

回転体への電磁診断技術の適用検討

Applicability study of the diagnostic technology by the electromagnetism to the rotating machines

中部電力(株)	清水 高	Takashi Shimizu	Member
北陸電力(株)	塚本 透	Toru Tsukamoto	Non-Member
(株)日立製作所	柴下直昭	Naoaki Shibashita	Non-Member
(株) I I U	黄 皓宇	Haoyu Huang	Member

This report describes the applicability study result of the diagnostic technology by the electromagnetism to an internal rotation object. In order to perform further detailed study, measurement of the basic data of a pump and the preliminary experiment in an air drive turbine were conducted.

Keywords: electromagnetism , diagnostic technology , rotating machines , CBM

1. 緒言

現状、ポンプインペラ、タービン羽根等の回転体の異常は、回転体の軸受の振動、軸受潤滑油の性状分析等の2次的なパラメータにより監視されている。

一方、浜岡5号機の主タービンで発生した低圧タービン羽根の損傷事象では、軸受の振動の監視だけではタービン羽根の異常兆候の検知が困難であったことから、タービン羽根が損傷に至る前に異常を検知できる新たな診断技術の検討を行なっていくこととした。

このような中、非破壊検査技術として実用化されているECT(Eddy Current Test)の技術を応用して、回転機器の内部回転体の状態を、電磁的に診断する技術の検討が進められてきている。この技術が実用化できれば、既存設備の大幅な改造を行なうこと無しに、内部回転体の状態監視精度を向上させることが期待できる。

本報告は、タービン羽根を含めた内部回転体への電磁診断技術の適用性検討の第一段階として、ポンプ、ファン等の回転体におけるデータ採取および小型の空気駆動タービンにおける予備実験の結果について述べたものである。

2. 回転体の電磁診断の基本原則と予備解析

2.1 基本原則

ポンプやタービンなどの回転機器において、回転羽根部の近傍に配置した永久磁石もしくは電磁石による磁場を、導電性のある回転翼が横切ることによって、回転翼内に渦電流が発生する。この渦電流による磁場の乱れは、近傍に配置した誘導検出コイルやホール素子などの磁場センサを用いることで容易に検出できる。

回転翼が磁場センサに近づくと、磁場の乱れが大きくなり、検出信号も大きくなる。検出信号の変化によって回転翼の通過を検出し、回転機器の運転状況を把握できる。また、渦電流の流れは翼端部に発生した傷によって変化し、健全な信号との比較により、欠陥の存在を検出することができる。

2.2 簡易モデルの予備解析

に示す簡易モデルによる予備解析を実施した。同図中(a)は回転羽根、(b)は羽根とその外側に存在する非回転のケーシングを示す。ケーシングの外面に永久磁石を取付け、回転羽根の回転方向に垂直に静磁場が発生させる。回転につれて、回転羽根を貫通する磁束が変化し、渦電流が発生し磁場の乱れが生じる。この磁場の乱れは検出コイルの誘起電圧として測定できる。回転体の電磁検出センサは永久磁石とその外側に巻く検出コイルにより構成される。

この簡易モデルによる数値解析結果の例を図2.2-2に示す。

連絡先：清水 高、〒461-8680 名古屋市東区東新町 1
中部電力(株)本店 原子力部 長期保全グループ
電話:052-951-8211、e-mail: shimizu takashi@chuden.co.jp

簡易モデルにおける羽根の材質はアルミニウム、ケーシングの材質は鋳鉄としたが、強力な永久磁石の影響で飽和磁化されているため、計算上ではステンレス鋼と同様、交流比透磁率を1に設定した。この条件でケーシングの有無による検出信号の変化を比較したが、ケーシングの有無にかかわらず、検出コイルに通る磁束と、それによって誘起される電圧はほぼ一定という結果が得られた。

一般的に、渦電流は表皮効果により導体の表面に集中し、深部に浸透できない特性があり、特に磁性体の場合は、厚いケーシングを通して信号を検出することが困難であると考えられている。しかし、本手法では磁性体ケーシングの外側から、羽根の回転運動を検出した。主要要因としては、

