

# 風力発電機の型式試験

## WIND TURBINE TYPE TESTING

藤原 惇嗣\* 小川 路加\*  
Atsushi Fujiwara Ruka Ogawa

工事計画の届出が必要となる出力が 500kW 以上の風力発電所においては、登録適合性確認機関により事前確認が義務付けられている。その事前確認では、導入する風力発電機が型式認証を取得している必要がある。型式認証の目的は、その型式の風車が設計条件、適用される基準、その他の技術的要求事項にしたがって設計、文書化および製造されていることを証明することにある。本稿では、当社製風力発電機 KWT300 の型式認証において実施した試験サイト評価、型式試験およびコンポーネント試験の概要について報告する。

キーワード：型式認証、型式試験、コンポーネント試験

### 1. はじめに

風力発電機の型式認証は、図-1 に水色網掛けで示す必須モジュールで構成される。型式認証の目的は、その型式の風車が設計条件、適用される基準、その他の技術的要求事項にしたがって設計、文書化および製造されていることを証明することにある。

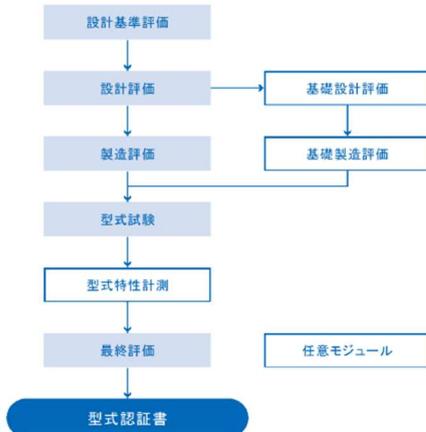


図-1 型式認証のモジュールおよび構成

表-1 風車仕様

型 式	KWT300
形 式	3 枚翼アップウィンド型 水平軸風車
定 格 出 力	300kW
ロータ直径	33m
ハブ高さ	41.5m
定格風速	11.5m/s
カットイン風速	3m/s
カットアウト風速	25m/s



図-2 サイト評価地点（宮古島）

### 2. 試験サイト評価について

試験サイトは、評価範囲の地形が平坦かつ風に影響を与える障害物がないことが望ましい。本節では IEC61400-12<sup>2)</sup> に基づき、試験サイトについて評価した内容を示す。型式認証取得のために使用した風車の仕様を表-1 に示す。

サイト評価を行った場所を図-2、3 に示す。本サイトは宮古島の北部に位置し、周辺は海であり、地形的に風況への影響が少ないことから、データの取得が容易であると考え、候補サイトとして選定した。次節より、本サイトの評価事例を紹介する。

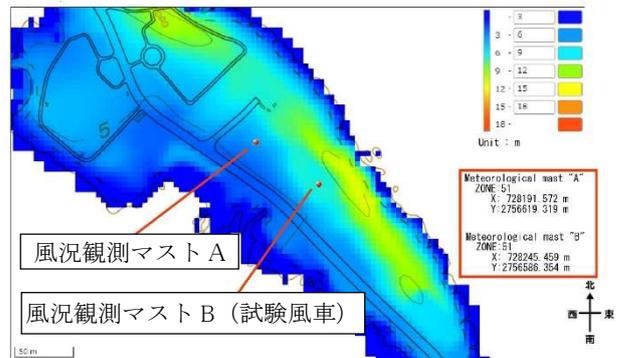


図-3 試験サイト周辺の地形（標高）

\* 環境インフラ本部 環境インフラ部

## 2.1 地形の評価

型式試験は、基本的に平坦地形上で行うべきであり、地形による風への影響を小さくするため、周辺の地形傾斜が少ないサイトを選定の方がよい。また、規格にて要求されている傾斜度以下であればサイトキャリブレーションを実施せずに試験を開始することができる。日本においては、複雑地形が多く、サイトキャリブレーションが必要になることが多い。すなわち、地形による気流のゆがみによる風速の不確かさを評価し<sup>3)</sup>、風車ロータ中心に流入する風速と風速計測に使用する風況観測マストの風速との統計的な相関係数を得る必要がある。

