

風力発電装置用転がり軸受

Rolling Bearings for Wind Turbine Generator

蔵下義一 Y. KURASHITA

Interest in natural energy, which emits no global-warming-causing carbon dioxide, has been increasing since the Kyoto Protocol came into effect. The use of wind turbine generators is growing rapidly, particularly in Europe, and the power generation capacity of such generators has been increasing year by year. Recently the development of large-sized wind turbine generators having a power capacity of 3 MW or more and a blade diameter of 100 meters or more is advancing, requiring the use of larger rolling bearings.

Key Words: wind power, gearbox, generator, spherical roller bearing, non-conductivity, ceramic

1. はじめに

近年、地球温暖化の原因となる二酸化炭素を排出しない自然エネルギーの利用に関心が高まってきている。中でも風力発電装置（以下風車と記す）は欧州を中心に飛躍的に拡大しており、その発電導入量は年々増加している。図1に全世界の風力発電導入量の推移¹⁾を示す。本報では要求寿命20年以上の高い信頼性が要求される風車用転がり軸受の特徴と選定基準について紹介する。

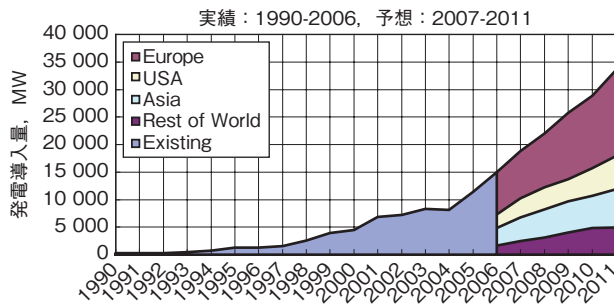


図1 全世界の風力発電導入量の推移

Transition of power generation capacity in the world

2. 風車の構造および種類

一般的に風車は、ブレード（羽根）で風を受けてロータを介して主軸が回転し、その回転を増速機にて発電可能な回転速度まで増速させたのち、発電機で発電する構造を採用している（誘導発電機タイプ）。図2に風車の構造を示す。

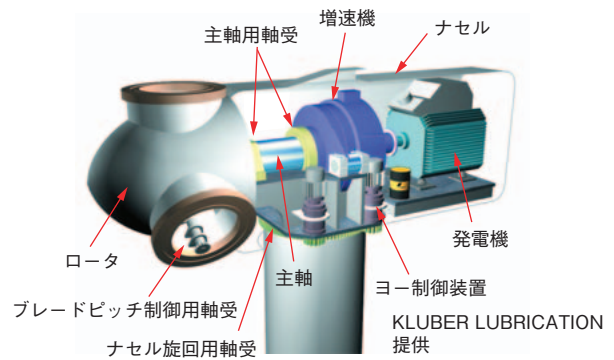


図2 風車の構造²⁾

Structure of wind turbine

現在の風車の主流は1.0～2.0MWの誘導発電機タイプ（増速機付き）であるが、一部、同期発電機タイプ（増速機がないダイレクト発電方式）の風車もある。また、風車はより高い発電量を得るために大型化されてきており、2006年における1台当たりの平均発電量は1995年の3.3倍になっている。図3に全世界の風車1台当たりの平均発電量を示す。また、最近では表1の様な大型機種が開発が進められている。風車には多くの軸受が使用されているが、ここでは主軸・増速機・発電機用の軸受について紹介する。

