

高温超電導電磁石を用いたタービン羽根の電磁診断

Electromagnetic evaluation of the impeller of a turbine using a high temperature superconductivity electromagnet

株式会社 I I U	黄 皓宇	Haoyu HUANG	Member
	高瀬 健太郎	Kentaro TAKASE	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

Abstract: This study proposes an electromagnetic method for the evaluation of the condition of a turbine in a nuclear power plant. Experimental results of a small turbine driven by an electric motor are shown in this paper. A high temperature superconductivity electromagnet is applied outside the case of the turbine to provide excitation magnetic field. On the other hand, pickup coils are placed near the impeller inside the case of the turbine. The experimental results show that it is not only possible to detect the movement but also the condition of the impeller by applying the electromagnetic evaluation method. Moreover, an enforcement vibration experiment shows that the vibration increment as well as the main frequency of the vibration of the impeller can be detected when comparing the results of cases with and without enforcement excitation.

Keywords: Electromagnetic Evaluation Method, Turbine, High Temperature Superconductivity Electromagnet.

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号機の主タービン等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技術のニーズが高まっている。

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。

これまでに、電磁診断技術を用いてポンプのインペラや軸受等の回転体の状態診断を検討してきた[2, 3]。また、タービンについては数値解析を行い、適用の可能性も確認できた。平成20年度では、小型の試験用タービンにおけるデータ採取を行い、タービン羽根への電磁診断技術適用の有効性と問題点を抽出した[4]。その結果、タービンのケーシング内に電磁センサを置くことができれば、羽根の信号を高精

度で検出することが可能である事が判った。ただし、励磁のためにケーシング内部に永久磁石による構成した電磁センサを長時間設置することが実機では不可能であり、励磁方式については更に検討する必要がある。解決案として、電磁センサの励磁部と検出部を分離することが提案された。励磁部はケーシング外部から励磁し、オンオフできるように永久磁石ではなく高温超電導電磁石を採用する。検出コイルはタービンに悪影響を与えないので、インペラの近傍に設置することが可能と考えられる。

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. 小型電動タービンの試験

タービン測定への電磁診断技術の有効性を確認するため、株式会社日立製作所構内における小型の試験用タービンを対象に試験を実施する。平成20年度の試験に使われた永久磁石タイプ電磁センサの問題点を解決し、タービン羽根の検出性を確認する。

2.1 ケーシング外部励磁のための磁気回路

本研究では、電磁診断技術を実機適用するため、タービンのケーシングの外側からの電磁石励磁を検討した。一般的に、磁石から発生する磁場の強度は

連絡先: 黄皓宇, 〒110-0008 東京都台東区池之端
2-7-17 井門池之端ビル 7F, 株式会社 I I U, 電話:
03-5814-5350, E-mail: huang@iiu.co.jp

距離によって指数的に減少するので、タービンのケーシング外部からの励磁では羽根まで届く磁場は極めて弱い。また、オンオフできる電磁石では、強い磁場を発生するために電磁石が巨大化になってしまう問題が存在する。

これらの問題を解決するには、まず励磁用に高温超電導電磁石を使用する。超電導励磁コイルを窒素で冷却することで、最大 50A までの励磁電流を使用することができ、最大 1-2T の強い磁場を発生させることができる。次に、磁場減衰の問題を解決するために、ケーシングと内部の構造物などの磁性体を利用し、鉄心と鉄脚を用いて磁気回路を構成させる。

タービンのケーシング外部から励磁するための磁気回路の断面図を Fig.1 に示す。赤い矢印は磁気回路中の磁束の流れを示している。高温超電導電磁石から発生した磁場は、鉄心の誘導によりケーシングまで無減衰に届くが、磁束の 90% 以上は最も近いケーシングの壁に沿って流される。残る磁束は両側のケーシング壁に沿って流れ、インペラの回転軸または鉄脚・羽根の回路から戻る。ただし、鉄脚と羽根の間には空気ギャップが存在するので、回転軸の磁束の分流は 90% 以上となる。鉄脚の磁束は空气中に発散し、一部が希望通り羽根まで届く。数値計算の結果では、高温超電導電磁石（励磁電流 10A）から発生した最大磁場は 1.2T に対して、鉄脚と羽根の空気ギャップまで届く磁場はわずか 1.7mT であり、ほぼ千分の一まで減衰した。ただし、平成 20 年度の測定結果から、検出コイルは可能な限り羽根に近づけば mT 単位の磁場でも羽根を検出することが可能と概算した。

