

風力発電の原理・構造と建設

天野 義如・長 沼 二 巳

当社は、風車メーカーとして1980年代初頭より大型風力発電装置を約4,000台生産し国内外に供給してきた。しかしながら、風車発電の国内における供給比率は、全電力供給量の0.5%と非常に少ないのが現状である。但し、欧州における風力発電導入の状況をみれば、今後の導入拡大の余地は大きいと考える。本稿では、風力発電の概要とこれまで取り組んできた大型風車の建設の状況を紹介する。

キーワード：風車、風力発電装置、風、発電機、タワー、ブレード、ナセル、再生エネルギー

1. はじめに

風力発電は、世界において新エネルギーのジャンルから既に脱し、一般的な電源として普及が拡大している。2011年における世界の風車の累積導入量は、約20万台・2.4億kWに達しており、ヨーロッパにおいては新設電源の2～4割を占めるに至っている。風車導入量は、毎年約30%の高成長が続いており、2020年には10億kWに達するとの予測がでている。一方、日本における2011年末の累積導入量は、1,832台・250万kW（JWPA調べ）であり、世界13位である。国内の風況・立地等の様々な制約により未だ本格的普及に至っていない状況であるが、部品メーカーを含めた国内風車製造産業は既に雇用5,000人以上と年商3,000

億円以上の波及効果を生んでいる。さらに今後は、再生エネルギーのひとつとして、国内における普及の拡大が見込まれている。

本稿では、風力発電装置の概要、そしてこれまで取り組んできた大型風車の建設の実態を紹介する。

2. 風力発電システム

風力発電システムを図-1に示す。風のエネルギーを回転力に換えるロータ部、その回転力を電気に変換する増速機・発電機であるナセル部、そしてこの二つの部分を支えるタワーで構成される。電気系統は、発電機から動力ケーブルによりタワー内を通り地上に降り、電力系統につながれることになる。

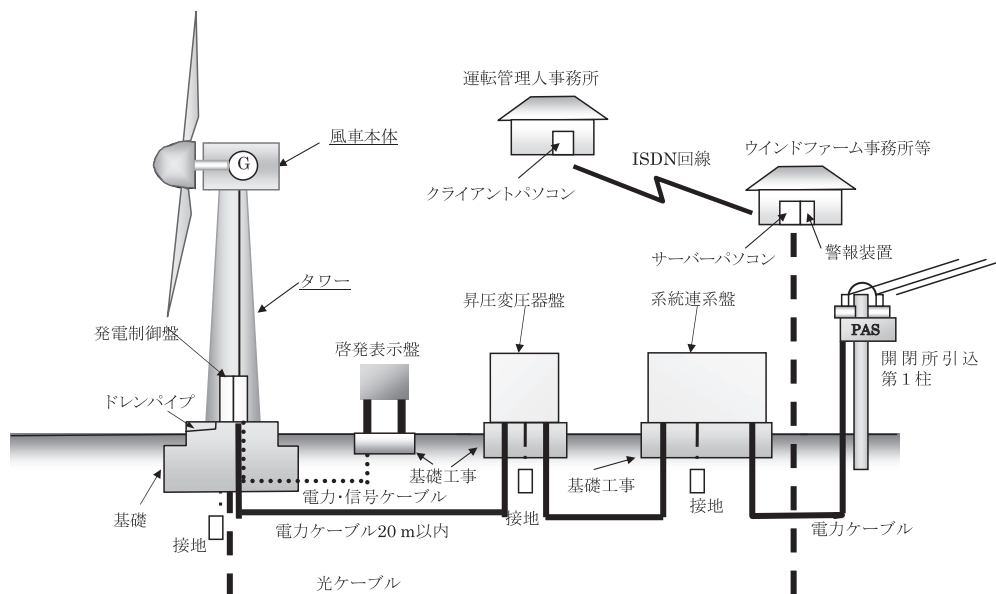


図-1 風力発電システム

3. 風車の構造と制御

現在の典型的な大型風車は、3枚の翼（ブレード）と発電機等の機器を格納するナセル、そしてそのナセルを支える鋼製モノポールタワーからなる。2MW級風車でナセルまでの高さは70～100mであり、ブレード先端位置の最高点では120～150mに達する。ナセル重量は100t以上、タワー・ブレードを含めた総重量が約300tとなる巨大構造物である（図-2）。

