

直線翼垂直軸風車の性能

Performance of Straight Blade,
Non-Articulated Vertical Axis
Wind Turbine関 和 市* 大 谷 勇**
Kazuichi SEKI Isamu OTANI

Abstract

This paper presents an application of single stream tube theory to the straight blade, non-articulated vertical axis wind turbine. In addition to the contribution of blades to wind turbine performance, effect of blade support arms is taken into consideration. This paper also presents some examples of the effects of parameters characterizing wind turbine configuration and geometry. They are blade solidity, number of blades and height diameter ratio. Effects of aerodynamic characteristics of airfoil and its pitch attitude with regard to support arm are also presented. Besides, we compared the theory with the experiment; as a result, we confirmed our applied theory.

Key Words: Wind Energy, Application, Straight Blade Vertical Axis Wind Turbine, Single Stream Tube Theory, Performance, Parameter, Experiment

1. 緒言

風エネルギー利用システムに用いられている風車は、そのほとんどがプロペラ型を主体とする水平軸風車である。一方、ダリウス型に代表される揚力利用の垂直軸風車はいくつかの優れた特徴から注目されているがその空気力学的特性については研究の歴史が浅い。

水平軸風車の性能計算についてはS.Goldstein⁽¹⁾, R.E.Wilson and P.B.S.Lissaman⁽²⁾らの翼端補正理論, H.Glauertの理論⁽³⁾, 翼素運動量複合理論および局所運動量理論⁽⁴⁾によるものなど詳細な研究があるが、これらは、厳密な解を得るためのものである。

垂直軸風車の性能計算に関してはH.C.Larsenの渦理論⁽⁵⁾による解法が用いられてきた。しかしながら、厳密解は風車特性式が複雑で明示し難い。

このため、R.J.Templin⁽⁶⁾は、風車を通過する気流を一つの流管と仮定し風車特性式を導き簡単に風車特性式を明示した。

また、垂直軸風車の性能計算方法には単一流管理論、多流管理論および角運動量理論などが提案されている

が、いずれを用いてもその性能を示す周速比と風車効率の関係の差異は少ないため、比較的単純な単一流管理論を用いて性能を論じたものが多い。これらは、ダリウス型風車の性能計算がほとんどであるが、R.J.TemplinやJ.H.Strickland⁽⁷⁾の研究結果が知られている。しかしながら、これらは、風車性能に影響を及ぼす因子に関してはブレードの枚数効果が中心で、他の幾つかの因子の影響を含めて体系的に明かにしている例はほとんど見あたらない。このため主要パラメータの影響について体系的に明かにすることが必要である。

本研究では、高性能を示す直線翼固定ピッチ垂直軸風車の開発を目的として、一樣流理論を基に運動量理論を考慮した単一流管理論を用いて直線翼垂直軸風車の主要設計パラメータの影響を明らかにし、解析手法を確立する。

本研究で対象とする直線翼垂直軸風車は、ブレードを直線翼とし、種々の空気力学的な作動要素を垂直な回転軸のまわりに設けたもので、非周期制御方式の揚力型垂直軸風車である。この風車の性能に影響を及ぼす各主要設計パラメータは、ソリディティ、ブレード枚数、ブレード支持アーム数、高さと同回転半径の比である縦横比、ブレード取付角、風車内風速および翼型特性である。これらの主要設計パラメータが直線翼垂

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

直軸風車性能にどの程度影響を与えるか体系的に性能計算を行い検討を行った。また、理論と実機との比較を行った。

2. 主な記号

- a : 速度低減率
 α : 迎角(deg)
 β : 周速比
 C : 翼弦長(m)
 C_{Fx} : 風車抗力係数
 C_D : 抗力係数
 C_L : 揚力係数
 C_H : 縦揺れ(ピッチング)モーメント係数
 C_T : トルク係数
 F_x : 風車抗力(kg)
 ϕ : 風車回転角(deg)
 h : ブレード長さ(m)
 ζ : 縦横比($\zeta = h/R$)
 l : 無次元翼弦長
 m : ブレード支持アーム数
 n : ブレード枚数
 ψ : 流入角(deg)
 ω : 風車回転角速度(rad/sec)
 ρ : 空気密度($\text{kg s}^{-2}/\text{m}^3$)
 r : 回転中心からの距離(m)
 R : 風車回転半径(m)
 S_w : 風車受風面積(m^2)
 σ' : ソリディティ($\sigma' = n l_B$)
 T : トルク(Nm)
 θ : ブレード取付角(deg)
 V : 風車内風速(m/sec)
 V_∞ : 一様流風速(m/sec)
 V_R : 相対流入風速(m/sec)

