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、風車は風洞ノズル出口直後の開放空間に設置されている。したがって、風洞断面における風車の閉塞効果は

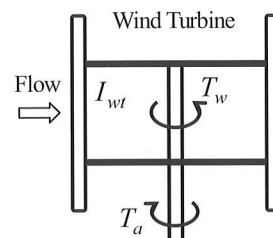


図 2.1 風車の力学モデル

* 経営管理部経営企画グループ

*² 企業支援部設計制御グループ

*³ 山口大学大学院創成科学研究科

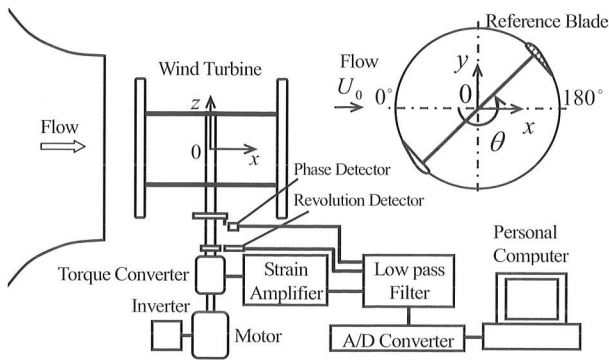


図 3.1 実験装置概要および座標系

考慮する必要はない。一方、速度の非一様性の影響が想定されるが、設置位置における風速分布測定から、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十分に入っており、風車は一樣流中にあることを確認している。なお、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する。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 $0[\text{deg}]$ 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 $\langle T_w \rangle_t$ 、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、これらは、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 $\langle T_w \rangle_t$ 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 $\bar{F}(t)$ および位相平均 $\langle F(t) \rangle_t$ を次のように定義する。

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

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

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 ρ は空気密度 [kg/m^3]、 A は受風面積 [m^2]、 r は風車回転半径 [m] である。

供試風車は回転半径 $r=0.3015\text{m}$ 、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 $\sigma = Nc/(2\pi r) = 0.16$, $N=2$ ）。 r は翼型前縁と風車回転中心の距離である。ブレードの取付角 β は、前縁を通る風車回転円周の接線と翼弦線のなす角とし、それは、最大出力係数が最も大きくなる角度に設定した。本実験においては $\beta=14.18^\circ$ である。ブレードはその両翼端から c の位置で風車回転軸に接続するアームにより支持されている。供試ブレードの翼型は NACA0020 で、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。翼端板の影響を調べるために厚み 1.0mm、半径 $c/2$ の半円形の翼端板をブレードの両翼端に角度を変えて取り付け付けた。翼端板のブレードへの取り付け状態を図 3.2 に示す。翼端板の取付角 γ はブレード幅方向を基準に風車回転軸と反対側を $\gamma > 0$ とし、 $\gamma = \pm 45^\circ$, $\pm 90^\circ$ とした。これらと翼端板なしをあわせて計 5 条件について調べた。また実験は $U_0=6\text{m/s}$ の条件で行われた。このときのレイノルズ数は $\text{Re} = 2rU_0/\nu = 2.4 \times 10^5$ である。また、他のレイノルズ数について、周速比 $\lambda (= r\bar{\omega}/U_0) = 1.34$ のとき、 $\text{Re}_c = Wc/\nu = 2.0 \times 10^4 \sim 1.4 \times 10^5$ である。ここで、 W は相対速度、 ν は空気動粘性係数である。

4. 実験結果および考察

4・1 平均特性

図 4.1 に取付角の異なる四種類の翼端板と翼端板なしの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。 C_T は $\lambda < 0.87$ の低周速比領域で翼端板なしが最も大きく、翼端板を取り付けることによって C_T が低下している。 $\lambda > 1.18$ の高周速比側では、 $\gamma = +90^\circ$ を除いて翼端板を取り付けることによって C_T は大きくなっている。全ての条件において $\lambda \geq 1.34$ で C_T は最大値 $(C_T)_{\max}$ をとり、 $\gamma = -90^\circ$ のとき $(C_T)_{\max} = 0.13$ で最も大きく、 $\gamma = -45^\circ$ と $\gamma = +45^\circ$ 、および翼端板なしと $\gamma = +90^\circ$ は同程度である。詳しく見ると、 $\gamma = -90^\circ$ 、 $\gamma = -45^\circ$ 、 $\gamma = +45^\circ$ 、翼端板なし、 $\gamma = +90^\circ$ の順に大きい。なお、 $\gamma = -45^\circ$ と $\gamma = +45^\circ$ の C_T は λ の全域にわたって比較的類