本サイトでは、風況観測マスト A および B (試験風車) を 67.6m (2.05D = 1L) 離して配置した。ここに、D はロータ直径である。それぞれを中心として、16L (1081.6m) の範囲で 10°毎の方位で地形傾斜度を調べてサイト評価を実施した。ここでは、0° (北方向) の評価を行った際の結果を表-2 に示す。

表-2 地形傾斜度評価

		最大傾斜	許容最大傾斜度	評価
		[%]	[%]	
マストA	< 2L	8.9	3	NG
	≧2L and < 4L	2.2	5	OK
	≧4L and < 8L	1.1	10	OK
	≧8L and < 16L	0.5	10	OK
マストB (試験風車)	< 2L	20.8	3	NG
	≧2L and < 4L	7.1	5	NG
	≧4L and < 8L	3.5	10	OK
	≧8L and < 16L	1.7	10	OK

表-2 より、地形の傾斜度については、風況観測マスト A を中心に 2L より内側の範囲で許容値以上の傾斜であった。2L ~ 16L では許容値内の傾斜で収まっていた。また、風況観測マスト B (試験風車) を中心に 4L より内側の範囲で許容値以上の傾斜であった。4L ~ 16L では許容値内の傾斜で収まっていた。以上より、本サイトは型式試験を実施する前にサイトキャリブレーションを実施する必要があるサイトであることが判明した。

## 2.2 除外風向の評価

IEC 規格<sup>2)</sup>によると、試験風車および風況観測マスト付近の風車や建物等の障害物について、下式に基づき影響角度を算出し、型式試験に使用できない風向の算出を行う必要がある。

$$\theta = 1.3 \tan^{-1} \left( \frac{2.5D_e}{L} + 0.15 \right) + 10 \quad (1)$$

$\theta$  : 影響角度 [°]

$D_e$  : 等価ロータ直径 or 近傍風車ロータ直径 [m]

$L$  : 障害物と試験風車との距離 [m]

また、障害物の等価ロータ直径については、下式より算出する。

$$D_e = \frac{2l_h l_w}{l_h + l_w} \quad (2)$$

$l_h$  : 障害物の高さ [m]

$l_w$  : 障害物の投影幅 [m]

風況観測マスト A および B (試験風車) に対して、上記の 2 式を用いて影響を評価し、両方とも等価ロータ直径の 2 倍以上の離隔距離を確保して設置する必要がある。一方、等価ロータ直径の 20 倍以上離れている場合は、その障害物の影響はないと評価できる。また、試験風車も障害物として評価する必要があるため、試験風車からみて主風向側に風況観測マストを設置することが望ましい。

図-4 は、除外風向を検討するために、風況観測マスト (Mast A, B) 周辺の障害物である運転風車 (NWT1, 2) および建築物 (RO1, 2) の位置関係を示したものである。それぞれに対する評価を表-3 に示す。



図-4 風況観測マストと障害物との関係

表-3 障害物の影響評価

a) 風況観測マストA							
障害物	高さ [m]	幅 [m]	等価ロータ直径 [m]	対 風況観測マストA			
				距離 [m]	障害物方位 [°]	除外風向角 [°]	除外方位 [°]
試験風車			33.0	67.6	117.0	80.0	77.0 ~ 157.0
NWT1			44.0	201.7	132.0	55.3	104.4 ~ 159.7
NWT2			44.0	390.8	142.0	40.3	121.9 ~ 162.2
RO1	8.0	12.0	9.6	351.6	139.0	0.0	none
RO2	4.0	8.0	5.3	134.5	325.0	0.0	none

b) 風況観測マストB (試験風車)							
障害物	高さ [m]	幅 [m]	等価ロータ直径 [m]	対 風況観測マストB (試験風車)			
				距離 [m]	障害物方位 [°]	除外風向角 [°]	除外方位 [°]
試験風車			33.0				
NWT1			44.0	137.0	140.0	66.7	106.7 ~ 173.4
NWT2			44.0	330.2	147.0	43.5	125.3 ~ 168.8
RO1	8.0	12.0	9.6	289.4	144.0	0.0	none
RO2	4.0	8.0	5.3	197.3	316.0	0.0	none

