

# 北海道向け風力発電タワーの設計と施工

## Design and Construction of Wind Turbine Tower for Hokkaido Project

山中 和夫	エコ・発電システム部 統括スタッフ	Kazuo Yamanaka
根本 大	エコ・発電システム部	Dai Nemoto
宮岡 十里	シビルエンジニアリング部 土木建築設計室 室長	Juri Miyaoka
棚邊 隆	シビルエンジニアリング部 土木建築設計室 主査	Takashi Tanabe
飯田 泰彦	シビルエンジニアリング部 土木建築設計室 主査	Yasuhiko Iida
増田 博	シビルエンジニアリング部 土木建築設計室	Hiroshi Masuda

当社は 2001 年 4 月、北海道の江差町と幌延町で、それぞれ発電容量 21000kW (750kW × 28 基) の風力発電設備の現地工事に着手、2001 年 10 月に機器据付工事を完了し、2002 年 3 月の本格送電開始に向け試運転調整を鋭意進めている。この中で風力発電機用のタワーに関しては、発電機の発電量を上げるため、従来型よりその高さを増している。本稿では、当該タワーの基礎を含めた設計・施工方法について、その概要を述べるものとする。

*21000kW wind farms are under construction at both Esashi and Horonobe in Hokkaido by NKK, and these will start to supply power in spring of 2002. In these projects, the tower is elevated in comparison with our previous type because the amount of wind turbine's generating to be increased. This report is especially stated about the design and construction of the tower including its foundation for LAGERWEY-LW50/750 wind turbine.*

### 1. はじめに

当社は 1996 年 12 月にオランダの風車メーカー LAGERWEY (ラガウェイ) 社と提携、国内での独占販売権を取得し、風力発電分野に参入している。これまでの納入実績は LW18/80 (80kW 機) および LW30/250 (250kW 機) を 1 基ずつ、そして LW50/750 (750kW 機) を今回の北海道の江差町と幌延町向けを含めて 90 基ということになる。江差町と幌延町の地理的位置は Fig.1 を参照されたい。

ところで風力発電機用のタワーについては、当社ではその設計・調達機能を自社にて有しているが、他社、特に海外風車メーカーの日本代理店ではその機能を本体側に完全依存しているケースが多いようである。また商品の性質上、風力発電機本体に注目が集まり、その支持構造物であるタワーおよび基礎の設計・仕様がクローズアップされることは比較的少ない。

これまで当社が納入した 750kW 機については、すべてハブ高さ (発電機ローター回転中心高さ) を 50m (タワー高さ 46m) としていた。しかし今回の 750kW 機については、その発電量を上げるため、重機による発電機上架可能高さも考慮して、ハブ高さを 74m (タワー高さ 70m) とすることになった。この際、タワーおよび基礎の設計においては以下の点が課題となった。

- (1) 製作・輸送条件を考慮したタワーの形状 (外径) 設定およびこれに起因する発電機との共振の有無
- (2) 上記共振も含めた疲労設計条件を満足するタワーの溶接ディテール考案および実際に製作する上での品質管理
- (3) 寒冷環境に対するタワーの構成鋼材の選定
- (4) 工期短縮を目的としたタワー柱脚および基礎形式の選定

本稿は、この江差町と幌延町向け風力発電機用タワーおよび基礎の設計・施工全般に関して紹介するものである。



Fig.1 Site location of Esashi & Horonobe

## 2. 750kW 風力発電タワーの設計

### 2.1 タワーの形状決定要素

タワーの形状決定に当たっては、まず風力発電機が想定あるいは仕様上要求される発電量を実現しうる、地盤面から発電機ローター回転中心までの高さが設定される。これをハブ高さと呼び、LW50/750 ではタワー高さ（発電機～タワー間の接続部高さ）＝ハブ高さ - 4.0m となる。

これまで当社が納入した 750kW 機については、ハブ高さ 50m（タワー高さ 46m）を標準型としていたが、今回は先述の発電量を上げることを目的にハブ高さ 74m（タワー高さ 70m）とした。

またタワーは美観上の問題もあって、鋼製のコニカルパイプ形状のものが多く採用されている。当社でも同タイプのものを採用しているが、頂部外径は発電機側との接続部で決定され 2.0m、基部外径は車両輸送上の制約から 3.5m としている。Fig.2 に風力発電機を含めた姿図、Photo 1 に姿写真を示す。

