



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

Nondestructive Electromagnetic Monitoring and Diagnosis of Damage Growth in 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	Non Member
法政大学	宮 健三	Kenzo Miya	Member

This study evaluates the size of outer race defects of ball bearings during accelerated life testing by analyzing the signal of an electromagnetic sensor. The electromagnetic sensor consists of a pickup coil wrapped around a permanent magnet. When a conductor passes in the static magnetic field, the generated eddy currents are detected as a change of the magnetic field. The autocorrelation method is applied for sizing defects in the early phase of the damage growth and the RMS method is applied for larger defects. With those methods, the growth of the damage is constantly monitored and is shown to be almost linear.

Keywords: nondestructive electromagnetic detection, ball bearing, signal processing, accelerated life testing

1. 緒言

国内の原子力プラントの安全性及び稼働率を向上させるため、これまでの時間基準保全 (TBM) 中心から、状態監視基準保全 (CBM) を取り入れた保全体制への移行が進められている。効果的な CBM を行うためには、設備の劣化とその進展過程を正確に診断する技術が必要である。電磁診断技術は、回転機器の軸受やインペラ等の状態を電磁現象から診断する特徴を有し、振動診断等の従来の診断技術を補完する新たな技術である [1-5]。

本研究は、回転機器の主要な劣化部位にあたる転がり軸受 (以下、軸受と称す) に対し、電磁診断技術の劣化診断への適用性研究の一環として行われたものである。これまでの研究成果として、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、電磁信号から「自己相関法」によりサイジングが可能であることが示されている[6]。この成果を基に、本論文では、軸受の転動面上での傷の発生から進展までの状況下における傷のサイジング手法の適用性を検証するため、劣化加速試験による実験を行った。また、「自己相関法」とともに、特定周波数帯の電磁信号の RMS の増減から傷をサイジングする「RMS 法」を新たに開発し適用した。これらを踏まえ、

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

本研究は、損傷の進展過程を可視化し、劣化特性を把握する補完技術としての基盤構築を目的としている。

2. 電磁診断技術の原理

電磁センサは、永久磁石からなる静磁場印加部とコイルからなる変動磁場検出部により構成される。測定原理は、磁場源からの静磁場中を導体が通過することで渦電流が生じ、その応答磁場をコイルにて誘導起電力として検知するものである (Fig.1)。

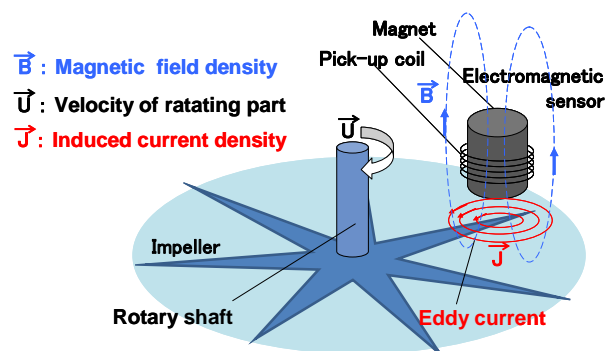


Fig.1 Principle of electromagnetic detection

劣化による導体の空間的位置や周期的回転運動の変動により、コイルに生じる誘導起電力の変化から、回転機器の状態を診断できる。例えば、インペラであればブレード、軸受であれば転動体個々に対応した信号が得られ

るため、振動診断とは全く異なる診断が可能となる。また、センサ設置表面や測定対象の内部に伝搬する振動からの磁場変化を検知することで振動計と同等の診断も可能となる。このことから電磁診断技術は、インペラ、軸受等の回転機器の主要な劣化部位の診断に適用することが可能である。

3. 劣化加速試験

3.1 試験方法

試験方法として、劣化加速試験機を用いて転がり軸受の一つである自動調心玉軸受 1204S に動定格荷重を超える 1200kgf(11.76kN)をかけて運転し、転がり疲労による初期損傷を発生させる。初期損傷の発生時には、運転音と電磁信号の変化から検知できる。そのため、その時点で一度試験機を止め軸受を取り外し、損傷状態を目視観察する。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

