

# 風力発電装置における軸受の最新技術と市場動向

New Technology of Bearings for Wind Turbine Generators and Market Trends of Wind Turbine Industry

小林康裕 Y. KOBAYASHI

The Kyoto Protocol, adopted in 1997 globally, accelerated the introduction of power generation by renewable energy to prevent greenhouse gas emission from 2000. Furthermore, there have been growing concerns about both safety and reliability of nuclear power generation since the Great East Japan Earthquake caused a number of nuclear accidents in March 2011. Many countries around the world are consequently showing a great interest in renewable energy. Wind power, as the most practical renewable energy, has been spreading all over the world since 2000. Today, the cost reduction in wind power generation is the biggest key to boost the prevalence of the wind power generation. Rotor blades of wind turbine generators installed onshore are being upsized to be able to operate in weaker wind blowing areas, while higher power generating offshore turbines are being developed. As a result, rolling bearings installed into these turbines should be larger and more reliable.

**Key Words:** bearing, Kyoto Protocol, renewable energy, greenhouse gas, wind power generation, onshore, offshore

## 1. はじめに

全世界で再生可能エネルギーを利用した発電方式が注目されている。主要なエネルギーの1つである風力による発電方式は2000年以降、欧州を中心にその導入が加速している。近年では中国での導入が著しく、2009年度の新規導入量、および2011年までの累積導入量とも世界第1位となり、その導入量は飛躍的に増加している。図1に全世界の新規導入量の推移<sup>1)</sup>を示す。本報では風力発電装置（以下、風車）に使用される軸受の最新技術とその市場動向について紹介する。

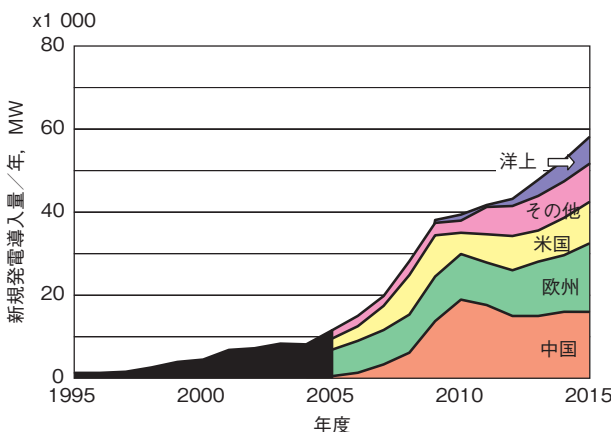


図1 全世界の新規導入量の推移

Global trends for introduction of wind turbine generators

## 2. 風車の構造

図2に風車の構造および各部品名称を示す<sup>2)</sup>。主軸、増速機および発電機はドライブトレインと呼ばれ、ナセル内に格納されている。風車はハブに連結されているブレードで風を受けて、主軸が回転し、増速機で発電可能な回転数まで増速される。発電機を回転することで、回転エネルギーを発電エネルギーに変換する。

現在の主要機種は1.5～2.3メガワット(MW)であり、約100倍に増速する増速機および誘導発電機で構成されている。その風車のブレード直径は80～100m、タワー高さは約100mである。

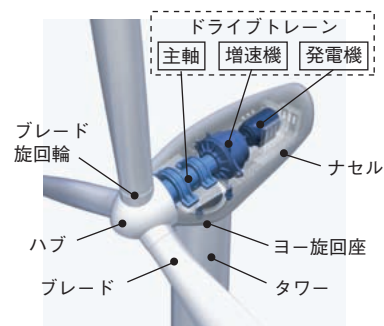


図2 風車の構造

Configuration of wind turbine generator

### 3. 風車の特徴

#### 3.1 風車クラス

風車は世界中で導入されており、風車のクラスは世界で統一されている。国際電気標準会議（IEC）発行の IEC61400-1ed.3<sup>3)</sup> では風速および乱流特性に応じ、風車クラスを9種類（IA, IB～IIIC）に分類している。

表1に風車クラスの分類<sup>3)</sup>を示す。

ここで、

$V_{ref}$  : 10分間平均基準風速

$V_{ave}$  : 年間平均風速

A : 高乱流特性カテゴリ

B : 中乱流特性カテゴリ

C : 低乱流特性カテゴリ

$I_{ref}$  : 風速が15m/sの時の乱流強度期待値

である。

表1 風車クラスの基礎パラメータ

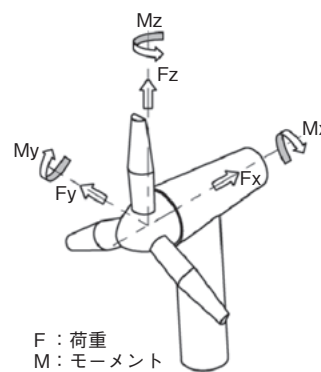
Basic parameters for wind turbine classes