なお、タワーには現場継手（内フランジ形式・高力ボルト接合）が設けられるが、今回は現地の輸送・立地条件を最大限に生かし、最大長さ 24m の 3 分割として輸送・建方の効率化を図った。



Photo 1 LW50/750 w/hub height 74m towers (Esashi)

### 2.2 タワーの構成鋼材（引張強度クラス）・板厚設定

先述により決定された形状に耐力・剛性上必要な板厚を付与することになるが、それを決定する要因として以下が挙げられる。

- (1) 建築基準法および関連設計規準・指針上の地震力・風荷重
- (2) 発電機ローター回転振動との共振回避、または抵抗
- (3) 操業上の疲労荷重（寿命 20 年）

(1)については通常、当該構造物は建築基準法上の工作物申請が必要となり、特に建築基準法あるいは日本建築学会「建築物の荷重設計指針」で規定される風荷重に対して耐力上問題ないことを確認しておくことが必要である。設計諸元を Table 1, 2 に示す。

Table 1 Basic design data in LAGERWEY's instruction

Type	Weight (t)	Projected area in operation (m <sup>2</sup> )	Projected area in cut-out (m <sup>2</sup> )
LW50/750	54.8	Max. 188 incl. wind factor in front	Max. 81 incl. wind factor in side

Table 2 Parameters of wind load based on Japanese building law

Site location	Basic wind velocity V <sub>0</sub> (m/s) -AVG. per 10 minutes	Geographical roughness class
Esashi	34	(in easy hill)
Horonobe	32	(along sea line)

(2),(3)についてはLAGERWEY社のレビューを受けることになるが、まずタワーの許容固有振動数領域が指定され、(1)により設計したタワーがこれを満足することを確認する。これは Campbell Diagram と呼ばれるローター回転数に応じた発電機側に起因する固有振動数が示されたもので、この中でタワーに対して有害となる振動成分領域とタワー固有振動数が一致しないことを確認することになる。次に

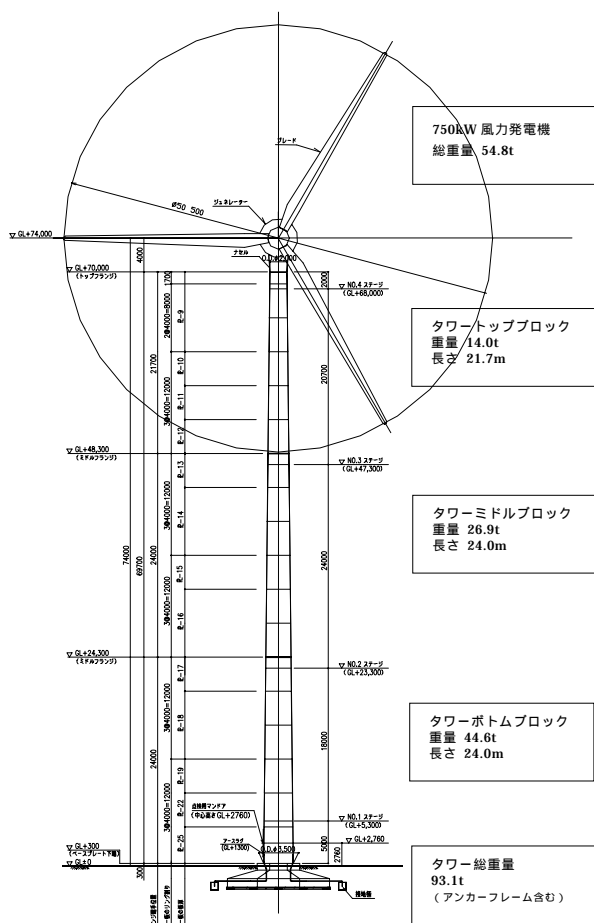


Fig.2 Elevation of hub height 74m tower for LW50/750



## 2.5 タワーの柱脚部ディテール

先述しているように当該タワーは基本的に共振を許容する設計を行っているため、柱脚部に対してもその設計思想を踏襲する必要があった。これまで当社の 750kW 機（ハブ高さ 50m）については、そのタワーの根元を基礎ペDESTAL部分に埋め込み、さらに基礎フーチングにアンカーボルトで定着をとる形式を採用していた。しかし今回、柱脚部の応力伝達機構をより明確にするために、Photo 2, 3 に示す露出型アンカーボルト構造を採用することとした。これは基礎工事とタワー建方工事の取り合いを極力解消し、工期短縮を意図したのもでもあり、実際に有効であった。