ナセル内部には、ブレードを支える軸受、その回転エネルギーを電気に変換する発電機、機種にもよるがブレードの回転数を発電機に適した回転数に増速するギアボックス（増速機）などが設置される（図-3参照）。風車は、分類の仕方によるがその構成部品数は約1～2万点と言われており、電気・制御品、鉄鋼品、機械品、油圧機器、樹脂成型品等の大小多種多様な部品の集合体である。これら各構成部品は、風車特有の荷重・環境条件より、汎用品ではなく風車専用品のも



図-2 大型風車の構成

のも多いという特徴がある。

変動する風のエネルギーを効率的に電力エネルギーに変換するため、現在の風車では以下の制御を行っている。

- ①ヨー制御：ナセルをタワー上端部で回転させ、ブレード面を風上に正対させる。
- ②ピッチ制御：風速に応じてブレードの取付角度を変化させる。
- ③可変速制御：風速に応じてブレードの回転数を変化させる。
- ④補機制御：冷却装置等のナセル内機器の制御を行う。

4. 風のエネルギー

風、すなわち空気の流れのもつエネルギーは、運動エネルギーである。風車の翼の受風面積を A [m²] とし、この面積を単位時間あたりに通過する風速を v [m/s] とすると、風のエネルギー P_{wind} [W] は、次式で表される。

$$P_{wind} = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}(\rho Av)v^2 = \frac{1}{2}\rho Av^3$$

ここで、 $A = \pi D^2/4$ ：ロータ直径

ρ ：空気密度

上式から、風力エネルギーは、受風面積つまりロータ径の2乗に比例し、風速の3乗に比例することがわかる。このことから、風車は、少しでも強くそして安定的に風の吹く場所に立てることが重要となる。