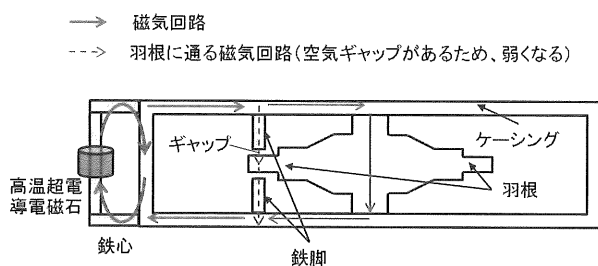


Fig.1 Magnetic circuit for excitation

2.2 高温超電導電磁石と検出コイル

高温超電導電磁石の仕様を Table 1 に示す。超電導コイルに流れる臨界電流は 50A で、鉄心を構成する磁性材料の磁気特性は線形であれば 6T までの磁場を発生させることができる。しかし、一般的な磁性材料は非線形特性を持ち、また飽和磁束密度が存在しており、励磁電流に比例して磁場が強くなることはない。材料の飽和磁束密度に制限され、高温超電導電磁石の磁場は最大でも 2T が限界と数値解析の結果から分かった。

励磁部の高温超電導電磁石はケーシングの外部に設置したが、検出コイル部は羽根の近傍に設置する

必要がある。Fig.1 に示した鉄脚の先端に、Φ35 のねじ状のセンサーコアを設計した。このコアは、磁気回路の一部となる以外に検出コイルのコアとして働き、検出する磁場を集中させる役割を果たしている。コアの直径は 35mm、長さは 40mm、検出コイルの巻数は 500 ターンである。センサの検出部の写真を Fig.2 に示す。電圧信号は BNC コンネクターよりアンプ・フィルターに送る。検出部を装着する前のタービン内部の写真を Fig.3 に示す。検出コイルは羽根を挟む形で両側に配置する。コアにはねじ切りしており、鉄脚にねじこめば装着且つ距離の調節が可能となる。

Table1 Specification of superconductivity magnet

部品名	仕様	
高温超電導コイル	内径	185mm
	外径	210mm
	厚み	40mm
	巻き数	186 ターン
	臨界電流	50A
断熱容器	概要	発泡スチロール製簡易断熱容器
	高さ	365mm
	幅	284mm
	奥行き	112mm
	鉄心穴	横 100mm×縦 110mm

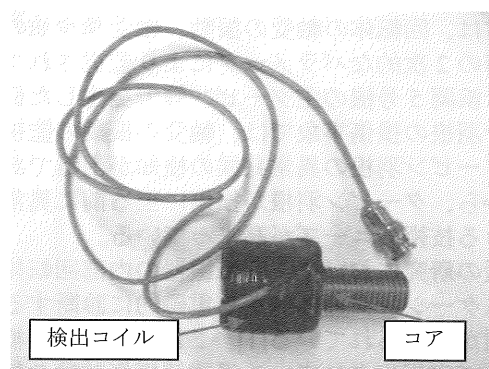


Fig.2 Pickup coil and core with screw

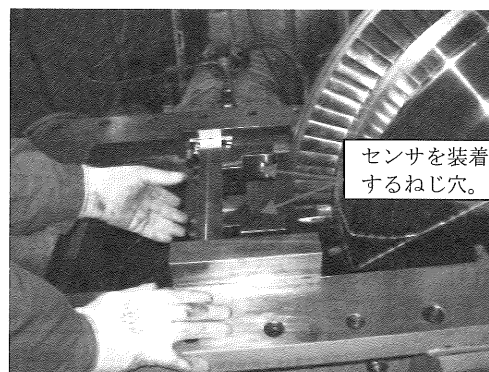


Fig.3 Iron leg and impeller of the turbine

2.3 測定システムと試験内容

電磁診断システムは Fig.4 に示す。電磁センサを対象物であるインペラの羽根の軸方向に配置し、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。高周波ノイズを除去するため、ポンプのインペラを測定する際には 10kHz ローパスフィルターをかけることが一般的であるが、タービン羽根の枚数は 102 枚もあり信号の周波数成分が高いと予想し 50kHz のローパスフィルターを使用することにした。

