

風車主軸受における AE を用いた状態監視評価方法の開発 第 1 報

Development of a Condition Monitoring Method for Wind Turbine Main Bearings Using Acoustic Emission – Part I

大同メタル（正）*香月 広光 大同メタル（非）森 成良 産総研（正）間野 大樹 産総研（正）是永 敦

Hiromitsu Katsuki*, Mori Shigeyoshi*, Mano Hiroki**, Korenaga Atsushi**

* Daido Metal Co., Ltd., ** National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

1. 緒言

現在、洋上風力発電に対しては 10～15MW 級の大型風車が求められており、その主軸受には直径 3～4m の転がり軸受が使われてきた。分解困難な転がり軸受の保守維持費用は比較的高額となり、故障時には設備利用率の低下を招く課題もあることで故障や寿命の診断方法について長年、転がり軸受の状態監視技術も同時に開発されてきた¹⁾。

一方で、分解容易なすべり軸受は損傷した場合でも軸受単体のみの交換やメンテナンスを行うことにより故障時の復旧が大幅に短縮される利点を持つ。すべり軸受の状態監視技術としては従来から研究として振動計測、AE による監視、潤滑油の劣化診断など多岐にわたるモニタリング技術が開発されてきた²⁾。更に、振動診断を主とした状態監視技術が ISO 規格として制定され現在に至っている。

水力・火力などの発電所においてすべり軸受は欠かせない重要機能部品として設計・運用技術が進んできた。現在は、これまでの設計・運用技術を応用し、風車主軸受への適用を目指した研究が進んでいる。すべり軸受は、適切な設計や潤滑方法、メンテナンス技術の組合せによって長期運用が可能である。また、主軸回転時にすべり軸受しゅう動面に発生する油膜圧力により風況の変化に伴って発生する動荷重に対する減衰効果に優れている特徴も持つ。

これらに述べたすべり軸受の利点を活用した風車主軸受が開発され、風車ナセル内部においてすべり軸受のみの交換が可能となる分割支持構造の軸受ユニットが提案され、現在、風車主軸用すべり軸受ユニットに関する設計技術・分解組立・材料・状態監視の研究開発を進めている³⁾。

電力の安定供給の観点では、風車向けすべり軸受の使用時においても、円滑な運用に資する状態監視技術の開発が重要である。風車用に使用するすべり軸受の状態監視技術は風車の運用全体にもかかわる点から重要であるが、これまで研究・報告された事例は殆ど見当たらない。そこで、本報告では風車主軸受用に用意した PEEK すべり軸受材を用い、故障事象として一番厳しい焼付き試験を行い、状態監視のための検証技術の一つとして AE 法を適用した。

2. 試験方法および試験条件

AE 信号を取得する試験方法として、試験面圧を上げていく焼付き試験を実施した。Fig. 1 に試験機の概略図及び、Table 1 に試験条件を示す。評価用の試験片材料には風車実機の主軸受として試験中の PEEK すべり軸受開発材を用いた。AE センサは試験片固定治具にそれぞれ 35-100kHz（共振型）と 100-1000kHz（広帯域型）の周波数帯を持つ 2 種類を取り付けることで広い周波数での AE 信号取得を試みた。AE 信号は PC にて収録を行い、付属のソフトにて実効値の測定を実施し、周波数解析は個別に実施した。試験用の潤滑油には実機の風車増速機に使用されている市販のギヤ油と市販のギヤ油と同じ VG1000 相当の粘度を有する無添加基油（PAO）の 2 種類を使用した。今回、潤滑油の温度コントロールは行わず室温にて試験を開始した。

尚、焼付き判定は試験トルクの急激な上昇変動を根拠とした。試験軸には機械構造用炭素鋼 S55C を採用した。試験軸の摺動部分の表面粗さは $Ra=0.1\sim0.15\mu m$ とし、試験軸の硬度は 500-600HV にて作成した。

