

# 410 プロペラ型風力タービンの理論的な研究

(NACA 翼型ブレードに対しエネルギー翼素複合理論を適用した場合)

## Theoretical Study on Aerodynamic Characteristics of Horizontal Axis Wind Turbine (Application of Energy-Momentum-Blade Element Combined Theory to NACA 44xx Aerofoil Blade)

○ 正 岸浪 紘機 (室蘭工大)、鈴木 淳 (室蘭工大)  
ヒムサール・アマバリータ, 小池田 岳洋 (室蘭工大)  
伊庭野 洋 ((財)室蘭テクノセンター)  
下山 裕之、新屋 泰彦 (室蘭工大)

Koki Kishinami\*, Jun Suzuki, Himsar Ambarita, Takahiro Koikeda, Masayuki Fukushi, Hiroshi Imano\*\*,  
Hiroyuki Sagayama and Yasuhiko Shinya

\*Muroran Institute of Technology, 27-1 Mizunoto-cho, Muroran 050-8585

The Aerodynamic performance characteristics of a horizontal axis wind turbine (HAWT) using by NACA44xx aerofoil series as known the detail date of  $C_L$ ,  $C_D$  were investigated theoretically by an analysis involving a combination of momentum, energy, and blade element theory by means of the strip element method. In this study, two approaches involving combination analysis are made use of, namely, the thrust-torque and thrust-energy methods. Although both approaches yield identical results, the latter is superior for evaluating the relationship of the kinetic energy of the flows on blades. The theoretical characteristics of the HAWT using the different types of the blades such as, blade dia., coard length, twist pitch angle, are discussed by reference to the power torque and thrust coefficient,  $C_p, C_q, C_T, C_{th}$ , and the tip speed ratio  $\lambda$  from the point of view of the optimum design and controlling.

Key Words: Energy, Momentum and Blade Element Combination Theory, Power Coefficient, Tip Speed Ratio

### 1. 緒論

21 世紀を迎え世界は本格的なエネルギー資源の有限性の問題に直面し、化石エネルギーに大幅に依存する現近代社会体制は深刻なる地球環境問題を併発し、私ども人類に必要な不可欠な資源 (土壌、水、生物の多様性) の崩壊を招来し環境と人類が共存できるエネルギー対策への転換が迫られている。これらを両立できるものとして環境に優しく再生可能な自然エネルギーへの選択があり、中でも近年、技術の飛躍の著しい風力発電は将来のエネルギー供給体制の一翼を担うものと期待される。近代的な翼型の特性を利用したプロペラ型風力タービンは代表的な風力変換機として期待を担うべきものであるが、ブレード翼のピッチ角、翼枚数、翼弦と半径の比 (アスペクト比)、それらを組合わせた総合的な最適性、風速変動に対する追従性など誘導発電機を駆動する定回転型風車においても重要な課題で在り、その解明が待たれるところである。

本研究では広範囲の翼  $Re$  数で  $C_L, C_D$  特性の判明している NACA44 系翼型を用いたプロペラ型風車に対して理論的な解析法としてのエネルギー・翼素複合理論を詳述して、これまでの運動量・翼素複合理論との違いを明らかにして理論解析を行い、本エネルギー法の利点を述べて、広範なる風車の要因因子の組合せからプロペラタービンの空力特性を論じ、この翼型を用いた場合のプロペラ型風車の最適性を明らかにするものである。

#### 使用記号

$a$ : 軸方向誘導速度,  $a'$ : 周方向誘導速度係数,  $l$ : ブレード長 [m]  
 $C_p, C_q$ : 出力係数, トルク係数,  $D$ : 抗力 [N],  $L$ : 揚力 [N],  
 $N$ : ロータ回転数 [rpm],  $P$ : 軸出力 [W],  $p_0$ : 大気圧 [Pa]  
 $Q$ : 軸トルク [N·m],  $R_0$ : ロータ半径 [m],  $t$ : 経過時間 [s]  
 $V_R$ : 軸方向速度 [m/s],  $V_w$ : 後流速度 [m/s],  $V_\infty$ : 風速 [m/s]  
 $\lambda$ : 先端周速度比,  $\theta_{tip}$ : 先端ピッチ角 [deg],  $\rho$ : 空気密度 [kg/m<sup>3</sup>]

