

特別寄稿

風力開発と先端風車技術について

三重大学 工学部 機械工学科
エネルギー環境工学研究室
清水幸丸・前田太佳夫

1. 風力エネルギーの評価

1.1 風と生活史

風力発電について、よく話題になる問題は、風は吹いたりやんだりであてにならない、すなわち、変動性が大きい、または間欠的であるという点である。

我が国の場合、すなわち、日本列島で長い歴史を背負って生活してきた人々にとって、風は生活の上で農作物に被害を与える、住みにくいといった障害物であり、それをさけて生活してきた。幸い日本は山岳国であり、国土面積の70%が山岳地帯であるために、山かげに住む、あるいは農耕期間の春、夏、秋に風のほとんど吹かない場所に住むという方法をとってきた。人々はわずかの平坦地に耕地を形成し、生活してきた。風は生活に必要なでなかった。

これに対して、ヨーロッパ大陸の海岸線に面した国々、例えばデンマーク、ドイツ、オランダ、ベルギー、フランス、英国、スペイン、ポルトガル等においては、大きな山岳部が少なく、冬期間又は年間を通して、絶えず海洋からの一定の強さの風にさらされて生活してきている。こういった生活空間においては、風は変動の大きいものではなく、かなり定常状態で、すなわち、一定速度で吹くものという体感を持つことになる。このような場所では、風の持つエネルギーの有効利用技術が進み、揚水、農産物加工の動力源、小工場の動力源等として、風車が利用されてきた。この歴史は現在においても引き継がれ、今や750kW、1,000kW、2,000kWという大型風力発電技術として脈々と発展してきている。

さて、日本の風は、本当に吹いたりやんだりの気まぐれなものなのであろうか。確かに、伝統的に人々の多く住んでいる場所はそうであるかもしれない。しかし、実際にはそうでない場所、つまりヨーロッパ大陸の海岸線領域と同様な条件の場所も多数存在する。それらの場所は、北海道、本州、四国、九州、南西諸島と全国に存在する。

1.2 風の定常性と変動性

地球上の風を大きく把握すると Fig.1-1 のようになる。同図は、地球上の風の発生状況のモデルを示している。地球上の平均的な風は、主に Fig.1-1 右側に示した地球上にそそがれる太陽エネルギーの密度差に基づくヒートポンプ作用によって生じる大気大循環と地球の自転に基づくと言われている。さらに、地域地域における風は、地形やその他地理的諸因子の影響を受け複雑な風となる。

次に、日本列島における風について注目してみる。Fig.1-2 には、山形県立川町狩川のアメダステータ(観測点地上高 6.5m と低いので、換算式により地上高 40m へ換算しなおした値)15 年分(1980 年～1994 年)および北海道襟裳岬アメダステータ(観測点地上高 12m を、地上高 40m へ換算しなおした値)15 年分(1981 年～1995 年)の各年の年間平均値および 15 年平均値を示す。15 年平均値に対して、各年の年間平均値は最大で 12% の差が見られるが、通常年では、15 年間程度の平均値に対して ±5% 程度の差が見られるにすぎない。

Fig.1-3 には、年間平均風速を与えた場合の年間の風速の出現頻度分布を示す。平均的な考察を行うため、定評のあるレイレ分布を用いた。自然の風は大体レイレ分布関数で示されるような風速分布になるとされている、Fig.1-2、Fig.1-3 に示すとおり、それぞれ特定の地点の風は、年間平均で見れば ±5% 程度、特異年を入れても ±10% 程度の変動が見られるにすぎない。すなわち、極めて安定している

と言える。このデータに基づいて、年間風力発電量を kWh で積算すると、風のエネルギーは風速の3乗に比例するから、年間の発電量の統計は、通常±15%、特異年は±30%程度の変動が予想される。これが kWh 効果と呼ばれるものである。

さて、日変化、季節変化を見ると、次第に変動幅が大きくなる。場所によっては日変化の変動幅が大きくなるが、この評価を kW 効果という言葉で表す。電力の安定供給の為には、瞬時出力の kW が安定している必要がある。例えば、現在、我が国では、昼間と深夜では電力使用量に 4:1 の差があるといわれており、これらの使用電力量の変動に対応するために、夜間の余剰電力を用いて揚水し、昼間の需要増大時にこの水を用いて水力発電を行う揚水発電等の手段が用いられている。風力発電の瞬時出力は風力の日変化に影響されるため、風力発電による発電量が大きくなると、瞬時出力の変動に対応するための安定化の手段が必要になる。しかし、現在は、風力発電量はまだ、全発電量の 0.01%未満であり、新エネルギー大綱の目標値が成功裏に達成されても 0.1%にすぎないので、まだその心配の必要は全くない。

なお、将来において風力および太陽光等の出力変動の大きい発電による発電量が、全発電電力量の 5%~10%に達した段階では、電力供給量の安定化の手段として、揚水発電に加えて天然ガスを用いたガスタービン発電を併用することによって発電量の平滑化、すなわち kWh 効果を高めるのがよいと提案されている。

