

445 プロペラ型風力タービンの実験的・理論的な基礎研究 (風車ブレード NACA44 系翼に噴出しフラップを装着した場合)

Theoretical and Experimental Study on Aerodynamic Characteristics of H. A. W. T.
(In case of NACA44 series Blade equipped with a Single-slotted Flap)

岸浪 紘機, 鈴木 淳, 杉山 弘, 高櫻 修平 (室蘭工大)
小西 聡史 ((株) 富士通システムリソリューションズ)
伊庭野 洋 ((財) 室蘭テクノセンター)

Koki Kishinami, Jyun Suzuki, Satoshi Konishi, Syuhei Takazakura, Hiromu Sugiyama
& Hiroshi Imano, Muroran Institute of Technology, 27-1 Mizumoto-cho, Muroran 050-8585

Aerodynamic performance characteristics of the HAWT were investigated theoretically by the combination analysis of momentum, energy, and blade element theory by using the strip element theory, and experimentally by a sub-scale model, by considering the angular rotation of working flow. In this study, no twist rectangular blade with NACA44 series aerofoil were examined by the analytical results under the condition of open typed wind tunnels with wind stream 0.8~4.5 m/s and outlet ducts dia of 0.88m ϕ . The aeronautical characteristics of the H.A.W.T. were cleared to the relationship between C_p, C_T, C_q and tip speed ratio λ , and the far wake flow velocity distribution, for the pitch angle as parameter. Particularly, slotted flap was considered to avoid a stall of the blade for a gust with vortex, therefore, the rectangular blade with a single-slotted flap was examined by experiment. Obtained results were discussed under the same condition as parameter of attack angle and flap angle acting as significant role.

Key Word: Horizontal Axis Wind Turbine, Momentum and Blade Element Combination Theory,
Power Coefficient C_p , Tip Speed Ratio λ , No Twist Rectangular Blade with A Single-slotted Flap.

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、近代文明の原動力となるエネルギーを化石エネルギーに依存する現体制は深刻なる地球環境問題を招来し、環境と人類が両立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昨年8月ドイツ・マグジブルク市に設置されたエネルギーコン社の E-112 型機 (112m 径, 4600kW) の如く巨大化が進み、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ている。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、巻き込み流などを伴う日本の風況下では本来の性能に達せず、風車ブレードの対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と考えられる。

本研究は水平軸型プロペラ風車について、NACA44 系翼型を用いた非ねじり矩形翼ブレード風車の模型実験を行い、運動量・翼素複合理論に円管要素理論を重ねた解析によりこの風車の特性を精確に究明し、併せて性能向上の余地を検討した。特に本論では、突風・失速などに効果的と言われる吹き出しフラップに注目して、上述の NACA44 系翼型の風車ブレードに適用した場合について実験を行い、検討・考察した結果について報告するものである。

2. 運動量・翼素複合理論

Fig.1 に風力タービン前後における空気流の拡大流管モデルと圧力・流速変化を示す。風力タービン回転面任意半径 r 上にピッチ角 θ に設定された翼素はタービンの回転と翼素通過流の合成風速 W_0 において揚力と抗力を生成する。風力タービン後方の低圧部は進行と共に大気圧 P_0 に回復し、出力分減速して図示の速度場となる。翼に生成するトルクの反作用として図示の如く空気流体側に回転速度 $V_\theta = 2\omega r a'$ (a' : 周方向誘導速度係数) が生成され、エネルギー損失となる。