### 2. エネルギー・運動量・翼素複合理論と無次元数

Fig.1 は風車径  $R_0$  を通過する流管モデルを示すが、図中には上流、風車、後流の各位置を添字 1,2,3 で表わし、下流側には風車のエネルギー吸収により、風速  $V_\infty$  から  $V_w$  に減速 (流管径は  $R_1, R_3$  に増大)、さらに空気流体が風車ブ

レードにトルクを与える反作用として、周方向回転速度  $V_T$  が与えられている。図下部には、任意  $r$  半径位置の捻り角  $\theta$  の翼素上の速度ベクトルを与えるが、迎え角  $\alpha$  が失速角以内であれば翼素上に作用する大きな揚力  $dL$  の方向余弦成分が強力なトルクを与えることを示している。周方向回転速度  $V_T$  と軸方向後流速度  $V_w$  と周、軸方向誘導速度係数  $a'$ ,  $a$  の間には以下の関係式が与えられる。

$$V_T = 2\omega r a', \quad V_w = (1-2a) \cdot V_\infty \quad (1), (2)$$

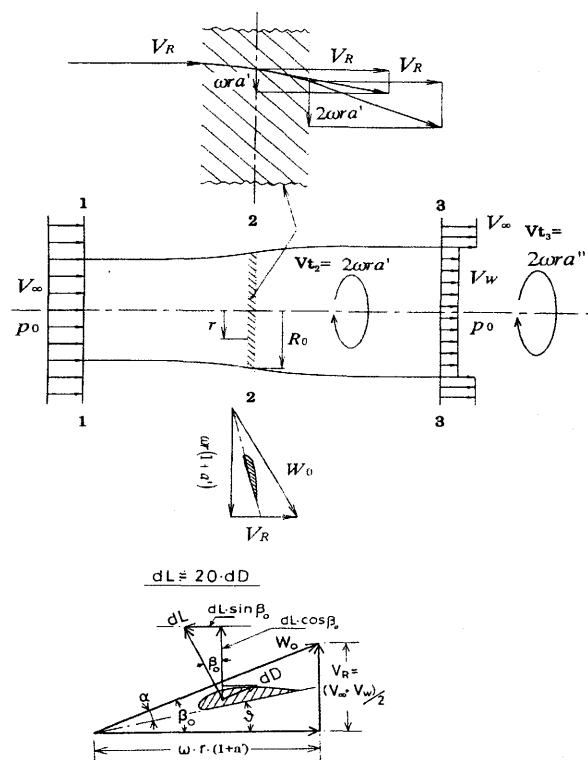


Fig. 1. Streamtube model of HAWT.

図下中の速度ベクトルにおいて、翼素の迎え角  $\alpha$  と捻りピッチ角  $\theta$ 、相対速度  $W_0$  の迎え角  $\beta_0 = \tan^{-1}(V_R/\omega \cdot r(1+a'))$  の間には以下の関係がある。

$$\alpha = \beta_0 - \theta \quad (3)$$

運動量・翼素複合理論は風力タービン前後の流管の状態から導出される運動量とエネルギーに関する理論と風力タービンの任意翼素上の揚力、抗力を考える翼素理論の2方向から、風力タービンのスラストおよび出力についての関係式を導出し、両式より定風速・定回転下でブレード半径  $r$  上の未知量  $a, a'$  を算定し、出力、スラストを求める現実的な解析法である。

軸方向の運動量変化が翼素上の揚力と抗力の軸方向成分の積分量に等しいとして以下の抗力の関係式が導出される。

$$Th_r = \rho \cdot \pi \cdot r_R^2 \cdot V_R \cdot (V_\infty - V_w) \\ = \frac{\rho}{2} \cdot \omega \cdot Z \cdot \int_0^r W_0^2 \cdot l(r) \cdot (C_L \cdot \cos \alpha - C_D \cdot \sin \alpha) \cdot dr \quad (4)$$

