



本格化しつつある日本の風力開発

清水幸丸*

1 緒 論

最近風力発電が話題になり始めた。これまで「風を利用する」という行為は、我が国では帆船あるいはヨットといった舟への利用が中心であった。日本では、風の運動エネルギーから電力多量使用時代に間に合う程の電力を得るといことは、夢としては成立しても、現実味のとぼしい内容と理解している人々が多い。このような状況から我が国では、独自開発は大幅に遅れた。現在欧米の風車技術は格段の進歩をとげ、1,000 kW ~ 1,500 kW、直径 55 m ~ 65 m 程度が主力商品

になりつつある。さらに、風力発電の拡大に伴って洋上風力 (off-shore) 開発研究が相当レベルまで進んできている。洋上の場合には、風車規模も大きく 5,000 kW 程度が開発の対象として上げられている。このような状況になれば、自主開発に腰の重い人々も目を覚ますのでなからうか。

図1には日本の風車設置状況を示す。400 kW 級の中途半端な風車が多数並んでいるが、国際的にみれば「おやおや」という首をかしげる状況である。これは今までの日本であるが、この期におよんで 750 kW 機、1,000 kW 機が建設されはじめ、規模も 2 万 kW ~ 3 万



図 1 1999 年前半の日本の風車設置状況

* 三重大学, 工学部機械工学科

kW場合によっては6万kWという集合型発電所の建設が進んでいる。この背景には上にも述べたが、大型風車技術開発の成功と、地球規模環境問題の一つ「地球温暖化」対策の諸施策が上げられる。中でも「新エネルギー利用促進に関する特別措置法」(新エネ法)の役割は大きい。

技術開発の内容としては、代表的なものを上げると「風車専用厚翼の開発」、「長尺翼の取り付け方法の開発(1例としてTボルト構造)」、「発電機2発電方法の開発(2重巻線、2段切り替え発電機、インバータ技術使用の連続可変速発電機)になる。当然であるが部分的には多数の改善点がある。

以下の各節では「風とは」「先端技術風車とは」を述べることにする。

2 風力エネルギーの評価

2.1 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、冬期間または年間を通して、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750 kW、1,000 kW、2,000 kW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。これらの場所は、北海道、本州、四国、九州、南西諸島と全国に存在する。

2.2 風の定常性と変動性

地球上の風を大きく把握すると図2-1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、主に図2-1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。

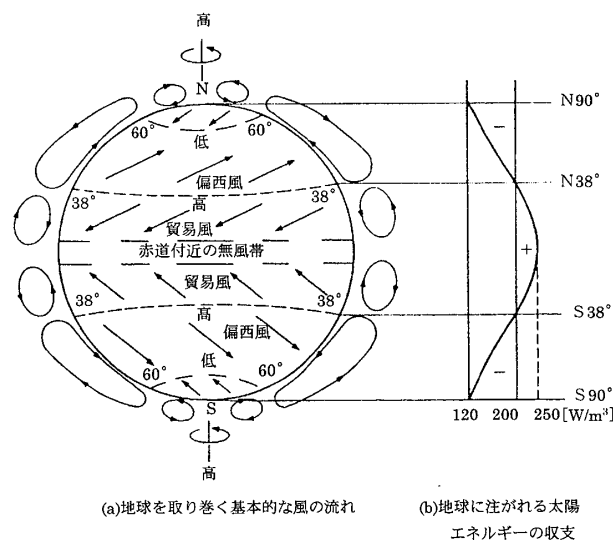


図 2.1 地球上の風の発生モデル
資料「風力発電技術」(清水幸丸・1999)

次に、日本列島における風について注目してみる。図2-2には、山形県立川町狩川のアメダスデータ(観測点地上高6.5 mと低いので、換算式により地上高40 m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データ(観測点地上高12 mを、地上高40 m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。

