

# 自励振動オイルホワールの周波数応答と潤滑油解析

太田 博光<sup>1†</sup>, 清水 慧<sup>2</sup>, 福井 良輔<sup>3</sup>, 長橋 尚也<sup>4</sup>, 山田 雄太<sup>5</sup>

## Frequency response and lubricant analysis of oil whirl in kind of self excited vibration generated in sliding bearings

Hiromitsu Ohta<sup>1</sup>, Satoru Shimizu<sup>2</sup>, Ryousuke Fukui<sup>3</sup>,  
Naoya Nagahashi<sup>4</sup>, and Yuta Yamada<sup>5</sup>

**Abstract** : This paper shows the vibration characteristics of a sliding bearing. Especially, the self-excited vibration to be called as oil whirl generated in sliding bearing is studied in the current paper. Four methods like trajectory analysis, frequency response function analysis, particle numbers of wear debris and SOAP-T based on lubricant analysis are analyzed to clarify the vibration characteristics of oil whirl. The oil whirl in a sliding bearing is a characteristic self-oscillation, which occurs at a rotation speed less than the twice of the critical speed of the experimental system. In addition, when oil whirl is generated in a sliding bearing, the frequency response in all domains of frequency is suddenly become larger compared to that in the case of normal conditions. It seems that simultaneous development of oil whirl generates the large damage to the rotary machinery system. Furthermore, the amount of whirling to the shaft generated by the oil whirl are identified large in the horizontal, vertical and axial directions of sliding bearing. Particularly, the amount of whirling in the horizontal direction is identified larger, because, there is no suppression as gravity and structural barrier in this direction like that in the vertical and in the axial directions.

**Key words** : Self-Excited Vibration, Oil Whirl, sliding bearing, frequency response, lubricant analysis, SOAP-T.

### 1.はじめに

近年、船舶の機械設備は生産効率の維持とメンテナンスコスト削減のため限界まで稼働されている。長期間の連続稼働や高負荷な環境下での操業が要求され、時間経過と共に機械設備は消耗し、性能の低下によりエネルギーロスが発生する。結果的に操業コストは増加し、生産効率は低下してしまう<sup>1)</sup>。機械設備の故障を未然に防ぎ、且つ余寿命を延ばすためには定期的なメンテナンスは欠かせない。また生産ラインでは重要機器を停止してしまうと利益に多大な影響を及ぼしてしまう。重要機器の中には、レシプロエ

ンジンやタービンなど高速回転機械も多く含まれ、その軸の支持には滑り軸受が使用されている。滑り軸受は転がり軸受に比べ、耐荷重や余寿命に優れ、メンテナンスが容易<sup>2)</sup>である。また滑り軸受内に充填された潤滑油は油膜圧力により軸を支えることで軸と軸受間の直接接触が防止している。そのため、効果的に振動や騒音を低下させることができる。一方、オイルホワール<sup>3),4),5)</sup>と呼ばれる自励振動現象が発生することがある。オイルホワールは回転軸の1次危険速度（固有振動数）の2倍以下の回転数で発生する不安定振動で、軸が大きく振れ回り、摩擦を招き、損傷の原因となる可能性がある<sup>6),7)</sup>。本研究では、オイルホワール発生

2022年11月30日受付、2023年2月13日受理

1 水産大学校 海洋機械工学科 (Department of Ocean Mechanical Engineering, National Fisheries University)

2 水産大学校 水産学研究科 研究科生(Graduate School of Fisheries Science, National Fisheries University)

3 株式会社 神鋼エンジニアリング&メンテナンス(Shinko Engineering & Maintenance Co.,Ltd)

4 日鉄テックスエンジ株式会社(NIPPON STEEL TEXENG. CO., LTD.)

5 ダイキン工業株式会社 (DAIKIN INDUSTRIES, LTD.)