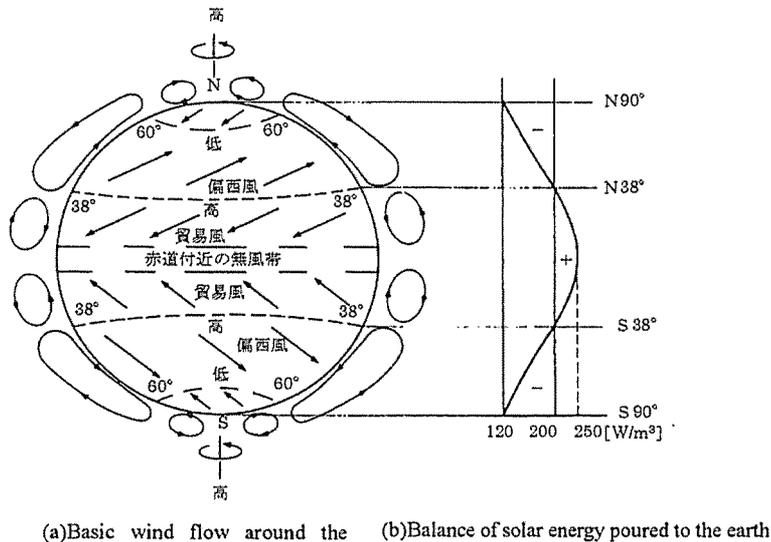


Fig.1-1 Model of wind appearance on the earth

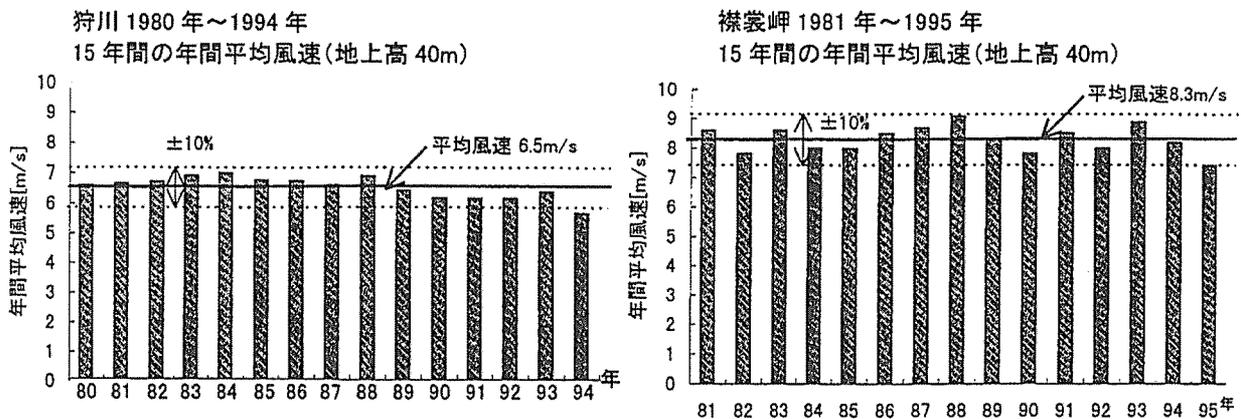


Fig.1-2 AMeDAS data

2. 現在の先端技術風車

2.1 風力タービンの現状

1996 年末現在で世界に設置されている風力タービン(風車)の設備容量は、6097MW に達している (Table. 2-4 参照)。EU の 2030 年の目標値 100,000MW(1 億 kW)には、まだしばらくの間があるが、着実に進展している。風力タービンの増設に伴い技術革新も着実に進展している。1980 年当初には、主力機の出力が 50kW であったが、1995 年時点で 500~800kW が主力機となり、1996 年には、商用機として 1000kW~1500kW 機が登場し、2000 年には、1000kW 機が主力機になると予想されている。

さらに風力タービンの技術革新が、コスト低減および風力タービン設置場所の拡大に対応できるように行われている。設置場所の拡大とは、これまでの海岸線近くの平坦地だけでなく、浅い海面上、急な斜面や凹凸の大きい山岳部にも建設が拡大しているということである。山岳部では、風の乱れが一段と大きく、風力タービンは変動力に対応できる能力が求められる。このような背景をもとに近未来の風力タービンに求められる革新技術を整理すると Table 2-1 のようになる。

Table 2-1 Wind turbine of next generation

パッシブ型テータ&ブレイキ付きロータ	ブレードに働く推力を利用して、テータ運動と設計出力以上のブレイキ効果を発揮させる。
ロータの各種運動の空気力学的解明および風力タービン専用翼型の開発	風力タービン・ロータ直径は、大型化しており各回転角の場所場所で空気力学的特性が異なってくる。この問題を理論的に解明する。さらに、ブレードの強度、および回転半径各位置で翼に対するレイノルズ数が異なるので、これらの問題を考慮したブレード専用翼型の開発が行われているが、さらに発展させる。
ギヤレス風力タービン	多極発電機を用いることによって、増速ギヤを省略することができる。この方法がいくつかのメーカーによって開発されている。
可変発電システム	タービンロータを風の強弱に応じて可変速に回転させると、ロータに衝撃的に加わる空力変動力を大幅に緩和できる。可変速発電システムは、いくつかの方法がある。この技術は、近未来の重要技術なので、今後継続的な研究が必要である。
低騒音風力タービン	ここ数年、風車ブレード翼端形状、ギヤボックスおよびナセル密閉構造等の改良により騒音は1/3程度に低下している。しかし、さらなる努力により、極力騒音の低い風力タービンが追求されている。
柔構造システム	機械・構造、電気・制御面で柔軟な設計思想を導入し、耐久性の向上と重量、コストの大幅な低減を実現するシステム。
電力網接続方法の簡略化と安全確保	商用電力網に風力発電電力を接続する場合、いくつかの問題が生じる。これらの対応策は、国によって異なる。さらに、電力網なるものはヨーロッパと日本また、日本とアジア各国では相当異なる。また、同じ国内でも接続条件が場所によって異なる。経済的に電力網への接続が可能のように研究開発が待たれる。
高強度・軽重量素材の開発	ブレード・ナセル等に、高強度・軽重量素材が求められている。
安全管理システムの開発	集合型風力発電所を建設した場合、人件費節約形の高度な安全管理体制が必要になる。台風・地震等の災害時にも十分対応できるシステムが望まれる。
風力タービン立地場所の選択手法の開発	風力タービンの設置場所選択は、重要な問題である。特に我が国のように山岳地帯の多い国では、多数の風力タービンを設置する場所を特定するのに困難を伴う。山岳部凹凸地形と風の関係についての研究は少なく、適格な判断が難しいので、今後人工衛星画像等を用いた適地選定手法を開発する必要がある。
精度が高くかつ低価格で行える風況観測手法の開発	さらに、風況測定を全国的に行い、強風地域を正確に把握する必要がある。全国的な風況測定に当たっては、低価格で面的な測定が可能のように、アルミポール15mを用いる方法が良い。安価なポールでも十分強風に耐えることが過去の測定から明らかになっているので、安価なポールを用いて本数を増やし、面的に強風域の発見が望まれる。