試験終了とする。ここでの終了条件は、振動計メーカーが推奨する軸受の交換基準 (DN 判定基準) を上回るものである。試験開始から終了までの間、軸受ケーシング部の上部に設置した電磁センサにより信号を取得する。損傷発生後の荷重条件として、1125kgf(11.03kN)、975kgf(9.56kN)、825kgf(8.09kN)、450kgf(4.41kN)の4通りとした。試験軸受は、(1)自動調心性を有することで芯ずれが補正できる、(2)動定格荷重が低い、(3)分解組立が可能である、(4)初期損傷が発生した時点で1度取り外して損傷の状態を確認できる、などの利点から NTN 製の自動調心玉軸受 1204S を採用している。

計測システムは、信号を取り込むセンサであるプローブ、DC アンプ及びアナログ信号をデジタル信号に変換する A/D 変換機、データ処理及びデータ蓄積用の PC から構成される。サンプリング周波数は 20kHz で、一定時間おきに 10 秒間計測した。また DC アンプ部で 10kHz の Low Pass Filter をかけてノイズを除去している。

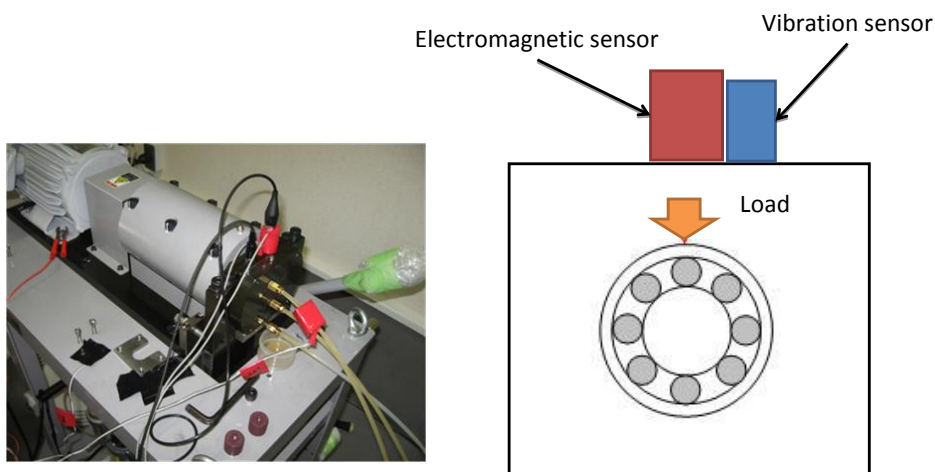
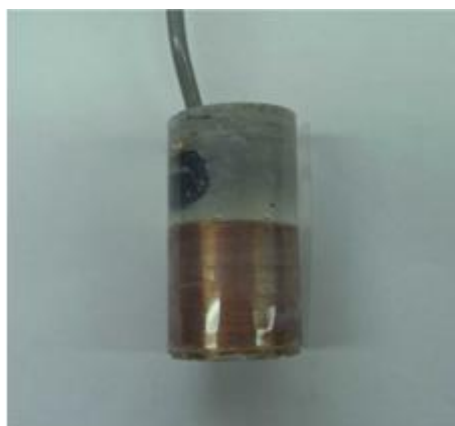


Fig.2 Accelerated life testing machine and sensors placement



Test bearing	Type : Double row self-aligning ball bearing Dynamic load rating : 10 kN
Lubrication condition	Oil lubrication
Running condition	40 Hz (2400 rpm)
Load condition	<Before initial damage> Test No.1~4 : 1200 kgf <After initial damage> Test No.1 : 1125 kgf (11.03 kN) Test No.2 : 975 kgf (9.56 kN) Test No.3 : 825 kgf (8.09 kN) Test No.4 : 450 kgf (4.41 kN)
Electromagnetic sensor	Distance : 20 mm Coil turns : 500 Surface magnetic flux density : 0.1 T