添え字

- $()_A$: アーム
 $()_B$: ブレード
 $()_{Fn}$: C_{Fx} の垂直方向成分
 $()_{Ft}$: C_{Fx} の水平方向成分
 $()_k$: 一枚の
 $()_n$: V_R の回転半径方向成分
 $()_t$: V_R の回転接線方向成分
 $()$: 無次元
 $()'$: 風車内風速に基づく
 $()_l$: 分割流管

3. 直線翼垂直軸風車の性能計算

直線翼垂直軸風車の性能計算方法は、二つに大別することができる。一つは、風車を通過する気流が風車の前後および風車内において一様であると仮定する方法である。しかし、実際には、風車は風の運動エネルギーによって回転しているので、風車内を通過する気流は減速する。このため、この速度変化より運動量保存則を用いて風車抗力による速度変化を考慮した運動量理論を基に風車性能計算を行う。この運動量理論による風車性能計算方法には、単一流管理論⁽⁸⁾、多流管理論および角運動量理論等がある。

単一流管理論は、風車を通過する気流を一つの流管として考え、その断面のどの位置でも一様な速度低減率を持つと仮定する方法である。

これに対し、気流を多くの流管に分けて、それぞれの流管において、速度低減率を求める多流管理論がある。また、風車が回転体であることに着目し、角運動量の影響を考慮した角運動量理論がある。以下にこれらの理論の概念を示す。

