

マルチメガワットクラス風力発電装置主軸用軸受の信頼性向上

Improvement of Reliability for Main Shaft Bearings of Multi-megawatt Class Wind Turbine Generators

保坂亮平 R. HOSAKA 松田晋也 S. MATSUDA

Many countries around the world are showing a great interest in renewable energy. Wind power, as the most practical renewable energy, has been spreading throughout the world since the year 2000. Recently, installations of wind turbine generators at offshore sites have increased, leading to the introduction of multi-megawatt wind turbine generators. A bigger bearing size and a various type of bearings are employed on multi-MW wind turbines. Our company has developed bearings for the main shaft of multi-megawatt wind turbine generators, and verified reliability for these bearings.

Key Words: bearing, renewable energy, wind power generation, onshore, offshore, multi-MW

1. はじめに

全世界で再生可能エネルギーへの注目が増す中、風力発電は2000年以降、欧州を中心に米国、中国と導入が加速している。全世界の新規風力発電装置（風車）の導入推移を図1¹⁾に示す。2005年以降、急速に新規導入が増加している。また2010年以降は洋上風車の導入が拡大しているが、これは採算性の点からマルチメガワット風車の導入が中心となっていることが背景にある。本報では、マルチメガワット風車の市場動向と主軸用軸受の信頼性向上への取り組みについて紹介する。

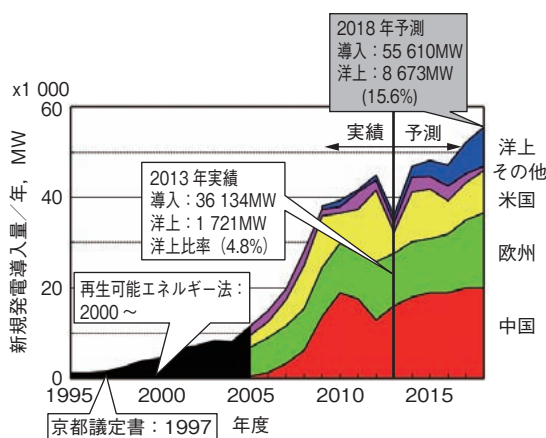


図1 全世界の新規導入量の推移

Global trends in the introduction of wind turbine generators

2. マルチメガワット風車の市場動向

図2に風力発電が本格的に導入され始めた2000年以降の風車の風力有効利用率を示す²⁾。

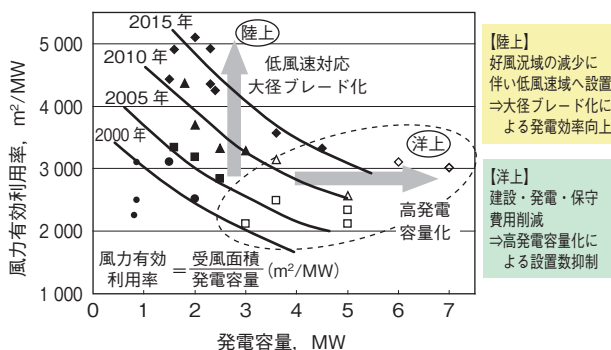


図2 風車の風力有効利用率

High availability for wind power of wind turbine generators

縦軸は風車の発電容量当たりの受風面積で、数値が大きいほど風を有効に利用していることを示している。図2より、近年のマルチメガワット風車は陸上ではブレードの大径化により有効利用率が向上し、洋上では高発電容量化（大型風車）へ推移していることが分かる。

<陸上風車>

近年では洋上風車も増えているが、風車の多くは今でも陸上に設置されている。風車の発電容量増大と、発電コスト抑制の取り組みは、以下に示すように各種実施されている。

(1)欧州では好風況域がすでに占有されており、ブレードの大型化による低風速域への設置拡大。

(2)発電容量増大による、発電量の確保（2MW以上の風車の導入増加）

(3)信頼性向上による、発電時間の延伸
 <洋上風車>

洋上では、陸上よりも乱流の発生が少なく風況が安定していることから、欧州を中心として遠浅の洋上へ大規模のウインドファームが設置されている。近年では、事業採算性の改善にも取り組まれている。