風車クラス	I	II	III	S
$V_{ref}$ (m/s)	50	42.5	37.5	設計者が規定する 数値
$V_{ave}$ (m/s)	10	8.5	7.5	
$I_{ref}$	A	0.16		
	B	0.14		
	C	0.12		

一方台風や地震などが発生しやすい日本などの特殊な環境に設置される風車には、クラスSが新たに設定されている。日本での風車導入拡大のためにも日本独特の風況に適合した風車規格の制定が期待される。

#### 3.2 使用環境

風車は屋外に設置されるために、さまざまな自然環境下で稼動しなければならない。今後、寒冷地への適用が拡大するために、 $-40^{\circ}\text{C}$ で安定稼動が要求され、材料の低温せい性、潤滑性能を検討しなければならない。近年では、洋上への導入も加速し、従来の陸上での環境とはまったく異なっている。塩害による材料の腐食防止対策などが必要である。



F : 荷重  
M : モーメント

図3 荷重とモーメント方向

Schematic directions of loads and moments

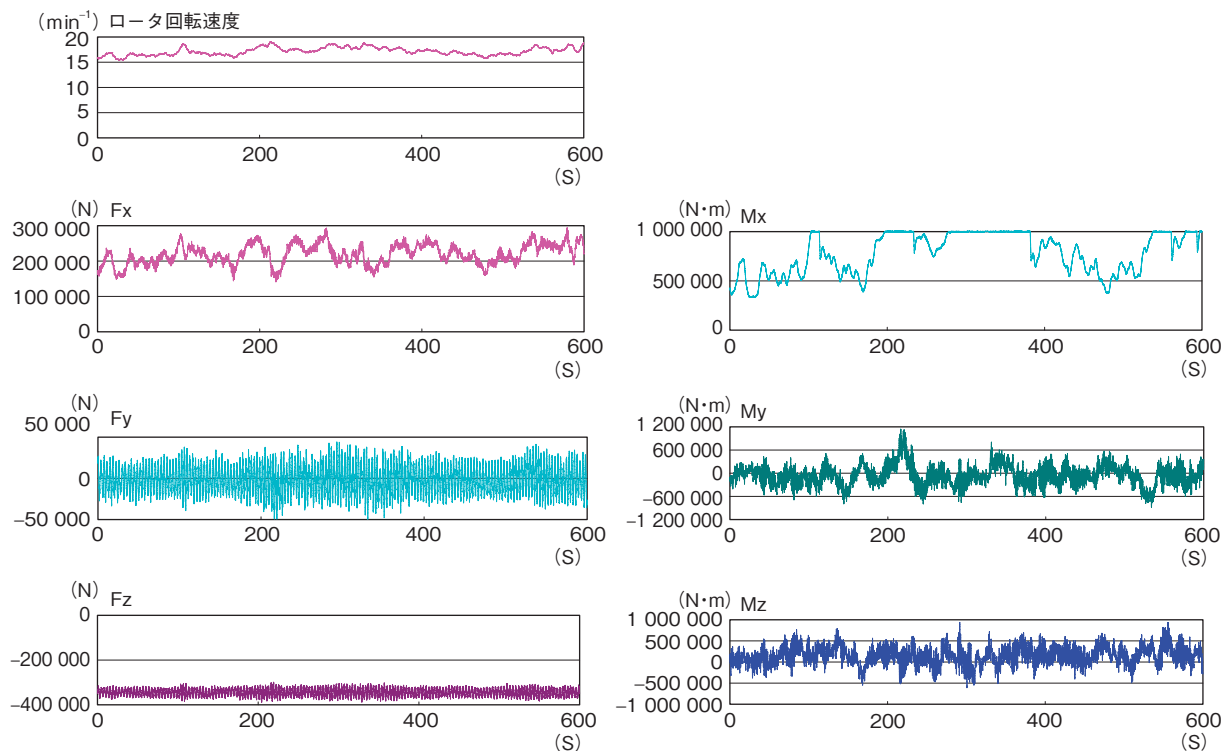


図4 600秒のロータ回転速度、荷重およびモーメント

One of distributions of main shaft rotational speed, loads and moments for 600 seconds