- 1) 永久磁石の飽和効果で磁性体の交流比透磁率が1になり、渦電流の浸透深さが大きくなること。
- 2) 本手法で得られた渦電流の周波数が 50 Hz と比べて低く、計算上浸透深さが 70 mm 以上となること。

の2点が考えられる。この結果から、一般的なポンプのケーシングの外側からでも、回転体の動的挙動を検出できると評価できる。

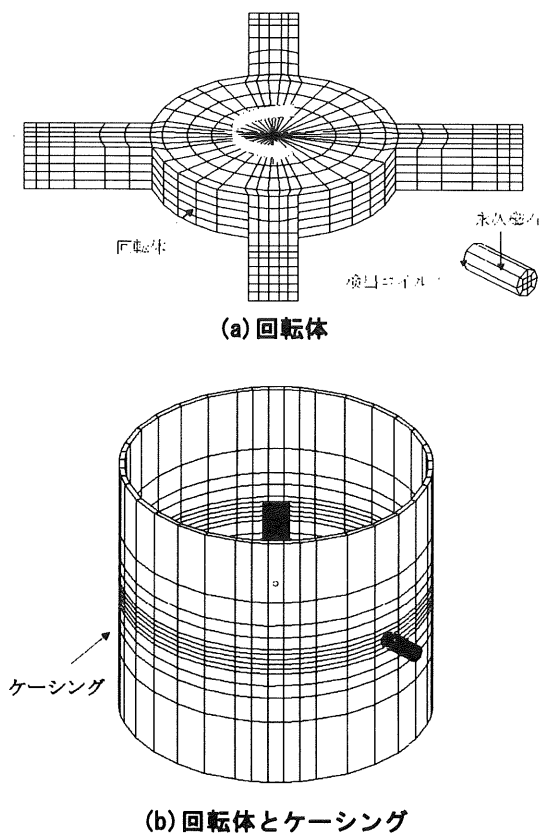
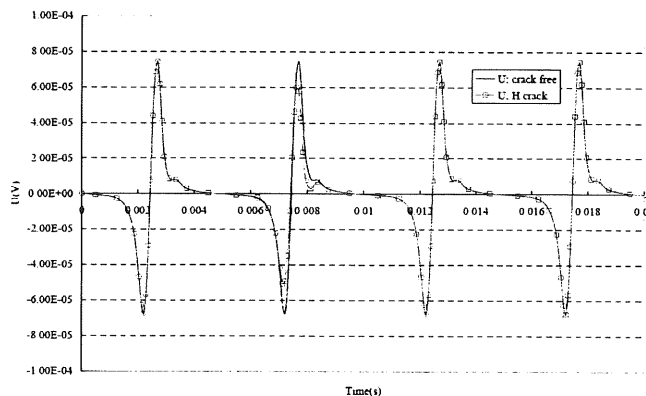
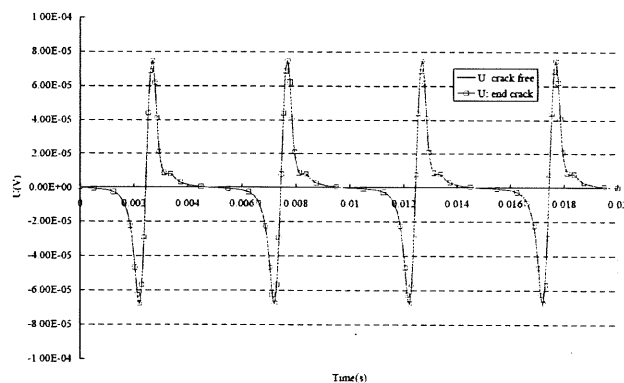