風車前後の速度エネルギー差(回転エネルギー含む)が翼素上に作用する揚力と抗力の回転方向成分のトルクに風車ブレードの回転角速度  $\omega$  と翼枚数  $z$  の積に対応するものとして、以下のエネルギーと出力の関係式が導出される。

$$L_{out} + L_{dis} = \rho \cdot \pi \cdot r_R^2 \cdot V_R \\ \cdot \left( \frac{V_\infty^2}{2} - \frac{V_w^2}{2} - r_R^2 \cdot \omega \cdot a'^2 \cdot \frac{V_w}{V_R} \right) \\ = \frac{\rho}{2} \cdot \omega \cdot Z \cdot \int_0^r W_0^2 \cdot l(r) \cdot (C_L \sin \alpha - C_D \cos \alpha) \cdot r \cdot dr \quad (5)$$

エネルギー式中、以下の翼素の抗力による散逸エネルギー項を考慮することが最も重要なことである。

$$L_{dis} = \frac{\rho}{2} \cdot Z \cdot \omega \cdot \int_0^r W_0^3 \cdot l(r) \cdot C_D \cdot dr \quad (6)$$

未知数は風力タービンの後流速度  $V_w$  と周方向誘導速度係数  $a'$  の2つであるとして、スラスト、出力(トルク/エネルギー)について各々方程式を組み立て、この連立方程式より風力タービン前後の流体の状態と性能特性を求める。ここで風車ブレード先端部( $R_0$ の3%)は先端渦の生成のため抗力  $C_D$  のみ考慮、 $C_L$  は零としている。

尚これまでの、運動量・翼素複合理論はブレードに作用する空気流の角運動量の時間的変化が翼ブレードのトルクになるものとして以下のように導出されている。

$$\int_{R_r}^R 4\pi\rho_\infty(1-a) \cdot V_\infty \cdot \omega \cdot a' \cdot r^3 \cdot dr \\ = \pi\rho_\infty(1-a) \cdot a' V_\infty \omega (R^4 - R_r^4) \\ = \frac{\rho_\infty}{2} \cdot Z \int_{R_r}^R l(r) \cdot W_0^2 (C_L \sin \beta_0 - C_D \cos \beta_0) \cdot r \cdot dr \quad (7)$$

スラスト式(4)とトルク式(7)による解析結果は、エネルギー式(6)とスラスト式(4)による結果と関係式が全く異なるにも関わらず、同一の結果となる。

本研究では風力タービンの出力  $P$  [W] は出力係数  $C_p$ 、トルク [N·m] はトルク係数  $C_q$ 、回転数  $N$  [rpm] は風速  $V_\infty$  に対する先端周速度比  $\lambda$  を以下のように無次元化した。

$$\lambda = \frac{2\pi R_0 N}{60 V_\infty}, \quad C_p = \frac{P}{0.5\rho\pi R_0^2 V_\infty^3}, \quad C_q = \frac{Q}{0.5\rho\pi R_0^3 V_\infty^2} \quad (8)$$

### 3. 解析結果

#### 3.1 $z \cdot l = 1$ 一定条件下翼枚数 $z$ による風車空力特性

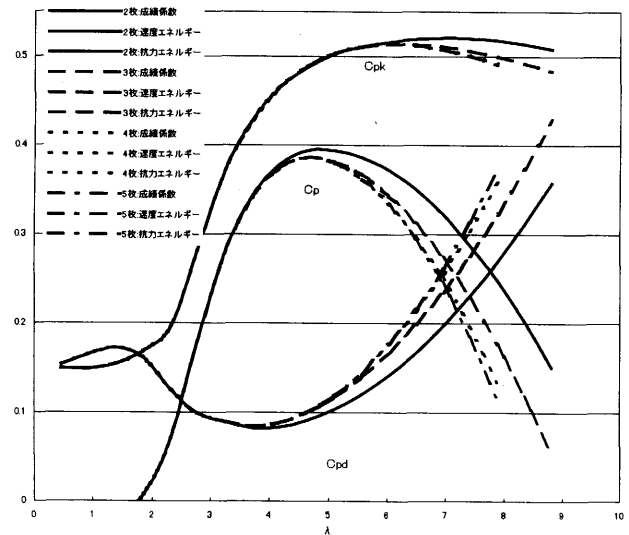


Fig.2 Kinetic Energy and Drag Dissipation for 2,3,4,5 Blades at Constant  $l \cdot z$