検出センサを装着した鉄脚とインペラの写真 Fig.5 に示す。センサの表面から羽根までの最も短い距離は 5mm だが、羽根は平面状ではないので、センサと羽根の距離は大体 5-10mm である。また、Fig.1 の鉄脚部分と異なって、破線で示したバイパス構造があり、磁束がバイパスに流れ込むことが予想できる。ただし、数値計算の結果ではセンサと羽根の間の空気ギャップの磁束密度は 1.7mT (バイパス無し) から 1.2mT (バイパス有り) に減少したが、検出することには支障がないと考えられる。また、それを補うために超電導コイルの励磁電流を最適化し、25A に選定した。

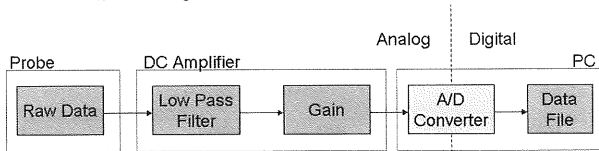


Fig.4 Block diagram of measurement system

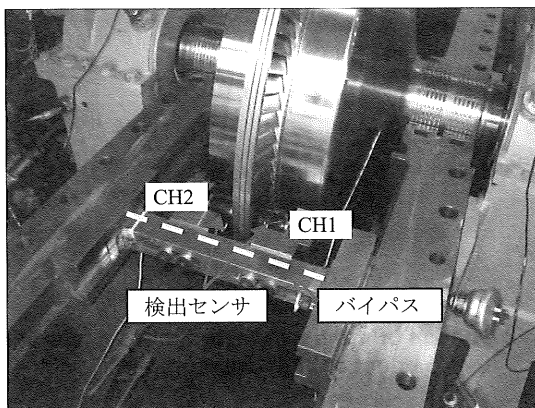


Fig.5 Block diagram of measurement system

小型電動タービンの試験は Table 2 に示した条件で、測定時間は 10s/回で各ケースにおいて 5 回を測定した。インペラの回転速度は 300、600、900、1200、1500、1800rpm の計 6 ケースを対象とし、回転速度が安定した状態で測定を行った。また、インペラ羽根の振動の検出可能性を調べるため、高圧気流で羽根を振動させ、各回転速度において加振の有無それぞれ 2 ケースを計測した。

測定結果からタービン羽根の信号を確認することができた。測定データをパソコンに保存し、試験後

に詳細分析を実施する。

Table 2 Times of acquisition of each condition

回転数 (rpm)	加振なし	加振有り
300	10s/回, 5 回	10s/回, 5 回
600	10s/回, 5 回	10s/回, 5 回
900	10s/回, 5 回	10s/回, 5 回
1200	10s/回, 5 回	10s/回, 5 回
1500	10s/回, 5 回	10s/回, 5 回
1800	10s/回, 5 回	10s/回, 5 回

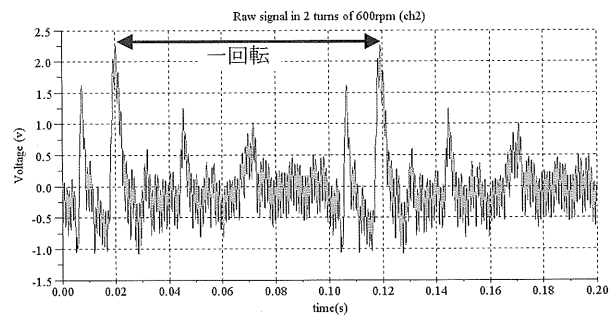
3. タービンの測定信号の分析

測定信号を用いて解析し、羽根の検出信号、回転周波数などの情報を取り出す。また、加振試験の検出信号を用いて羽根振動の増加の検出と振動増加の周波数帯の特定を試み、インペラ羽根の異常兆候を検知するための信号解析手法を開発する。