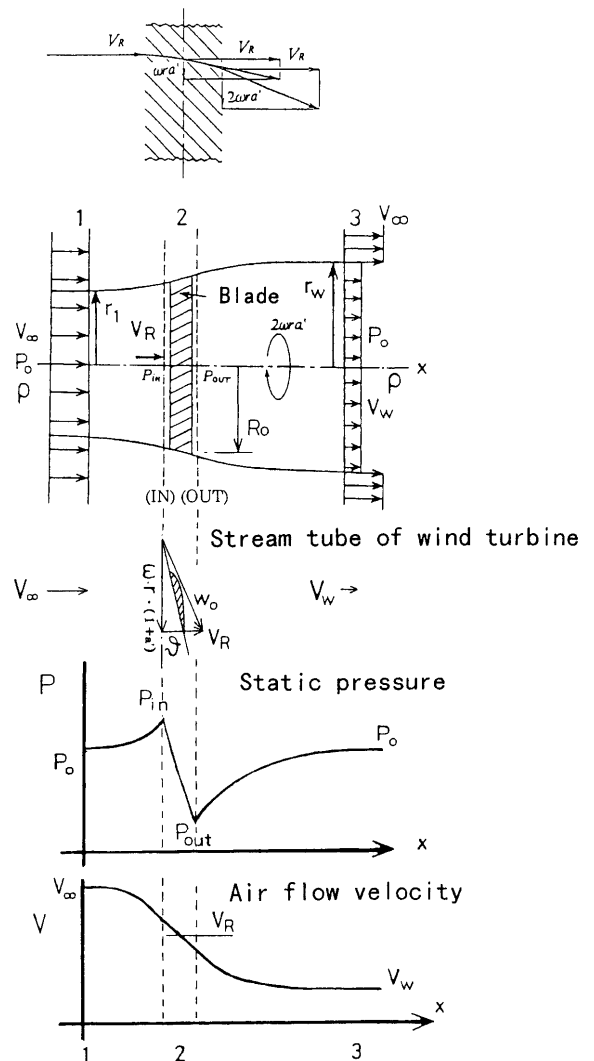


Fig. 1 Stream-tube Analytical Model of H.A.W.T.

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トルク（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二方向から、与えられた設定条件の風力タービンのスラストおよび出力（トルク）についての関係式を導出し、この二式が定風速定回転下では互いに等しいものとして出力・スラストを求める風車空力の現実的な解析法である。出力に関連する未知数は風力タービンの後流速度 V_w [m/s]と周方向誘導速度係数 a' の二つであるとして、スラストおよび出力（トルク/エネルギー）についてそれぞれ方程式を組み立て、この連立方程式より風力タービン前後の流体の状態と空力性能特性を求める。

本研究では風力タービンの出力 L [W]は成績係数 C_p 、スラスト T [N]はスラスト係数 C_T 、回転数 N [rpm]は風速 V_∞ に対する先端主速度比 λ 、風車回転面積に対する風車ブレード面積の比としてソリディティ S_o を以下のように無次元化したパラメータとして使用する。

$$C_p = \frac{L}{0.5\rho\pi R_0^2 V_\infty^3}, C_T = \frac{T}{0.5\rho\pi R_0^2 V_\infty^2}, C_q = \frac{2Q}{\rho\pi R_0^3 V_\infty^2}$$

$$\lambda = \frac{2\pi R_0 N}{60V_\infty}, S_o = \frac{zS}{\pi R_0^2}$$

ここで、 ρ ：空気密度、 R_0 ：風車ブレード翼回転半径、 z ：風車翼枚数、 S ：翼面積 である。

3. 実験装置及び測定方法

Fig.2 は、本研究で使用した模型風力タービン実験装置の概略図である。本装置は送風部と風力タービン部で構成されている。送風部はインバータ制御の可変速 3 相 400W 交流モータに直結された 1.2mのプロペラの駆動により、出口に設置された整流板で整流され一様な風速を提供する。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部はトルク検出器と回転検出器が取り付けられ、トルクコンバータにより表示され、計算機に接続し電圧に変換されたトルクと回転数をアナログ/デジタル変換により過渡応答を含めた空力特性が計算機に記録される。

