

3.4.3 風力発電

風力発電は、1900年代の後半から発電効率を高める技術開発と、風車の大型化が進みました。近年は単体ではなく、多くの風車を集中設置するウィンドファームが世界的に増加しています。安定した風況を求めて、洋上に設置する事例も増えています。日本も風力発電が増えています。適地に恵まれないこともあって、発電量の寄与率は全電力需要の1%に達していません。

昔から人類は製粉や灌漑に風のエネルギーを利用してきましたが、発電に利用する基礎を作った先駆者は、デンマークのエジソンといわれた P. ラクール教授です。彼は1世紀以上も前にローターの直径が23mもある大型風車を使い、直流発電機を使って発電しています。実用化は外部から電力を得るのが困難な山小屋や、小規模な温室などから始まり、その後は小型から大型まで技術が進歩しています。

1の上段はローターの軸が風向きに水平な水平軸型風車、下段は風向きに垂直な垂直軸型風車です。また、上段左側3種類の風車は、回転力を風の押す力（抗力）によって得るタイプ、右側の3種類は回転力を風の浮かす力（揚力）によって得るタイプです。垂直軸型風車はそれぞれ個性的な形をしており、クロスフロー型風車はローターのブレードが立った状態で回ります。ダリウス型風車は卵の泡立て器に似た形で、風の揚力を利用して高速回転します。一般的に揚力を利用するタイプは、先端の速度（チップスピード）が風速の数倍になり、回転数が多くて効率が高いので発電に適しています。たとえばプロペラ型風車の場合、先端の速度は風車に向かって吹く風速の5~10倍にもなるので、ゆっくり回っているように見えても秒速100m程度の高速に達します。

2. 風力発電の原理と効率

1. 風車の種類

風車にもさまざまな形がありますが、ローターの回転軸が風向と水平になる水平軸型風車と、風向と垂直の垂直軸型風車に大きく分かれます。図

運動する物体のエネルギーは、物体の質量を M 、速度を V とすると、 $[E=1/2 \cdot MV^2]$ 畳で表されます。図2のように、風車の受風面を単位時間に通過する風の体積は、風速 V と受風面積 A を掛け合わせ $V \cdot A$ と表されますので、これに空気の密度 ρ を掛けて質量 M は、 $M = \rho VA$ で表されます。これを前の式に代入すると、 $E = 1/2 \cdot (\rho VA) V^2 = 1/2 \cdot \rho AV^3$ になります。プロペラ型風車の場合にはローターの直径を d とすると、受風面積 A は $\pi (d/2)^2$ と表せるので、