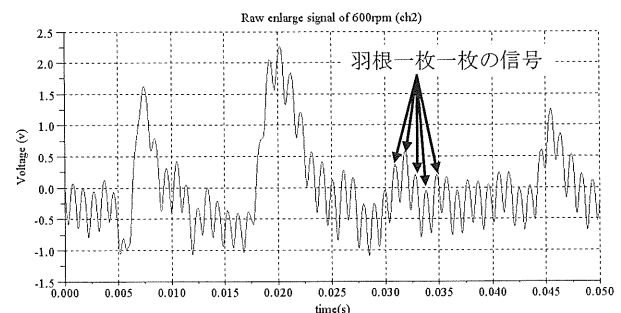
3.1 羽根の検出信号

Fig.5 に示した検出センサは左右対称二つを設置したが、それぞれ面する羽根の形状が異なるので、検出信号も異なる。ここでは、得られた信号が大きい左側のセンサの信号 (CH2) を対象として議論する。

電磁センサ CH2 の検出信号を Fig.6 に示す。各図において、(a) は 2 回転間の検出信号、(b) は 1/2 回転間の検出信号を示したものである。Fig.6(a)には電磁信号の周期性が見られ、Fig.6(b)には羽根の一枚一枚の信号を確認することができる。



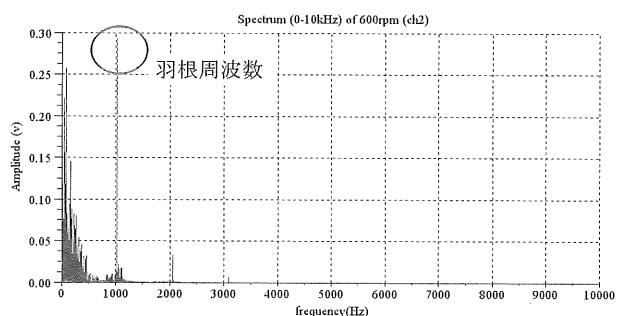
(a) Signal of 2 turns



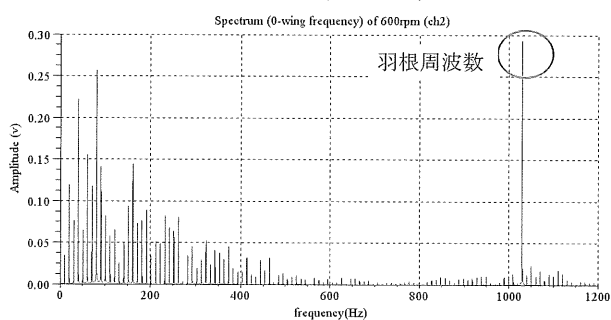
(b) Signal of 1/2 turn

Fig.6 Raw signal of EM sensor CH2 (600rpm)

また、同じ CH2 の検出信号の FFT 結果を Fig.7 に示す。各図において、(a) は 0~10kHz までの FFT の結果、(b) は FFT の結果を 0~羽根周波数まで拡大した図を示したものである。FFT の結果では、信号の周波数帯の分布、羽根周波数 (回転周波数*羽根枚数)、羽根周波数成分の大きさを確認できる。



(a) FFT results (0~10kHz)



(b) FFT results (0~frequency of wing)

Fig.6 FFT results of EM sensor CH2 (600rpm)

電磁診断技術は直接羽根を測定しているため、羽根の可視化が可能である。全ての羽根について一枚一枚見分けることが可能であり、羽根の脱落や変形を検出可能と考えられる。また、羽根の周波数が FFT の結果から高精度で確認できるので、インペラの回転速度も極めて高精度で測定できる。