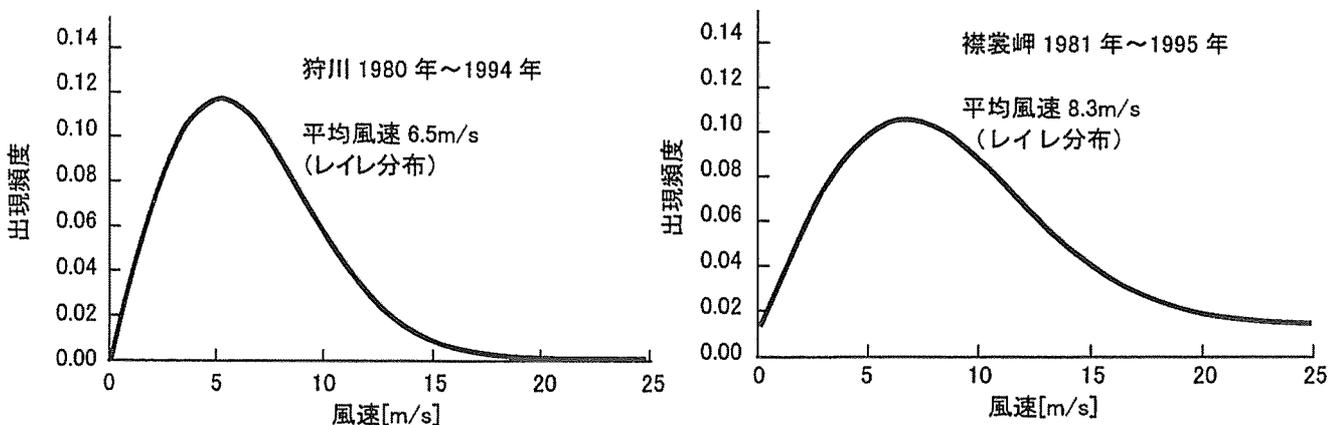


Fig. 1-3 Frequency of wind velocity appearance

2.2 風力タービンの制御(運転方式および駆動方式)による分類

Fig. 2-1 には、風力タービンの出力曲線、すなわち、出力と風速の関係を2例程示す。風力タービンは設計出力以上になると発電機容量の制約から風を逃がす必要がある。この方法には、2つの方法が用いられている。(1)フルスパンピッチ制御 (2)翼端小翼失速制御 (Fig. 2-2 参照) (1)および(2)の方式は、それぞれ特徴があり平均風速の違い、風の乱れ強度によって、その特徴が発揮されるように設計されている。Table 2-2 には、36社87機種種のフルスパンピッチ制御および翼端失速制御の分類を示す。定速発電・可変速発電ともに失速制御風車の方がフルスパンピッチ風車より多い。Table 2-3 には、風車の発電方式について、調査結果を述べている。定速運転発電においても2つの方法がある。1つは、2段切替方式:風速3m/s~7m/s程度では、6極で低回転発電を行い、7m/s以上では、4極で高回転発電を行う。2つ目には、2発電機方式:主発電機プラス小型発電機(主発電機の1/5~1/3)可変速発電:風速に応じて回転数を変える。突風によるトルク増大を回転数を高めることによって緩和する。さらに、直接駆動方式では、ロータに発電機が取り付けられており、しかも可変速で発電を行う。

Fig. 2-3 には、風車ブレードの制御方法の違いによる発電出力ピークの瞬時値を比較する。失速制御方式では、最大で定格出力の2.2倍に達し、フルスパンピッチ制御では可変発電機を組み合わせると1.2~1.3倍程度におさまる。

Fig. 2-4 には、ロータ直径と kWh 当たりの建設単価の年別変化を示す。

Fig. 2-5 には、風車定格の違いによる発電単価と年間平均風速の関係を示す。

Fig. 2-6 には、ナセル1kg当たりの設備単価とロータ直径の関係を示す。

Fig. 2-7 には、比風力発電単価と、ロータ直径の関係を示す。

Fig. 2-8 には、中型風車および大型風車の翼端周速度の関係を示す。

Fig. 2-9 には、ナセル1kg当たりのトルク発生量と風車直径の関係を示す。

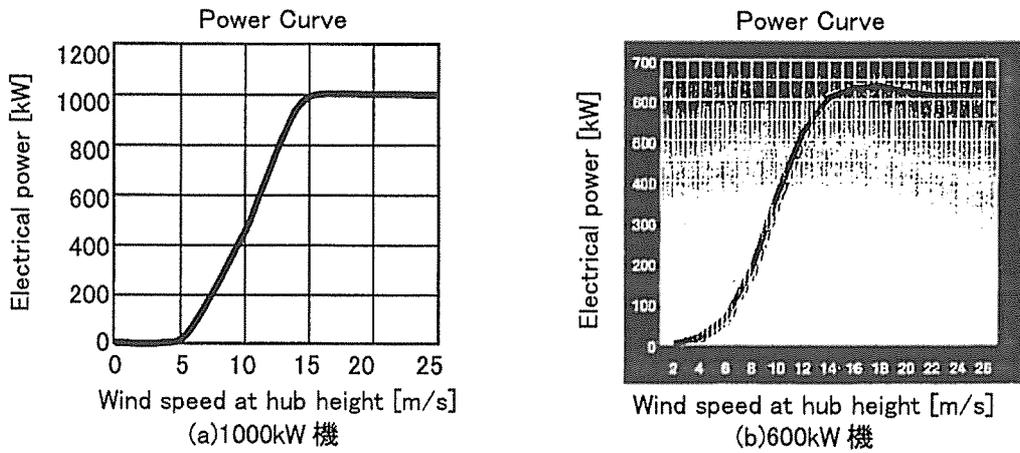


Fig. 2-1 Feature of power generation of wind turbine

Table 2-2 Class of full span pitch control and stall control of blade tip

方式	定速運転		可変速運転	直接駆動式
	2段切替方式 (2重巻線式発電機)	2発電機方式		
	種数変換 低風速域 (4~7m/s)6極 ↓ 高風速域 (7m/s~)4極	主発電機+ 小型発電機(主発電 機定格の1/5~1/3)	風速に応じてロータ回 転速度を変える	直接駆動式発電機 (減速機無し)
特徴	低風速域(4~7m/s) で発電可能 低風速域:回転数低 (定格の2/3)→空力的 騒音減少	低風速域(4~7m/s) で発電可能 低風速域で小型発電機 はフルロード	ガスト等による瞬時的 なトルク変動をロータ 回転数を上げることに よって回避 低風速域:回転数低 (定格の2/3)→空力的 騒音減少	増速機トラブル無し ギヤ騒音無し