風力タービンを論ずる場合、まずブレード枚数の空力特性に与える影響が一つの問題となるが、その因子はスラスト・エネルギー式(4),(5)より矩形翼では  $z \cdot l$  である。Fig.2 は本エネルギー翼素複合理論による、風速 4.5 [m/s] ブレード長さ 0.415 [m]、先端ピッチ角 2 [deg]、根元ピッチ角 26 [deg]、翼枚数  $Z$ 、先端翼弦長  $l_{tip}$ 、根元翼弦長  $l_{root}$  として  $Z \cdot l_{tip} = 0.1$ 、 $Z \cdot l_{root} = 0.16$  の条件で翼枚数 2, 3, 4, 5 枚の成績係数と風車前後の速度エネルギー差、さらに式(4)で表される抗力エネルギーを式(8)と同様の無次元化処理をして先端周速度比に対する関係を表すものである。低回転域では翼枚数の影響はほとんど見られないが、翼枚数が多くなるほど抗力エネルギーが回転数の増大と共に大きくなる。風車前後での速度エネルギー差は  $\lambda = 4$  付近で最大となる。従ってこの域で最も風車ブレードのエネルギー吸収が大きく、2枚翼の場合は高入域で速度エネルギー差が一定となり、5枚翼の場合の速度エネルギー差が低減している。これより5枚翼の方が高回転域で高性能と考えられる。しかし、本論のエネルギー解法では、式(4)で表される抗力散逸エネルギーを考慮している結果、高回転域では5枚翼の場合、抗力エネルギーは著しく増大する。そして、低回転域と高回転域で散逸抗力エネルギーは増大している。これは低回転域では失速によって抗力係数が増大し、高回転域では著しく増大する合成速度  $W_0$  の三乗的な効果による。エネルギー式の関係から風車前後の速度エネルギーと抗力エネルギーの差が風車出力であり、図から速度エネルギーと抗力エネルギーの差が成績係数に対応している。図より、2枚翼が最も高性能で5枚翼が最も性能が悪い。しかし、耐振動性と風の方向追従性から今日は3枚翼が推奨されている。図中、低回転域  $\lambda = 2$  から  $\lambda = 4$  の急激な効率低下を利用する出力制御法を固定ピッチ失速出力制御法と称し、簡易で安価な風車に利用されている。尚、式(4)と式(7)によるトルク法では成績係数のみの結果しか与えられず、速度エネルギーと抗力エネルギーの関係がわからない。

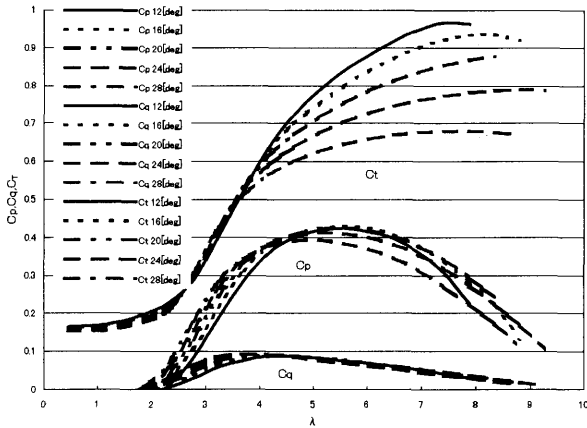


Fig. 3 Aerodynamic Characteristic of  $C_p, C_q, C_t$  depend on Blade Pitch Root Angle  $\theta_{root}$

3.2 根元ピッチ角  $\theta_{root}$  による風車空力特性

Fig.3は先端ピッチ角 2 [deg],先端翼弦長 0.05 [m], 根元翼弦長 0.08 [m],ブレード長さ 0.415 [m],風速 4.5[m/s]の条件下で、根元捻り角を 12 [deg]から 28 [deg]まで 4 [deg]ごとに変えた場合の成績係数  $C_p$  と先端周速度比  $\lambda$  の関係を示す。図の結果から根元ピッチ角が 16[deg]から 20[deg]で最も最も高性能となっている。特に低回転域と高回転域での出力増加が著しい。低回転域では捻りピッチ角が大きな場合、ブレード先端部は失速するが根元部は失速に至らず回転力を保持することになる。低捻りピッチ角の場合は低回転域ではブレード根元部の失速が早まり劣性能となる。根元の絶対速度  $W_0$  の流入角が高回転域でも増大し、低捻りピッチ角の場合根元部で失速が起こり性能低下の主因となっている。高捻り角の場合は高回転域でブレード根元部において失速が起こり性能低下の原因となる。図中にトルク係数  $C_q$  を与えるがプロペラ風車のトルクは最大回転の 2/3 上に最大トルクが現れ、起動トルクは微小である。同様にスラスト係数  $C_t$  も与えてあるが、 $\theta_{root}=28[deg]$ の場合最も小さく倒壊からは安全となる。これより、翼の捻り角は大きすぎても小さすぎても良くない。使用する回転数を見極めて捻り角を決めると良い。図より、捻りピッチ角を大きくする程、起動性が増すが、高回転域での性能が低下している。今日の大型風車は低捻りピッチ角としているが、