3.2 回転速度の高精度検出により外乱検出

小型電動タービンの試験では、一回の測定の時間は 10s であるため、FFT により確認される羽根の周波数の精度は 0.1Hz。羽根の枚数が 102 枚で、また周波数を rpm に換算すると、インペラの回転速度の検出精度は 0.06rpm 以上であることが分かった。電動タービンまたは実機蒸気タービンでは、回転速度をある程度制御して運転しているが、一時的な外乱により速度が不安定になる過渡現象が起こる可能性がある。

小型タービン試験では、高圧気流で羽根を強制的に振動させる加振試験を実施した。羽根の形状、回転方向と加圧気流の方向を Fig.7 に示す。高圧気流によって、インペラの回転が速くなることが分かった。加振前後の回転速度を電磁信号の FFT で表した結果、Fig.8 に示したように、加振後の羽根周波数(回

転速度と比例している)は僅かながら加振前の羽根周波数より大きい。加振により回転速度の増加が有意に見られる。

回転速度の高精度検出により予期外の外乱を検出することが可能であり、タービンの運転の安定性指標としてタービンの状態を評価することが可能と考える。

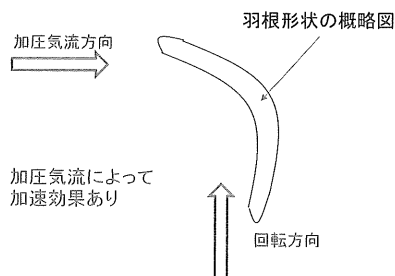
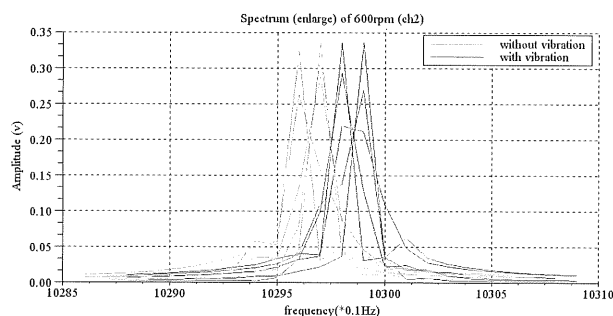
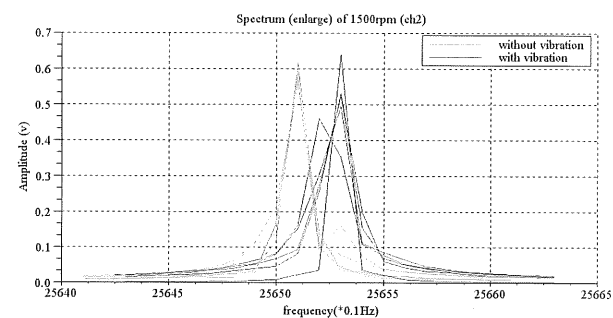


Fig.7 Accelerating effect of high-pressure air



(a) Frequency of wing (600rpm case)



(b) Frequency of wing (1500rpm case)

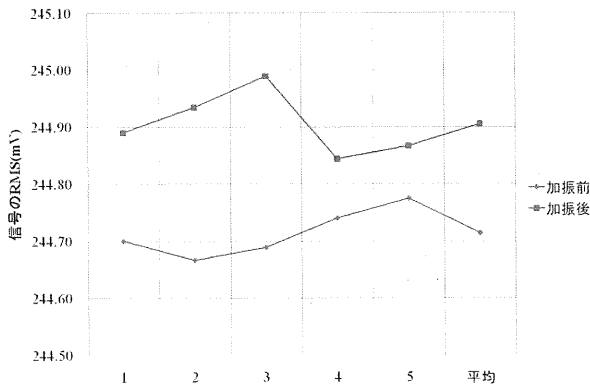
Fig.8 Change of rotation speed due to accelerating effect of high-pressure air