図 2.2-1 簡易モデル

羽根に欠陥がある場合を考慮した解析においては、2枚目の羽根表面にスリットを仮定した。また、羽根の表面に穴が存在する場合、羽根の中段、または羽根の付け根に欠陥があるという3つの場合を解析した。その結果、スリットがある場合では、羽根の表面の渦電流分布が大きく変化し、2枚目の羽根の信号が小さくなる傾向があった。一方、表面に穴があっても渦電流に与える影響が小さく、また羽根の付け根の近傍は距離の関係で流れる渦電流密度が小さいため、欠陥の存在による目立った変化は見られなかった。羽根の中段に設けた欠陥では、検出した磁束は若干小さくなったが、検出コイルの誘起電圧に与える影響は小さいと考える。したがって本手法では、センサに近い回転部位の異常に対して感度がよく、複数のセンサによって異常部位の特定に役に立つと考える。しかし、距離の影響が大きく、接近困難な部位では検出が難しいと考えられる。



(a)ケーシングのあり、スリットあり



(b)ケーシングのあり、付根欠陥あり

図 2.2-2 予備解析結果の例

3. 実機ポンプのインペラの電磁診断

中部電力(株)浜岡原子力発電所の研修センターに設置された、実機と同仕様のポンプを実際に運転し、電磁診断手法による測定・データ採取を行なう

測定の結果、横置きポンプ（正常）の測定においては、インペラの羽根の正確な情報を含んだ信号を採取することができ、5つの羽根の周期、振幅ともに実際の形状と符合した。ベアリングの測定に関しては、玉の信号が検出できなかったが、信号の周波数成分から、ベアリングの欠陥に結びつく信号は見当たらず、ベアリングの状態が正常であることが確認できた。

横置きポンプ（異常）の測定においては、センサをアンバランスネジの近隣に配置した場合、それに符合する信号を検出することができた。検出されたアンバランスネジからの信号は比較的大きく、異常インペラと正常インペラの差は歴然であった。欠陥のあるベアリングについての測定では、ベアリングの固有振動数成分が大きく、ベアリングの異常を検出した。また、内輪の欠陥を示した 144.4Hz 成分が大きく、初期的な解析では内輪欠陥であると判断した。回転周波数とその高調波成分が大きくなったので、アンバランスやセンターリング不良などの問題が存在する可能性があると考えられた。

4. 空力タービンの予備実験

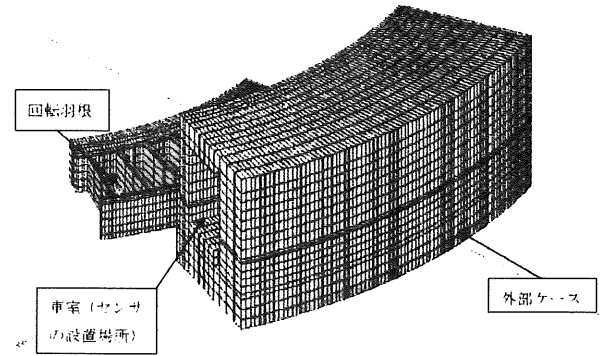
タービンで発生した羽根の損傷事故を受け、タービン羽根の異常兆候を、早急かつ的確に検知できる技術の適用について検討を行うため、(株)日立製作所所有の空力タービンを用いて、予備実験を実施した

4.1 予備的検討

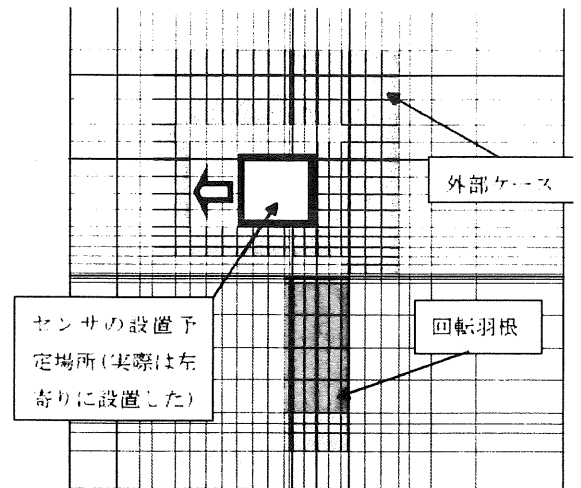
空力タービンの寸法を計測した結果に基づいてメッシュを作成し、解析を行なった。電磁センサは、車室に配置することとし、数値計算は、図 4.1-1 に示した位置で実施したが、実際ではタービン組立ての問題で、予定より左寄り（羽根から離れる方向）に配置することになった。

