



ポンプ軸受の欠陥の大きさと電磁診断技術の信号との相関関係

Electromagnetic Nondestructive Detection for Wounded Bearings and Correlation of Size of Defect and Signal

株式会社 IIU	萱田 良	Ryo KAYATA	Non Member
四国電力株式会社	三好 剛正	Takemasa MIYOSHI	Member
四国電力株式会社	藤原 英起	Hideki FUJIWARA	Member
株式会社 IIU	ペラン ステファン	Perrin Stéphane	Non 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
法政大学	宮 健三	Kenzo MIYA	Member

A new electromagnetic method for the nondestructive evaluation of electric pumps with ball bearings is proposed. A permanent magnet generates a static magnetic field and a coil of several hundred turns wrapped around it is used to pick up eddy currents induced inside rotating ball bearings and impellers. First, a method that makes use of the autocorrelation is applied to the signals of the ball bearings. A relation between the processed signals and the size of the defects in the bearings is obtained.

Keywords: Electromagnetic Nondestructive Detection Method, Ball Bearings, Eddy Currents

1. 緒言

電力自由化を迎え、発電設備の保守業務は、設備の信頼性維持と経済性の同時追求が求められており、保全方式も TBM (Time Based Maintenance: 時間基準保全) に CBM (Condition Based Maintenance: 状態監視保全) を複合させるなど、最適な保全方式が検討されている。最適な保全方式を実施するためには、設備の劣化状態を的確に把握できる設備診断技術が必要である。現在、原子力発電所を含む原子力施設の保守現場では、振動測定による機器の異常診断法が導入されつつある。振動測定による機器監視は長い歴史を持っており、そのデータベースは膨大な量が蓄積され、カテゴリ化されており、言わば、成熟した技術である。

しかしながら、回転機器を対象とした振動測定では、複数の回転体・欠陥が存在した場合の診断が困難であること、また、部位によっては振動測定データに異常状態が反映されない場合もあること、等の課題に対して解決に限界があると認識されている。そのため、回転機器に対して、これらの課題を解決できる新たな状態監視技術の開発が望まれている。そこで、新たな設備診断技術である電磁診断技術を原子力発電所の回転機器に適用することによって、早期に対策が可能となり、安全性の確保のみならず、大きな経済的効果が期

待されている。^[1-9]

電磁診断技術によって、ポンプ等の回転機器の状態を診断するためには、実際の不具合や欠陥と電磁診断技術で得られる信号との相関関係のデータベースが不可欠である。この論文では、まず電磁診断技術の基本的な原理を述べ、電磁診断装置の構成について簡単に紹介する。次に、電磁診断及び振動診断により、実機ポンプ（横型渦巻きポンプ）に 1.25mm～4.50mm の範囲でスリット加工を付与した軸受を装着したデータを取得し、傷幅と信号の相関関係を明確化する。さらに、本電磁診断技術の有効性を示し、本装置を実機ポンプへ適用するための課題について整理する。

2. 装置概要

2.1 測定の原理

電磁診断技術は、磁場中を導体が運動するとその導体を含む閉回路に起電力が発生するという原理を応用したものである。発生した起電力によって生ずる渦電流が作る磁場をピックアップコイルで起電力として検出する。その導体に不具合があると、この渦電流の流れが正常の場合と異なるので、回転体等の異常を定量的に検出することができる。

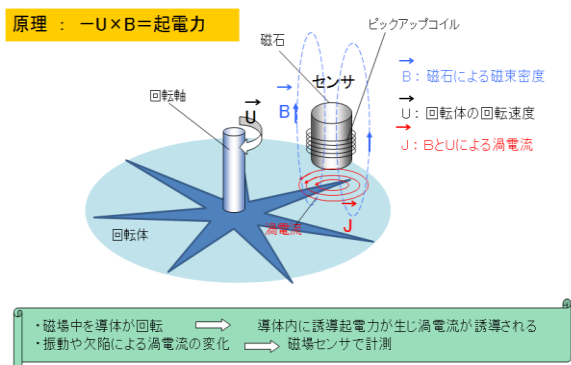


Fig.1 電磁診断技術の測定原理

Fig.1 に示すように導電体が静磁場を横切ること導電体表面に渦電流が発生する。回転機器に外部より静磁場が加えられている場合、ベアリングやインペラなどの回転体においても材質が導電体であれば回転体の表層に渦電流が発生する。この渦電流は回転体の振動や回転体のブレによって変化するので、この渦電流の変化を磁場センサで捉えることで回転機の回転状態のわずかな変動をも検出し診断に利用することができる。