表-3 より、風況観測マスト A および B に対して、RO1 と RO2 については、等価ロータ直径の 20 倍以上距離を有しているため評価不要（影響なし）と判断できる。一方で、NWT1 と NWT2 については、等価ロータ直径の 20 倍以下の距離であるため、障害物の影響があると評価される。このことから、風況観測マスト A および B に対して、NWT1、NWT2 および風況観測マスト A（試験風車）について除外風向の算出を行ったところ、このサイトでの除外風向は 77°~174°（0°を真北とする）である。

2.3 試験サイトでの風況の評価

型式試験においては、各風速帯での結果が要求されるため、サイトの風況を調査し、試験を実施するために有用なサイトかどうかを評価する必要がある。

図-5 に風配図<sup>4)</sup>に除外風向を重ねたものを、表-4 に風向別風速別出現頻度を示す。図-5 の赤色のハッチで風況観測マスト B（試験風車）の影響による除外風向範囲を、青色のハッチで障害物による除外風向の範囲を示す。表-4 の縦軸にカットイン風速~カットアウト風速（3m/s~25m/s）までの 1m/s BIN の風速を、横軸に 10° BIN の風向（除外風向は除く）をとり、それぞれに 10 分平均でその範囲に入ったデータの個数を示す。

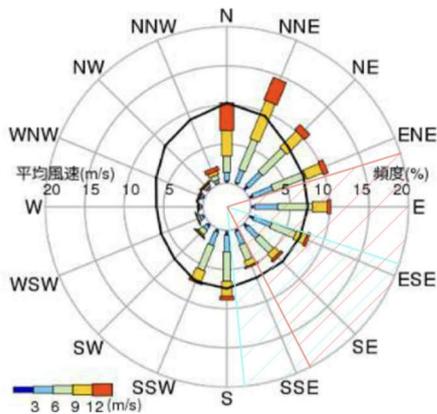


図-5 風配図および除外風向（出典：NEDO 洋上風況マップ）

表-4 風向別風速別出現頻度

WS	WD																																			
	0	10	20	30	40	50	60	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310	320	330	340	350												
3	54	37	37	13	8	7	14	95	97	97	89	83	74	98	94	84	118	156	232	134	125	93	56	47												
4	40	38	24	6	7	10	13	101	105	134	98	156	190	176	161	143	146	211	381	253	218	77	49	81												
5	38	20	8	7	5	16	20	93	170	249	202	227	210	258	217	177	159	108	101	899	178	66	85	119												
6	61	7	2	12	6	8	13	139	195	248	287	393	298	177	195	242	169	82	92	108	43	38	65	122												
7	90	0	1	3	3	7	3	224	297	371	295	243	228	388	339	259	119	54	44	54	52	28	17	117												
8	2	1	3	5	3	4	5	224	253	356	319	218	163	182	159	160	48	67	34	26	41	18	13	10												
9	0	4	4	2	4	2	8	224	211	292	255	168	93	78	63	76	45	60	21	8	30	7	13	4												
10	3	3	0	1	1	1	1	188	227	318	180	98	36	35	46	26	44	33	18	1	6	9	9	3												
11	2	0	1	0	1	2	0	168	190	234	74	79	14	18	21	27	32	10	6	1	6	5	5	7												
12	1	0	1	1	3	1	2	161	177	131	30	32	13	13	57	31	19	3	0	0	0	0	1	8												
13	1	0	0	1	0	4	6	149	116	84	14	4	3	18	56	41	7	1	0	0	1	0	0	1												
14	0	0	0	2	1	3	4	138	96	24	9	4	1	0	34	15	1	0	0	0	0	0	0	0												
15	0	0	0	3	4	11	6	111	38	10	7	4	0	4	12	8	0	0	0	0	0	0	0	0												
16	0	0	0	7	3	4	0	62	16	4	9	6	0	8	8	2	0	0	0	0	0	0	0	0												
17	0	1	0	1	0	2	1	18	1	3	2	10	2	9	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0												
18	0	6	4	5	0	3	1	3	0	0	0	0	1	2	13	7	1	0	0	0	0	0	0	0												
19	0	10	9	2	0	0	0	3	5	0	0	0	0	2	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0												
20	0	8	8	5	0	1	1	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0												
21	0	3	7	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0												
22	0	5	4	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0												
23	5	13	0	12	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0												
24	12	7	4	18	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1												
25	6	6	0	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1												