3.1 一様流理論

一様流理論では図1に示すように風車を通過する気流が風車の前後や風車内において一様であると仮定する。

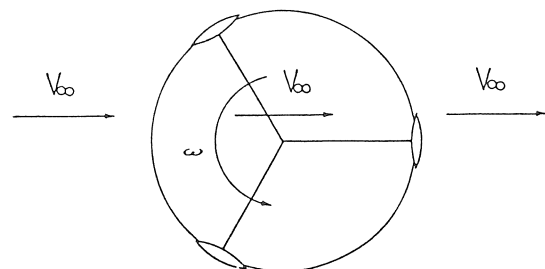


図1 一様流理論の概念

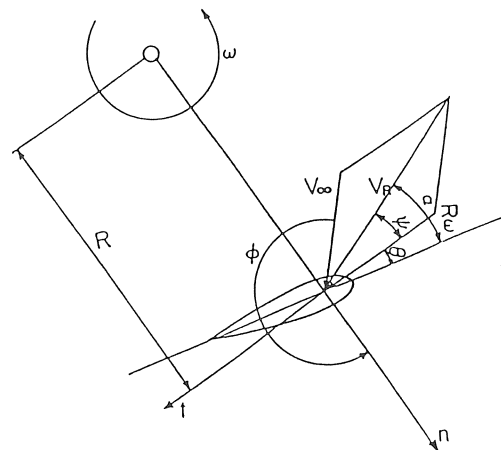


図2 ブレードへの流入風速

このためブレードへの相対流入風速 $\bar{V}_R$ は次式で示される

$$\bar{V}_R = \sqrt{1 - 2\beta \sin \phi + \beta^2} \quad (1)$$

ここで、周速比 β を定義する。

$$\beta = \frac{R\omega}{V_\infty}$$

図2は、ブレードへの流入風速の関係を示したものである。

以下では風車抗力による速度変化を考慮した運動量理論について論じる。

3. 2 単一流管理論

図3に示すように風車を通過する気流を一つの流管と仮定する。

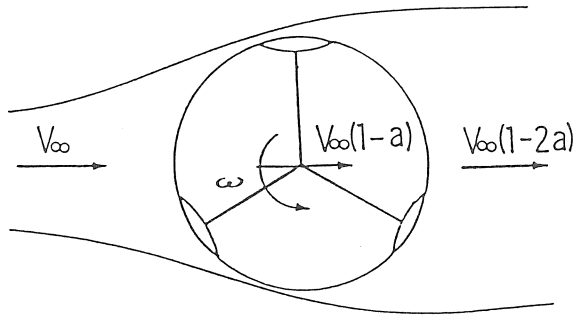


図3 単一流管理論の概念

この考えから、速度低減率 a と風車抗力 F_x の関係は、次式で示される。

$$F_x = 2\rho V_\infty^2 S_u (1-a)a \quad (2)$$

風車抗力係数 C_{Fx} を次式で定義する。

$$F_x = \frac{1}{2} \rho V_\infty^2 C_{Fx} S_u \quad (3)$$

式(2)、(3)から a に関する2次式が得られる。

$$a^2 - a + \frac{C_{Fx}}{4} = 0 \quad (4)$$

したがって、速度低減率 a は次式で示される。

$$a = \frac{1}{2} (1 - \sqrt{1 - C_{Fx}}) \quad (5)$$

相対流入風速 $\bar{V}_R$ は

$$\bar{V}_R = (1-a) \sqrt{1 - 2\beta \sin \phi + \beta^2} \quad (6)$$

となる。

ここで、

$$\beta^* = \frac{\beta}{1-a}$$

3. 3 多流管理論

図4に示すように、回転角 ϕ によって流管を分割し、各々の流管において風車抗力と速度低減率の関係から速度低減率を求める。

任意の分割流管内において、流れの方向に受ける風車抗力は上流側の回転角 ϕ_u での風車抗力を F_{xu} 、下流側の回転角 ϕ_d における風車抗力を F_{xd} とし、この時の風車抗力係数をそれぞれ C_{Fxu} 、 C_{Fxd} とすれば任意の分割流管での速度低減率 a_R は次式で示される。

$$a_R = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \sqrt{1 - \frac{n(C_{Fxu} + C_{Fxd})}{\pi |\cos \phi|}} \right\} \quad (7)$$

この時の相対流入風速 $\bar{V}_R$ は

$$\bar{V}_R = (1-a_R) \sqrt{1 - 2\beta_R^* \sin \phi + \beta_R^{*2}} \quad (8)$$

となる。

ここで、

$$\beta^* = \frac{\beta}{1-a_R}$$

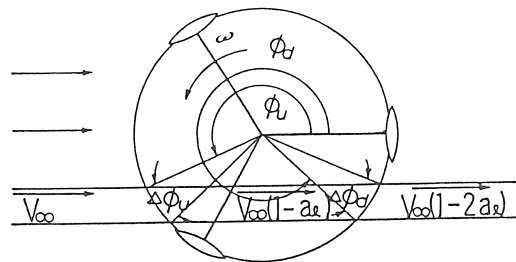


図4 多流管理論の概念

3. 4 角運動量理論

図5に示すように、角運動量理論は、単一流管理論に角運動量の影響を加えたものである。

速度低減率と風車抗力との関係は変わらないが、風車を通過する気流を空気の塊、すなわち剛体と仮定し、風車から角運動量を受け取って角速度 ω を持つという考えに基づいている。

したがって、ブレードへの相対流入風速の回転接線方向成分 $\bar{V}_t$ 、回転半径方向成分 $\bar{V}_r$ は、

$$\bar{V}_t = \beta - (1-a) \sin \phi + \frac{\omega R}{V_\infty}, \quad \bar{V}_r = \beta \cos \phi$$

$$\bar{V}_n = -(1-a) \cos \phi \quad , \quad \left. \vphantom{\bar{V}_n} \right\} (9) \quad \text{じる.}$$

であり，ブレードへの相対流入風速 $\bar{V}_R$ は次式で示される。

$$\bar{V}_R = \sqrt{\left\{ \beta - (1-a) \sin \phi + \frac{\omega_s R}{V_\infty} \right\}^2 + \left\{ -(1-a) \cos \phi \right\}^2} \quad (10)$$

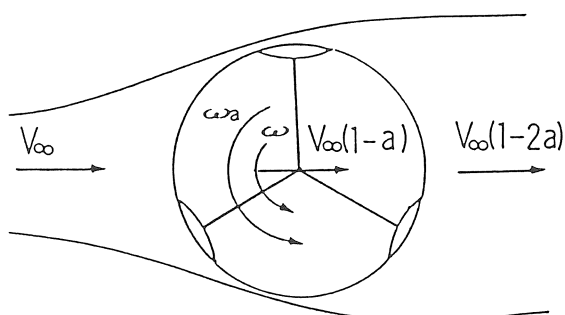


図5 角運動量理論の概念

これらの各理論において、速度低減率の算出方法は多少異ってくるが、風車特性を明らかにするために必要な諸量

- 1) . ブレードに発生するトルク
- 2) . ブレードに発生する風車抗力
- 3) . アームに発生するトルク

を表す特性式はいずれも次式で示される.

$$C_{TB} = \frac{n l_B}{4\pi} \int_0^{2\pi} \bar{V}_R^2 (C_L \sin \psi - C_D \cos \psi - C_H l_B) d\phi \quad (11)$$

$$C_{FX} = -\frac{n l_B}{4\pi} \int_0^{2\pi} (C_{Fn} \cos \phi + C_{Ft} \sin \phi) d\phi \quad (12)$$

$$C_{TA} = -\frac{nm\ell_A}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 C_{DA} \bar{V}_{tA}^2 \bar{r} d\bar{r} d\phi \quad (13)$$

ここで, l_a, l_b はそれぞれアームおよびブレードの無次元翼弦長また, n, m はそれぞれブレードおよびアームの枚数である.

