

垂直軸風車用翼型の空気力学的研究

An Aerodynamic Study of the Airfoil
for Vertical Axis Wind Turbine

関 和 市* 大 谷 勇**

Kazuichi SEKI

Isamu OTANI

Abstract

The basic characteristics of the straight wing type vertical axis wind turbine are presented under some simplifying assumptions and a set of weighting functions is introduced in order to provide an explicit relationship between wind turbine efficiency and the aerodynamic characteristics of the airfoil. It is shown that pitching moment coefficient as well as minimum drag coefficient and lift coefficient has significant effect both on the starting capability and on the maximum efficiency of a wind turbine. Furthermore, a suggestion is made with regard to the design of the mean lines to attain a preferable characteristics for the airfoil of the vertical axis wind turbine.

Key Words: Wind Energy, Vertical Axis Wind Turbine, Airfoil, Weighting Function, Aerodynamic Characteristics, Airfoil Design

最適翼型として研究開発したTWT翼型について示す。

1. 緒言

風エネルギー利用技術の歴史は古く、多種多様な形態で利用されている。また、近年各方面で多くの研究発表が行われているが、そのほとんどがプロペラ型を主体とする水平軸風車(HAWT)である⁽¹⁾。一方ダリウス型に代表される垂直軸風車(VAWT)は、いくつかの優れた特徴から注目を集めているが、その空気力学的特性については研究の歴史も浅く、とくに翼型特性と風車性能との関係については線型理論によるパラメータスタディによるほかはなかった⁽²⁾。

VAWT(Vertical Axis Wind Turbine)では風車の回転に伴って翼が広い迎角範囲で作動し、低周速比においては ± 180 度、また高周速比では ± 10 度前後迎角の変化を受け、またこの間動圧も周期的に変動する。したがって翼型の空気力学的特性が風車性能に及ぼす影響は直感的に把握し難く、適正翼型の選択および開発の障害となっている。

本稿では、単純化した風車特性式から重み関数を定義し、それによって翼型特性と風車効率の関係を明示した。さらに適正翼型選択の指針を示し、垂直軸風車用

2. 主な記号

a	: 速度低減率
α	: 迎角(deg)
$\alpha_{\max}$	: 最大迎角(deg)
A	: 下面側の最大キャンバー
B	: 上面側の最大キャンバー
β	: 周速比
C	: 翼弦長(m)
C_D	: 抗力係数
C_L	: 揚力係数
$C_{m0/4}$	: 縦揺れ(ピッチング)モーメント係数
C_P	: 風車効率
C_T	: トルク係数
C_{Fx}	: 風車抗力係数
ϕ	: 風車回転角(deg)
ξ	: 縦横比($\xi = h/R$)
h	: ブレード長さ(m)
l	: 無次元翼弦長($l = C/R$)
m	: ブレード支持アーム数
n	: ブレード枚数
N	: 反転位置を与えるパラメータ

*, **, 東海大学産業科学研究所
(〒259-12 平塚市北金目1117)

- N_m : ミーンライン反転位置
 ω : 風車回転角速度(rad/sec)
 ψ : 流入角(deg)
 R : 風車回転半径(m)
 σ' : ソリディティ ($\sigma' = n l$)
 θ : ブレード取付角(deg)
 V : 局所流速 (風車内風速) (m/sec)
 V_R : 相対流入風速(m/sec)
 V_∞ : 一様流風速(m/sec)
 W_D : 抗力係数による重み関数
 W_L : 揚力係数による重み関数
 W_H : 縦揺れモーメント係数による重み関数
 Y_L : 下面側の翼型座標
 Y_m : ミーンライン
 Y_{mL} : 下面側のミーンライン
 Y_{mU} : 上面側のミーンライン
 Y_U : 上面側の翼型座標

3. 風車特性式

図1に示した直線翼垂直軸風車(SW-VAWT)について風車効率は次式で定義される。

$$\text{効率} = \frac{\text{風車軸出力}}{\text{単位時間にSwept-Areaを通過する風のエネルギー}} \quad (1)$$

