



Techno Scope

見えてきた新エネルギー時代の到来

大型化する風力発電

青空を背景に、巨大な白い風車が回る。風力発電の風車が立ち並ぶ風景は、大自然の中で大いなるロマンを感じさせる。地球温暖化防止のためにいろいろな新エネルギーの導入が検討されているが、このなかで風力発電は、エネルギー源の風がクリーンで枯渇する心配がなく、技術的にも実用化段階にあり、今後の導入量の伸びが期待される。風力発電設備では、風車を初め、さまざまな箇所に鉄鋼材料が使われている。今回は、将来有望な新エネルギーの一つである風力発電を紹介する。

北海道・苫前町の苫前ウインドファームの全景。1,000kW風車×20本。ハブ高さ45m、風車直径54.2m、羽根先端の最高高さは72.1mにおよぶ。

神にも似た「風の脅威」

ギリシャのアテネに「風の塔」と呼ばれる塔がある。大理石で作られた八角形の塔の上部には、ギリシャ神話の8人の風の神様が彫刻されている。北風の神ボレアスはひげの老人の姿をしており、また西風の神ゼフィロスは着衣に花を抱えた春の神である。

風は神によってもたらされる、と当時の人々は考えてきたのであろう。やさしく吹くそよ風もあれば、自然の猛威としてとてつもない力を振るう突風もある。何の前触れもなくいきなり強い風が吹いたかと思えば、気まぐれに去っていく。この「力強さ」と「気まぐれ」という要素が、風を神という人間の手の届かない存在に見立てる理由であろう。

古くから人間が利用してきた風

風力は、水力と並んで人間が古くから利用していたエネルギーである。

風力利用は、紀元前6世紀～紀元4世紀のギリシャおよびローマ時代に始まったといわれている。7世紀のペルシャでは、灌漑のための揚水や製粉の目的で風車が利用された。10～13世紀には、風車の技術はアラビア、ヨーロッパ、中国などに広まった。「風車の国」とも呼ばれるオランダでは、19世紀には10,000台近くの風車が製粉と排水用に利用された。

一方日本では、風力利用の歴史は浅い。これは、水利に恵まれているため、動力としては主に水車が多く使われたからだと思われる。

風力発電への風の利用については、1891年、デンマークのポール・ラケールが世界で初めて成功し、その後、ヨーロッパを中心に各国へ広がっていった（コラム参照）。アメリカにおいても1910年代から小型風車による発電が普及した。1930年代になると出力100kW以上の大型風力発電機が開発されたが、羽根の折損事故やコスト高の理由から、1960年代には多くの事業が取り止めとなった。

歴史の中で多くの場合、強い風は人間の生活を脅かす存在として嫌われてきた。日本も例外ではない。例えば、北海道北部に位置し日本海を望む苫前町は、風が強いことで知られ、特に冬季のシベリアからの強い北西風が長い間人間の活動を阻害してきた。

しかし、苫前町では、この風で風力発電を行い、町おこしの一環としても利用しようと考えた。候補地は海岸に面した町営牧場敷地であり、この付近で見られる日本海に沈む夕日は、地域の重要な観光資源でもある。それゆえここに建設する風力発電施設には、最新技術を導入しながらも、自然環境に悪影響を及ぼさないことが求められた。

1999年、ここに建設された日本最大級のウインドファーム(複数の風車による風力発電設備)「苫前グリーンヒルウインドパーク」が北海道電力への売電を目的とした商業運転を開始した。設備の総出力は20,000kWで、当時(1998年度末)の国内風力発電設備総出力約38,000kWの2分の1以上に当たる出力を持つ画期的な設備である。苫前町は、引き続き2000年に出力30,600kWの「ドリームアップ苫前」、出力2,200kWの「風来坊」を建設した。厄介者だった風を、逆に利用した苫前町の取り組みは大きくクローズアップされ、「風の町」としてその名を知られるようになった。

「2010年に300万kW」を目指す日本

1980年代以降、地球温暖化防止に貢献する技術として、新エネルギー導入が検討されている。新エネルギーによる発電としては、風力発電のほか、太陽光発電、廃棄物発電、バイオマス発電などの可能性が期待されている。このうち政府が定めた2010年導入目標量の大きいものは、太陽光発電、風力発電および廃棄物発電であり、現状からの大きな伸びが期待されるのは風力発電と太陽光発電である。

