

アコースティックエミッション法を用いた スラスト玉軸受の疲労損傷早期検知に関する研究

長谷 亜蘭

埼玉工業大学工学部機械工学科

alan_hase@sit.ac.jp

A Study on Early Detection of Fatigue Damage in Thrust Ball Bearing Using Acoustic Emission Technique

Alan HASE

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Saitama Institute of Technology

Abstract

Rolling bearings are widely used in various machines. As for a large number of bearings used, there is a strong desire to detect the troubles as soon as possible. Although vibration analysis is common for the diagnosis of rolling bearings, it is expected that the failure of rolling bearings can be detected earlier by using an acoustic emission (AE) technique. In this study, the detection of the fatigue damage of a thrust ball bearing is examined by AE signal and vibration analysis in order to confirm the difference between the two methods until fatigue damage occurs. For the AE signal analysis, the maximum amplitude and the frequency spectrum were mainly used for detection and identification of fatigue damage in the bearing. In addition, the feature of the AE signals detected when a defect is artificially formed on the raceway surface of the bearing with Vickers hardness tester was examined. As a result of the experiments, it was found that AE technique can detect initial cracks due to fatigue damage earlier than vibration analysis. Also, AE signals always were detected during the lifetime experiment, but it was found that different frequency components are contained in the AE signals detected at the crack initiation and the crack extension.

Key Words: acoustic emission (AE), sensing, rolling bearing, lifetime prediction, frequency analysis

1. 緒 言

スラスト玉軸受は、世界中で自動車部品や航空機、工作機械や家電製品とあらゆるところで使用されている。しかし、軸受は使い続けると

材料内部に疲労が蓄積し、内部に微小なクラックが生じる。このクラックが進展し表面に達し拡大することで材料表面の一部が剥がれる損傷が生じる。剥離が生じた軸受は寿命となり、軸

受の交換時期となる。軸受の損傷の検出・診断方法としては、従来から振動法が用いられている¹⁾。しかしながら、振動法では損傷の予知に関して十分な情報を得ることができない。

一方、軸受の寿命診断方法として、摩擦・摩擦の直接的な評価が可能なアコースティックエミッション (acoustic emission, AE) 法が非常に有効であると考えている²⁾。AE 法は、材料の変形・破壊時に材料内部にそれまで蓄えられていたひずみエネルギー解放時の弾性応力波を検出し、評価に用いる診断手法である³⁾。そのため、軸受の疲労予知や損傷のモード評価に適しているといえる。

そこで本研究では、機械システムの多くに使われているスラスト玉軸受の摺動状態の評価に AE 法を適用した。また、従来の診断法である振動法との比較を行うため、AE 法と振動法を同時に用いて、スラスト玉軸受の剥離 (フレーキング) の予測を目的とした軸受の疲労試験を行った。双方の測定値の変化を比較し、軸受の異常診断に対する AE 法の有効性を検討した。

2. 実験方法

2.1 軸受疲労試験

図 1 および図 2 は、軸受疲労試験で用いた軸受疲労試験機の外観および概略図である。AE センサは、広帯域型の超小型センサ (AE-900M-WB) を用いた。摺動により発生する弾性波を感度よく検出できるように、軸と軸受の接触部に近い場所に AE センサを設置した。ここで、AE 増幅率は 70 dB とし、20 kHz のハイパスフィルタによりノイズを除去した。今回は、スラスト玉軸受 51205 (転動体数 : 5 個, 外径 : 47 mm, 内径 : 25 mm, 高さ : 15 mm) を使用した。また、振動センサ (最小検出加速度 : 0.98 m/s^2) を AE センサ近傍に設置した。

本試験は、荷重を 9,800 N、主軸の回転数を 800 rpm で行った。潤滑油は、タービンオイル粘度グレード 46 を使い、油温を約 40°C に保ちながら試験を実施した。軸受に剥離が生じ、機械全体の振動が増大した際に機械を停止して試験終了とした。

2.2 圧痕傷形成実験

圧痕傷形成実験では、ビッカース硬さ試験機を使用して、軸受軌道面に圧痕傷を人為的に形成させた際に計測される AE 信号を解析し、その周波数スペクトルの調査を行った。AE センサは、軸受軌道面の背面に設置した。AE 増幅率は 90 dB に設定し、20 kHz のハイパスフィルタによりノイズを除去した。ここで、圧子の押し込み荷重は 9.8 N および 98 N とし、保持時間は 30 s とした。なお、圧子と軌道面の間に

