

産機用軸受のカーボンニュートラルへの取り組み

Industrial Bearing Activities for Building a Carbon Neutral Society

綿本 裕 Y. WATAMOTO 岡田一真 K. OKADA

Developing renewable energy and green energy technologies, can make a significant contribution to achieving carbon neutrality by 2050. This report introduces black oxide surface treatment technology for bearings, grease sensing technology for wind turbine generators, and magnetic bearings for infrastructure equipment.

Key Words: wind turbine bearing, magnetic bearing, carbon neutrality, renewable energy

1. はじめに

世界各地で異常気象が発生しており、温室効果ガス排出量の増加がその主な要因と考えられている。そのため各国では、温室効果ガスの排出量を低減する脱炭素への取り組みが重要視されている。

この流れを受けて、日本政府は2050年までにカーボンニュートラルの実現に向けて温室効果ガスの排出を実質的にゼロにする脱炭素社会を目指すと宣言しており、当社ではグループ全体で2035年のカーボンニュートラル達成の目標を掲げている。

カーボンニュートラルの実現には、太陽光や風力、地熱などを使った温室効果ガスを排出しない再生可能エネルギーとグリーンエネルギーとして認知されている水素などの活用が重要となってくる。

本報では、当社の産業機械用軸受分野でのカーボンニュートラルの取り組み内容について紹介する。具体的には、風力発電主軸用軸受への取り組みと磁気軸受のCO₂排出量や水素インフラ設備への適用について述べる。

2. 風力発電主軸用軸受への取り組み

2.1 風力発電の現状と動向

政令では、再生可能エネルギーの定義として、太陽光・風力・水力・地熱・太陽熱・大気中の熱その他の自然界に存在する熱・バイオマスが定められている。当社はこの中で風力発電による再生可能エネルギー活用に取り組んでいる。

図1に新規風力発電機導入量の推移を示す。2020年

には、全世界で過去最大の95GWの風力発電機が新規導入されている。近年では、年間50GW以上の風力発電機が導入されており、累計導入量は906GWに到達している。図2に示すように、今後、風力発電は陸上から洋上へと拡大され、高発電容量風力発電機の導入とあわせ、飛躍的に発電量が伸びると予測されている。

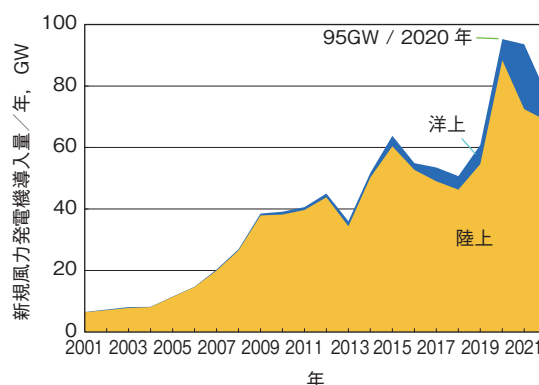


図1 風力発電機の新規導入量¹⁾
New installations of wind turbines

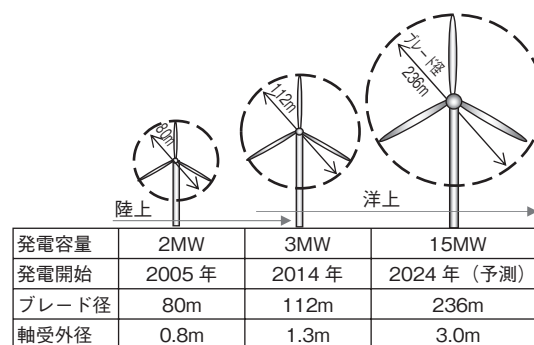


図2 風力発電機の推移
Wind turbine transition

また、国内でも 2020 年 12 月、日本政府は 2050 年のカーボンニュートラルの実現に向けて、洋上風力発電を「再生可能エネルギーの主力電源化に向けた切り札」と位置づけている。そして、2030 年までに 10GW、2040 年までに 30 ~ 45GW まで拡大する目標を掲げている。