2.2 電磁設備診断装置の概要

電磁設備診断装置は、Fig.2 に示すセンサと、Fig.3 に示す信号処理回路及び A/D 変換カードを内蔵した PC から構成されている。電磁センサは、静磁場を与えるための永久磁石と回転体表面に発生した渦電流を捉えるためのコイルからなる。一般的な回転機器における導電体の回転は低周期なので表皮効果が小さい場合が多く、導電体ケーシングの外側から磁場信号を通して回転体の回転状態を検出することができる。(表皮効果とは高周波電流が導体を流れる時、周波数が高くなるほど電流が表面へ集中し、導体の交流抵抗は高くなる現象のことである。) 軸受部の磨耗・フレーキング・粉末固着といった異常を軸受部の公転周期の変化や回転体の回転周期の変化として測定することができる。回転異常を電磁信号として取り出すことによって高精度で高度な設備診断が可能となる。

測定方法は、測定者が電磁センサを対象物である軸受のケーシングに配置し、アンプとフィルタを用いて検出コイルに誘導される電圧を加工し、その電圧を AD 変換器によって PC に取り込む。PC に取り込んだデータを精密診断 (時間波形分析、周波数分析等) するこ

とで異常の有無、異常個所の特定が可能となる。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パソコンから成り、そのブロック図を Fig.4 に示す。電磁センサの永久磁石は $\phi 30\text{mm} \times 20\text{mm}$ のネオジム磁石を使用し、コイル巻数は 500 ターンであり、振動加速度センサは感度 $10\text{mV}/(\text{m/s}^2)$ の圧電型の加速度ピックアップを用いた。

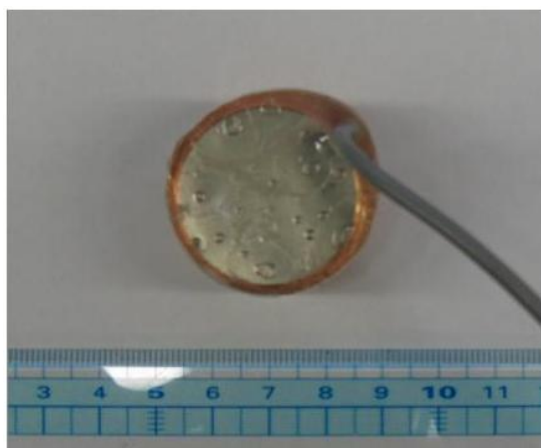


Fig.2 電磁センサの写真

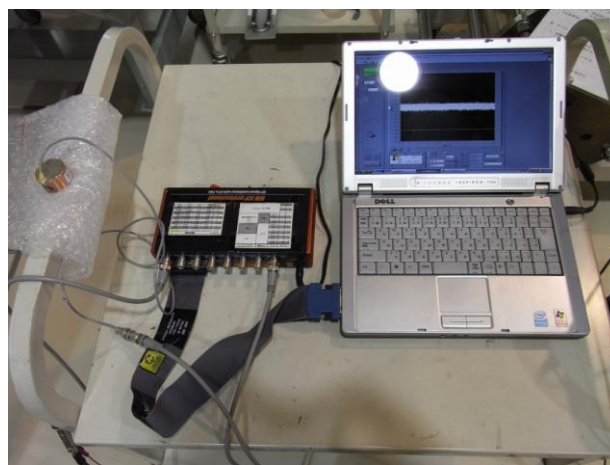


Fig.3 電磁設備診断装置

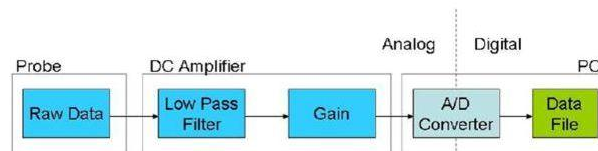


Fig.4 計測システムブロック図

3. 実験結果

3.1 試験軸受

スリット加工した軸受はポンプのインペラ側の深溝玉軸受型番 6306 で、スリット加工は内輪の1ヶ所である。Fig.5 に軸受スリットの例を示す。スリットの加工にはダイヤモンドビットを用い、試験時に転動体がスリット上を確実に通過するよう内輪転動面の軸方向に幅を持たせた。