<sup>†</sup>別刷り請求先(Corresponding author): ohta@fish-u.ac.jp

時の周波数応答, 回転軸の振れ回りの軌跡<sup>8)</sup>を求める事で振動特性の特徴を解析している。さらに滑り軸受中の潤滑油の摩耗粉粒子数である計数汚染度をリアルタイムで求めることで, オイルホワールによる損傷の可能性を検証している。これまで計数汚染度をリアルタイムで求める事は困難であったが, 滑り軸受の配管中にトライボテックス株式会社製パーティクルメイトを応用することで計数汚染度をリアルタイムで把握する事が可能となった。さらに摩耗粉粒子をフェログラフィーやSEM (走査型電子顕微鏡)・XMA (X線マイクロアナリシス) で解析することで直接接触到に起因する損傷を裏付けている。

## 2.滑り軸受試験機および解析手法

### 2.1 滑り軸受試験機

Fig.1は本実験で用いた状態監視対象である滑り軸受試験機 (以下, 試験機と略) である。接続した計測ボックスで軸の回転数を0[rpm] ~ 5000[rpm]の範囲で増加・維持・減少することが可能である。供試油には無添加機械油VG22(ISO粘度グレード22)を使用した。供試油は試験前に新油を濾過したものを使用している。試験機の滑り軸受の外輪の材質は真鍮, 軸はSUS304である。

### 2.2 振動解析手法

周波数応答と軸の振れ回りの軌跡による振動解析を行う。Fig.2に加速度ピックアップを設置している反駆動側の滑り軸受を示す。加速度ピックアップは滑り軸受箱の水平方向と水平から45°方向に設置されている。周波数応答では回転数の変化に対応する振動応答の変化を求めた。周波数応答は水平方向からのみ測定を行っている。軸の振れ回りの軌跡では, 水平方向値と座標変換を行った鉛直方向値から得られた値から求められている。

### 2.3 リアルタイム潤滑油解析手法

潤滑油の流れはFig.2に示すように滑り軸受上部に設置された油槽から軸受内部に

導かれ, 下部の配管から排出され, 圧送ポンプで循環される構造である。潤滑油解析ではオイルホワールが発生する際の摩耗粉粒子数の変化をリアルタイムで観察している。手法として滑り軸受下部から油槽間の配管にトライボテックス株式会社製パーティクルメイト(以下,潤滑油解析装置)を配置し, 摩耗粉粒子数の変化を解析することで滑り軸受の軸と外輪の接触状態を推定している。

## 3.測定方法

### 3.1 振動解析手法による実験方法

試験機反駆動側滑り軸受の軸受箱に加速度ピックアップを水平方向に設置して周波数応答の測定を行う。最初に回転数を500[rpm]から5000[rpm]まで増加させ測定を行う。次に, 回転数を5000[rpm]から500[rpm]まで減少させ測定