3.3 羽根の振動分析

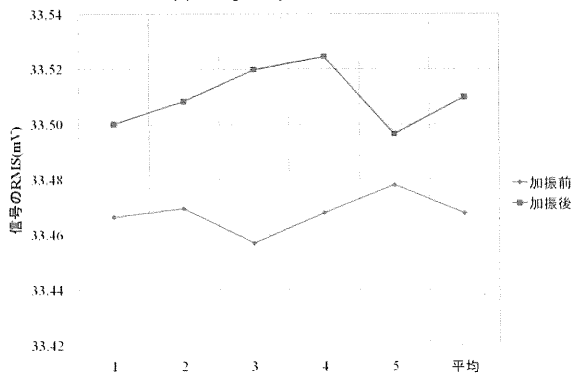
タービン試験の電磁信号の測定サンプルレートは 50kHz、また信号処理の際に 10kHz のローパスフィルターをかけている。従って、電磁診断の検出信号は 0~10kHz の範囲内の情報を全て反映している。但し、直接全周波数帯を見ると、必要な情報が他の信号に埋められ、加振による変化(羽根の振動の増加)を見分けることが困難となる。この問題を解決するため、信号処理においてバンドパスフィルターを使用し、ある特定周波数帯の情報を抽出して分析

する方法を採用した。

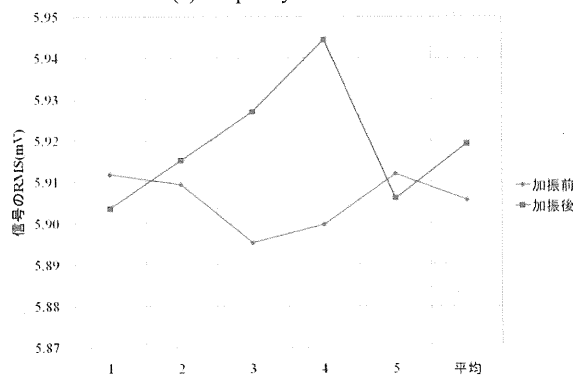
回転速度 300rpm~1800rpm 全ケースの測定結果から、周波数帯ごとの有効値 (RMS) を分析した。回転速度 600rpm の信号に対して周波数帯の RMS の分析結果を Fig.9 に示す。各図において、(a) は 1-2kHz の周波数帯、(b) は 2-3kHz の周波数帯、(c) は 3-4kHz の周波数帯の RMS 分析結果を示したものである。図の横軸の 1-5 は 5 回の測定結果に対応し、平均は 5 回の結果を平均したものに対応している。



(a) Frequency band 1-2kHz



(b) Frequency band 2-3kHz



(c) Frequency band 3-4kHz

Fig.9 Change in RMS according to frequency band (results of 600rpm cases)

回転速度 600rpm のケースでは、Fig.9(a)と Fig.9(b) (1-2kHz と 2-3kHz) に加振後の RMS の増加が明確に確認できた。Fig.9(c) (3-4kHz) では一部の RMS の増加が確認できないが、5 回の平均値では加振後の RMS が大きい。また、5 回の測定値においてもば

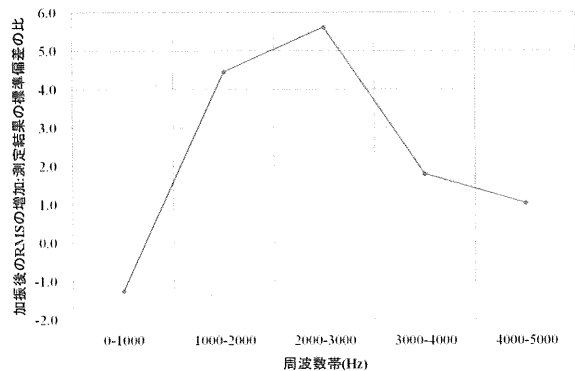
らつきが存在しており、RMS の増加がばらつきより大きいかどうか評価する必要がある。

ここでは周波数帯の RMS の評価結果を用いて、三つのパラメータを抽出する。一つは加振後の RMS の平均 S_1 、一つは加振前の RMS の平均 S_0 、もう一つは加振前の 5 回測定の RMS の標準偏差 σ である。RMS の増加を規格化するため、以下の式を用いる。