風力発電システムの特徴は、風力は再生可能なエネルギーであるため環境負荷が少ないこと、エネルギー源の風はクリーンで無尽蔵にあること、発電規模が比較的大きくできること、などである。

日本では、1976年以降2000年までサンシャイン計画(1993年度からはニューサンシャイン計画)において、風力発電システムの技術開発が行われてきた。1990年代前半までの風力発電設備は試験研究用が多かった。1992年になると、電力会社による余剰電力購入制度の整備にともない、風力発電の電力を電力会社に売ることが可能になり、これに則したシステムの導入が検討されるようになった。1997年には「新エネルギー利用の促進に関する特別措置法(新エネ法)」が施行され、新エネルギー導入促進策の強化が図られた。

【コラム】

世界の風力発電をリードするデンマーク

世界で最初に風力発電を行った国はデンマークである。デンマークは1860年代のプロシャ戦争に敗れ、荒廃した国土を復興するためにさまざまな努力を行ったが、その一つが豊富な風を利用した風力発電だった。1891年に国立風力研究所が設立され、所長のポール・ラクール(ラウール)の指導により10~20kW級の風力発電所が多数建設された。

現在、世界で稼働している風力発電用風車のシェアの約3分の2をデンマークが占めている。また、IEC(International Electrotechnical Commission、国際電気標準会議)の風力発電に関する基準は、デンマーク国内の風車製造組合が作成した設計基準をもとに作成されている。このようにデンマークは、世界の風車製造技術をつねにリードし、風力発電の先進国と呼ばれている。



世界最初の風力発電装置

■日本における風力発電導入量の推移 (10kW以上、稼働中のもの)

(資源エネルギー庁資料)



■2010年度における新エネルギー導入目標(供給サイド)

(「新エネルギー部会報告書」総合資源エネルギー調査会新エネルギー部会、2001年6月より)

	1990年度(実績)		2010年度					2010/1990
			現行対策維持ケース		目標ケース			
	原油換算	設備規模	原油換算	設備規模	原油換算	設備規模		
	(万kl)	(万kW)	(万kl)	(万kW)	(万kl)	(万kW)		
太陽光発電	5.3	20.9	62	254	118	482	約23倍	
風力発電	3.5	8.3	32	78	134	300	約38倍	
廃棄物発電	115	90	208	175	552	417	約5倍	
バイオマス発電	5.4	8.0	13	16	34	33	約6倍	
太陽熱利用	98	—	72	—	439	—	約4倍	
未利用エネルギー (雪氷冷熱を含む)	4.1	—	9.3	—	58	—	約14倍	
廃棄物熱利用	4.4	—	4.4	—	14	—	—	
バイオマス熱利用	—	—	—	—	67	—	約3倍	
黒液・廃材等	457	—	497	—	494	—	約1.1倍	
新エネルギー供給計	693	—	878	—	1910	—	約3倍	

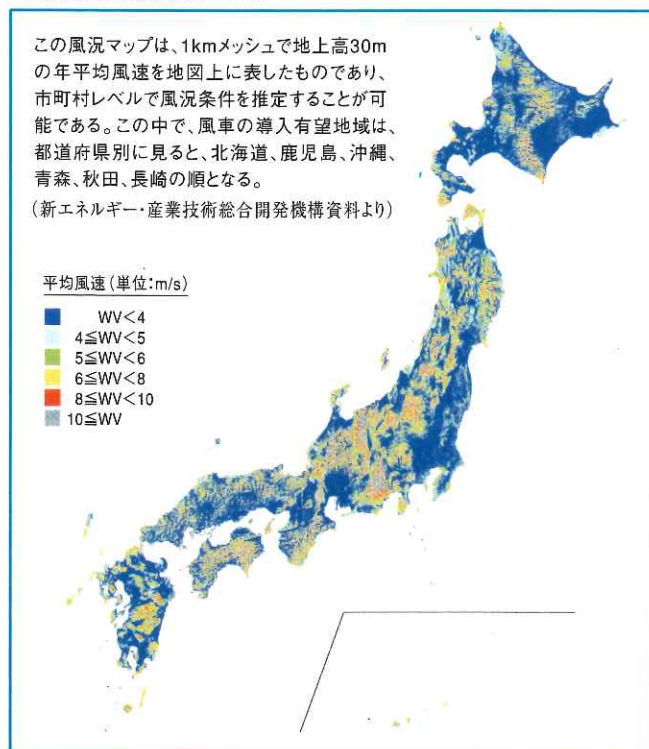
政府は、1997年の気候変動枠組条約第3回締約国会合（京都会議）での温室効果ガス排出量削減目標である「1990年比6%削減」を達成するために、2010年の風力発電の導入目標量を300万kW（設備規模）と定めた。これは1999年度の8.3万kWに比べ約38倍という規模であり、2001年実績として25万kWを達成した。しかしながら、設備規模では、風力発電の先進国であるドイツが約610万kW、アメリカが約260万kW（いずれも2000年末）であり、日本の規模はまだ遠く及ばない。