Fig.5 軸受スリット (例)

スリットの転動面中心付近の幅は 1.25mm~4.50mm で、計9個の試験軸受の測定を行った。スリット幅は一様ではなくバラツキがあり、正確にスリット幅の定義は出来ないが、転動体は転動面の中心を通過するので、転動面中心付近の幅で代表させて評価に用いることが妥当と考える。スリット幅は電気顕微鏡により写真を撮影し、写真上の縮尺から換算した。Table 1 に試験軸受とスリットの転動面中心付近の幅を纏めたものを示す。

Table 1 試験軸受とスリット幅

試験軸受番号	スリットの転動面 中心付近の幅
①	1.25mm
②	1.42mm
③	1.54mm
④	1.95mm
⑤	2.14mm
⑥	2.22mm
⑦	3.86mm
⑧	4.29mm
⑨	4.50mm

3.2 測定位置及び測定条件

試験用ポンプ (Fig.6) は一般的な横型ポンプであり、インペラと回転軸、それらを支える軸受とモータからなる。

Fig.7 にセンサの設置位置を示す。図に示すように試験軸受はインペラ側の軸受であるので、その軸受の円周上で軸受までの距離が近い側面に電磁センサ及び振動加速度センサを設置し測定を行った。

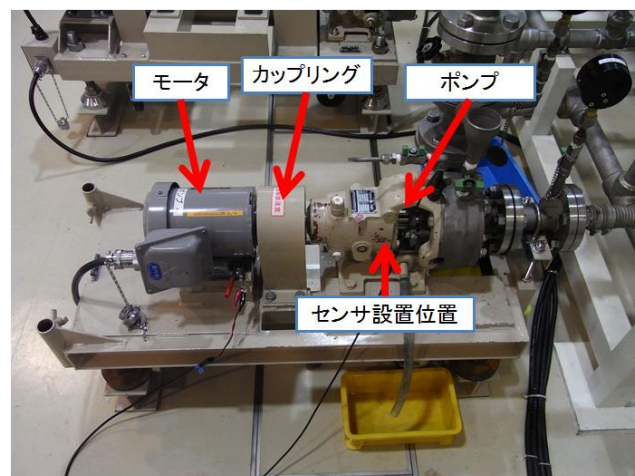


Fig.6 試験用ポンプ外観

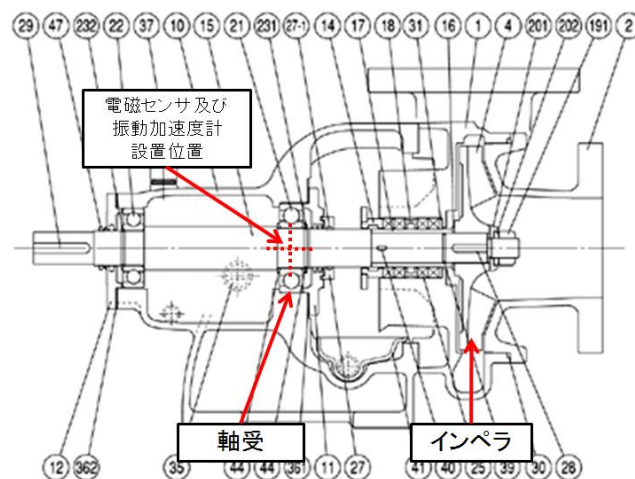


Fig.7 センサ設置位置

測定条件に関して、サンプリングレートは20kHz で、1回の測定時間は10秒間である。ローパスフィルタは10kHz とし、ゲインは100倍とした。

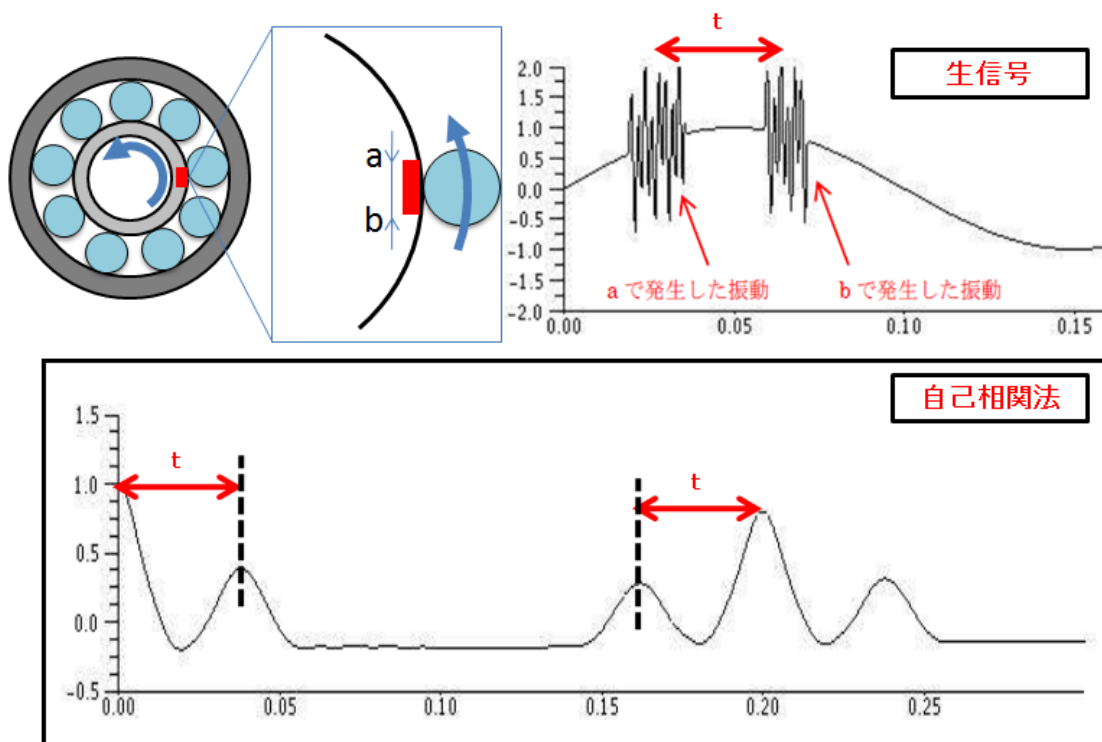


Fig.8 自己相関法を用いた傷の長さの推定

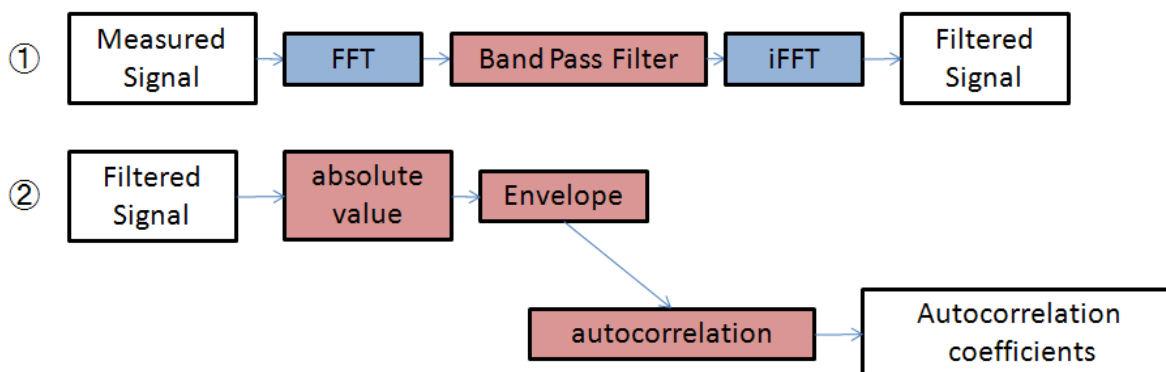


Fig.9 信号処理手順

3.3 信号処理及び分析手法

Fig.8 に自己相関法を用いた傷の長さの推定方法の概念図を示す。図に示すように軸受転動面に傷が発生し、転動体はその傷上を通過する際に、傷の入口と出口で軸受は大きく振動する。傷の入口及び出口と転動体が衝突する際の電磁信号及び振動加速度信号は数 kHz の信号で、軸受の固有振動数に対応している。傷の長さを推定する為には傷の入口から出口までの時間差を特定できれば良いが、実際の測定結果の生信号には電源ノイズや他の振動ノイズが含まれており特定しづらい。