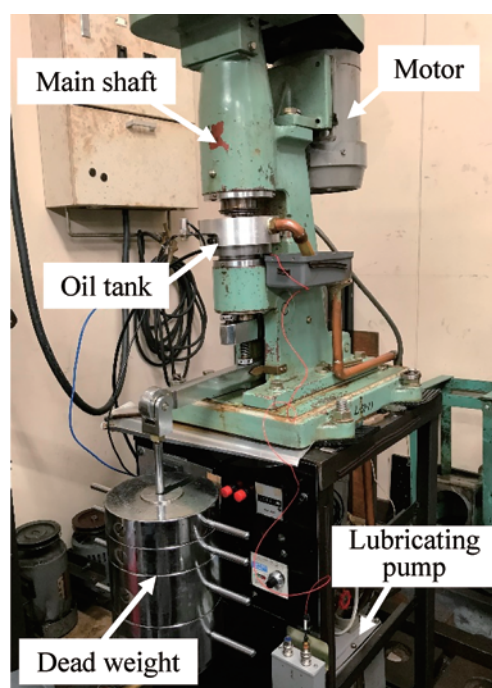


Fig. 1 Appearance of the experimental setup.

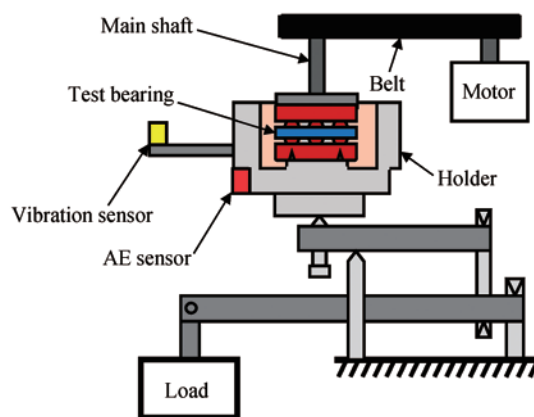


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental setup.

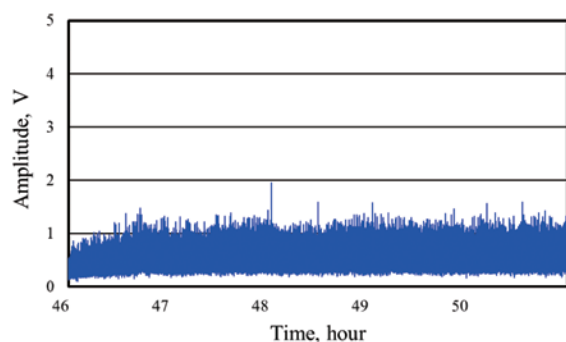
疲労試験時と同様の潤滑油を塗布して実験を実施した。

3. 実験結果および論議

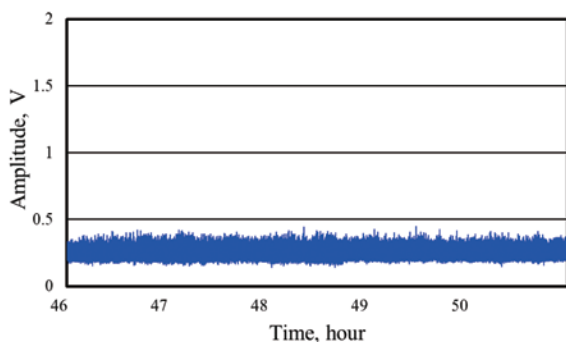
3.1 軸受疲労試験開始初期の変化

今回、試験開始から約 306 時間後にスラスト玉軸受の軸軌道盤にフレーキングが確認された。その直後に実験を中断し、スラスト玉軸受の軸軌道盤のみを新しいものに交換して試験を再開した。試験開始から 383 時間後、すなわち軸軌道盤を交換して約 80 時間後、ハウジング軌道盤にフレーキングが確認された。軸軌道盤、ハウジング軌道盤ともにフレーキングを確認したところで実験を終了とした。

