

420 NACA44 系翼を用いたプロペラ型風車の空力特性

(ねじりピッチ角による影響とスロットを付けた場合)

Aerodynamic Characteristics of H. A. Wind Turbine Employing by NACA44xx Aerofoil Series
(Effects of Twist Pitch Angle and Slotted Blade on Performance)

○ 准 松下 知佳 (㈱コーノ), 正 岸浪 紘機 (室蘭工大)
正 鈴木 淳, 小池田 岳洋, 福士 眞之 (室蘭工大)
伊庭野 洋 ((財)室蘭テクノセンター)

Tomoyoshi Matsushita, Koki Kishinami, Jun Suzuki, Takahiro Koikeda, Masayuki Fukushi* & Hiroshi Ibano
*Muroran Institute of Technology, 27-1 Mizunoto-cho, Muroran 050-8585

Aerodynamic performance characteristics of the propeller type of HAWT were investigated theoretically by the combination analysis of momentum, energy, and blade element theory, and experimentally by a subscale model. In this study, three different types of blades with NACA44 aerofoil and slot arrangement were examined by a subscale experiments and numerical results under the condition of open typed wind tunnels with wind stream 0.8-4.5 m/s, i.e., tapered rectangular blade with different twist pitch angle and with slot arrangement. The obtained aeronautical characteristics by experiment and analysis employing the three different blades were discussed by reference to power and torque coefficients C_p , C_q and tip speed ratio λ , and with regard to starting or acceleration dynamic characteristics.

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

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の崩壊(土壌、水、生物の多様性)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、技術的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、広大な平野と定常的偏西風に恵まれた欧州に比べ急峻な山脈が多く突風、渦流、巻込流などを伴う日本の風況下では本来の性能に達せず、風車ブレードの耐寿命性の著しい低下などが指摘され、失速・突風下において回転する風車ブレード翼に対して何らかの対策が必要である。しかも、東洋ならではの台風や突風対策も欠かせない。ロータ回転/非回転時に突風が発生すると、ピッチ制御機構が追従できずブレード自体の過大な揚力増大あるいは過大な抗力によってブレードないし制御機構の損傷を誘引して風車の性能と寿命を低減させる。

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の模型実験を行い、ブレードねじりピッチ角の性能特性に与える効果を問題として取り上げ⁽¹⁾、さらに流れの剥離を遅らせる効果のあるスロット⁽²⁾をブレードに設置し、スロットを有する NACA44 翼風車、有しない同一条件の風車を対象に、定風速下における非回転状態からの起動特性、風速を急上昇させた時の追従特性を調べ、さらに定風速定常回転時における出力特性を調べ、スロットが風車の性能に及ぼす影響を明らかにするものである。

使用記号

A, B, C: $V_\infty=4.0, 4.3, 4.5$ [m/s]における性能
 a' : 周方向誘導速度係数, C_p, C_q : 出力係数, トルク係数
 D : 抗力 [N], L : 揚力 [N], l : ブレード長 [m]
 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_∞ : 風速 [m/s]
 λ : 先端周速度比, θ_{tip} : 先端ピッチ角 [deg], ρ : 空気密度 [kg/m³]

2. 運動量・翼素複合理論と無次元数

運動量・翼素複合理論⁽¹⁾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、風力タービンスラストおよび出力についての関係式を導出し、2式が定風速・定回転下では互いに等しいものとして出力、スラストを求める現実的な解析法である。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。

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

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

ここで $R_0=0.43$ [m], $\rho=1.247$ [kg/m³]とした。

3. 実験装置および実験方法

Fig. 1 に実験装置概略を示す。本装置は送風部および風力タービン部より構成されている。送風部はインバータ制御の可変速三相 400W 交流モータに直結された径 1.2 [m Φ] の二枚型プロペラの駆動により、径 88 [cm Φ] の風洞出口に設置された整流版を通して一様の風速を提供する。この風速は熱線風速計を用いて測定する。擬似負荷を与えるトルクモータに直結された風力タービンは軸トルク、回転数検出器によって A/D 変換され PC に伝送される。PC では測定値をファイルに記録するほか、ディスプレイにリアルタイム表示する。風洞出口から風車ロータまでの距離は 1.2 [m] 以上とした。

