

電磁診断技術を用いたタービン羽根の異常検出

Material Evaluation of Cast Iron based on Eddy Current

株式会社 I I U	黄 皓宇	Haoyu HUANG	Member
株式会社日立製作所	柴下 直昭	Naoaki SHIBASHITA	Member
中部電力株式会社	釘本 三男	Mitsuo KUGIMOTO	Member
北陸電力株式会社	塚本 透	Toru TSUKAMOTO	Member

This study proposes an electromagnetic method for the evaluation of the condition of the turbine in a nuclear power plant. Experimental results of a small turbine driven by an electric motor are shown in this paper. The results show that it is possible to detect the movement and condition of the impeller by applying the electromagnetic evaluation method. Moreover, an excitation experiment shows that the higher order vibration of the impeller can be detected and the distinction of the condition of with and without enforcement excitation is possible.

Keywords: Electromagnetic Evaluation Method, Nuclear Power Plant, Turbine, Eddy Current, Excitation.

1. 緒言

現在、原子力プラントにおけるポンプインペラ、タービン羽根等の非破壊検査手法としては、軸受の振動、軸受潤滑油の性状分析等が多く用いられている。しかしながら、これらの手法は万能ではなく、軸受振動の発生源の特定、潤滑油分析にかかる時間等、解決すべき問題も少なくない。このような状況の中で、浜岡 5 号機と志賀 2 号機のタービンで発生した羽根の損傷事故が発生した。これを受けて、これまでの技術では得ることが困難であった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への要請が高まり、それに応える技術として電磁診断技術の実機への適用についても検討を行っておくことは有意義と考えられる。

(株) I I U の最近の研究において、回転機器の内部回転体の状態を、ケーシングの外側から電磁的に診断する技術の検討が進められている[1]。これは、非破壊検査技術として実用化されている渦電流探傷試験の技術を発展させたものであり、本技術が実用化できれば、既存設備の大幅な改造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。ポンプインペラ等の回転体への適用について検討を行いその可能性を確認したが、ポンプと比べ遥かに大きいタービンへの適用について可能性はあるものの、感度向上のためのセンサの改良、取り付け方法の改善等多くの課題があることが分かった。

このため、本研究では実機タービンへの適用につい

て検討することより実用化検討を進め、原子力発電所の信頼性向上に資することを目的とする。その第一歩として、小型の試験用電動駆動タービンを用いた試験・分析を実施した。

2. タービン試験

2.1 タービン試験装置

電磁センサを対象物である回転体の回転部付近に配置し、アンプを用いて検出コイルに誘導される電圧を増幅し、その電圧を AD 変換によってパソコンに取り込む。計測システムのブロック図を Fig. 1 に示す。

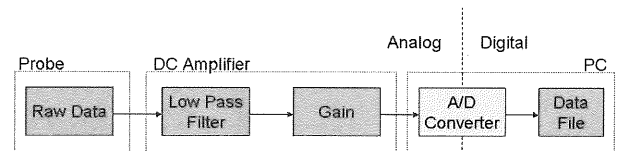


Fig. 1 Block diagram of measurement system

従来の渦電流探傷法と異なり、ここで提案した電磁診断技術は交流磁場ではなく静磁場を使用する。静磁場中回転する導電性羽根には、電磁誘導により渦電流が誘導され、その渦電流を検出することで羽根の状態を調べることができる。電磁センサは、永久磁石に検出コイルを直接に巻くものである。センサの写真を Fig. 2 に示す。予備計算の検討結果を考慮し、より感度の良い直径 35mm の磁石を使用した。実験用センサの仕様を Table 1 にまとめた。

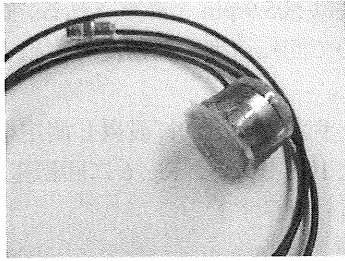


Fig. 2 Photograph of the electromagnetic sensor

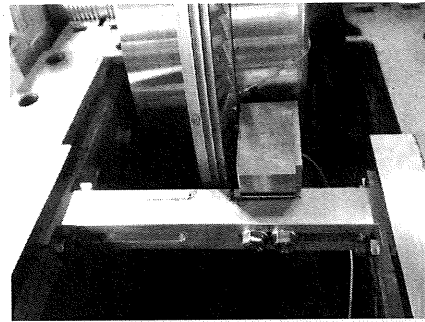
Table 1 Specification of the electromagnetic sensor