### 3.3 風車の使用条件

自然エネルギーを利用する風車では、ブレードに負荷される荷重は風況により短周期で変動し、軽荷重から重荷重まで幅広い範囲に及んでいる。また、停止時の微振動、アイドリング時の極低速回転 ( $0.1\text{min}^{-1}$  程度) も考慮する必要がある。ロータ中心に負荷される荷重とモーメント方向<sup>4)</sup>を図3に、それらの一例<sup>2)</sup>を図4に示す。風車は設置される地域により風況が異なるために、IEC61400-1ed.3に規定されているDLC (Design Load Case)<sup>3)</sup>と呼ばれる各運転条件の組合せとその頻度を用いて、風車の要求性能を検討する。

## 4. 風車のドライブトレインと主軸用軸受

### 4.1 2MW 級風車のドライブトレインと主軸用軸受

現在の主力商業機種である2MW 級風車ドライブトレインの構造と主軸用軸受の特徴を表2に示す。

2MW 級の風車では、増速機と4または6極誘導発電機より構成されているタイプ1および2が全体の80%以上(当社推定)となっている。しかし、増速機の故障や誘導発電機用の軸受の電食が頻繁に発生するために、ダイレクトドライブ方式と呼ばれる増速機を使用しない大型の多極同期発電機より構成されるタイプ3の風車も約20%導入されている。このタイプ3は発電機質量が増加するために、ナセルの質量が大幅に増加するとい

表2 2MW 級風車ドライブトレインの構造と主軸用軸受の特徴

Configuration of 2MW wind turbine drive trains and the characteristics of the main shaft bearings

風車	タイプ	1		2		3	
	概略構造図						
特徴		・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)	・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)	・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 (一体ハウジング) ・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 固定側	リヤ 自由側	フロント 固定側	リヤ 増速機キャリア用軸受で支持 増速機メーカーにより軸受タイプ異なる	フロント 固定側	リヤ 自由側
	構造図						
	主軸用軸受個数	2		1		2	
	組込性	◎	◎	◎	—	△	△
	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	・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		・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		・誘導発電機に対し、コスト高 ・増速機が無いため、信頼性高い	
*市場でのシェア (2008年)	37%		47%		16%		

◎: 優, ○: 良, △: 可, ×: 不可 \* 当社推定

う短所もある。

主軸用軸受は、ブレードに受けた風により発生した荷重が負荷されるだけでなく、回転トルクを増速機に伝達する重要な部位であり、さまざまなタイプが使用されている。2MW 級では調心性、耐荷重性に優れた自動調心ころ軸受が主に採用されている。また、タイプ3のダイレクトドライブ方式では、フロント軸受とリア軸受の芯ずれを制御しやすくするために、一体ハウジング構造を採用している。近年では、固定側にはアキシャル荷重性能に優れた複列円すいころ軸受、自由側には軸方向移動性に優れた円筒ころ軸受を採用する風車が増加している。

#### 4.2 2MW を超える大型風車のドライブトレインと主軸用軸受

2MW を超える大型風車も開発および商用化が進んでいる。表3に代表的な風車仕様を、表4に代表的なドライブトレインの構造と主軸用軸受の特徴<sup>2)</sup>を示す。

2MW を超える風車は2MW 級と同等の構造を採用しているものが多いが、表4に示すように急勾配（接触角45°）複列円すいころ軸受1個で主軸を支持し、小型化した構造も採用されている。この場合、主軸の質量を軽減できるが、軸受外径が2.5m程度となり、軸受および周辺部品の調達性が問題となる。大型品の調達が比較的容易な中国の風車メーカーが積極的に採用している。今後は、風車の信頼性向上および軽量化を加速するために、タイプ1～3の長所を組み合わせた低増速比の増速機と小型の同期発電機で構成されるハイブリッドタイプが主流となる。

#### 4.3 主軸用軸受への要求事項

軸受選定にあたっては国際的な審査および検査機関であるGL (Germanischer Lloyd) やDNV (Det Norske Veritas AS) の規格値<sup>4)</sup>が基準となっている。そこには軸受の静的安全率および寿命に関する規格値が記載されている。従来のL<sub>10</sub>寿命 (Basic rating life calculation: ISO281-2007<sup>5)</sup>)に加えて、新しい軸受寿命として以下の項目を考慮したL<sub>10m</sub>寿命 (Modified rating life calculation: ISO281-2007) およびL<sub>10mr</sub>寿命 (Modified reference rating life calculation: ISO/TS16281-2008<sup>6)</sup>)において20年 (175 000時間) の設計寿命が要求されている。