Fig.3 は本研究でフラップの装着を想定して選定された非ねじり矩形翼型ブレード TypeIII の風力タービン翼の詳細図である。ブレード翼部は全長 393mm、翼弦長は 80mm で、ハブ部を含めた回転半径は 427mmR である。翼形は根元部 NACA4420、根元部から 50%位置では NACA4415、先端近傍では NACA4412 翼形である。Fig.4 は上述の typeIII を加工して後縁部の 83%域に噴出しフラップ機構を設置した詳細図である。フラップ部の全長は 326mm、その翼巾は 20mm である。ここで噴出し部がある場合を TypeVI、噴出し隙間部をセロテープで塞いだプレーンフラップとした場合を TypeVII とする。Fig.5 は噴出しフラップ部の詳細図で、ここでは $C_a=60$ mm、 $C_f=20$ mm、 $x_f=10$ mm である。図示の如く、翼全体の迎え角 $\text{deg}(0)$ 、翼弦に対するフラップの下げ角を $\text{deg}(1)$ または $\text{deg}(2)$ と表示する。風力タービン翼は、ハブ部にベアリングを取り付け、ピッチ角の変更・調整を可能にした。

設定定常風速条件下の出力・トルク特性は 3.27, 4.16, 4.8m/s において先端ピッチ角 (6° 8° 10° 12° 14°) に固定してトルクモータにより負荷をかけ、Fig.5 に示すように、噴出し型と通常型フラップの下げ角 $\text{deg}(1), \text{deg}(2)$ を 0° 1° 3° 5° にして、 $\text{deg}(0)$ と $\text{deg}(1)/\text{deg}(2)$ の組合せの下、風力タービンの回転が止まるまでの各回転数におけるトルクを 0.1 秒ごとに 2 秒間ずつ測定・記録した。

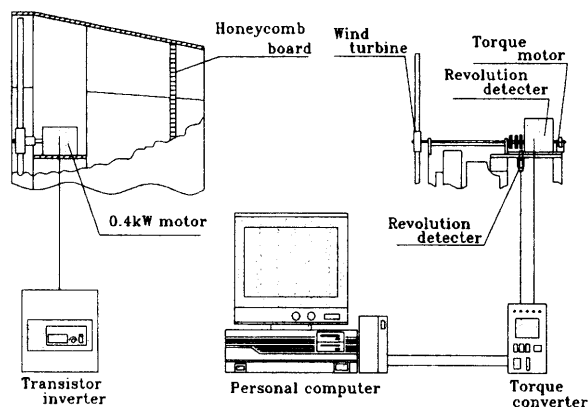


Fig.2 Schematic Diagram of Experimental Apparatus

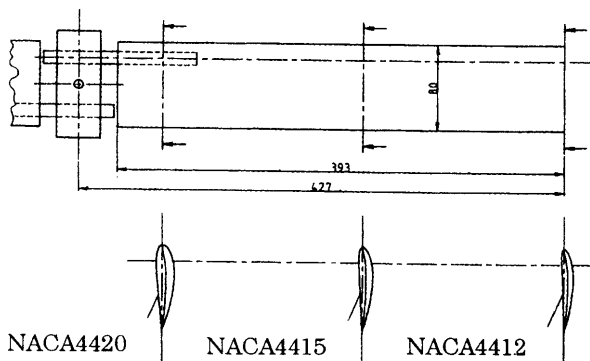


Fig.3 Details of No Twist Rectangular Blade Type III with NACA44 series airfoils

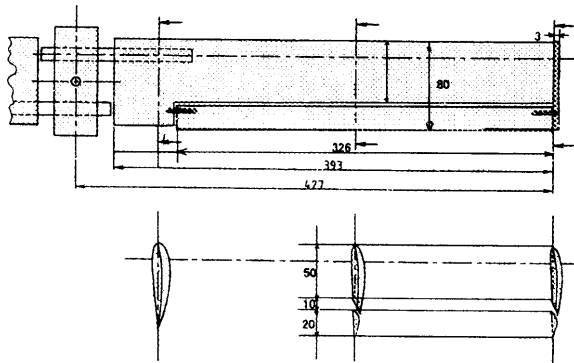


Fig.4 No Twist Rectangular Blade with Single-slotted Flap Type VI and Plane Flap Type VII