図-5 より、試験に有効な風向は S~ENE の範囲である。特に、N~ENE の範囲については、他の範囲では出現頻度の低い 12m/s 以上の中・高風速域の出現頻度が高く、試験のために十分なデータが取得できることが期待できる。

表-4 より考えられるデータ取得見込みについて、以下に示す。

9m/s 以下の風速について 190°~330°の風向で 100 個程度のデータが取得できており、早い段階でデータの取得ができると予測される。

200°付近の風向について、定格付近のデータが平均 100 個以上出現しており、風向は限られるものの、十分なデータが取得できると予測される。

17m/s~25m/s の範囲について、全風向にわたりデータの出現頻度が低く、この風速域に必要なデータの取得に時間がかかると予測される。

以上を踏まえると、高風速域の試験データは多少時間を要する可能性があるものの、型式試験サイトとしては、問題ないことを確認した。

3. 型式試験

型式試験は、風力発電機的设计値と実際の値や設計で想定している挙動が同じとなっているかを確認するために実施され、性能試験、荷重試験、挙動試験の 3 試験を行う。本節では、それぞれの試験で実施した内容について示す。

3.1 性能試験

性能試験は、風車の出力性能特性の測定を目的として実施される。本節では、IEC61400-12<sup>2)</sup>に準拠して試験を実施した際の事例を示す。

風車への流入する風の計測のため、図-6 の風況観測マストを風車から 2D 程度離れた位置へ設置した。

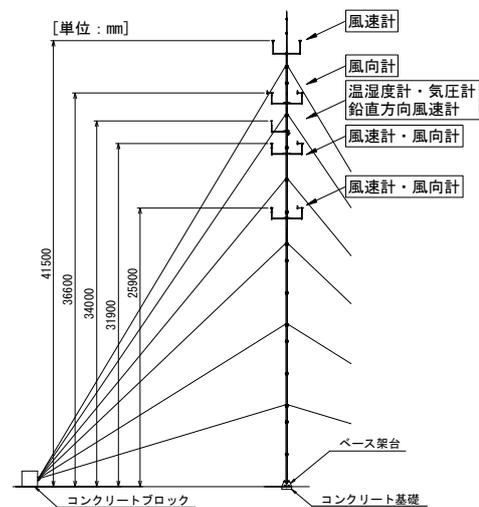


図-6 風況観測マスト

本マストは、ハブ高さと同じ 41.5m 高さに三杯式風速計を 2 台、36.6m 高さに矢羽根式風向計を 2 台、34.0m 高さに鉛直方向風速計、温湿度計および大気圧計を各 1 台ずつ、ブレード中間位置付近である 31.9m およびブレード下端位置である 25.9m 高さに三杯式風速計と矢羽根式風向計を 1 台ずつ設置した。設置したセンサを表-5 に示す。

性能試験にて計測した出力パワーカーブを図-7 に示す。図-7 の縦軸は発電出力で、横軸に風速を取り、黒線で設計パワーカーブを、黄線で計測パワーカーブを示す。計測パワーカーブは 9m/s 以下の範囲で、設計値とほぼ同等であることを確認できた。また、定格風速付近では、計測値が設計値より低くなったが、これは風車に流入する風が時間的に変動するため、平均化処理をした際に小さくなったものとする。15m/s 付近で計測値が設計値よりも 3% 程度大きくなっている。これは定格出力運転時には、ピッチ角を変更することにより、出力を一定になるように制御を行っているが、風車へ流入する風が変動した際、ピッチ制御の遅れにより回転数が変動したためと考える。いずれも乱流による影響で設計時の許容範囲内であり問題ないとする。

