

418 運動量・翼素複合理論による風力タービン性能特性の研究 (作動流体のねじれに関する一検討)

Study on Aerodynamic Characteristics of H.A.W.T. by Combination Analysis of
Momentum, Energy and Blade Element theory, and Experiment
(Effects of Angular Rotation of Air Flow on Performance)

乗田 雅幸, 尾山 兼一, 岸浪 紘機, 鈴木 淳(室蘭工大)
伊庭野 洋 ((財)室蘭テクノセンター), 今野 勇 ((株)今野鉄工所)
Masayuki Norita, Kenichi Oyama, Koki Kishinami, Jun Suzuki, Hiroshi Imano, Isamu Konno

Aerodynamic performance characteristics of the HAWT were investigated theoretically and experimentally by the combination analysis of momentum, energy, and blade element theory superimposed by the strip element theory, and by a small-scale model, considering the angular rotation of working flow. In this study, four types of wing section and arrangement of blade were examined by a small scale experiments under the condition of open typed wind tunnels with free stream 0.8-4.5 m/s and outlet ducts dia. of 0.88m ϕ . i.e., tapered rectangular blade with NACA44, LS04 and two-stage pitch angle tapered blade and tip oval tapered blade with NACA44. The aeronautical characteristics of the H.A.W.T. employing the different blades were discussed to the relation of C_p , C_T , C_q and tip speed ratio λ , based on the experimental and analytical results. Prediction results of aeronautical characteristics for large scale unit are cleared how to be optimized design parameters acting as significant role.

Key Word Horizontal Axis Wind Turbine, Momentum and Blade Element Combination Theory, Angular Rotation

1. 緒 論

人類は産業革命以来 200 年間, 大量消費, 大量廃棄において, 資源・エネルギーの逼迫, 近代史の側面としての南北問題と付随する人口増加, 過耕作による森林および熱帯林の消滅と畑作地の砂漠化等の諸因子が重なり地球生態系全体の破綻を来し, 現産業構造と技術では 21 世紀のかなり早い時期に本格的な資源・エネルギーの枯渇と食糧危機がもたらされるものと考えられ, 本格的な地球環境革命の時を迎えようとしている. その一環として, 環境に優しく再生可能な自然エネルギーへのシフトは時代の要請と考えられ, 中でも 3 次元空間の風力エネルギーは大きな潜在力を有し, 未来エネルギーのひとつとして期待されている. 近代的な翼形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エネルギー変換機として期待を荷うものであるが, いまだ解明されない多くの問題が残されている.

本研究は水平軸型プロペラ風車について模型実験を行い, 運動量・翼素複合理論に円管要素理論を重ね, 関連するパラメータの下で解析的検討を行い, 特性を究明したものである. ここでは風車翼に適正があるといわれている NACA44 系翼形と LS04 系翼形を適用し, その空力特性を究明するとともに, 翼形や風力タービンブレード形状に関するパラメータ, 寸法因子等が空力性能に及ぼす諸影響について検討・考察する. また模型実験と比較検討をおこない, 先端部のピッチ角を一定とした 2 段ピッチ型ブレード翼や先端部楕円翼型ブレードなどの諸条件の風力タービンの性能特性について得られた結果を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減速拡大流管モデルを示す. 風力タービン回転面の任意半径 r 上に気流方向垂直面に対してピッチ角 θ に設定された翼素は風力タービンの回転速度とブレード回転面の空気流速の合成速度 W_0 において揚力と効力を発生する. 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, 風力タービン出力分減速されて図中の速度分布となる. ここでは, 翼に生成するトルクの反作用として, 図中に示すように示すように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, 回転エネルギー損失となる.

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, 風力タービン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解析法である. 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, 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立て, この連立方程式よりタービン前後の流体の状態と空力性能特性を求めることができる. 本年度は運動量・エネルギー理論においてタービン後流の回転角速度を考慮したベルヌーイ則を適用した.

