



レーザ干渉計を用いた非接触 AE 法による 軸受の欠陥計測

Defects measurement of bearings
by non-contact acoustic emission method using a laser interferometer

(独) 日本原子力研究開発機構 大田 恭史 Yasufumi OHTA Member
(独) 日本原子力研究開発機構 猿田 晃一 Koichi SARUTA Non Member

Abstract: In order to investigate the relationship between the defect size and the corresponding AE parameters, we carried out laboratory tests using a rotating machine and bearing specimens. The rotational speed is 837 rpm and the size of defect diameter of the specimens ranges from 0.25 mm to 1.00 mm, in 0.25 mm steps. AE signals caused from interaction between balls and defects are measured at the rotating shaft using a laser interferometer and also measured on the bearing housing by a piezoelectric sensor. After analyzing AE signals, we found out that the AE energy and the frequency centroid depend on the defect size. By increasing the defect size, the AE energy increases while the frequency centroid broadens to lower and higher frequency regions. It was also found that the measurement at the shaft is able to detect smaller defects than the measurement on the bearing housing.

Keywords: Acoustic Emission (AE), Non-contact Measurement, Laser Interferometer, Condition Monitoring Technology, Bearing

1. はじめに

回転機器のトラブル事例の多くは、軸受の損傷と密接に関係している。そのため、軸受の異常、劣化兆候を早期から検知し、軸受の損傷程度を継続的に把握することができる状態監視技術の開発は、保全を高度化する上で重要である。アコースティックエミッション (AE) 法^[1]は、材料の破壊、変形、摩擦、摩耗、または物質の漏洩等にもない発生する弾性波 (周波数は数 10 kHz~数 MHz 程度) を利用する状態監視技術である。AE 法は振動法と比べてより早期の軸受の異常、劣化兆候を検出でき、また各事象により特徴的な AE が発生することが知られている。そのため、発電プラントの主循環ポンプ等の保全重要度が高い回転機器への適用が期待される。火力発電所の蒸気タービンの動翼部に水蒸気酸化スケールが衝突することで発生した AE を重心周波数と振幅の分布により損傷程度を評価した報告がある^{[2][3]}。軸受疲労寿命試験では、軸受の剥離進展時に発生する 100 kHz~500

kHz の AE の振幅変化と損傷程度の相関性については明確でなく、また、欠陥に起因する 100 kHz 以下の AE が発生しているものの検出困難であることが報告されている^[4]。実機運転中は剥離進展前の劣化初期から中期までの時間が長く、100 kHz 以下の AE の発生頻度が高いと考えられる。そのため、100 kHz 以下の AE により得られた AE パラメータを用いて損傷程度を評価することができれば AE 法の状態監視技術としての信頼性が向上する。100 kHz 以下の AE については、摩擦、摩耗試験中、回転している物体にピン試験片摩擦部を押し当てることにより発生した AE をピン試験片摩擦部の反対側に取り付けられたピエゾセンサで測定した報告がある^{[5][6]}。このような直接的に AE を測定する方法により、100 kHz 以下の AE を測定できる可能性が高い。軸受寿命試験でも回転するシャフト上で測定を行うことにより、100 kHz 以下の AE を検出できると考えられるが、ミスアライメント、アンバランス、接触部の摩擦によるノイズ等の影響をなくすために非接触で測定する必要がある。既往の非接触 AE センサはレーザ干渉法を用いている^{[7][8][9][10]}が、回転機器で AE を測定した研究例は見当たらない。そこで本研究では、軸受試験装置を用いて異なる寸法の欠陥を付与した軸受供試体から発生する AE を、レーザ干渉計により回転するシャフト上で直接的に測定した。そして、実験により

連絡先: 大田恭史

(独) 日本原子力研究開発機構
〒919-1279 福井県敦賀市白木 1 丁目
FBR プラント工学研究センター
運転・保全技術開発グループ、
E-mail: ohta.yasufumi@gmail.com