Fig. 2, 3, 4 にブレードの詳細を示す。これらは全て NACA 44 系の翼型を用い、ねじりピッチ角 16° としたブレードを TYPE A, 22° としたものを TYPE B、それにスロットを設置したものを TYPE C とする。両者ともブレード長 l は 0.4 [m] であり、翼弦長が根元で 0.08 [m]、先端で 0.05 [m] とするテーパ翼である。TYPE A のブレード各位置における翼型は 0 [%] l , 50 [%] l (0.2 [m]), 100 [%] l (0.4 [m]) の各位置でそれぞれ NACA 4420, 同 4415, 同 4412 となって

いる。一方 TYPE B では、0 [%] での翼型は NACA 4421 とし、50 [%]、100 [%] での翼型は TYPE A と同一とした。

Fig. 4 に TYPE B と同形状のブレードにスロットを付設した TYPE C についてスロット加工部の詳細を示す。加工範囲は 55 [%] (0.22 [m]) から 75 [%] (0.3 [m]) までとした。

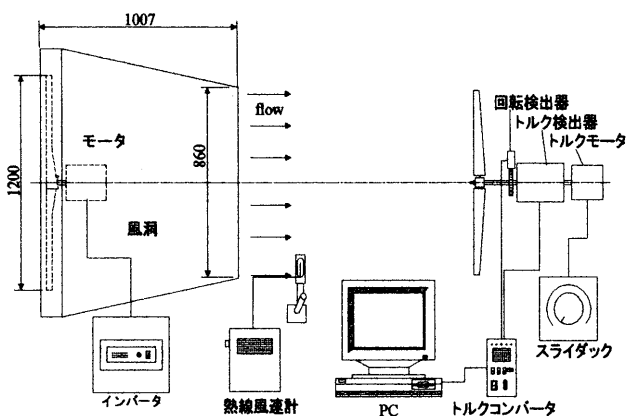


Fig. 1 Schematic Diagram of Experimental Apparatus

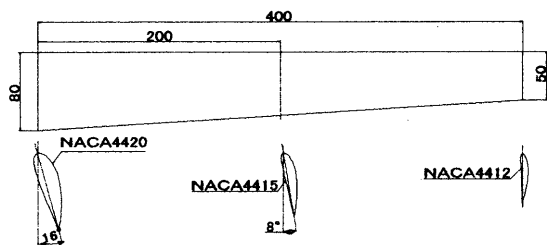


Fig. 2 Details of TYPE A with NACA44xx Airfoils

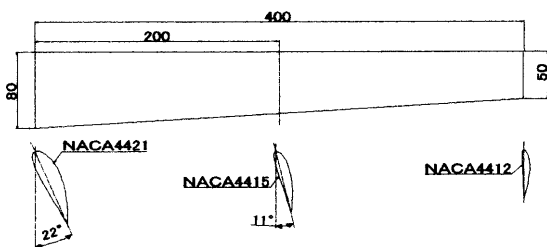


Fig. 3 Details of TYPE B with NACA44 Series Airfoils

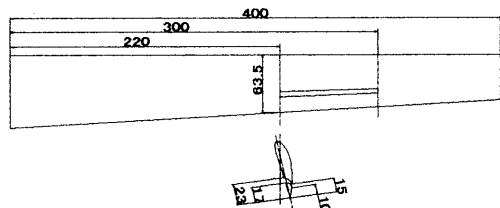


Fig. 4 Detail Configurations of TYPE C with Slot

(1) 起動性能実験 (Type B vs Type C)