Fig.3 Electromagnetic sensor and testing 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、100 分後に振動加速度が 5G に達し試験を終了した。Fig.4 に電磁信号の RMS を示す。尚、電磁信号の RMS は、初期損傷発生前の平均値を 1 とした比で表している。図より、RMS が増加し、初期損傷の発生を検知出来ていることが分かる。全ての試験について同様に RMS の増加から損傷の発生を検知できている。

Fig.5 に初期損傷発生時と試験終了時の軸受外輪を示す。観察結果から、初期損傷時には外輪にスポット上の傷が生じ、この傷が試験終了時には 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る。また外輪以外には損傷が見られていない。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の、初めに外輪にスポット傷が発生し、その後大きく進展する損傷形態が共通であった。

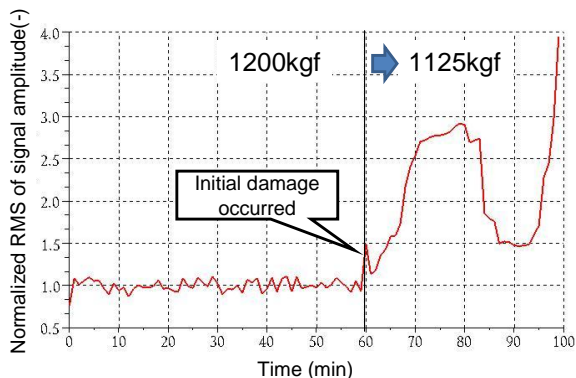


Fig.4 Electromagnetic sensor normalized RMS value (Test No.1)

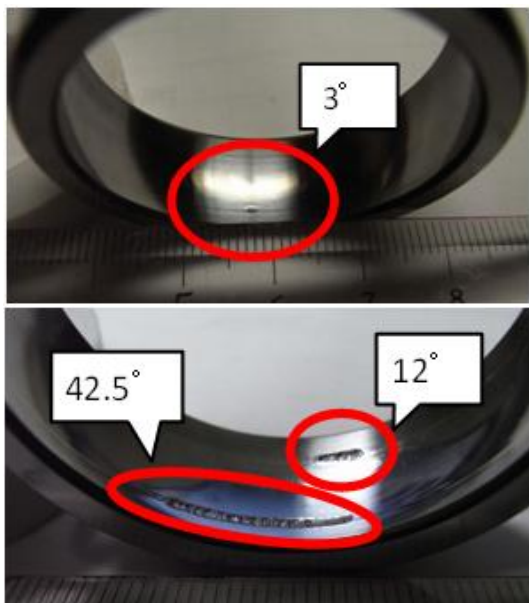


Fig.5 Size of the outer race defect (Test No.1) at the occurrence of the defect (top) and at the end of the test (bottom)

3.3 自己相関法による傷のサイジング

自己相関法による傷のサイジング手法について説明する。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)で電磁信号の衝撃波形が発生する。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 の衝撃波形の時間差に、転動体の公転速度を乗じることで傷の長さを定量的に評価できる。そこで衝撃波形の鮮明化とノイズを除去するために以下の処理を行う。まず envelope (包絡線) 処理により高周波信号からなる衝撃波形を 1 つのピーク波形に単純化する (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)。自己相関係数とは、ある時間の信号を起点として時間シフトした信号との相関性を表す値である。そのため、 $t=0$ では元の波形と完全に一致するため自己相関係数が 1 となる。模式図の包絡線をシフトした場合、 $t=0$ の次の信号のピーク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 $t=0$ の信号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。