今後、政府目標を達成するためには、風力発電に伴う課題、風力エネルギー密度が小さいこと、不規則性があること、地域により風況に差があること、設備コストの低減、景観との調和などに取り組む必要がある。日本は長大な海岸を有し、北海道や東北などで風力の強い場所も多い。このため、風況の良い場所で大規模に発電する方法が効率的・効果的である。一方小型の風力発電は、他の発電と組み合わせた補完型の分散電源として利用が期待される。

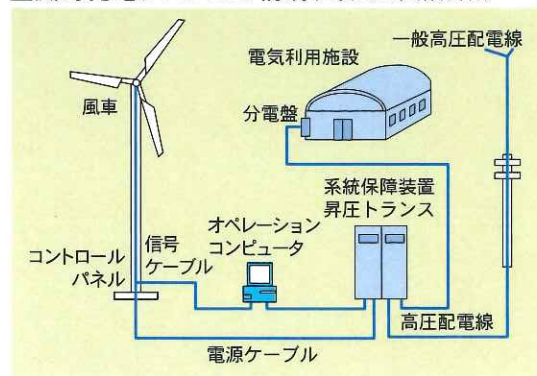
風力発電設備を支える鉄鋼材料

風力発電といえば、プロペラ形の風車を思い浮かべる人が多いだろう。プロペラ形風車は、水平軸の周囲に何枚かの羽根が付き回転する構造で、現在最も普及しているタイプである。このほかの風車としては、垂直軸を中心に回転するダリウス風車などがある。

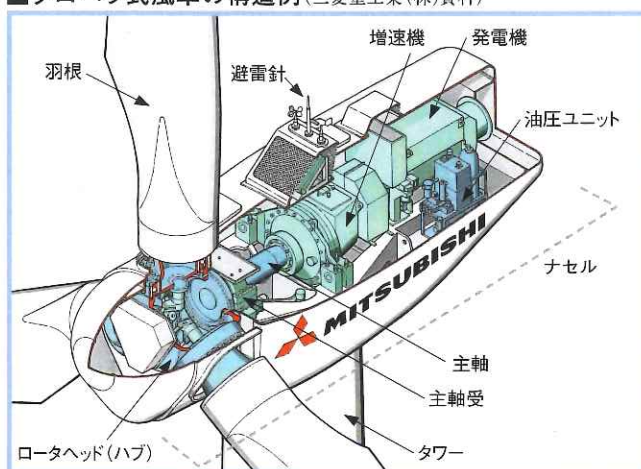
■日本国内の風況マップ



■風力発電システムの構成（三菱重工業（株）資料）



■プロペラ式風車の構造例（三菱重工業（株）資料）



代表的なプロペラ式風車では、風車の羽根（ブレード）、ハブ、ナセル、タワーの各部で構成されている（「プロペラ式風車の構造例」図参照）。羽根の回転はハブを介してナセル内の発電機に伝わり、発電される。風車からの電源ケーブルは、タワーに付設された変圧器で昇圧され、ここから高圧の送電線へ送られる。

風力発電では、風の運動エネルギーを羽根の回転力に変換し、発電機を回転させる。羽根の材質はGFRP（ガラス繊維強化プラスチック）が一般的である。羽根は重量を支えるために、鋼製ボルトで中央のハブに取り付けられる。羽根の回転エネルギーは、ハブから水平方向に伸びる鋼製の回転軸によって増速歯車、さらに発電機へとつながれる。