Table 2-3 Generation form of wind turbine

定速運転		可変速運転	
ピッチ制御	失速制御	ピッチ制御	失速制御
18	59	8	2

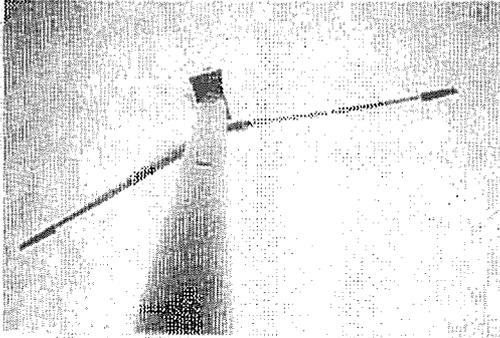


Fig.2-2 Blade tip vane stall control

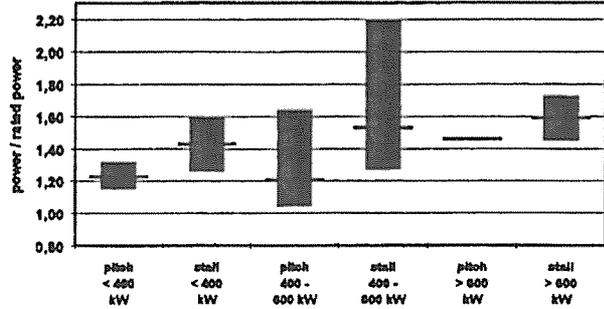


Fig. 2-3 Instantaneous power peaks of measured WECs⁽¹⁾

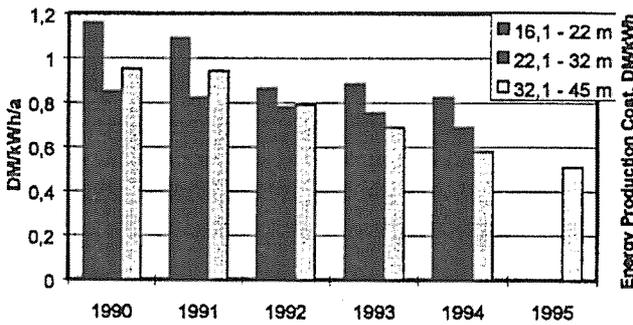


Fig. 2-4 Development of the WEC prices in DM value of 1991 with respect to the annual energy yield⁽¹⁾

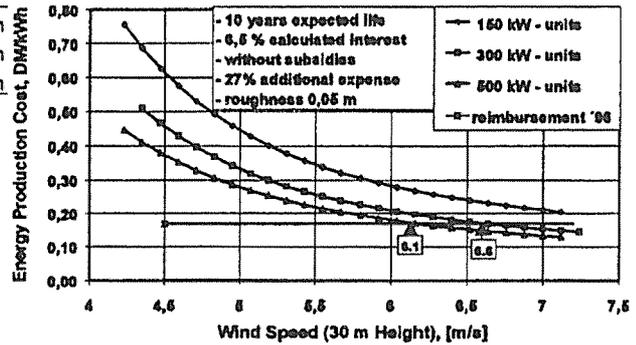


Fig. 2-5 Wind energy production cost for different WEC sizes with respect to same financial conditions⁽¹⁾

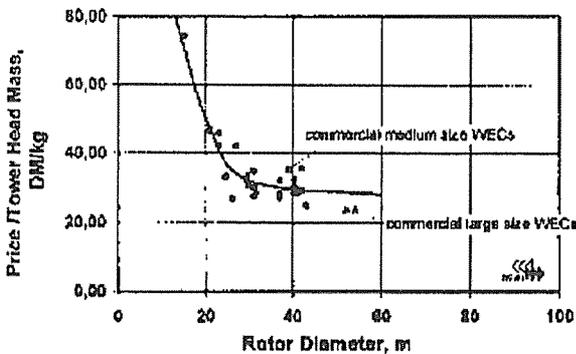


Fig. 2-6 Price of 1kg to warhead mass of some WECs⁽¹⁾

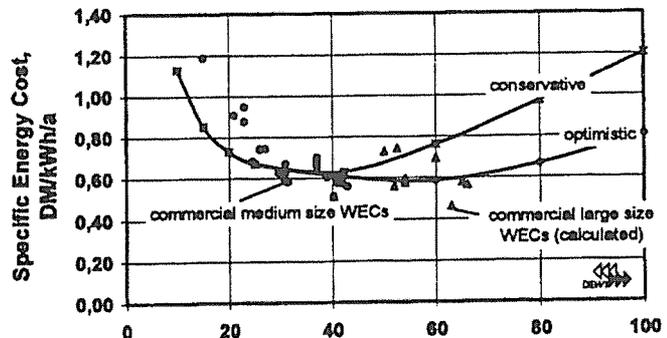


Fig. 2-7 Energy generation costs related to annual energy yield at a 6m/s (10m height) site with the assumption of a conservative and optimistic technological development in comparison with today's values of commercial WECs⁽¹⁾

2.3 先端技術風力タービンの例

Fig. 2-10 には AOC15/50 風力タービンを紹介する。新しい考え方を多数取り入れた風力タービンの一例を示す。チップブレーキ、固定ピッチ、ダウンウインドタイプ、ヨーダンパ付きパッシブヨー、Fig. 2-11 には AOC15/50 に採用した翼の翼断面形状、Fig. 2-12 には改良機 AOC15/50 と従来機 Entertech44/40 との性能比較を示す。きめこまかな改良によって、低風速領域の性能が著しく改善される。Fig. 2-13 には、新型風車専用翼型を用いた場合の性能改善例を示す。翼型によって、50%~60% という性能改善が達成された例である。風車専用翼型の開発は今後の重要な研究課題である。