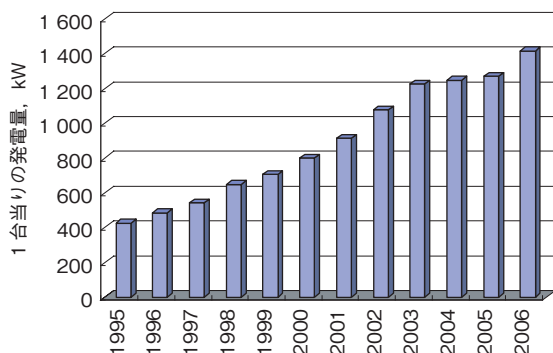


図3 全世界の風車1台当りの平均発電量

Average amount of power generation per wind turbine in the world

表1 各社開発中の大型機種

Large-sized models under development at each manufacturer

発電容量	ブレード径	伝達系	発電機
2.4MW	92m	増速歯車	誘導
2.5MW	90m	増速歯車	誘導
3MW	90m	増速歯車 + ダイレクト	同期
	90m	増速歯車	誘導
	94m	増速歯車	誘導
3.6MW	107m	増速歯車	誘導
	111m	増速歯車	誘導
4.2MW	110m	増速歯車	誘導
4.5MW	114m	ダイレクト	同期
	120m	増速歯車	誘導
5MW	116m	増速歯車 + ダイレクト	同期
	126m	増速歯車	誘導

3. 主軸用軸受

主軸用軸受は、ロータを介して風力による荷重が負荷され、回転トルクを増速機に伝達する重要な部位に使用されており、種々のタイプがある。主軸用軸受として主に採用されているのは調心性、耐荷重性に優れている自動調心ころ軸受である。図4に主軸用軸受（自動調心ころ軸受）の3Dモデルを示し、表2に主軸用軸受の使用事例を示す。

3.1 使用条件

風車の主軸に負荷される荷重は秒単位で変動し、軽荷重から重荷重までの幅広い範囲におよんでいる。また、停止時の荷重も考慮する必要がある。図5にロータ中心に負荷される荷重とモーメント方向図、図6に軸受選定時の使用条件の一例を示す。

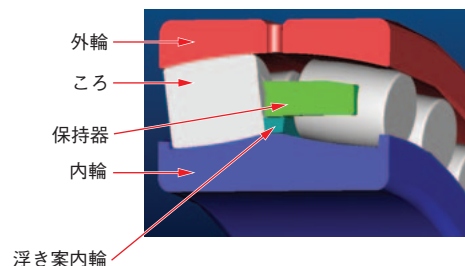


図4 主軸用軸受（自動調心ころ軸受）
Main shaft bearing (spherical roller bearing)

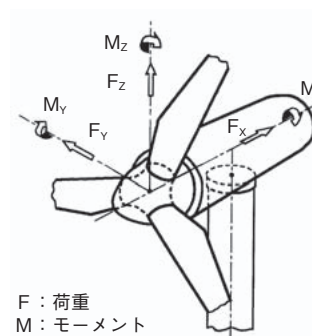


図5 荷重とモーメント方向図
Directional diagram of load and moment

3.2 軸受選定

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ドイツ船級協会³⁾ (Germanischer Lloyd : 以下GLと記す) の規格値が基準となっている。

3.2.1 静的強度

$$f_0 = C_0/P_0$$

判定基準 : $f_0 \geq 2.0$

ここで f_0 : 静的安全率, C_0 : 基本静定格荷重 (kN), P_0 : 最大静等価荷重 (kN)

3.2.2 動的強度と寿命検討

提示された変動荷重から等価荷重を算出し ISO 寿命式を基に計算する。

このとき GL の要求である軸受内部諸元、軸および軸箱の剛性などを考慮した補正係数を JTEKT 軸系解析プログラムにて導き出し、以下寿命式にて算出する。

$$L_h = a_x \cdot a_y \cdot \frac{10^6}{60 \cdot n} \cdot \left[\frac{C}{P} \right]^p \text{ (h)}$$

ここで

a_x : 補正係数 (下記①~⑤)

a_y : 潤滑係数 (下記⑥)

n : 平均回転速度 (min^{-1})