回転を考慮したベルヌーイ則を風車の前後面に適用した場合の風車通過流速は次式となる.

$$V_R = \frac{1}{2}(V_\infty + V_w) + \frac{1}{2}r^2\omega_2 \frac{\omega_2 - \omega_w}{V_\infty - V_w}$$

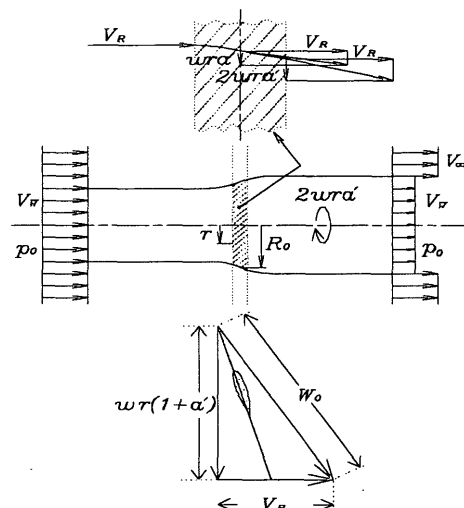


Fig.1 Streamtube Model of H.A.W.T

本研究では風力タービン出力 L [W] は成績係数 C_p , 風力タービンスラスト T [N] はスラスト係数 C_T , 回転数 N [rpm] は風速 V_∞ に対する先端周速度比 λ として以下のように無次元化したパラメータを使用する。

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

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

ここで, ρ : 空気密度, R_0 : 翼回転半径である。

3. 実験装置及び測定方法

Fig.2 は本研究において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から構成されている。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の風速を提供する。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し、計算機に接続され、電圧に変換されたトルクと回転数をアナログ/デジタル変換によって過渡応答を含めた空力特性が計算機に記録される。

Fig.3 には本実験において研究対象とした風車ブレードを示す。本研究ではデータの完璧な NACA4415 翼を用いた先細翼 Type II を基準として、ほぼ同一条件で LS04 翼を使用した Type I, さらに NACA44 系の条件を変えた Type III, Type IV の4種の詳細図である。翼形は Type I が先端部 LS0413, 中間部 LS0417, 根元部 LS0421 翼形であり Type II, Type III, Type IV は共に先端部 NACA4412, 中間部 NACA4415, 根元部 NACA4420 翼形である。Type I は全位置で振り角が 14° の逆カンバー形状翼, Type II は振り角が 16° の全位置振り翼, Type III は振り角 16° で先端部 20% が楕円形状をしている先端部楕円型全位置振り翼, Type IV は根元部から 60% の位置までが振り角 14° , そこから先端部までは振りのない2段ピッチのテーパ翼である。これら風力タービン翼は、ハブ部にベアリングを取り付け、ピッチ角の変更・調整を可能にしている。

定常風速条件下の出力・トルク特性は 3.0, 4.0, 4.5m/s において先端ピッチ角を 4Type の風力タービンブレードとも $1^\circ, 3^\circ, 4^\circ, 5^\circ, 7^\circ$ に固定して負荷をかけ、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1秒間ずつ測定・記録した。

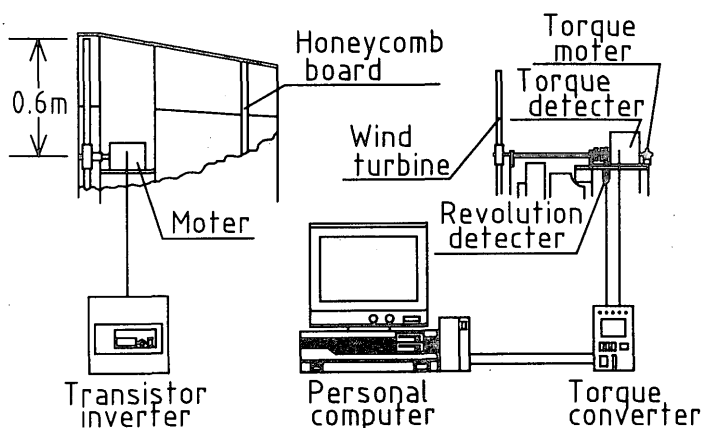


Fig.2 Schematic drawing of the experimental apparatus

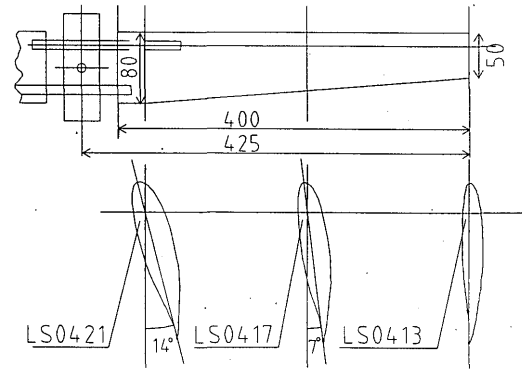


Fig.3 Details of Type I blades (NACA LS04XX series airfoils)