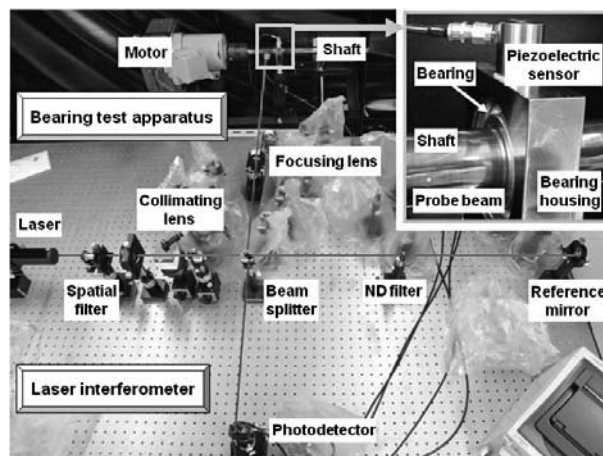
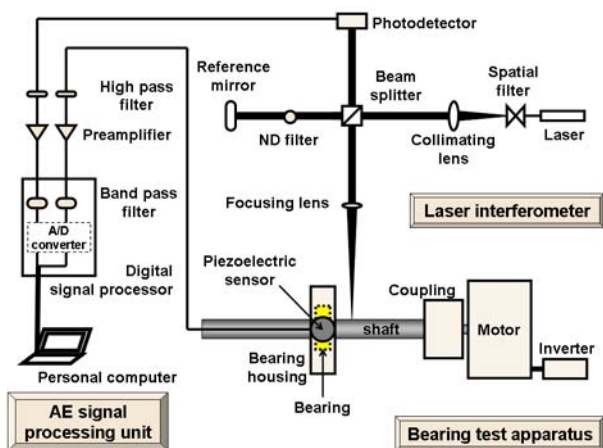


Fig. 1 Configuration of the experimental setup (left side), and the overview photograph of the laser interferometer and bearing test apparatus (right side)

得られた AE パラメータと軸受の損傷程度との相関性について検討を行った。

2. 実験方法

実験系は、レーザ干渉計測部と AE 信号処理・収録部、軸受試験装置部から構成される (Fig. 1)。光源は、波長 632.8 nm、出力 7 mW の He-Ne レーザ (メレスグリオ社製 05LHR171) である。レーザ光はスペーシャルフィルタを通過後、コリメートレンズで平行光とし、ビームスプリッタにより 2 つの平行光に分割する。一方の平行光は参照光となり参照ミラーに向かう。もう一方はプローブ光となりシャフト表面にフォーカシングレンズを用いて集光する。シャフト表面には反射率を増加させるために、ラッピング研磨による鏡面加工を施している。参照ミラー、シャフトで反射された光は、ビームスプリッタで再合成され、フォトディテクタ上に干渉縞を形成する。干渉縞のコントラストを向上させるために、参照光の強度はニュートラルデンシティ (ND) フィルタで調整する。発生した AE がプローブ光の集光位置に伝播すると、参照光とプローブ光の光路差が時間とともに変動するため、干渉縞の光強度も時間的に変化する。この光強度変化をフォトディテクタにより電圧に変換し、AE 信号処理部で AE パラメータを抽出する。AE 信号処理システムはフィジカルアコースティクス社製の機器 (Disp-4) を用いた。各機器の設定値、仕様は、ハイパスフィルタ 10 kHz、プリアンプ 20 dB、バンドパスフィルタ 20 kHz ~2 MHz、A/D 変換分解能 16 bits、サンプリング周波数 5 MHz である。軸受試験装置部はモータ、カップリング、シャフト

(直径 30 mm、長さ 300 mm)、軸受箱からなる。軸受箱はシャフトの重心を軸受が支持するように配置する。レーザ干渉計の測定点は軸受端面から 30 mm の位置になるように調整し、ピエゾセンサを軸受箱上面の中央部に設置する。