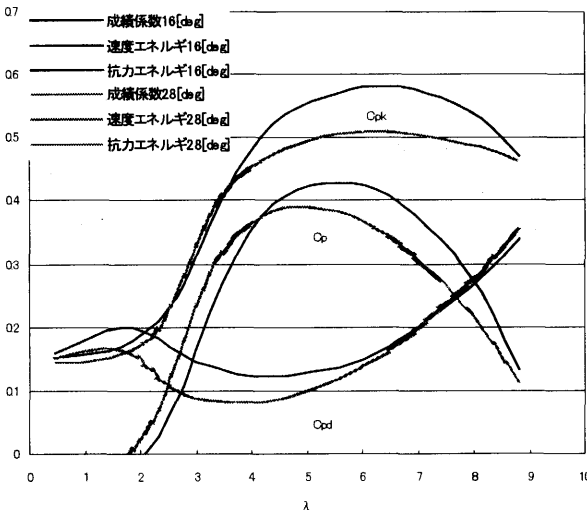


Fig.4 Kinetic Energy and Drag Dissipation for the case of  $\theta_{root}=16,28[deg]$

可変ピッチ出力制御方式ではピッチ角に対する制御が敏感になり、強風速変動に対して過回転しないことと、強風時のフル・フェザリングの適性など、風車に最も基本的な要件を満たしているため  $\theta_{root}-\theta_{tip}=15[deg]$ 前後の低捻りピッチ角としている場合が多い。

Fig.4はFig.3において高性能である 16[deg]と劣性能の 28[deg]に注目し、速度エネルギー、抗力エネルギー、成績係数と先端周速度比の関係を表したものである。16[deg]は低回転域での抗力エネルギーが大きく、28[deg]に比べ起動性は低い。しかし高回転域に移行する程 16[deg]は速度エネルギーが増加し高性能となっている。28[deg]は速度エネルギーの増加が小さく、高回転域になると抗力エネルギーが増し低性能となっている。

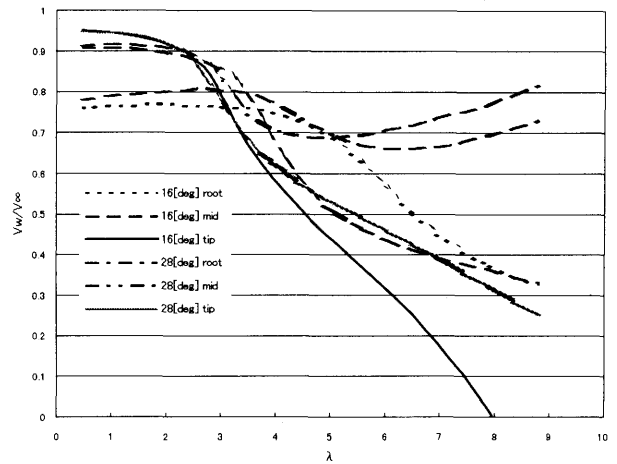


Fig.5 Wake Behaviors for  $\theta_{root}=16,28[deg]$

Fig.5は前述の 16[deg]と 28[deg]の場合に対するブレード先端、中部、根元部後流速度と先端周速度比の関係を表したものである。16[deg]における後流速度は高い先端周速度比で、先端、中部、根元部共に速度低減エネルギー吸収が高いが、先端部の  $V_w$  は高回転域で逆流しており問題となる。それに比べ 28[deg]の場合、高回転域で速度エネルギーの吸収が適正で、先端部での逆流は見られず、出力上安定、安全と考えられる。これより 20~28[deg]根元捻り角の場合が出力は低くても設計上優れていると考えられる。