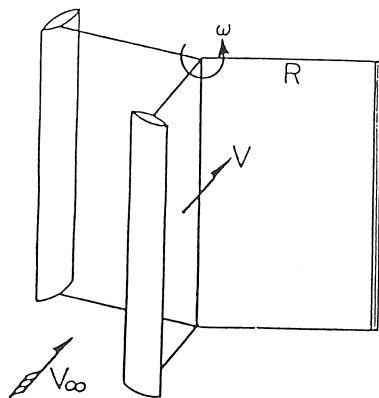


図1 Straight Blade VAWT

ここで、周速比 β および局所流速 (風車内風速) V に基づく周速比 β^* を以下で定義し、

$$\beta = \frac{\omega R}{V_\infty} \quad (2)$$

$$\beta^* = \frac{\beta}{1-a} \quad (3)$$

単一流管理論によって図2から効率を求めると、

$$C_p = \frac{n l}{4 \pi} (1-a)^2 \beta \int_0^{2\pi} (1-2\beta^* \sin \phi + \beta^{*2}) (C_L \sin \psi - C_D \cos \psi - C_n l) d\phi \quad (4)$$

となる。

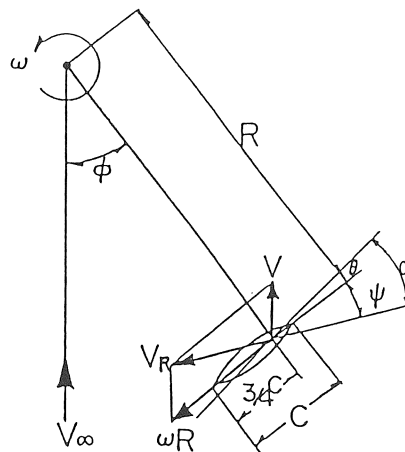


図2 Symbols

局所流速に基づく周速比 β^* と流入角 ψ との関係は図2から次式に示す関係にある。

$$\left. \begin{aligned} \psi &= \tan^{-1} \left(\frac{\cos \phi}{\sin \phi - \beta^*} \right), (\sin \phi - \beta^* < 0), \\ \psi &= \tan^{-1} \left(\frac{\cos \phi}{\sin \phi - \beta^*} \right) + \pi, (\sin \phi - \beta^* > 0). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ここで $(1-a)$ は局所流速 (風車内風速) と一様流風速との比であって、運動量理論から風車抗力係数 C_{Fx} は次式に示す関係にある。

$$C_{Fx} = \frac{n l}{4 \pi} (1-a)^2 \int_0^{2\pi} (1-2\beta^* \sin \phi + \beta^{*2}) \{ (C_L \sin \psi - C_D \cos \psi) \sin \phi - (C_L \cos \psi + C_D \sin \psi) \cos \phi \} d\phi \quad (6)$$

また、速度低減率 a は次式で示される。

$$a = \frac{1}{2} (1 - \sqrt{1 - C_{Fx}}) \quad (7)$$

式(6),(7)からわかるように互いに二つの未知数が同時に存在する。このため、まず a の値を仮定して C_{Fx} を求め、その C_{Fx} から新たな a を仮定するいわゆる逐次近似法で a を求める。

したがって風車効率 C_p は、

$$C_p = \frac{n l}{4 \pi} (1-a)^2 \beta \int_0^{2\pi} (1-2\beta \sin \phi + \beta^2) (C_L \sin \psi - C_D \cos \psi - C_N l) d\phi \quad (8)$$

となる。

4. 重み関数

風車効率を与える式(8)の内、翼型特性の影響が大きいのは被積分関数であるが、積分は ϕ を変数として行われるため、迎角の関数として与えられる各空力係数が風車効率に貢献する度合いが直感的に把握し難い。そこで積分変数を ϕ から ψ に変換するため式(5)を微分して、

$$\frac{d\phi}{d\psi} = \frac{1-2\beta \sin \phi + \beta^2}{\beta \sin \phi - 1} \quad (9)$$

翼の取付角を零度とすれば、迎角 α は流入角 ψ に等しいからこれを用いて式(8)を書き換えると、

$$C_p = \frac{n l}{4 \pi} (1-a)^2 \beta \int_{\alpha} \frac{(1-2\beta \sin \phi + \beta^2)^2}{|\beta \sin \phi - 1|} (C_L \sin \alpha - C_D \cos \alpha - C_N l) |d\alpha| \quad (10)$$