図2-3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

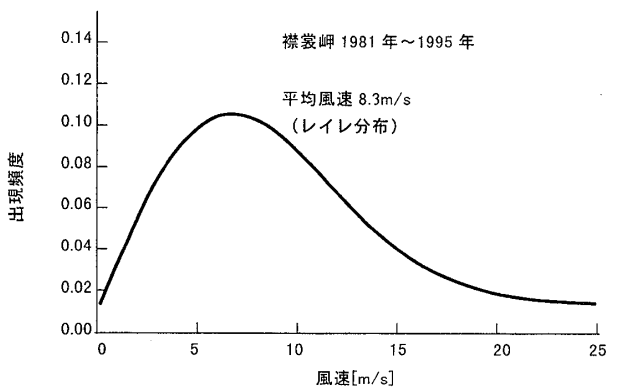
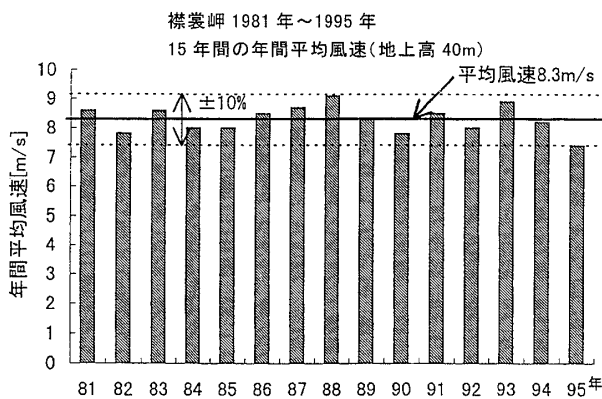
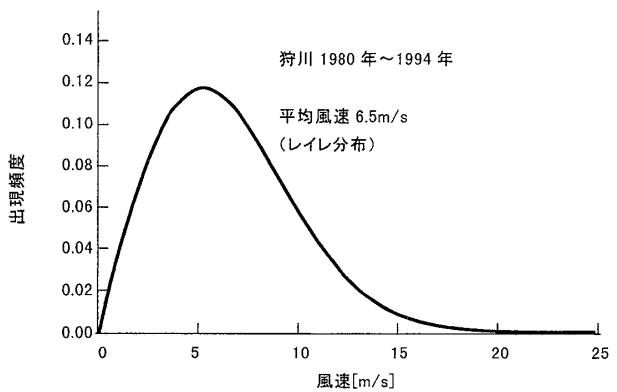
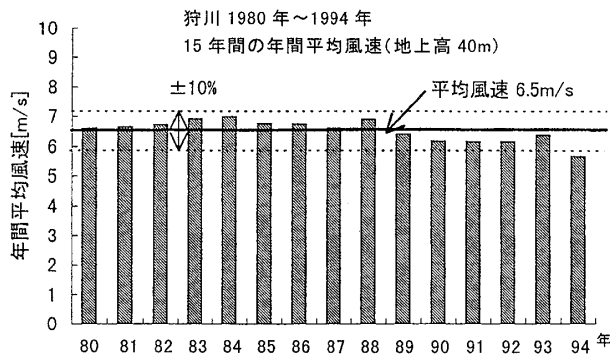


図 2-2 アメダスデータ

図 2-3 風速出現頻度

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、図2-2、図2-3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。電力の安定供給のためには、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。

3 現在の先端技術風車

3.1 風力タービンの現状

1998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、9,839 MWに達している(表3-4参照)。EUの2030年の目標値100,000 MW(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50 kWであったが、1995年時点で500～800 kWが主力機となり、1996年には、商用機として1,000 kW～1,500 kW機が登場し、2000年には、1,000 kW機が主力機になると予想されている。

表 3-1 次世代風力タービン

パッシブ型テイータ&ブレイキ付きロータ	ブレードに働く推力を利用して、テイータ運動と設計出力以上で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ない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ないように、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。