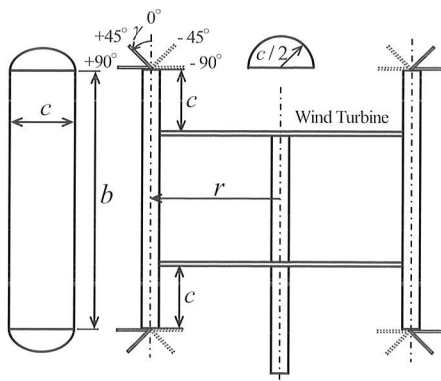


図 3.2 ブレードに取り付けられた翼端板

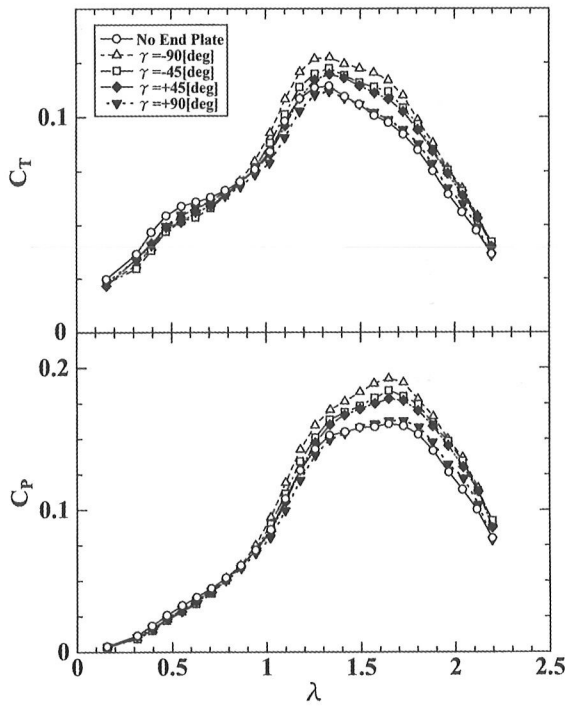


図 4.1 平均トルク・出力特性に及ぼす翼端板の効果

の傾向を示している。 $(C_T)_{\max}$ をとる λ より大きい領域では、翼端板なしと $\gamma = +90^\circ$ の C_T の変化傾向は類似している。

C_P については平均トルク特性を反映して $\lambda < 0.87$ の低周速比領域において翼端板なしが最も大きく、翼端板を取り付けることによって C_P は低下している。 $\lambda > 1.18$ の高周速比側では $\gamma = +90^\circ$ を除いて翼端板を取り付けることによって C_P は大きくなっている。全ての条件において $\lambda \approx 1.65$ で C_P は最大値 $(C_P)_{\max}$ をとり、 $\gamma = -90^\circ$ のとき $(C_P)_{\max} = 0.19$ で最も大きく、翼端板なしと $\gamma = +90^\circ$ の $(C_P)_{\max}$ は同程度である。詳しく見ると、 $\gamma = -90^\circ$ 、 $\gamma = -45^\circ$ 、 $\gamma = +45^\circ$ 、 $\gamma = +90^\circ$ 、翼端板なしの順に大きい。なお、 $\gamma = -45^\circ$ と $\gamma = +45^\circ$ 、および翼端板なしと $\gamma = +90^\circ$ の C_P は λ の全域にわたって比較的類似の傾向を示す。

以上より、 $\lambda < 0.87$ の低周速比領域では翼端板を取り付けることにより C_T および C_P は低下する。一方、 $\lambda > 1.18$ の高周速比側では $\gamma = +90^\circ$ を除いて翼端板を取り付けることにより C_T および C_P は大きくなり、 $(C_T)_{\max}$ および $(C_P)_{\max}$ は $\gamma = -90^\circ$ で最も大きい。

4・2 トルク変動特性

4・2・1 二枚ブレードにおける変動特性

図 4.2(a)および(b)に取付角の異なる四種類の翼端板と翼端板なしのブレードを二枚取り付けした風車のアジマス角 θ に対するトルク変動を示す。二枚のブレードは 180° 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。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。また、図 4.3(a)および(b)にそれら五種類の二枚ブレード風車における最大および最小位相平均トルク係数を示す。代表として低周速比領域の $\lambda = 0.63$ と C_T が最大となる $\lambda = 1.34$ について示す。 $\lambda = 0.63$ について、 $\gamma < 0$ では全ての条件において基準ブレードが $\theta = 161^\circ \sim 167^\circ$ 、もう一方

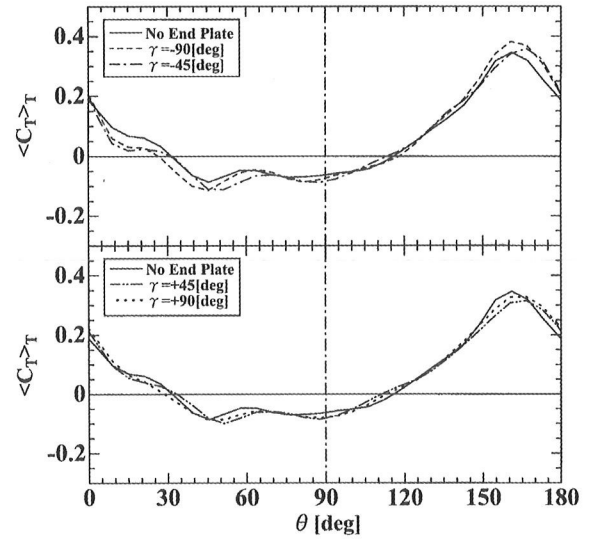
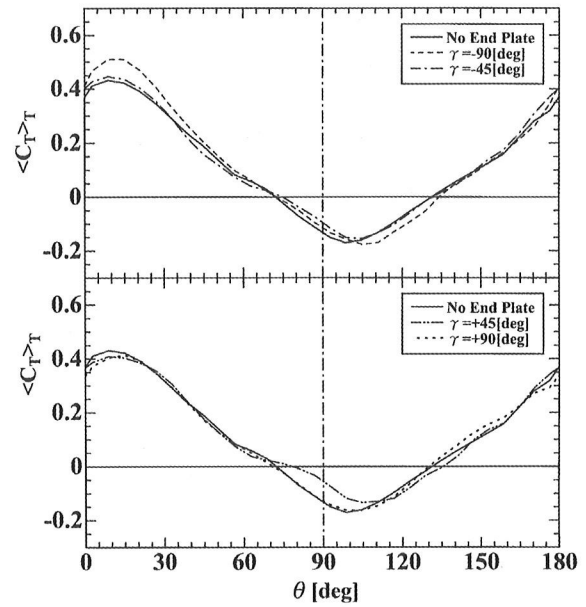
(a) $\lambda = 0.63$ (b) $\lambda = 1.34$