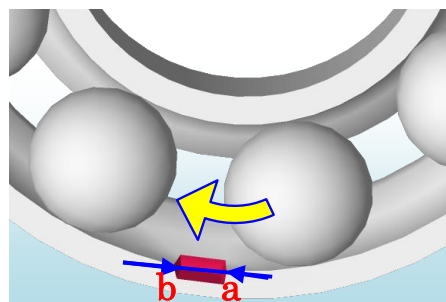


Fig.6 Image of ball bearing with outer race defect

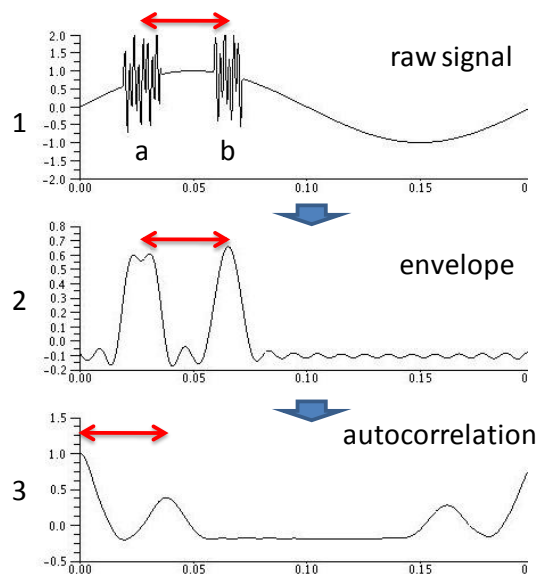


Fig.7 Steps of the autocorrelation method

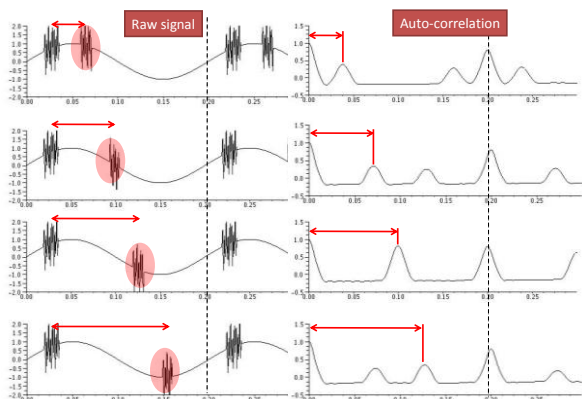


Fig.8 Autocorrelation method and damage growth

Fig.8 に損傷の進展に応じた電磁信号と自己相関波形の変化の模式図を示す。図中の赤矢印は傷の長さに対応しており、傷の進展に伴い赤矢印部分が伸びていくことがわかる。実際の取得した電磁信号では、傷の入り口と出口に対応する衝撃波形がノイズに紛れて不明瞭であるが、自己相関をとることにより赤矢印部分の長さを読み取ることで傷の進展状況を検知できる。

