

# 電磁診断技術による転がり軸受の劣化進展過程の計測及び診断

Electromagnetic Nondestructive Detection for Monitoring the Damage Progress of Ball Bearings

日本原燃株式会社	馬渡 慎吾	Shingo MAWATARI	Member
株式会社 IIU	角皆 学	Manabu TSUNOKAI	Non Member
株式会社 IIU	高瀬 健太郎	Kentaro TAKASE	Member
株式会社 IIU	萱田 良	Ryo KAYATA	Member

This study evaluates the outer race defect size of ball bearings in the accelerated life test by analyzing the signal of electromagnetic sensor. The electromagnetic sensor consists of a permanent magnet and a pickup coil. When a conductor passes in the static magnetic field, the generated eddy current is detected as the change of the magnetic field. The autocorrelation method is applied for sizing defects in the early phase of the damage progress and the RMS method is developed for bigger defects. With those methods, the damage progress is visualized and the characteristic of it is revealed as almost linear.

**Keywords:** electromagnetic nondestructive detection, ball bearing, signal procedure, accelerated life test

## 1. 緒言

保全合理化の観点からCBM（Condition Based Maintenance：状態監視保全）の重要性が高まる中、設備の劣化とその進展過程を正確に診断する技術が求められている。従来の振動診断や油分析等を補完する新たな技術として、電磁診断技術が挙げられる<sup>[1-5]</sup>。原子力施設を含むプラントでは、ポンプをはじめとする種々の回転機器が存在するが、電磁診断技術はそれらを振動とは全く異なる原理で測定出来ることに特徴がある。

本研究は、電磁診断技術の劣化診断への適用性研究の一環として実施したもので、回転機器の主要な劣化部位の1つである軸受に対し、損傷量の定量的評価手法の確立と劣化特性の把握を目的として行われた。電磁診断技術は、転がり玉軸受の内外輪に人工的に付与したスリット傷について、その傷幅を正確に推定できることが示されている<sup>[6]</sup>。この成果を踏まえ本研究では、健全な軸受を用いて劣化加速試験を行い、損傷を発生、進展させ、その過程の損傷量を推定することで損傷の進展状況の可視化を行った。この際、傷のサイジング手法として、<sup>[6]</sup>で用いられた「自己相関法」とともに、特定周波数帯のRMS（Root-Means-Square value：実効値）の増減から傷の長さを推定する「RMS法」を新たに考案し適用した。

## 2. 電磁診断技術の原理

電磁センサは、永久磁石等の静磁場印加部とコイル等の変動磁場検出部よりなる。静磁場中を導電体が通過したとき、導電体に誘導起電力が生じ発生する渦電流を捉える（Fig.1）。

周期性を有する回転体のベアリングやインペラに、外部から電磁センサを当てることで、誘導起電力の変化を捕捉し、劣化診断するものである。

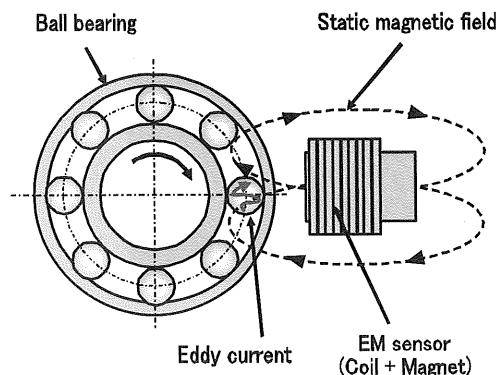


Fig.1 Principle of Electromagnetic Detection

## 3. 劣化加速試験

### 3.1 試験方法

Fig.2に劣化加速試験装置を示す。試験方法として、劣化加速試験機を用いて新品の自動調心玉軸受（複列）1204に1200kgfの荷重をかけて運転し、初期損傷を発生させる。その時点で一度試験機を止め軸受を取り外し、損傷の状態を確認する。次に再び軸受を試験機に戻し、荷重を下げて運転し、損傷を進展させる。振動加速度が5Gに到達した時点での試験終了とする。試験開始から終了まで、軸受ケーシング部に設置した電磁センサにより信号を取得する。損傷発生後の荷重を4通り変えて試験を行った（Fig.3）。