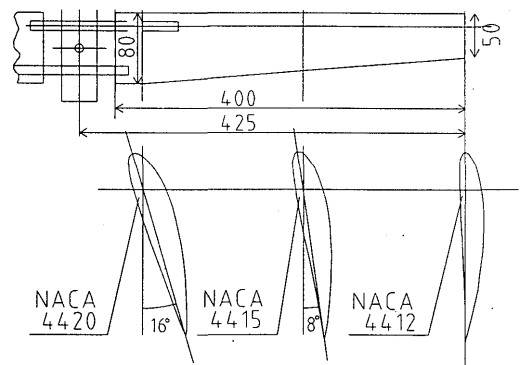


Fig.4 Details of Type II blades (NACA 44XX series airfoils)

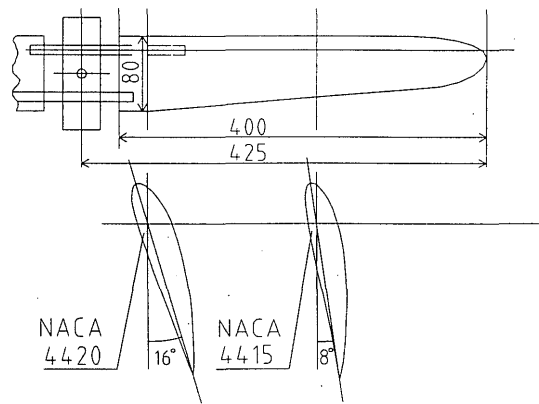


Fig.5 Details of Type III blades (NACA 44XX series airfoils)

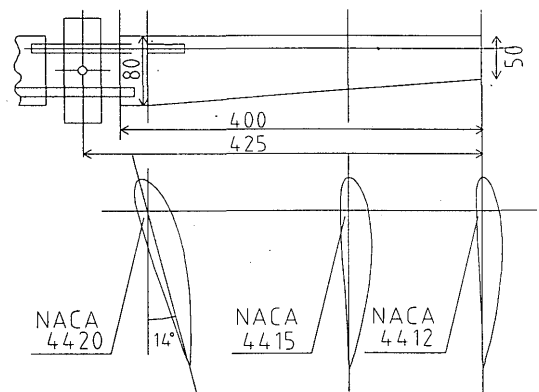


Fig.6 Details of Type IV blades (NACA 44XX series airfoils)

4. 結果の検討・考察

Fig.7 は Type II 翼, 風速 4.5m/s, 先端ピッチ角 1° の時の本実験条件における性能特性の予測計算値で先端周速度比 λ に対する成績係数 C_p , トルク係数 C_q , スラスト係数 C_T の関係を示したものである。この解析値は風力タービン後流の回転角速度を考慮したベルヌーイ則を適用した結果である。図よりトルクは起動時にわずかで回転上昇とともに $\lambda=4$ 前後で最大となり, 以降減少するが, 成績係数 C_p は $\lambda=6$ 前後で最大, $\lambda=10$ で $C_p=0$ 隣, スラスト係数 C_T は最大となっていることを示している。