このため、各々の理論による風車性能を示す β - C_p 曲線の相違はそれほど顕著でない、尚、各理論の計算結果の比較は6章で述べてある。

このため、本研究では、最も簡単に風車特性を明示することができる単一流管理論を用いて性能計算を行った。

以下では単一流管理論による風車特性式について論

4. 單一流管理論

4. 1 ブレードに発生するトルク

図2よりブレードへの相対流入風速 $\bar{V}_R$ の回転接線方向成分 $\bar{V}_t$ と回転半径方向成分 $\bar{V}_n$ は、

$$\left. \begin{aligned} \bar{V}_1 &= \beta - (1-a) \sin \phi \\ \bar{V}_2 &= -(1-a) \cos \phi \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

である。

したがって、ブレードに対する流入角 ψ は、

$$\left. \begin{aligned} \psi &= \tan^{-1} \left(\frac{\cos \phi}{\sin \phi - \beta} \right), \quad (\sin \phi - \beta < 0), \\ \psi &= \tan^{-1} \left(\frac{\cos \phi}{\sin \phi - \beta} \right) + \pi, \quad (\sin \phi - \beta > 0). \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

一枚のブレードに発生するトルク T_{BK} のトルク係数 C_{TBK} を次式で定義する。

$$T_{BK} = \frac{1}{2} \rho V_{\infty}^2 C_{TBK} S_u R \quad (16)$$

回転角 ϕ に対する 1 枚のブレードのトルク係数 C_{TEK} は、

$$C_{TBK} = \frac{g_B}{2} \bar{V}_R^2 (C_L \sin \psi - C_D \cos \psi - C_H g_B) \quad (17)$$

ここで, $\ell_B = C_B / R$

よって、 n 枚のブレードの1回転の平均トルク係数 C_{TB} は、次式で表せられる。

$$C_{TB} = \frac{n}{2\pi} \int_0^{2\pi} C_{TBK} d\phi \quad (18)$$

4. 2 ブレードに発生する風車抗力

風車抗力も風車内風速 V に基づいて求めることができる。

回転角 ϕ に対する 1 枚のブレードの風車抗力係数 C_{FXK} は,

$$C_{F_{XK}} = -\frac{l_B}{2} (C_{F_n} \cos \phi + C_{F_t} \sin \phi) \quad (19)$$

ここで、 C_{Fn} 、 C_{Ft} は、それぞれブレードの垂直および水平方向の風車抗力係数である。

$$\left. \begin{aligned} C_{Fn} &= \bar{V}_R^2 (C_L \cos \psi + C_D \sin \psi) , \\ C_{Ft} &= \bar{V}_R^2 (C_D \cos \psi - C_L \sin \psi) . \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

よって、 n 枚のブレード1回転の平均風車抗力係数 C_{FX} は、次式で表せられる。

$$C_{FX} = \frac{n}{2\pi} \int_0^{2\pi} C_{FXK} d\phi \quad (21)$$

4. 3 アームに発生するトルク

アームに発生するトルクはアームの抗力によるものである。

図6より回転中心から r の距離にある微小部分 Δr における回転接線方向成分 $\bar{V}_{tA}$ は

$$\bar{V}_{tA} = (1-a)(\bar{r}\beta \cdot \sin\phi) \quad (22)$$

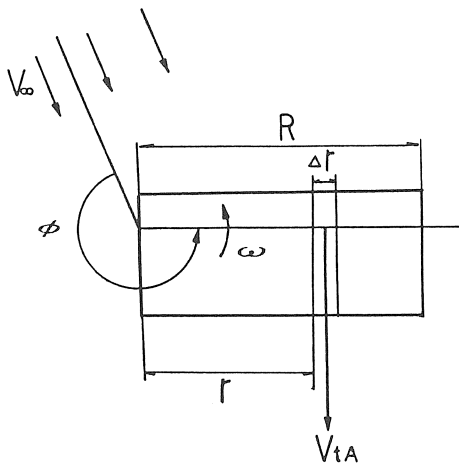


図6 アームへの流入風速

式(22)からわかるように $\bar{V}_{tA}$ は正と負の両方の値をとり得る。このため、アームに発生するトルクにおけるアームの抗力係数 C_{DA} は $\bar{V}_{tA}$ が、正、負の場合の2通りで考える。

$$\left. \begin{aligned} \bar{V}_{tA} > 0 \text{ の時 } C_{DA} &= C_{DF} \\ \bar{V}_{tA} < 0 \text{ の時 } C_{DA} &= -C_{DR} \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