①運転時の潤滑油粘度と清浄度

②軸受内部諸元

③運転時の軸受内部すきま

④軸受、軸、軸箱の剛性

⑤転動体荷重分布

⑥ころと軌道の形状を考慮した軸方向の接触応力分布

また、上記の要求事項だけではなく、軸受として以下を満足する必要がある。

- ・周辺構造の剛性を考慮した小型で高剛性の軸受（ドライブトレインの軽量化）
- ・低コスト
- ・安定供給
- ・優れたメンテナンス性

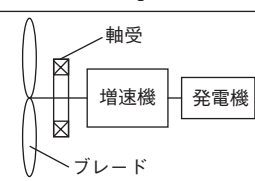
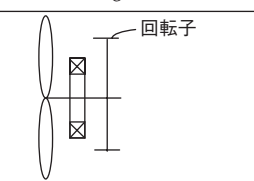


表3 2MW を超える風車仕様

Specifications for over 2MW wind turbine generators

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	100	増速機	誘導
2.75	103	増速機	誘導
3.0	101	ダイレクト	同期
	109	増速機	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
4.1	113	ダイレクト	同期
4.5	128	増速機	同期
5.0	116	増速機	同期
	126	増速機	誘導
6.0	126	増速機	誘導
	150	ダイレクト	同期
	154	ダイレクト	同期

表4 2MWを超える風車ドライブトレインの構造と主軸用軸受の特徴

Configuration of over 2MW wind turbine generator drive trains and the characteristics of the main shaft bearings

タイプ		4	5
風車	概略構造図		
	特徴	<ul style="list-style-type: none"> <li>主軸部, 増速機, 発電機で構成</li> <li>風荷重を主軸用軸受1個で支持(軸受の大型化)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>主軸用軸受で発電機回転子を支持</li> <li>風荷重を主軸用軸受1個で支持(軸受の大型化)</li> </ul>
	発電機タイプ	誘導発電機	同期発電機
	コスト	○	△
	信頼性	△	○
	効率	◎	○
主軸用軸受	構造図	急勾配複列円すいころ軸受 	急勾配複列円すいころ軸受 
	主軸用軸受個数	1	1
	組込性	△	△
	ラジアル荷重性能	◎	◎
	アキシャル荷重性能	◎	◎
	耐振動性能	◎ (予圧の場合)	◎ (予圧の場合)
	内輪, 外輪の許容傾き	△	△
	軸方向移動性	不要	不要
備考	<ul style="list-style-type: none"> <li>軸受の大径化により, 軸受および周辺部品の調達性が問題となる場合がある</li> <li>軸方向にコンパクト化が可能</li> <li>増速機の信頼性の問題あり</li> <li>発電機用軸受の電食の問題あり</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>軸受の大径化により, 軸受および周辺部品の調達性が問題となる場合がある</li> <li>軸方向にコンパクト化が可能</li> <li>誘導発電機に対し, コスト高</li> <li>増速機が無い場合, 信頼性が高い</li> </ul>	

◎:優, ○:良, △:可, ×:不可

#### 4.4 検討事例

従来, 風車は堅牢に設計されていたために, 軸受以外の軸や軸箱の剛性まで考慮する必要はなかった。しかし, 近年では風車の軽量化対策として中空軸や薄肉の軸箱を適用しているために, 軸および軸箱剛性を十分確保できなくなっている。そこで, 当社の軸系解析プログラムおよびFEM解析を用いて, 軸受の内部諸元, すきま, 軌道部のクラウニングに加えて, 軸, 軸箱の剛性などを考慮し, 最適な軸受仕様を検討している。その検討結果と

して得られた転動体荷重分布の一例を図5および図6に示す。軸箱が高剛性の場合には図5のような連続した転動体荷重分布が得られるが, 剛性が十分確保できないと図6のようないびつな転動体荷重分布になる。風車の軽量化は周辺部品の剛性不足を引き起こす場合があるので, 軸受設計には注意が必要である。

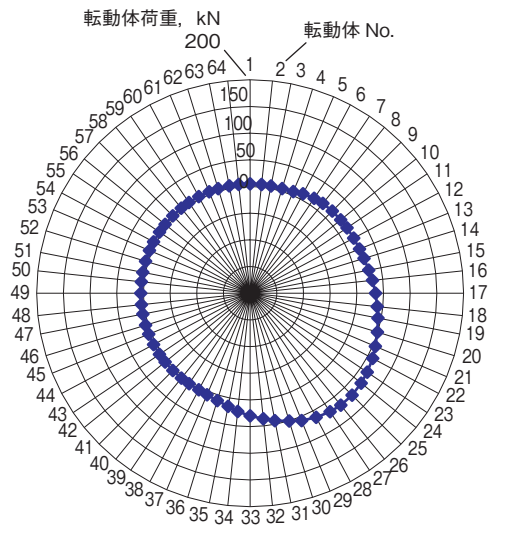


図5 軸箱が高剛性の場合の転動体荷重分布例  
Example of load distribution on roller in case of high-rigidity housing