計算は実物の六分の一（60度）モデルで行ったが、構造が複雑で、メッシュ数が大きくな

るため、計算の収束性まで考慮することが困難であった。車室の材料は強磁性だが、このメッシュでの計算では非磁性材料しか収束しないため、非磁性材料で計算した。その結果、大体±16mvの信号を検出できると分かった。また、実際の羽根の形状が複雑で薄いため、羽根の部分を測定して細かくメッシュを作った。このメッシュで計算した結果約±8mvの信号を検出できると分かった。ミリボルト単位の信号では、ノイズの影響を受けない場合に限り、測定が可能であり、感度の良いセンサの開発が必要と考える。



(a) 空力タービンのメッシュ（羽根、車室）



(b) 空力タービンのメッシュ（羽根、車室）

図 4.1-1 空力タービンメッシュとセンサ取付位置

4.2 実験結果

予備実験では、羽根の明瞭な信号を検出することができなかった。原因として、以下の項目が挙げられる。

- 1) センサの設計が最適ではなかった。
- 2) センサの設置位置が最も理想的な位置には設置することができなかった。
- 3) センサ自身のノイズ要因が影響する。
- 4) 外部のノイズ要因が影響する。
- 5) センサとインペラの距離が大きい。
- 6) 強磁性体ケースでの磁気遮断効果が大きい。

以上の原因に踏まえて、タービン羽根を測定するため以下の対策を検討した。

- 1) ケースの外形に合わせた表面形状を持ち、且つ周方向が長く（磁力を強くする）、径方向が若干短い（理想的な位置に設置できる）センサの製作

- 2) 磁石の形状を変更し、できるだけ動翼に近い位置に設置
- 3) センサの巻き線を固め、ステンレスのケースに収める等リード線などの動くものを極端的に短くにし、減らすこと。
- 4) 可能な限り、車室に点溶接するか、しっかり固定する。また、最近では、測定物のケースに接地させることで、ノイズの低減を図る。

5. 結言

これまでの解析と測定の結果から、回転体への電磁診断技術の適用の可能性は高く有効な手法であることが確認できたが、まだ解決すべき課題も多いため、今後の課題とそれを解決するための方向性について以下にまとめた。

1) タービン測定ためのセンサの設計・製作

電磁診断技術をタービンの羽根実験に適用するためには、検出信号の増強と同時にノイズ要因の削減が必要である。対象とするタービンの構造にあわせて、センサの設計を最適化し、更に高い感度を持つセンサを開発する。また、ノイズとなる要因を分析し、センサの構造や取付け方法にも工夫する必要がある。

2) タービンのフィールドデータ採取

タービンのフィールドデータ採取については、まず対象とするタービンを検討する必要がある。電磁診断技術は、近くにセンサを設置できれば必ず信号を検出できる。ケースの材料やケースの有無などの電磁診断技術に適用し易いタービンを選択し信号を確認することが第一歩である。また、フィールドデータに向けて、計測装置の準備、ノイズ要因と除去手法を検討する必要がある。

3) 信号処理及び評価技術の研究

実機適用する場合、現場のノイズは必ず存在し、物理的にノイズを削減する手段を講じても残留ノイズがある。信号処理手法でノイズを除去することが重要で120ある。また、信号からいかなる情報を取り出せるかの信号評価技術の開発も必要となる。不具合の状態と信号の関係を実験と解析方法で解明し、逆に信号を得られた時にどのような不具合が発生したかを定量評価する方法を検討する必要がある。

謝辞

本研究に対して多大なご協力と助言を頂いた、日本保全学会、株式会社 I I U 並びに株式会社日立製作所の関係諸氏に心から感謝いたします。