連絡先: 馬渡 慎吾, 〒039-3212 青森県上北郡六ヶ所村大字尾駿字沖付、日本原燃株式会社、再処理事業部、電話: 0175-71-2335, shingo.mawatari@jnfl.co.jp

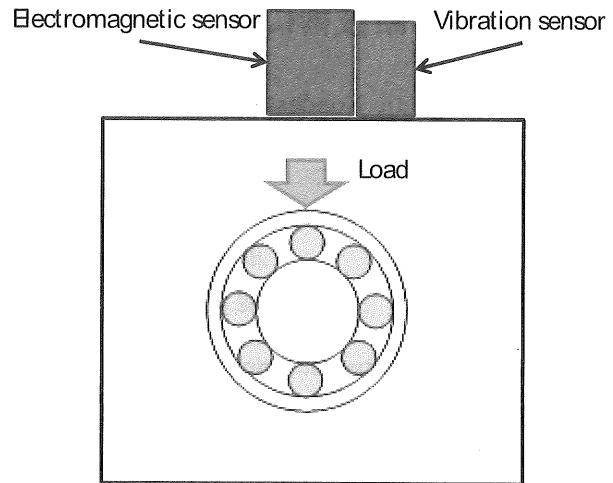
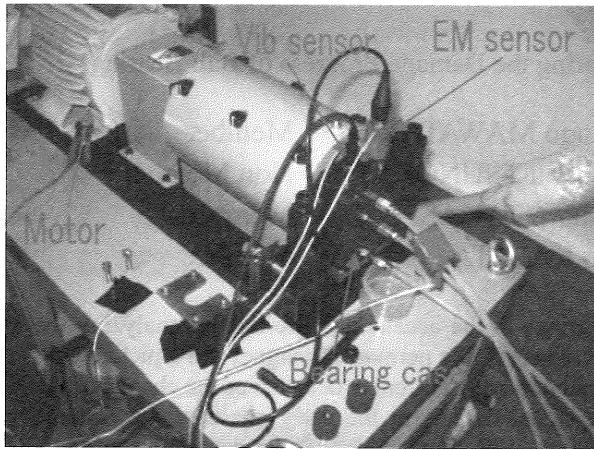
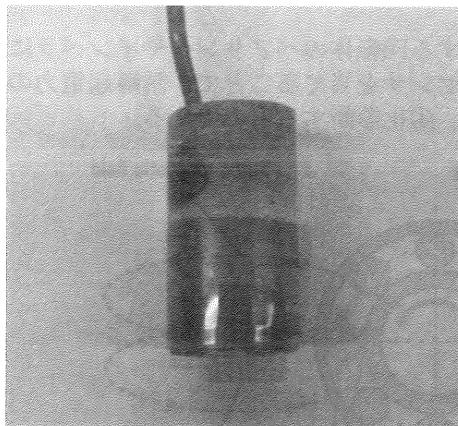


Fig.2 Accelerated aging test machine and sensor placement



軸受仕様	種類:複列自動調心玉軸受1204 動定格荷重:1020kgf
潤滑方式	強制潤滑方式の循環給油
軸回転周波数	40Hz
荷重	純ラジアル荷重 初期損傷発生までは全て1200kgf 試験No.1: 1125kgf 試験No.2: 975kgf 試験No.3: 825kgf 試験No.4: 450kgf
電磁センサ仕様	直径 :20mm 巻き数 :500ターン 磁束密度 :0.5T

Fig.3 EM(Electromagnetic) sensor and details of test conditions

### 3.2 試験結果

試験 No.1 (初期損傷後荷重 1125kgf) を例に試験結果を示す。荷重 1200kgf で運転を開始、60 分後に初期損傷が発生した。その後荷重を 1125kgf に下げ運転を再開し、40 分後に振動加速度が 5G に達した後、試験を終了した。Fig 4 に電磁信号の RMS を示す。尚、RMS は、損傷発生前の平均値を 1 とした上で表している。試験結果から、初期損傷の発生後、RMS が急激に増加しており、損傷の発生を検知していることが確認できる。また、この傾向は、全ての試験条件にて同様の結果を得ている。