測定対象の風速 V_∞ が 4.0, 4.3, 4.5 [m/s] における先端ピッチ角 θ_{tip} が 0, 1, 2, 4, 6, 8, 12, 16 [deg] の 24 条件とした。所定の風速下において、停止状態から定常回転に移行するまでの経過時間と回転数 N を測定した。

(2) 風速追従性能実験 (Type B vs Type C)

測定対象のパラメータは θ_{tip} のみ、(1) と同じ 8 条件とした。定常回転時にインバータ制御により V_∞ を 3.5 [m/s] から 4.0 [m/s] に急上昇させ、定常になるまでの経過時間、回転数を測定した。

(3) 定風速性能実験 (Type B vs Type C, Type A vs Type B)

測定対象のパラメータは(1)と同じ 24 条件とした。所定の V_∞ , θ_{tip} のもと、始めに無負荷状態で定常回転時の N および軸トルク Q を測定した。測定はこの後一定増の負荷トルクを与えて回転数 N が定常になった所で行い、 N が止まるまで続行した。Type A と B の測定対象のパラメータは風速 V_∞ を 4.0 [m/s] とし、先端ピッチ角 θ_{tip} を 1, 3, 5, 7 [deg] の 4 条件とした。測定方法は同一である。

4. 実験結果および考察

4.1 ブレードねじりピッチ角の性能に及ぼす影響

本研究で行った運動量・翼素複合理論を適用した解析は、実験とほぼ同じ条件とし、ブレード根元翼弦長ならびに先端翼弦長がそれぞれ 0.08 [m], 0.05 [m] で NACA 翼型、ロータ半径を 0.43 [m]、風速を 4.0 [m/s] に設定した。本論ではねじりピッチ角の風速変動に対する追従性に注目して、ねじり角は 16 [deg], 22 [deg] の 2 種類、先端ピッチ角 θ_{tip} は 1, 3, 5, 7 [deg] に設定した。

Fig. 5, 6 に翼素・運動量解析による出力特性およびトルク特性を示す。縦軸には各々 C_p , C_q ととり、横軸は両者とも λ をとっている。Type A, B をそれぞれ実線、破線で表した。括弧内の数字は先端部ピッチ角 θ_{tip} を表す。Fig. 5 は C_p の最大値 C_{pmax} はねじりピッチ角の小さい方が上回り高性能であることを示している。同時に最大トルク C_{qmax} 上の λ は Type B の方が低回転域に移行する。一方、Fig. 6 では C_q の最大値 C_{qmax} は TYPE A, B とともに僅かの差しかなくほぼ等しいと見ることができ、ねじり角が大きい方が C_{pmax} あるいは C_{qmax} を小さい λ で出力することが判明する。また、Type A の場合 $\theta_{tip} = 1, 3$ [deg] において、Fig. 5, 6 のどちらも $\lambda = 9$ の点で C_p , C_q が逆転していることが確認できる。すなわち、 $\lambda > 9$ の範囲では先端ピッチ角を 1, 3 [deg] に増加または減少させても出力、トルクを低下できないことより、可変ピッチ制御には不適である。一方、ねじり角を大きくした Type B はこの現象が皆無であり、最大トルクが低入域に移行した分突風に対する追従性が向上する。

Fig. 7 に模型実験により得られた出力特性を、Fig. 8 にトルク特性を示す。破線は Fig. 5, 6 に示したねじり角 22 [deg] の解析値である。TYPE A と TYPE B とでは、ブレード根元の翼厚が翼弦長に対して 1 [%] 後者の方が大きいだけで他の寸法、翼型は同一であり、ねじり角のみが大きく異なる。ねじり角が 16 [deg] の TYPE A は、 $\theta_{tip} = 1, 3$ [deg], $\lambda = 4$ から 6 の範囲で C_p および C_q がほぼ等しくなった。一方、TYPE B の実験値は、 C_p あるいは C_q が逆転したり近似したりしないことが Fig. 7, 8 の結果から明らかである。しかも出力曲線、トルク曲線は 2 [deg] ずつ θ_{tip} を変化させていることに対応して等間隔になっていることが確認でき、実験条件の範囲について先端ピッチ角に伴う出力、トルクの制御が可能であると言える。

