

エネルギーの未来を拓く風車トライボロジーの挑戦

Challenge of Wind Turbine Tribology to Energy Future

日本風力エネルギー学会（戸田建設株式会社）（非）*松信 隆

Takashi Matsunobu*

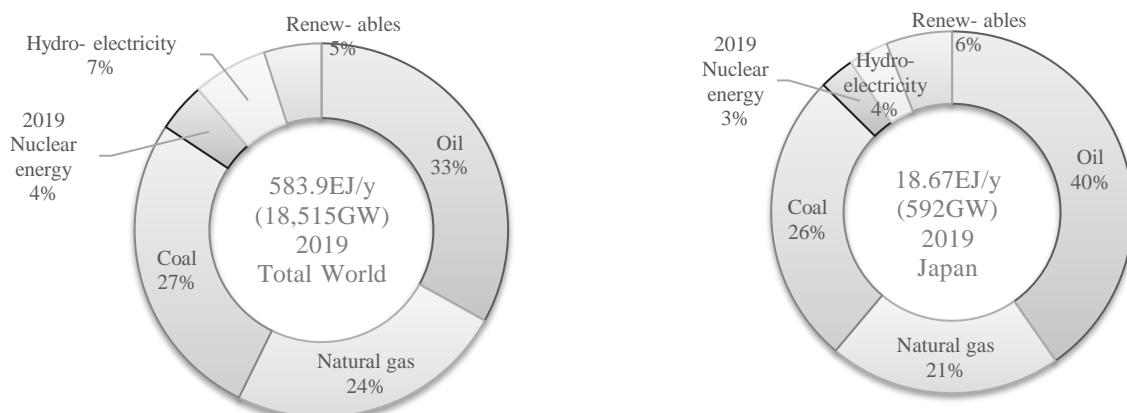
*Japan Wind Energy Association (Toda Corporation)

1. はじめに

地球温暖化対策の切り札とされる風力エネルギーを始めとする再生可能エネルギーへの期待が拡大している。再生可能エネルギーは、エネルギー密度が化石燃料のように高くなく、エネルギーとして産業界で利用するには、機構的、経済的制約も多い。中でも、商業的に成立している風力エネルギー事業(以下「風力」という)では、長さ 50m を超える翼(以下「ブレード」と言う)を有した大型の風力エネルギーシステム(以下「風車」という)の採用が主流となってきている。風速は、人為的に増大させることができないので、ブレード先端の周速比を適正なレンジにする観点から、ブレードの回転速度を 10min^{-1} 程度に抑えざるを得ず、結果としてロータの回転軸を中心にはたらく、回転軸の周りの力のモーメント(以下「トルク」と言う)が定格運転状態で、10000kNm 超える風車まで出てきている。風車に使用されている軸受や歯車機構なども、接触や潤滑などの技術面での限界を見据えつつ、風車を安全かつ安定的に運転するよう極めて難易度の高い設計が要求されている。本稿では、風車の市場動向および風車から、トライボロジー的な観点の要求事項、それらへの対応方針などを解説する。

2. 風車市場の動向

一次エネルギーの世界における需要は、2019 年に 583.9EJ [1] (1 秒平均で 18,515GW), 日本国内需要は、18.67EJ [1] (1 秒平均で 592GW) となっている。供給側では、水力を除く再生可能エネルギーが、世界で 5% [1], 日本国内が 6% [1] に留まる。化石燃料依存率は、世界で、84%(155,526GW), 87% (515GW) となる。Figure 1 に全世界および日本の一次エネルギーの需要をエネルギー源ごとに示す。第 26 回気候変動枠組条約締約国会議(COP26: United Nations Climate Change conference)では、石炭火力発電所の全廃、電気自動車(EV)の導入、森林面積の減少抑制、メタンガスの削減目標などが設定された。風力への期待の高まりもあり、2020 年には世界で、93000MW [2], 日本で、551MW [2] の風車が導入され、主に発電用に供されている。2021 年 12 月 24 日には、国の洋上風力発電事業者の選定 [3]において、定格出力 12.6MW ロータ径 220m の風車が、3 サイト計 134 基規模で、売電価格 11.99 円/kWh から 16.49 円/kWh で事業者が採択されている。2022 年現在、素材価格などが高騰する中、大型化による発電量増加と明確な技術的根拠に裏付けられた合理化により、大型商用電源並みの風力発電が洋上でも見通せる時代になってきた。これに伴い、基幹エネルギーとしての風力とトライボロジーへの期待も、より、高まっている。