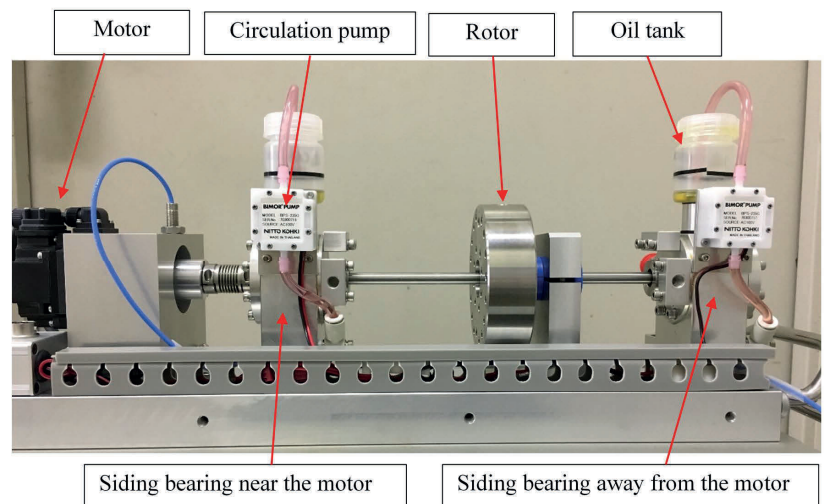


Fig.1 Sliding bearing test machine

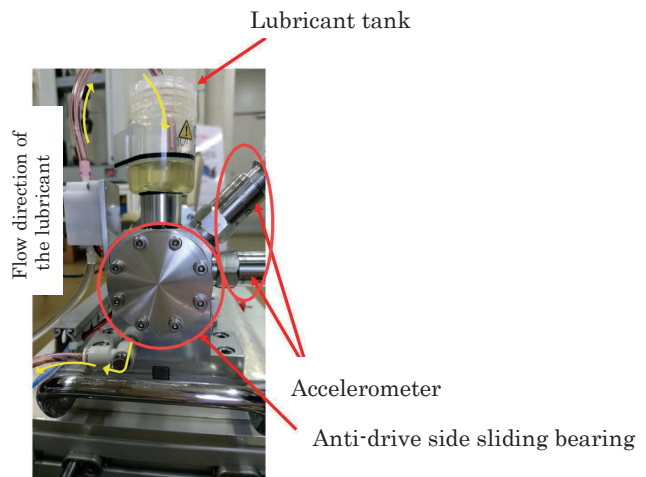


Fig.2 Sliding bearing mounted on two accelerometers

する。同一条件でそれぞれ3回ずつ測定を行っている。本実験では剛性が低い木製の机と剛性が高いコンクリート床にそれぞれ試験機を設置して測定を行った。鉛直方向の周波数応答値は剛性に違いが見られなかったため、変化の大きな水平方向の周波数応答値のみで比較している。

### 3.2 リアルタイム潤滑油解析手法による実験方法

試験機反駆動側滑り軸受の潤滑油を用いて解析を行った。まず濾過された新油をサンプルボトルから圧送ポンプで試験機の油槽へ送る。油槽から滑り軸受内に供試油が送られ、軸受下部から潤滑油解析装置のポンプにより圧送される。潤滑油解析装置により計数汚染度が算出された後、供試油は空のサンプルボトルに回収される仕組みである。よって常に滑り軸受内を通過する潤滑油は濾過された新油である。測定では最初、一次危険速度(固有振動数)以下の試験機回転数1500[rpm]で保持され、摩耗粉粒子数が低く定常状態になったのを確認してから試験を開始した。測定では回転数1500[rpm]から5000[rpm]まで増加される。オイルホワール発生回転数の5000[rpm]付近に達した後はそのまま5000[rpm]で維持し、計数汚染度の解析を行う。同時に1500[rpm]から5000[rpm]まで上昇している間に水平方向に設置した加速度ピックアップから得られる周波数応答も算出された。

## 4. 振動・潤滑油解析の結果

### 4.1 振動解析の結果

Fig.3は剛性が低い基礎に設置した試験機の回転数増加時の3回分と回転数減少時の3回分の周波数応答値を示す。回転数増加時では、1500[rpm]付近で応答値が増加し、その後、減少し、約2200[rpm]付近から再度増加し、2750[rpm]でピークに達し、4000[rpm]付近でオイルホワールが発生している。回転数減少時では、5000[rpm]から4500[rpm]付近まで応答値が減少した後、再び増加し、3650[rpm]付近にて応答のピークに達した後に急激に減少しオイルホワールが終了している。回転数増加時と減少時でオイルホワール発生回転数に差が生じておりヒステリシスが生じていると考えられる。剛性の低い基礎の固有振動数が影響を与えている。Fig.4は剛性が高い基礎に設置した試験機の回転数増加時の3回分と回転数減少時の3回分を測定した周波数応答値である。回転数増加時では、危険速度の2543[rpm]で共振が発生し、その後、減少し、回転数

3700[rpm]付近でオイルホワールが発生した。回転数減少時では、3450[rpm]までオイルホワールが持続している。これも同様にヒステリシスである。

次に、Fig.5は試験機を剛性の高い基礎に設置し、水平方向と45°方向に設置した加速度ピックアップから得られた回転軸の振れ回りの軌跡の測定結果である。横軸は水平方向、縦軸は鉛直方向の電圧値である。鉛直方向の値は水平方向と45°方向に設置した加速度ピックアップから得られた値から変換を行っている。