一方、風力発電に関して、まだ技術課題が多く、風力発電機の早期損傷発生で保守点検費用が膨らみ、発電コストの増加要因となっている。

2.2 主軸用軸受の課題²⁾

風力発電機の構造を図 3 に示す。ナセルと呼ばれる部分に主軸、増速機および発電機が搭載されている。

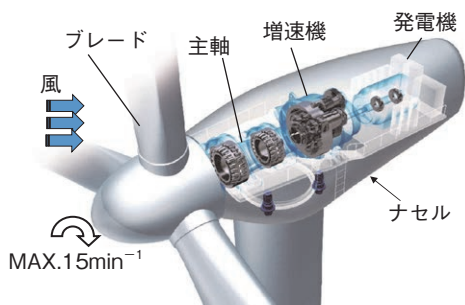


図 3 風力発電機の構造
Wind turbine configuration

風力発電機の主軸用軸受には、図 4 に示す調心性に優れ、定格荷重が大きい自動調心ころ軸受が主に採用されている。一方で、構造上、転がりすべりが発生するという不利な点がある。このような特性のある軸受を主軸用軸受に使用すると、風力発電機は想定以上の突風や不規則な風況で稼働するため、早期に損傷する場合がある。特に主軸用軸受は、すべりが発生している高負荷状態で $10 \sim 15 \text{min}^{-1}$ という低速回転のため、軸受性能は潤滑状態に大きく依存する。

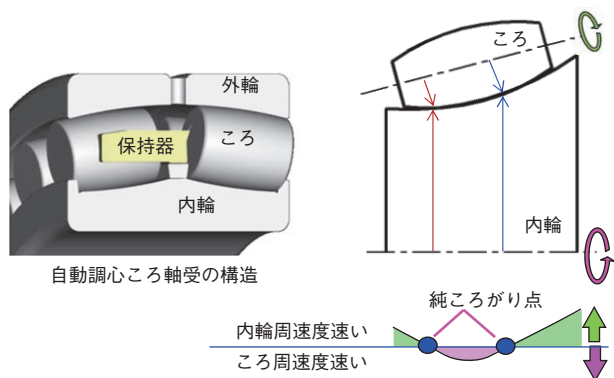


図 4 自動調心ころ軸受の構造
Structure of spherical roller bearing

図 5 に自動調心ころ軸受の内輪軌道の損傷事例を示す。アキシアル荷重負荷列の内輪軌道全面に剥離が発生している。変動荷重や低速回転による潤滑なじみ不良が原因と推定されるため、主軸用軸受の信頼性向上および軸受損傷の早期発見が重要となる。

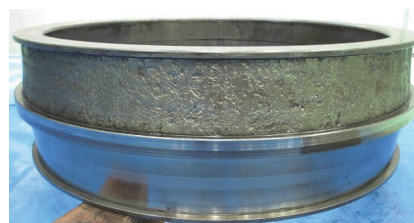


図 5 内輪軌道の早期損傷の例
Premature failure of inner raceway

主軸用軸受が損傷した場合、軸受交換に多くの日数と費用が必要となる。このことは風力発電機の稼働率低下、発電機会損失を招く。

3. 主軸用軸受の稼働率向上の取り組み

当社は 1990 年代より風力発電用軸受の製造・供給を開始し、軸受の信頼性向上に対する取り組みを実施してきた。

主軸用軸受損傷防止のためには、軸受の負荷容量をあげる大形化だけではなく、軸受性能向上が必要である。そこで、内部設計の最適化による負荷性能向上³⁾、さらに、前述の軸受軌道輪とこころの接触部の潤滑なじみ不良による早期損傷改善のために表面処理技術を開発した。一方、軸受損傷に至る前段階で損傷を予見するためにグリースセンシング技術の開発にも取り組んできた。以下に、これらの技術開発内容について紹介する。

3.1 表面処理技術の開発⁴⁾

風力発電機の増速機に使用されるころ軸受は、スミアリングが発生しており、その対策としてブラックオキサイド被膜技術の適用で軸受の早期損傷が低減した。そこで、主軸用軸受の早期損傷の原因である潤滑不良対策として、このブラックオキサイド皮膜を適用し、軸受評価試験を実施した。

ブラックオキサイド被膜の状態を図 6 に示す。

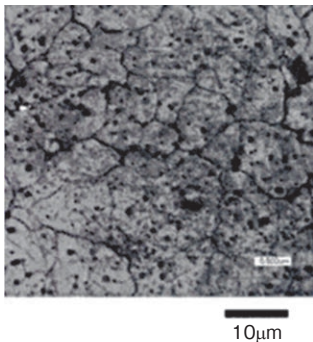


図6 ブラックオキシダの表面状態
Surface structure of black oxide

潤滑油保持性確認のために、ブラックオキサイド被膜に塗布した直後と、一定時間放置後の表面油膜厚さ分布を図7に示す。光干渉縞が多いほど、油膜が厚いことを意味する。

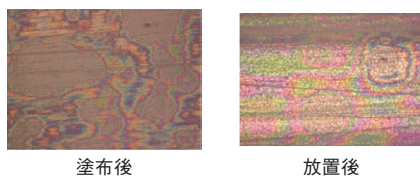


図7 ブラックオキシダの油分保持性確認結果
Confirmation result of oil retention of black oxide

図7から分かるように、ブラックオキサイド表面には無数の微小穴とき裂が縦横無尽に形成されている。これらの微小穴やき裂が潤滑剤保持の役割を担っているものと推測できる。表面に光が反射した縞状のフリンジが認められ、ブラックオキシダの表面は潤滑剤とのなじみが良好であることが確認できた。