Data source: Statistical Review of World Energy 2020 [1]

Figure 1 Primary energy: Consumption by fuel

3. 風車とトライボロジー

商用の風力で主流となっている風車は、水平軸風車である。水平軸風車は、Figure 2 に示すように、水平面に対して約 5 度から 8 度の傾き(傾きは、図示せず)を有した水平軸(以下「主軸」という)に 3 枚程度のブレードを搭載している。ロータを構成するブレードが風のエネルギーの約 50%を回転エネルギー(以下「トルク」と言う)に変える。主軸は、增速機を介してトルクを発電機に伝達し、発電機は、トルクを電力エネルギーに変換する。主軸、增速機、発電機などは、ナセルと言われるコンポーネントとしてまとめられ、高さ 100m 程度のタワーの頂部に、変化する風向にブレードが正対するように、水平面内で旋回可能な形で取り付けられる。商用大型風車は、その寸法において、人類史上最大の発電用回転機械とも言え、軸受、歯車など多数のトライボロジー関連部品が技術的な難易度が高い状態で設計され適用されている。

風車は、エネルギー密度が 300 W/m^2 から 400 W/m^2 程度の比較的低い風力エネルギーを用いていることから、水力、火力、原子力などの大型発電システムと大きく異なり、発電機の定格出力で運転される時間は、30%から 40%程度になることが多い、自然界の風速が下がれば、風速の三乗に比例して出力が変動する。出力計算式を式(1)に示す。多くのトライボロジー関連の部品は、寒冷地においては、潤滑剤が氷点下の環境にさらされることもあり、熱帯においては、高温、多湿の状態に置かれる。風速が所定の値に達すれば、運転を開始し、突風や、熱帶性低気圧の来襲を受ければ、ロータの過回転防止の観点で、ブレードのピッチ角を調整することで、停止する。過酷な環境下で、荷重の変動が大きいことが、風車の特長の一つである。

$$P = \min \left\{ C_p \frac{1}{2} \rho A V^3, P_r \right\} \quad (1) \quad A = \pi r^2 \quad (2)$$

π: 円周率、r: 翼半径、P: 発電電力量、Cp: 出力係数、ρ: 空気密度、A: 受風面積、V: 風速、Pr: 定格出力

風力のエネルギー、特に風力発電の発電コストは、欧米を中心に商用の大型発電所の発電コスト並みまで合理化されている。日本では、前述のように 2021 年 12 月に発表された一般海域の洋上風力発電の事業者公募事業で、12 円/kWh まで低減されてきている。風力発電は、運転に燃料が不要で、ほぼ CO₂ の発生がなく、生涯 CO₂ 発生量は、主として、資本費(CAPEX)と運転保守費(OPEX)に関連したものである。発電コストを下げるには、生涯発電量を上げるか、CAPEX と OPEX を下げるかが有効な手段となる。風車の発電量は、前述の式(1)(2)に示したように、人為的な操作が難しく風車の設置場所に依存する風速を上げるか、ブレードの旋回する面積に相当する受風面積を拡大することが有効である。風速が高い地域では、ナセルに搭載されている発電機の定格出力を上げることも有効である。