危険速度以下の回転数1498[rpm]までは僅かな振幅の増加しか確認できず、危険速度の2568[rpm]付近で軌跡の振れ回りが大きくなっていることが分かる。共振点を超えた3788[rpm]で軌跡の振れ回りが小さくなり、危険速度を通過したことが分かる。オイルホワールが発生する回転数4182[rpm]で8の字を描くように非常に大きく振れ回り始め、4899[rpm]で更に振れ回り幅が増加した。水平方向の値に比べ、鉛直方向の値が小さい理由は重力により抑制さ

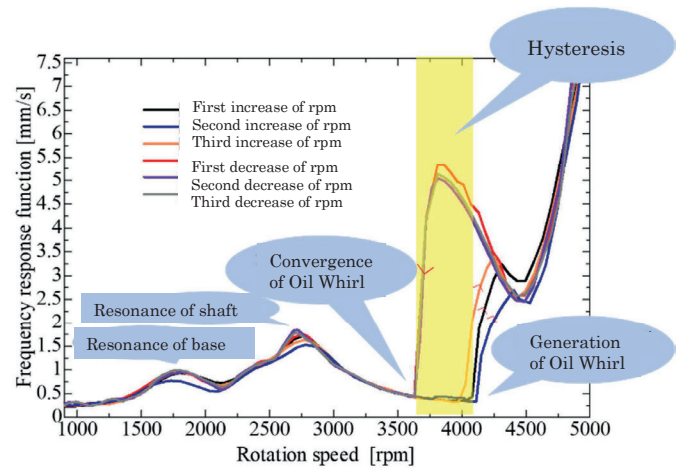


Fig.3 Frequency response function in the case of low rigidity

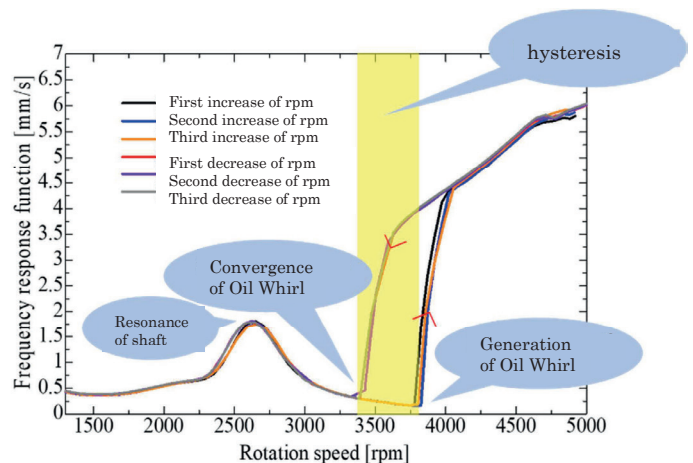


Fig.4 Frequency response function in the case of high rigidity

れているからである。Fig.4の剛性が高い基礎での周波数応答値の帯域でも同様に危険速度の回転数とオイルホワール発生時の回転数の応答値が非常に大きくなっていることが分かる。