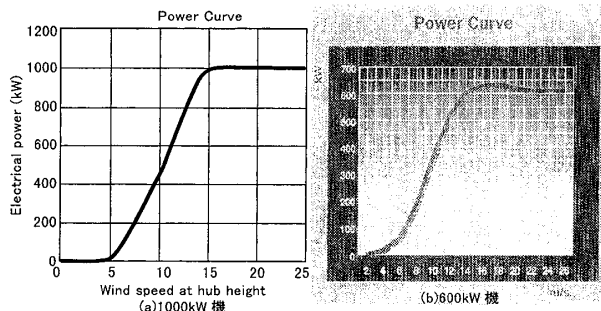


図 3-1 風車出力特性

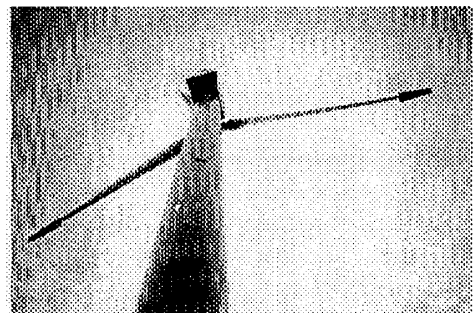


図 3-2 翼端小翼失速制御

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表3-1のようになる。

3.2 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

図3-1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

表 3-2 風車の発電方式

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

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 (図3-2参照) (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。表3-2には、36社87機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。表3-3には、風車の発電方式について、調査結果

表 3-3 フルスパンピッチ制御および翼端失速制御の分類

方式	定速運転		可変速運転	直接駆動式
	2段階切替方式 (2重巻線発電機)	2発電機方式		
極数変換 低風速域 (4~7m/s)6極 ↓ (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ー回 転速度を変える	直接駆動式発電機 (減速機なし)	
特徴	低風速域(4~7/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	ガスト等による瞬間的なトルク変動をローター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

を述べている。定速運転発電においても二つの方法がある。一つは、2段階切替方式：風速3 m/s～7 m/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。二つ目には、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。

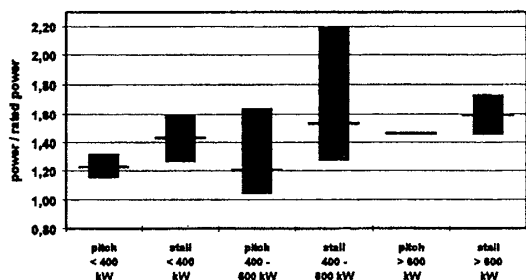


図 3-3 発電出力ピークの瞬時値¹⁾

図3-3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したものである。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。

図3-4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。図3-5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。図3-6には、

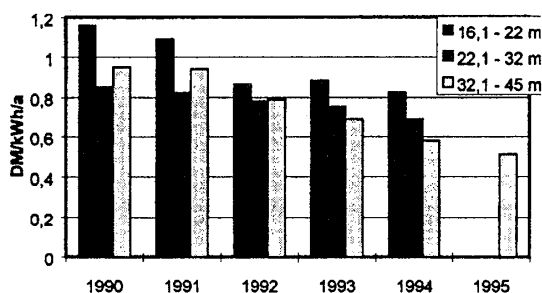


図 3-4 ロータ直径とkWh当たりの建設単価の年別変化¹⁾

ナセル1 kg当たりの設備単価とロータ直径の関係を示す。図3-7には、比風力発電単価と、ロータ直径の関係を示す。図3-8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。図3-9には、ナセル1 kg当たりのトルク発生量と風車直径の関係を示す。