2022 年までに、世界で商品化された風車は、ロータ直径 50m から、220m 程度まで大型化してきている。Figure 3 にこれらの風車をロータ直径とロータのトルクとロータの回転数で整理した結果を示す。特に大型化が発電コストの低減に有利な洋上風力発電において、前述の国の洋上風力発電事業者の選定 [3] で選定された事業者が採用した風車のロータ直径は、220m で、前述 Fig. 3 にプロットしたように、ロータのトルクは、定格運転状態で 17000kNm と推定される。このトルクは、大型船舶のエンジンのトルクをはるかに上回り、風車および風車コンポーネントの開発、設計、試験において、他に類を見ない新規開発要素になっている。

4. トライボロジーとしての課題

4.1 旋回軸受の摩耗

ブレードのピッチおよびナセルのヨー機構に使用される旋回軸受は、風車が 10 分平均風速と風向で制御されるため、運転中は、一定の一で静止している時間が長い。風車の大型化に伴い、ブレードおよびナセルの受ける風荷重と支持する質量も増加している。ベアリングが静止した状態で、ブレードの回転運動などが発生する振動を受けた際に生ずる摩耗現象、いわゆるフレッチングを防止する設計とする。長期間風車が停止するような場合には、人為的に駆動す

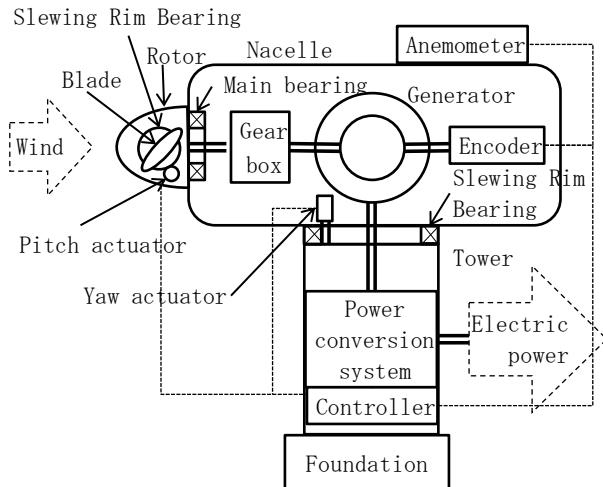


Figure 2 Block diagram of wind turbine

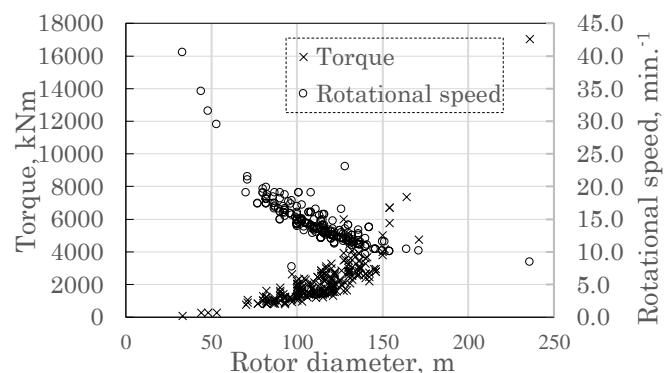


Figure 3 Commercial wind turbine

ることも防止策としては有効である。さらに、潤滑剤に適切な粘度指数向上剤や摩耗防止剤などを添加することも対策されている。

4.2 主軸受および増速機歯車の摩耗

ブレードの回転が発生する振動は、主軸受および増速機などに伝搬する。周期的な接触応力の繰り返しによって生じる表面粗さ上の塑性流れによって、接触した表面に微細なピッチングが発生する場合がある。特に風車のブレード径の拡大によって、ブレードの質量が増加していることで、技術的な難易度が上がっている点に留意し設計される。