Fig. 2-14 には、三重大学で開発中のティーター・ブレーキ&ダンパ機構の性能を示す。まだ風洞実験の段階であるが、すぐれたブレーキ効果(定格風速以上で)を示す。

Fig. 2-15 には、ロータ・発電機一体形のラハウエー風車を紹介する。この風車には、多極発電機を用いてギヤレスを実現し、ロータ・発電機一体形にして、回転軸を省略している。極めて斬新な風車である。

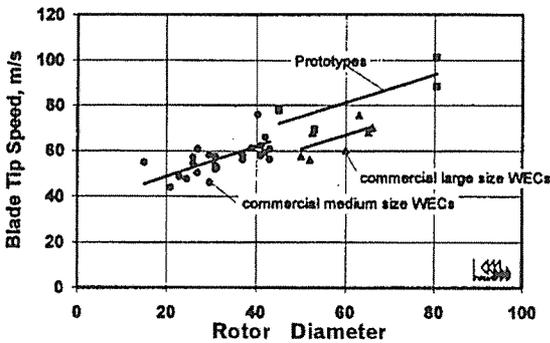


Fig. 2-8 Blade tip speed of medium and large size WECs⁽¹⁾

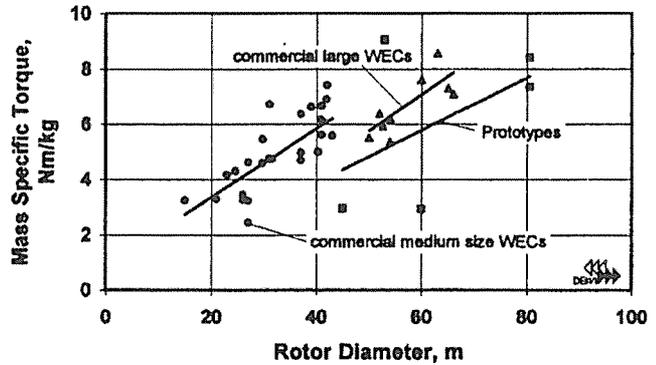


Fig. 2-9 Torque per kg tower head mass of WECs⁽¹⁾

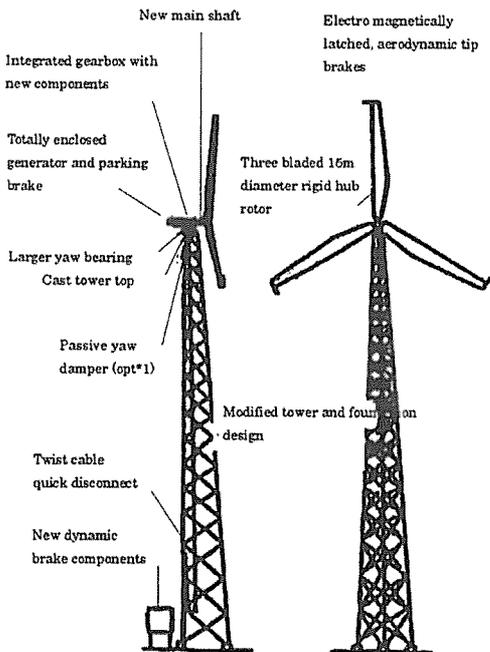


Fig. 2-10 AOC15/50wind turbine⁽²⁾

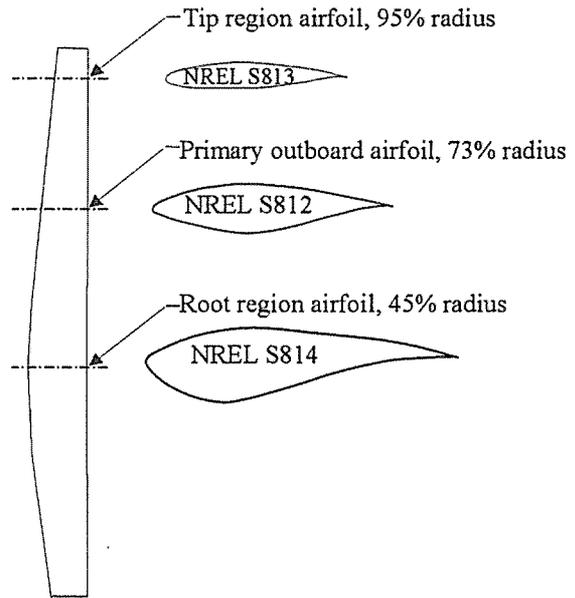


Fig. 2-11 Blade cross section of AOC 15/50⁽⁴⁾

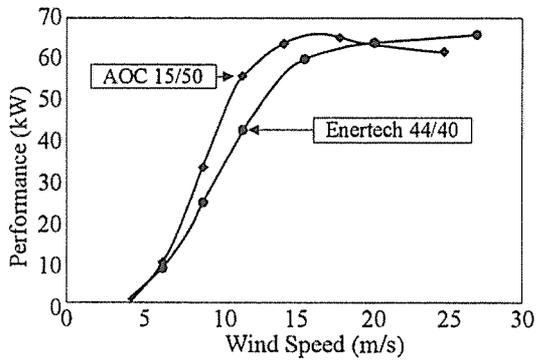


Fig. 2-12 Performance comparison of improved wind turbine⁽²⁾

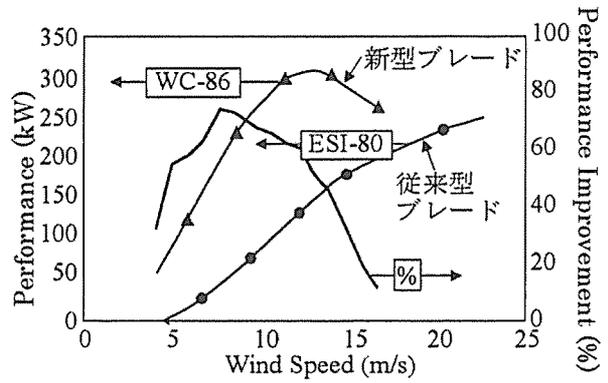


Fig. 2-13 Performance improvement by wing profile⁽²⁾

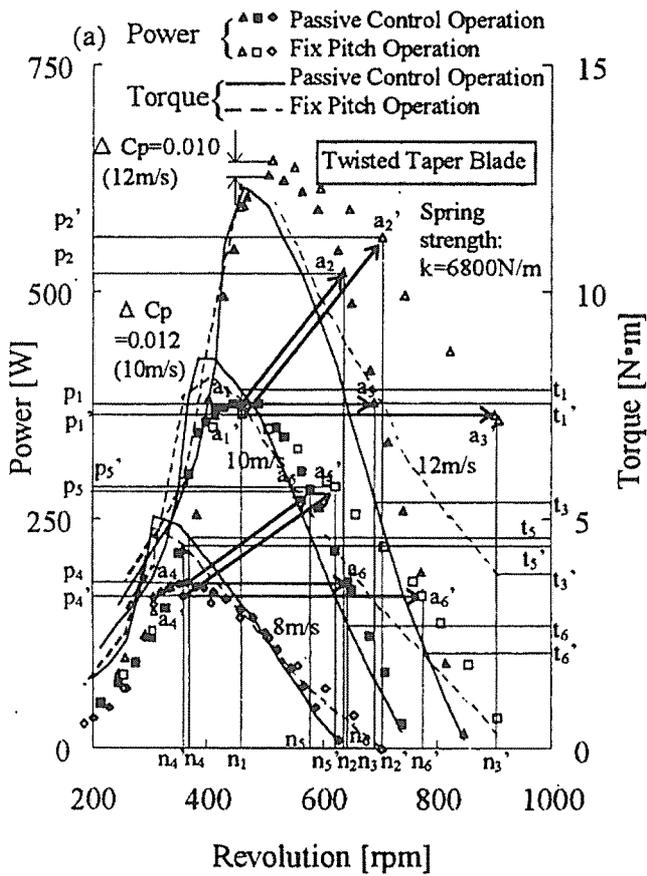


Fig. 2-14 Performance figure of Teeter brake and Damper mechanism⁽³⁾

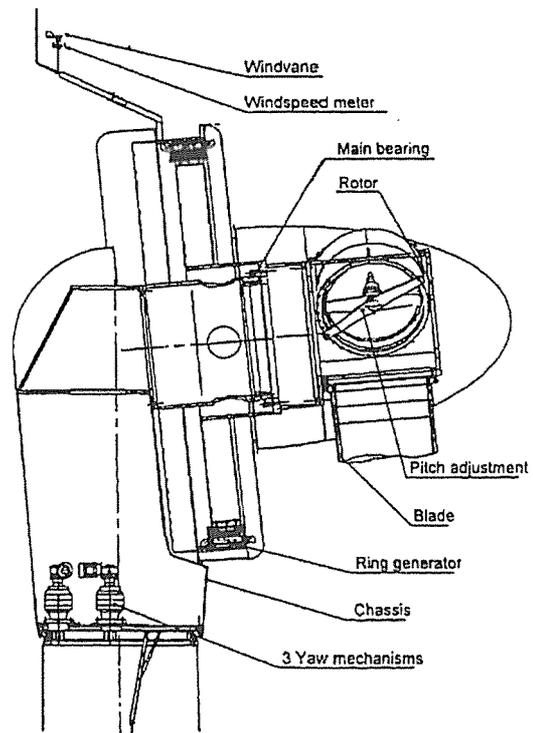


Fig. 2-15 Lagerwey wind turbine with rotor and generator in a body⁽⁴⁾

Table 2-4 Operational wind power capacity worldwide^{1,2)}

Operational wind power capacity worldwide				
	END 1997	CURRENT	END 1997	CURRENT
Europe				
Germany	2080	2583		
Denmark	1116	1380		
Spain	512	660		
Netherlands	325	359		
UK	320	331		
Italy	100	154		
Sweden	117	148		
Ireland	51	60		
Portugal	38	60		
Greece	29	39		
Austria	20	25		