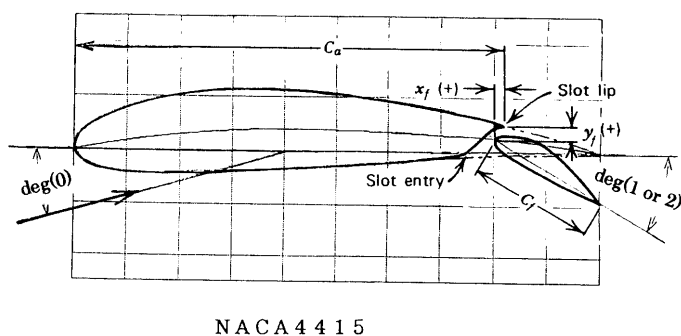


Fig.5 Detail Configuration of Single-slotted Flap

4. 結果および検討・考察

4.1 非ねじり矩形 NACA44 系翼風車の基本特性

Fig.6 に本解析に使用した NACA4415 翼の C_L, C_D 特性を翼レイノルズ数 ($Re_C = W_0 C / \nu$) と迎え角 α の関数として示す。本解析ではある回転時の r 半径上の合成風速 W_0 m/s と迎え角 α から随時 C_L, C_D を算定して計算しているが、本実験条件では翼弦長 $C=80$ mm、風速 $V=5$ m/s で $Re_C=10^5$ 程となり、大型機の条件 ($Re_C=6 \times 10^6$) に比べて抗力係数が 2 倍以上となって模型実験では性能が低下することを示している。

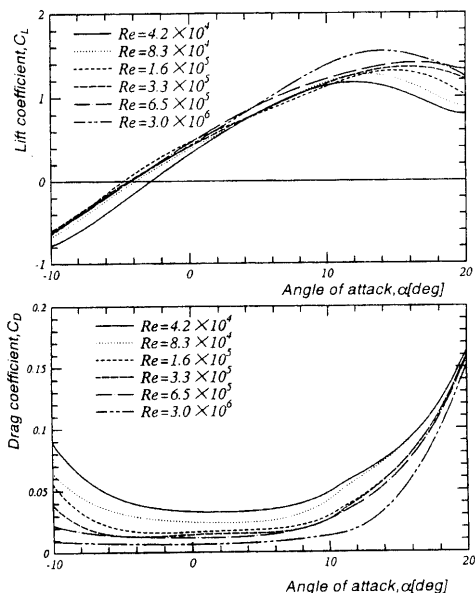


Fig.6 C_L and C_D Characteristics of NACA4415 Aerofoil

Fig.7 には本風車 (Type III) の本実験条件 ($V=5$ m/s) における出力と抗力特性の解析結果をピッチ角 $\text{deg}(\theta)=4^\circ, 5^\circ, 6^\circ, 7^\circ, 8^\circ, 9^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ の条件で示している。本風車はピッチ角 $7 \sim 9^\circ$ で出力性能はほとんど変わらず、 12° 以上のピッチ角では出力、抗力共に著しく低下し、 5° 以下の浅いピッチ