図 4.2 トルク変動へ及ぼす翼端板の影響（二枚ブレード）

のブレードが最上流（ $\theta = 0^\circ$ ）近くの $\theta = 341^\circ \sim 347^\circ$ で $\langle C_T \rangle_T$ は最大値 $(\langle C_T \rangle_T)_{\max}$ をとり、それは翼端板を取り付けることによって増加し、 $\gamma = -90^\circ$ で最も大きい。また $\theta = 45^\circ \sim 51^\circ$ で $\langle C_T \rangle_T$ は最小値 $(\langle C_T \rangle_T)_{\min}$ をとり、翼端板なしで最も大きく、 $0^\circ < \theta \leq 100^\circ$ の大半の領域において翼端板なしの $\langle C_T \rangle_T$ は他と比べて大きい。このことが低周速比領域において翼端板なしの C_T が最も大きくなることに寄与する。 $\gamma > 0$ について、全ての条件において基準ブレードが $\theta = 161^\circ \sim 167^\circ$ 、もう一方のブレードが最上流近くの $\theta = 341^\circ \sim 347^\circ$ で $(\langle C_T \rangle_T)_{\max}$ をとり、それは翼端板を取り付けることによって低下し、 $\gamma = +45^\circ$ で最も小さい。また、 $45^\circ \leq \theta < 100^\circ$ および $150^\circ \leq \theta \leq 165^\circ$ の大半の領域において $\langle C_T \rangle_T$ は翼端板なしで最も大きい。一方、 $\theta = 45^\circ \sim 51^\circ$ で $(\langle C_T \rangle_T)_{\min}$ をとり、それは $\gamma = +45^\circ$ で最も小さく、他の二つは同程度であるが、それらの差異は $(\langle C_T \rangle_T)_{\max}$ と比べて小さい。一方のブレードが最上流近くでとる $(\langle C_T \rangle_T)_{\max}$ と $45^\circ \leq \theta < 100^\circ$ および $150^\circ \leq \theta \leq 165^\circ$ の大半の領域における

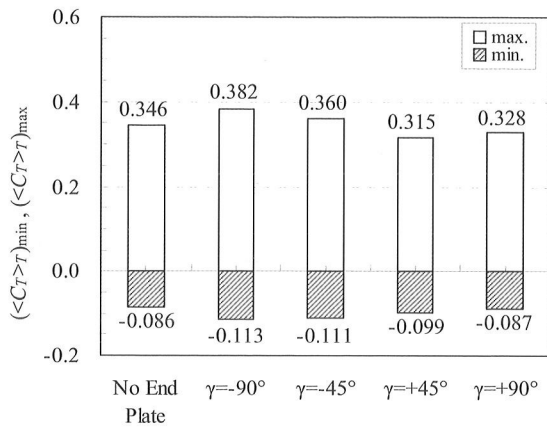
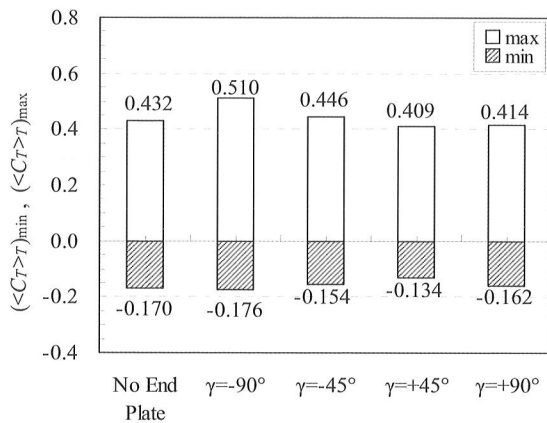
(a) $\lambda = 0.63$ (b) $\lambda = 1.34$

図 4.3 最大および最小位相平均トルク係数 (二枚ブレード)