その為、測定された生信号からノイズ等を取り除き、その信号の包絡線 (エンベロープ) を取り、その包絡線

処理した結果の自己相関係数を算出することで傷信号を確認し易くする。軸回転周波数が一定であれば、内輪の回転速度や転動体の公転速度等は幾何学的に算出可能であり、その傷を通過する時間を推定することで、軸受転動面の傷の幅を推定することが可能となる。

次に、信号処理の流れを説明する。Fig.9 に示すように電磁センサ及び振動加速度の生信号を FFT 処理し、バンドパスフィルタにより傷信号を取り出す。取り出した傷信号に対して絶対値処理をし、包絡線を取る。包絡線を取った信号には傷信号以外の相関性の無いノイズが含まれている。この包絡線の自己相関係数を算出することで相対的に相関性の無いノイズは小さくなり、傷入口と傷

出口の信号の変化が見やすくなる。

傷幅の推定

次に、深溝玉軸受 6306 の内輪に傷がある場合に、内輪上を転動体が進む距離と時間の関係を算出する。この距離から内輪上の傷幅を推定出来る。

深溝玉軸受 6306 内輪転動面直径 39.8mm 玉数 8 個 軸回転周波数 29.4Hz
① 内輪転動面 円周 $39.8\text{mm} \times \pi = 125.04\text{mm}$
② 内輪と転動体が接触している点と点との円周上の距離 $125.04\text{mm} / 8\text{個} = 15.63\text{mm}$
③ 8 個の転動体が内輪の一点と接触する周波数 FFT 結果の傷信号から 144 Hz
④ 転動体が内輪上を 15.63 mm 進む時間は $1 / 144\text{Hz} = 0.0069\text{sec}$
⑤ 転動体が内輪上を 1.0mm 進む時間は $0.0069\text{sec} / 15.63 = 0.00044\text{sec}$

以上の内輪上を転動体が進む距離と時間の関係及び自己相関法により求めた時間からスリット幅が推定される。これを実際のスリット幅と比較し関係を整理する。

3.4 スリット幅と自己相関分析結果

自己相関分析結果の例として試験軸受②（スリットの転動面中心付近の幅 1.42mm）と試験軸受⑨（スリットの転動面中心付近の幅 4.50mm）の結果を示す。Fig.10、Fig.11 に試験軸受②のスリット拡大写真と自己相関分析結果を示し、Table2 にその自己相関分析によるスリット幅の推定値を示す。Fig.12、Fig.13 に試験軸受⑨のスリット拡大写真と自己相関分析結果を示し、Table 3 にその自己相関分析によるスリット幅の推定値を示す。

試験軸受②の人工傷幅（Fig.10）は約 1.42mm であり、電磁信号、振動加速度の自己相関分析結果（Fig.11）は 0.55msec と 0.70msec で、その時の傷幅の推定値（Table2）はそれぞれ 1.24mm、1.58mm となる。