表2 主軸用軸受の使用事例
Application examples of main shaft bearing

タイプ	構造図	ブレード側軸受	発電機側軸受	特徴
1		SRB SRB CRB	SRB CRB 2-row TRB	誘導発電機タイプ 主軸を2個の軸受で支持 一般的な構造
2		SRB	-	誘導発電機タイプ リア側荷重は増速機内の 軸受で支持
3		2-row TRB	-	誘導発電機タイプ ブレード側軸受のみで支持
4		2-row TRB	-	誘導発電機タイプ 主軸用軸受と増速機を ユニット化
5		SRB TRB 2-row TRB CRB	CRB TRB CRB 2-row TRB	同期発電機タイプ (増速機のないタイプ)

SRB：自動調心ころ軸受 CRB：円筒ころ軸受 2-row TRB：複列円すいころ軸受
TRB：単列円すいころ軸受

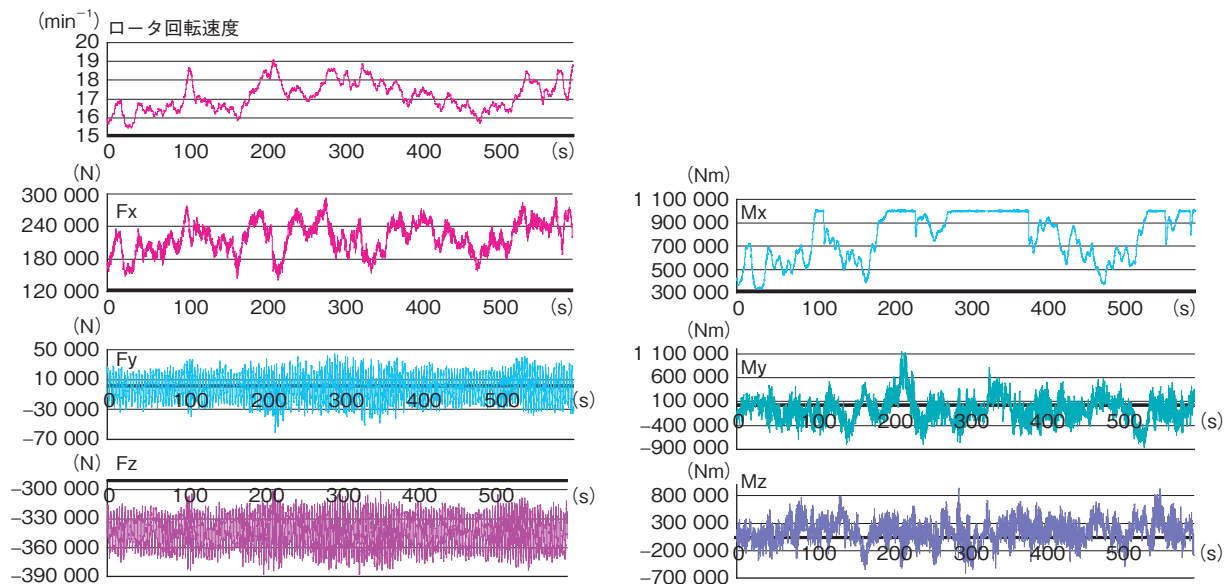


図6 軸受選定時の使用条件例：600秒（ロータ回転速度、荷重、モーメント）

Example of application conditions when selecting bearings: 600sec. (rotor speed, load and moment)

- C : 基本動定格荷重 (kN)
- P : 平均動等価荷重 (kN)
- p : 玉軸受の場合…… $p = 3$
ころ軸受の場合…… $p = 10/3$
- 補正係数として考慮必要な項目 (GL 要求)
 - ①軸受内部諸元
 - ②運転時軸受内部すきま
 - ③軸受, 軸, 軸箱の剛性
 - ④転動体荷重分布
 - ⑤ころと軌道の形状を考慮した軸方向の面圧分布潤滑係数 (GL 要求)
 - ⑥運転時の潤滑油粘度と清浄度
- 判定基準 : 20 年以上 (175 000h)

3.2.3 検討事例

JTEKT 軸系解析プログラム⁴⁾ および FEM 解析により上記の静的・動的強度が最大となるように軸受内部諸元, すきまおよび転動体のクラウニングなどの仕様を決定している。検討事例として図7に FEM 解析結果 (軸箱の剛性) を示す。