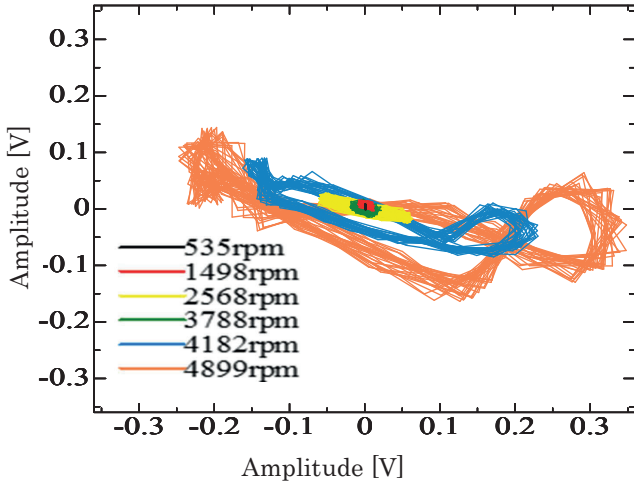


Fig.5 Shaft trajectory of rotating shaft

4.2 リアルタイム潤滑油解析の結果

本章以降は試験機を剛性の高い基礎に設置し得られたデータである。Fig.6に粒子数と気泡数およびNAS等級の3項目での潤滑油解析結果を示す。横軸は経過時間、縦軸に計数汚染度、NAS等級を取っている。NAS等級とは、各粒径範囲で区分された100[ml]中の粒子数で割り当てられた等級で、高い値ほど汚染が進行していることを表す指標である。図の上部に対応する試験機の回転数を記入している。1500[rpm]から5000[rpm]で回転数を上げて測定した領域、オイルホワール時の5000[rpm]で維持した領域、5000[rpm]から回転数を下げた領域に分けられている。図の下部に周波数応答の測定を行った時刻に合わせて応答値を記載している。5000[rpm]に達した後、計数汚染度が徐々に増加し、回転数5000[rpm]を維持している間に計数汚染度のピーク値10,000[個/100ml]が現れた後、減少し、回転数を下げたから再度、計数汚染度が上昇した。解析結果と回転数にタイムラグがあるがオイルホワールが発生する回転数4000[rpm]を超えたあたりから計数汚染度が徐々に増加していることが分かる。よって、オイルホワールの発生により滑り軸受の軸と外輪の直接接触が発生したものと考えられる。一方、1次危険速度(固有振動数)約2500[rpm]付近では計数汚染度の増加が観測できなかったため、固有振動数を通過する際に軸と外輪の直接接触はなかったと考えられ