ここで積分記号に付した α は、 ϕ が0から 2π に至る間の α の値に沿って積分経路をとることを示している。

したがって重み関数を以下のように定義すれば、

$$\left. \begin{aligned} W_L &= \frac{(1-2\beta \sin \phi + \beta^2)^2}{|\beta \sin \phi - 1|} \sin \alpha, \\ W_D &= -\frac{(1-2\beta \sin \phi + \beta^2)^2}{|\beta \sin \phi - 1|} \cos \alpha, \\ W_N &= -\frac{(1-2\beta \sin \phi + \beta^2)^2}{|\beta \sin \phi - 1|} l. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

効率は各重み関数と対応する各空力係数の積の和を迎角で積分して次式で表わされる。

$$C_p = \frac{n l}{4 \pi} (1-a)^2 \beta \int_{\alpha} (W_L C_L + W_D C_D + W_N C_N) |d\alpha| \quad (12)$$

風車トルク係数 C_T も同様に

$$C_T = \frac{n l}{4 \pi} (1-a)^2 \int_{\alpha} (W_L C_L + W_D C_D + W_N C_N) |d\alpha| \quad (13)$$

となるので周速比 β を与えれば重み関数を用いて、 C_p および C_T に対する翼の空力特性の影響を知ることができる。

5. 結果と考察

5. 1 重み関数と翼型特性

前章で求めた各重み関数と対応する各空力係数との積を α 軸上にプロットして、その積が α 軸上に描く面積の総和が大きくなるための条件を考えると、VAWTの翼型特性に求められる諸々の特性を知ることができる。

ここで翼型の迎角に対する揚力、抗力および縦揺れモーメント係数については図3に翼型の空力特性を示すようにおよそその関係は知られているから、上述した面積を重み関数から容易に想像しうる。

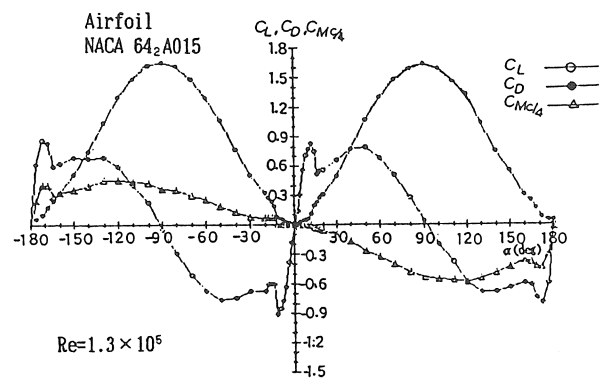


図3 NACA Section Aerodynamic Characteristics

図4はVAWTで問題となる起動特性と翼型特性との関係調べる重み関数の一例である。翼の迎角は ± 180 度変化するが動圧の変動による影響が大きく、迎角 ± 70 度程度までの特性が顕著に現れる。

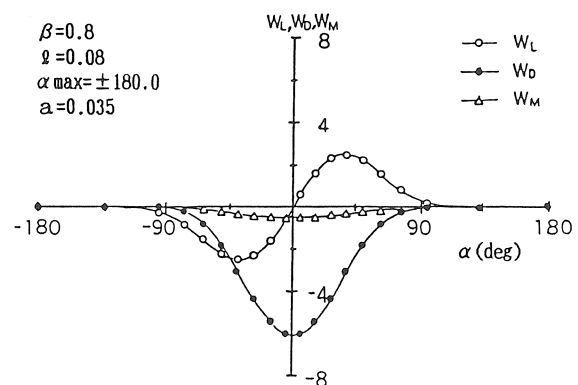


図4 Weighting Functions at $\beta=0.8$

この図4と式(12)および式(13)からわかるように、起

動特性を良くするためには、

- 1) 揚力係数が大きい
- 2) 抗力係数が小さい
- 3) 零揚力角と最小抗力角との差が小さい
- 4) 負の縦揺れモーメント係数が大きい

等の翼型特性が必要であることがわかる。

一方VAWTでは一般に高い周速比の基で最大効率が得られるので、効率を高めるためにはこの領域での翼型特性と効率との関係を知る必要がある。図5は周速比2、図6は周速比3、図7は周速比4、図8は周速比6の場合の各重み関数を示している。