軸受は深溝玉軸受 6206 (内径 30 mm、外径 62 mm、幅 16 mm、転動体直径 9.53 mm) である。軸受の内輪または外輪軌道部に段階的に異なる寸法の模擬欠陥を放電加工により付与したものを軸受供試体とした。欠陥の形状は円形であり、直径は $\phi 0.25$ mm、 $\phi 0.50$ mm、 $\phi 0.75$ mm、 $\phi 1.00$ mm、深さは全て 0.25 mm である。全実験条件において、実施時間は 12 分、シャフトの回転速度は 837 rpm、としたので、シャフトの総回転数は約 1 万回転である。シャフトを伝播する AE はレーザ干渉計で測定し、軸受箱上の AE はピエゾセンサにより測定した。AE 信号の検出閾値は、シャフトでの測定では 62 dB_{AE}、軸受箱での測定では 70 dB_{AE} とした。dB_{AE} の基準電圧は 1 μ V である。

3. 実験結果

各実験条件で測定された AE ヒット数を Table 1 に示す。シャフトでの測定の場合、内外輪欠陥ともに欠陥寸法が大きくなるにつれて AE ヒット数が増加する傾向がある。欠陥寸法が $\phi 0.25$ mm、 $\phi 0.50$ mm において、外輪欠陥の AE ヒット数が内輪欠陥に比べ大きく減少している。軸受内輪とシャフトは密着した状態であり、内輪欠陥で発生した AE は減衰せずに内輪からシャフトに伝播することができる。一方、外輪欠陥で発生した AE は、転動体と軸受内輪の接触状態の影響を受け、シャフトに伝播する。

Table 1 AE hit numbers

Measurement		Defect position and size (mm)				
method	point	$\phi 0.25$	$\phi 0.50$	$\phi 0.75$	$\phi 1.00$	
Laser interferometer	Rotating shaft	Inner	853	820	944	1433
		Outer	138	113	931	1687
Piezoelectric sensor	Bearing housing	Inner	1	1	134	300
		Outer	1	0	4	16

外輪欠陥寸法が $\phi 0.25$ mm や $\phi 0.50$ mm で発生する AE の振幅値は比較的低く、これらの影響での振幅減衰により検出閾値に満たない AE が多くなるため AE ヒット数の減少が生じたと考えられる。

軸受箱での測定でも、欠陥の増加に伴い AE ヒット数が増加する傾向が見られるが、シャフトの場合に比べ、AE ヒット数が大幅に少なくなっている。これは軸受箱と軸受外輪の境界面にすきまがある(すきまばめ)のため、その境界面で AE の振幅減衰が大きくなることが主な原因と考えられる。特に欠陥寸法が $\phi 0.25$ mm、 $\phi 0.50$ mm の場合、境界部での減衰に加え、欠陥が小さいために発生する AE の振幅自体が小さいので、有意な AE ヒット数が得られていない。一方、シャフトでは小さな欠陥寸法においても AE ヒット数が得られ、はめあい面の影響を受けにくい特性(しまりばめ)のため、シャフト上での測定は有益であると考えられる。

全欠陥寸法にわたり有意な AE ヒット数が得られた内輪欠陥のシャフトでの測定値における AE 信号実効値とピーク周波数の関係を Fig. 2 に示す。ピーク周波数は各 AE 信号波形のパワースペクトル分析での最大値の周波数であり、実効値とともに軸受の損傷程度の判定に用いられることが多い AE パラメータである。欠陥寸法とこれらの AE パラメータの関係を見てみると、欠陥寸法が $\phi 0.25$ mm から $\phi 0.75$ mm においては、欠陥寸法の増加に伴い実効値が増加しているが、 $\phi 1.00$ mm では、 $\phi 0.50$ mm の場合と同程度の値になっている。また、ピーク周波数に着目すると、 $\phi 0.50$ mm、 $\phi 1.00$ mm の欠陥では 40 kHz 以上のピーク周波数を持つ AE が発生しているが、 $\phi 0.25$ mm、 $\phi 0.75$ mm では発生していない。以上の結果から、実効値およびピーク周波数は、欠陥寸法に対して一貫した傾向を示していないことがわかる。そのため、これらの AE パラメータから欠陥寸法を把握することは難しいといえる。