$\langle C_T \rangle_T$ が翼端板なしで最も大きいことが翼端板なしの C_T が最も大きくなることに寄与する。

次に $\lambda = 1.34$ について, $\gamma < 0$ では全ての条件で基準ブレードが最上流近くの $\theta \cong 9^\circ$ で $\langle C_T \rangle_T$ をとり, それは翼端板を取り付けることによって増加し, $\gamma = -90^\circ$ で著しく大きい. また, $0^\circ \leq \theta < 65^\circ$ の $\langle C_T \rangle_T$ まわりの広範囲にわたって $\gamma = -90^\circ$ の $\langle C_T \rangle_T$ が大きくなっている. 一方, $\theta = 99^\circ \sim 105^\circ$ で $\langle C_T \rangle_T$ をとり, $\gamma = -45^\circ$ で最も大きく, $\gamma = -90^\circ$ で最も小さい. それらの差異は $\langle C_T \rangle_T$ と比べて小さい. 以上より, 高周速比側において翼端板を取り付けることにより C_T および $(C_T)_{\max}$ が大きくなり, $(C_T)_{\max}$ は $\gamma = -90^\circ$ で最大となるのは, 基準ブレードが最上流近くの $\theta \cong 9^\circ$ でとる $\langle C_T \rangle_T$ の増加の寄与が大きい. $\gamma > 0$ について, $\gamma < 0$ と同様に全ての条件で基準ブレードが最上流近くの $\theta = 9^\circ \sim 15^\circ$ で $\langle C_T \rangle_T$ をとるが, それらの差異は $\gamma < 0$ と比べて小さい. 詳しく見ると, 翼端板なしにおいて最も大きい, また, $\theta = 99^\circ \sim 105^\circ$ でとる $\langle C_T \rangle_T$ は $\gamma = +45^\circ$ で顕著に大きく, 他の二つは同程度であり, $\gamma = +45^\circ$ の $\langle C_T \rangle_T$ は $70^\circ < \theta < 110^\circ$ の比較的広範囲で他と比べて著しく大きくなっている. このことが, 翼端板なしに対して $\gamma = +45^\circ$ の C_T が大きくなることに寄与する. 翼端板なしと $\gamma = +90^\circ$ のトルク変動の傾向は, 類似しているが, 翼端板なしに対して $\gamma = +90^\circ$ の C_T が若干小さいのは, $\langle C_T \rangle_T$ が $\gamma = +90^\circ$ において若干小さいことが寄与している.

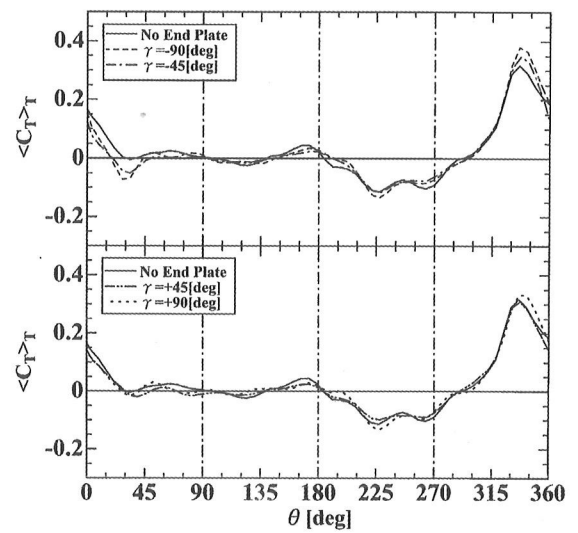
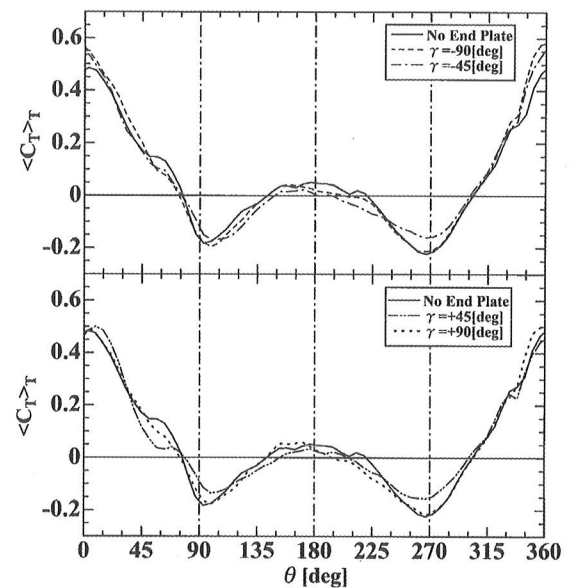
(a) $\lambda = 0.63$ (b) $\lambda = 1.34$

図 4.4 トルク変動へ及ぼす翼端板の影響 (一枚ブレード)

4・2・2 一枚ブレードにおける変動特性

図 4.4(a)および(b)に図 4.2 で用いたものと同じ五種類のブレードを一枚だけ取り付けた風車のアジマス角 θ に対するトルク変動を示す. また, 図 4.5(a)および(b)にそれらの五種類の一枚ブレード風車における最大および最小位相平均トルク係数を示す. 代表として, 二枚ブレードの場合と同様に $\lambda = 0.63$ および 1.34 の場合について示す. $\lambda = 0.63$ について, $\gamma < 0$ では全ての条件において最上流近くの $\theta = 336^\circ \sim 337^\circ$ で $\langle C_T \rangle_T$ をとり, それは翼端板を取り付けることによって増加し, $\gamma = -90^\circ$ で最も大きい. これらの傾向は, 二枚ブレード風車の $\langle C_T \rangle_T$ の傾向と対応している. ブレードが最上流から下流側に向かって移動する $0^\circ < \theta < 75^\circ$ の大半の領域で翼端板なしの $\langle C_T \rangle_T$ が大きい. これは二枚ブレード風車において $0^\circ < \theta \leq 100^\circ$ の大半の領域で翼端板なしの $\langle C_T \rangle_T$ が他と比べて大きいことに対応しており, このことが低周速比領域において翼端板なしの C_T が最も大きくなることに寄与している. ここで, 0°