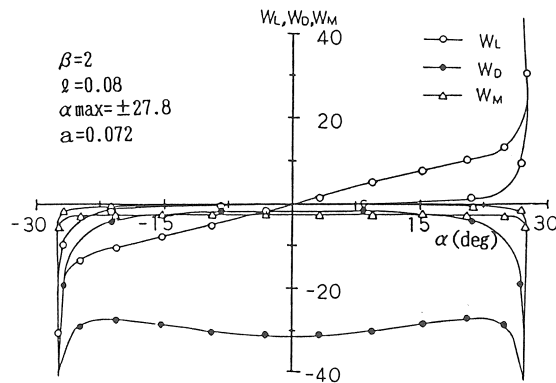


図5 Weighting Functions at $\beta=2$

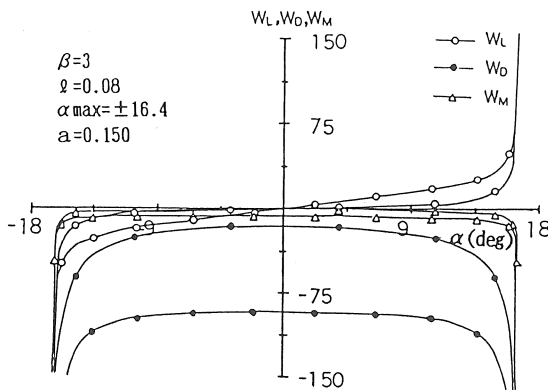


図6 Weighting Functions at $\beta=3$

図7の周速比4の場合の重み関数からわかるように翼の迎角範囲は±約10度であるが、図4と異なって動圧の変動による影響は小さくなっていく。また図4、図5、図6、図7および図8から高い周速比において迎角範囲が狭まるにつれて、揚力係数による貢献が抗力係数による負の貢献によって打ち消されていく様子がわかる。ここで効率を増大させるために必要な翼型特性を列挙すると、

- 1) 揚力係数が大きい
- 2) 抗力係数が小さい

3) 抗力係数が零揚力角に対して対称

4) 負の縦揺れモーメント係数が大きい。

このうち第3項は通常零揚力角と最小抗力角との差が小さいと言い換えることもでき、この場合には前述した良好な起動特性を与える翼型特性と一致する。

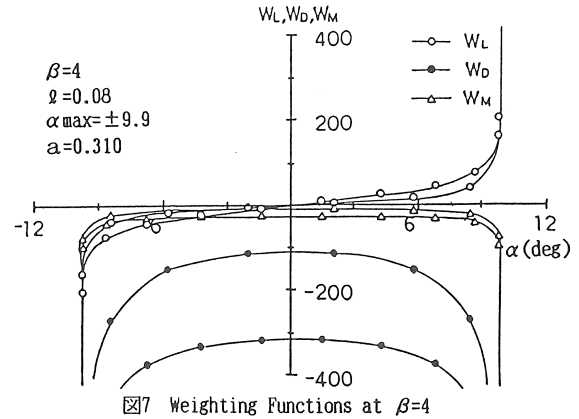


図7 Weighting Functions at $\beta=4$

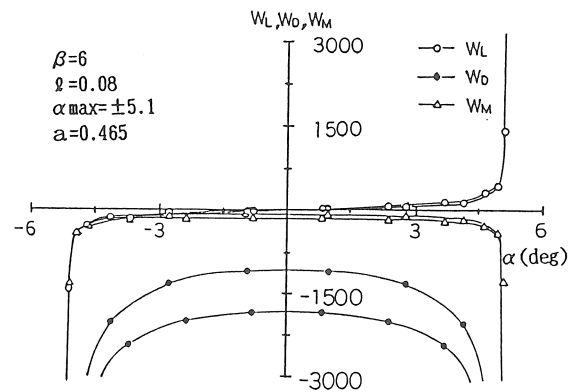


図8 Weighting Functions at $\beta=6$

現在までのところVAWTではNACA 4文字系の対称翼型を使用するのが慣例となっている⁽³⁾⁽⁴⁾。これらの対称翼は上に述べた諸特性の内、縦揺れモーメントに関する点を除けば好ましい特性を持っているが、筆者らは縦揺れモーメントを積極的に利用して効率を高めることを考えたものである。