風は、地表の摩擦の影響を受けるため、地表に近いほど弱くなる。風の高度分布は、地表面の状態（粗度）に

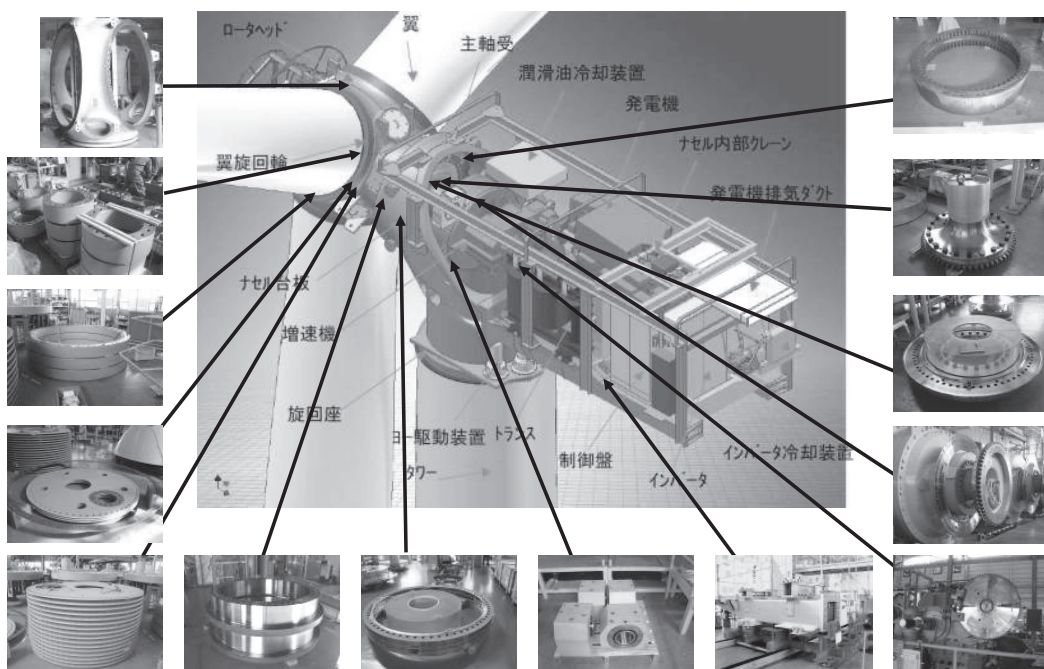


図-3 大型風車（ナセル部）の構成

よって異なり、地形が複雑なほどまた粗度が大きいほど地表面付近での風速低下が大きくなる。地表面(海表面)の粗度が小さい洋上に設置する風車は、この点で陸上風車に対して大きなアドバンテージを持っていると言える。

全世界における風力エネルギーの賦存量は、陸上において 4×10^4 TWh といわれており、この値は世界の電力需要の2倍以上というものである。さらに、洋上における賦存量は、陸上の10倍とされる。一方、日本において、洋上を含む風力発電の賦存量は、782 GW ともいわれており、膨大な潜在エネルギーが存在していることになる。

5. 風車の建設

“段取り八分”とは昔から工事現場で言われてきていることであるが、風車の建設工事もその例外ではない。風車建設工事は、「大物の輸送が想定されていないところを運ぶ」「風の強いところで風に弱い工事をする」と、矛盾が多くある作業環境である。矛盾を多く抱えた風車の建設工事であるが、輸送・建設共に事前に情報を集め、それらによって最適な工事計画を立案し、これを実現出来ないリスクを排除あるいは低減することが現地建設玉成への近道である。

ここで、リスクは過小に評価せず、得られたデータから導き出されるリスクを整理、優先順位をつけることで工事開始前に消しこんでいくことが重要である。

(1) 風車建設場所

当社が現在生産している2.4 MW 風車 MWT92/2.4 は、日本市場を念頭に置き開発された機種である。台風の影響、山間部に建設される等、日本固有の気象・地形条件に合致し、風車の高さを山間部での取り回しが良い大型油圧クレーンで建設できるように設計している。

写真一1、写真二は、国内と海外の風車設置場所の典型的な地形差を示す。このように、国内における風車設置場所は海外と比較すると各種制約が多く、詳細な工事計画を必要とする。



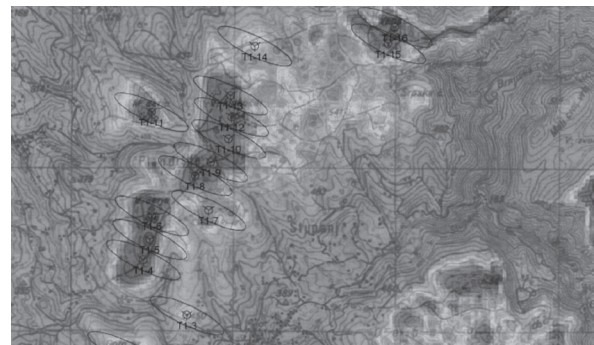
写真一1 国内の風車設置状況



写真二 海外の風車設置状況

(2) 風車の配置

ウインドファームの設置地域が選定された後は、各風車の建設場所の選定を行う。開発予定地域内に最大の経済性が得られるように風車を配置する検討作業をマイクロサイティングと呼ぶ。風の強い場所から順に配置するのは当然だが、風車の相互干渉（ウェイクロス）や、地形の起伏による乱流も考慮する必要がある。専用の風況解析プログラムを使用して検討を行う(図一4)。尾根筋の色の濃いところほど、風速が高いことを示す。ウェイクロスを抑制するために、風車の前後左右に一定の離隔(図中の楕円)を取って配置する。一般に風は上空ほど強いので、尾根筋にそって風車を並べることが多い。