3. 試験結果および考察

3.1 焼付き試験

Fig. 2 にギヤ油を用いた場合の焼付き試験時の試験面圧と摩擦トルク、また前述の共振型と広帯域型 AE センサにて測定した AE 実効値をそれぞれ示す。

ここでは、焼付き試験において試験面圧が増加するごとに摩擦トルクが上昇している。この結果と併せて、試験面圧の増加と共に AE 実効値の上昇も確認できた。AE 波は物質の変形や破壊に付随して発生する現象であり、特に面圧が増加した瞬間に AE 実効値も上昇したことから、今回使用している PEEK すべり軸受材においても試験面圧の上昇と共に摺動部の変形やなじみ摩耗が生じ、それらの現象によって誘起された AE 波を捕捉することができたと考える。異なる周波数帯を持つ 2 つの AE 実効値にて比較すると 35-100kHz で測定した AE 実効値が試験面圧上昇時での反応が大きいことが分かった。

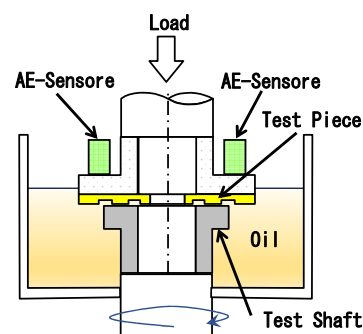


Fig.1 Schematic diagram of Ring-on-Plate tester

Table 1 Test condition of seizure tests

Test Specimens Diameter	[mm]	OD:φ26.2×ID:φ23
Step-Up Test Load Time	[MPa/min]	1MPa/5min
Test Speed	[m/sec]	0.5
Lubricating Method	-	Oil Bath
Oil Temperature	[Deg C]	RT

3.2 試験結果および考察

焼付き試験時に摩擦トルクが急上昇していく 2850 秒近傍での 35-100kHz の AE センサでの実効値において、トルク上昇が起きる約 10 秒前に AE 実効値が上下に変動を示す現象を確認することができた。この変化が起きた際の AE 信号に対して FFT 解析を行った。その結果を Fig. 3 内の黒線にて示す。また同図内の赤線で示す波形は FFT 解析後のスペクトラムを 16 点間隔で移動平均処理したものである。この結果から当該 AE 信号は 40-120kHz の間において大きな成分を有していることが分かった。更に低い面圧から上昇させていった時と摩擦トルクが急上昇した直後の AE 信号に対して FFT 解析結果を Fig. 4 に示す。この結果から、本試験では、面圧の増加に伴って AE 信号の主に 40-120kHz の周波数成分が増加していき、焼付きに至ることが確認された。

これらの結果から、PEEK すべり軸受材における焼付き試験の状態監視の手段として、摩擦トルクと AE 信号の測定と FFT 解析は有効であることが分かった。

また、同じ焼付き試験条件にて PAO を用い、面圧が 10MPa にて焼付きが発生した際の AE 信号に対する FFT 解析結果をギヤ油の結果と共に Fig. 5 に示す。同図から PAO においては 20-50kHz の周波数帯において高い信号強度が得られた。また試験は 3 回実施されたが、いずれの場合においても同様の周波数帯で最大値を示す結果を得ることが分かった。

今回の焼付き試験においては 2 種類の油の違いによる試験軸上への PEEK 樹脂の凝着などは表面観察からは見当たらなかった。一方、AE 信号の周波数スペクトラムは、摺動面で生起する現象により異なることが知られおり⁴⁾、また添加剤の種類によって最大値を示す周波数成分が異なるという試験結果と報告事例がある⁵⁾⁶⁾。

今回の試験においてギヤ油と PAO の最大の周波数成分が異なる理由の一つとしてはギヤ油に含まれている P 成分が試験軸の表面に吸着し反応膜として形成され、摺動特性の違いに現れたことが、AE 信号においても把握出来たのではないかと考えている。この周波数の違いや摺動メカニズムに対する影響は、表面分析の実施とともに解析を今後進め、更に状態監視技術開発を進めていく。

4. 結言

風車主軸受における AE を用いた状態監視評価方法の開発を目的として、実機で試験中の PEEK すべり軸受材を用い焼付き試験を実施した。その際、PAO とギヤ油を使用し、それぞれの AE 信号の傾向を把握した。また、オイル間にて周波数解析の比較を行った。その結果、以下の知見を得た。

- (1) PEEK すべり軸受材の焼付き試験時において摩擦トルクの上昇と AE 実効値には相関関係が得られる。
- (2) 試験面圧を増加させ焼付きを生じさせる際、同じ油では AE 信号の同じ周波数成分の強度が徐々に高くなっていく。
- (3) ギヤ油と PAO では AE 信号の周波数成分が異なる。