薄翼理論によれば⁽⁵⁾、翼の揚力係数ならびに縦揺れモーメント係数は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} C_L &= 2\pi(\alpha_a + \beta_a) \\ C_{nc/4} &= 2\mu_a - \frac{\pi}{2}\beta_a \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

$$\left. \begin{aligned} \mu_a &= \int_a^\pi \frac{y}{c} \cos \theta d\theta \\ \beta_a &= \frac{2}{\pi} \int_a^\pi \frac{y}{c} \frac{d\theta}{1 + \cos \theta} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

翼型にミーンラインを単調に与えると、 β_0 が増大するために縦揺れモーメント係数も増加するが、一方零揚力角も変化してしまい、前述した翼型特性の第3項と矛盾する。したがって上式の内 μ_0 のみに負の大きな値を持たせて縦揺れモーメントを得るのが好ましく、このためにVAWTの翼型では、ミーンラインを翼弦上の適当な点で負から正へ反転させる必要がある。翼型座標を図9に示した。

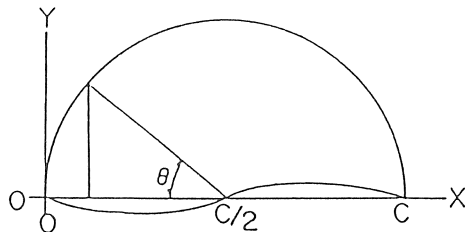


図9 Coordinate System of Thin Wing Theory

本稿では風車作動域を通じて一様な誘導速度を仮定して議論を進めてきたが、実際には各流線ごとに誘導速度を決定しなければならない。しかしながら筆者らの経験によると、一様な誘導速度を仮定して得られた各重み関数に加えるべき修正は次の二点に集約される。

- 1) 迎角の小さな領域で前進側翼と後退側翼との動圧差が増大する。
- 2) 迎角の絶対値が減少する。

したがって前述したVAWT用翼型に要求される諸特性には原則的に影響を与えないと考えられる。

5. 2 重み関数に基づく適正翼型開発

垂直軸風車の良好な翼型特性を得るには、5.1節で提案したようにVAWT用最適翼型の設計にあたっては、ミーンラインを翼弦上の適当な点で負から正へ反転させる必要がある。即ち図9および図10に示すようにミーンラインを翼弦上のある点を境として、前縁側で下側に凸、後縁側で上側に凸の正弦波状の反転ミーンラインを持たせるのである。この反転ミーンラインを持たせるTWT翼型(Tokai University Wing Section)の設計法は次の手順で行う。図10、図11に幾何学的記号を示したが、まず、反転ミーンラインを次式で与える。

$$Y_{ml} = -A \sin \left\{ 2\pi \left(\frac{x}{c} \right)^{\frac{1}{N}} \right\} + B \sin \left\{ \pi \left(\frac{x}{c} \right) \right\} \quad (16)$$

ここで、図10に示すようにNmはミーンライン反転位置、Aは下面側の最大キャンパー、 (x/c) は翼弦長を基準とした時の前縁からの距離の割合、Nはミーンライン反転位置を決めるパラメータ、Bは上面側の最大キャンパーを示している。この反転ミーンラインに風圧分布の良好な対称翼を選択し翼厚を加える。

しかし、このまま単純に式(16)へ翼厚を加えたのでは、上面側の風圧分布が不安定となることが予想されるため、上面側のみ別なミーンラインを次式で与える。

$$Y_{au} = B \sin \left\{ \pi \left(\frac{x}{c} \right) \right\} \quad (17)$$

したがって、翼型のミーンラインは次式で与えられる。

$$\begin{aligned} Y_m &= \frac{1}{2} (Y_{au} + Y_{ml}) \\ &= -\frac{1}{2} A \sin \left\{ 2\pi \left(\frac{x}{c} \right)^{\frac{1}{N}} \right\} + B \sin \left\{ \pi \left(\frac{x}{c} \right) \right\} \quad (18) \end{aligned}$$