アンカーボルトには 36 アンボンド PC 鋼棒（JIS G 3109）を採用、油圧ジャッキによる緊張力導入を行うことで、柱脚部の固定度を確保した。また基礎ペDESTAL断面が常時圧縮応力下となることから、当該部分のタワー共振による劣化が生じにくく、台風などの暴風時の転倒モーメントに対しても非常に安全な構造となっている。



Photo 2 Tightening of PC anchor bolt by hydraulic Jack (Horonobe)



Photo 3 Protection caps for exposed PC anchor bolt's thread (Esashi)

## 3. 750kW 風力発電タワーの施工

### 3.1 タワーの製作および輸送

今回はほぼ同時期に、江差町と幌延町向けにそれぞれ 28 基ずつ、計 56 基というこれまでにない大量のタワー製作発注となるため、製作コストのみならず、輸送を含めたコストダウンを図るべく業者選定がなされている。結果としては計 56 基のうち、その大部分を海外の重工メーカーに発注した。発注した業者の中にはこれまで当社設計のタワー製作実績のないところも含まれ、特に海外製作分につい

てはその基数も多いことから、当社から SV を派遣して輸送も含めて品質・工程管理を行った。またタワー母材と現場継手フランジの突き合わせ溶接部で指定しているグラインダ仕上げについては、当社にてサンプルを作製・提示し、その仕上り具合を指示した。

当該タワーは、約 4m 高さに切り板から曲げ加工されたテーパ管状のものが連続接合されて成り立っており、輸送・建方上、分割される位置に現場継手フランジが挿入される形となっている。各業者とも製作手法・手順は必ずしも同一ではなく、たとえばタワー母材と現場継手フランジの突き合わせ溶接部については、半自動多層溶接であったり、SAW の一発仕上げであったりと、所有設備・技量によって差がある。ただし、いずれの業者も製缶・塔槽類を主体とした十分な製作実績があり、タワー本体の製品上の品質については差がないと言える。

製作されたタワーは各業者から海上輸送され、江差町向けは函館港で、幌延町向けは稚内港でそれぞれ水切り、そこから現地まで陸送された（Photo 4 参照）。タワーの陸送は交通量の少ない深夜に行われ、そのまま翌朝から現地での建方が開始できるような段取りとした。



Photo 4 Carrying of tower block into site (Horonobe)

### 3.2 基礎の設計および施工

江差町と幌延町はそれぞれ現地の地質条件も全く異なるため、基礎の仕様も異なっている。

江差町現地は背後に山岳地を控えたなだらかな丘陵地である。計画段階では概ね基礎床付けレベルには良好な岩盤が存在していると想定されたため、直接基礎にて設計を進めていた。ところが平面配置確定後の詳細な地質調査の結果、一部岩床付けの困難な箇所が生じたため、その程度に応じて地盤改良、あるいは杭基礎への設計変更という対応を取った。最終的には杭基礎への変更が 5 基分となり、Photo 5 に示す現場造成杭+マット基礎形式とした。

幌延町現地は海岸線から県道を挟んだ砂地である。こちらは非常に緩い砂地盤上となり、地下水位も高いことから地震時に表層地盤の液状化が懸念された。そこで今回は周辺環境への配慮ということも念頭に置き、低振動・低騒音工法である当社商品・つばさ杭（先端翼付き回転貫入工法）の採用決定に至った。また基部の転倒モーメント抵抗要素



Photo 5 Construction of foundation w/RC pile (Esashi)



Photo 7 Lifting of tower bottom block by 350t crane (Horonobe)

として、つばさ杭に短期許容引抜力 20t を設定した基礎の設計を行った。この許容引抜力については、現地での載荷試験を通じて設定値を十分上回ることを確認した。Photo 6 に当該基礎の施工状況を示す。