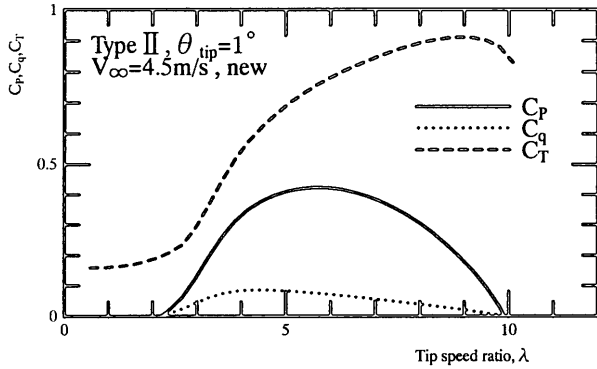


Fig.7 Aerodynamic Performances Characters C_p , C_q , C_T

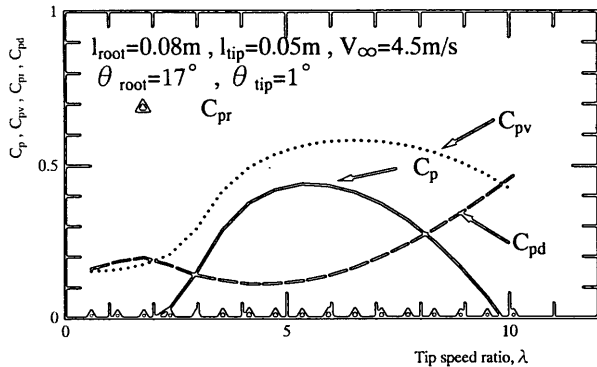


Fig.8 Aerodynamic Performances Characters C_p , C_{pV} , C_{pR} , C_{pD}

Fig.8 は Fig.7 と同条件における運動量・エネルギー・翼素複合理論解析による先端周速度比 λ に対する成績係数 C_p , 速度エネルギー差のみに基づく出力係数 C_{pV} , 回転エネルギー損失係数 C_{pR} , 抗力エネルギー損失係数 C_{pD} の関係を表したもので, 各回転毎の成績係数は $C_p = C_{pV} - C_{pR} - C_{pD}$ の関係にあり, 翼素の回転を静止する方向に作用する抗力損失が回転始めと高入域において著しいことを表している。

Fig.9 は風速 4.5m/s の条件で運動量・翼素複合理論による解析結果と模型実験による結果を各ブレードごとに成績係数 C_p と先端周速度比 λ の関係で表したものである。なお, 本解析において翼弦長と翼径は Fig.2 と同条件で先端 3% の部分における揚力係数を無視してある。

実験値と解析値の比較において Type I (LS04) は値としては差があるが傾向は合致している。これは解析値の翼レイノルズ数・揚力・抗力係数の設定に問題があるためで今後の課題としたい。また実験における先端ピッチ角ごとの成績係数と出力可能回転数域の差が大きくピッチ角制御がしやすい風車と考えられる。本翼形は可変ピッチ角機構を持つ風力タービン向きで, 比較的先端周速度比がせまいという短所が克服でき, 高い出力性能が期待できる。

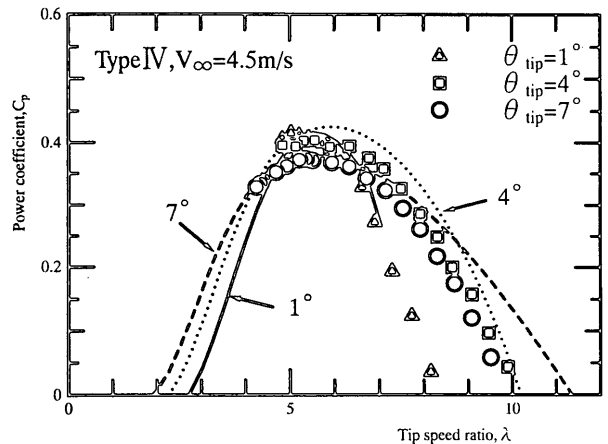
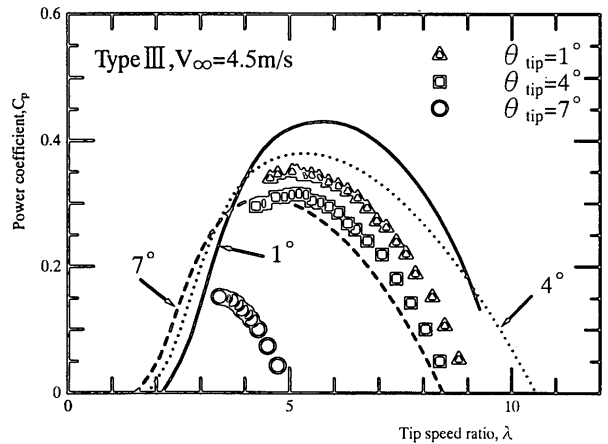
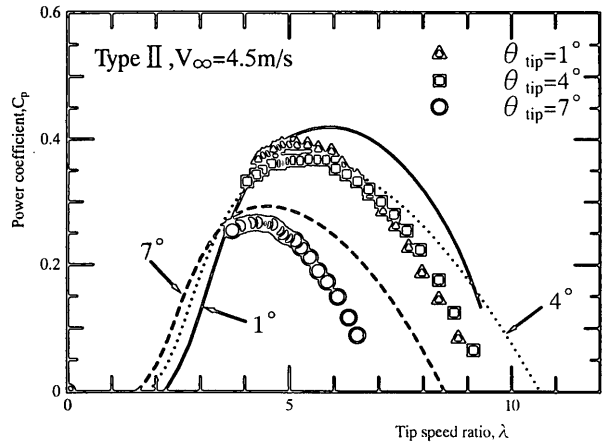
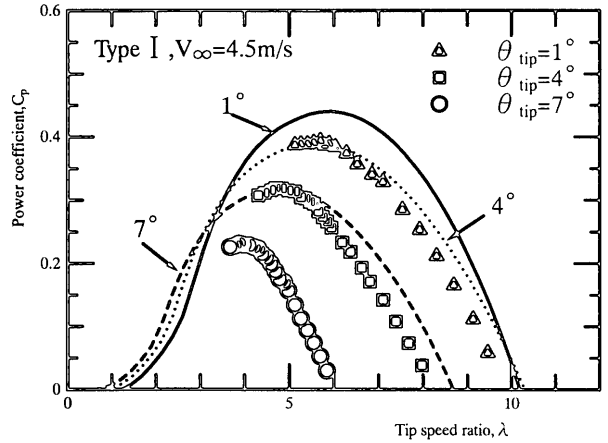