	Diameter (mm)	Length (mm)	Turns
Magnet	35 (outer)	40	—
Pickup coil	35 (inner)	20	1000

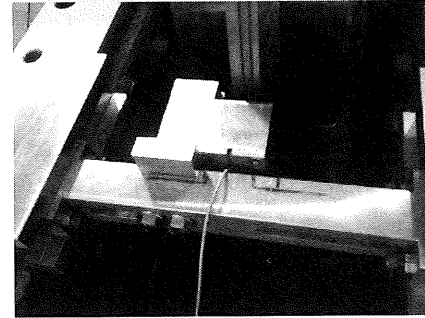
株式会社日立製作所殿より提供頂いた小型の試験用電動駆動タービンを用いて、実験を実施した。センサの設置パターンは計 9 種類を試したが、ここでは代表的な 2 パターンの結果を示す。実験の対象となるタービンの写真とセンサの設置を Fig. 3 に示す。電磁センサはセンサケースに収めており、センサを保護すると同時に磁性体の遮蔽効果を検証する。

羽根を検出するために、タービンの上蓋が開く状態でセンサケースを治具に設置し、BNC ケーブルを穴に通して外に出しておく。10m ほどの BNC ケーブルで信号をアンプまで送り、適切に増幅した信号を A/D 変換器を通してデジタルデータをパソコンに取り込む。タービンの羽根の高周波振動を捉えるため、A/D 変換器は 100kHz のサンプルレイトを採用した。タービンの回転数は 500rpm~2000rpm に変化し、500rpm 刻みで測定を行った。

ここでは、羽根の公転信号を測定し、検出感度を評価する試験を一般試験と呼ぶことにする。羽根の公転信号を測定することによって、羽根の脱落や大きな欠陥は検出できるが、羽根の微小な欠陥を検出することが困難である。微小な欠陥を検出するためには、羽根のねじれ運動のような高次振動を分析する必要がある。本研究では、羽根に強制的な振動を加えて加振試験を行った。加振ための高圧空気ノズルを Fig. 4 に示す。加振前後の信号を比較することによって、羽根の高次信号の検出可能性を検討する。



(a) Sensor position (axial direction)



(b) Sensor position (radial direction)

Fig. 3 Photograph of the turbine and the EM sensor

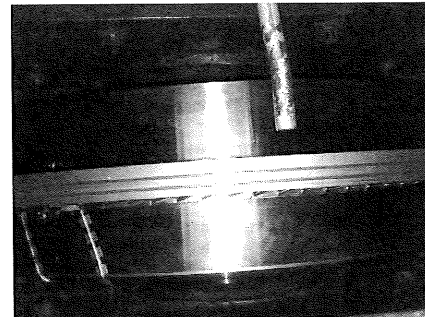


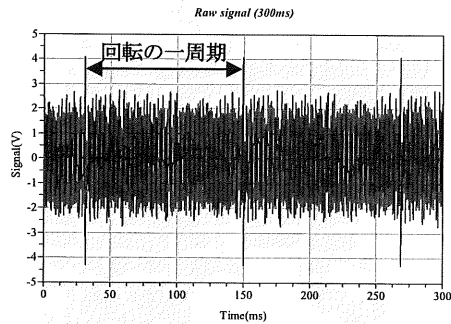
Fig. 4 The nozzle of high pressure air for excitation

2.2 一般試験の結果と分析

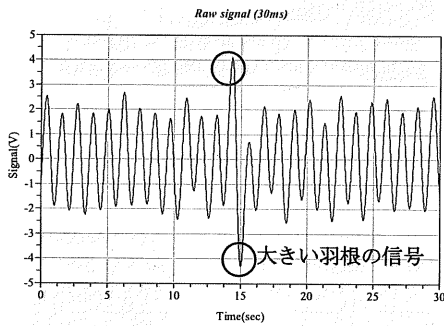
タービンの羽根を車室内に配置した電磁センサを用いて測定した。羽根の枚数は 102 枚で、仮に羽根がすべて同じであれば、羽根の信号の主な周波数成分は回転周波数×羽根数と考えられる。実験の回転速度は 500rpm~2000rpm に設定したので、羽根信号の周波数は 850Hz~3400Hz と計算される。