図一4 風況解析の例

ただし、下記に示す制約要因で風速の高い場所に風車が建てられない場合もある。また、各種の規制や、サイト内の道路の造成についても勘案する必要がある。道路については、勾配10%以下に抑えること、道幅を直線部においては5mとるのが好ましい。コーナーにおいては軌跡図を描き個別に検討する必要がある。風車の配置は、開発事業者がこれらの要因を総合的に判断して、最終的に決定することになる。

【風車配置の制約要因】

- ・ 地 形：風上方向の隆起等で乱れが発生し易い場所は避ける。
- ・ 湧 水：基礎造成に伴う掘削で地下水の湧水が予

想される場所も不適。

- ・地盤：取り除けない岩が障害になったり、軟弱地盤で杭基礎が必要になる場合がある。
- ・用地種別：保安林、農地等の面積により、申請手続きが難しくなる場合がある。
- ・所有者：国・地方自治体・個人の所有権が入り組んでおり、調整に時間がかかる場合がある。
- ・騒音：民家から一定の離隔を取って風車を配置すると共に、開発事業者が近隣住民に事前に説明して納得を得ることが大切と考える。
- ・バードストライク：衝突を避けるために、頻繁に鳥の通る場所を避けて配置変更した例もある。
- ・電波障害：テレビや通信の電波の通路は避ける必要がある。
- ・景観：観光地等で景観を損ねないように配慮を求められる例もある。

(3) 輸送計画

(a) 水切り港

タワーやブレード（翼）など長尺重量物を持ち込む為に、多くの場合建設現地に近隣の港（岸壁）を利用することになる。海上輸送に使用する船舶（外航船、内航船、バージ船）によっては接岸条件（水深、岸壁の長さ）が異なってくるので水切り港の選択は風車建設工事の重要なポイントの一つである。

(b) 内陸輸送

陸上輸送に関しては、最も重い部材 最も長い部材を運べるかがポイントとなる。

①最も重い部材

ナセルやタワーが該当する。橋、高架等、通行する重量に制限がある場合、輸送車両が通過できるかを確認する必要がある。特に山間部など、もともと重量物が通過することを想定していない経路においては、注意が必要である。

②最も長い部材

多くの場合、翼が最も長い部材となる。輸送経路上のコーナ部における道幅、道路両側の地形はもちろんであるが、標識、電柱等の障害物を考慮する必要がある。地形等の関係で翼をトレーラに搭載した状態ではどうしても通過できない場合等は、写真—3に示すような、ブレード（翼）起立装置が使用されることもある。一部の現地では、大型輸送ヘリを使用した実績もある。

(c) その他留意事項

港、道路、橋、トンネル等、改修工事により道路が閉鎖することも考えられるため、これらの工事の予定



写真—3 ブレード（翼）起立装置

があるのであれば、風車建設工事についても勘案する必要がある。

(4) 建設計画

(a) 重機の選定

風車建設工事においては、国内には希少な巨大重機を長期間使用するため、適切な重機の選定が必要となる。ナセルモジュールの重量は、冶具込みで最大65t程度（2.4MWの場合）であり、タワー上端部の70m/80mといった高所に据付けることが必要であるため、大型重機の使用が必要となる。使用される重機のうち、クレーンは写真—4に示すような、オールテレーンクレーン（以下油圧クレーン）とクロラクレーンとに大別される。

両者の比較を表—1に示す。表中の○印が有利な項目である。

山岳地帯で風車を建設する場合には、アクセス道路の幅も狭く、移動時の解体範囲も少ない油圧クレーンが有利であるが、吊上げ重量がクロラクレーンに比べ、小さい欠点がある。



写真—4 油圧クレーン（左）とクロラクレーン（右）

表—1 油圧クレーンとクロラクレーンの比較

	油圧	クロラ
吊上げ重量		○
車幅	○	
吊上げ中の移動		○
組立・解体	○	

昨今の風車をめぐる市場・環境の変化により、翼、ハブ高さ共により長大化する傾向であり、今後主力となる風車はロータ径 95 m 以上、ハブ高さ 80 m 以上となる傾向である。そのため、設置用重機の選択がクローラクレーンに偏る傾向にある。