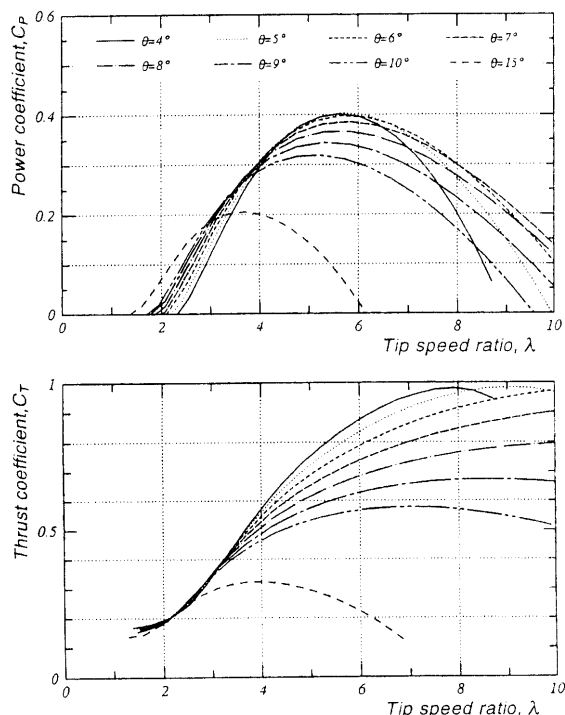


Fig.7 Power and Thrust Coefficient for Type III Blade

角では高速回転時の大きな性能降下が認められ、抗力と出力の兼ね合いから、最適ピッチ角条件は $\text{deg}(\theta)=8^\circ$ 前後にある。

Fig.8 には Fig.7 と同一条件における先端速度比 λ ごとの無次元後流速度 W_w/V_∞ と周方向誘導速度係数 a' 分布の解析結果を示す。図より、ピッチ角 $\text{deg}(\theta)=8^\circ$ の最適条件では高速回転時中心部に僅かの閉塞、先端部は全く閉塞しないことが本風車の最大特徴となっている。勿論、ブレード径位置毎に一樣な減速、即ち風速エネルギー吸収が一樣なる事が本来望ましく、 $\lambda=4 \sim 5$ 域の最高出力点において達成されている。一方、周方向誘導速度係数 a' は中心部において大きく先端部で小さくなる傾向が認められ、実際の周方向誘導速度 $V_\theta=2\omega r a'$ より低 λ 回転域では r 方向に一樣分布、高速回転 ($\lambda=8$) ではブレード先端領域での回転成分は僅かであり、全体として回転エネルギーの速度場に占める損失は僅かである。

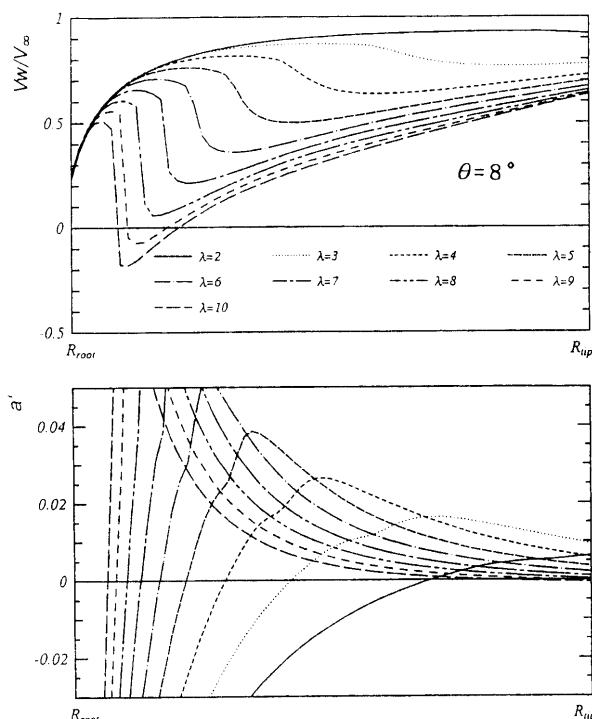


Fig.8 Wake and Tangential Induction Factor a' Distribution along Blade of Type III

4.2 NACA44 系翼型本風車の性能向上の検討

以上 NACA44 系翼型を用いた非ねじり矩形翼風車の基本的性能特性を示したが、Fig.6 に示す C_L, C_D 特性を僅かに変化させた場合の風車性能に及ぼす影響について明らかにしてみる。

抗力と揚力計算プログラムにおいて、それぞれ 5% 増加、5% と 15% 増加した場合、得られる出力、抗力、トルク係数の解析結果を Fig.9 に与える。抗力が 5%、揚力がそれぞれ 10%、15% 増加した場合、低速速度 $\lambda=3 \sim 4$ での出力、トルクは 20% ~ 30% 増加し、成績係数の最大値が約 0.4 から 0.45 と 10% 以上の効率増加が見られる。風車に適応する翼とは揚力が大きく、抗力の小さな翼と考えることができるが、この対応策として、①風車用専用翼の開発・研究、②既存の翼に限定すれば、噴出し効果を有するフラップ機構の装着などが考えられる。特に、噴出しフラップの装着は大迎え角時の翼上面からの剥離・巻き込み流を吹き飛ばし失速性の向上が予測される。フラップ機構を翼に設置すれば揚力増大効果を得ることができるが、翼摩擦面積の増加、流れ場の変化によって抗力も増加してしまう。全体として、適正なフラップの装備により揚力増大効果が抗力増大効果を上回る事が望ましい。