これまでの研究から、NACA 翼型は可変ピッチ制御翼には不適であると考えられ、LS 翼と比較して可変ピッチ制御には LS 翼の方が向くと結論づけられてきた。過去の研究で用いたブレードのねじり角は 15 [deg] 前後であった。しかし、本論で初めてねじり角を 22 [deg] と大きくしたことで、同じ NACA 翼型でも上述のような結果の違いを見出すことができ、風車の出力、トルク性能にはねじり角が大きく支配することが判明した。

4.2 スロット付ブレードの性能に及ぼす影響

(1) 起動性能

Fig. 9 に定常化するまでの起動特性の時間的変化 ($\theta_{tip} = 0, 16$ [deg]) を示す。縦軸に回転数 N 、横軸に経過時間を

とっている。図中の a, b, c はそれぞれ $V_\infty=4.0, 4.3, 4.5$ [m/s] での風速条件を表す。図より、回転数 N が時間にほぼ比例して上昇する領域の存在が認められる。この領域において、同一風速下では θ_{tip} が 16 [deg] の方が 0 [deg] の場合より立ち上がり上昇が早くなり、回転数が定常になるまで要する時間が短い。これより先端ピッチ角 θ_{tip} が高い方が起動性が良いと言える。一方、定常到達回転数は $\theta_{tip}=16$ [deg] の方が大きく減少している。また、 θ_{tip} が同一の設定であれば V_∞ の上昇に伴い立ち上がりは早くなる傾向が見られる。Fig. 9 の a, b, c それぞれについて、TYPE C は TYPE B より回転数 N の上昇が僅かに早くなっており、ブレードにスロットを付設することで起動性が若干向上できたと言える。

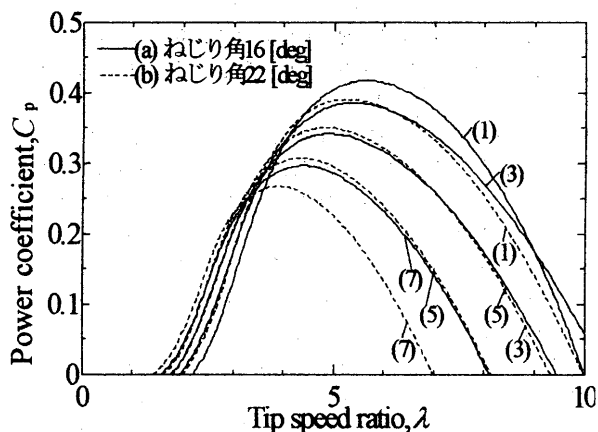


Fig. 5 Power Coefficient ($V_\infty=4.0$ [m/s])

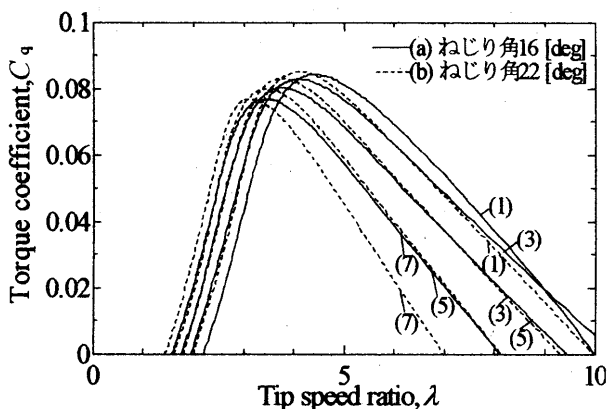


Fig. 6 Torque Coefficient ($V_\infty=4.0$ [m/s])