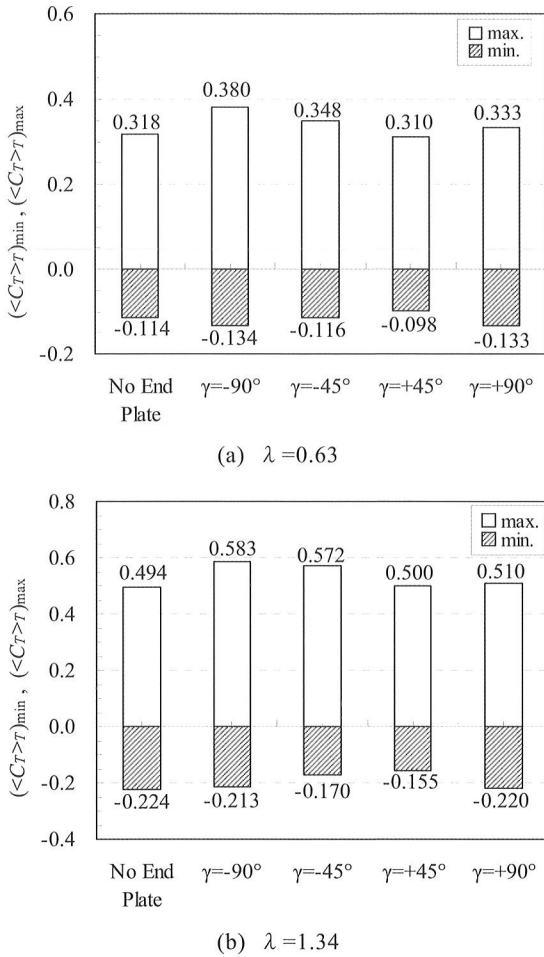


図 4.5 最大および最小位相平均トルク係数 (一枚ブレード)

$\theta < 75^\circ$ の大半の領域で翼端板なしの $\langle C_T \rangle_T$ が大きいことについて考察する. $\lambda < 1$ において, 風速が一樣に流入すると仮定すると, この領域ではブレードの相対風速に対する迎角 $\alpha < 0$ (回転軸側が負圧面となる) は $\alpha > -90^\circ$ から $\alpha < -90^\circ$ に単調に減少する. $\alpha > -90^\circ$ では, 揚力は風車の回転方向のトルクに, 抗力は反対方向のトルクに寄与する. また, $\alpha < -90^\circ$ では, 揚力は回転と反対方向のトルクに, 抗力は回転方向のトルクに寄与する. ところで, この領域では, 翼端板なしの三次元翼の翼端には大規模な渦が生成される⁹⁾ため, その渦の低圧領域が, $\alpha > -90^\circ$ では揚力として, $\alpha < -90^\circ$ では抗力として回転方向トルクに寄与する. 翼端板を取り付けると, この渦の生成が抑制されるため, 翼端板なしにおいて $\langle C_T \rangle_T$ が大きくなると考えられる. $\theta = 227^\circ \sim 228^\circ$ で $\langle C_T \rangle_T$ の最小値 $\langle C_T \rangle_{T, \min}$ をとり, $\gamma = -90^\circ$ で最も小さく, 他の二つは同程度であるが, これらの差異は $\langle C_T \rangle_{T, \max}$ と比べて小さい. すべての条件において, $\theta = 170^\circ$ 付近で $\langle C_T \rangle_T$ は極大値をとり, 翼端板なしで最も大きく, $\gamma = -45^\circ$ で最も小さい. また, 全ての条件において $\theta = 30^\circ$ 付近で極小値をとっており, その極小値は翼端板なしが著しく大きく, $\gamma = -90^\circ$ で最も小さい. $\gamma > 0$ では, 全ての条件において最上流近くの $\theta = 336^\circ \sim 337^\circ$ で $\langle C_T \rangle_{T, \max}$ をとり, $\gamma = +90^\circ$ で最も大きく, $\gamma = +45^\circ$ で最も小さい. それらの差異は $\gamma < 0$ と比べて小さい. 全ての条件において $\theta = 170^\circ$ 付近で $\langle C_T \rangle_T$ は極大値をとり, それは翼端板なしで最も大きい.

このことは, 二枚ブレード風車において, 一方のブレードが $\theta = 170^\circ$ 付近にあるとき, もう一方のブレードは $\theta = 350^\circ$ 付近にあることから, 二枚ブレード風車において最上流近くでとる $\langle C_T \rangle_{T, \max}$ が翼端板なしで最も大きくなることに寄与する. また, $57^\circ \leq \theta \leq 105^\circ$ の大半の領域および $150^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ において $\langle C_T \rangle_T$ は翼端板なしで最も大きく, 他は同程度であり, これらは二枚ブレード風車において $45^\circ \leq \theta < 100^\circ$ の大半の領域および $150^\circ \leq \theta \leq 165^\circ$ で翼端板なしの $\langle C_T \rangle_T$ が最も大きいことに対応する. $\theta = 227^\circ \sim 228^\circ$ で $\langle C_T \rangle_{T, \min}$ をとり, $\gamma = +90^\circ$ で最も小さく, $\gamma = +45^\circ$ で最も大きい. $\theta = 30^\circ \sim 40^\circ$ で $\langle C_T \rangle_T$ は極小値をとっており, $\gamma = +45^\circ$ で最も小さく, 他の二つは同程度である. それらの差異は $\gamma < 0$ の場合に $\theta = 30^\circ$ 付近でとる $\langle C_T \rangle_T$ の極小値の差異と比べて小さい. この極小値の傾向は, 二枚ブレード風車において, $\theta = 45^\circ \sim 51^\circ$ でとる $\langle C_T \rangle_{T, \min}$ が $\gamma = +45^\circ$ で最も小さく, 他の二つは同程度であることに対応する.