3.3 先端ピッチ角  $\theta_{tip}$  による風車空力特性

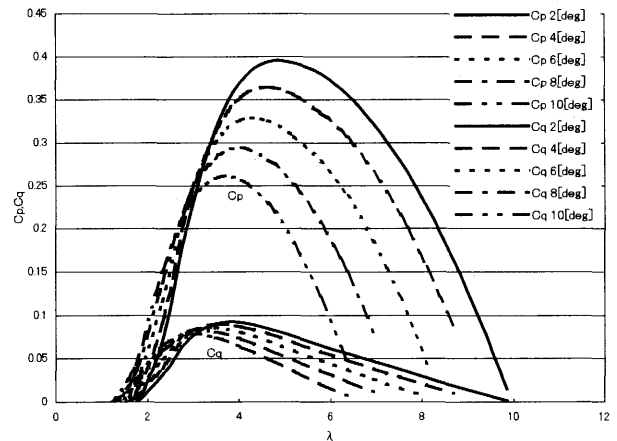


Fig.6 Aerodynamic Characteristics of  $C_p, C_q$  depend on Rotor tip Angle  $\theta_{tip}$

Fig.6 は先と同一条件で、根元ピッチ角を 26 [deg]で、先端ピッチ角を 2 [deg]から 10 [deg]まで 2 [deg]ごとに変えた場合の成績係数と先端周速度比の関係を表したものである。先端ピッチ角 2 [deg]が最高の性能となり、先端ピッチ角を大きくするほど性能は低下していく。Fig4 の結果と併せ、根元のピッチ角よりも先端ピッチ角の方が性能に及ぼす影響が大きいことがわかる。先端ピッチ角が大きな場合、ブレードの根元だけでなく先端部も高回転で失速を起こして高回転時の性能低下の要因となっている。

### 3.4 風車径 $R_0$ による風車出力特性

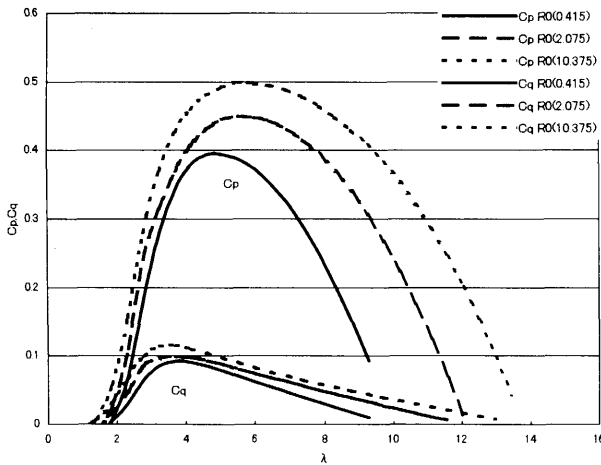


Fig.7 Aerodynamic Characteristic of  $C_p, C_q$  depend on Rotor  $R_0=0.415, 2.075, 10, 375$  [m]

これまで風車径 0.83m  $\phi$  (ブレード径 0.415m) の実験条件の場合に限定し、関連する翼枚数  $z$  と先端、根元ピッチ角などの影響を詳細に論議してきた。Fig.7 は実験条件のブレード径 0.415 [m], 先端翼弦長 0.05 [m], 根元翼弦長 0.08 [m], 先端ピッチ角 2 [deg], 根元ピッチ角 26 [deg] を基準に翼弦長とブレード径を 5, 25 倍に拡大した場合の成績係数  $C_p$  と先端周速度比  $\lambda$  の関係を与える。図より、風車が大型になるほど成績係数が向上し回転域が増大している。本来、無次元化による成績係数と先端周速度比の関係は一般化されたものとなる。しかし、NACA44 系の翼型は翼レイノルズ数によって抗力係数  $C_D$ 、揚力係数  $C_L$  が著しく変わり、翼レイノルズ数の増大と共に  $C_L$  は増大し、 $C_D$  は減少する。同一風速条件でも大型風車は翼レイノルズ数が増大し、揚力が増え抗力が減少するため風車性能が向上する。このことより模型風車の実験結果から大型風車の性能を予測することは大きな問題である。実際、風車径 20.75m  $\phi$ , 根元、先端部翼弦長 2m, 1.25m 相似条件の風車は翼弦長が過大で、耐強度許容と製造コストの低減の観点から、今日の大型風車はかなり細身の先細ブレードとなるため、大型化によるこれ程の性能向上は期待できない。勿論、中型風車において太身のブレードとすることはかなりの性能向上が期待できることになる。