したがって、1枚のアームの全体の抗力によるアームのトルク T_{AK} は

$$T_{AK} = -\frac{1}{2} \rho C_A R^2 \int_0^1 C_{DA} \bar{V}_{tA}^2 \bar{r} d\bar{r} \quad (24)$$

また、アームに発生するトルクをアームのトルク係数 C_{TAK} をもって次式で定義する。

$$T_{AK} = \frac{1}{2} \rho V_\infty^2 C_{TAK} S_A R \quad (25)$$

すなわち1枚のアームのトルク係数 C_{TAK} は、

$$C_{TAK} = -\frac{l_A}{2} \int_0^1 C_{DA} \bar{V}_{tA}^2 \bar{r} d\bar{r} \quad (26)$$

ここで、 $l_A = C_A / h$

アームのトルク係数もブレードのトルクおよび風車抗力係数と同様に回転角 ϕ によって変動する。したがって、ブレード枚数 n 、ブレード支持アーム数 m における全体としてのアームの1回転における平均トルク係数 C_{TA} は、

$$C_{TA} = \frac{nm}{2\pi} \int_0^{2\pi} C_{TAK} d\phi \quad (27)$$

5. 性能計算と逐次近似法

本研究の直線翼垂直軸風車の性能計算に用いた主な風車特性式は次の通りである。

$$a = \frac{1}{2} (1 - \sqrt{1 - C_{FX}}) \quad (28)$$

$$\bar{V}_R = (1-a) \sqrt{1 - 2\beta \sin\phi + \beta^2} \quad (29)$$

$$C_{FX} = -\frac{n l_B}{4\pi} \int_0^{2\pi} \bar{V}_R^2 \{ (C_L \cos\psi + C_D \sin\psi) \cos\phi + (C_D \cos\psi - C_L \sin\psi) \sin\phi \} d\phi \quad (30)$$

$$C_{TB} = \frac{n l_B}{4\pi} \int_0^{2\pi} \bar{V}_R^2 (C_L \sin\psi - C_D \cos\psi - C_H l_E) d\phi \quad (31)$$

$$C_{TA} = -\frac{nm l_A}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 C_{DA} \bar{V}_{tA}^2 \bar{r} d\bar{r} d\phi \quad (32)$$

$$C_P = \beta (C_{TB} + C_{TA}) \quad (33)$$

上式から速度低減率 a が定まらなると各特性値は定まらないことがわかる。

しかし、式(28)および式(30)からわかるように同時に2つの未知数を求めることは不可能である。このため、最初に速度低減率 a ($0 < a < 0.5$) を適当な値に仮定し、風車抗力係数 C_{FX} を求める。さらにこの C_{FX} から a を求めるというように速度低減率 a と風車抗力係数 C_{FX} を交互に計算を行っていく逐次近似法を用いた。

6. 各理論の比較

図7に示すように垂直軸風車の性能計算について、角運動量理論、多流管理論および単一流管理論について

性能計算を行い比較した。これらの結果、各理論による効率の差異はあまり見られない。したがって直線翼垂直軸風車の主要設計パラメータの性能計算は単一流管理論で実用上十分であることを明らかにした。

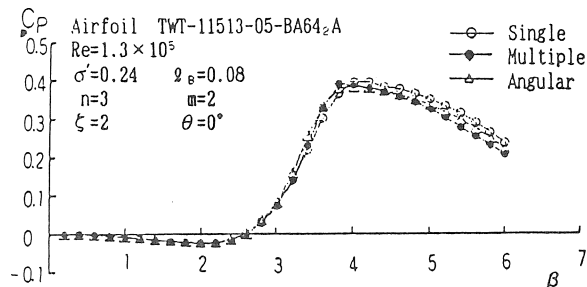


図7 各理論の比較

7. 直線翼垂直軸風車の性能計算結果と考察 (主要設計パラメータの変化による風車効率への影響)

本研究の性能計算に用いた翼型は、筆者らが研究開発したTWT翼型⁽⁹⁾である。このTWT翼型はTWT-11513-05-BA64₂Aで、風洞実験結果の3分力特性を図8に示す。