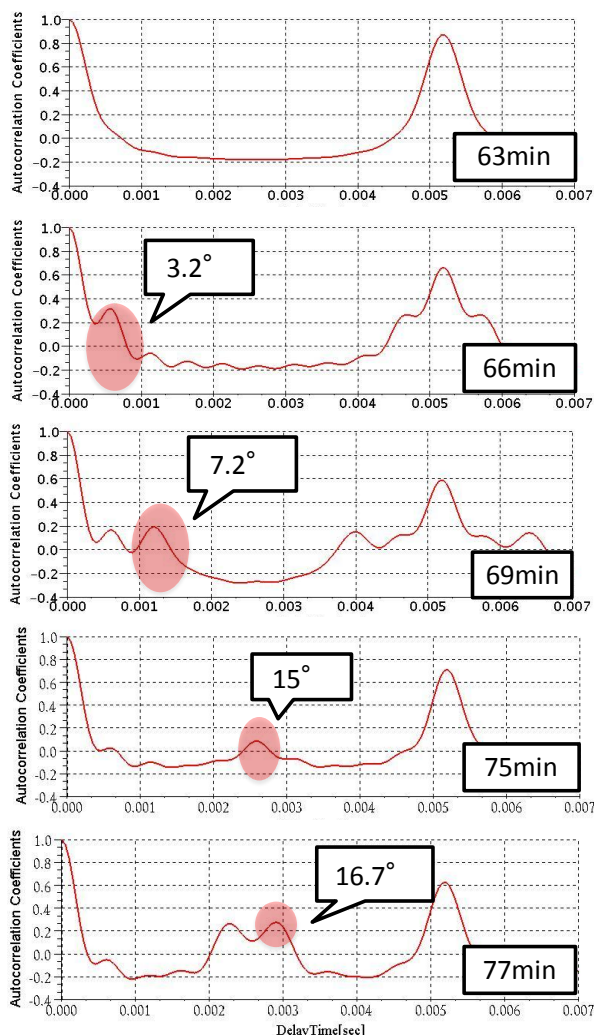


Fig.9 Autocorrelation method (Test No.1)

Fig.9 に試験 No.1 の試験開始 63 分、66 分、69 分、75 分及び 77 分の自己相関分析結果を示す。63 分は損傷発生直後であるが、傷の長さが小さいことや表面状態の影響等により傷信号は現れていない。左右のピークの間隔は外輪の 1 点に対する転動体の通過周期に対応している。66 分以降は、傷信号が現れているため傷の長さを評価することが出来る。図から時間の経過とともに損傷が進展していく様子を読み取れる。人工的に付与した損傷を自己相関法により傷の長さを高い精度で評価できることは既に示されているが⁶⁾、本実験により劣化加速試験で自然に生じた剥離についても同手法を適用できる可能性が示されたと言える。本実験では、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、過去の実験⁶⁾により、自己相関法で傷の入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いる。本研究では、その内容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.10 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推定曲線を示す。左端と右端の赤点は、実際に試験を停止して損傷の大きさを測定した実測値である。損傷発生後のいずれ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、損傷の表面状態や振動の仕方により明瞭なピークが得られない場合もあった。また傷が大きく成長した場合や複列に発生した場合は波形が複雑になり、傷のサイジングは困難であった。このことから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。

本研究では他の試験条件についても損傷の初期段階部分に自己相関法を適用し、損傷の進展の可視化を行った。

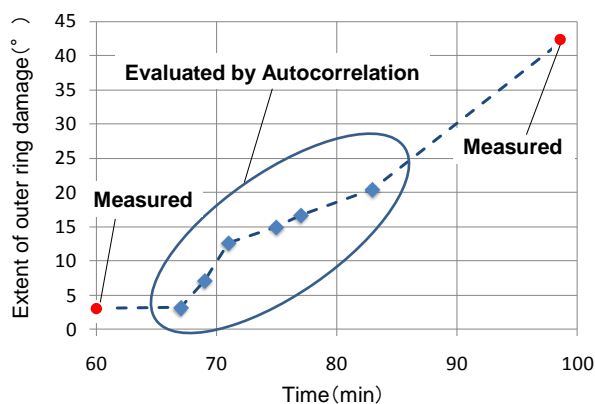


Fig.10 Evaluated damage growth by the autocorrelation method (Test No.1)

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、適用が困難であることが前節で示されている。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における電磁信号の RMS の増減により傷の進展を推定する手法 (RMS 法) を開発した。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転動体の挙動変動やそれに付随する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 RMS の傾向に基づく考察

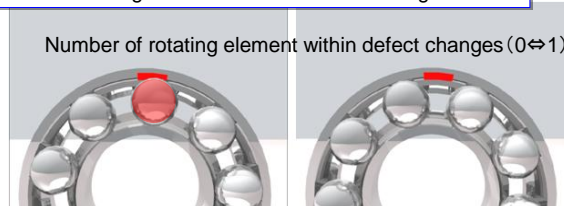
傷の長さが転動体間の距離に比べて十分に小さい場合、Fig.11 上図に示す様に傷の内部に位置する転動体は、内輪の回転に伴って 0 個⇔1 個と変動する。一方、傷の長さが丁度転動体間の距離に等しい場合、Fig.11 下図の様に、傷の内部に位置する転動体の数は常に 1 個である。