4.3 増速機歯車の面圧

風車の増速機の低速側、ロータ側には、遊星歯車が採用されることが多いが、前述のロータトルクが著しく増加し、歯面の面圧が設計許容値を上回ることとなる。一般的に遊星歯車機構では、リングギアの径を拡大する設計が採用される。遊星歯車の数を4枚以上とする対策は、遊星歯車への力の均等な配分が難しいなどとの理由で、採用する歯車メーカは、少ない。増速機を経ずに発電機を駆動するいわゆるダイレクトドライブ方式も選択肢となるが、低速回転の発電機は、発電機の電極の増加、最終的には、発電機質量の増加とコスト増加につながる。発電機と増速機の設計難易度とのトレードオフで、風車システムのドライブトレーンの設計が決まるが、風車メーカによって見解が分かれている。

Figure 4 に遊星歯車機構のイメージを示す。

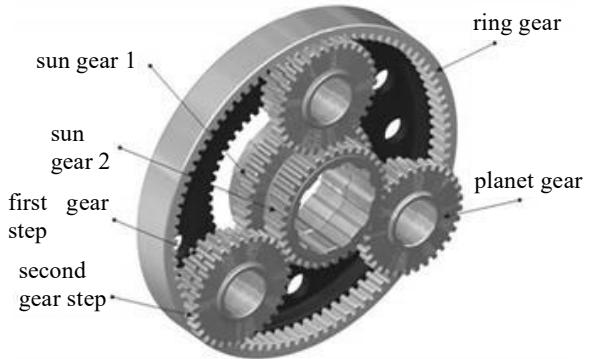


Figure 4 planetary gear system [4]

4.4 発電機軸受の電食

回転中の軸受に電流が通過すると、玉と内外輪の点接触部分の油膜を介してスパークが発生し、表面の局部的な溶解で、内外輪の転動面がピッチング状となる現象、いわゆる電食が発生する。軸受にセラミック製の電気的に絶縁された玉を採用すること、内外輪の転動面に絶縁被膜を形成することなどで、対策される。

5. おわりに

本稿では、風車に関するトライボロジー、いわゆる「風車トライボロジー」に関連した風力技術とのかかわりについて述べた。風力エネルギーは、人類が直面する地球温暖化の課題を解決するために重要なプレーヤーの一つである。日本の風力産業と風車トライボロジーを含む技術の充実と風力の導入加速による 3E+S* [5] の実現に向けて、日本風力エネルギー学会の活動などに、引き続き、トライボロジー関連のみなさまからのご指導ご鞭撻をいただきたい。

* 経済産業省が掲げる基幹エネルギーの要件、安全性 Safety を大前提とし、自給率 Energy Security、経済効率性 Economic Efficiency、環境適合 Environment を同時に達成すること

文献

- 1) BP plc. Statistical Review of World Energy 2020 | 69th edition. bp Home. (オンライン) BP plc. Statistical Review of World Energy 2020 | 69th edition. bp Home. BP plc, 2020 年. (引用日: 2022 年 1 月 27 日.) [https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-repo.](https://www.bp.com/2020 年. https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-repo.)
- 2) Global Wind Energy Council. Global Wind Report 2021. Brussels, Belgium : Global Wind Energy Council, 2021.
- 3) 経済産業省. 「秋田県能代市、三種町及び男鹿市沖」、「秋田県由利本荘市沖」、「千葉県銚子市沖」における洋上風力発電事業者の選定について. ニュースリリース. (オンライン) 2021 年 12 月 24 日. (引用日: 2022 年 2 月 24 日.) <https://www.meti.go.jp/press/2021/12/20211224006/20211224006.html.>
- 4) Rohloff AG. Planetary Gear System. Products. (オンライン) Rohloff AG. (引用日: 2022 年 2 月 25 日.) [https://www.rohloff.de/en/experience/technology-in-detail/planetary-gear-system/.](https://www.rohloff.de/en/experience/technology-in-detail/planetary-gear-system/)
- 5) 経済産業省. 3E+S. 日本のエネルギー 2020 年度版 「エネルギーの今を知る 10 の質問」. (オンライン) 経済産業省. (引用日: 2022 年 2 月 26 日.) <https://www.enecho.meti.go.jp/about/pamphlet/energy2020/005/>