Fig 5 に初期損傷発生時と試験終了時の軸受外輪の損傷状況を示す。初期損傷は外輪のスポット状の傷が確認できるが、試験終了時には 42.5° (以下傷の長さは角度を用いて表す) まで進展し、さらに 2 列目にも剥離が発生していた。また、外輪以外の軸受の構成部品にて損傷が確認されなかった。その他の試験条件についても、最終的な損傷量の違いはあ

るもの、初期損傷時に外輪のスポット傷が発生し、その後大きく進展するという損傷形態は共通であった。

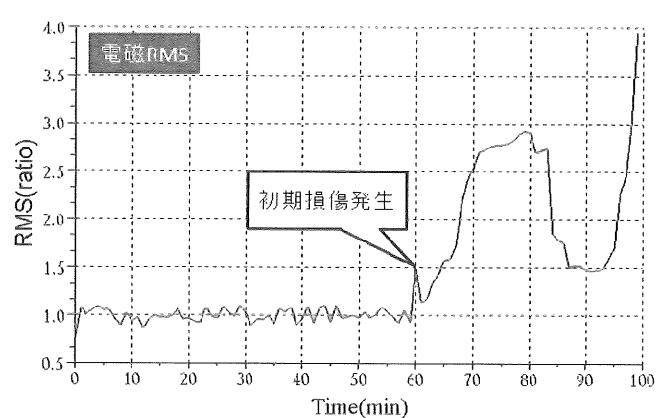
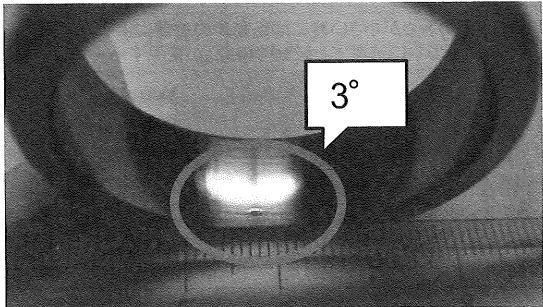
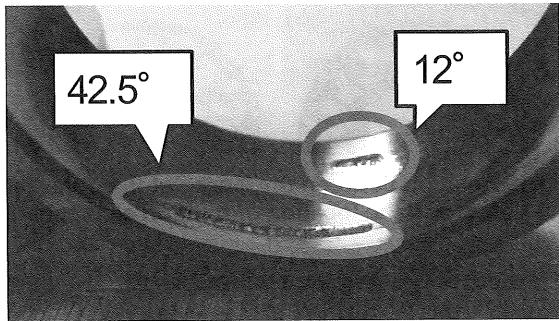


Fig.4 Electromagnetic sensor RMS (Test No.1)



(a) at occurrence of the defect



(b) at the end of the test  
Fig.5 Defects of outer race (Test No.1)

### 3.3 自己相関法による傷の長さ推定

Fig.6 に外輪剥離が発生した軸受の模式図を示す。傷上を転動体が通過する際、傷の入口(a)と出口(b)で振動が発生する。この時得られる信号は Fig 7-1 の模式図のようになる。a と b の振動の時間差が分かれば、転動体の公転速度を乗じることにより傷の長さを定量的に評価することが出来る。

a と b の時間差を求めるには、まず envelope 处理により波形を単純化する (Fig.7-2)。さらに自己相関係数をとることにより、周期性のない信号を除去し、a と b の時間差を明瞭化することができる (Fig.7-3)。自己相関係数は、信号を時間方向にシフトさせ、元の信号と比較することにより、信号自体の周期性、類似性を評価する指標である。横軸はシフトした時間を表し、 $t=0$  では元の波形と完全に一致するため、当然のことながら最大値となる。模式図の包絡線をシフトしていく場合、 $t=0$  の次に大きくなるのは傷入口に対応したピークが傷出口に対応したピークと重なる時である。よって  $t=0$  のピークと次に現れるピークの差から傷の長さに対応した時間間隔が求められる。