表-5 風況観測マストセンサ

三杯式風速計	Thies 製 4.3351.00.140
矢羽根式風向計	Thies 製 4.3151.00.141
鉛直方向風速計	Yang 製 CYG-27106F
温湿度計	Thies 製 1.1005.54.160
大気圧計	Vaisala 製 CVS-PTB210C + SPH10

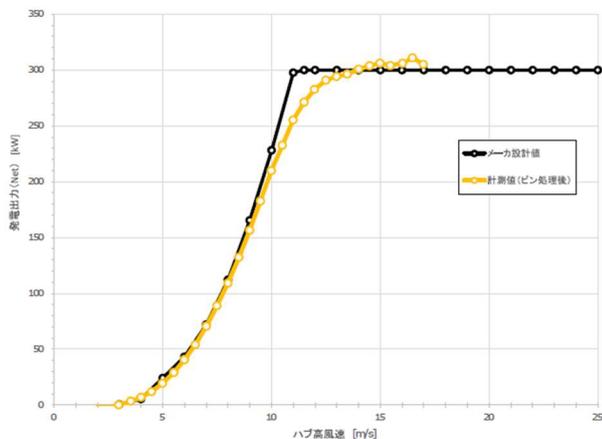


図-7 出力パワーカーブ

### 3.2 荷重試験

荷重試験は設計時に想定した荷重と実機の風車が受ける荷重が同程度であり、設計が妥当であることを確認することを目的に実施される。本節では、IEC61400-13<sup>9)</sup> に準拠して試験を実施した事例を示す。

風車が受ける荷重を計測するため、ひずみゲージを風車の主要部分に取付け、荷重の計測を行った。表-6 に計測項目と計測場所を示す。

荷重試験では、通常運転中、発電停止中、エラー等による停止時の荷重、および運転中の荷重変動による疲労の評価が要求されている。図-8、9 にエラーが生じて空力ブレーキが作動したときに、発電が停止する際の主軸トルクおよびブレードフラップ方向の計測結果を示す。

縦軸はそれぞれの荷重であり、横軸にエラー発生時を 0 秒とした経過時間を示す。図中の青丸で計測値を、橙丸で設計値を示す。

表-6 荷重計測項目および場所

ブレードフラップ方向 曲げモーメント	ブレード翼根部
ブレードエッジ方向 曲げモーメント	ブレード翼根部
主軸トルク	メインシャフト
タワー前後方向 曲げモーメント	タワー基部
タワー左右方向 曲げモーメント	タワー基部

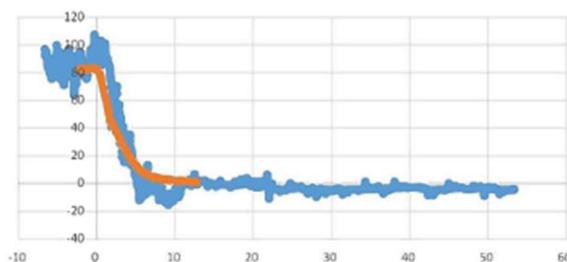


図-8 主軸トルク

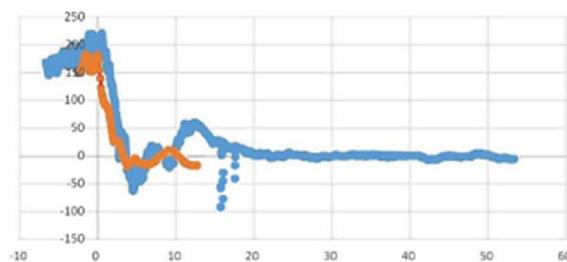


図-9 ブレードフラップ方向曲げモーメント

ブレードのフラップ方向の曲げモーメントについて、設計値と計測値の変化速度がおおよそ一致しており、同等の挙動となっていることが確認できた。主軸トルクについて、設計値と計測値で若干傾向が異なるが、試験時の風の状態によるロータ回転数の違いであると考えられる。