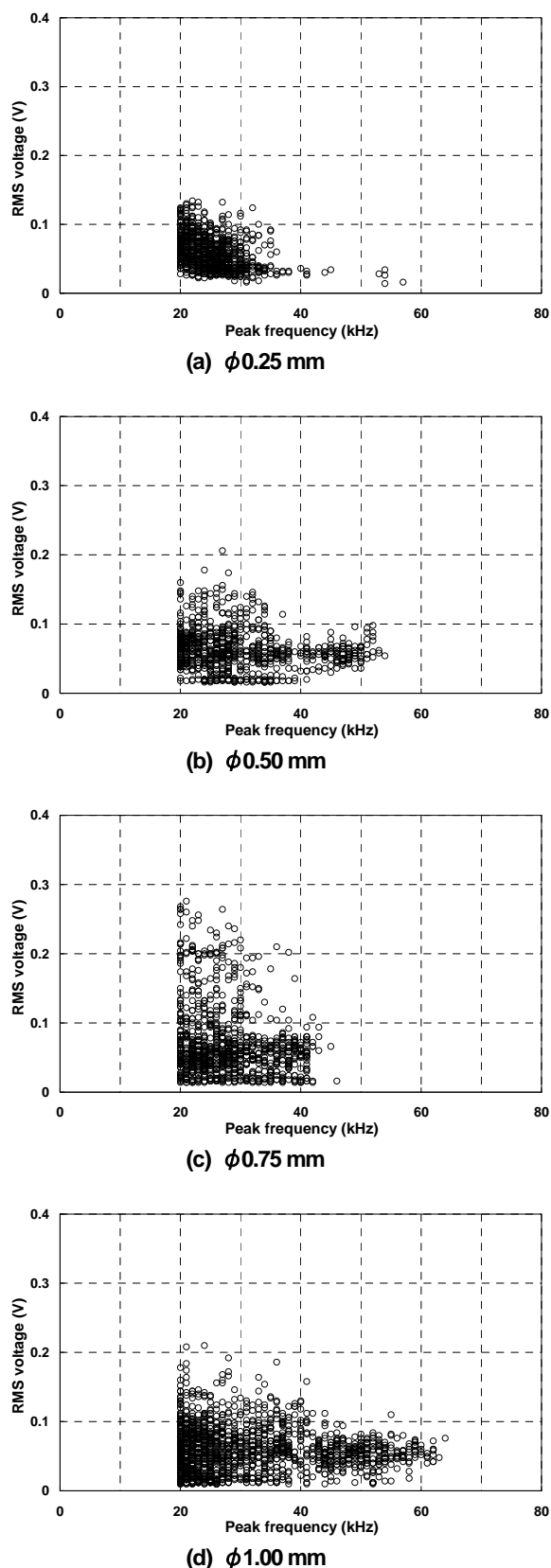


Fig. 2 Scatter diagrams of RMS voltage and peak frequency measured at rotating shaft for inner defect bearing specimens