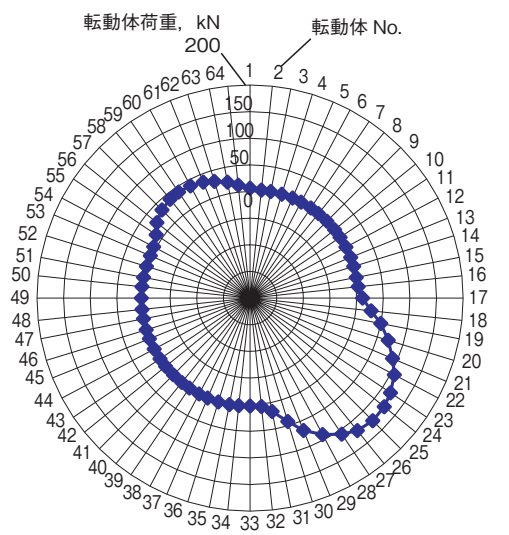


図6 軸箱が低剛性の場合の転動体荷重分布例  
Example of load distribution on roller in case of low-rigidity housing

### 5. 増速機用軸受

増速機はキャリア、遊星ギヤ、リングギヤ、低速軸(サンギヤ) および平行軸で構成されている。現在の商用機種の風車の増速機は1段遊星ギヤと2段平行軸で構成されているタイプが一般的である。図7に2MW増速機の構造の一例を示す。近年、増速機を小型にするために多段遊星ギヤのみ、または1段平行軸との組合せの増速機が増加している。

増速機用軸受は主軸から伝達された回転トルクを、ギヤのかみあいにより発電可能な回転速度まで増速する。発電機の形式、極数および周波数により異なるが、出力

側の回転速度は $1\,300 \sim 1\,600 \text{min}^{-1}$ が多い。遊星ギヤには高トルクが負荷されるため、その剛性を考慮した検討が必要である。遊星ギヤの剛性を向上するため、遊星ギヤと軸受外輪を一体化したインテグラルタイプの構造(図8)が増加している。一方、風車の増速機は刻々と変化する風況により回転速度、回転トルクも変化する。その結果、軸受到に負荷される荷重や回転速度も変化する。特に高速軸に使用される軸受は低荷重、高速回転となる頻度も高く、転動体と軌道輪のすべりによるスミアリングが発生する。この対策として、軸受内部諸元の最適化を行い、表面処理を実施している。主要な対策として、2MW級以上の増速機に使用されている円筒ころ軸受には特殊表面処理が適用されている。さらに風車の増速機はメインフレームに固定されておらず、トルクアームで回転方向のみ固定している機種が多い。その結果、一般的な使用方法とは異なり、振動に起因した故障が増加している。このように風車の増速機は特異な運転条件で使用されるために、軸受は技術検討だけではなく、実際に回転試験を実施し軸受性能を確認することが重要である。潤滑装置はギヤ部と共用のため、潤滑方法、潤滑剤の選定およびその清浄度管理も重要である。

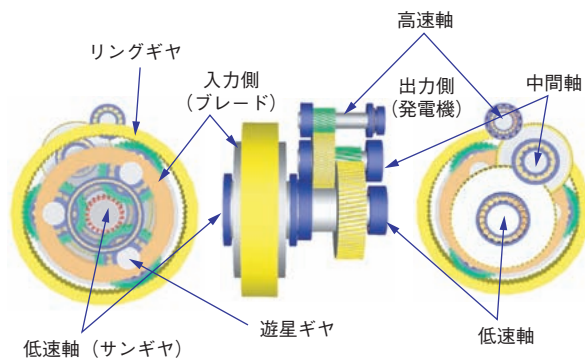


図7 2MWクラス増速機構造  
2MW class gearbox configuration

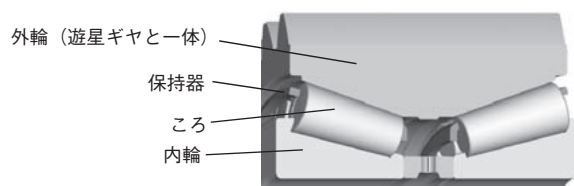


図8 遊星ギヤ用インテグラル軸受  
Integrated bearing for planet gear

軸受の選定は ISO81400-4 に規定されている。代表的な増速機の軸受レイアウトを図9に、使用される軸受を表5に示す<sup>7)</sup>。主軸用軸受と同様、軸受の内部諸元、軸、軸箱の剛性および潤滑を考慮した寿命検討が要求されている。さらに、使用部位に応じて、ころと軌道の最大接触応力および要求寿命<sup>7)</sup> (表6) が規定されている。