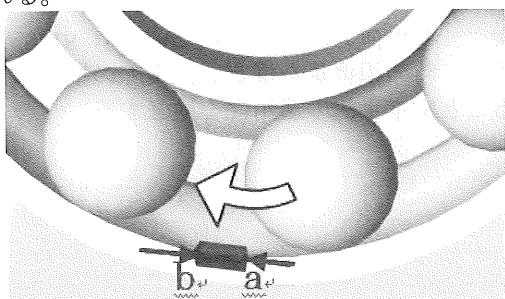


Fig.6 Image of ball bearing with defect

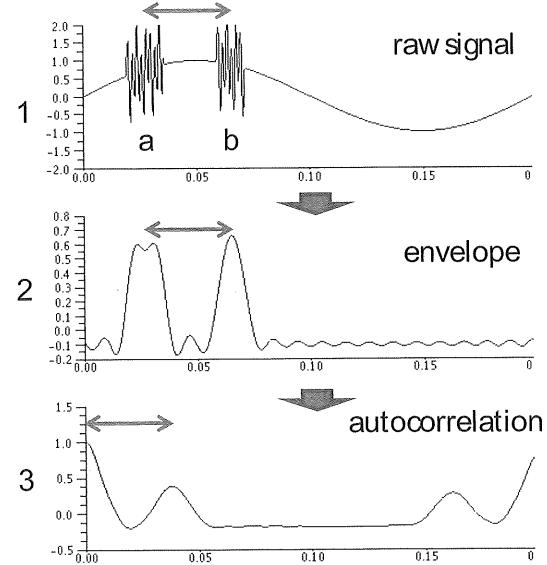


Fig.7 Image of autocorrelation method

Fig.8 に試験No.1 の試験開始 67 分と 75 分の自己相関分析結果例を示す。傷の入り口と出口の時間差を読み取ることができ、劣化加速試験にて生じた剥離についても自己相関法が適用できることが分かった。本試験では初期損傷発生時と試験終了時以外の実際の損傷量は不明であるため、各時点の推定値の精度を確かめることはできないが、<sup>[6]</sup>により、自己相関法で傷の入り口と出口に対応した時間差が得られる場合、傷の長さを正確に推定できるという結果が得られており、これを根拠に各時点の外輪傷長さの推定値を求め、損傷の進展特性を明らかにする。

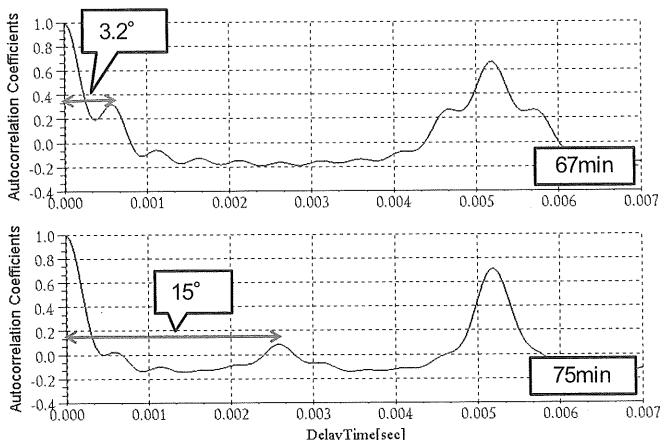


Fig.8 (Test No.1) Autocorrelation method

Fig.9 に試験 No.1 における自己相関法により得られた外輪傷進展曲線を示す。損傷発生後のどの時間の信号についても自己相関法が適用できるわけではなく、明瞭なピークが得られない場合もある。特に傷が大きく成長した場合や複列に傷が発生した場合は、波形が複雑になり、傷のサイジングが困難である。自己相関法は損傷の初期段階に適した推定手法であると言える。