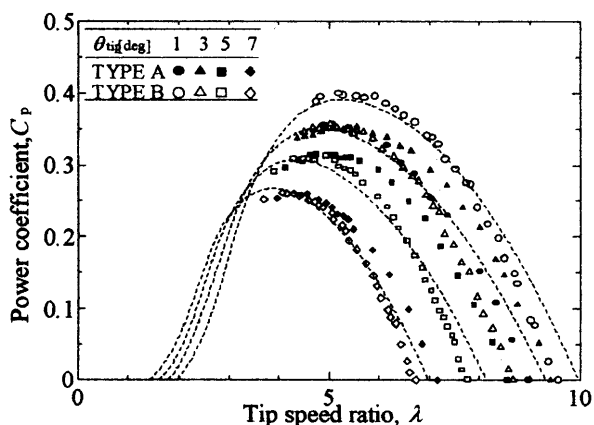


Fig. 7 Experimental Power Coefficient ($V_\infty=4.0$ [m/s])

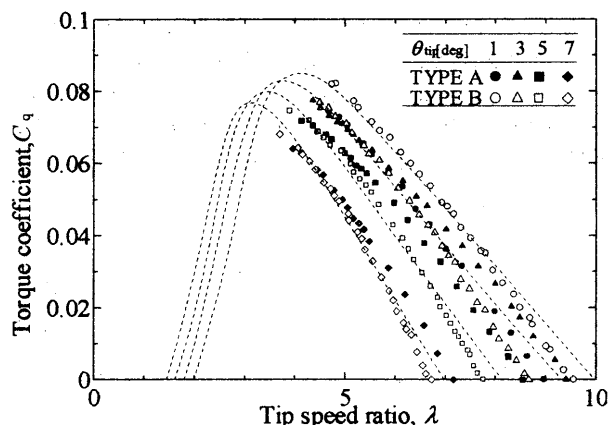


Fig. 8 Experimental Torque Coefficient ($V_\infty=4.0$ [m/s])

(2) 風速追従性能

Fig. 10 に V_∞ を 3.5 [m/s] から 4.0 [m/s] に約 1 [s] かけて急上昇させた時の N の変化を示す。縦軸、横軸は Fig. 9 と共通である。括弧内の数字は θ_{tip} を指す。起動特性と同様、スロットを有する TYPE C は全ての θ_{tip} において定常回転数が低下しており、起動実験ほどのスロットの効果は認められない。これらの測定値より回転数定常化所要時間 t_s を調べ、Fig. 11 に θ_{tip} に対する変化として示す。 θ_{tip} の増大に伴って所要時間 t_s が小さくなることに加え、TYPE C では TYPE B より t_s が低減されており、スロットが風速追従性の向上に寄与している。

$\theta_{tip}=0, 16$ [deg] の場合について TYPE B, TYPE C における t_s の差を TYPE B の場合を基準に低減割合を求めると、 $\theta_{tip}=0$ [deg] の場合約 24 [%], $\theta_{tip}=16$ [deg] の場合約 15 [%] となり、 θ_{tip} の増大に伴ってこの値が小さくなる傾向が見られる。そのため、 θ_{tip} の増大によってスロット自体が追従性向上に寄与する効果が少なくなると考えられる。

(3) 定風速性能

Fig. 12, 13 は Type B, C の風車の風速 $V_\infty=4.5$ [m/s] における実験値出力特性と、トルク特性を先端ピッチ角 $0^\circ, 8^\circ, 16^\circ$ 条件で示す。また、 θ_{tip} が高いほど C_{pmax} とに対応する λ 値が低下し、スロットの効果は低下する。スロットを設置した TYPE C は同一条件のスロットなし Type B に対し出力、トルク共に同様の傾向が見られる。これより、スロットを設けた場合には先端ピッチ角が小さくなるほど抗力が増加していることが確認できる。