(1)洋上風車の高発電容量化による、設置コストと発電コストの低減。

（船舶でのアクセスが可能で、大型風車の輸送が陸上に比べて容易であるため。）

(2)遠浅沿岸部（着床式）から深海域への設置（浮体式）による設置可能領域の拡大。

以上のように2MWを超える大型風車の開発、および商用化が陸上、洋上ともに加速している。表1にマルチメガワット風車の代表的な仕様を示す。

表1 2MWを超える風車仕様

Specifications for wind turbine generators over 2MW

発電容量 (MW)	ブレード径 (m)	伝達機構	発電機
2.3	82	ダイレクト	同期
	113	増速機	誘導
2.4	92	増速機	誘導
2.5	114	増速機	誘導
2.5	100	増速機	誘導
2.75/2.85	103	増速機	誘導
3.0	101	ダイレクト	同期
	90/112	増速機	誘導
3.4	104	増速機	誘導
3.6	120	増速機	誘導
4.5/5.0	128	増速機	同期
6.0	154	ダイレクト	同期
8.0	164	ダイレクト	同期

2MWを超える風車も、2MWクラスと同等の構造を採用しているものが多い。表2に、その主軸用軸受の特徴を示す³⁾。

3MWを超える風車は、各部品の質量やサイズ増加による部品の調達性や輸送性が問題となる。

近年では表2に示すこのタイプの1～3の長所を組み合わせた低増速比の増速機と、小形の同期発電機で構成されるハイブリッドタイプが開発され、当社ではこの

主軸用軸受の設計・開発・評価を客先と共同で実施した。以下に、その取り組み結果について紹介する。

3. CAE解析を駆使した軽量化技術

図3に当社が開発取り組みの対象としたドライブトレインの外観を示す。主軸は組合せ単列円すいころ軸受（フロント：φ1 550×φ1 920×200， リヤ：φ1 400×φ1 700×160）で構成されており、増速機は主軸に直結する構造となっている。軸受は軽量化のため薄肉としており、また軸・軸箱についても同様に薄肉としている。

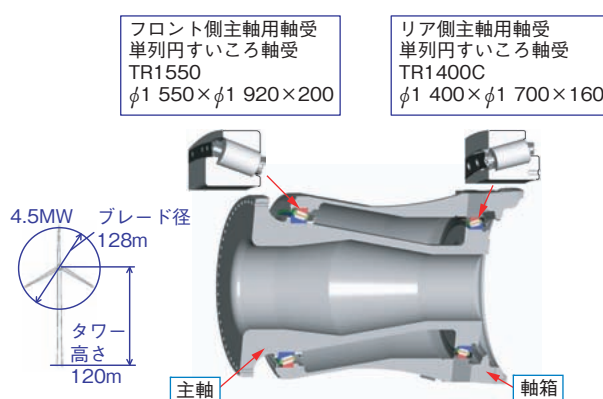


図3 マルチメガワット級風車主軸の構造

Structure of drive train for multi-MW wind turbine generators

薄肉化により、軸受は軽量となったが、その反面ブレードとロータの支持荷重や入力トルクによる変形の影響を受けやすく、期待寿命値を満足しないことが懸念されるようになった。このためFEM解析により弾性体領域で各軸受の転動体荷重がどのように変化するかを検証した。図4に解析モデルを示す。

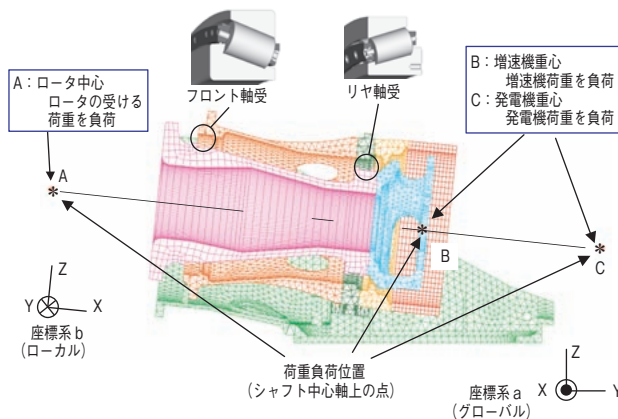


図4 FEM解析モデル

Structure of FEM analysis

表2 2MW クラス風車のドライブトレインと主軸用軸受の特徴
Characteristics of drive train and main shaft bearings for 2MW wind turbine generators