まず、試験開始から 46~50 時間の AE 信号振幅（包絡線検波波形）および振動の大きさの変化を図 3 に示す。振動に関しては大きな変化がみられないが、AE 信号振幅が最初わずかに上昇している。これは、潤滑油の温度が上昇し



(a) AE envelope signal

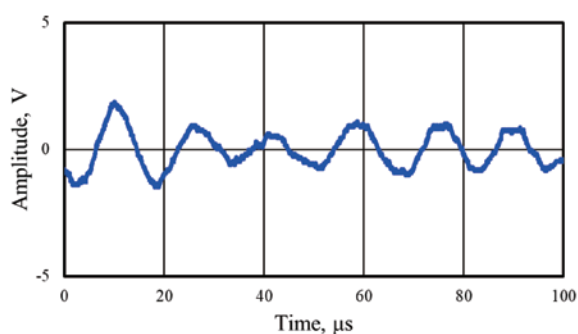


(b) Amplitude by vibration

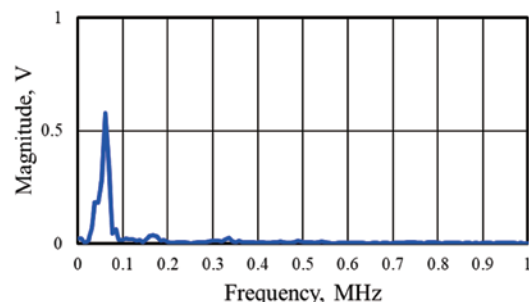
Fig. 3 Changes in the AE signal and the vibrational acceleration about 50 hours later from the start of the rolling fatigue test.

て粘度が小さくなり、油膜厚さが小さくなって接触状態が変化した結果と考える。この傾向は試験中に何度か確認された。この時間帯に検出された典型的な AE 信号原波形とその周波数解析結果を図 4 に示す。この周波数解析結果から、0.1 MHz 以下に大きな周波数ピークが存在している。試験開始初期には、図 4(b) のような 0.1 MHz 以下の周波数ピークのみがみられることがわかった。

図 5 は、試験前のスラスト玉軸受の軌道面と

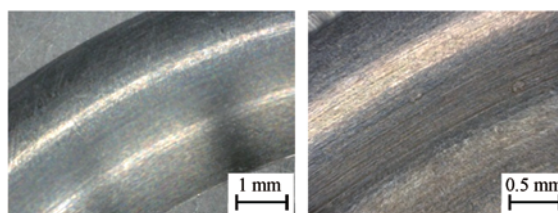


(a) AE signal waveform



(b) Frequency spectrum

Fig. 4 Typical AE signal waveform detected at around 50 hours and its frequency spectrum.



(a) before the test (b) after 50 hours

Fig. 5 Micrographs of the raceway surface of the bearing (shaft washer).

50 時間運転した後の軌道面の観察結果である。50 時間運転後の軌道面では、玉が通過した後である摺動痕を確認することができる。したがって、0.1 MHz 以下の周波数ピークは、軌道面のなじみに起因するものとする。

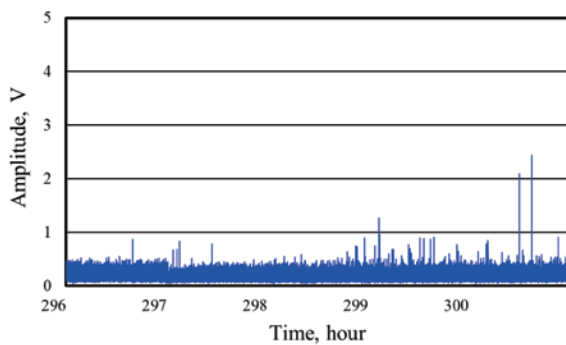
3.2 軸軌道盤フレーキング発生時の変化

試験開始から約 300 時間経過付近の AE 信号振幅および振動の大きさの変化を図 6 に示す。299 時間を過ぎた頃から大きな突発型 AE 信号を検出しているが、振動の大きさには変化がみられない。300 時間を過ぎた頃に得られた典型的な AE 信号原波形とその周波数解析結果を図 7 に示す。この周波数解析結果から、これまでと同様に周波数ピークが 0.1 MHz 付近のみならず、0.2~0.3 MHz 付近にも存在することが確認された。