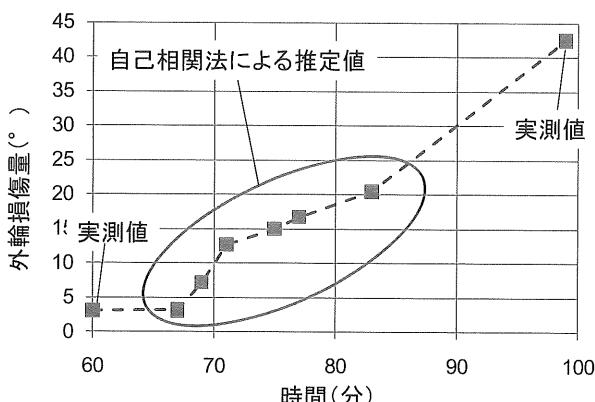


Fig.9 Evaluated damage progress by autocorrelation method (test No.1)

### 3.4 RMS による傷の長さ推定-RMS 法

自己相関法は損傷の初期段階で有用であるが、損傷が大きく進展した場合、適用が困難である。より大きなスケールの損傷量の推定法として、外輪傷の固有周波数帯の RMS の増減により傷の進展を推定する手法 (RMS 法) を考案した。外輪傷の固有周波数とは、外輪の 1 点を転動体が通過する周波数であり、外輪に傷が発生した場合、転動体が傷を通過する度に振動が発生することにより、この周波数成分が大きくなる。

#### 3.4.1 理論的仮定

傷の長さが転動体間の距離に比べて十分に小さい場合、Fig.10 上図に示す様に傷の内部に位置する転動体は内輪の回転に伴って 0 個 ⇌ 1 個と変動する。一方、傷の長さが丁度転動体間の距離に等しい場合、Fig.10 下図の様に、傷の内部に位置する転動体の数は常に 1 個である。

外輪傷中に転動体が位置した場合、その転動体は外輪との接触面積が減少するため、荷重を受ける割合が減少する。その結果、その転動体と外輪傷の接触部の縁の部分や、他の転動体に余分な荷重が加わる事になる。このような応力分布の変動は転動体の周期的な運動に影響を与えるものと考えられる。従って、外輪傷中に転動体がある状態と無い状態の間の遷移が、外輪傷の固有周波数程度で現れると考えられる。

しかし、傷の長さが丁度転動体間の距離に等しい場合には、傷内部に常に 1 つの転動体が位置する様になり、軸受全体として見た場合の応力分布は安定する事が予想される。従って先に述べた外輪傷の固有周波数成分は減少する事になる。

この仮説に基づけば、傷の長さが丁度転動体間の距離に等しい時に、外輪傷の固有周波数帯 RMS は極小値をとる。本試験に使用している軸受 1204 の場合、傷の長さが  $30^\circ$  になった時がこれにあたる。また、傷の長さが倍の  $60^\circ$  になった場合についても、傷上に存在する転動体が常に 2 つになることにより極小値が現れ、以下同様に傷の長さが  $30^\circ$  の整数倍になるごとに同様の現象が起こるものと考えられる。

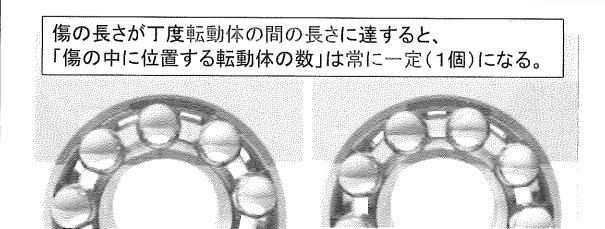
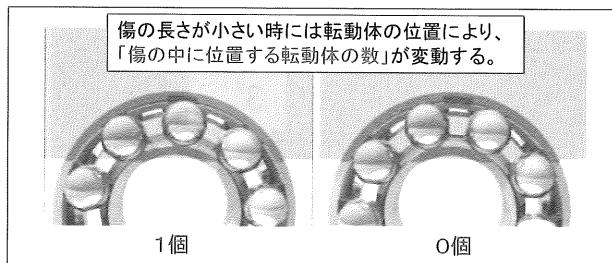


Fig.10 Relation between the length of the outer race defect and the location of rotation elements