### 3.3 挙動試験

挙動試験では、通常運転時やエラー発生時などの風車の挙動が設計どおりに動作するかについて、実機で確認することを目的に実施される。本節では GL Guideline<sup>6)</sup> に準拠して実施した事例のうち、ロータの過回転による風車の停止状況のデータを示す。

ロータ過回転のエラーを再現するため、試験中のみロータ過回転の閾値を 30rpm に変更し、30rpm を超えた際に、ブレードピッチ角が 0°から 88°に変化し空力ブレーキがかかることを確認する。図-10 にロータ回転数を、図-11 にブレードピッチ角を示す。

図-10, 11 の縦軸にロータ回転数、ブレードピッチ角を示し、横軸にエラー発生時を 0 秒とした経過時間を示す。

両図より、回転数 30rpm を超えた際、ブレードピッチ角が 88°になるように変化していき、それとともにロータ回転数が低下して回転が停止される挙動が確認できた。このように、挙動試験では、設計において想定している安全確保のための風車制御が、実機において実現できるかを確認する。

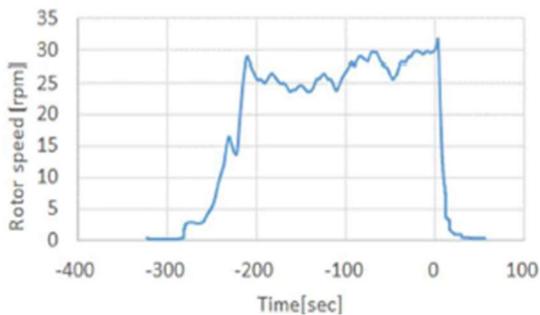


図-10 ロータ回転数

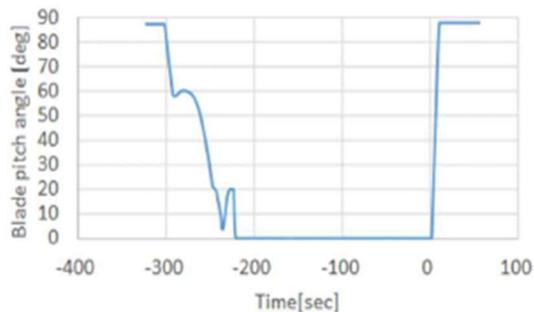


図-11 ブレードピッチ角

## 4. コンポーネント試験

設計評価の過程では、風力発電機の主要部品であるブレード、増速機および発電機については、部品単体としての試験を行い、部品として設計の妥当性確認が行われる。ここでは、ブレードと増速機の試験について述べる。

### 4.1 ブレード試験

ブレードは風のエネルギーを電気に変換する主要部品のひとつであるだけでなく、その性能が風車全体の性能にも大きく影響を与える。そのため、設計したブレードが所定の強度を有しているかの確認は極めて重要となる。一般に、ブレードはFRP製であり、金属製品と比較すると、材料や加工方法などによる特性の変化が著しい。そのため、ブレード試験は実物大ブレードを用いて実施される。本節では GL Guideline に準拠して実施した事例を示す。

試験は、静的载荷試験と疲労試験に分類される。静的载荷試験では、設計で想定した極値荷重に対して、ブレードの変形、ひずみを計測する。また、実物大ブレードの固有振動数や減衰が風車全体解析で仮定している数値の範囲であるかを確認する。静的载荷試験状況を写真-1 に示す。

疲労試験は、風力発電機が供用期間（一般に 20 年）の間に蓄積される疲労荷重に対して確認を行うものである。ブレードの先端付近に設置した回転質量の慣性力で、ブレードを設計で想定した疲労回数を強制加振させる（写真-2）。疲労試験中に、急激なひずみや変位の変化が生じないことを確認するだけでなく、疲労試験終了後に、再度、静的载荷試験を実施して、当初の耐荷力が維持できているか確認した。