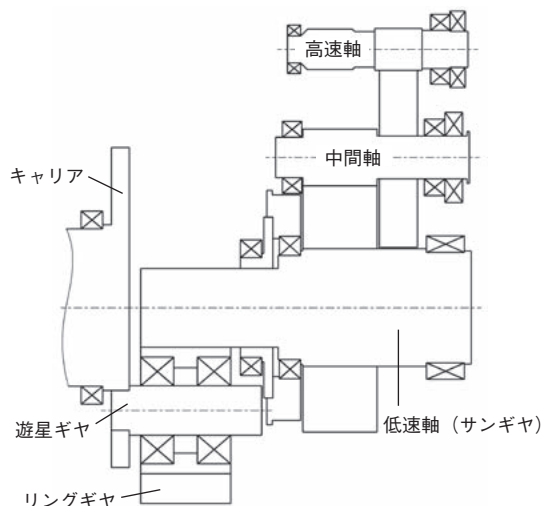


図9 増速機用軸受レイアウト  
Bearing layout for gearbox

表5 増速機に使用される軸受タイプ  
Bearing types used in gearbox

使用部位	軸受形式			
	高速軸	CRB	TRB	SRB
	TRB + CRB		CRB + 4 point BB	
中間軸	CRB		SRB	
	TRB × 2		CRB + 4 point BB	
低速軸 (サンギヤ)	CRB	SRB	TRB × 2	
	2 row TRB			
遊星ギヤ	CRB × 2	SRB × 2	TRB × 2	
キャリア	CRB	TRB	SRB	BB

CRB：円筒ころ軸受      TRB：単列円すいころ軸受  
SRB：自動調心ころ軸受      BB：単列深溝玉軸受  
4 point BB：4点接触玉軸受      2 row TRB：複列円すいころ軸受

表6 最大接触応力値および要求寿命

Maximum contact stress and required min. calculated life

使用部位	L <sub>10</sub> (時間)	L <sub>10mr</sub> (時間)	静的安全率		最大接触応力 (MPa)
			最大運転荷重	静的最大	
高速軸	30 000	風車 メーカー 設定	3.0	2.0	1 300
高速中間軸	40 000				1 650
低速中間軸	80 000				1 650
遊星ギヤ	100 000				1 650
低速軸	100 000				1 450

## 6. 誘導発電機用軸受

近年の商用機種では、低風速時から効率的に回転エネルギーを電気エネルギーに変換するために、パワーエレクトロニクスを介した二重給電誘導発電機が広く用いられている。その簡易構造を図10に示す。このような誘導発電機に使用される軸受では、回転中の軸受の内部に電流が通過した場合、転がり接触部の非常に薄い油膜を通してスパークが発生し、表面が局部的に溶融する、いわゆる電食(図11)による損傷が発生しており、故障の原因の一つになっている。

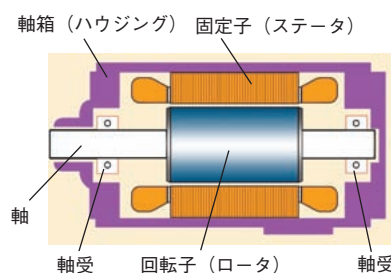


図10 誘導発電機の構造  
Configuration of inductive generator

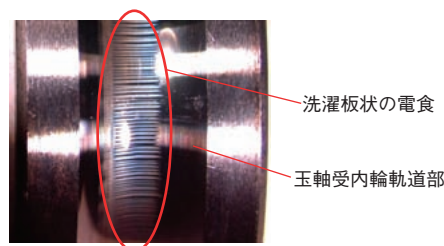


図11 玉軸受内輪軌道の電食例  
Example of electric pitting on inner ring raceway of ball bearing

電食を防止するには軸受に絶縁機能を付与する必要がある。その対策の一つとして、転動体として絶縁性能に優れたセラミックス(窒化けい素)を使用した絶縁セラミック軸受<sup>9)</sup>が採用されている。2MW級の発電機の軸受では直径約50mmの大径セラミック球が転動体に使用されている。図12に絶縁セラミック軸受の3Dモデルを示す。本軸受は外輪外径部への絶縁皮膜(セラミック溶射コーティング、樹脂コーティング)および軸箱での絶縁に比べると、以下の特長がある。