Photo 6 Construction of foundation w/steel pile (Horonobe)

先述しているようにタワーの基礎への定着方法としてアンカーボルトに PC 鋼棒を採用しており、そのアンカープレートを支圧機構を実現するために、基礎コンクリートには設計基準強度 24N/mm<sup>2</sup> の高強度コンクリートを採用した。それぞれの基礎の仕様概略を Table 4 に示す。

Table 4 Outline of foundation system

Site location	Bearing system	End bearing capacity	Footing shape
Esashi	Spread foundation	30t/m <sup>2</sup>	12m width octagon
	RC pile 4- 1500 (L=6m)	320t	12m width square
Horonobe	Screw steel pile w/toe wing 16- 406.4 × 8 (SKK490, L=7m)	100t (pull-out 20t for short term)	12m width octagon

### 3.3 タワーの建方

タワーの建方には、日本でも数少ない大型クレーン（江差町：550t 油圧式トラッククレーン，幌延町：350t クローラクレーン）が使用された。当該重機仕様は発電機重量約 30t の高さ 74m への上架に必要な能力により決定されているが、その能力を最大限に活用するためにタワーの分割数を 3 とし、ボトムブロックの重量は約 45t となっている。タワー揚重の様子を Photo 7 に示す。

建方手順としては、ボトムブロック据付後、PC 鋼棒アンカーボルトの仮締付けを行い、順次ミドル・トップブロックの据付を行った。平行して PC 鋼棒アンカーボルトの本締めを行いながら、現場継手フランジの高力六角ボルト（F10T-M30）の仮締めを行った。高力六角ボルトの本締めは、発電機の上架後、現場継手フランジ同士のなじみを待って、トルクコントロール法にて行った。

なお、ローターおよびブレードは Photo 8 に示すように地上で地組されるが、このために直径 50m 程度の円状の地組用スペースが必要となる。また、その揚重は天候（風速）に影響されることが多いが、今回に関しては比較的天候に恵まれ、建方工事は順調に進んだ。Photo 9 に風力発電機全パーツ取付後の全景を示す。



Photo 8 Setting of rotor & blades on ground (Esashi)



Photo 9 Installation of LW50/750 wind turbine (Esashi)

参考文献

#### 4. おわりに

北海道の江差町と幌延町向けの風力発電設備，その中でも特にタワーの設計と施工について，その概要を報告した。はじめに述べた課題についてまとめると以下ようになる。

(1) タワー形状（外径）については従来の製作・輸送条件を踏襲して決定し，発電機との共振を前提にその条件を設定し疲労設計を行った。

(2) 上記設計条件を満足するタワーの溶接ディテールを考案し，十分な品質管理を行った。

(3) 寒冷環境に対するタワーの構成鋼材の選定においては，JIS仕様鋼材に低温靱性能を付加したものを使用した。

(4) タワー柱脚部を露出型アンカーボルト構造とすることで，基礎工事との取り合いを極力解消し，工期短縮を実現した。

設計に関してはその設定条件の確認など，既設タワーも含めて別途調査・研究を進めており，近い将来，報告の場を設けたいと考えている。また製作に関しては，今後さらなるコストダウンのため，海外調達の方角に進むものと思われる，その品質管理がより重要になってくると思われる。

2002年度施工の新規プロジェクトもスタートしており，今回，特に紹介はしなかったが，細かい部分での改善点など，設計・管理手法へのフィードバックを続け，より品質の高いタワー設計・調達を進めていきたいと考えている。

- 1) LAGERWEY the Windmaster. "Tower Verification Report for NKK". (2000).
- 2) 日本鋼構造協会. "鋼構造の疲労設計指針・同解説". (1993).
- 3) 北海道土木技術会鋼道路橋研究委員会. "北海道における鋼道路橋の設計および施工指針". (1989).
- 4) 柴村陽吉ほか. "久居榑原風力発電施設の概要". NKK 技報. No.168(1999).

<問い合わせ先>

エコ・発電システム部

Tel. 045 (505) 6535 根本 大

E-mail address : nemotodk@nkp.tsurumi.nkk.co.jp

シビルエンジニアリング部 土木建築設計室

Tel. 045 (505) 7722 増田 博

E-mail address : masudah@eng.tsurumi.nkk.co.jp