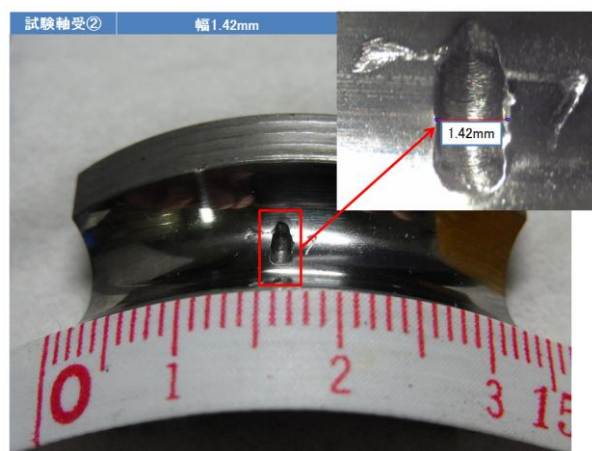


Fig.10 スリット拡大写真（試験軸受②）

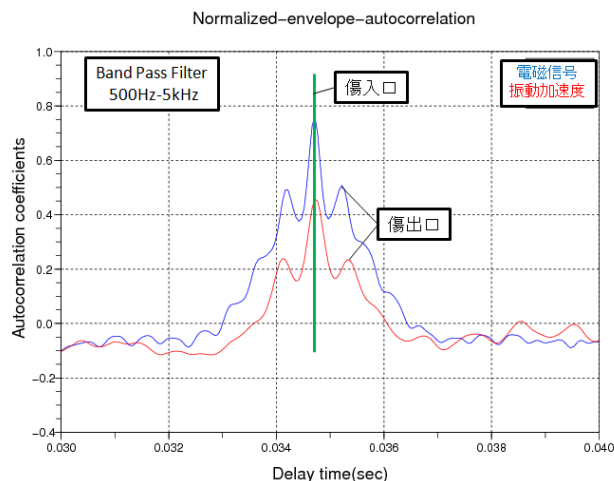


Fig.11 自己相関分析結果（試験軸受②）

Table 2 自己相関分析推定値（試験軸受②）

試験軸受②	電磁信号	振動加速度
時間差	0.55msec	0.70msec
推定幅	1.24mm	1.58mm

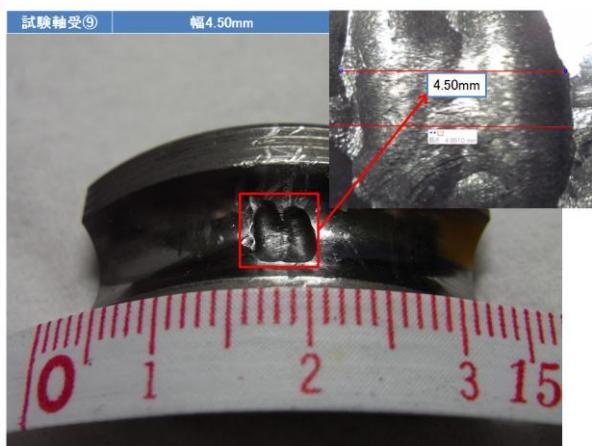


Fig.12 スリット拡大写真 (試験軸受⑨)

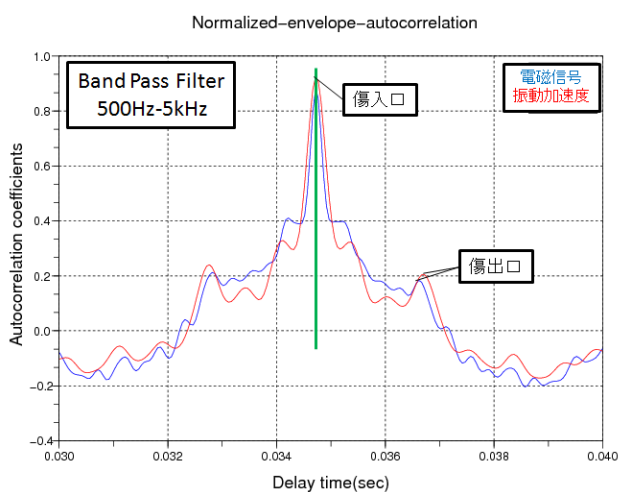


Fig.13 自己相関分析結果 (試験軸受⑨)

Table 3 自己相関分析推定値 (試験軸受⑨)

試験軸受⑨	電磁信号	振動加速度
時間差	1.90msec	1.95msec
推定幅	4.28mm	4.39mm

試験軸受⑨の場合、人工傷幅 (Fig.12) は4.50mmであり、電磁信号、振動加速度の自己相関分析結果 (Fig.13) は1.90msecと1.95msecで、その時の傷幅の推定値 (Table 3) はそれぞれ4.28mm、4.39mmとなる。自己相関分析による推定値は電磁信号、振動加速度ともに多少の誤差はあるものの実際の傷幅と良く一致する。

Table1 に示した試験軸受①～試験軸受⑨の試験結果を Table 4 に纏め、Fig.14 に電磁信号による推定値および振動加速度による推定値と人工傷幅を比較した図を示す。電磁信号による傷幅の推定値と振動加速度による推定値に若干のずれはあるが、どちらも実際の傷幅と比較して10%程度の誤差範囲内でよく一致した。