- ・長期間安定した絶縁性の維持
- ・軸受組込み時の取り扱いやすさ
- ・低昇温による潤滑剤(グリース)の寿命向上

表7にセラミックスと軸受鋼の特性比較<sup>9)</sup>および図13に絶縁セラミック軸受の昇温特性<sup>9)</sup>を示す。

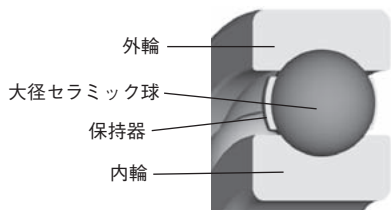


図12 絶縁セラミック軸受の3Dモデル  
3D model of insulated hybrid ceramic bearing

表7 セラミックスと軸受鋼の特性比較

Comparison of characteristics between ceramics and bearing steel

項目	セラミックス (Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> )	軸受鋼 (SUJ2)	セラミックスの特長
耐熱性 (°C)	800	180	高温下で高負荷能力維持
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	3.2	7.8	昇温抑制
線膨張係数 (1/°C)	3.2 × 10 <sup>-6</sup>	12.5 × 10 <sup>-6</sup>	寸法変化小
ピッカース硬さ (HV)	1 500	750	高剛性
縦弾性係数 (GPa)	320	208	
ポアソン比	0.29	0.3	
導電性	絶縁体	導電体	耐電食性
素材の結合状態	共有結合	金属結合	耐焼付性

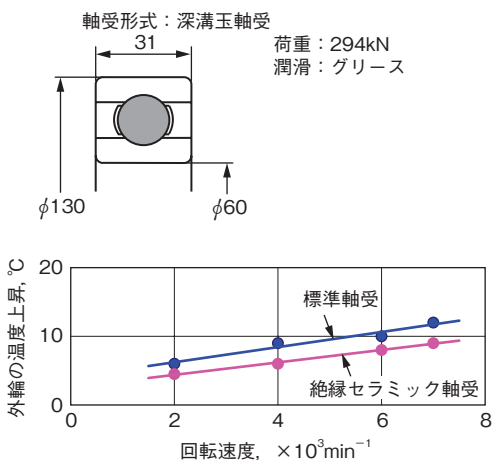


図13 絶縁セラミック軸受の昇温特性  
Temperature-rise characteristic of insulated hybrid ceramic bearing

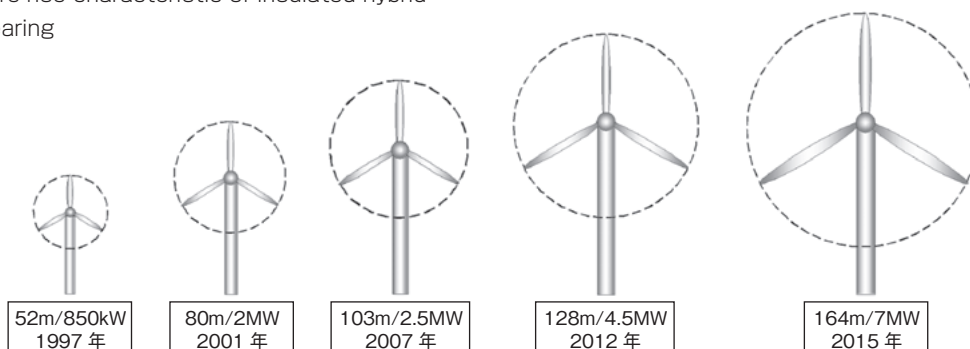


図14 風車サイズの変遷  
Change in wind turbine generator size

従来の軸受では頻繁に電食が発生し早期に軸受を交換していたが、軸受を交換する場合、交換作業に加えナセルにアクセスする時間も必要であり、長期間の停止による発電機会の損失が大きい。絶縁セラミック軸受を採用することにより、故障による発電停止時間を低減するだけでなく、グリース寿命延長によるメンテナンス期間延長も期待できるため、メンテナンスコストの大幅削減および稼働効率向上に大きく貢献する。