Fig.9 Verification of the theoretically performance results with the experimental values

Type II(NACA44)においても多少差があるが、最大成績係数を示す先端周速度比の値がほぼ等しい事、低回転域では先端ピッチ角が大きい場合のほうが高効率である事など出力傾向は一致している。また先端ピッチ角 1° の条件において高い性能特性が見受けられるが、高回転域では性能の低下が急激である。これは高回転域で翼先端部が閉塞状態になっているためと考えられる。

Type III(NACA44)では実験値と解析値の差が大きく、先端ピッチ角 7° の時の実験値が極めて低い。これは抗力を最小に抑える楕円形状を先端部に施したが、その楕円化部分にもねじりを加えたため先端楕円翼部の有効迎え角が一樣とならず、このような低出力結果となったと考えられる。Type IV(NACA44)は今回の4種の翼では実験値が解析値に最も近い結果を得た。先端ピッチ角 1° の時は出力可能回転数域がせまいがこれは翼先端部が閉塞状態になっているためである。またピッチ角ごとの成績係数の値の差が小さいのでピッチ角制御には向かず、最適ピッチ角における固定ピッチ失速制御に適しているといえる。これらより2段ピッチ方式の目的である、ねじりピッチ角を一定(非ねじり)にした時、その翼部で実効迎え角が一定になり、ある先端ピッチ角において高性能を発揮する事が実証された。

Fig.10は先細翼、先端部楕円形状翼、2段ピッチ翼、極先細翼をLS翼形における最適ピッチ角に設定した60mφの大型風力タービンの性能予測の結果を示したものである。根元部翼弦長は4.0m、先端部翼弦長は極先細翼が0.8m、その他は1.6mとした。これらから楕円翼は先細翼よりも成績係数は最大値で若干向上しており、先端周速度比でもより高回転で出力できるようになっているのがわかる。また先端部での後流速度 V_w/V_∞ はどちらも閉塞状態になっているが、楕円翼のほうが高回転まで速度を保っているのが認められる。2段ピッチ翼も先細翼と比べると同様に最大成績係数、出力可能回転数域、後流速度のいずれも向上していて、楕円翼とともに理論上では先細翼より優れていることがわかる。先端部翼弦長を他の半分(0.4m)まで絞った極先細翼と他の翼を比較すると、最大成績係数自体は若干低下しているが、出力可能回転数域が格段に広く、どんな回転数でも安定して出力できることがわかる。また後流速度分布では他条件の翼では先端部が閉塞状態に陥っているが、極先細翼では表れず、適度な出力吸収をしているといえる。もちろん、先端部の閉塞を回避する別の手段として先端ピッチ角 θ_{tip} を 2° 、 3° にすることも有効である。

5. 結論

本研究はプロペラ型風力タービンの模型実験を行い、解析結果と併せて、その空力特性を明らかにしたものである。

以下、本研究で得られた結論を列記する。

- (1) NACA44系翼形よりLS04系翼形の方が風車翼として優れた特性を有し、ピッチ角制御に適している。
- (2) 先端部楕円形状翼は楕円部分にピッチを与えたため、期待した性能は得られなかった。今後の検討としたい。
- (3) 2段ピッチ翼は最適ピッチ角で大幅な性能向上をし、実験時の寸法では正確な性能予測が可能である。
- (4) 60mφ級の大型の実機では先端部楕円形状翼、2段ピッチ翼ともに先細翼よりは性能向上が予測される。しかし先端部が閉塞状態に陥ってしまうので、閉塞を避けるために先端部翼弦長を適度に短くしたほうが広域回転数での出力も望め、翼全体の軽量化による遠心力荷重や曲げモーメントの低減、そして高耐久性につながり、実用性があるといえる。