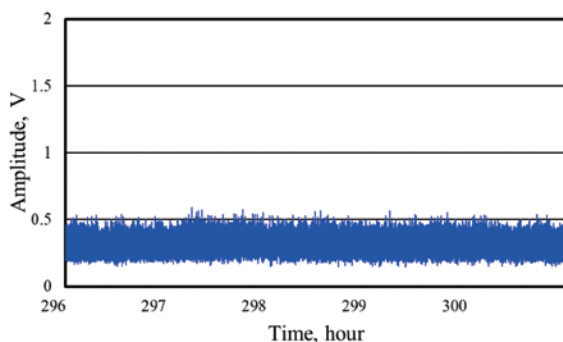
試験開始から約 306 時間後、大きな振動の検知により、機械の停止装置が作動して運転が停止した。軸軌道盤を取り外して軌道面の観察を行った結果、軌道面にフレーキングが確認され

た。この時の AE 信号振幅および振動の大きさの変化を図 8 に示す。303~304 時間の間と停止直前に大きな突発型 AE 信号を検出しているが、振動では停止直前に検出したのみである。大きな突発型 AE 信号が検出された 303 時間頃に得られた典型的な AE 信号原波形とその周波数解析結果を図 9 に示す。この周波数解析結果から、これまでと同様に周波数ピークが 0.1 MHz 付近のみならず、0.2~0.3 MHz 付近にも存在することが確認された。

図 10 は、フレーキング発生前の約 300 時間後と軸軌道盤フレーキング発生時の約 306 時間後に関する軸受軌道面の観察結果である。図 10(a) の軌道面の写真はこれまでの軌道面と大きな変化はみられず、摺動痕全体になし地面が形成されていることがわかる。対して図 10(b) では、中心部分に表層部が剥がれ落ちたフレーキングを確認できる。

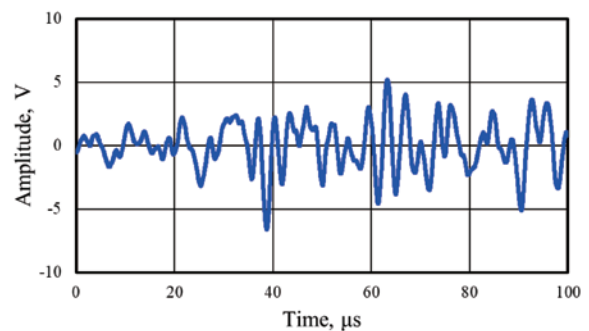


(a) AE envelope signal

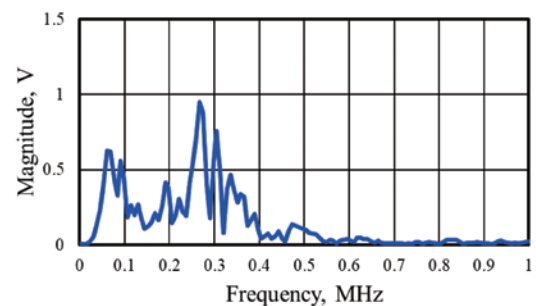


(b) Amplitude by vibration

Fig. 6 Changes in the AE signal and the vibrational acceleration about 300 hours later from the start of the rolling fatigue test.

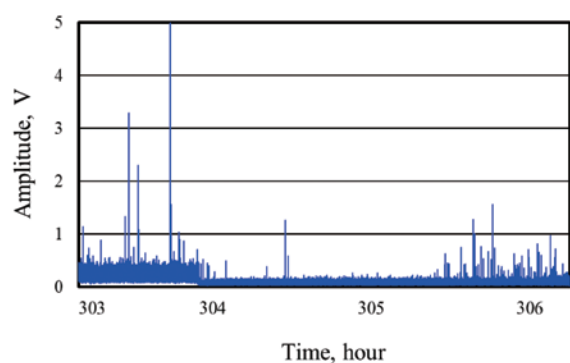


(a) AE signal waveform

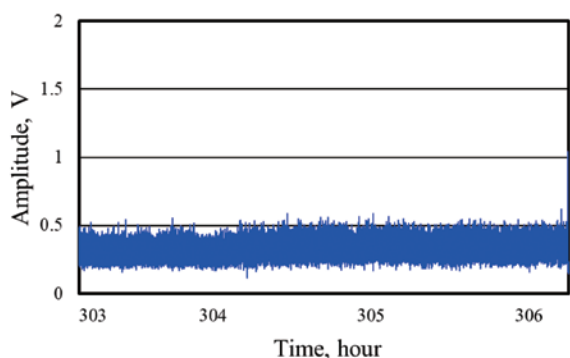


(b) Frequency spectrum

Fig. 7 Typical AE signal waveform detected at around 300 hours and its frequency spectrum.