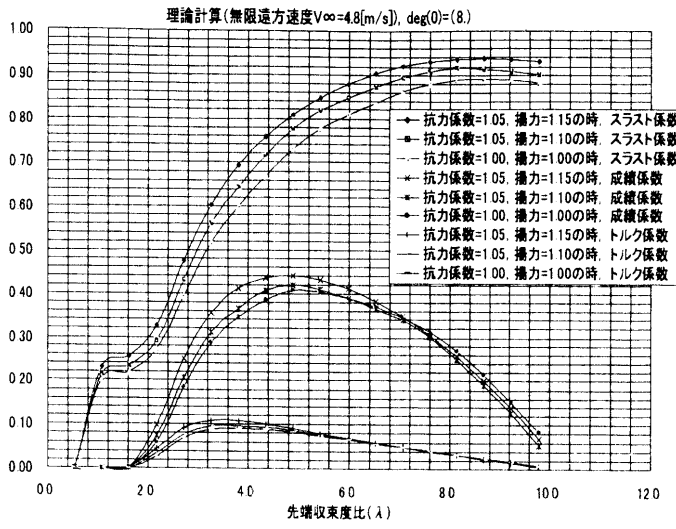


Fig.9 Prediction Result of C_p , C_t and C_q for Type III by changing C_L and C_D of NACA 4415 Aerofoil

4. 3 噴出しフラップを装着した場合の結果および考察

Fig.10 は噴出しフラップ付風車 Type VI とプレーンフラップ付風車 Type VII の最適ピッチ角 $\text{deg}(0)=6^\circ$ ($\text{deg}(1)=0^\circ, 1^\circ, 3^\circ, 5^\circ$), ($\text{deg}(2)=0^\circ, 1^\circ, 3^\circ, 5^\circ$) の条件で風速 4.8m/s における出力係数 C_p を、基準とする Type III の解析値と共に示す。両結果より、低回転 $\lambda=4\sim 5$ 域ではフラップ下げピッチ角による C_p の違いが見られず基準翼 Type III の解析値に近い結果となるが、 $\lambda=6$ 以上の高回転域になれば、解析値より下回る