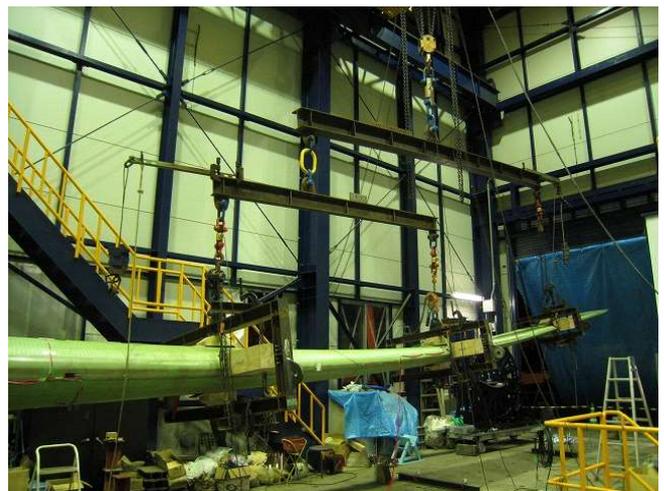


写真-1 ブレード静的载荷試験



写真-2 ブレード疲労試験

#### 4.2 増速機負荷試験

増速機をテストベンチに設置し、設計で想定している 100% の負荷をモータで段階的に載荷する (写真-3)。本節では、GL Guideline に準拠して実施した事例を紹介する。

負荷試験の実施中には、騒音、振動、オイル温度、および歯車の歯当りについて検査する。また、負荷試験の前後にオイルの清浄度を測定する。

試験終了後の増速機の分解を実施し、内部に異常がないことを確認した。歯当り検査の事例を写真-4 に示す。



写真-3 増速機負荷試験状況



写真-4 歯車の歯当り検査

#### 5. おわりに

当社製風力発電機 KWT300 の型式認証において実施した試験サイト評価、型式試験およびコンポーネント試験の概要について述べた。

本稿では紹介を割愛したが、型式認証の過程では、図-1 に示すように製造評価も行われる。これは、風車が設計文書に基づき、品質が確保された状態で製造されているかどうかを評価するものである。このように、型式認証では、法令、規格および技術要件に基づき安全性が確保されているかを評価する。そのため、評価を実施するのは、第三者機関に委ねられなければならない。

国内に公的な風車試験機関や試験所がなく、自社の設備や、場合によっては海外の試験所で試験を実施せざるを得ない状況となっていることも課題である。海外においては、NREL<sup>7)</sup> や WTTC<sup>8)</sup> のような公的機関が存在し、風況の良い試験サイト、ブレード試験設備および各種荷重試験設備を提供することで、試験コストの負担軽減が図られている。国内においても同様の試験所ができることで、ますます国内の風力産業が発展することを期待したい。

一方で、型式認証において評価されるのは、最低限度の要件を満足しているかであることを忘れてはならない。そのため、風車メーカーおよびサプライヤーは規格を満足させることに留まらず、より安全を確保するための開発行為が求められる。

#### 参考文献

- 1) 一般社団法人日本海事協会：風力発電システムの認証，2021.
- 2) IEC 61400-12-1 : Power performance measurement of electricity producing wind turbines, 2022.
- 3) 植田祐子，今村博，丸山勇祐，石原孟，山口敦，小垣哲也：複雑地形における風車性能評価のためのサイトキャリブレーション，第 36 回風力エネルギー利用シンポジウム，pp.205-208, 2014.
- 4) NEDO NeoWins (洋上風況マップ) : [https://appwdc1.infoc.nedo.go.jp/Nedo\\_Webgis/top.lhhtm](https://appwdc1.infoc.nedo.go.jp/Nedo_Webgis/top.lhhtm)
- 5) IEC 61400-13 : Measurement of mechanical loads, 2015.
- 6) Guideline for the Certification of Wind Turbine, Edition 2010, 2010.
- 7) NREL ホームページ : <https://www.nrel.gov/>
- 8) WTTC ホームページ : <https://www.masscec.com/masscec-focus/offshore-wind/wind-technology-testing-center-wttc>