したがって、基本翼型のY座標を $Y(x/c)$ として上面側と下面側に翼厚を加えるTWT翼型座標(図11参照)は次式で与えられる。

$$Y_u = Y \left(\frac{x}{c} \right) + B \sin \left\{ \pi \left(\frac{x}{c} \right) \right\} \quad (19)$$

$$Y_l = Y \left(\frac{x}{c} \right) - A \sin \left\{ 2\pi \left(\frac{x}{c} \right)^{\frac{1}{N}} \right\} + B \sin \left\{ \pi \left(\frac{x}{c} \right) \right\} \quad (20)$$

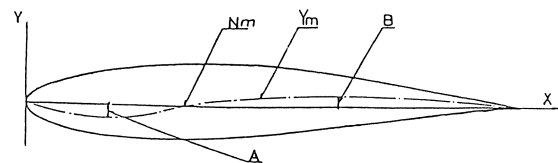


図10 TWT-Airfoil Symbols

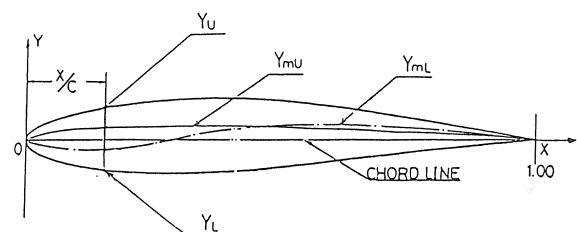


図11 TWT-Airfoil Symbols

このTWT翼型の表示法は次のように示す。

$$\text{TWT} - \underset{\textcircled{1}}{1} \underset{\textcircled{2}}{1} \underset{\textcircled{3}}{8} \underset{\textcircled{4}}{1} \underset{\textcircled{5}}{5} - \underset{\textcircled{6}}{1} - \text{BA00}$$

- ① Tokai University Wing Section
- ② 下面側最大キャンパー
- ③ 基本翼型の最大翼厚
- ④ 反転位置を与えるパラメータ $N \times 10$
- ⑤ 上面側最大キャンパー
- ⑥ 基本翼型

このように、TWT翼型はミーンラインを翼弦に対し、前縁側で下に凸、後縁側で上に凸の反転ミーンラインとし、ミーンライン反転位置を決めるパラメータN、下面側の最大キャンパーA、上面側の最大キャンパーBおよび基本翼型を選択することによって任意に必要な翼型を設計することが可能となった。

5. 3 TWT翼型の風洞実験と実機によるフィールド実験

5. 3. 1 TWT翼型の風洞実験

図12には、TWT翼型の設計にしたがって供試翼型を設計し風洞実験を行った結果の一例を示した。この図はTWT翼型TWT-11513-05-BA64₂Aの3分力特性を示している。この実験結果から重み関数によって明示されたVAWT用翼型に求められる諸特性がほぼ満たされていることがわかる。

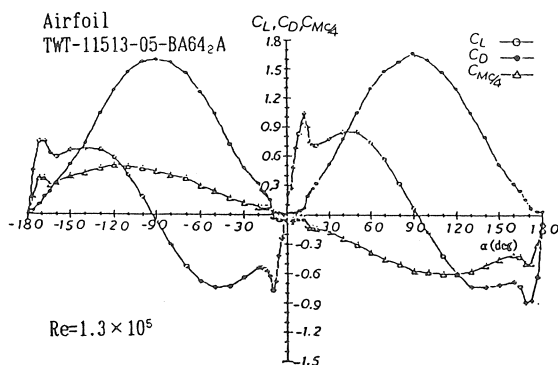


図12 TWT-Section Aerodynamic Characteristics

5. 3. 2 TWT翼型と従来翼型の比較

図13には、従来翼の対称翼NACA 64₂A015とTWT翼型の代表的な2枚の翼型について比較したものを示す。これは各翼型の迎角 α に対して抗力係数 C_D 、揚力係数 C_L および前縁からC/4弦長の縦揺れモーメント係数 $C_{Mc/4}$ の3分力特性を示した。