France	10	19		
Finland	12	17		
Turkey	0	9		
Norway	4	8		
Belgium	7	7		
Czech Republic	7	7		
Russia	5	5		
Ukraine	5	5		
Poland	3	3		
Luxembourg	2	3		
Switzerland	2	2		
Latvia	1	1		
Romania	1	1		
			Asia	
			India	950
			China	166
			South	0
			Korea	2
			Total	1116
			1160	
			South&Central America	
			Costa Rica	20
			Argentina	9
			Brazil	3
			Mexico	2
			Total	34
			43	
			Pacific Region	
			Japan	18
			Australia	11
			New Zealand	4
			Total	33
			62	
			Middle East & Africa	
			Iran	9
			Israel	6
			Egypt	5
			Africa	3
			Jordan	1
			Total	24
			24	
Total	4766	5886		
North America				
USA	1590	1946		
Canada	21	83		
Total	1611	2029		
			Caribbean	4
			4	
			World's current total	9208 MW

3. 風車回転翼に加わる非定常流体力に関する研究

3.1 IEA 国際指定研究

本節では風車先端技術を支える研究の一環として、当研究室が行っている研究を紹介する。当研究室は、国際エネルギー機関第 18 分科会 (International Energy Agency, Annex XVIII、以下 IEA Annex XVIII と略す) の国際指定研究 “フィールド回転翼空力データベースの構築 (Enhanced Field Rotor Aerodynamics Database)” を、附属農場・生物生産システム研究センター敷地内で行っている。この国際共同研究には、日本政府代表として当研究室が参加しているほか、オランダ、デンマーク、イギリス、ギリシャ、アメリカの各国政府を代表する研究機関から専門の研究者が参加している。

最近の風車の研究開発により、風車効率は大きく改善されてきている。風車性能は翼の性能に大きく影響されるため翼に作用する流体力を把握するのは重要な課題である。しかしフィールドにおいて風車翼に流入する流れは非定常であり、また翼の回転により翼周りの流れは 3 次元流れとなり非常に複雑である。IEA Annex XVIII において当研究室が寄与しているテーマとしては、フィールドにおける水平軸風車実機翼面上の圧力測定を行い、風車翼に働く流体力の諸特性を明らかにし、今後の翼型開発に役立てることを目的としている。