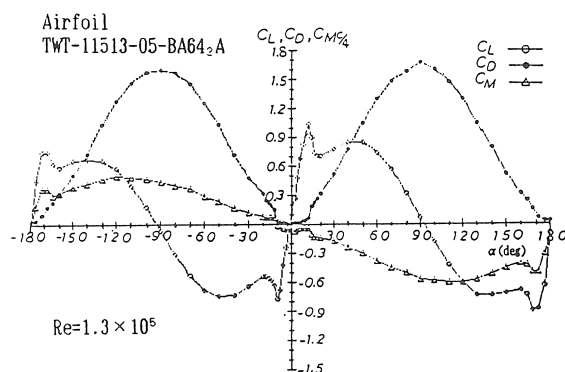


図8 性能計算に用いたTWT翼型の3分力特性

7. 1 ソリディティの変化による風車効率への影響

図9にはソリディティの風車効率への影響について示す。

直線翼垂直軸風車のソリディティは、次式で定義される。

$$\sigma = \frac{n C_s}{2 \pi R} \quad (34)$$

$$\sigma' = n l_b \quad (35)$$

式(31)、(35)からソリディティが大きくなるとブレ

ードの総面積が増加するのでトルク係数が増加し、風車効率が高くなると予測される。しかし、図9に示すように最大効率は高くなるが、全体としては運用範囲の狭いピーキーな曲線となる。これはソリディティが増加すると同時に、風車回転時のブレードによって形成される円筒表面積上に占めるブレードの表面積の割合が増すため、風が風車を通過する際の速度低減率が大きくなるためである。つまり、ブレードへの相対流入風速の減少による。

したがって、必ずしも風車効率は高くない。

図10にはソリディティの風車内風速への影響を示す。

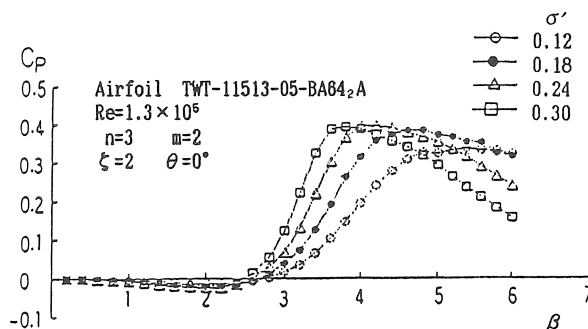


図9 ソリディティの風車効率への影響

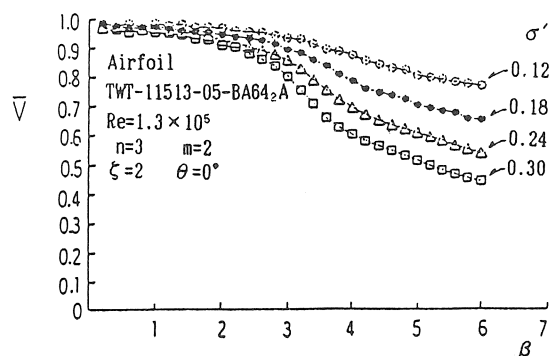


図10 ソリディティの風車内風速への影響

7. 2 ブレード枚数の変化による風車効率への影響

図11にはブレード枚数の風車効率への影響について示す。

この図の $\beta - C_p$ 曲線は、ソリディティの変化によるものと類似した傾向を示している。これは、ソリディティの場合と同様にブレード枚数の増加に伴う速度低減率の増大によるものである。

また、 $\beta - C_p$ 曲線は、ブレード枚数を増加するとピーキーになるので運用については望ましい傾向ではない。

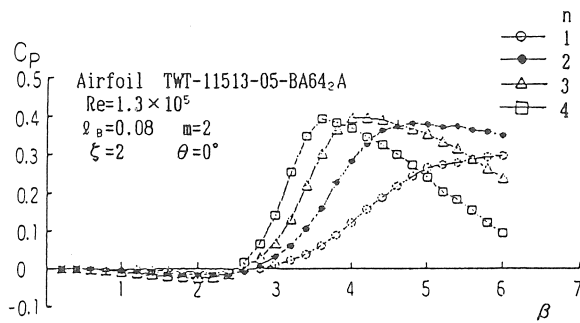


図11 ブレード枚数の風車効率への影響

7.3 ブレード支持アーム数の変化による風車効率への影響

図12にはブレード支持アーム数の風車効率への影響について示す。アームに発生するトルクは、アームの抗力によるものである。このため風車性能に負の影響を及ぼす。したがって図に示すように、ブレード支持アーム数の増加は風車効率の低下を示す傾向にある。