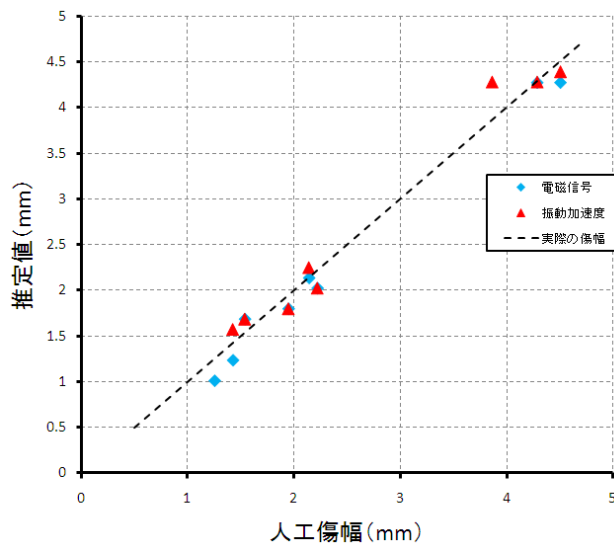


Fig.14 推定値と実際の傷幅の比較

Table 4 推定値と実際の傷幅の比較

試験軸受	電磁信号推定値 (mm)	振動加速度推定値 (mm)	人工傷幅 (mm)
①	1.01mm	特定できず	1.25mm
②	1.24mm	1.58mm	1.42mm
③	1.69mm	1.69mm	1.54mm
④	1.80mm	1.80mm	1.95mm
⑤	2.14mm	2.25mm	2.14mm
⑥	2.03mm	2.03mm	2.22mm
⑦	特定できず	4.28mm	3.86mm
⑧	4.28mm	4.28mm	4.29mm
⑨	4.28mm	4.39mm	4.50mm

4. まとめ

実機ポンプの軸受にスリット加工を施し、そのスリット幅を電磁診断及び振動診断により推定した。

- 傷幅が1.25mm～4.50mmの範囲で電磁信号及び振動加速度の推定値と実際の傷幅は高い相関性を示した。
- 電磁信号、振動加速度信号に対し自己相関法を用いることにより軸受転動面の傷幅を推定できる。
- 軸受内で転動体と傷が衝突することによる軸受の振動を電磁信号と振動加速度で測定した結果、非常に似た信号が得られたが、電磁信号と振動加速度では

測定原理が異なるため、傷幅の推定値に若干の違いが見られた。また、一方の測定手法では傷幅を推定できない場合でも、もう一方の測定手法によって特定出来るケースもあった。このように測定原理の異なる2つのセンサを用いて測定し比較検討することで、より高い信頼性を持って軸受傷の診断が可能となる。

- 今回の実験に用いたポンプは訓練用のポンプであるが、仕様等において実機ポンプと同等であると考えられ、実機においても電磁診断と振動加速度による複合センサの適用により傷幅が推定出来る可能性は高いと言える。
- 測定対象がインペラの場合、電磁センサでインペラ表面の渦電流を測定することで回転状態のわずかな変動を検出出来、振動診断には無い特徴を有していることが分かっている。^[6] また、本試験において、電磁診断技術が軸受傷の診断にも適用可能であることが示された。よって、電磁診断技術を用いることでポンプの主要な回転部位を個別に評価出来ることが分かり、ポンプの診断技術として有効であることが示された。
- 今後、電磁診断技術を実機に適用するためには、外輪傷に対しても本手法が適用可能か検証する必要がある。また、人工傷だけでなく実機ポンプの運転中に発生した傷等にも適用可能か検証し、傷の大きさと信号の明確な相関関係を得るためのデータベースを構築していく必要がある。

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 rotating blades. 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 rotating blades. 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ベアリングの挙動測定、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、石川達也、堀内隆夫、真木絢一、遊佐訓孝、ポンプ軸受及びインペラの不具合の大きさと電磁診断技術の信号との相関関係、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、A-4-3。

[7] 萱田良、馬渡慎吾、黄皓宇、ペランステファン、真木絢一、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、A-6-7。

[8] 萱田良、三好剛正、藤原英起、ペランステファン、ポンプ軸受の不具合の大きさと電磁診断技術の信号との相関関係、日本保全学会 第7回学術講演会 御前崎市民会館、浜岡原子力館 2010/7/13-15、A-2-12。

[9] 馬渡慎吾、角皆学、高瀬健太郎、萱田良、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、日本保全学会 第7回学術講演会 御前崎市民会館、浜岡原子力館 2010/7/13-15、A-2-13。

(平成23年2月8日)