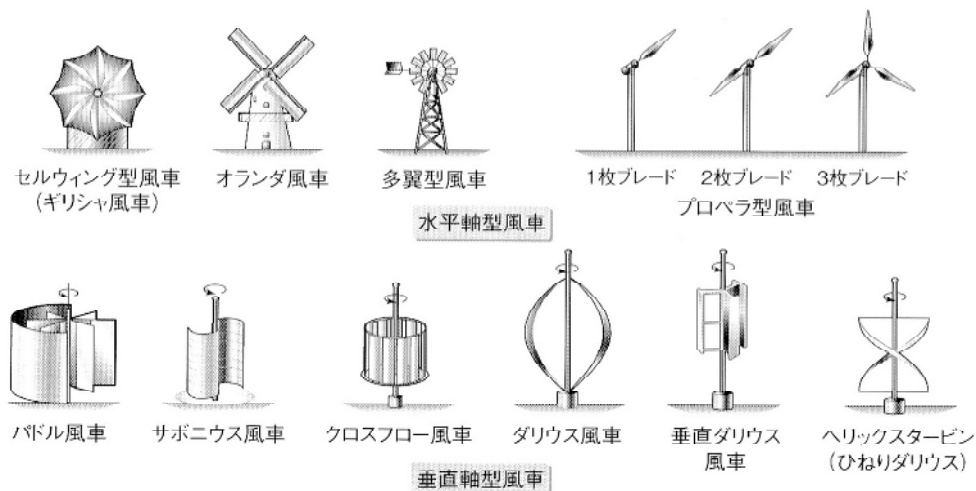


図1. 風車の種類

これを代入すると $E = (\pi \rho / 8) \cdot d^2 \cdot V^3$ になります。

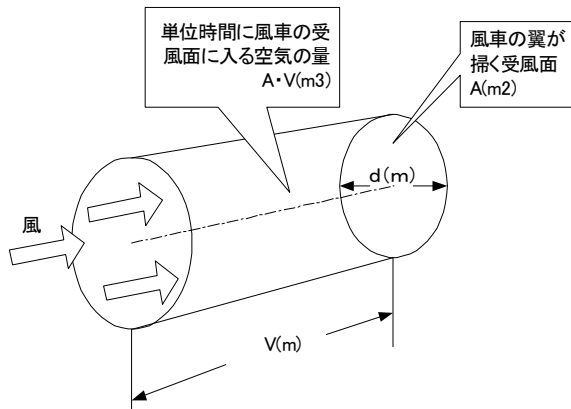


図 2. 単位時間に受風面を通過する気流の体積

このように風車の受風面での風のエネルギーは、風速の 3 乗に比例し、ローター直径の 2 乗に比例します。ローターの直径が大きくなるとハブ（ローターの回転中心軸）の高さも高くなるので、それだけ受ける風速が強くなります。このことから、風況の良い場所の選定と風車の大きさが風のエネルギーを利用する上では重要なことが分かります。

風車で得られる理論的な風のエネルギーは上記のようになりますが、すべてを利用できるのではなく、熱力学の法則から一定の割合しか利用できません。その割合は風車の種類と周速比で決まるパワー係数で表されます。周速比はチップスピード（羽の先端の速度）が、風速の何倍かという数値です。パワー係数は理論的な最大値が 0.593 で、実際の数値は水平軸風車で 0.35~0.45 です。ただし、この数値は機械的なエネルギーの値ですから、電力に変換する場合は変換損失を差し引く必要があります。変換損失はローターの回転を発電機の駆動歯車に変換する損失と、発電機自体の機械損失で合わせて 1 割~2 割ぐらいです。したがって最終的な発電効率は、0.25~0.35 程度

になります。

3. 風力発電の用途

風力発電は用途によって、風車の種類と大きさが違います。表 1 はおよその用途ですが、マイクロ風車はスペースの小さい垂直軸型が多く、メーカーによって多様な形状が採用されています。主に系統電源から離れた山小屋や、看板や標識の照明などに使われています。小型から大型になると、パワー係数の大きい 3 枚羽根のプロペラ風車が圧倒的に多くなります。小型風車は離島や僻地の電源、井戸水の汲み上げポンプ駆動、灯台の電源などに使用されています。中型風車は、工場や商業施設の自家発電に使われています。大型風車は自家用ではなく、ほとんどが売電を目的とした電気事業用です。1 基が単独ではなく、複数の風車を使って出力規模を大きくしているのが一般的です。広い地域に数十基を並べた風力発電施設は、ウィンドファームとかウィンドパークと呼ばれます。

表 1. 風車の規模分類と用途（概略）

規模	定格出力	ローター径	用途
マイクロ風車	10kW 未満	1~1.5m	山小屋など
小型風車	10~100kW	10~20m	離島など
中型風車	100kW~1MW	20~50m	商業用
大型風車	1MW~3MW	50~100m	電気事業用
超大型風車	3MW 以上	100m 以上	電気事業用

4. 風力発電設備の構成

図 3 に一般的な 3 枚羽根のプロペラ風車を構成する設備を示します。広範囲にわたって多様な先進技術が採用されていますが、大きく分けると風車ローター系、ナセル内蔵機系、電気系、支持と構造系から構成されています。