## 7. 風力発電の市場動向

風力を利用した発電方式は、2000年以降欧州を中心に加速的に導入され、発電効率向上のため、より一層の発電量を得るために大型化（高発電容量化）してきている。風車サイズの変遷を図14に、風車1基当たりの平均発電量の推移を図15に示す。さらに2007年以降、風力発電装置の導入量は中国をはじめ世界各国で拡大し、急激に増加している。近年では電力消費量に対し、再生可能エネルギーによる発電比率を高めることが世界各国の国策として取り上げられている。欧州では2020年までに電力消費量の20%を風力発電とする目標が設定された。米国でも2030年には電力消費量の20%を風力発電でまかなう技術的可能性について検討が行われている<sup>10)</sup>。日本では風力による発電量は世界各国と比べるとまだまだ低いが、2012年7月からFIT（Feed in Tariff：固定価格買取制度）が採用されたので、今後の成長が注目される。このように固定買取制度が適用されると、風力発電事業の採算性が重要になり、風車設置費用および発電費用を抑制するための高発電効率が注目されている。今後、風車は陸上に加え、洋上にも設置されるので、風車に要求される性能は異なってくる。



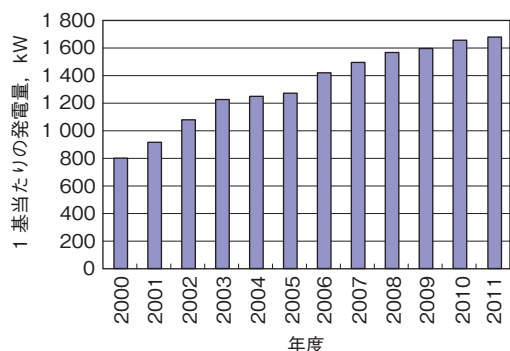


図15 風車1基当たりの平均発電量の推移

Change in average power generation per wind turbine generator

## 7.1 陸上風車

現在、風車のほとんどは陸上に設置されている。2000年以降、風力発電市場の拡大に伴い、風車は大型化（高発電容量化）し、設置台数を抑制している。そのために、設置費用と搬送費用が大幅に増加し、軽量かつ小型化が要求されている。さらに、近年では好風況地域はすでに占有され、風況が安定していない低風速地域への設置を拡大する必要がある。その結果、低風速から発電するために風車のブレードを大型化し、発電時間を延伸すること、さらに風車の信頼性を向上し、保全、故障および修理に要する停止時間を抑制することで高発電効率への期待が高まっている。

## 7.2 洋上風車

近年、欧州では遠浅の洋上へ大規模なウィンドファームが設置され、運用が開始されている。洋上は平坦であり乱流の発生が少ない。また風況が安定しているために発電可能時間が長い。さらに設置場所へは船舶でアクセスが可能であることから、大型風車の輸送も容易である。このために、高発電容量風車で長時間発電することにより発電効率が大幅に向上する。しかし、風車の大型化には限界があるため、新材料および新ドライブトレインの構造（油圧伝達によるマルチ発電機など）による風車の軽量化が必要である。

## 8. おわりに

原子力発電の安全性および信頼性が疑問視されている現在、風力を利用した発電の拡大は間違いない。風力発電への期待は大きいですが、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、信頼性は十分とはいえない。さらに世界規模で風車メーカーが統廃合されており、いまだ確立した産業とはいえない。しかし、固定価格買取制度が世界中に浸透していくことで採算性が改善され、高効率に向けた取組みが加速すると考えられる。当社では、新技術の導入により、風車の軽量・小型化、高信頼性が期待でき、これらに用いられる最適軸受を開発・提供していくことで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 2011(2012).
- 2) 安達丈博: トライボロジスト, 第56巻 第6号(2011).
- 3) IEC61400-1 Edition 3.0 2005-08: Wind turbines- Part 1 (Design requirements)(2005).
- 4) Germanischer Lloyd : Guideline for the Certification of Wind Turbines Edition.
- 5) ISO: ISO281 Second edition (Rolling bearings- Dynamic load rating and rating life)(2007).
- 6) ISO: ISO/TS16281 (Rolling bearings- Methods for calculating the modified reference rating life for universally loaded bearings)(2008).
- 7) ISO: ISO81400-4 (Wind turbines Part 4: Design and specification of gearboxes)(2005).
- 8) 桜井清隆, 小田徹也: 鉄道車両トラクションモータ用絶縁軸受, Koyo Engineering Journal, no. 146, (1994) 23.
- 9) ジェイテクト: 特殊環境用軸受シリーズ, セラミック軸受・EXSEV軸受, CAT. no. B2004.
- 10) NEDO 再生可能エネルギー技術白書: 3 風力発電の技術の現状とロードマップ(2010).

## 筆者



小林康裕\*

Y. KOBAYASHI

\* 産機・軸受事業本部 産業機器技術部