(a) AE envelope signal



(b) Amplitude by vibration

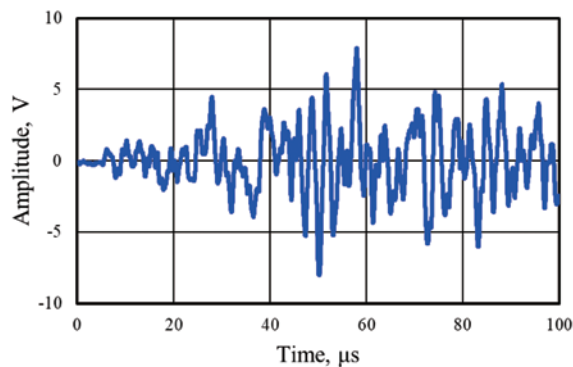
Fig. 8 Changes in the AE signal and the vibrational acceleration about 306 hours later from the start of the rolling fatigue test.

3.3 ハウジング軌道盤フレーキング発生時の変化

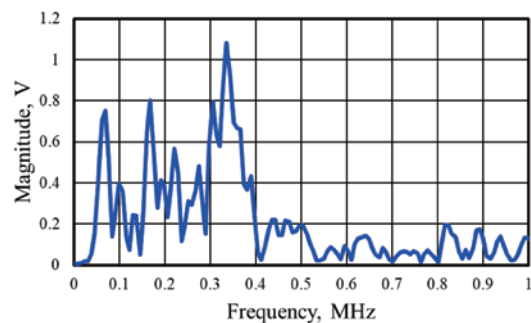
軸軌道盤がフレーキングした後、軸軌道盤を交換して試験を継続し、その約 80 時間後に大きな振動の検知により、機械の停止装置が作動して運転が停止した。ハウジング軌道盤を取り外して軌道面の観察を行った結果、軌道面にフレーキングが確認された。

機械が停止する直前までの AE 信号振幅および振動の大きさの変化を図 11 に示す。大きな突発型 AE 信号を 380 時間経過して間もなく検出しているが、振動に関しては停止直前の 383 時間に振幅値の上昇がみられた。停止する 383 時間直前に得られた典型的な AE 信号原波形とその周波数解析結果を図 12 に示す。この周波数解析結果から、大きな周波数ピークが 0.2 MHz 付近に存在することが確認できる。

ハウジング軌道盤のフレーキングの観察結果

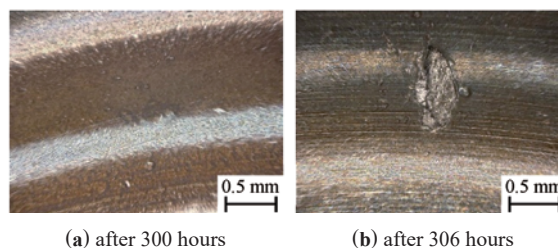


(a) AE signal waveform



(b) Frequency spectrum

Fig. 9 Typical AE signal waveform detected at around 306 hours and its frequency spectrum.



(a) after 300 hours

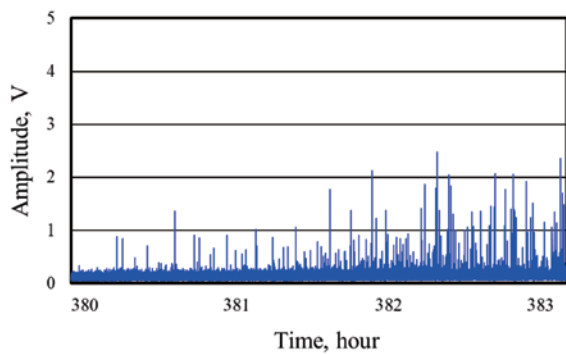
(b) after 306 hours

Fig. 10 Micrographs of the raceway surface of the bearing (shaft washer).