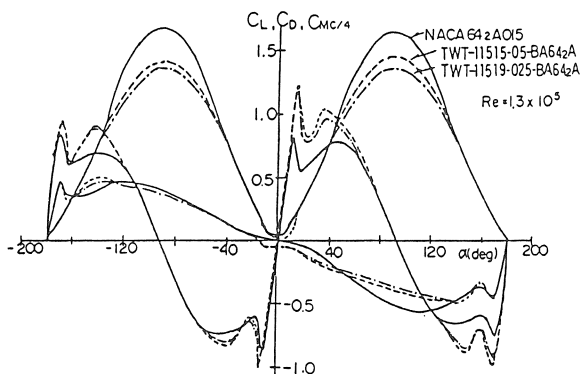


図13 Comparison of Aerodynamic Characteristics for Airfoil

TWT翼型の最大揚力係数はレイノルズ数が 1.3×10^5 の時、従来翼型より可成り大きくなっている。最小抗力係数は従来翼型より零揚力角で低い値を示している。また、負の縦揺れモーメント係数は、零揚力角で従来の対称翼型が0に対し、TWT翼型は、非常に大きな値となっている。すなわち、従来の対称翼型の特性を損なうことなく、TWT翼型はVAWT用翼型に求められる諸特性3)と4)を満足し垂直軸風車用翼型として好ましい特性を示している。特に翼の失速角までの抗力係数と負の縦揺れモーメント係数の特性は従来の対称翼型と比較して極めて優れた特性を示している。

5. 3. 3 TWT翼型とFX翼型、Lissaman翼型およびGöttingen翼型の比較

図14にはTWT翼型TWT-11511-0-BA64₂AとFX62-K-153翼型、Lissaman 7769およびGöttingen 625翼型の3分力特性を示す。

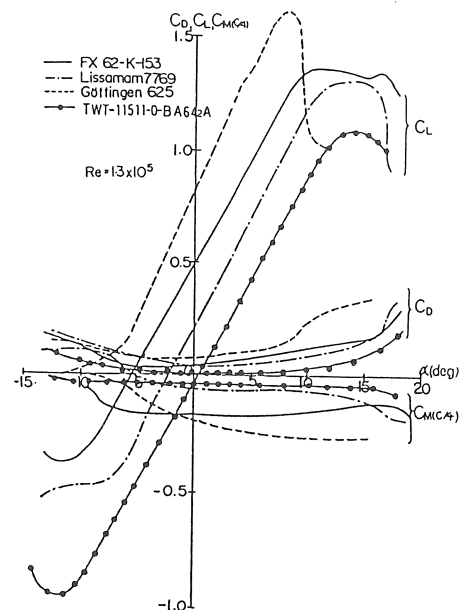


図14 Comparison of Aerodynamic Characteristics for Airfoil

FXやLissamanおよびGöttingen翼型は、低レイノルズ数領域で、低速滑空機や人力飛行機等に用いられているもので最大揚力係数が大きく、縦揺れモーメント係数も大きい。しかしながら、特にTWT翼型や従来の対称翼型と違うのは、零揚力角が負の迎角側に大きくずれてしまい、最大揚力係数が零揚力角に対して正負側で顕著な非対称性となり、さらに最小抗力係数が大きくなり、結果的に揚抗比が小さくなる。

これらの従来翼型に対し、TWT-11511-0-BA64₂Aの3分力特性は、零揚力角で最大揚力係数は正負の迎角で対称となり、最小抗力係数が小さく、揚抗比が大きく、負の縦揺れモーメント係数が大きく良好な結果を示してい

る。また、ブレード翼型特性と直線翼垂直軸風車の性能について、比較したのが図15である。これらの結果からTWT翼型が良好な結果を示していることがわかる。

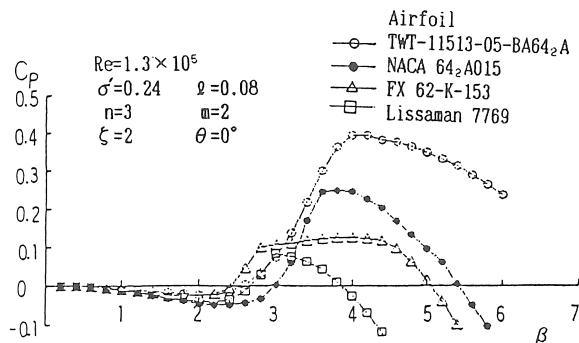


図15 Comparison of Performance for Airfoil

5. 4 実機によるフィールド実験

図16には研究開発したTWT翼型のうち、TWT-11815-1-BA00翼型を装着した非周期制御方式の直線翼垂直軸風車の実機によるフィールド実験結果を示した。この実機は、静岡県御前崎町に設置した直線翼垂直軸風車（直径5m、ブレード長さ5m）で、発電による出力(20kW)は、国民宿舎おまえぎ荘の外灯照明、VTR、TV電源および電気自転車のバッテリー充電に利用されている。この実機での回転数、風速および出力から求めた周速比 β と風車効率 C_p の関係を示す。この結果は、単一流管理論によって求めた性能計算の予測に対し、ばらつきが見られるが、変動する風速と発電機効率を考慮すると可成り良好な一致を示していることがわかる。