まず、センサが軸方向に設置し測定を行った。アンプの倍率は 10 である。Fig. 5 に回転速度 500rpm の場合の検出信号を示す。(a) には 300ms 間の信号、(b) には 30ms 間の信号、(c) には 0-5kHz の FFT 結果を示している。図 (a) に示したように、1 回転ごとに一つの大きな信号が得られる。これは羽根を組立てる時、最後の一枚は残る隙間に合わせて特別に制作したもので、

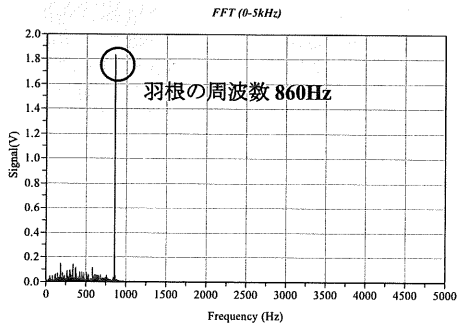
このタービンの場合ではその一枚の幅が他の羽根より大きいである。その結果、検出した信号もほかの羽根信号に比べて大きい。また、同一羽根に対して信号の再現性が高く、羽根を高い精度で検出できたと考える。



(a) Signal in 300ms



(b) Signals in 30ms



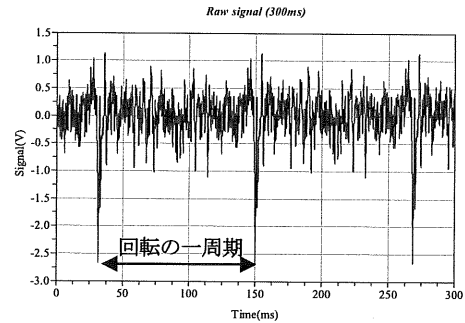
(c) Spectrum of the signals

Fig. 5 Measured signals (500rpm, axial direction)

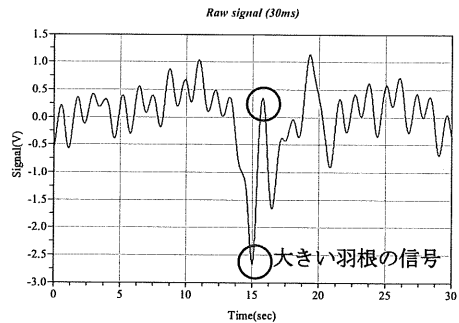
回転速度は1000rpmと1500rpmと2000rpmの場合でも同様に羽根信号を検出することができた。回転数が増えることに連れて、検出信号の一周期の時間が短くなり、FFTの結果から確認できる回転周波数が高くなる。回転速度を500rpm~2000rpmにするように設定したが、実際はそれより若干速い速度で回転している。例えば、500rpmで回転した場合の信号のFFTから羽根の周波数は860.0Hzと確認でき、羽根の枚数102で割

ると回転速度は505.9rpmと計算される。従って、電磁センサを用いて回転速度を高精度で検出することが可能と分かった。

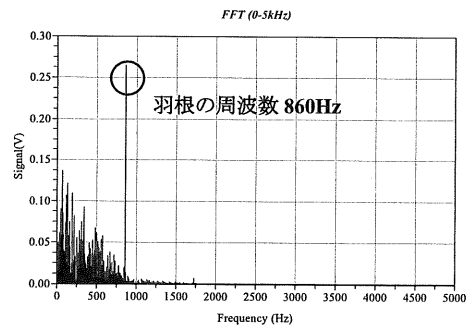
つぎ、センサが半径方向に設置し測定を行った。アンプの倍率は100である。Fig. 6に回転速度500rpmの場合の検出信号を示す。



(a) Signal in 300ms



(b) Signals in 30ms



(c) Spectrum of the signals

Fig. 6 Measured signals (500rpm, radial direction)

径方向に設置した検出コイルでは、羽根に直面したわけではなくリング状の金属ガイドに覆っており、検出感度は軸方向に配置した場合より大幅低くなっている。しかし、径方向の検出はタービン羽根の径方向の変位を捉えることができ、タービン羽根の診断には不可欠だと考えられる。