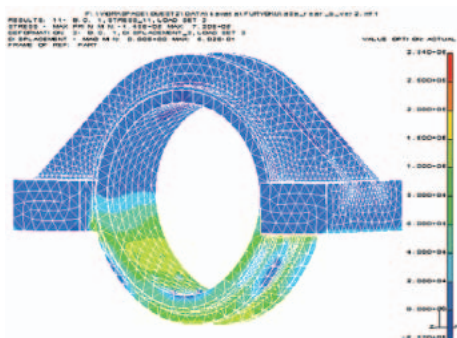


図7 FEM 解析結果 (軸箱の剛性)
FEM analysis result (housing stiffness)

4. 増速機用軸受

増速機はキャリア, 遊星ギヤ, 低速軸 (サンギヤ), 中間軸, 高速軸で構成されている。図8に一般的な構造 (遊星1段+平行2段), 表3に使用軸受タイプを示す。最近では軽量化の観点から遊星ギヤ二段タイプや増速機と同期発電機を組み合わせたタイプ (マルチブリッド) も採用されている。

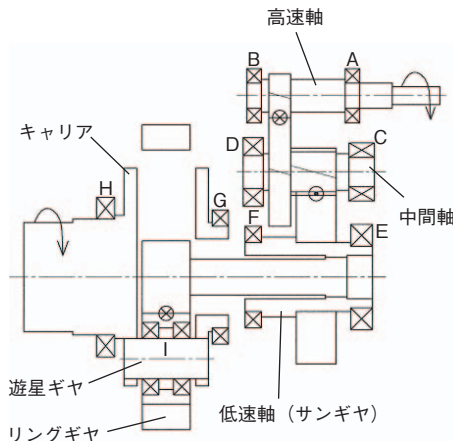


図8 増速機の構造
Structure of gearbox

表3 使用軸受タイプ
Bearing types

	使用部位	軸受形式
A	高速軸	CRB, TRB, SRB, TRBX2
B		TRB + CRB, CRB + BB*
C	中間軸	CRB, SRB
D		TRBX2, CRB + BB*
E	低速軸	CRB, SRB, TRBX2
F	(サンギヤ)	2-row TRB
I	遊星ギヤ	CRBX2, SRBX2, TRBX2
G	キャリア	CRB, SRB, TRB, BB
H		

- 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
- BB* : 4点接触玉軸受
- 2-row TRB : 複列円すいころ軸受

4.1 使用条件

主軸と同様に秒単位で変動する回転トルク (Mx) (図6) をもとに軸受を選定する必要がある。

4.2 軸受選定

軸受の選定にあたっては, 米国歯車製造者協会 (American Gear Manufacturers Association : 以下 AGMA⁵⁾ と記す) がその選定基準を示している。主軸の場合と同様, 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。また AGMA では使用部位ごとに, ころと軌道の最大接触面圧値および要求寿命 (表4) を設定している。

表4 最大接触面圧値および要求寿命
Maximum contact pressure and required life

使用部位	最大接触面圧, MPa	要求寿命, h
高速軸	1 300	30 000
中間軸	1 650	40 000
低速軸 (サンギヤ)	1 650	80 000
遊星ギヤ	1 450	100 000
キャリア	指定なし	100 000