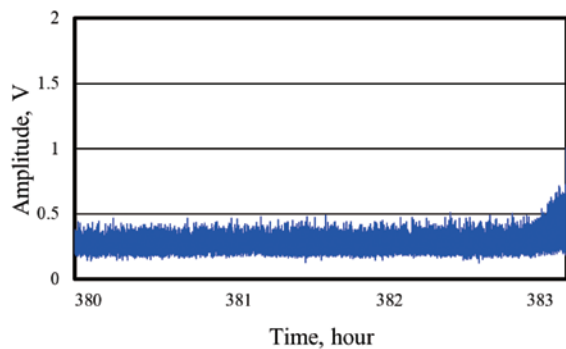
を図 13 に示す。これより、中心部分に表層部が剥離したフレーキングの発生を確認できる。したがって、0.2~0.3 MHz の周波数帯域に現れる周波数ピークは、フレーキングに起因するものと考えられる。

3.4 圧痕傷形成実験による AE 周波数の確認

圧痕傷形成時において得られた AE 信号波形の周波数解析結果を図 14 に示す。図 14(a) の低荷重では、0.1 MHz 付近に周波数ピークが存在している。また、図 14(b) の高荷重では、0.1



(a) AE envelope signal

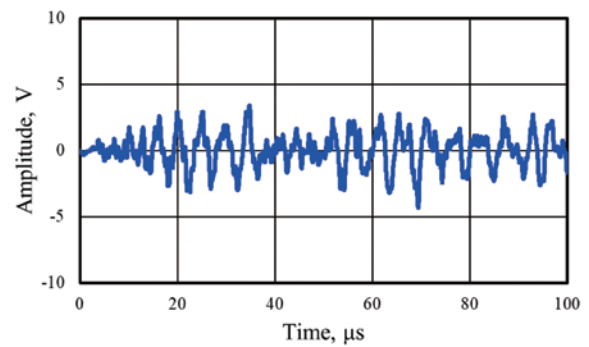


(b) Amplitude by vibration

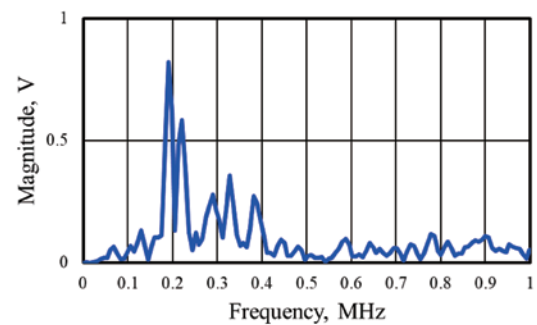
Fig. 11 Changes in the AE signal and the vibrational acceleration about 383 hours later from the start of the rolling fatigue test.

MHz 付近のみならず 0.2 MHz 付近にも周波数ピークが存在していることがわかる。いずれの場合も 0.1 MHz 付近に周波数ピークが確認されていることから、これは押し込みによる塑性流動が生じる際の特徴と考えられる。これは、3.1 節で述べた軸受疲労試験の初期段階でみられた周波数帯域の特徴と類似しており、なじみ過程も同様に表面突起の塑性流動が生じているためといえる。摩耗を伴わないすべり摩擦時にも同様の周波数ピークが確認されている⁴⁾。さらに、高荷重時には圧痕端部でクラックが生成することも考えられるため、0.2~0.3 MHz の周波数帯域は軸受クラックの発生・進展に起因するものといえる。他の疲労試験などにおいても、これらと同様の特徴が得られている^{5,6)}。

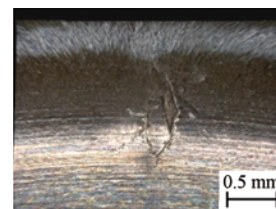
本試験では、新品の軸受が寿命に至るまでに、摺動面のなじみ、材料内部のクラック発生・進展、フレーキングと大きく三つの段階に分けることができると考えられる。AE 法では、この



(a) AE signal waveform



(b) Frequency spectrum

Fig. 12 Typical AE signal waveform detected at around 383 hours and its frequency spectrum.

Fig. 13 Micrograph of the raceway surface of the bearing (housing washer).