タイプ		1		2		3	
風車	概略構造図						
	特徴	<ul style="list-style-type: none"> 主軸部、増速機、発電機で構成 風荷重を主軸用軸受の2個で支持 (分離ハウジング) 		<ul style="list-style-type: none"> 主軸部、増速機、発電機で構成 風荷重を主軸用と増速機キャリア用軸受の2個で支持 (分離ハウジング) 		<ul style="list-style-type: none"> 主軸用軸受で発電機回転子を支持 風荷重を主軸用軸受の2個で支持 (1体ハウジング) 増速機なし 	
	発電機タイプ	誘導発電機		誘導発電機		同期発電機	
	コスト	○		◎		△	
	信頼性	○		○		◎	
	効率	◎		◎		○	
主軸用軸受	配置	フロント 自由側	リア 固定側	フロント 固定側	リア 増速機キャリア用軸受で支持	フロント 固定側	リア 自由側
	構造図				増速機メーカーにより軸受タイプ異なる		
	主軸用軸受個数	2		1		2	
	組込み性	◎	◎	◎	—	△	△
	ラジアル荷重性能	◎	◎	◎	—	◎	◎
	アキシアル荷重性能	○	○	○	—	◎	不要
	振動性能	○	○	○	—	◎ (予圧の場合)	○
	内輪、外輪の許容傾き	◎	◎	◎	—	△	△
	軸方向移動性	△	不要	不要	—	不要	◎
	備考	<ul style="list-style-type: none"> 増速機の信頼性の問題あり 発電機用軸受の電食の問題あり 		<ul style="list-style-type: none"> 増速機の信頼性の問題あり 発電機用軸受の電食の問題あり 		<ul style="list-style-type: none"> 誘導発電機に対し、コスト高 増速機が無い場合、信頼性高い 	

◎：優，○：良，△：可，×：不可

* 当社推定

この解析モデルを検証した結果、回転トルク (Mx) を入力すると、通常の検討では発生しない図5に示すようなリアの軸箱の変形が確認された。これにより、軸受の回転体荷重分布は図6に示すような結果となり、回転トルクを负荷すると、軸箱の変形により、リア軸受の回転体荷重分布が大きく異なることが判明した。この荷重を考慮して、要求寿命 (20年, 175 000h) を十分満足するような軸受設計とした。

本 FEM 解析結果から分かるように、厳密に寿命を検討するには軸の変形のみではなく、軸箱とベースフレーム、および増速機まで考慮して検証することが重要である。

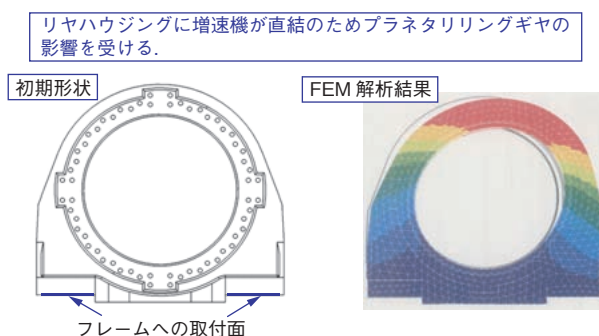


図5 リヤ軸箱変形図
FEM analysis results for Rear Housing

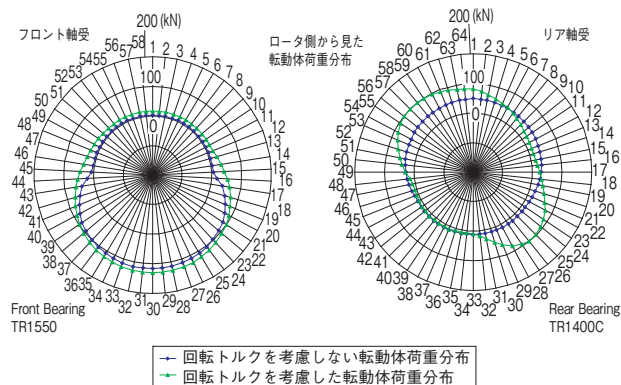


図6 転動体荷重分布
Bearing rolling element load distribution

4. 転動体荷重分布測定技術

FEM 解析結果と実荷重には差が発生する可能性があり、この合わせ込みを実施する必要がある。今回、本プロジェクトにおいて前述の FEM 解析を実施するとともに、実機モデルの縮尺サイズ（以下スケールサイズモデル）を用いた転動体荷重分布の測定と、客先実機ベンチ試験機による軸箱の変形量測定による合わせ込みを実施した。

4.1 2/5 スケールサイズモデル試験機

信頼性の高い転動体荷重の測定技術を確立するため、図7に示す 2/5 スケールサイズモデル試験機を導入した。転動体荷重に与える影響が大きい軸、軸箱と軸受は実機の比例縮尺で設計製作した。軸受に実機相当の荷重が負荷できるように、下記特長を備えている。