4.3 検討事例

増速機解析プログラムを用い、主軸と同様の検討を行い最適な軸受諸元を決定する。その解析モデル例を図9に示す。

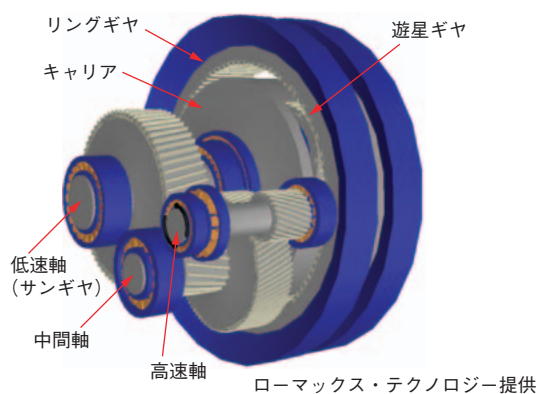


図9 増速機3D解析モデル例⁶⁾
Example of 3-D analysis model of speed-up gear

4.4 増速機用軸受選定上の注意点

4.4.1 遊星ギヤの剛性

遊星ギヤ(図10)は剛性を考慮した設計が必要である。剛性が低い場合は図11のような変形が生じ、内部に組み込まれている軸受が短寿命となる可能性がある。

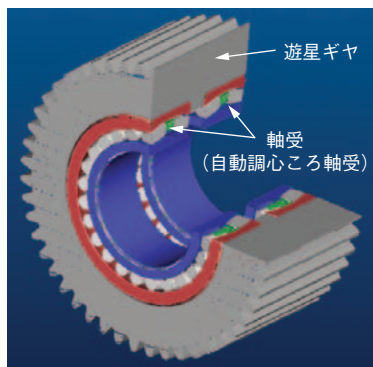


図10 遊星ギヤ3Dモデル
3-D model of planetary gear

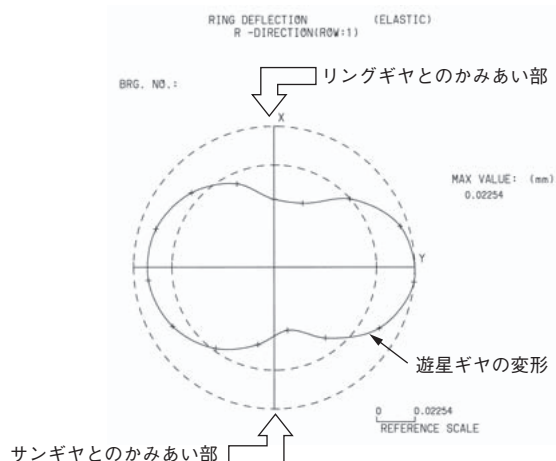


図11 遊星ギヤ剛性検討結果
Results of planetary gear stiffness study

4.4.2 異物油中での使用

増速機用軸受は、ギヤ部の潤滑油をそのまま循環使用しているため、潤滑油へのギヤ部の摩耗粉の混入により短寿命となる可能性がある。このような場合にはJTEKT 開発の耐圧痕性能を高めたKE 軸受^{7), 8)}を推奨している。これは高硬化化、残留オーステナイト量の最適化により汚れ油中の性能を飛躍的に高めたものである。KE 軸受の寿命について試験条件およびその結果を表5、図12にそれぞれ示し、耐圧痕性を図13に示す。但し、AGMA でも潤滑油の清浄度を規定しているため、油の管理をすることが最も重要である。

表5 試験条件
Test conditions

試験軸受主寸法, mm	φ30 × φ72 × 20.75	
ラジアル荷重, kN	20.6	
アキシアル荷重, kN	13.7	
回転速度, min ⁻¹	2 000	
潤滑条件	汚れ油* ¹	清浄油

* 1 汚れ油中異物量

硬さ, Hv	830	700
平均粒径, μm	27	125
量, g/L	0.55	0.55

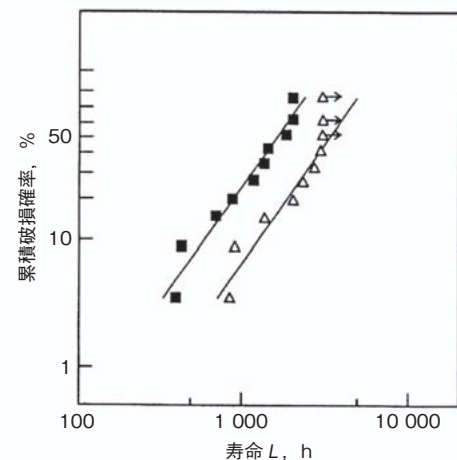
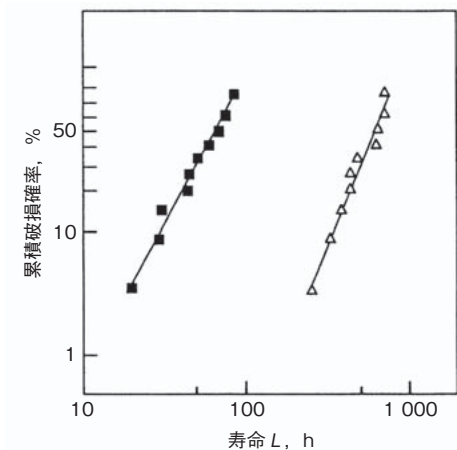