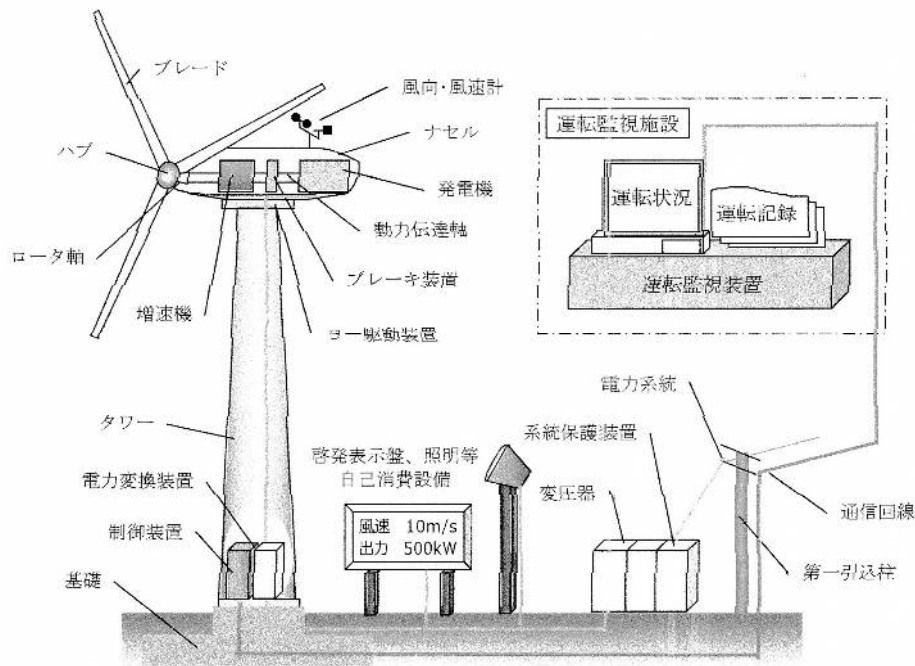


図 3. 風力発電設備の構成

4.1 風車ローター系の設備

図 3 の左上部分が、風のエネルギーを直接受ける風車ローターです。風車用のブレード（羽根）の翼型は、初期には飛行機の翼型が転用されていました。さまざまな飛行機翼の形状について、どのような揚力と抗力が働くかが昔から実験で調べられているからです。翼型は開発した人の名前や開発機関の名前に番号がつけられ、数百の形状データが登録されています。たとえば 1903 年のライト兄弟の翼型や、1922 年のクラーク Y などその中の 1 つです。風車専用の性能の高い翼形としては、海外ではリソ国立研究所（デンマーク）、NREL（米国）、デルフト工科大学（オランダ）、日本では産業技術総合研究所、三重大学、足利工業大学などの翼形が知られています。ブレードの材質には、一般的に軽量で耐久性が高いガラス繊維強化プラスチックが使われています。

4.2 ナセル内臓機器

図 3 で風車ローターの右側に直結する横長の設

備がナセルです。ローターの回転エネルギーを電気エネルギーに変換する一連の機械が内蔵されています。中型や大型の風車の場合、ローターの回転数は毎分 10 回転です。しかし一般的な 4 極式の交流発電機は 60Hz で毎分 1,800 回転、50Hz で毎分 1,500 回転と回転数が多いので、回転数を上げるために増速機を介する必要があります。一

方、増速機の歯車は風力発電の主な機械騒音源になります。このため、大型風車は歯車を組み込む増速機を使わず、代わりに発電機の極数を増やした多極型同期発電機を使う場合が増えていきます。このほかに風速計、風向計、ヨー駆動装置、ピッチ制御装置、ブレーキ、冷却機、コントローラーなどが内蔵されています。ヨー駆動装置は、プロペラの方向を自動的に風向き方向に追従させる装置です。ピッチ制御装置は、ブレードの取り付け角（ピッチ角度）を調節する装置です。強風時にはピッチ角を風向に近づけて風を逃がし、ローターの過回転を防止します。ブレーキは強風時や点検時に、ローターの回転を強制的に停止させる装置です。

4.3 電気系の設備

電気系は発電機と電力変換装置から構成されています。発電機は誘導発電機と同期発電機に大きく分けられ、誘導発電機は数千 kW 以下の発電に多く使われます。誘導発電機はカゴ型発電機と 2 次巻線型があります。カゴ型は 1,000kW 以下の中

小型機に、巻線型は 2,000kW を超える大型機に多く使われます。通常は風車と発電機の間増速機を設置し、回転数を 40 倍程度に上げて発電します。系統連系は AC リンク方式が一般的です。巻線型誘導発電機では可変速運転が可能です。多極型同期発電機を使う場合は、風車のローターと直結させて 40~100 極にすることで、増速機を介さずに低い回転数での発電が可能です。ただし多極型同期発電機は直径が大きく、現在最大の EnerconE-126/6MW の発電機は直径が 12m にもなります。系統への連系はコンバーターとインバーターを介した DC リンク方式になります。最近では DC リンク方式が増えてきています。