- (1) 実機のロータ中心に相当する位置に、XYZ 軸 3 方向の荷重 (Fx, Fy, Fz) を負荷可能
- (2) 図5に示すリア軸箱の変形を再現のため、リア軸箱に静ねじりを負荷可能

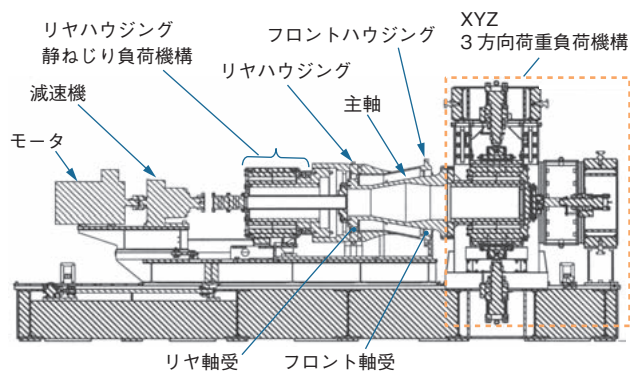


図7 スケールサイズモデル試験機
Scale size model test machine

4.2 転動体荷重測定手法

軸受の転動体荷重を測定する手法には、軸受の内輪または外輪に切欠き溝を加工し、その溝にひずみゲージを貼り付ける手法⁴⁾がある。今回は、本プロジェクトの軸受の転動体が中空形転動体であることに着目し、その中空転動体内面に発生するひずみを検出する手法を開発した⁵⁾。図8に開発した計測機構を示す。ひずみゲージは、転動体長さ方向の2箇所に貼り付けた。また、ひずみゲージ出力は、治具を介して転動体と一体化した超小型データロガー (Micromini datalogger) に記憶させ、計測終了後、軸受が静止した状態でデータを取り出し、解析することができる。

なお、校正は、スケールサイズモデルのリア軸受にこの計測システムを組み込み、縦型試験機で純アキシャル荷重のみを負荷することで転動体荷重とひずみの関係線図を事前に作成した。

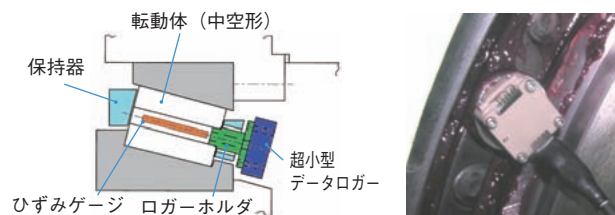


図8 転動体荷重計測システム
Measurement method of rolling element load

スケールサイズモデル試験機で転動体荷重を実測した結果と、FEM 解析により求めた転動体荷重を図9に示す。測定および計算時の荷重条件を表3に示す。図9の結果より、転動体荷重とその分布について、ともに実測値と計算値がよく合っていることがわかる。また、整合性を向上させる過程で、軸受、軸箱や軸だけでなくベースフレーム（軸箱の固定部品）までを、計算モデルに含めることが重要であることもわかった。

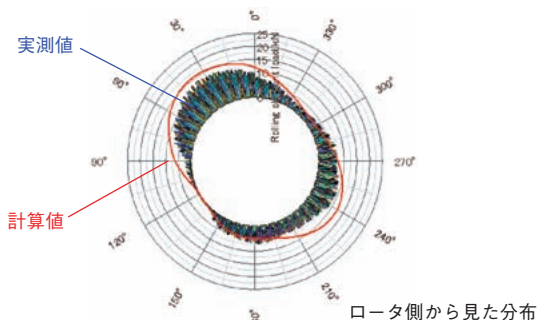
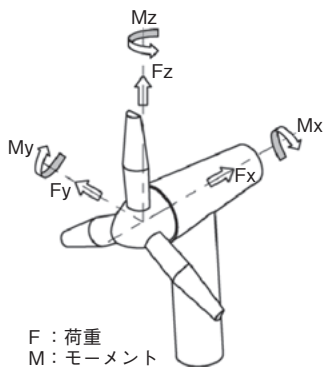


図9 転動体荷重の測定結果と計算結果の比較
Comparison of rolling element load measurement results and calculation results