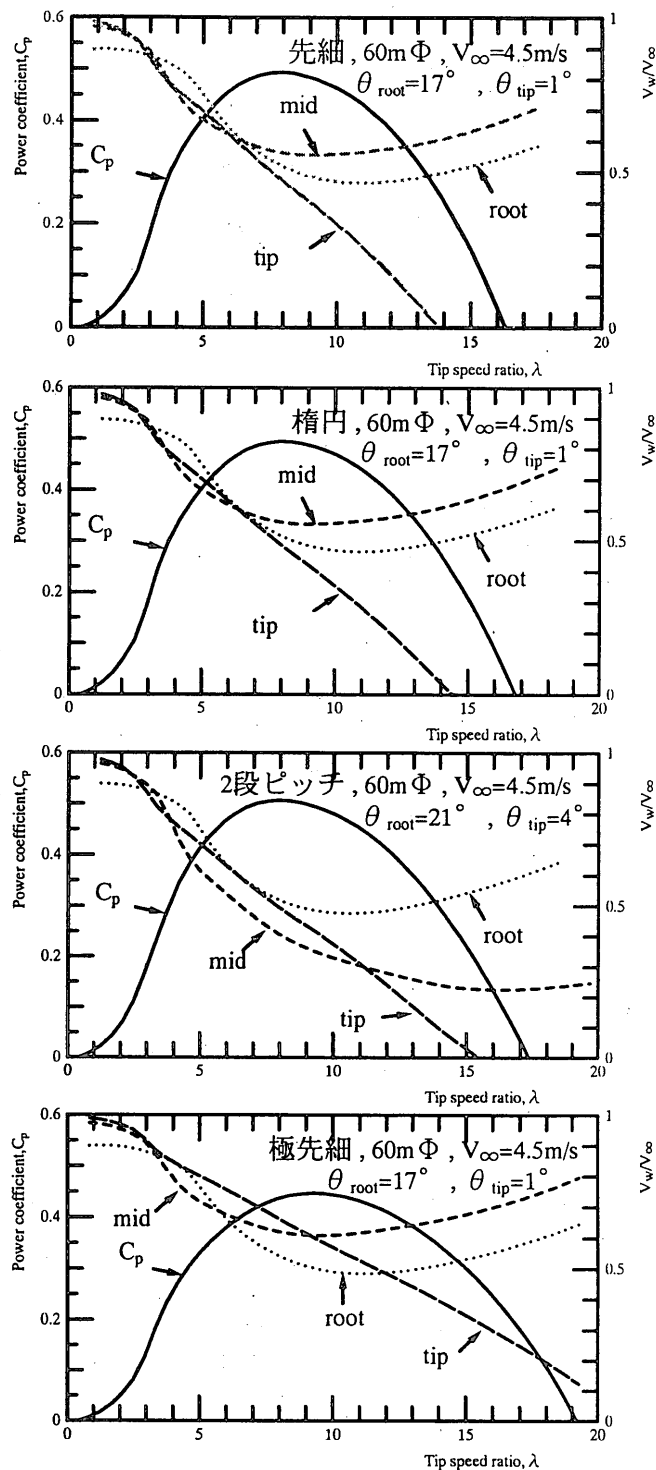


Fig.10 Aerodynamic Performances Characters of H.A.W.T for large scale unit

参考文献

- (1) L.L.Freris, "Wind Energy Conversion Systems" Prentice Hal International Ltd. U.K (1990)
- (2) Davi A Spera, "WIND TURBINE TECHNOLOGY-FUNDMENTAL CONCEPTS OF WIND TURBINE ENGINEERING" ASME PRESS NEW YORK (1994)
- (3) 西山哲男, 「翼型流れ学」, 日刊工業新聞社
- (4) 古谷克 他 5 名, 「運動量・翼素複合理論による風力タービン性能特性の研究」, 日本機械学会第 10 回環境工学総合シンポジウム 2000 講演論文集, p.351-354.