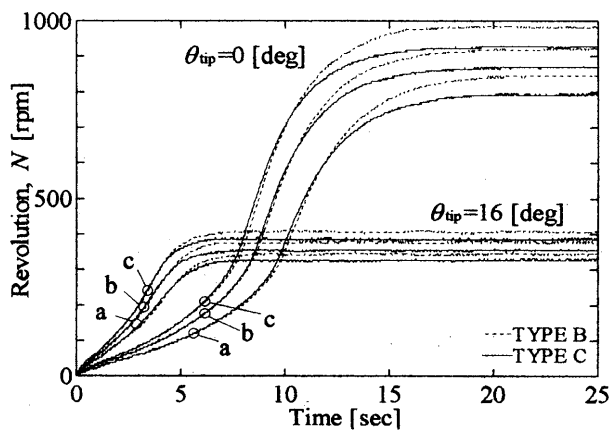


Fig. 9 Characteristics of ($\theta_{tip}=0, 16$ [deg])

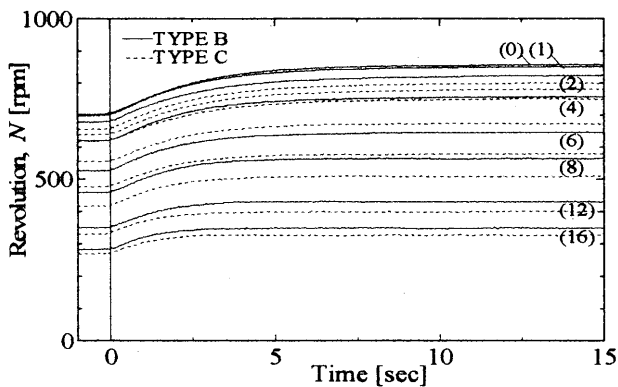


Fig. 10 Characteristics of ($\theta_{tip}=0, 16$ [deg])

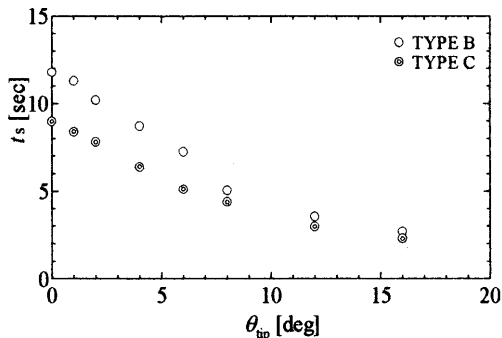


Fig. 11 Required Time t_s at Steady Run

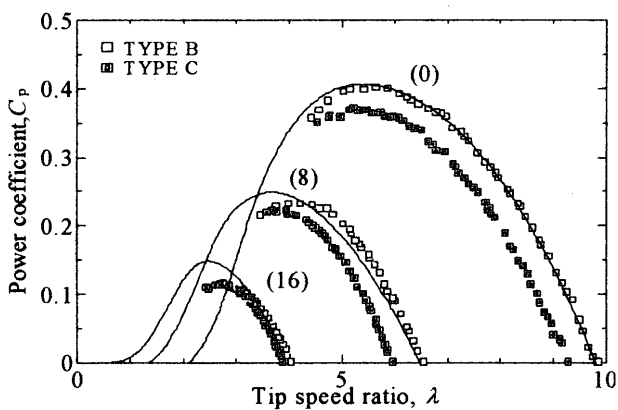


Fig. 12 Experimental Power Coefficient ($V_\infty=4.5$ [m/s])

本論では主に C_L, C_D 特性の判明している NACA44 系翼を用いた風車翼に異なるねじりピッチ角とスロットを設置した場合の性能特性を述べた。Fig. 14 には新しく開発した新型翼の外形を示す。根元部で 25%、先端部で 13% の翼厚である。この翼型を用いた同一形状の風車ブレードによる実験結果を略同一条件の NACA44 翼型の TYPE B の結果と比較した出力特性を Fig. 15 に示す。これより新型翼は厚翼にもかかわらず、抗力係数が小さく、最高出力で 5%、最大