ナセルには、増速歯車、発電機、制御機器などが収納されている。ナセルでは、各種機器の荷重を支えるため架台に鋼製の溶接構造や鋳造品が使用されており、このほか増速歯車部、発電機部品など、多くの部品に鉄鋼材料が使用されている。ナセル下部には、風向に合わせて風車の向きを調整するために大型の鋼製歯車が設けられており、回転しながら風車全体の荷重をここで支える。タワーは、風車の回転との共振を回避し、20年以上の疲労寿命を持ち、50年に1度のガスト（突風）に耐えられる設計となっている。形状は、テーパ状の鉄塔が多く、溶接構造用鋼が使用されているが、寒冷地ではより靱性の高



米国・カリフォルニア州モハベのウインドファーム。約3,600台の風車が稼働しており、中には日本製風車約600台も含まれている。

い鋼材が使われる。鉄塔の内部は空洞で、ここにメンテナンス用の梯子などが納められる。

一例として、最大出力750kWの場合、風車重量は約55tだが、このうち70% (約40t程度) が鉄鋼材料で作られていると推測される。また高さ50m規模のタワーには、約60tの鉄鋼材料が使用されている。風力発電設備は、全体の構成のうち、羽根を除きほとんどが鉄鋼材料で構成されているといっても過言ではない。

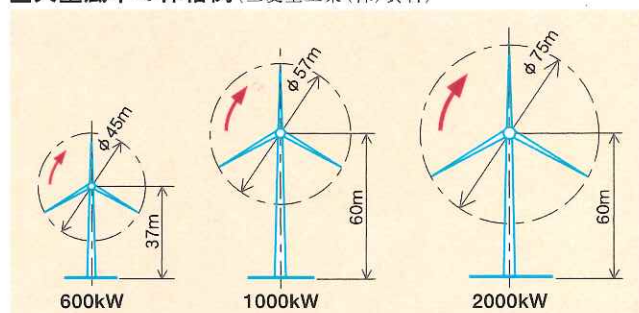
最新技術を導入し、効率を高めた大型風車

最近の風力発電設備では、大型化の傾向が一段と強まっている。1990年代中頃の主流は設備出力が300～400kW機であったが、90年代後半には500～600kW機となり、2000年以降は1,000kW (1MW) 機が主流の時代を迎えている。日本では三菱重工業 (株) が先行して大型機の開発を行っているが、1,000kW機の場合、羽根の回転直径57m、ハブ高さ60mという大きさである。

風車を大型化する最大のメリットは、風車の効率を高めることである。同じ風速当りの風力エネルギー量は、受風面積に比例し、羽根長さ (回転半径) が2倍になると風力エネルギーは4倍に大きくなる。また風車が大型化して高くなることにより、大きな風速が得られるようになる。たとえば、地上50mでは地上10mの観測地に比べおよそ1.6倍の風速が得られ、風力エネルギーは風速の3乗に比例することから、風力エネルギーは約4.1倍となる。

一方、羽根は空力特性を考慮した設計が普及し、わずかな風力でも発電開始できるようになっている。以前は風速4～

■大型風車の体格例 (三菱重工業 (株) 資料)



5m/sで発電開始していたのが、最近では3～3.5m/sで発電可能になった。また風速や風向にともなう、風車の姿勢や羽根角度の調整には、高度な電子制御技術が生かされている。これにより、稼働率が高くなり、経済性が向上した。

しかし、大型化に伴って気になるのが騒音の問題である。風車から発生する騒音には、羽根の風切り音と増速歯車の騒音がある。このうち風切り音は、羽根の回転速度が速いほど大きくなるため、最近の風車の羽根の回転速度は、10年前に比べおよそ半分に抑えられている。また羽根形状の最適化設計も進み、騒音を小さく抑えられるようになった。

増速歯車は、風車の回転数を発電機の回転数に合わせるために使われてきたが、歯車自身による騒音の問題があった。これに対応するために「可変速ギアレシ機構」が開発された。これは、永久磁石式多極同期発電機を搭載し、羽根から発電機までを直結した構造を持ち、インバータ/コンバータ電力変換装置を用いた可変速運転により、出力変動を小さく、きわめて低騒音を実現した。日本は、可変速機構及び制御技術に関しては、世界をリードする存在となっている。