次に $\lambda = 1.34$ について, $\gamma < 0$ では, 全ての条件で最上流近くの $\theta \approx 2^\circ$ で $\langle C_T \rangle_{T, \max}$ をとり, それは翼端板を取り付けることによって増加し, $\gamma = -90^\circ$ で最も大きい. これらの傾向は二枚ブレード風車において, 最上流近くの $\theta \approx 9^\circ$ で $\langle C_T \rangle_{T, \max}$ をとり, $\langle C_T \rangle_{T, \max}$ は翼端板を取り付けることによって増加し, $\gamma = -90^\circ$ で顕著に大きいことに対応する. また, $\theta = 95^\circ$ と $\theta = 270^\circ$ 付近の二箇所 $\langle C_T \rangle_T$ は極小値をとり, いずれか一方が最小値 $\langle C_T \rangle_{T, \min}$ となる. $\theta = 95^\circ$ 近くの極小値は, $\gamma = -45^\circ$ で最も大きく, $\gamma = -90^\circ$ で最も小さいが, それらの差異は小さい. また, $\theta = 270^\circ$ 付近の極小値は, $\gamma = -45^\circ$ で著しく大きく, 他の二つは同程度である. これらのことは二枚ブレード風車において $\theta = 99^\circ \sim 105^\circ$ でとる $\langle C_T \rangle_{T, \min}$ が $\gamma = -45^\circ$ で最も大きく, $\gamma = -90^\circ$ で最も小さいことに対応している. $\gamma > 0$ について, 全ての条件で最上流近くの $\theta = 2^\circ \sim 9^\circ$ で $\langle C_T \rangle_{T, \max}$ をとり, それは翼端板を取り付けることにより若干大きくなるが, それらの差異は $\gamma < 0$ と比べて小さい. 詳しく見ると, $\gamma = +90^\circ$ の方がわずかに大きい. また, $\gamma < 0$ の場合と同様に, $\theta = 95^\circ$ と $\theta = 270^\circ$ 付近の二箇所 $\langle C_T \rangle_T$ は極小値をとり, いずれか一方が最小値 $\langle C_T \rangle_{T, \min}$ となる. これらの極小値は $\gamma = +45^\circ$ で最も大きく, 他の二つは同程度である. これら二つの極小値のまわりの領域において, $\theta = 90^\circ$ を挟んでブレードが上流側から下流側へ移動する $75^\circ < \theta < 112^\circ$, および $\theta = 270^\circ$ を挟んでブレードが下流側から上流側へ移動する $236^\circ < \theta < 315^\circ$ の比較的広範囲で $\gamma = +45^\circ$ の $\langle C_T \rangle_T$ が大きい. 二つの極小値に関するこれらのことは二枚ブレード風車において, 基準ブレードが $\theta = 99^\circ \sim 105^\circ$ (他方のブレードが, $\theta = 279^\circ \sim 285^\circ$) でとる $\langle C_T \rangle_{T, \min}$ が $\gamma = +45^\circ$ で顕著に大きく, 他の二つは同程度であること, 基準ブレードが $70^\circ < \theta < 110^\circ$ (他方のブレードが, $\theta = 250^\circ \sim 290^\circ$) の比較的広い範囲で $\gamma = +45^\circ$ の $\langle C_T \rangle_T$ が他と比べて著しく大きくなっていることに対応する.

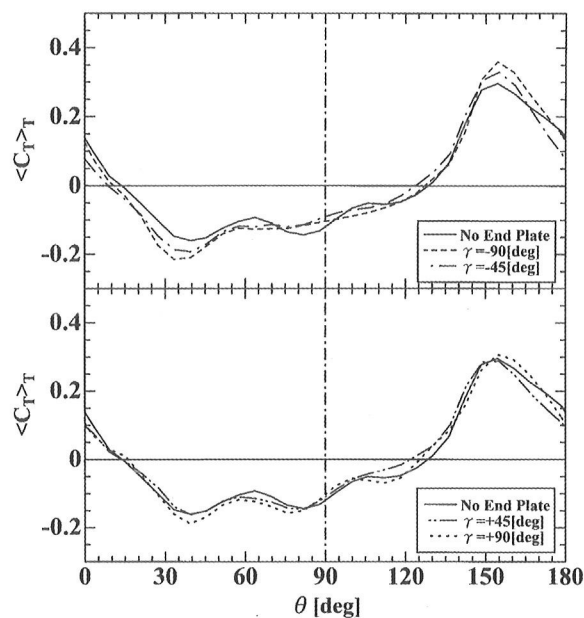
ここで, $\lambda = 1.34$ において, 最上流近くでとる $\langle C_T \rangle_{T, \max}$ および $\theta = 95^\circ$ あるいは $\theta = 270^\circ$ 付近でとる $\langle C_T \rangle_{T, \min}$ につい