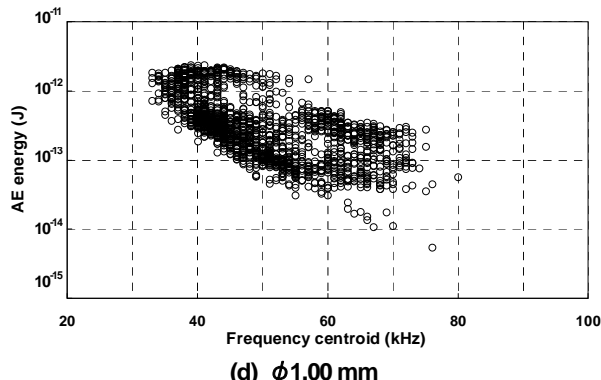
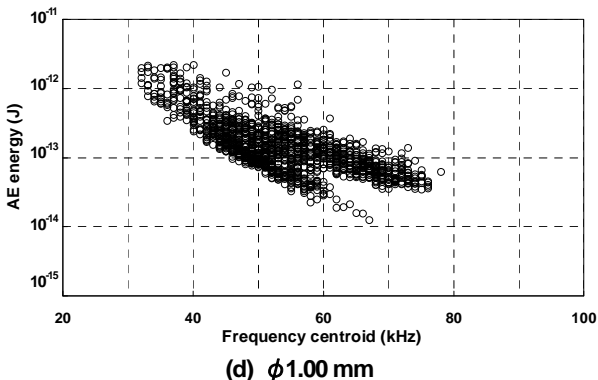
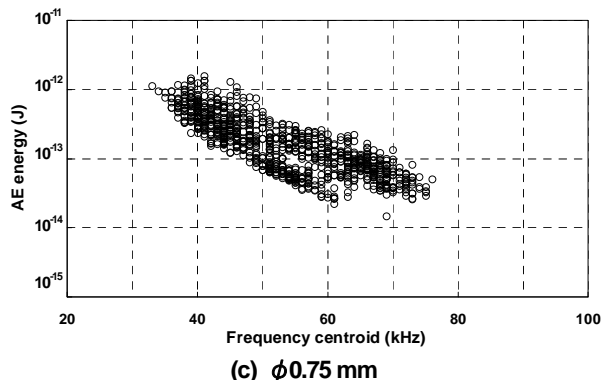
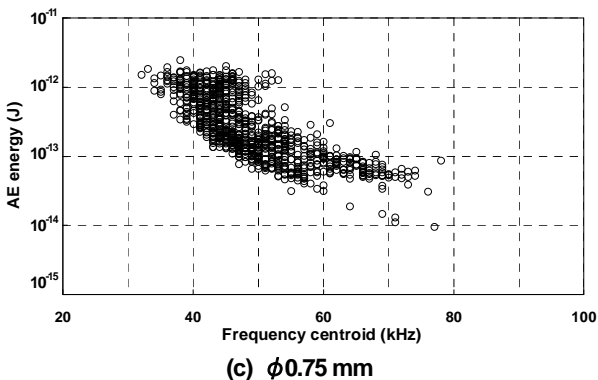
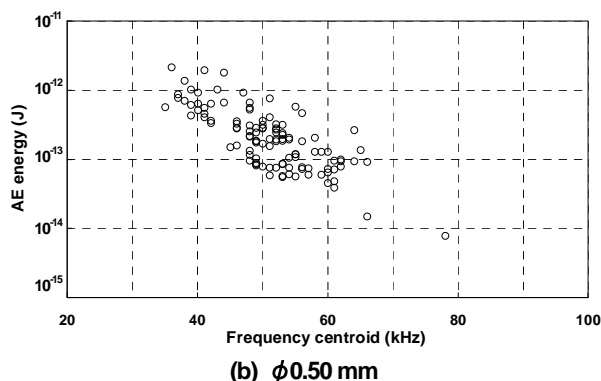
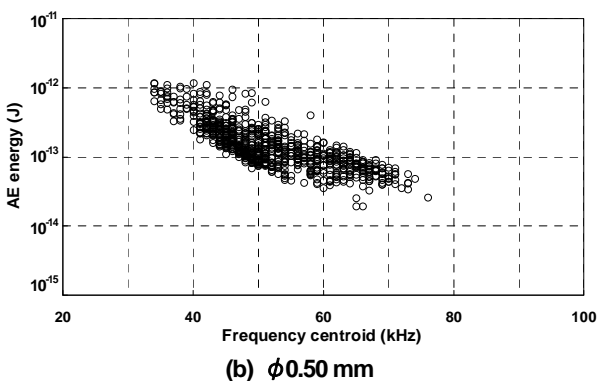
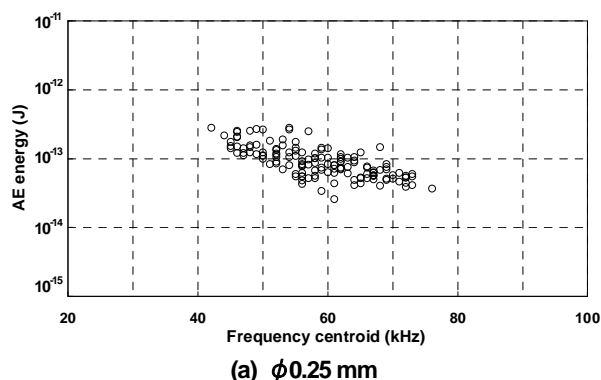
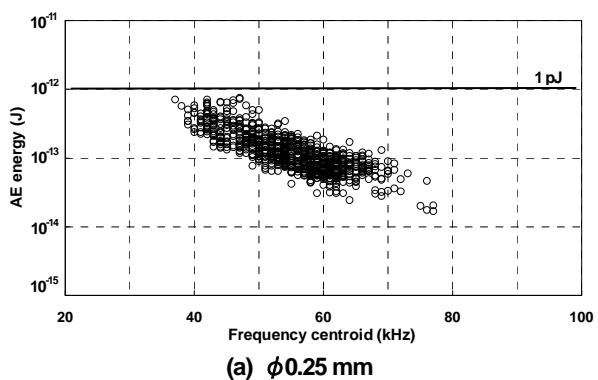