風力発電は街へ、洋上へ

風力発電設備の大型化は、単機出力を大きくするというだけでなく、複数の風車による風力発電設備群を形成することにより、土地の有効利用、スケールメリットを生かす方向に向かいつつある。これがウインドファームの形態で、現在、日本各地で自治体や事業者などが数多くウインドファームの構想を持っている。

風力発電の設置費用は24～37万円/kW(1999年度平均実績値)と高価なため、自治体には2分の1、事業者には3分の1の補助制度がある。発電費用はまだ10～24円/kW程度であり、これは従来の発電コストと比較して高価である。今後とも大型化、ウインドファーム化によりさらなる発電コスト低減を推進する必要がある。しかし、これまで単位電力あたりの設置費用や発電費用は年々安くなってきており、大規模風力発電の事業としての成長が見込まれる。

大規模風力発電の普及のために重要な要素の一つが、電力系統との連系である。風力発電設備は大規模とはいえ、火力発電所や原子力発電所と比較してまだまだ小さく、さらに風力発電の発電設備の建設は辺鄙な場所が多く、一方で電力の需要地は大都市であり、これをつなぐ必要がある。すなわち、個々の風力発電設備からできるだけ近くに連系すべき送電設備が必要となる。今後、風力発電をより活用するためには、電力会社の買い取りシステムや広域にわたる電力系統のさらなる拡充が重要な要素である。

さて、風力発電は将来的に、どのように展開、利用されていくのだろうか。日本風力エネルギー協会会長で、足利工業大学の牛山泉教授によれば、将来的に風力発電の進む方向の一つとして、洋上風力発電による大規模発電が期待されるという。「日本は沿岸距離が3万4千kmにも達する長大な海岸線を有している。風車の大型化によって、海上で運搬、建設する方が



2001年グッドデザイン賞を受賞した小型発電システム(40kW)は、日本の景観や設置環境を考慮して開発された(写真提供:富士重工業(株))



東京都心のビルで、小型の風力発電装置が設置された例(写真提供:ゼファー(株))

やりやすくなることもある。すでにスウェーデン、デンマーク、オランダ、イギリスなどで洋上風力発電の建設例があり、今後世界的に大いに期待できる」

日本では、日本海洋開発産業協会が2010年度を目標とした5,000kW規模の洋上風力発電システム開発を発表するなど、各機関で取り組みが始まっている。洋上風力発電では、海底から風車を建設する着底タイプと、海上に浮かぶフローティングタイプが考えられている。特に着底タイプの場合は、基礎部分やタワーを含めた構造物として、また人工魚礁などと一体化した構造物への応用の可能性も含めて、鉄鋼材料利用の新市場となることも期待される。

もう一つの可能性が都市型の風力発電である。

「都市型の風力発電は、都市内で建物と一体となった風車により発電するものだ。規模は10kW以下程度だが、環境共生型の街づくりが進むなか、モニュメントとしての導入が期待される。風力発電が普及すると、風車を景観と調和させることが重要な問題となるだろう」(牛山氏)

最近では、風力発電システムがグッドデザイン賞に選ばれるなど、機械の性能だけでなく景観をつくる要素としても注目され始めている。

思えば、私たちが風車をよく見かけようになったのは、最近数年のことである。今でこそ、日本の風力設備導入量は約25万kWに達したが、数年前にはわずかに1万kW程度だったことからすれば、本格的な普及がようやく始まった段階だといえるだろう。安定したエネルギー供給源となるために不可欠な運転制御技術などでは、日本の技術は世界に引けをとらない。さらに、風力発電を受け入れる社会システムの整備が進むことにより、いずれ日本が世界の風力発電先進国の仲間入りをするであろう。現在、国内設置の風車は約9割が輸入品である。今後は国内メーカーによる日本の風土に合った風車が増えることも期待される。

風は地球の自然が賦与してくれる再生可能なエネルギーである。これを生かす風力発電は、環境共生時代の科学技術の方向性を象徴する存在となるのかもしれない。



コペンハーゲン沖合の洋上ウインドファーム。ここでの風車のレイアウトは、景観を考慮し「どこから見ても美しいデザイン」として採用された(写真提供:東京大学大学院工学系研究科・荒川 忠一教授)

●取材協力:足利工業大学総合研究センター・牛山泉教授、新エネルギー・産業技術総合開発機構、(株)ユラスエナジー・三菱重工業(株)