表3 荷重条件
Load conditions

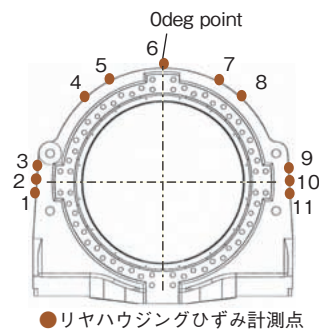


F_x	102kN
F_y	2kN
F_z	-126kN
M_x	228kN·m

F : 荷重
M : モーメント

さらに、実サイズ軸受との整合性を評価するため、客先実機ベンチ試験機を用いてリヤ軸箱外周面の最大主ひずみと変形量について、同様に実測とFEM 計算値の比較を実施した。最大主ひずみの測定のため、リヤ軸箱の外周面にロゼットゲージを11箇所貼り付けた。また、変形量は、リヤ軸箱外周面に沿ってレーザー変位計を9台設置し、ひずみと同時に測定した。測定結果を図10および図11に示す。客先実機ベンチ試験機での評価結果においても、実測値と計算値がよく合致していることが確認できた。

これらの結果から、当社のFEM 解析の計算結果は信頼性があり、軸受寿命の検証手段として十分に活用可能であることが確認できた。



● リヤハウジングひずみ計測点

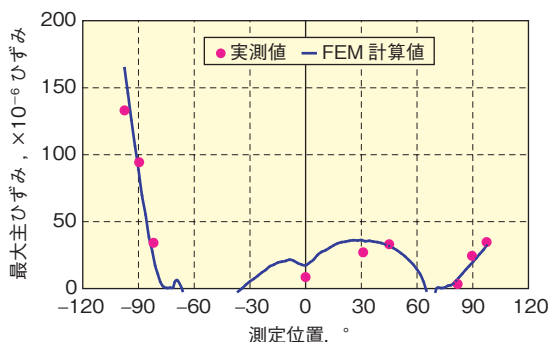
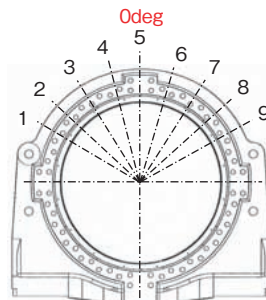


図10 軸箱の最大主ひずみ測定結果と計算結果の比較
Comparison of max. principle strain measurement results and calculation results



リヤハウジング変位計測点

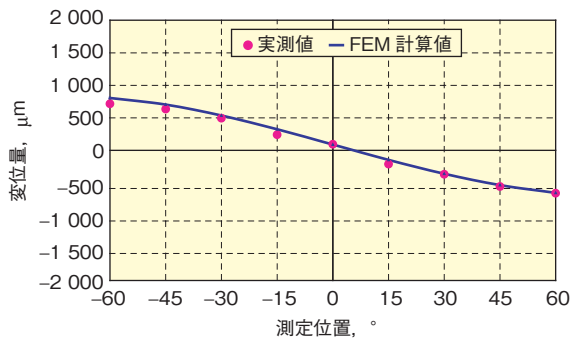


図11 軸箱の変形量測定結果と計算結果の比較
Comparison of deformation measurement results and calculation results

5. おわりに

再生可能エネルギーの中では、風力発電への期待は非常に大きいですが、風力発電が本格的に商用化されてから10年程度しか経過しておらず、信頼性は十分に検証できていない。当社では、本報で紹介した評価試験や新技術により、最適な軸受設計による風車の軽量化、評価設備による信頼性向上に取り組んできた。さらにはマルチメガワット風車の実機サイズの軸受を評価することが可能な評価設備を導入済みであり、これらを活用してお客様の開発期間の短縮を図り、今後の再生可能エネルギーの促進に貢献していきたい。

参考文献

- 1) BTM Consult A PART OF NAVIGANT: World Market Update 2013(2014)
- 2) 藤原英樹, 小林康裕: 風力発電装置ドライブトレイン用軸受の技術動向, 日本風力エネルギー学会誌, 第108号(2014)465.
- 3) 小林康裕: 風力発電装置における軸受の最新技術と市場動向, JTEKT ENGINEERING JOURNAL no. 1010(2012) 51.
- 4) 春海藤夫, 篠原正則: 連続鋳造機ロール二分割軸受の開発, Koyo Engineering Journal no. 133(1988)40.
- 5) 特許公開 2011 - 149538

筆者



保坂亮平*
R. HOSAKA



松田晋也**
S. MATSUDA

* 軸受事業本部 産業機器技術部

** 軸受事業本部 実験解析部