図12 KE軸受の寿命特性

Life characteristics of KE bearing

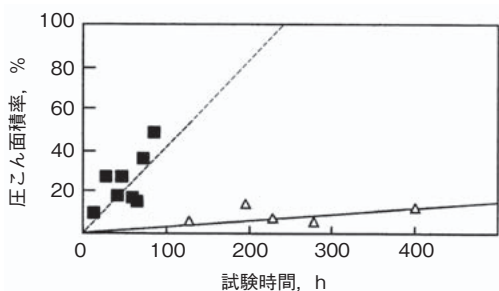


図13 KE軸受の耐圧痕性

(図12の汚れ油中試験後の試料比較)

Indentation resistance of KE bearing
(Comparison results of specimens tested in contaminated oil shown in Fig. 12)

5. 発電機用軸受

発電機に使用される軸受では、電食（回転中の軸受の内部に電流が通過した場合に、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、表面が局部的に溶解する現象）による損傷が発生しやすく故障の原因の一つになっている。そのために絶縁性能に優れたセラミックを転動体に使用した絶縁セラミック軸受⁹⁾（図14）が採用されている。また、上記の特長以外にその優れた低昇温特性（図15）によりグリース寿命延長によるメンテナンス工数削減効果も期待できる。



図14 絶縁セラミック軸受

Insulated hybrid ceramic bearings

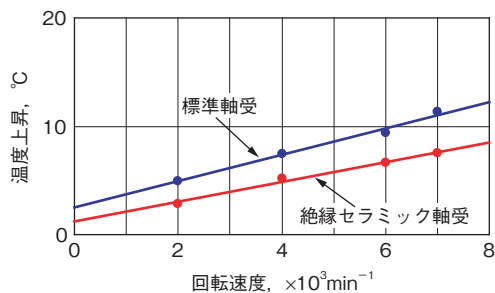


図15 絶縁セラミック軸受の昇温特性

Characteristics of temperature rise in insulated hybrid ceramic bearing

6. おわりに

今後ますます大型化が進む中で、軽量・コンパクト化の要求に対し、信頼性が高く、機能に最適な軸受の設計が重要となってくる。ジェイテクトとしては、これらに対応する商品を開発提供することで地球環境保全に貢献していきたい。

参考文献

- 1) BTM Consult ApS: International Wind Energy Development, World Market Update(2006).
- 2) 蔵下義一：月刊トライボロジー, no. 224(2006)28.
- 3) Germanischer Lloyd: Guideline for the Certification of Wind Turbines Edition(2003).
- 4) 大嶋昭男：Koyo Engineering Journal, no. 143(1993) 5.
- 5) ANSI/AGMA/AWEA 6006-A03: Standard for Design and Specification of Gearboxes for Wind Turbines.
- 6) 蔵下義一：月刊トライボロジー, no. 224(2006)30.
- 7) 戸田一寿, 三上 剛：Koyo Engineering Journal, no. 143(1993)15.
- 8) 戸田一寿, 柴田正道：Koyo Engineering Journal, no. 145(1994)138.
- 9) 桜井清隆, 小田徹也：Koyo Engineering Journal, no. 146(1994)23.

筆者



蔵下義一*

Y. KURASHITA

* 軸受・駆動事業本部 産業機器技術部