### 3.5 本実験条件で $R_0, \theta_{tip}, \theta_{root}$ , 翼弦長一定とし、翼枚数を増加させた場合の空力特性

Fig.8 はブレード径、翼幅、先端ピッチ角、根元ピッチ角共に先と同じ条件で翼幅を変えずに翼枚数を増やし、その時の成績係数  $C_p$ 、トルク係数  $C_q$ 、スラスト係数  $C_T$  と先端周速度比  $\lambda$  の関係を表したものである。

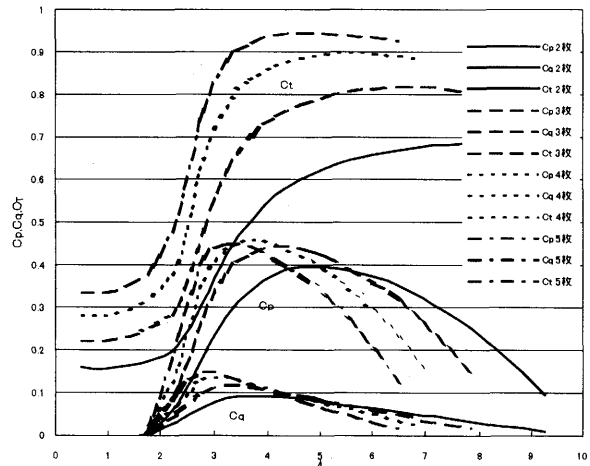


Fig.8 Kinetic Energy and Drag Dissipation depend on 2, 3, 4, 5 Blades at constant  $l_{tip}, l_{root}$  and  $\theta_{tip}, \theta_{root}$

成績係数は、2 枚翼が最も低く、3 枚翼とすればかなり向上し、4、5 枚翼が近い値となっている。また、翼枚数が多いほど最大成績係数は低い先端周速度に移り、翼枚数が少ないと高い先端周速度比で最大成績係数となり、出力曲線も広回転域となっている。トルク係数については、5 枚翼が最も高い値を示し、翼枚数を減らしていくに従って低下している。また 5 枚翼では低回転域での出力が大きい値を示している。スラスト係数についても同様に、5 枚翼で最も高い値となり、2 枚翼で最も低い値となっている。低回転で運転する風車なら翼枚数の多くすることで高いトルクを得ることができるが、スラストが大きくなり風車に強い力が加わり倒壊の危険性が増大する。この事より 3 枚翼が出力を得られる先端周速度比の範囲も広く、スラストも比較的小さくトルクも得られ、生産コストやバランスの上からも良い風車であると考えることが出来る。なお本実験条件では翼幅を一定としているが、Fig.2 に示す様に翼枚数を増やした場合に翼幅を小さくすればスラストを小さく、ほぼ同一出力特性とすることが出来る。

### 4. 結論

本研究は主にエネルギー、運動量、翼素複合理論による揚力係数、抗力係数が広いレイノルズ数で既知の NACA44xx 翼型を用いたプロペラ風力タービンの出力、トルク、抗力及び後流速度などの空力特性を解析的に解明し数値解析を行い、広範囲の要因条件の下で適正な風車翼の在るべき形を提示したものである。

#### 参考文献

- (1) Koki Kishinami, et al "Theoretical and experimental study on the aerodynamic characteristics of a horizontal axis wind turbine", Energy, vol.30 (2005), pp2089-2100.
- (2) 鶴喰正人, 岸波紘機, 伊庭野洋, 他 3 名 "寒冷地用風力タービンに関する基礎研究", 第 9 回環境工学総合シンポジウム講演, No.99-12(1999), pp.409-412.
- (3) 乗田雅幸, 尾山兼一, 岸波紘機, 他 3 名, "運動量, 翼素理論による風力タービン性能特性の研究", 環境工学総合シンポジウム講演, No.01-12(2001), pp.460-463