Fig. 3 Distribution maps of AE energy and frequency centroid measured at rotating shaft for inner defect bearing specimens

Fig. 4 Distribution maps of AE energy and frequency centroid measured at rotating shaft for outer defect bearing specimens

4. 考察

Fig. 2 に示したように、AE 信号実効値とピーク周波数では欠陥寸法による影響が明確でなかった。そこで AE パラメータとして AE エネルギーと重心周波数に着目し、欠陥寸法との相関性について考察する。AE エネルギーは、AE 信号波形の振幅を 2 乗した値を用いる。重心周波数は AE 信号波形から求めたパワースペクトルの振幅値を重み係数とした周波数の加重平均値である。すなわち、この重心周波数は、前述のピーク周波数と異なり、AE 信号波形の全周波数の特徴を有する AE パラメータである。また、以下の考察では、全欠陥寸法において有意な AE ヒット数が得られたレーザ干渉計によるシャフト上での測定結果を用いる (Table 1 参照)。

内輪欠陥における AE エネルギーと重心周波数の分布図を Fig. 3 に示す。縦軸に AE エネルギー、横軸に重心周波数をプロットしている。いずれの欠陥寸法においても、重心周波数が高くなるにつれて AE エネルギーが減少する分布形状を示す。これは高い周波数成分ほど AE の振幅が小さくなることが要因である。また、欠陥に起因する単一の AE 事象であるため分布の範囲も限定される。重心周波数に着目すると、欠陥寸法が大きくなるにつれてその分布範囲が拡大していく様子がわかる。特により低い周波数への広がりを顕著に確認することができる。欠陥寸法が $\phi 0.25$ mm の場合、重心周波数は 40 kHz から 70 kHz の範囲に集中するのに対し、 $\phi 0.50$ mm では 40 kHz 以下の周波数まで分布している様子を識別でき、また、70 kHz 以上の周波数にも分布が拡大しているのがわかる。これらの傾向は欠陥寸法が $\phi 0.75$ mm、 $\phi 1.00$ mm と大きくなるにつれてさらに明確となる。このような分布傾向になるのは欠陥が大きくなるにつれて欠陥と転動体の接触状態が多様化することが原因と考えられる。次に、AE エネルギーを比較すると、欠陥寸法の増加にともない、AE エネルギーの分布範囲がより高いエネルギー領域に広がる傾向を明瞭に確認することができる。欠陥寸法 $\phi 0.25$ mm での AE エネルギーは 0.7 pJ 以下に分布しているが、 $\phi 0.50$ mm になると 1 pJ に達する。さらに欠陥寸法が $\phi 0.75$ mm、 $\phi 1.00$ mm と大きくなるに従い、より高エネルギー側へ分布が拡大している。このような AE エネルギー分布が発生する理由は、欠陥寸法が大きくなるにつれて欠陥と転動体の接触面積が増加するためと考えられる。