3.2 本節で使用する記号

- C_p : 圧力係数 $p/0.5 \rho W^2$
- C_n : 翼厚方向力係数 $\int p ds_t / 0.5 \rho W^2 c$
- C_t : 翼弦方向力係数 $\int p ds_n / 0.5 \rho W^2 c$
- c : 翼弦長 m
- p : 遠心力を補正した翼面上圧力 Pa
- r : 翼半径位置 m
- R : 翼車半径 5m
- S_n : 翼厚方向投影長さ m
- S_t : 翼弦方向投影長さ m
- U : 主流速度 m/s
- W : 相対速度 $(U^2 + (R\omega)^2)^{1/2}$ m/s
- x : 翼前縁からの翼面上位置 m
- ω : 翼車回転角速度 rad/s
- α : 局所迎角 deg

3.3 風車仕様および実験装置

Fig.3-1 に供試フィールド風車の概要を示す。本風車は定格出力 8kW、翼車直径 10.0m、ハブ高さ 13.3m、可変ピッチ機構を持つ 3 枚翼のアップウインド型水平軸風車である。ナセルとタワーの間にヨーモータが取り付けられており、風向に対して可動である。また、風車上流 14.3m に主流速度を測るため風速計を設けてある。

Fig.3-2 に圧力測定用の供試翼を、Fig.3-3 に圧力測定部翼断面を示す。供試翼は翼端半径 5.0m、FRP 製テーパねじり翼で、翼型は翼根部から、DU 91-W2-250、DU 93-W-210、NACA 63-618 の 3 つの翼断面を代表として採用し、その他の翼断面は補間によって寸法を定めてある。翼端から翼根までのねじり角は 12° である。

圧力測定孔は、翼半径位置 $r/R=0.7$ の断面の翼表面に直径 0.4mm で 60 個設けてある。また、翼前縁 1ヶ所に流れの動圧、流入角測定のための 5 孔ピトー管を取り付けている。

Fig.3-4 に圧力測定系を示す。翼面上の圧力測定孔で検知される圧力はウレタンチューブを介し半導体式圧力センサで電気信号に変換される。この信号は信号ケーブルを通り、信号増幅器、スリッピングを介して AD ボードからコンピュータに取り込まれサンプリングされる。なお、使用した圧力セ

ンサは、検定モードと圧力測定モードの切換のための加圧を必要とするので、圧力タンクをハブ上に取りつけてある。

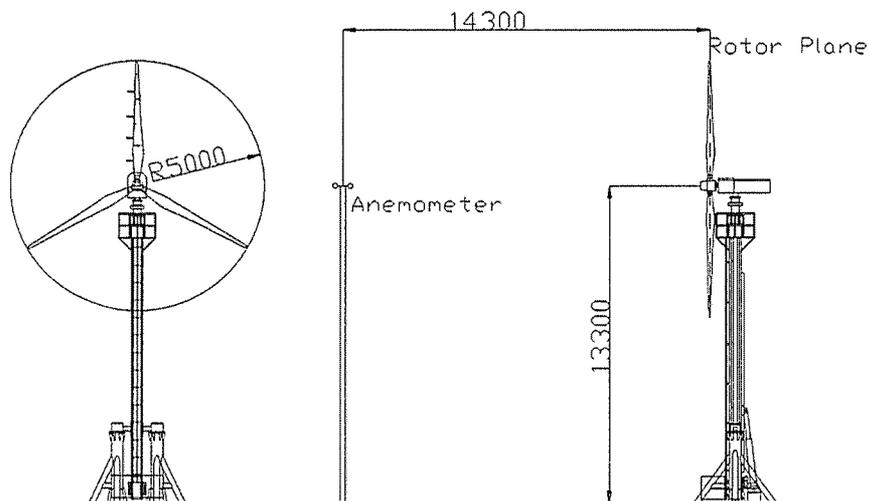


Fig.3-1 Wind Turbine and Anemometer

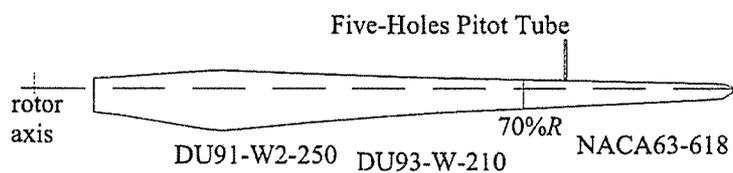


Fig.3-2 Test Blade

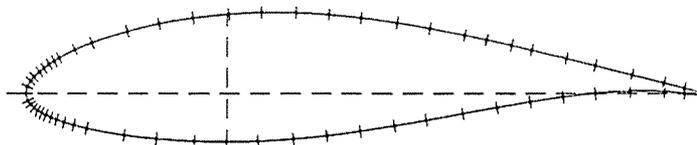


Fig.3-3 Positions of Pressure Taps at Measurement Cross-Section

3.4 実験結果

Fig.3-5 に発電状態における局所迎角 α に対する翼厚方向力係数 C_n および翼弦方向力係数 C_t との関係を示す。ここでは C_n と C_t を α に関して BIN 法で平均化した。また、本報では C_n 、 C_t を算出するために用いる流れの動圧、迎角を求めるための流れの流入角を求めるため、風車より 14.3m 上流の風速計で測定される主流速度 U と回転速度 $r\omega$ を用いた。これにより相対速度 W 、局所迎角 α を算出した。

C_n の値は迎角の増加にともなってなだらかに増加し、 $\alpha=9^\circ$ で $C_n=1.232$ となり最大値をとる。そしてその後は迎角の増加に伴ってなだらかに減少する。一方 C_t の値は迎角の増加にともなってなだらかに減少し $\alpha=11^\circ$ で $C_t=-0.152$ となり最小値をとる。その後、迎角の増加にともなってなだらかに増加する。

このことから、この翼は $\alpha=9^\circ$ 付近で最高の効率を示している事がわかる。また迎角の変化があっても C_n と C_t の変化はゆるやかである。したがってこの翼は非定常流に対して発生する力が安定しており、風車翼として適していることがわかる。