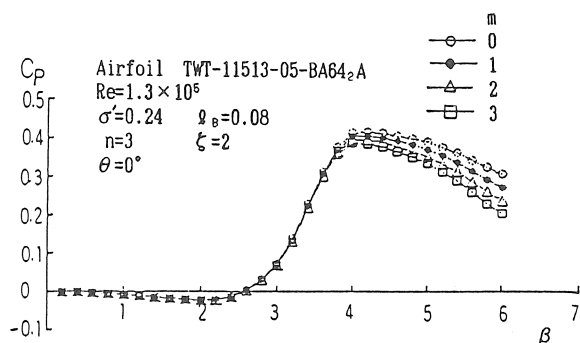


図12 ブレード支持アーム数の風車効率への影響

7.4 風車サイズである縦横比の変化による風車効率への影響

図13には縦横比の風車効率への影響について示す。

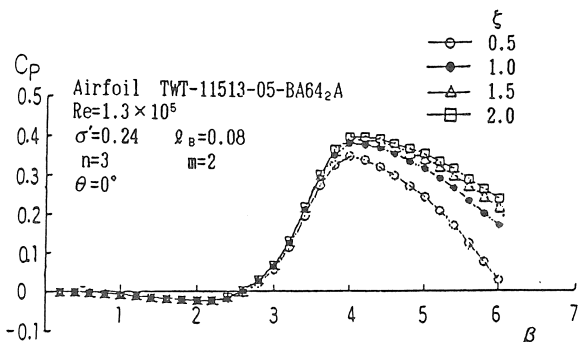


図13 縦横比の風車効率への影響

図に示すように縦横比が増すにつれて風車効率が高

くなる傾向を示している。縦横比はブレード長さ h と風車回転半径 R との比 ($zeta=h/R$) である。このため縦横比が増すということは風車の受風面積において、風車回転半径 R の占める割合が少なくなり、ソリディティが増加するため風車効率が増加する。また、その変化が顕著でないのはアームの抗力によるものと考えられる。

7.5 ブレード取付角の変化による風車効率への影響

図14にはブレード取付角の風車効率への影響について示す。アームに対するブレードの取付角は、風車が回転する際のブレードの流入角の変動に対して最も高い平均トルクが発生するように定められる。ブレードに発生するトルクおよび出力は揚力、抗力および縦揺れモーメントなどの空気力学的特性からなり、これらの空気力学的特性は、翼の迎角によって変化する。このため、ブレード取付角の変化に伴う迎角の変化は風車効率に大きく影響する。

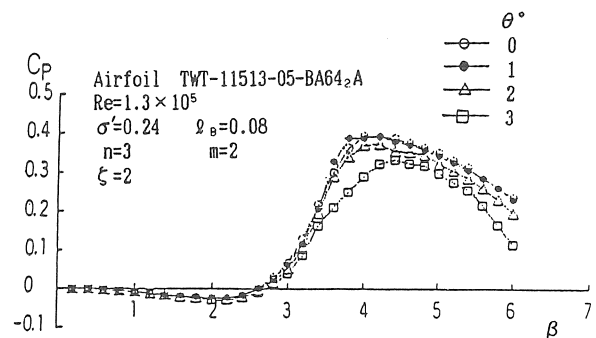


図14 ブレード取付角の風車効率への影響

7.6 ブレード翼型特性による風車効率への影響

図15にはブレード翼型特性の風車効率への影響について示す。ブレードに発生するトルクおよび出力は揚力、抗力および縦揺れモーメントなどの空気力学的特性からなり、これらの空気力学的特性は、翼断面型によって決まるためブレード翼型特性の風車効率への影響度は極めて重要で高い。

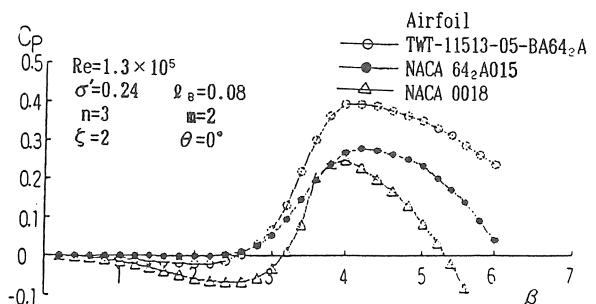


図15 ブレード翼型特性の風車効率への影響

8. 理論と実機によるフィールド実験の比較

直線翼垂直軸風車の実機によるフィールド実験を7年以上を越える期間にわたって行った結果と本性能計算結果を比較した。このフィールド実験は、青森県車力村に設置された熱変換システムで、風車半径4m、ブレード長7m、受風面積56m²、出力45kWである⁽¹⁰⁾。

実機での回転数、風速および出力から周速比 β と風車効率 C_p を求め、性能計算と比較したものを図16に示した。この結果から、実験値は $\beta-C_p$ 曲線のまわりに分布し、良好な結果を示していることがわかる。