2.3 加振試験の結果と分析

タービンの羽根を高圧空気で加振しながら電磁センサを用いて測定した。生信号と低周波成分の比較では、加振による有意な変化が見られなかった。検出信号は主に羽根の大きさ・材料特性およびセンサからの距離で決めており、加振による振動の振幅は僅かであり影響が小さいと考えられる。

検出信号に占める割合は小さいが、5kHz以上の成分に加振による影響が見られる。FFT結果(5kHz~20kHz)を1kHzごとに積分した結果をFig. 7とFig. 8に示す。加振前後に変化を現した周波数領域に丸付けをした。回転数が500rpmと1000rpmの場合では、加振前後の変化が見えるが、回転数が1500rpmと2000rpmの場合では加振による変化が小さく、加振前後の信号を区別できなくなることが分かった。これは回転速度上がることに連れて羽根の振動が大きくなり、加振の影響が相対的に小さくなったと考えられる。また、羽根の公転信号では径方向の検出感度が軸方向より低い、加振の影響では径方向の検出が逆に顕著であることが分かった。

3. 結言

小型の試験用電動駆動タービンを対象に実験を実施し、得られた結果を以下にまとめる。

1. 一般試験では、小型タービンの羽根の信号を高精度で検出することが可能と分かった。同一羽根に対して信号の再現性が高く、回転速度を精密測定することができること分かった。
2. 軸方向と径方向に設置したセンサが共に羽根信号を検出することができる。軸方向の場合の検出感度が高いと分かった。
3. 加振試験では、検出信号の低周波領域には加振の影響が小さいが、高周波数領域に加振による変化が見られ、信号処理技術の向上で羽根の高周波振動を検出することが可能であることが示された。

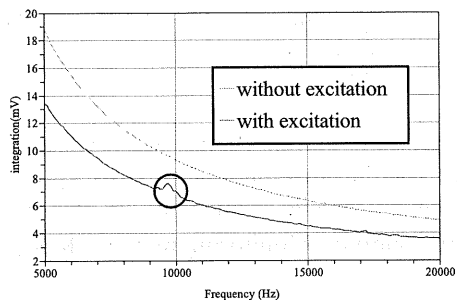
謝辞

本研究は株式会社日立製作所、中部電力株式会社および北陸電力株式会社からの委託研究「回転体の電磁診断研究その2」の成果の一部である。

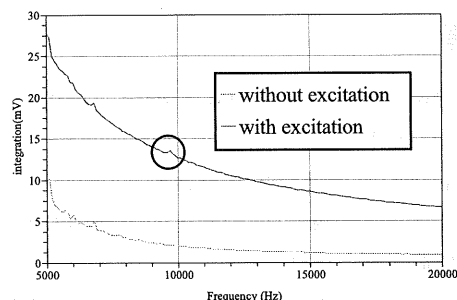
参考文献

- [1] D. Kosaka, H. Huang, N. Yusa and K. Miya. "Electromagnetic Nondestructive Evaluation of Rotating

Blades". The 13th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, Michigan State University, USA, 2007/09/09-12.

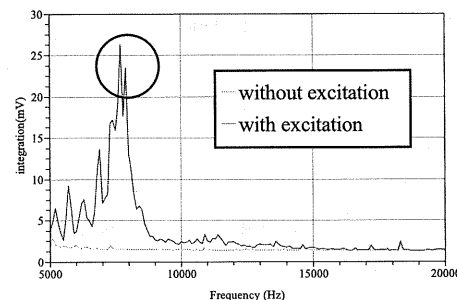


(a) Results of 500rpm

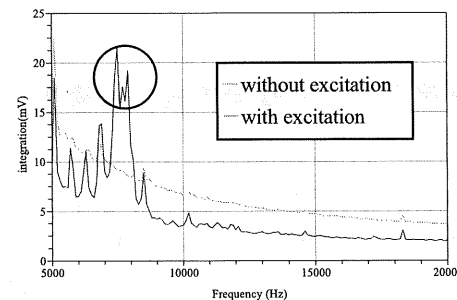


(b) Results of 1000rpm

Fig. 7 Comparison of the spectrum of the signals with & without excitation (axial direction)



(a) Results of 500rpm



(b) Results of 1000rpm

Fig. 8 Comparison of the spectrum of the signals with & without excitation (radial direction)