ここで、クローラクレーンを使用する場合の留意点を述べる。前述のように油圧クレーンに比べ、吊上げ重量が大きい利点があるが、風車間の移動の際、解体しないまま移動しようとするとも 15 m 近くの通行路が必要となってしまう。この場合、道路拡幅工事にかなりの労力を注ぐことになってしまう。そのため、クローラクレーンを都度解体することが多いが、この場合、移動のために風車の建設と同じ、あるいはそれ以上の日数が必要となることを念頭に置く必要がある。

かつて風車は国内において 1 プロジェクト当たり 1 ～ 数台の設置がほとんどであったが、建設における経済性を重視するのであれば、複数台建てるのが望ましい。基本的に重機の搬入・撤去に伴う費用は 1 台建てる場合も 10 台建てる場合も同等であり、風車の設置台数が少ないほど 1 台当たりにかかる重機の搬入・撤去費の割合が大きくなってしまふ。特にクローラク

レーンにおいては、使用費よりも搬入・撤去費が高い場合もあるので、注意が必要である。

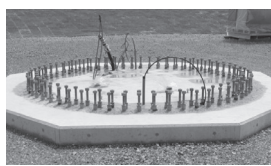
(5) 造成計画

クレーンの種別、風車設置場所へのアクセス方法が決定された後、造成計画を行う。国内では山林や牧場に建設されることが多いが、それゆえに現場及びその周辺区域（保安林、農地、私有地 他）における多くの制限がある中での計画となる。造成においては、風車部材の置き場所を考慮することはもちろんであるが、クレーンの組立て場所を確保することを忘れてはならない。特にクローラクレーンを使用する場合、ブームを組立てる場所の確保が必要である。

クレーンの配置場所についても、敷地内は盛土、切土が混在した平面となるが、クレーンが要求する地耐圧を確保するためにも、クレーンは切土側に配置することが必要である。

(6) 風車組立方法

風車の組立は、基本的に基礎上に部材を下から順番に積上げて、施工する。以下に風車組立の概要を説明する。



①基礎

風車タワーと基礎との結合はアンカボルトを介して行う。タワーの第一節、あるいは第二節を据付けて芯を出した後に、基礎とタワーの境界部にグラウト施工を実施する。



②タワー

タワーを下から順番に 3 から 4 段積上げていく。このとき注意すべき点は、タワー固有振動数とカルマン渦発生周波数が合致することによるタワーの共振である。この共振を避けるため、タワー最上段積上後、速やかにナセルを上架する。



③ナセル

ナセルをタワー上端部に据付ける。この際にポイントとなるのは、ナセル旋回軸受と主風向との位置関係である。軸受にはソフトゾーンがあり、主風向方向と重ならないように設置することが重要となる。



④ロータ

風車建設において最も見ごたえのあるシーンである。ナセルの主軸とロータの関係が決まっている場合は、合いマークを合わせる必要がある。

写真—5 風車の組立

風車の据付時の注意点として、各部材を締結するボルトが挙げられる。使われている高力ボルトは、降伏点近傍まで締め付けられており、ボルト・ナット座面の清掃が不十分等の原因によりトルク係数が低下すると、軸力が過大に掛けられ、ボルトの降伏・折損といった不具合に繋がるので注意が必要となる。

(7) 天候

そもそも風車というものは風の強いところに建てるものである。しかしながら、クレーンは風速 10 m/s 以上では使用できない。故に、作業可能時間を予測することが重要となる。

過去数年間の天気予報から作業可能な時間を割り出す方法もあるが、建設場所では、風車建設前に風況観測塔を建て、風況データを取得している為、そのデータから割り出すのが最も実用的である。導き出された作業可能な時間を有効に使用するのが計画段階では肝要となる。

最近では局地的な予報や官公庁発表のレーダ等の情報も豊富にあるため、建設工事開始以降は先を見た作業計画が必要である。場合によっては、早朝、深夜の工事になることもあるが、過労による災害を避ける意味でも、作業員に無理をさせないように、適切な作業時間を設定するのが重要である。