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における電磁信号の振幅に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。

この考察に基づけば、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における電磁信号の RMS は極小値をとる。本実験に使用している軸受 1204S の場合、傷の長さが 30° になった時がこれにあたる。また、傷の長さが倍の 60° 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° 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。

Case : Outer ring defect < Size between rotating elements



Case : Outer ring defect = Size between rotating elements

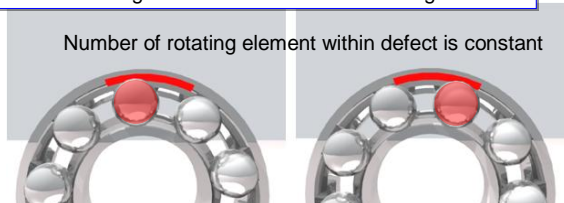


Fig.11 Relation between the size of the outer race defect and the location of rotating elements

3.4.2 考察の検証

Fig.12 に試験 No.1 における外輪傷固有周波数帯 (190-195Hz) における電磁信号の RMS を示す。試験開始 90 分に極小値を示していることから、この時点において傷が 30° に達したと推定される。

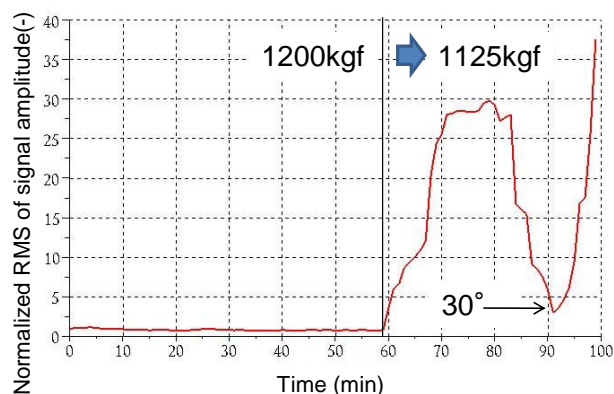
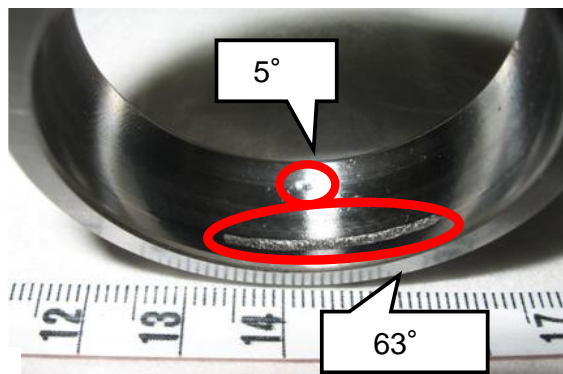
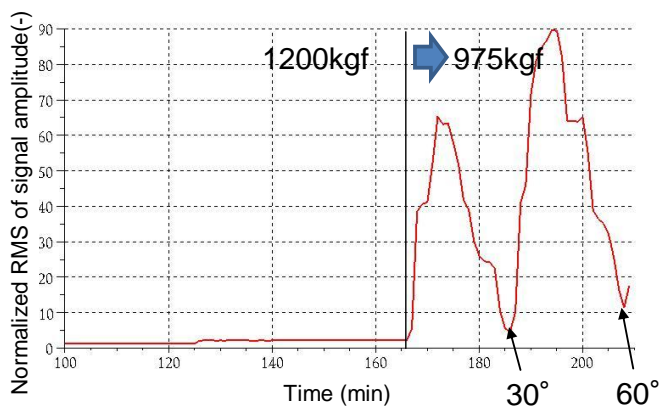