また、ブラックオキシダのナノインデント硬さ測定結果を図8に示す。ブラックオキシダの硬さは無処理品に比べて柔らかいことが分かる。これは母材との間で緩衝材のような役割を果たし、接触応力低減の効果があると推定した。

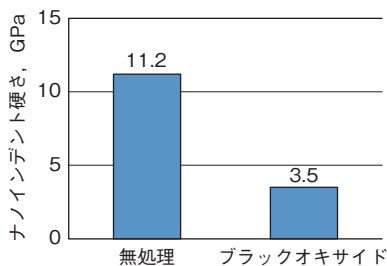


図8 ナノインデンテーション硬さ測定結果
Results of nanoindentation hardness measurement

自動調心ころ軸受におけるすべりを模擬した、二円筒転がり試験機の模式図を図9に示す。表1にブラックオキサイドの摩耗時間推移を示す。

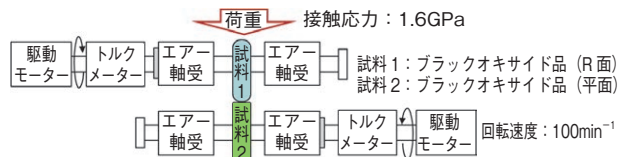


図9 二円筒転がり試験機
Test machine for two cylinder rolling

表1 試験結果
Test results of two cylinder rolling

試料2：ブラックオキサイド表面		
試験時間	50h 試験後	80h 試験後
	形状測定結果	

ブラックオキシダの初期摩耗は確認されたが、表1に示すように50時間と80時間で形状測定結果に差がないことから、なじみ後はほとんど摩耗しないことが確認できた。

3.2 早期損傷の再現と効果確認結果

次に、実際の主軸用軸受より小さい自動調心ころ軸受を用いてブラックオキサイド効果確認試験を実施した。表2に試験条件を示す。試験条件は実際に軸受が使用される条件に相当している。図10にブラックオキサイド効果確認試験結果を示す。

ブラックオキサイド処理をした場合、剥離寿命が約2.5倍延長され、表面処理適用の軸受寿命延長効果を確認できた。また、表面処理なし品は、基本定格寿命L10hに対して約30%で剥離しており、市場の早期損傷を再現できたと考える。

表2 試験条件
Test conditions

軸受	自動調心ころ軸受
荷重	ラジアル荷重, アキシアル荷重
回転	低速回転
潤滑	グリース

表面処理	なし	ブラックオキサイド (内外輪・ころ)
基本定格寿命 L10h	4 000h	
試験時間 (剥離発生)	1 200h (6年相当)	3 000h (15年相当)
グリース鉄粉濃度	4.5wt%	2%
内輪軌道面		
外輪軌道面		
ころ転動面		

図10 ブラックオキサイド効果確認試験結果

Confirmation test results for the advantage of black oxide

3.3 グリースセンシング技術開発

主軸用軸受の予兆診断技術として、振動や温度の変化による監視方法が行われているが、軸受の損傷がかなり進んだ状態でなければ検知は難しい。

当社では、2.2項で紹介した主軸用軸受は軌道の損傷に至る前段階である摩耗状態で、潤滑剤であるグリース中の鉄粉含有量が徐々に増加することに着目して、グリース中の鉄粉含有量の経過観察を行い、損傷の予兆診断に取り組んでいる。また、グループ会社の株式会社ジェイテクトエレクトロニクス（旧社名 光洋電子工業株式会社）の協力を得て、遠隔操作も取り入れている。

これにより軸受損傷予兆を早期に検知し、新しいグリースに入れ替えることで、軸受軌道の損傷を防止できる。その結果、軸受交換に至らないため、発電機の稼働率向上につながる。図11に軸受損傷推移とグリースセンシング時期のイメージを示す。