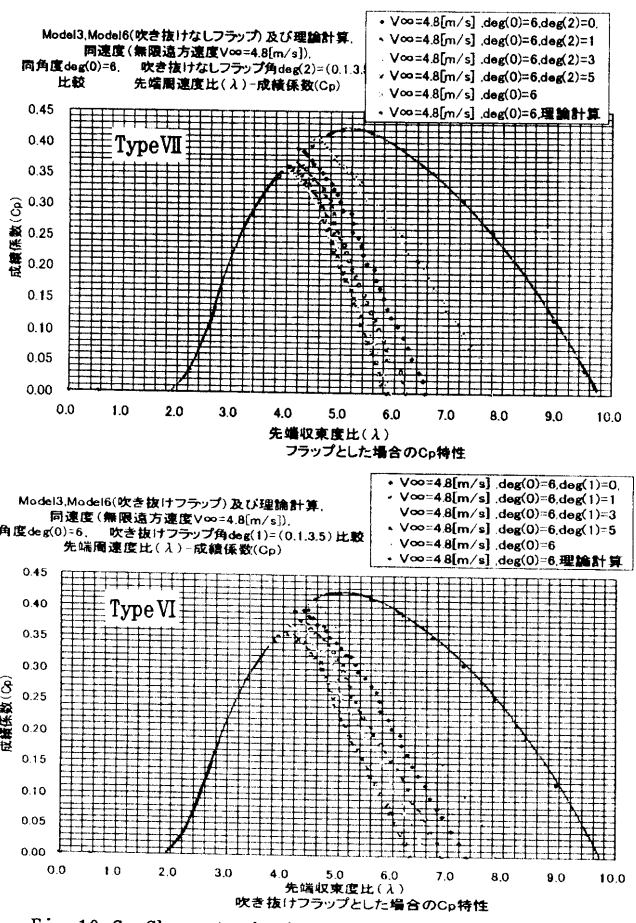


Fig.10 C_p Characteristics of Type VI and Type VII

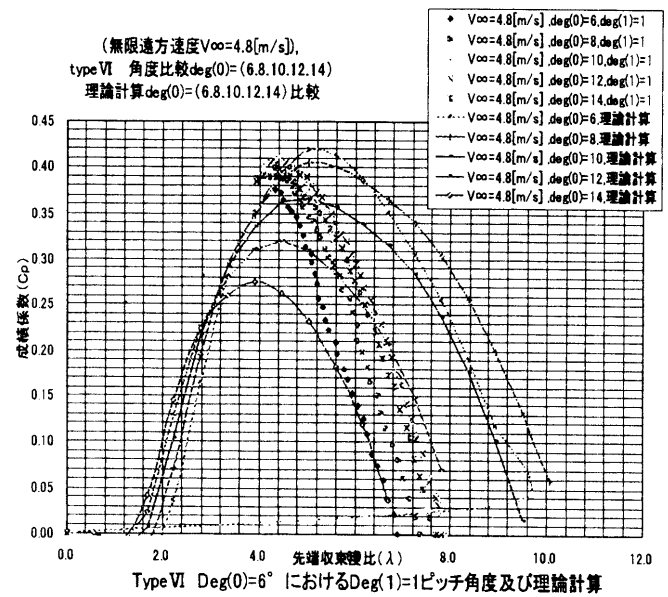


Fig.11 Power Coefficient C_p of Rectangular Blade with Single-Slotted Flap at $\text{deg}(1)=1^\circ$ as Parameter Attack Angle of $\text{deg}(0)=6, 8, 10, 12^\circ$

傾向にあり、Type III の実験値も同様の傾向にある。これはフラップの装備によって、低回転時(迎え角大), C_t 値が上昇して性能が上がり、高回転域では逆に C_p 値の増加により抗力が増えたことによる。この2つの結果より、噴出しフラップを持つ Type VI のほうが高入域で高性能である。噴出し流により翼上面の空気の剥離が押さえられ Type VI の抗力が Type VII より高回転時低くなっていることが予測される。フラップ付風車 Type VI, VII の出力係数 C_p は基準風車 Type III の解析値より高回転域で低く、フラップ下げピッチ角を増加すればその傾向が助長され、Type III の特性と異なる傾向にある。

Fig.11 は、噴出しフラップ付風車 Type VI をフラップ下げ角 $\text{Deg}(1)=1^\circ$ にして、迎え角 $\text{Deg}(0)=(6^\circ, 8^\circ, 10^\circ, 12^\circ, 14^\circ)$ として場合の実験結果と、その条件に対応するフラップ無し基準翼 Type III の解析結果を比較したものである。この結果より、 $\lambda=4\sim 5$ の低下移転域では、理論値の値をこえる傾向が認められる、これより、NACA 翼にフラップをつければ、ピッチ角の効果基準翼の理論(フラップなしの Type III)値ほどの差が現れず、殆んどピッチ角に依存せず $\lambda=4$ 付近で出力特性が著しく向上する風車翼となる。実際 Type III ブレードは 480rpm ($\lambda=4.4$) で停止するに、フラップをつければ揚力と抗力の相乗効果において 430rpm ($\lambda=3.9$) まで定出力回転する結果を得ている。フラップは 20mm で翼弦長の 25% を占めていること、その隙間比など今後の検討課題としたい。

5. 結論

本研究は、水平軸型プロペラ風車について NACA44 系翼型を用いた非ねじり矩形ブレード翼風車を基準として、突風・失速などの効果的と言われる噴出しフラップを装着した場合の空力特性について実験を行い、理論的な検討を加えてフラップを装着した場合の特性を明らかにしたものである。

参考文献

1. 岸浪, 乗田, 鈴木, 伊庭野他, 「運動量・翼素複合理論による風力タービンの性能特性の研究」、日本機械学会第 11 回環境工学総合シンポジウム講演, No01-12, 2001, pp.460-463.