Fig.11 に試験 No.1 における外輪傷固有周波数帯 (190-195Hz) の RMS を示す。試験開始 90 分に初期損傷発生後の RMS にて極小値を示しており、この時点で傷が  $30^\circ$  に達したと推定できる。これは Fig.9 に示した自己相関法による外輪傷進展曲線において傷が  $30^\circ$  に達する時間 (推定値) と一致している。また試験終了時は 2 つ目の極大値の手前であることから、損傷量は  $45^\circ$  より小さい程度と推定されるが、実際の外輪傷の長さは  $42.5^\circ$  であり (Fig.5)、主要な傷の長さについて正しく推定できていることが分かる。

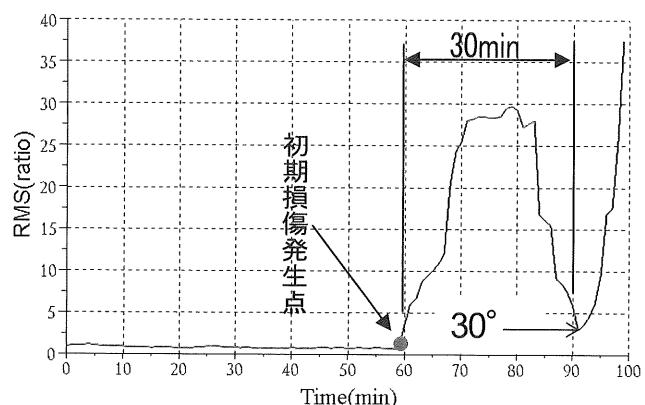
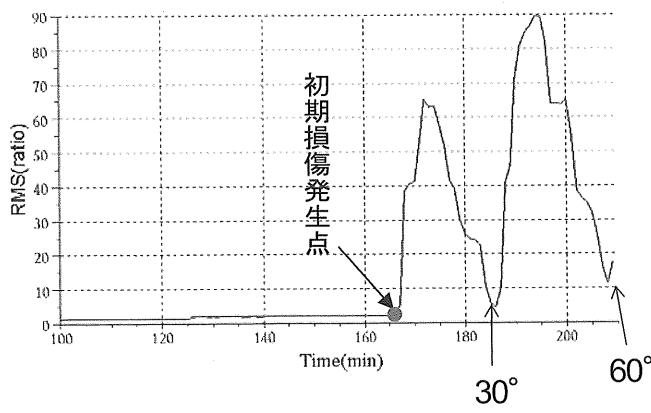
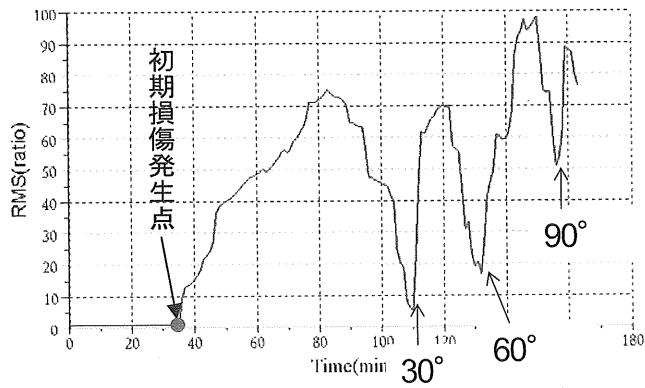
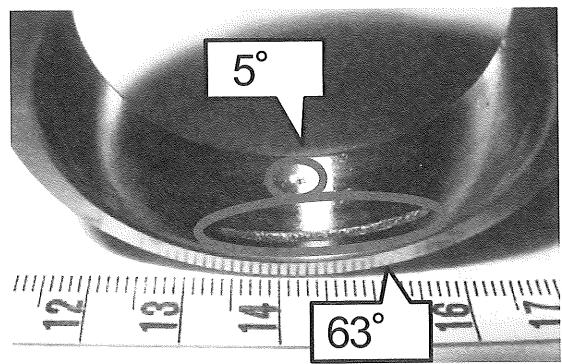


Fig.11 RMS of the outer race defect frequency (test No.1, bandpass 190-195Hz)