Fig.3-6 に代表的な 3 つの迎角における翼面上の圧力分布を示す。これは前述の翼性能評価で得られた最高効率迎角 $\alpha=9^\circ$ 、それより小さい $\alpha=5^\circ$ 、また大きい $\alpha=17^\circ$ の 3 つの迎角を選び、各迎角における圧力分布を示している。ここでよどみ点での圧力係数 C_p が厳密には 1 に等しくないが、これは流れの動圧を上流の主流速度 U を用いて算出したため風車と風速計の距離による時間差、および風車上流の近寄り速度により誤差が生じたものと考えられる。

図より翼前縁付近において正圧面と負圧面の圧力差が大きく、それは $\alpha=9^\circ$ のときに顕著であることがわかる。また、これら 3 つの圧力分布を比較すると、 $\alpha=5^\circ$ と $\alpha=17^\circ$ では $\alpha=5^\circ$ の方が全体的に負圧面の値が小さいが全体の分布形状はかなり似ている。それに対し $\alpha=9^\circ$ においては、負圧面の圧力が $x/c=0.2$ で $\alpha=17^\circ$ とほぼ同じ値を取るが、それより前縁では負圧が急激に上昇し、前縁付近で大きな圧力差を発生していることがわかる。

これらの事から、この翼で最大の効率を示す迎角においては、負圧面の翼前縁付近で大きな負圧が発生し翼の性能を向上させていることがわかる。

参考文献

- (1) J.P. Molly, et. al. Status and further development of wind energy in Germany, Proc. European Union Wind Energy Conference 1996, Goteborg(1996),846.
- (2) A.S. Lexson et. al., 米国エネルギー省／国立再生型エネルギー研究所の先進風車開発計画, ターボ機械, 22-2, 1994, 16.
- (3) Y. Shimizu, et. al., Development of advanced passive-controlled hub of horizontal axis wind turbine -(2nd report: behavior of improved mechanism and the effects of blade configurations)-, Proc. European Union Wind Energy Conference 1996, Goteborg(1996),846.
- (4) G.J.W. van Bussel, A Hundred Years of wind Power Development in Europe, Past, Present and Future, Proc. International Conference on Fluid Engineering, Tokyo(1997), 171.
- (5) Wind power monthly, July, 1998.

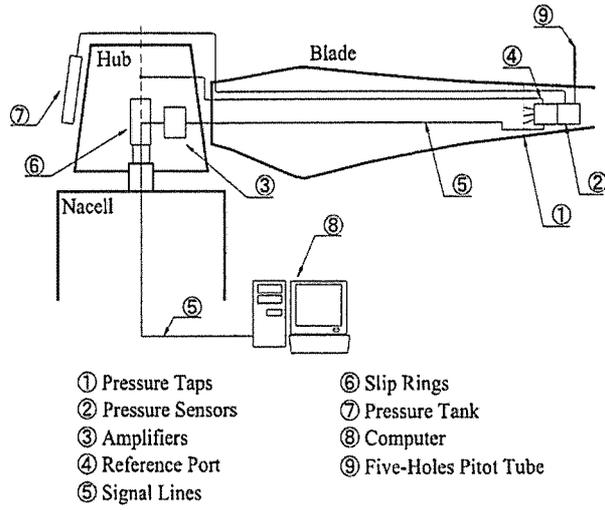


Fig.3-4 Measurement System

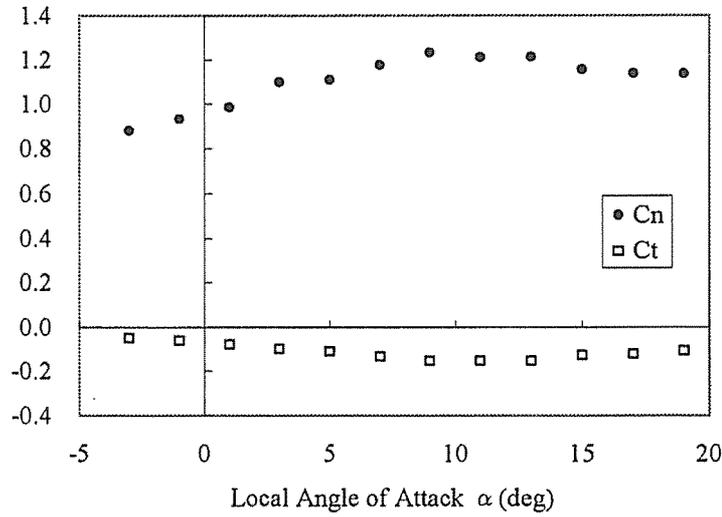


Fig.3-5 Tangential and Normal Forces Coefficient Curve of the Cross Section

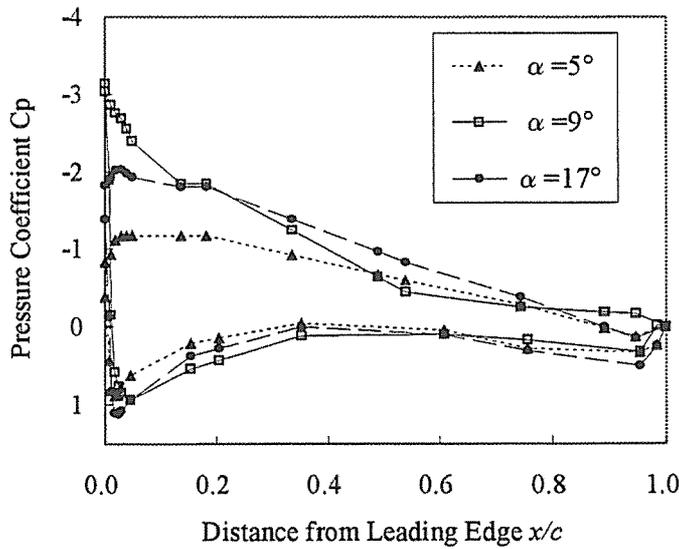


Fig.3-6 Difference of Pressure Distribution for the Various Local Angle of Attack