て流れ場の観点から考察する. まず, $\langle C_T \rangle_T$ の最大値について考察する. 最上流近くから下流側へ向かう領域では負圧面(回転軸側の面)全体にわたって大規模な渦が生成され, 通過することによる動的失速現象が生じ, 大きな揚力が発生する¹⁰⁾. 一方, 三次元翼では翼端渦が発生する⁴⁾ため, 風車のブレードが動的失速状態にあるとき, この翼端渦は前述の大規模な渦に影響を与え, 揚力低下に寄与すると考えられる. したがって, 翼端板を取り付けることで翼端渦が抑制され, 揚力低下が低減されることで $\langle C_T \rangle_T$ が大きくなると考察される. なお, その程度は, 実験結果から, $\gamma = -90^\circ$, $\gamma = -45^\circ$, $\gamma = +90^\circ$, $\gamma = +45^\circ$ の順で大きい. 次に, $\theta = 95^\circ$ あるいは $\theta = 270^\circ$ 近くで $\langle C_T \rangle_T$ の最小値をとるが, これらの位相のまわりでは風車回転トルクに対して抗力の寄与が大きい. この領域では, 風が風車に一樣に流入すると仮定した場合, 相対風速に対する迎角は $\alpha = 0^\circ$ を挟んで正負に大きく変化するが, 抗力としては, ブレードの形状抗力および誘導抗力の影響が大きいと考えられ, 抗力の低減には $\gamma = \pm 90^\circ$ よりも $\gamma = \pm 45^\circ$ において効果が大いだと推測される.

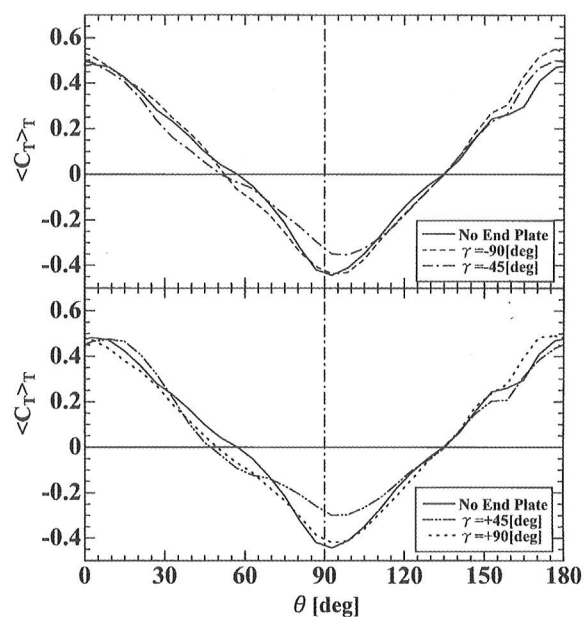
4・3 一枚ブレード風車トルク変動から算出した二枚ブレード風車トルク変動

一枚ブレード風車と二枚ブレード風車とではソリディティが異なるので直接比較することは難しいが, 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解釈することの妥当性について検討する. 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 4.6(a)および(b)にそれぞれ $\lambda = 0.63$ および $\lambda = 1.34$ における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. $\lambda = 0.63$ について見てみる. $\gamma < 0$ において, 基準ブレードが $\theta = 154^\circ \sim 155^\circ$, もう一方のブレードが最上流近くの $\theta = 334^\circ \sim 335^\circ$ で $\langle C_T \rangle_T$ の最大値をとる, それは翼端板を取り付けることによって増加し, $\gamma = -90^\circ$ で最も大きい. また, $\theta = 33^\circ \sim 40^\circ$ で $\langle C_T \rangle_T$ の最小値をとる, 翼端板なしで最も大きく, $0^\circ \leq \theta \leq 70^\circ$ の広範囲で翼端板なしの $\langle C_T \rangle_T$ は他の二つと比べて大きい. 以上の傾向は, 図 4.2(a)の上側に示す二枚ブレード風車のトルク変動の傾向と類似している. ただし, 位相および位相平均トルク係数の値は異なる. $\gamma > 0$ において, 全ての条件で, 基準ブレードが $\theta = 155^\circ$, もう一方のブレードが最上流近くの $\theta = 335^\circ$ で $\langle C_T \rangle_T$ の最大値をとる. $\langle C_T \rangle_T$ は翼端板の有無にかかわらず同程度である. $0^\circ \leq \theta \leq 8^\circ$, $55^\circ \leq \theta < 80^\circ$ および $172^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ において $\langle C_T \rangle_T$ は翼端板なしで最も大きい. また, $\theta = 39^\circ \sim 40^\circ$ で $\langle C_T \rangle_T$ の最小値をとる, $\gamma = +90^\circ$ で最も小さく, 他の二つは同程度である. 全ての条件において, いずれか一方のブレードが最上流近くで $\langle C_T \rangle_T$ の最大値をとること, $55^\circ \leq \theta < 80^\circ$ の範囲において $\langle C_T \rangle_T$ は翼端板なしで最も大きいこと, および $\theta = 39^\circ \sim 40^\circ$ で $\langle C_T \rangle_T$ の最小値をとるといふ傾向は, 位相および位相平均トルク係数の値は異なるものの, 図 4.2(a)の下側に示す二枚ブレード風車のトルク変動の傾向と類似している.