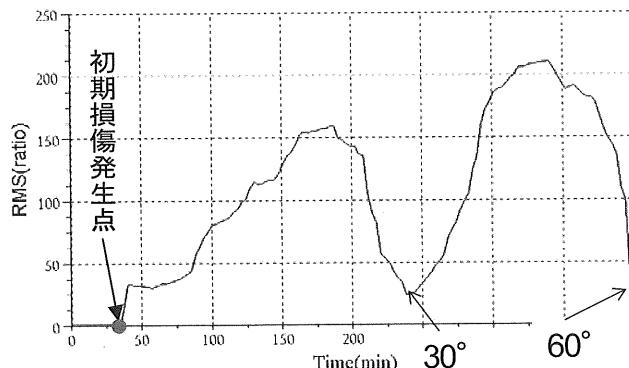
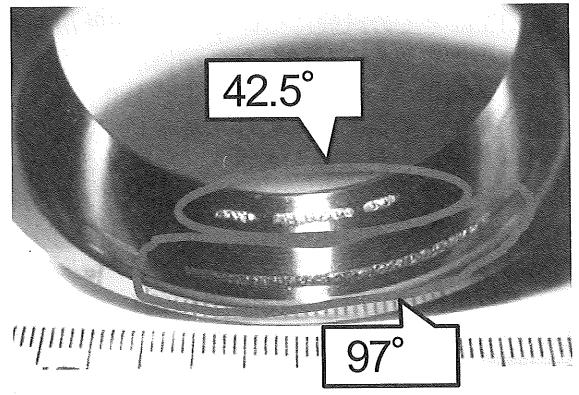
次に、その他の試験条件についても RMS 法から試験終了時の損傷量を推定し、実際の損傷量と比較することで本手法の適用性を検証する。



(a) Test No.2



(b) Test No.3



(c) Test No.4

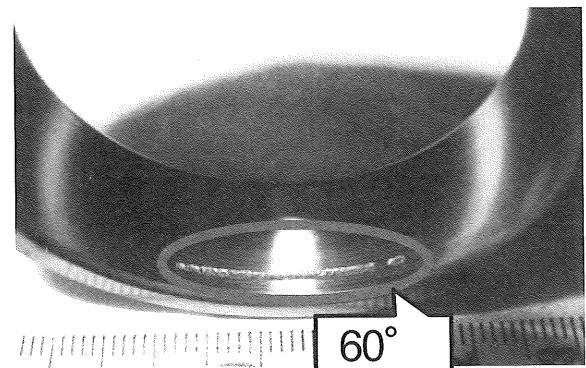


Fig.12 RMS of the outer race defect frequency and Pictures after the test (190-195Hz)

Fig.12 に試験 No.2～No.4 の外輪傷固有周波数帯 (195Hz 帯) RMS と試験終了時の外輪の様子を示す。試験 No.2 の 195Hz 帯 RMS (Fig.11(a)) から、試験終了時の外輪傷の長さは 60° 程度と推定でき、実際の損傷量と比較して正しく推定出来ていることが分かる。

試験 No.3 の 195Hz 帯 RMS (Fig.12(b)) から、試験終了時の外輪傷の長さは 90° を越えた程度であると推定でき、実際の損傷量と比較して、2列あるうちの主要な損傷について正しく推定出来ていることが分かる。

試験 No.4 の 195Hz 帯 RMS (Fig.12(c)) から、試

験終了時の外輪傷の長さは 60° 程度と推定でき、実際の損傷量と比較して正しく推定出来ていることが分かる。

以上のように全ての試験について RMS 法から試験終了時のおおよその損傷量が正しく推定できており、本手法が大きく進展した外輪剥離の長さを推定する、有用な手法があることが示された。