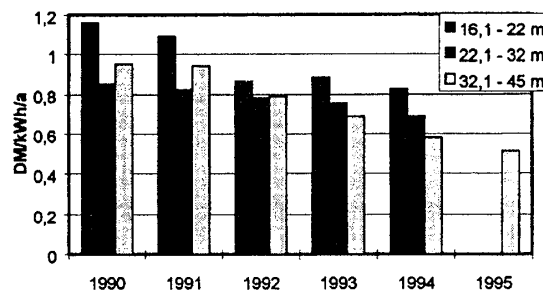


図 3-5 風車定格の違いによる発電単価と年間平均風速の関係¹⁾

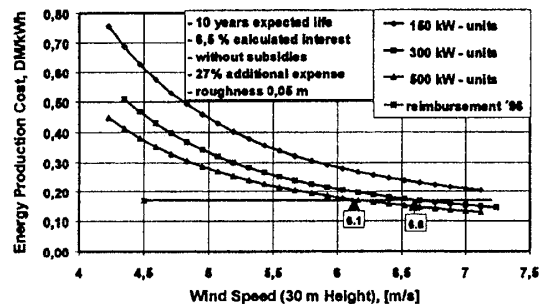


図 3-6 ナセル1 kg当たりの設備単価とロータ直径の関係¹⁾

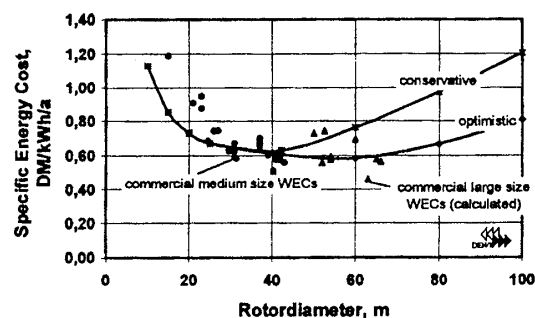


図 3-7 比風力発電単価とロータ直径の関係¹⁾

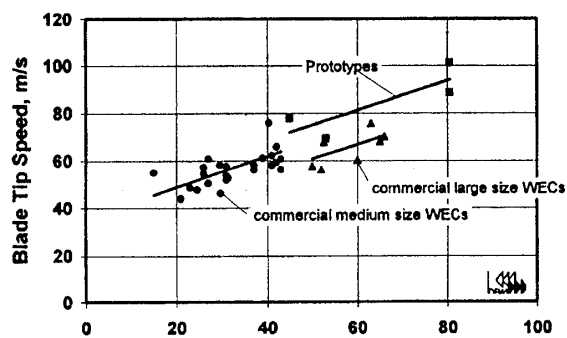


図 3-8 中型風車および大型風車の翼端周速度の関係¹⁾

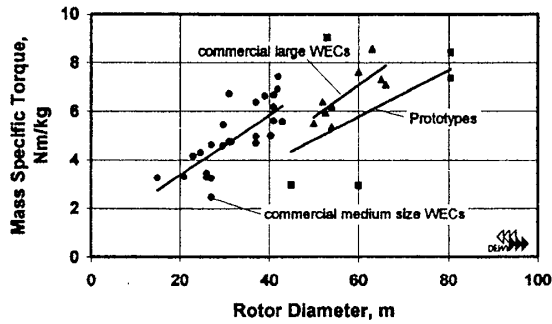


図 3-9 ナセル1 kg当たりのトルク発生量と風車直径の関係¹⁾

これらの図は、小型機から大型機に至る過程の風車を評価する諸コスト要素を示している。大きな結果は、風車の大型化によって発電単位は低下する傾向にあるという事である。

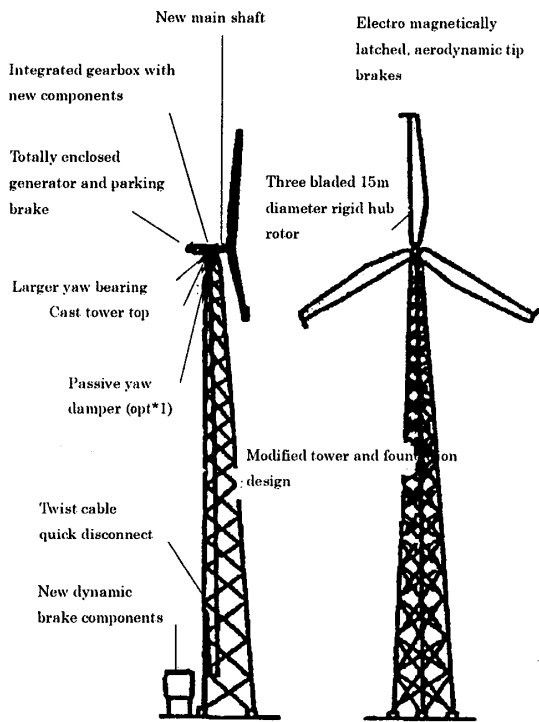


図 3-10 AOC15/50風車²⁾

3.3 先端技術風力タービンの例

図3-10にはAOC15/50風力タービンを紹介する。「翼根側に厚翼を用いたり、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等」新しい考え方を多数取り入れた風力タービンである。図3-11にはAOC15/50に採用した翼の翼断面形状、図3-12には改良機AOC15/50と従来機Enertech44/40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。