次に, $\lambda = 1.34$ について見てみる. $\gamma < 0$ において, 全



(a) $\lambda = 0.63$



(b) $\lambda = 1.34$

図4.6 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

の条件で, 基準ブレードが $\theta = 3^\circ \sim 9^\circ$, 177° のいずれか一方のブレードが最上流近くで $\langle C_T \rangle_T$ の最大値をとる, それは翼端板を取り付けることによって増加し, $\gamma = -90^\circ$ で最も大きい. $0^\circ \leq \theta < 48^\circ$, $135^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ の $\langle C_T \rangle_T$ の最大値まわりの大半の領域で $\gamma = -90^\circ$ の $\langle C_T \rangle_T$ が大きい. また, $\theta = 93^\circ \sim 99^\circ$ で $\langle C_T \rangle_T$ の最小値をとる, $\gamma = -45^\circ$ が最も大きく, 他の二つは同程度である. $67^\circ < \theta \leq 109^\circ$ の比較的広い範囲で $\gamma = -45^\circ$ の $\langle C_T \rangle_T$ は他の二つと比べて大きくなっている. 全ての条件で, いずれか一方のブレードが最上流近くで $\langle C_T \rangle_T$ の最大値をとる, それは翼端板を取り付けることによって増加し, $\gamma = -90^\circ$ で最も大きいこと, $0^\circ \leq \theta < 48^\circ$, $135^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ の $\langle C_T \rangle_T$ の最大値まわりの大半の領域で $\gamma = -90^\circ$ の $\langle C_T \rangle_T$ が大きいこと, および $\theta = 93^\circ \sim 99^\circ$ で $\langle C_T \rangle_T$ の最小値をと

るという傾向は、図 4.2(b)上側に示す二枚ブレード風車のトルク変動の傾向と類似している。ただし、位相および位相平均トルク係数の値は異なる。 $\gamma > 0$ では、全ての条件で、基準ブレードが $\theta = 3^\circ \sim 9^\circ$ 、 177° のいずれか一方のブレードが最上流近くで $\langle C_T \rangle_T$ の最大値をとるが、その条件による差異は小さい。また、 $\theta = 93^\circ$ で $\langle C_T \rangle_T$ の最小値をとり、 $\gamma = +45^\circ$ で顕著に大きく、他の二つは同程度である。 $70^\circ < \theta < 126^\circ$ の比較的広範囲で $\gamma = +45^\circ$ の $\langle C_T \rangle_T$ は他の二つと比べて著しく大きくなっている。翼端板なしと $\gamma = +90^\circ$ のトルク変動の傾向は比較的類似している。これらのトルク変動の傾向は、位相とその値は異なるものの、図 4.2(b)上側に示す二枚ブレード風車のトルク変動の傾向と類似している。

以上のことは、 $\lambda = 0.63$ および 1.34 とともに、一枚ブレード風車のトルク変動データから算出した二枚ブレード風車のトルク変動は、二枚ブレード風車のトルク変動と定性的に類似しており、一枚ブレード風車のトルク変動から二枚ブレード風車のトルク変動の傾向を解釈することが可能であることを示している。

5. 結 論

- (1) $\lambda < 0.87$ の低周速領域では翼端板を取り付けることにより C_T および C_p は低下する。
- (2) $\lambda > 1.18$ の高周速比側では $\gamma = +90^\circ$ を除いて翼端板を取り付けることにより C_T および C_p は大きくなり、 $(C_T)_{\max}$ および $(C_p)_{\max}$ は $\gamma = -90^\circ$ で最も大きい。
- (3) 低周速比領域で翼端板なしの C_T が最も大きくなるのは、ブレードが最上流から下流側へ向かって移動する $0^\circ < \theta < 75^\circ$ で、翼端板なしの $\langle C_T \rangle_T$ が大きくなる寄与する。
- (4) 高周速比側で $\gamma = +90^\circ$ を除いて翼端板を取り付けることにより C_T が大きくなるのは、 $\gamma < 0$ では、最上流付近でとる $\langle C_T \rangle_T$ の最大値が、 $\gamma > 0$ の $\gamma = +45^\circ$ については、 $\theta = 90^\circ$ および 270° 付近でとる $\langle C_T \rangle_T$ の二つの極小値まわりの比較的広い領域で $\langle C_T \rangle_T$ が大きくなっていることが寄与する。

本研究の風洞実験におきましては、学生研修生の西川直毅氏（当時、山口大院生）に多大なる協力を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

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，p. 195-197 (2002)。
- 3) 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，p. 325-328 (2009)。
- 4) 古屋義正 著，流体力学 I <基礎編>，共立出版，p. 113-121 (1973)。
- 5) Hofemann, C. et al., "3D stereo PIV study of tip vortex evolution on a VAWT", <https://www.researchgate.net/publication/27344062>, (2008)。
- 6) 西沢良史，他 3 名，垂直軸型風車の実験的研究，日本機械学会論文集，B, Vol. 75, No. 751, p. 550-552 (2009)。
- 7) Kirke, B. and Lazauskas, L., "Variable pitch darrieus water turbines" Journal of Fluid Science and Technology, 3, No. 3, p. 430-438 (2008)。
- 8) 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, p. 121-124 (2011)。
- 9) Ferreira, C., Kuik, G. and Bussel, G., "Wind turbine hotwire measurements, flow visualization and thrust measurement of a VAWT in skew, 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit 9-12 January, p. 4 (2006)。
- 10) 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，p. 115-116 (2007)。