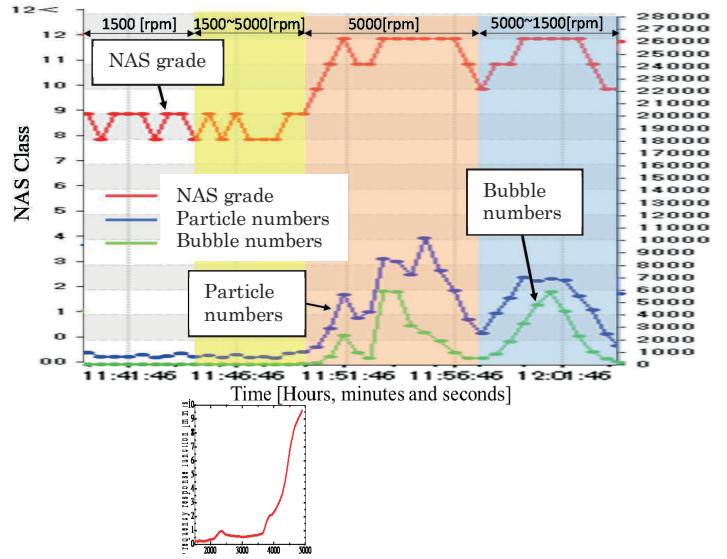


Fig.6 Particle numbers of wear debris in the lubricant

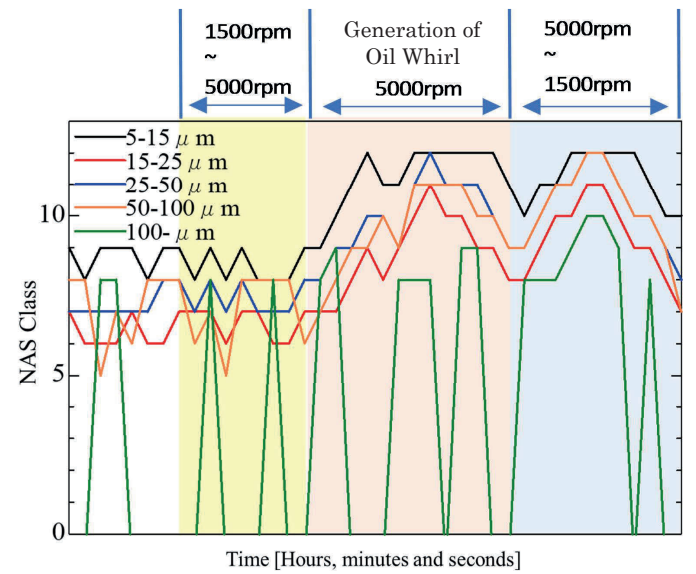


Fig.7 Time variation of particle size according to NAS classification

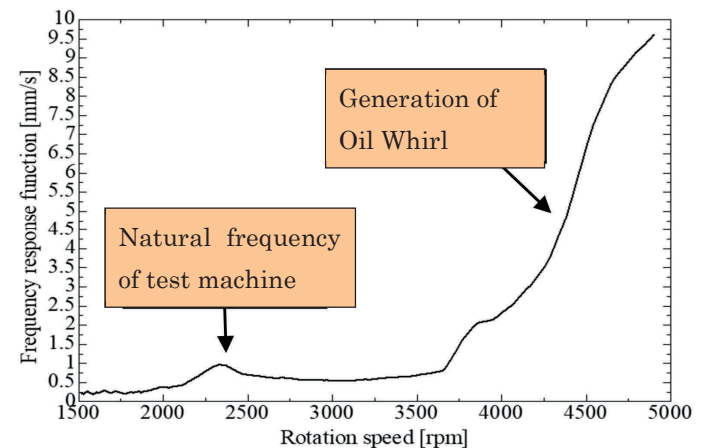


Fig.8 Frequency response function in lubricant analysis

る。Fig.7に粒子サイズ別にNAS等級を示す。オイルホール発生に伴う直接接触により各粒子径とも摩耗粉粒子数は大幅に増加していることが分かる。また、Fig.8に潤滑油試験中の回転数を増加させた時の周波数応答の結果も示す。周波数応答においても危険速度（固有振動数）による共振とオイルホールが発生していたことが示されている。

### 4.3 摩耗粉粒子の分析

潤滑油分析で得られた摩耗粉粒子の分析結果を示す。Table1はSOAP-T, Fig.9はフェログラフィー, Fig.10はフィルターの残渣, Fig.11はSEM画像である。SOAP-Tでは鉄と銅、亜鉛の金属元素が確認され、特に銅元素が多く見られた。滑り軸受の軸材料はSUS304である。また滑り軸受外輪は真鍮であることから、これらの材質がオイルホールによって軸と外輪の直接接触が発生し、潤滑油中に混入したものと考えられる。Fig.9では微小領域の油膜切れにより発生するシビア粒子や、異物が潤滑部に噛み込むことにより発生する切削粒子が確認された。図中の切削粒子は線状であることから磁性を帯びているようである。これは磁性のない銅元素に磁性を帯びた鉄の元素が付着した結果だと考えられる。Fig.10の潤滑油を濾過したフィルター上の残渣を観察した結果、銅系の金属片が確認された。銅系粒子のサイズは数[ $\mu\text{m}$ ]～約80[ $\mu\text{m}$ ]であった。また、フィルターで捕捉された粒子の組成をXMAにより分析した結果、鉄を主成分とした粒子と、銅と亜鉛を主成分とした粒子が確認された。SOAP-Tの分析結果と合わせて滑り軸受外輪の成分である真鍮と推定される。よってオイルホールにより軸と外輪の直接接触が発生していると考えられる。また、Fig.11に示すSEMで観察された銅系摩耗粉粒子の表面には「すべり線」と呼ばれる条痕が見られることから、滑り軸受の軸と外輪の直接接触による摺動現象が発生したものと推定される。

## 5. 結 論

滑り軸受において、1次危険速度（固有振動数）の2倍以下の回転数では自励振動であるオイルホールが発生することがある。オイルホールは固有振動数による共振よりも遥かに大きな振幅の振動を発生させることが周波数応答値と回転軸の振れ回りの軌跡から分かった。また滑り軸受の配管中にトライボテックス株式会社製パーティクルメイトを応用することで計数汚染度をリアルタイムで把握する