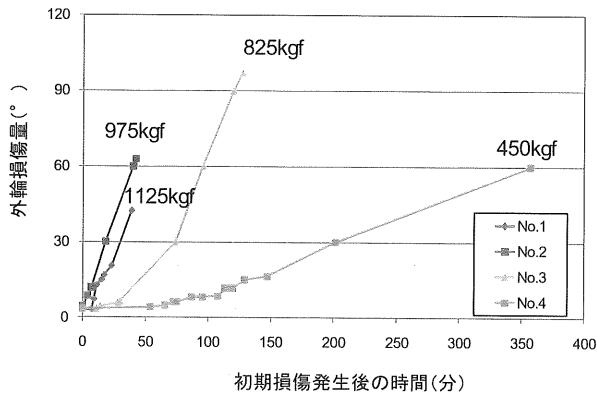


Fig.13 Evaluated damage progress

Fig.13 に全ての試験について、自己相関法と RMS 法による推定値から作成した外輪傷進展曲線を示す。図は各試験について初期損傷発生時を 0 分とし、初期損傷発生後の傷の進展の様子を示している。複列に損傷が発生した試験もあるが、はじめに発生した片列のみを評価している。 $30^\circ$  より小さい部分については自己相関法による推定、 $30^\circ$  以上の部分については RMS 法による推定である。また各試験の右端の点は試験終了時の実測値である。

このように自己相関法と RMS 法により外輪傷の進展状況を定量的に可視化することができた。傷の進展は、試験 No.3 でやや加速度的に進展する傾向が見られるものの、全体的には線形的な傾向にあることが確認できる。

次にこの曲線を線形近似した直線の傾きから、外輪傷の進展速度を求める。Fig.14 に各試験の外輪傷進展速度と荷重の関係を示す。



Fig.14 Load and damage progress speed

図から荷重が低くなるほど損傷進展速度が小さくなる傾向があることが分かる。これらの点の適切な近似曲線をとることにより、荷重 0 に近い領域の損傷進展速度を求めることができると考えられるが、適切な近似曲線を定めるには、より低荷重領域で多くのデータが必要であり、今後の研究課題と言える。

#### 4. まとめ

転がり軸受の劣化加速試験を行い、軸受近傍に設置した電磁センサで測定した。得られた電磁信号に対し、自己相関法を適用し、損傷の初期段階における傷のサイジングを行った。また、大きく進展した外輪傷に対しては、外輪傷の固有周波数帯の RMS の増減に着目する手法 (RMS 法) を構築し、これにより大きく進展した外輪傷のおおよその長さを推定出来ることが示された。以上の手法から各試験の外輪傷進展曲線を描くことにより、損傷の進展状況を可視化することができた。損傷の進展は時間に対して比較的直線的な傾向にあり、進展速度は荷重が低くなるほど小さくなる傾向が見られた。より低荷重におけるデータをとることにより、荷重 0 における損傷進展速度を推定できると考えられる。

今後さらに複合的な損傷の評価手法や潤滑方式の違いによる影響、軸受の種類の違いによる影響等について検証する必要があるが、本研究で開発、適用した損傷の評価手法と、軸受の損傷の進展特性に対する知見は、余寿命評価手法を構築する上での基礎になるとと考えられる。

#### 参考文献

- [1] 黄皓宇、宮健三、遊佐訓孝、小坂大吾. 回転体異常の電磁検出. 日本非破壊検査協会第 10 回表面探傷シンポジウム、東京都城南地域中小企業振興センター、2007/01/25-26
- [2] 小坂大吾、黄皓宇、遊佐訓孝、回転機器の電磁非破壊評価手法の検討、日本保全学会第 4 回学術講演会、福井大学、2007/07/02-03
- [3] Daigo Kosaka, Haoyu Huang, Noritaka Yusa and Kenzo Miya. Electromagnetic nondestructive evaluation of rotatingblades. The 13th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, Michigan State University, USA, 2007/09/12-12.
- [4] Daigo Kosaka, Haoyu Huang, Noritaka Yusa and Kenzo Miya. Electromagnetic nondestructive evaluation of rotatingblades. Science and Technology of Maintenance (Under review).
- [5] 萱田良、黄皓宇、遊佐訓孝、電磁診断技術による異物混入軸受の挙動測定、日本保全学会 第 5 回学術講演会 水戸市民会館 2008/7/10-12、産学-7
- [6] 萱田良、馬渡慎吾、黄皓宇、ペランステファン、真木紘一、電磁診断技術による傷付与転がり軸受の測定及び信号処理による傷大きさの推定法、日本保全学会 第 6 回学術講演会 ホテルニューオータニ札幌 2009/8/3-5