(8) 風車建設における効率化

風車建設では、設計部門と協調し、効率化を進めている。以下に実現例を紹介する。

(a) 翼多段積みのための架台開発

写真一六は、輸送・建設サイドの要望により、保管時の翼の占有面積低減のため、翼の多段積みができるようにしたものである。



写真一六 実証機での輸送架台（左）と量産機での輸送架台（右）

(b) 翼一本付け工法の確立

標準的な工法では地上でハブに翼三本を取り付け、組みあがったロータを一体で上架する方法を採用するが、特に日本国内においては、敷地の造成面積を減ら

し、土木開発費を削減するため、また森林の伐採面積を最小限にするために翼の一本付けの要望があった。特に森林伐採面積の低減については環境保全及び産業廃棄物低減の二つの利点がある。

施工法の確立において、実際の翼を使用してどれだけ傾けられるかなど、現地での使用において予想される条件を模擬することで、検討結果と合致するかの検証試験を行っている。

(c) ナセル一体吊上げ工法の確立

日本国内では大型油圧クレーンの吊上げ能力等の理



写真一七 翼一本付け工法



写真一八 現地でのナセル一体組み



写真一九 現地でのナセル一体吊上げ

由により、MWT92/2.4 のナセルは3分割構造となっており、個別のモジュール毎に上架され、上空でこれらのモジュールを接合する工法が採用されているが、日本よりも大型の重機が充実している海外においては、写真一7, 8 に示すように、ナセルを地上で組立て、一体で上架する工法が望まれた。地上で作業することにより、重機の拘束時間の短縮、及び安全管理、品質管理が容易になる利点がある。

6. おわりに

風力発電の全電力供給量に占める割合は、欧州の風車先進諸国では10%以上、EU全体でも6%に達している。日本における割合は未だ0.5%と非常に小さく、今後の導入拡大の余地は大きいと考える。風力発電の導入が進んでいる欧州・米国・中国の例をみれば明らかのように、風車の導入拡大には国の政策関与が不可欠である。既に国によって導入が決定し、現在詳細制度検討中のFIT（フィードインタリフ）制度をはじめとする、国の更なる導入促進策を期待したい。

今後とも、製造メーカーとして風車の供給により、再生可能エネルギーの普及に引き続き貢献していく所存である。

JICMA

《参考文献》

- 1) 日本風力発電協会 (JWPA) ウェブページ (<http://jwpa.jp/>)
- 2) World Market Update 2010, BTM Consult
- 3) Wind in power 2011 European statistics (EWEA 2012/02/06)

【筆者紹介】



天野 義如 (あまの よしゆき)
三菱重工業㈱
エンジニアリング本部 建設統括部
長崎プラント建設部 風車建設グループ
主任



長沼 二巳 (ながぬま ふたみ)
三菱重工業㈱
原動機事業本部 風車事業部
企画営業部 企画事業推進課
主席技師

平成 23 年度版 建設機械等損料表 発売中

■内 容

- ・国土交通省制定「建設機械等損料算定表」に基づいて編集
- ・機械経費・機械損料に関係する通達類を掲載
- ・損料積算例や損料表の構成等をわかりやすく解説
- ・各機械の燃料（電力）消費量を掲載
- ・主な機械の概要と特徴を写真・図入りで解説
- ・主な機械には「日本建設機械要覧（当協会発行）」の関連ページを掲載

■ B5判 約 710 ページ

■一般価格

7,700 円（本体 7,334 円）

■会員価格（官公庁・学校関係含）

6,600 円（本体 6,286 円）

■送料（単価） 600 円（但し沖縄県を除く日本国内）

注 1) 複数冊発注の場合は送料単価を減額します。

注 2) 沖縄県の方は一般社団法人沖縄しまたて協会

（電話：098-879-2097）にお申し込み下さい。

一般社団法人 日本建設機械施工協会

〒 105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8（機械振興会館）

Tel. 03 (3433) 1501 Fax. 03 (3432) 0289 <http://www.jcmanet.or.jp>