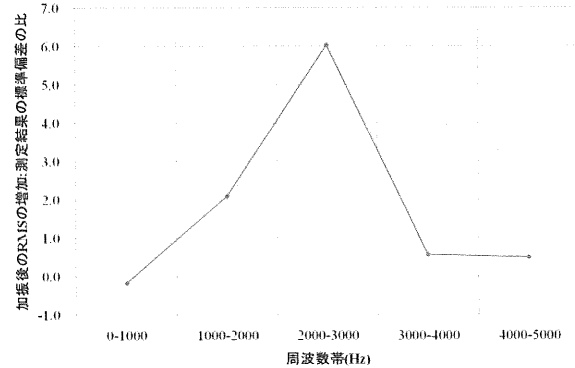
$$\alpha = (S_1 - S_0) / \sigma$$

一般的に、 α が 1 より大きく、特に 2, 3 より大きい場合、加振前後の RMS には有意な差があると認められる。

加振後の RMS の増加と測定結果の標準偏差の比 α の周波数帯ごとの分析結果を Fig.10 に示す。RMS の増加量が 3σ より大きいという基準で選定すれば、600rpm のケースでは 1kHz~3kHz の周波数帯において、1500rpm のケースでは 2kHz~3kHz の周波数帯において有意な増加が確認された。ちなみに、ひずみゲージによる測定では羽根の固有振動数は主に 2kHz~3kHz の範囲内であることが分かり、電磁診断もこの固有周波数帯の振動の増加を確認することができたと言える。



(a) 600rpm case



(b) 1500rpm case

Fig.10 Increase of RMS by standard deviation

各回転速度の測定においても、羽根固有周波数帯 2kHz~3kHz に加振による振動の増加が検出した。また、回転速度により羽根の振動信号が調波され、周波数の敏感帯と不感帯が存在すると分かった。同じ振動を測定するといっても、タービンの滑り軸受部の振動診断と異なり、電磁診断は直接に羽

根の振動を不接触で検出するので、羽根の損傷を早期的に検出することが期待できる。

4. 結言

高温超電導電磁石で励磁し、羽根近傍の検出コイルで検出することで、小型の試験用電動駆動タービンを対象に試験を実施した。本研究で得られた結果を以下にまとめる。

1. 高温超電導電磁石は従来の永久磁石に比べ、印加磁場を長距離まで到達させることが可能と分かり、高温超電導電磁石によりケーシング外からの励磁の可能性が示された。
2. 電磁診断技術は直接羽根を測定しているので、羽根の可視化が可能である。全ての羽根について一枚一枚見分けることが可能であり、羽根の脱落や変形を検出可能と考えられる。
3. 回転速度の高精度検出により予期外の外乱を検出することが可能であり、タービンの運転の安定性指標としてタービンの状態を評価することが可能と考える。
4. 加振による羽根の振動を検出するために、周波数帯別に信号の RMS を分析し、加振後の RMS の平均値の増加を確認した。RMS の増加量と標準偏差の比を用いることにより、この RMS の増加は有意であることが確認され、この比が大きい周波数帯は実際の羽根の共振周波数と一

致していることが明らかになった。

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3」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, September 9-12, 2007.
- [2] H. Huang, R. Kayata, S. Perrin, N. Yusa and K. Miya, "Numerical Analysis of an Electromagnetic Nondestructive Evaluation Method for Rotating Machinery," Proceeding of the 14th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, Xi'an, China, September 20-24, 2009. (in Press)
- [3] 萱田良, 黄皓宇, Stephane Perrin, 真木絃一, 遊佐訓孝, 宮健三, "電磁診断装置「電磁郎」の開発," 検査技術, Vol.14, No.3, 55-61, 2009.
- [4] 黄皓宇, 柴下直昭, 釘本三男, 塚本透, "電磁診断技術を用いたタービン羽根の異常検出," 日本保全学会第6回学術講演会, 札幌市ホテルニューオータニ札幌, 2009年8月3-5日.