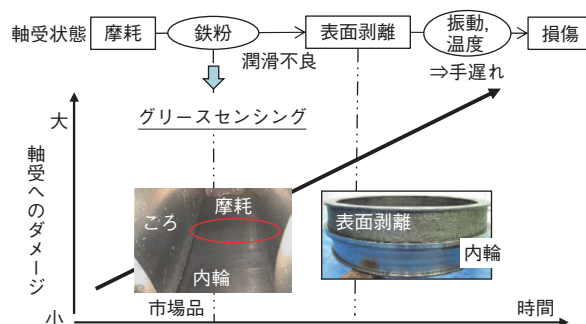


図11 軸受損傷推移とグリースセンシング
Bearing damage transition and grease sensing

グリースセンシングは遠隔操作にて、主軸用軸受箱の排出口からグリースを吸引し、磁気センサーを内蔵した検知ユニットで鉄粉含有量を計測する。その結果は制御BOXから通信BOXへ送られる。それら一連の動作は監視カメラでモニターしている。また、吸引したグリース分の補給として給脂ユニットを設けている。グリースセンシング装置ユニットの概略を図12に示す。

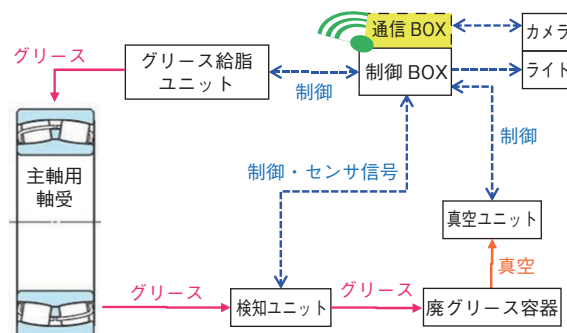


図12 グリースセンシング装置
Grease sensing device unit

このように、ブラックオキサイド適用により、主軸に使用される自動調心ころ軸受の信頼性向上が確認できた。また、今後洋上風力発電は日常アクセスの悪い沖合への設置が予想される。したがって、グリースセンシング技術の確立により、日常メンテナンス性を向上させ、主軸軸受の早期損傷防止に役立つと考えられる。軸受本体の最適化（ハード面）とグリースセンシング技術（ソフト面）の両方を適用することにより、風力発電機の稼働率向上に貢献できる。このことは、風力発電主軸用軸受でカーボンニュートラルの達成に貢献できるといえる。

4. 磁気軸受による省エネルギーへの取り組み

当社では、再生可能エネルギー分野以外にも、地球温暖化の原因となるCO₂の排出が低減でき、グリーンエネルギーと呼ばれる水素のインフラ設備にも適用できる磁気軸受開発にも注力している。ここでは、グループ会社の株式会社ジェイテクトマグネティックベアリング*の取り組みについて紹介する。

※株式会社ジェイテクトと株式会社MUTECSが設立した会社

4.1 磁気軸受の取り組み

磁気軸受技術は従来、半導体製造装置に使われるターボ分子ポンプに広く適用されていた^{5), 6), 7)}。近年、CO₂排出量の低減や水素エネルギーの要求が高まり、磁気軸受の活用が注目されている。

株式会社ジェイテクトマグネティックベアリングで製造・販売している制御型磁気軸受（以下、磁気軸受）は、非接触で摩擦損失がなく、動力損失がきわめて小さいため、カーボンニュートラルに貢献できる商品として注目されている。

一般的な5軸制御型磁気軸受の構成図を図13に示す。ラジアル4軸、アキシアル1軸を、それぞれ軸の変位計測センサー信号を基に電磁石の電流をフィードバック制御している。回転体は電磁石の電磁力により磁気浮上しており、ハウジング部と接触する部分がなく、完全に非接触支持を実現しているのが特長である。

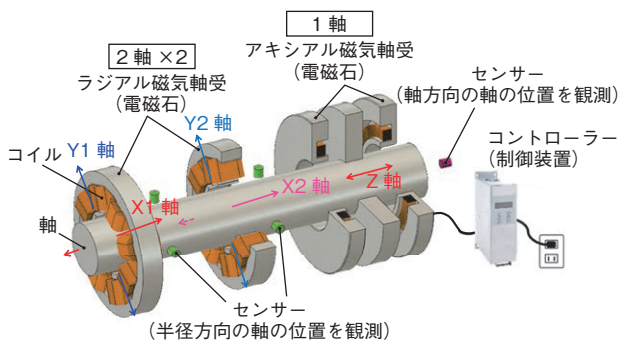


図13 5軸制御型磁気軸受の構成^{B)}

Configuration of 5-axis control magnetic bearing

4.2 磁気軸受のCO₂排出量の低減効果

磁気軸受は電磁力で回転体を完全に非接触に支持するため、転がり軸受や、すべり軸受のような摩擦損失がなく、動力損失がきわめて小さい。また、潤滑油が必要な

いため、潤滑油供給装置が不要となることに加え、転がり軸受の回転に必要なであった潤滑油のCO₂換算分削減効果も大きい。

特に、高速回転が必要である場合には、転がり軸受やすべり軸受は油潤滑が必須となるが、磁気軸受は、高速でも無潤滑で回転できる。

図14に軸径約φ45mmの磁気軸受と転がり軸受の運転時のCO₂排出量の比較グラフを示す。磁気軸受は動力損失がきわめて少ないこと、潤滑油が不要であることから、これらにかかわるCO₂排出量がきわめて小さいことが分かる。また、磁気軸受運転時の電力消費は転がり軸受の潤滑装置消費電力よりも小さい。したがって、転がり軸受に比べて磁気軸受のほうがCO₂排出量を大幅に低減できることが分かる。