この成果は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の助成事業 (JPNP21015) の結果得られたものです。

参考文献

- 1) 風力発電装置用状態監視システム(CMS)の開発と適用例, NTN technical review (86), 40-44, 2018-10
- 2) 椎原・岡本・黒澤: 滑り軸受け状態監視の計測・解析・診断技術-ディーゼル主機関主軸受の最適状態監視を目指して, 日本マリンエンジニアリング学会誌 第 44 巻 第 2 号 (2009)
- 3) 大同メタル工業株式会社, <https://ssl4.eir-parts.net/doc/7245/tdnet/2271224/00.pdf>
- 4) 長谷垣蘭: アコースティックエミッション計測の基礎, 精密工学会誌, Vol. 70, No.10, 2012, pp.856,
- 5) 土屋・森田・佐藤・佐藤・佐々木: アコースティックエミッション法によるリン系・硫黄系添加剤の濃度変化に伴う銅の摩耗挙動の調査, トライボロジー会議 2025 春 E2.
- 6) 森田・立山・小野寺・佐藤・長谷: AE 測定法を用いた S 系・P 系添加剤の反応解析, トライボロジー会議 2020 秋 A2.

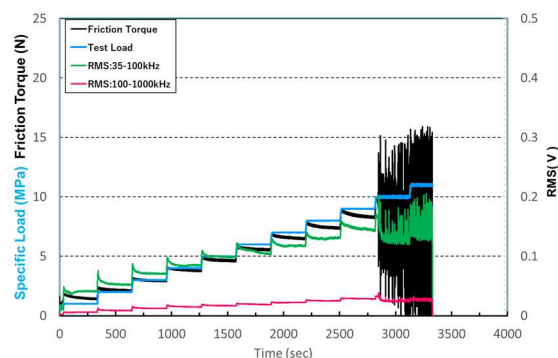


Fig.2 Experimental Results of Seizure Test Using Gear Oil

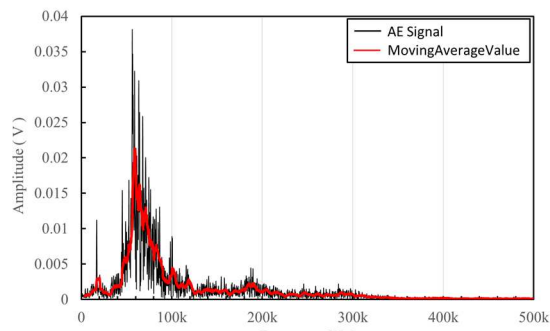


Fig.3 FFT Analysis results of AE Signals just before seizure occurrence in Gear Oil

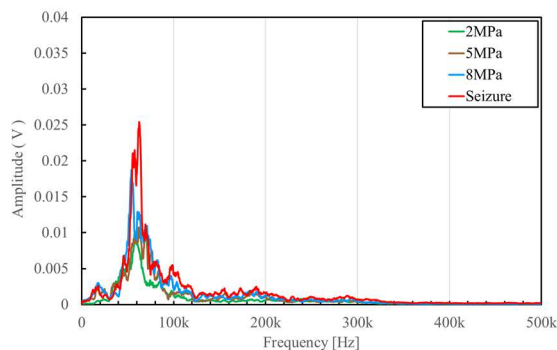


Fig.4 Comparison of test results under different specific loads using gear oil

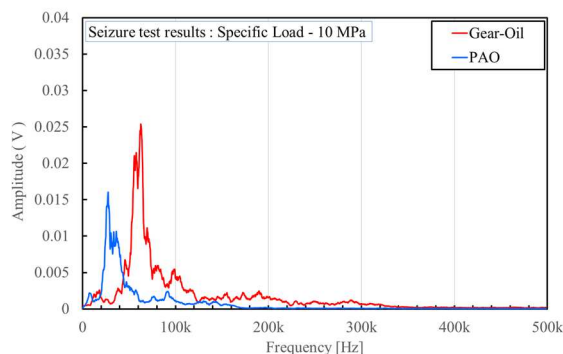


Fig.5 Comparison of test results between PAO and gear oil