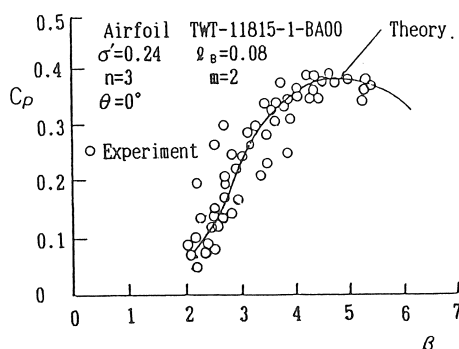


図16 理論と実機の比較

9. 結言

本研究では直線翼垂直軸風車の性能計算において各理論の比較を行い単一流管理論の有効性を検証した。

さらに、風車の性能に影響を与えるパラメータであるソリディティ、ブレード枚数、ブレード支持アーム数、縦横比、ブレード取付角および翼型特性において、これらの主要設計パラメータが、どの程度風車効率に影響を及ぼすか、単一流管理論による風車特性式を用いて性能計算を行った。また、実機との比較を行った。その結果、次のようなことがわかった。

- 1) 風車効率に影響を及ぼすパラメータの内、ソリディティおよび翼型特性による影響が顕著であることを明らかにすることができた。
- 2) ソリディティの増大は、風車回転時に形成される円筒表面上で、ブレードの占める割合の増加となり、速度低減率の増加となることがわかった。
- 3) ブレード枚数の増加は、ソリディティの場合と同様にブレードの占める面積の増大となり、したがって、速度低減率の増大となることを明らかにした。
- 4) ブレード支持アーム数の増加は、アームの抗力の増大となるため風車効率の低下を示す傾向になること

がわかった。

5) 風車の回転トルクと出力はブレードに生じる揚力、抗力および縦揺れモーメントからなり、これらの空気力学的特性は、翼断面型で決まるため翼型特性は風車効率に大きな影響を及ぼすことを明らかにすることができた。

6) 縦横比の増加は、ソリディティの増加につながるため結果として風車効率は高くなることがわかった。

7) ブレード取付角によって翼の迎角が変化するので、翼型特性と同様に空気力学的特性が大きく影響することを明らかにした。

8) 最も簡単に風車特性式を明示することが出来る単一流管理論によって、直線翼垂直軸風車の性能計算を実行し、体系的に主要設計パラメータと効率の関係を明らかにすることができた。

9) 理論と実機との比較から単一流管理論を用いて風車特性を明示する方法でも十分有効であることがわかった。

10) 角運動量理論、多流管理論および単一流管理論による性能計算を比較した結果、主要設計パラメータの性能計算は単一流管理論による方法でも実用上十分であることが確認できた。

文献

- (1) S. Goldstein, On The Vortex Theory of Screw Propellers, Proc. Royal Society of London A-123 (1929), 440-465.
- (2) R. E. Wilson, P. B. S. Lissaman and S. N. Walker, Aerodynamic Performance of Wind Turbines, NSF/RA-760228, RB-259089 (1976), 38-40.
- (3) H. Glauert, Aerodynamic Theory, Vol. IV, Airplane Propellers, (1963), 191-198, 261-269, New York, Dover.
- (4) 東昭他, 局所運動量理論の風車への応用, 第18回飛行機シンポジウム講演集, (1980-11), 161-171.
- (5) H. C. Larsen, Summary of a Vortex Theory of the Cyclogiro, Proceedings of the 2nd U.S. National conference on Wind Engineering Research, (1975-6), Colorado State University, V-8-1.
- (6) R. J. Templin, Aerodynamic Performance Theory for the NRC Vertical-Axis Wind Turbine, National Research Council of Canada Report LTR-LA-160, (1974).
- (7) J. H. Strickland, Aerodynamics of The Darrieus Turbine, Workshop, 11-29-58, (1976-5), Sandia Laboratories.
- (8) 関 和 市, 直線翼垂直軸風車の性能に関する研究, 産業科学研究所研究報告, 15, (1984), 1-7.
- (9) K. Seki, A Study of Aerodynamic Performance and Airfoil for Straight Blade Non-Articulated Vertical Axis Wind Turbine and Its Application, Wind Power-85, (1985-8), 531-538, American Wind Energy Association U.S. Department of Energy Solar Energy Research Institute, San Francisco.
- (10) 関 和 市, 青森県車力村における風エネルギー利用システム, 第5回風力エネルギー利用シンポジウム講演論文集, (1983-5), 63-70, 東京.

(平成元年12月28日, 原稿受理)