事が可能となった。このリアルタイム潤滑油解析によりオイルホール発生時に計数汚染度が急激に増加しており、軸と滑り軸受外輪との直接接触が発生したことが推測された。この情報を元に軸と滑り軸受外輪との直接接触の状態を推定することが出来、今後潤滑油のメンテナンスが適

Table1 Results of SOAP-T

	ppm	Under 0.8 $\mu\text{m}$	Over 0.8 $\mu\text{m}$	Total
SOAP-T	Fe	0	0.1	0.1
	Cu	0	0.2	0.2
	Zn	0	0.1	0.1

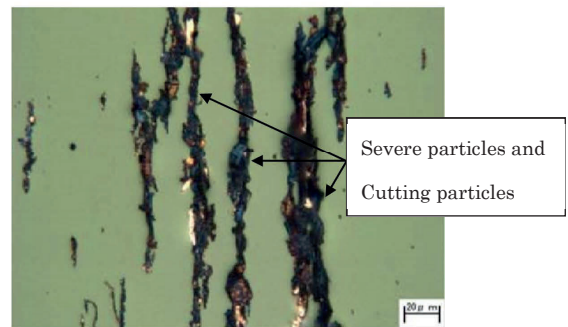


Fig.9 Ferrography picture of wear debris



Fig.10 Residue within the filter

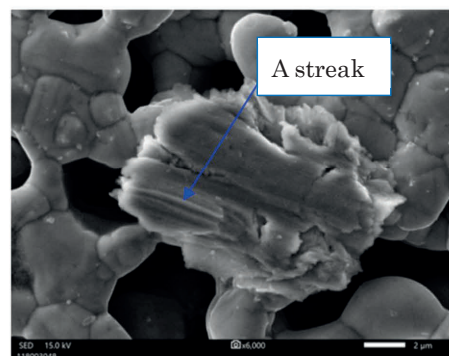


Fig.11 SEM picture of wear debris

切かつ容易になると思われる。さらに、摩耗粉粒子の成分分析結果により、摩耗粉粒子は滑り軸受の軸と外輪の材質と一致したことから、直接接触により摩耗が発生したと裏付けられる。一方、試験機の1次固有振動数による共振時には軸と外輪の直接接触は今回、発生しなかったと考えられる。以上の結果を踏まえ、設備管理の面ではオイルホワールにより軸が外輪に直接接触することで傷、摩耗、焼き付き、疲労などに結び付くことが予測される。また発生した多量の摩耗粉粒子が潤滑油を汚染することで軸受の機能と信頼性を低下させる危険性があることが分かった。

## 謝 辞

本研究は科学研究費補助金「基盤研究(C)」課題番号17K06979および社団法人 造船学術研究推進機構 助成金の援助を受けて実施されたことを記し、謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 設備管理技術辞典編集委員会編：「設備管理技術辞典」, (株)産業技術サービスセンター, 65-73(2003)
- 2) 兼田 楨宏 他：「基礎機械設計工学」, 理工学社, 108(2009)
- 3) E. Capone, “Oil Whirl in Journal Bearings under No Load Conditions”, WEAR, Vol.26, No.2, 2017-217.(1973)
- 4) 豊田利夫：「設備診断のための信号処理の進め方」, 日本プラントメンテナンス協会, 245-246(1996)
- 5) 岩壺卓三 他：「振動工学の基礎」, 森北出版, 140-141(2016)
- 6) E.C. Fitch, “Proactive Maintenance for Mechanical Systems Second Edition” , FES, Inc., 28(1992)
- 7) 日本トライボロジー学会編：「トライボロジー故障例とその対策」, 養賢堂, 6-25(2000)
- 8) L. Wang and R.Gao, “Condition Monitoring and Control for Intelligent Manufacturing” , Springer Press, 111-114(2005)