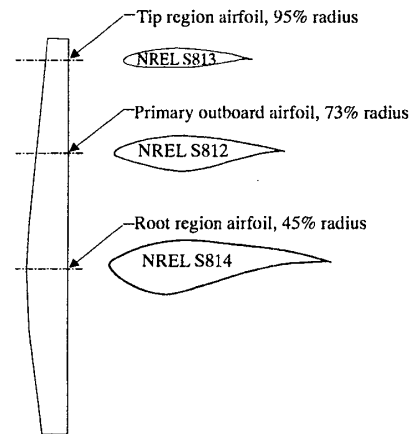


図 3-11 AOC15/50機の翼断面²⁾

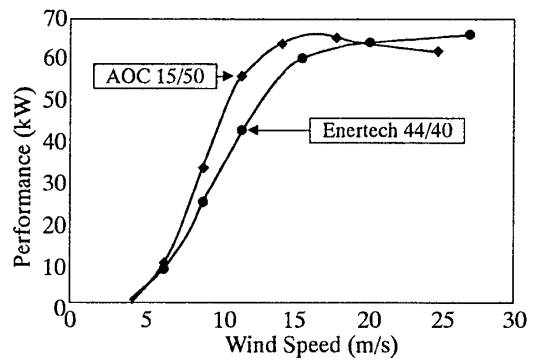


図 3-12 改良型風車の性能比較²⁾

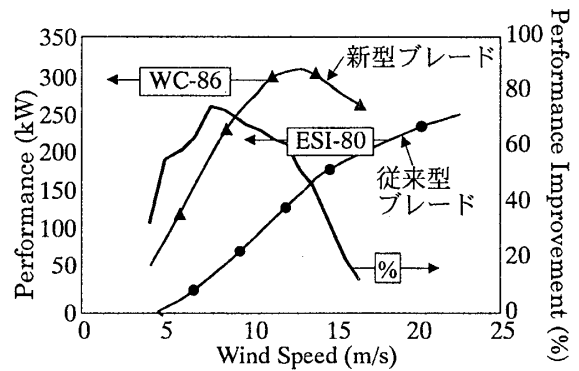


図 3-13 翼型の改良による性能改善例²⁾

図3-13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。

図3-14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)を示す。

図3-15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

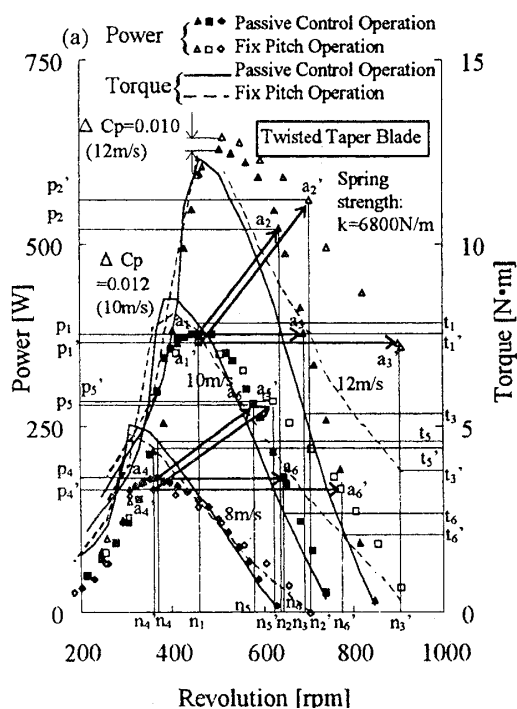


図 3-14 ティーター・ブレーキ&ダンパ機構の性能³⁾

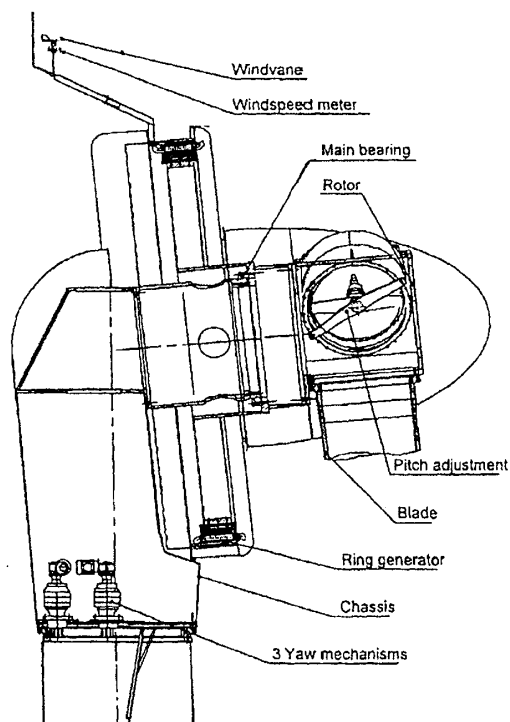


図 3-15 ロータ・発電機一体形のラハウエー風車⁴⁾

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。

参考文献

1) J. P. Molly, et al., Status and further development of

表 3-4 世界各国の風力発電設備容量

Operational wind power capacity worldwide				
	END 1997	END 1998	END 1997	END 1998
Europe				
Germany	2080	2874		
Denmark	1116	1450		
Spain ¹	512	834		
Netherlands	325	363		
UK	320	334		
Italy	100	180		
Sweden	117	150		
Ireland	51	63		
Portugal	38	60		
Greece	29	39		
Austria	20	30		
France ²	10	19		
Finland	12	17		
Turkey	0	9		
Norway	4	9		
Belgium	7	8		
Czech Republic	7	7		
Luxembourg	2	5		
Russia	5	5		
Ukraine	5	5		
Poland	3	3		
Switzerland	2	3		
Latvia	1	1		
Romania	0	1		
Total	4766	6469		
North America				
USA	1590	1952		
Canada	21	83		
Total	1611	2035		
Asia				
India			950	968
China			166	224
South Korea			0	2
Total			1116	1194
South & Central America				
Costa Rica			20	26
Argentina			9	12
Brazil			3	7
Mexico			2	3
Total			34	48
Pacific Region				
Japan			18	41
Australia			11	17
New Zealand			4	5
Total			33	63
Middle East & Africa				
Iran			9	11
Israel			6	6
Egypt			5	5
Africa ³			3	3
Jordan			1	1
Total			24	26
Caribbean				
			4	4
<small>¹ includes Canary Is. ² includes Portugal Caledonia ³ includes Cape Verde</small>				
World total start 1999 9 8 3 9 MW				

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 Busse1, 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, May, 1999.