Fig.12 Normalized RMS value of the ball pass frequency outer (190Hz-195Hz, Test No.1)

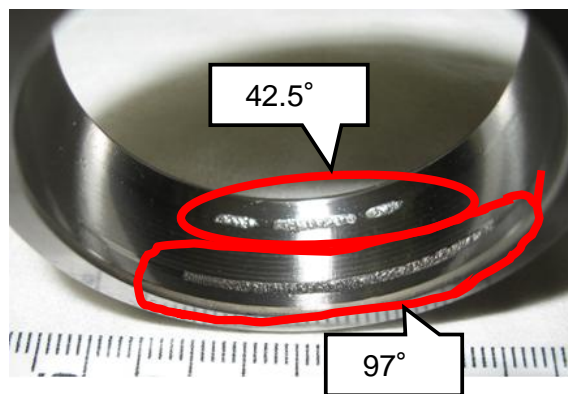
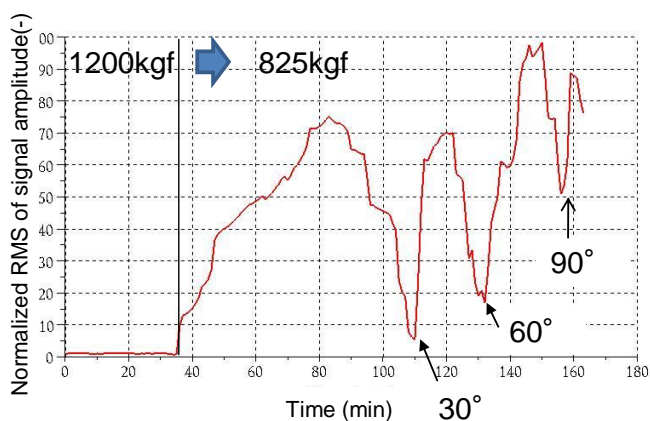
これを自己相関法により推定した外輪傷進展曲線と比較すると、90分において30°に達する結果となっており、自己相関法による外輪傷進展曲線にて傷が30°に達する時間とおおよそ一致している。また試験終了時は、2つ目の極小値に至る前であることから、損傷量は30°から60°の範囲内と推定できるが、実際の外輪傷の長さは42.5°であり (Fig.5)、整合がとれていることがわかる。

さらに、他の試験条件についても RMS 法で得られた推定値と試験終了時の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。Fig.13 に試験 No.2~No.4 の外輪傷固有周波数帯 (195Hz 帯) の電磁信号の RMS と試験終了時の外輪傷の様子を示す。試験 No.2 の 195Hz 帯の電磁信号の RMS (Fig.13(a)) から、2 つ目の極小値の位置が試験終了時と近い位置にある。この場合、2 つ目の極小値が傷の長さの 60° に相当すると推定されるが、片側の損傷の実測値が 63° とおおよそ一致することから、本手法が妥

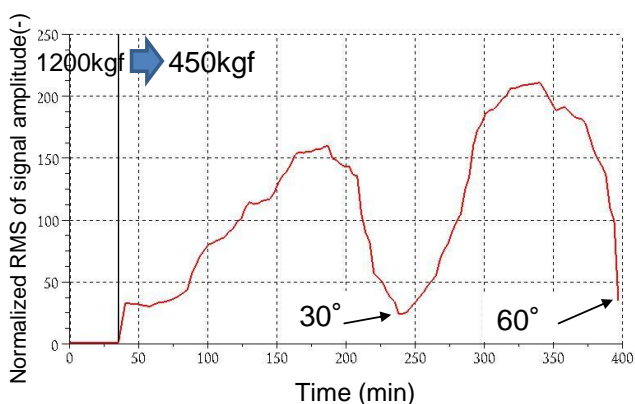
当である事を確認することができる。試験 No.3 の 195Hz 帯 RMS (Fig.13(b)) から、試験終了時の外輪傷の長さは 90° を越えた程度であると推定でき、実際の損傷量と比較して、2 列あるうちの主要な損傷について正しく推定出来ていることが分かる。また、同様に試験 No.4 の 195Hz 帯 RMS (Fig.13(c)) においても、試験終了時の外輪傷の長さは 60° 程度と推定でき、実際の損傷量と比較してほぼ一致していることが分かる。