欠陥寸法の増加にともなう AE エネルギーと重心周波

数の挙動は、外輪欠陥の場合においても同様の傾向が認められる。Fig. 4 は外輪欠陥の場合であり、内輪欠陥の場合よりもさらに重心周波数が 40 kHz 以下に広がる傾向が明瞭になる。欠陥寸法 $\phi 0.25$ mm と $\phi 0.50$ mm の AE ヒット数は内輪欠陥の場合よりも少ないが、AE エネルギーと重心周波数の分布範囲の変化には同様の傾向が認められる。外輪欠陥寸法 $\phi 1.00$ mm ではより高い AE エネルギーが生じる傾向が最も明瞭である。以上の結果から、シャフトを干渉計で測定することにより、内輪欠陥、外輪欠陥とも $\phi 0.25$ mm から検知することが可能である。また、AE エネルギーと重心周波数の分布形状は欠陥の位置に依存しないと考えられる。

以上の考察により、AE エネルギーと重心周波数は、欠陥寸法に対して有意な相関があることが明らかとなった。これらの AE パラメータによる分布図は、軸受の損傷程度と進展状況を把握する上で有用であると考えられる。

5. おわりに

レーザ干渉計を用いて異なる欠陥寸法の軸受供試体から発生した AE を回転するシャフト上で測定した。また、得られた AE パラメータと軸受の損傷程度との相関性について検討を行った。その結果、欠陥寸法は AE エネルギーと重心周波数に相関があるため、欠陥による影響は AE エネルギーと重心周波数の分布図に現れることを明らかにした。また、干渉計とピエゾセンサで得られた AE ヒット数を比較した結果、回転しているシャフトを伝播する AE を直接測定することで、より小さな欠陥から軸受の異常兆候を検知できることが明らかとなった。本レーザ干渉計型非接触 AE 法と AE エネルギー、重心周波数を用いることにより状態監視技術の高度化が期待できる。

参考文献

- [1] “Condition monitoring and diagnostics of machines – Acoustic emission”, ISO/DIS 22096
- [2] 今泉幸男, 吉江敏彦, 前田守彦, 今中拓一, 吉江修: “発電プラント設備 AE 診断技術の開発 (I) ~ AE 法による蒸気タービンの異常兆候検出方法の開発 ~”, 日本設備管理学会, Vol.17, No.3, pp.52-60 (2005)
- [3] 今泉幸男, 吉江敏彦, 前田守彦, 今中拓一, 吉江修: “発電プラント設備 AE 診断技術の開発 (II) ~ AE 法による蒸気タービンの異常兆候検出方法の開発 ~”, 日本設備管理学会, Vol.17, No.3, pp.61-72 (2005)

- [4] 迫孝司: “AE 法による転がり軸受診断技術”, 第9回保全セミナー, 日本保全学会, pp.47-75 (2010)
- [5] 和田正毅, 水野萬亀雄: “AE による摩擦・摩耗の研究—摩耗形態と AE 信号—”, 精密工学会誌, Vol.55, No.4, pp. 673-678 (1989)
- [6] A. Hase, M. Wada, H. Mishina: “The relationship between acoustic emissions and wear particles for repeated dry rubbing”, *Wear*, Vol.265, No.5-6, pp.831-839 (2008)
- [7] C.H. Palmer and R. E. Green: “Optical detection of acoustic emission waves”, *Applied Optics*, Vol.16, No.9, pp.2333-2334 (1977)
- [8] C.H. Palmer: “Sensitive laser interferometer for acoustic emission and ultrasonic NDE”, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation (NDE)*, 5A, pp.651-658 (1986)
- [9] D.A. Bruttomesso, L.J. Jacobs, R.D. Costley: “Development of interferometer for acoustic emission testing”, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol.119, No.11, pp.2303-2316 (1993)
- [10] M. Watanabe, M. Enoki, T. Kishi: “Fracture behavior of ceramic coatings during thermal cycling evaluated by acoustic emission method using laser interferometers”, *Materials Science and Engineering*, A.359, pp.368-374 (2003)

(平成24年5月29日)