4.4 支持と構造系の設備

大型の風車を支持する円筒形のタワーは、断面が一様なものと、下部が太くて上部が細い角度のある構造があります。内部にはケーブル類がナセルまで届くように設置してあり、大型の場合は作業員が点検や保守のために登れるようになっています。プロペラ式風車のタワーの高さは、定格出力が 600 kW の場合で 40~50m、羽根の直径は 45~50 m です。定格出力が 1,000kW から 2,000kW の場合は、タワーの高さが 60~80m、羽根の直径は 60~90m が一般的です。タワーと基礎の強度設計には、暴風時（想定する最大風速時）にタワーに作用する風の荷重と、風車トップ作用する風の荷重を考慮しています。

5. 風力発電設備の運転と設備利用率

微風の日もあれば強風の日もあり、1 日の間でも時間帯によって風速が違います。時々刻々、絶えず風速と風向を変える自然エネルギーから安定した電力を効率よく取り出すには、風況に合わせた運転制御が必要不可欠です。図 4 は風速に対する発電出力を表す出力分布です。無風や微風では

プロペラが回らず発電しませんが、プロペラが回し始めて実際に発電を開始する風速を「カットイン風速（発電開始）」といいます。カットイン風速を低く設定すると年間の設備利用率が上がりますが、風速が低いと発電効率が低いので、通常は 2~5 m/秒程度に設定されます。カットイン風速から風速が上がり、所定の定格出力が得られる風速が定格風速です。定格風速は 8~16m/秒程度に設定されており、この間は定格風速以上に風速が上がっても、安定した電力を得るために出力は一定値に制御しています。さらに風速が上がった場合に、ローターの破損防止のために風車を止める風速が「カットアウト（運転停止）風速」です。カットアウト風速は 20~25m/秒程度に設定されます。

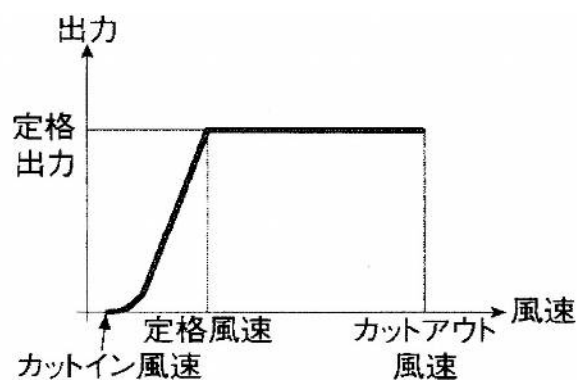


図 4. 風力発電の出力分布

設備利用率は、年間の発電量を 1 年間の定格出力（定格出力×8760 時間）で除した数値です。火力発電なら稼働率に該当しますが、火力発電は人為的に稼働時間を制御できるので、定期点検などの時間を除く 60%~80%程度の稼働率になります。一方、太陽光発電と風力発電は出力が自然任せになるので、稼働率に代えて設備利用率という表現が使われています。風力発電の設備利用率は、適切な立地環境なら 20~40%を期待できます。したがって、太陽光発電の 10~15%を大きく上回ります。それでも従来は発電コストが 10 円/kWh

を超える場合が多く、コスト競争力は火力発電より低い水準でした。しかし近年は風況のよいサイトの選択、技術進歩による高効率化とコストダウン、信頼性の向上、数十基の大型風車からなるウインドファームの建設などにより、発電コストの競争力が向上しています。風力発電の経済性に影響が大きい因子は、設備建設単価と年間設備利用率です。発電コストを7円/kWhにするには、建設コストが20万円/kW以下で、年間設備利用率30%以上が望まれます。風力発電の設備利用率は立地場所の風況に大きく依存し、30%から40%が経済性の判断基準とされています。