(a) Test No.2



(b) Test No.3



(c) Test No.4

Fig.13 Normalized RMS value around the ball pass frequency outer (left) and size of the defects at the end of the tests (right)

3.4.3 外輪傷進展曲線と進展速度

Fig.14 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。

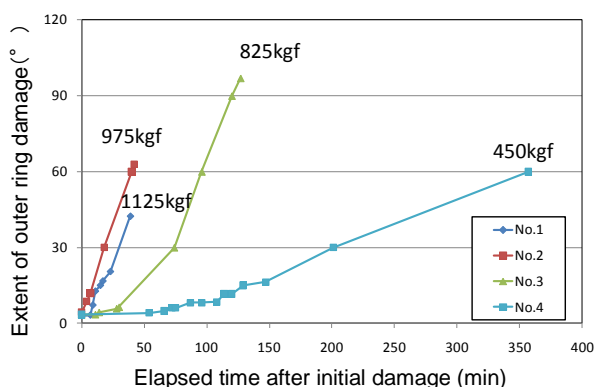


Fig.14 Evaluated damage progress

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場合は、はじめに発生した片列のみを評価している。30° より小さい部分については自己相関法による推定とし、30° 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。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、全体的には直線的な傾向が強いことが分かった。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可視化することができた。

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算出した。Fig.15 に各試験の外輪傷進展速度と荷重の関係を示す。ここで、本研究で採用した軸受 1204S の動定格荷重 1020kgf を 100% とした場合、各試験の荷重はそれぞれ 110%、96%、81%、45% と読み替える事ができる。図から荷重が低くなるほど進展速度が小さくなる傾向があることが分かる。この結果から近似曲線をとることで、機器の動定格荷重に対する荷重の割合に応じ、初期損傷以降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、低荷重領域を含め多くのデータが必要である。

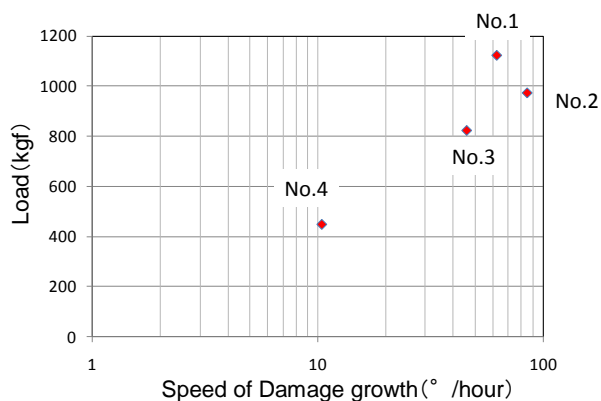


Fig.15 Load and speed of damage growth

4. まとめ

転がり軸受の劣化加速試験を行い、軸受の転動面上での傷の発生から進展までについて、電磁診断技術により傷のサイジングを行った。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電磁信号の RMS の増減に着目する手法 (RMS 法) を開発し、おおよその長さを推定出来ることが示された。以上の手法で得られた結果から、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。初期損傷以降の損傷進展速度から余寿命評価に有用なデータベースを構築するには、より低荷重におけるデータをとることにより、その傾向を明らかにすることができるものと考えられる。

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、一般的な診断技術を補完するものであり、さらには余寿命評価手法を構築する上での基礎になると考えられる。

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、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, 2007/09/09-12.
- [4] Daigo Kosaka, Haoyu Huang, Noritaka Yusa and Kenzo Miya. Electromagnetic nondestructive evaluation of rotatingblades. Science and Technology of Maintenance.
- [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