運転時の効率向上、CO₂排出量削減、メンテナンスフリーの特長から発展途上国では、ばっ気ブローや設備の冷凍装置などでの活用が増えている。

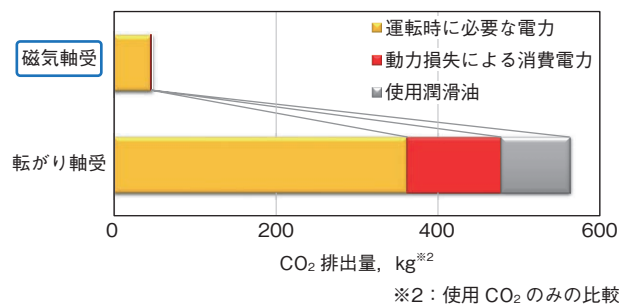


図14 CO₂排出量比較
CO₂ emission comparison

4.3 水素社会への貢献

近年、2050年のカーボンニュートラルの実現を目指す欧州各国を中心に、水素エネルギーの開発が進んでいる。日本でも2017年に世界で初めて水素基本戦略が策定され、水素社会実現に向けての取り組みが進んでいる。港湾に貯蔵された液化水素を発電所へ送るインフラ設備では液化水素を送るポンプが必要となる。水素エネルギー活用のためには、液体水素を用いる必要があり、液体水素の極低温-253℃の環境では転がり軸受の潤滑が困難なため、無潤滑で回転可能な磁気軸受の適応が期待される。

磁気軸受は制御により安定浮上しており、無潤滑で回転可能であるため、転がり軸受や他の流体軸受よりも信頼性が高いと考えられる。

以上、磁気軸受はCO₂排出量がきわめて少ないこと、また、水素インフラ装置にも適用が検討されていることから、磁気軸受はカーボンニュートラルの実現に大きく貢献することができるものと期待している。

5. おわりに

本報では、産機用軸受のカーボンニュートラルへの取り組みとして、風力発電用軸受と磁気軸受について紹介した。

風力発電用軸受では、主軸用軸受の寿命改善技術と損傷予兆検知技術について述べてきた。また、磁気軸受では、転がり軸受に比べてCO₂排出量が大幅に低減できることと水素のインフラ設備に適用できることを説明した。その結果、当社は風力発電用軸受と磁気軸受を通してカーボンニュートラル達成に向けて貢献していることを明らかにした。今後も、ジェイテクトグループの力を結集して、再生可能エネルギーおよびグリーンエネルギーへの技術開発を積極的に取り組み、カーボンニュートラル社会へ貢献していく。

参考文献

- 1) Global Wind Energy Council: Global Wind report 2023, <https://gwec.net/globalwindreport2023/>
- 2) 株式会社ジェイテクト：風力発電装置用製品カタログ, CAT. NO. B1002-4.
- 3) 安田浩隆, 武田喜重, 大塚和茂：自動調心ころ軸受の信頼性向上, JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1012 (2014) 38.
- 4) 小林康裕：風力発電装置主軸用軸受の信頼性向上への取り組み, 協会誌「ターボ機械」, 2023年1月号, 第51巻, 第1号 (2023) 19.
- 5) 光洋精工株式会社：制御形磁気軸受スピンドルカタログ, CAT. NO. 133-3.
- 6) 上山拓知：制御形磁気軸受の最近の開発動向, Koyo Engineering Journal, No. 163 (2003) 23.
- 7) 高畑良一, 宮川裕豊, 亀野浩徳, 上山拓知：高温超電導フライホイール電力貯蔵装置の研究開発, Koyo Engineering Journal, No. 159 (2001) 68.
- 8) 宮川裕豊, 谷口 学：汎用デジタル制御形磁気軸受システムの開発, Koyo Engineering Journal, No. 155 (1999) 42.

筆者



綿本 裕*

Y. WATAMOTO



岡田一真*

K. OKADA

* 産機・軸受事業本部 産機ソリューション技術部