三つの段階を AE 信号振幅および周波数スペクトルの変化から判断できるが、振動法では停止直前まで大きな変化はなかった。よって、AE 法は従来の診断方法（振動法）に比べ、早期検出にとっても有効な手法であるといえる。

4. 結 言

本研究では、AE 法を用いたスラスト玉軸受の疲労損傷の早期検知に関して検討を行った。得られた結果は以下の通りである。

(1) 軸受疲労試験の運転時間が経過するにつ

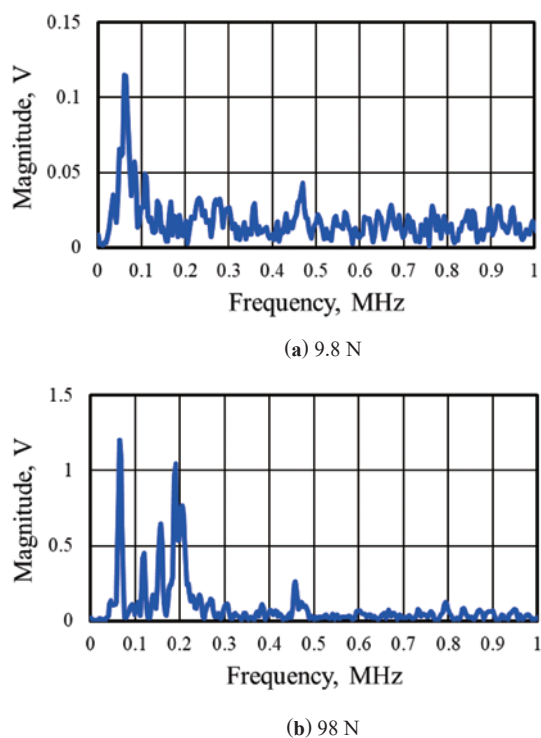


Fig. 14 Frequency spectrum of the AE signal waveform detected in the indentation test.

れ、軌道面の損傷過程に対応して AE 信号原波形の周波数スペクトルが変化することがわかった。

- (2) 運転開始初期段階では、0.1 MHz 以下の周波数帯域に軌道面のなじみ（表面突起の塑性流動）に起因する主ピークが確認される。
- (3) 運転開始からしばらくして、材料内部を起点としたクラックが発生または進展する際に、突発型 AE 信号が検出されることがわかった。この AE 信号の周波数成分は 0.2~0.3 MHz に周波数ピークをもつ。
- (4) 材料内部を起点としたクラックが発生または進展する際には AE 信号振幅に突発的な上昇がみられるが、振動法ではその変化を捉えることができないことから、AE 法は軸受疲労損傷早期検知にとっても有効といえる。

- (5) 人為的に軸受の軌道面に圧痕傷を形成させる実験において、低荷重では塑性流動に起因した 0.1 MHz 付近の周波数ピーク、高荷重ではクラックの発生・進展に起因した 0.2~0.3 MHz の周波数ピークが現れることを確認した。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、軸受疲労試験に関するご助言・ご協力をいただいた千葉大学大学院融合理工学府 元助教 大森達夫 先生に深謝の意を表する。また、実験の補助をいただいた千葉大学大学院融合理工学府 基幹工学専攻 機械工学コースの当時学生であった戸波佳史 氏に感謝申し上げる。

参考文献

- 1) John Moubray: Reliability-centered Maintenance Second Edition, Industrial Press Inc., (2000) pp.11-14.
- 2) 長谷亜蘭, 滝口駿也, 大森達夫: AE 計測を用いた転がり軸受の疲労早期検出に関する研究, トライボロジー会議予稿集 高松 2017-11, G46 (2017).
- 3) 長谷亜蘭: 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, 78 巻, 10 号 (2012) pp.856-861.
- 4) A. Hase, M. Wada, H. Mishina: Scanning Electron Microscope Observation Study for Identification of Wear Mechanism Using Acoustic Emission Technique, Tribology International, Vol.72 (2014) pp.51-57.
- 5) A. Hase, H. Mishina, M. Wada: Correlation between Features of Acoustic Emission Signals and Mechanical Wear Mechanisms, Wear, Vol.292-293 (2012) pp.144-150.
- 6) 長谷亜蘭: 摩耗計測の進化と可能性, トライボロジー会議予稿集 東京 2018-5, (2018) pp.430-431.