6. 日本の風力発電

6.1 風力発電の立地状況

表2は2018年における日本の風力発電立地状況です。日本では1990年代の後半から導入が急速に進み、2018年度の累積容量は3,502MWに達しています。地域別にみると北海道、東北地方、九州地区が多く、電力需要の大きい関東地方の立地が少ない状況です。国際的に比較すると、風況に恵まれたドイツ、アメリカ、スペイン、インド、デンマークの立地が多く、日本の容量規模は世界の15位前後です。なお、日本の2016年度の風力発電量は、全発電量の約0.5%です。

6.2 風力発電設備の動向

風車の動向としては、3枚羽根の水平軸プロペラ風車が主流になっており、世界の陸上風車の平均規模は2MW前後まで大型化しています。一方、近年は洋上風力の技術開発が活発化しています。洋上風力は陸上風力と比較して、設置・系統連系・運転・保守の費用が大きいことから、採算性を確保するために1基当たりの発電規模の増大が必要です。このため、平均の単機容量は年々拡大しており、5~10MW以上の超大型風力発電機の技術開発競争が始まっています。また、海洋条件に

表2. 日本の風力発電立地状況

都道府県	設備容量(kW)	設置基数(基)
青森県	417,463	253
秋田県	370,934	210
北海道	358,745	304
鹿児島県	263,005	157
福島県	183,585	96
三重県	180,300	106
島根県	178,140	85
静岡県	158,330	92
石川県	124,500	71
山口県	113,450	55
茨城県	111,570	64
長崎県	109,860	78
愛媛県	96,200	70
和歌山県	94,930	65
岩手県	92,380	72
千葉県	69,950	49
高知県	68,900	49
愛知県	64,710	41
山形県	61,230	35
鳥取県	59,100	41
兵庫県	55,310	29
佐賀県	46,675	32
福岡県	32,705	30
熊本県	28,950	22
福井県	28,000	14
新潟県	26,715	20
沖縄県	25,620	30
徳島県	19,500	15
宮崎県	16,000	8
大分県	11,490	13
その他	34,540	47
合計	3,502,787	2,253

出典：国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (2018年3月末現在)

適した基礎構造の技術開発や、メンテナンスコストの削減を目的としたギアレス発電機の軽量化が進んでいます。水深の大きい海域への設置を可能とする浮体式洋上風力の開発も進められています。

アームの事例を、図5に宗谷岬ウインドファームの景観を示します。(おわり)

参考：風力発電導入ガイドブック(第9版)NEDO
再生可能エネルギー技術白書第2版

6.3 ウィンドファーム

1990年代までの風力発電は単体設置が多く、既存の電力と併用する自家消費が中心でした。しかし近年は電力事業用が増え、広い地域に数基～数十基の風車を集中設置するウインドファームが増加しています。集中設置は建設時の輸送道路、系統連系にともなう電気設備、運転監視設備や運転・点検体制を共有化できるので、出力あたりの建設費や運転費の低減が可能です。日本のウインドファームは1999年より北海道、東北、九州などで建設され、その後は風車の大型化とも相まって、総出力数万kWの大規模なウインドファームが各地で見られるようになりました。表3に日本のウインドフ



図5. 宗谷岬ウインドファーム

表3. 日本のウインドファーム事例

名称	立地場所	出力容量	電力購入者
響灘風力発電所	福岡県北九州市	15,000kW (1.5MW×10基)	九州電力
瀬戸ウインドヒル風力発電所	愛媛県瀬戸町	11,000kW (1MW×11基)	四国電力
六ヶ所村風力発電所	青森県六ヶ所村	32,850kW (1.5MW×20基、 1.425MW×2基)	東北電力
宗谷岬ウインドファーム	北海道稚内市	57,000kW (1MW×57基)	北海道電力
郡山布引高原風力発電所	福島県郡山市	65,980kW (2,000kW×32基、 1,980kW×1基)	東京電力
南あわじウインドファーム	兵庫県南あわじ市	37,500kW (2.5MW×15基)	関西電力
サミットウインドパワー酒田	山形県酒田市	16,000kW (2MW×8基、 うち洋上が5基)	東北電力
瀬棚町洋上風力発電所「風海鳥」	北海道瀬棚町	1,200kW (600kW×2基)	北海道電力
苫前ウィンビラ	北海道苫前郡苫前	30,600kW (1,650kW×15基、 1,500kW×4基)	北海道電力