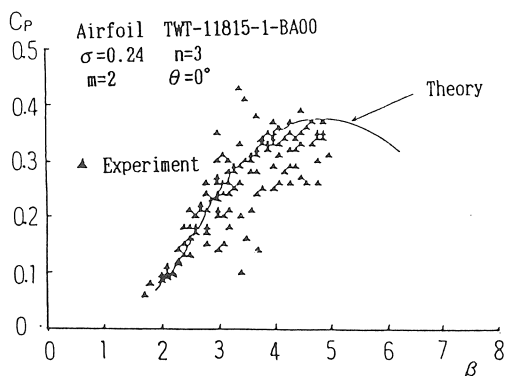


図16 Power Coefficient vs. Tip Speed Ratio on Field Test

6. 結言

本研究は垂直軸風車用翼型の研究を行った。これらの結果次のようなことが明示された。

- 1) 単純化した風車特性式から重み関数を導いた。
- 2) この重み関数からVAWT用の翼型として好ましい諸特性が求められた。

3) 良好な起動特性を与える翼型特性と高い効率を与える翼型特性とがほぼ一致することが示された。

4) さらに高い周速比において負の縦揺れモーメント係数が効率に貢献することが確かめられ、翼型の翼弦に対してミーンラインを反転して負の縦揺れモーメントを得るのが有効であることが示された。

5) VAWT用翼型として好ましい諸特性を満たす翼型の開発研究を行い反転ミーンラインをもつ翼型をTWT翼型としてその設計法について明示した。

6) 風洞実験によって垂直軸風車用翼型として良好な特性を満足するTWT翼型が確認され、3分力特性の一例が示された。

7) 従来翼型のFXやLissamanおよびGöttingen翼型は、揚力係数が大きく、負の縦揺れモーメント係数も大きい。零揚力角が負側に大きくつれ、最大揚力角が負側で顕著な非対称となり、さらに最小抗力係数も大きくなり、このため揚抗比も小さくなって風車性能が低下し不適正であることがわかった。

8) TWT翼型は、零揚力角で最小抗力角との差が小さく、負の縦揺れモーメント係数が大きく、揚力係数が零揚力角でプラス・マイナス側で絶対値の大きさが対称に大きく、抗力係数が零揚力角に対して対称に小さいことを特徴とする良好な翼型であることがわかった。また、従来の対称翼の空力特性を損なうことなく零揚力角で負の縦揺れモーメントが得られることを明らかにした。

9) TWT翼型を装着した直線翼垂直軸風車の実機によるフィールド実験結果は良好な結果が確認された。

文献

- (1) J.Schmid, Important Results of The European Wind Energy Programme, European Wind Energy Conference, European Wind Energy Association, (1984-10), 910.
- (2) R.J.Muraca, S.Stephen, V.Maria and R.J.Dagenhart, Theoretical Performance of Vertical Axis Windmills, NASA-Langley Research Center, NASA TM TMX-72662, (1975-5).
- (3) B.F.Blackwell, R.E.Sheldahl, L.V.Pectz and J.F.Bonas, Engineering Development Status of the Darrieus Wind Turbine, SAND-76-0650.
- (4) B.F.Blackwell, W.N.Sullivan and R.C.Reuter, Wind Tunnel Performance Data for the Darrieus Wind Turbine with NACA 0012 Blades, SAND-76-0130.
- (5) I.H.Abbot and A.E.von Doenhoff, Theory of Wing Sections, (1958), 68, Dover Publications, New York.
- (6) 関他, 御前崎における風力利用試験, 第8回風力エネルギー利用シンポジウム, (1986), 64-75.

(平成元年12月28日, 原稿受理)