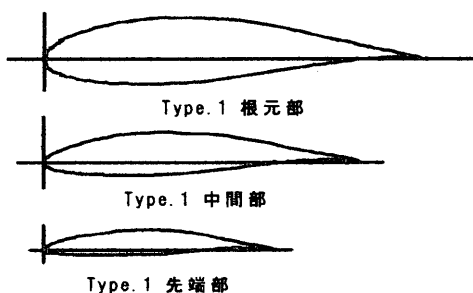


Fig. 14 New Proposed Aerofoil

回転で 22% 向上する結果を得ている。

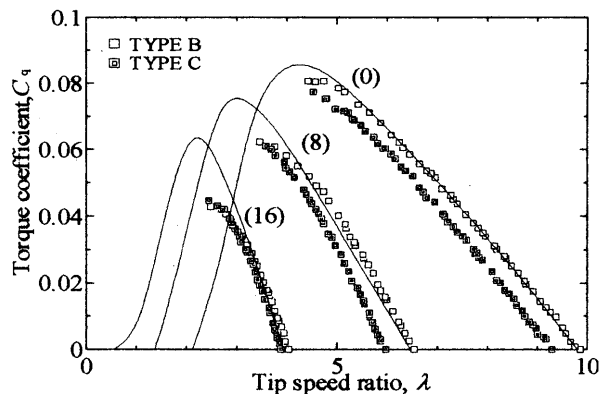


Fig. 13 Experimental Torque Coefficient ($V_\infty=4.5$ [m/s])

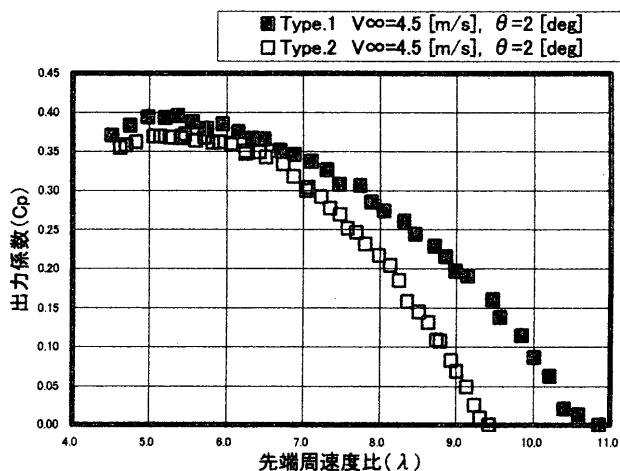


Fig. 15 C_p Characteristic of NACA44 and New Proposed Blades

5. 結論

本研究において以下の結論を得た。

- (1) 先端ピッチ角に伴い、出力係数とトルク係数が大きく変動する。一般論として NACA 翼型は可変ピッチ制御翼には適さないと言われているが、本研究のようにブレードのねじりピッチ角を大きくすると、若干性能は低落するが起動と突風に対する追従性が向上し、しかも可変ピッチ制御に適用できる見込みがある。日本の風況下でも風力タービン本来の性能の発揮が期待できる。
- (2) スロット付きブレードを有する風車は有しない風車に比べ起動性能、風速追従性能のどちらも良好であった。ただし、回転数を低下させた時の動特性は見えていないため、風速の上昇に対してのみ言える。また、スロットを設けた場合には抗力が増大するため先端ピッチ角が小さな適正出力時最大出力および最大トルクが低下するとともに出力時の先端周速度比が低下する。スロットを附加するより先端ピッチ角を大きくする機構のほうが追従性の向上に効果的である。

参考文献

- (1) Kishinami, K. et al., "Theoretical and Experimental Study on Aeronautical Characteristics of HAWT" Proc. of the 5th Inter. Symposium on C&E2002 and the 4th Inter. W.E.S. Conf.2002, pp.108-112.
- (2) 岸浪、鈴木、杉山、高桜、伊庭野、"プロペラ型風力タービンの実験的・理論的な基礎研究"、日本機械学会第 13 回環境工学シンポジウム講演 "、No03-10, 2003, pp.438-441.