

揺動励起されたファンモータの振動診断*

木村 英人, 渡部 誠二, 柳本 憲作

Vibration Diagnosis of Fan Motor Excited by Swing Motion

Hideto KIMURA, Seiji WATANABE, Kensaku YANAGIMOTO

(Received on January 20, 2021)

Abstract

The small fan motors are used by many electronics equipments for cooling equipment. They are essential for present industry. However, quality inspection of the small fan motor is conducted an organoleptic test by inspectors who have special skills which are based upon their auditory organs and tactual senses. It is not easy that inspectors will have mastered those skills. In addition, there are problem of those skills sometimes depend upon their mental and physical condition. Therefore, quality assurance is considered insufficient. When we observed inspectors to perform organoleptic test of the small fan in the actual production line, organoleptic inspector diagnosed rotation sound and vibration of the small fan to turn the wrist and to close the ear in the state of holding the small fan. Then we considered an operation to excite some kind of vibration to the small fan to add unsteady displacement. Therefore, The study measured the vibration acceleration signal of the small fan by equipment imitating the handling operation performed by the inspectors and aimed at realizing quality diagnosis by Mahalanobis' Distance (below "MD") from average value of measured vibration (Time average value of the RMS level of the vibration acceleration signal) and its deviation (the difference between the maximum value and minimum value of the vibration acceleration level)

Key Words : Small Fan Motor, Acceleration RMS Level, Mahalanobis' Distance

1. 緒 言

現在, IT 機器の軽量化, 省スペース化により電子機器内の冷却用として小型ファンモータの需要が増加傾向にある. ファンが発生した熱の外部への排出, 空気の循環等に利用されており, 特徴としてシンプルな構造, 利用できる範囲の広さ, 取り付けが容易に可能といったものがある. 近年では, 電子機器の高密度化, 高機能化に伴い冷却用ファンの重要性が増してきている. ファンの品質検査工程では, ファンの回転音や振動の検査を検査員が聴覚や触覚を利用した官能検査で行っている. しかし, 官能検査では, ファンの微妙な音の違いや振動の違いを正確に診断するために多くの経験を必要とし, 検査員の体調や環境の変化によって合否判定にばらつきが発生する. これら品質上の問題を解決するためには, ファンの音響・振動レベルを定量的・自動的に診断できる解析法の開発が求められている. そこで, 本研究では検査員が行っているハンドリングの動作を模して製作された回転揺動装置を用いて, 振動加速度を計測する. 計測した振動加速度から振動の平均値 (振動加速度信号の RMS レベル値の時間平均) とその偏差 (振動加速度レベルの最大値と最小値の差) からマハラノビス距離を算出し, 製品の良否の診断を試みた.

2. 良否判定の原理

2・1 パターン認識手法

製造ラインの最終検査工程の自動化を行うために、自動機械に製品の良否のパターン認識をさせる必要がある。認識手法としては、未知の入力パターンがあらかじめ入力されている標準パターンとどれだけ似ているかを評価し、どのカテゴリに属するかの判断をさせる処理が広く使われている。そこで本研究でも、パターン認識技術として MTS 法 (Maharanobis Taguchi System) を採用した。MTS 法では、製品を良とするパターンデータ群を基準とする単位空間として構成するため、異常なデータ群を準備する必要がなく、対象データが単位空間に属するか否かでその良否の判別が行える。

2・2 MTS 法について

MTS 法において、マハラノビス距離 (MD) という評価指標により単位空間からの外れ度合いを求め、正常/異常の判別を行う。対象データが同じ標準の同質のグループに属するかどうかの認識を得るための方法である。目的に対して均質な集団を単位空間として定義し、未知 (対象) データの単位空間中心からの距離をマハラノビス距離 (MD) として算出し、しきい値を超える MD の対象を否とする。Fig.1 に示すように MD が小さければ単位空間に近いパターン (合格), MD が大きければ単位空間から遠いパターン (否) であると判定することができる。ファンモータでは製品の良品から基準データ群を構成し、測定対象のファンモータのパターンから MD を算出し合否を判定する。

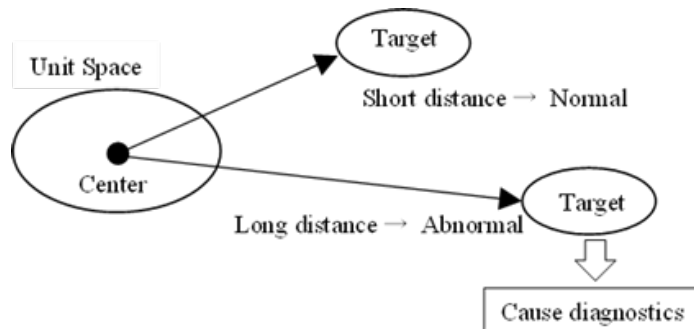


Fig.1 Conceptual drawing of the MT method

2・3 MD の計算方法

基準となるデータ群は、ファンモータを計測した振動加速度信号の RMS レベルの時間平均値 L_v とその振動加速度レベルの最大値と最小値との差 (偏差) L_e の 2 変数である。これらの 2 変数の単位は同じであるが、数値の範囲が異なるためデータ群の平均値 \bar{L}_v , \bar{L}_e と標準偏差 σ_x, σ_y で正規化を行う。MD を求める手順は以下のようにした。

- ① 振動加速度レベルの時間平均値 L_{vi} と偏差 L_{ei} を 2 変数として、それぞれ正規化する (X_i, Y_i) 。
- ② 正規化した値により 2 変数の相関係数 r を求め相関行列 A を作成する。
- ③ 正規化した値の行列を X とし、式(3)のように相関係数の逆行列 A' を挟むような形で演算を行うと MD の二乗値が求まる。

$$X_i = \frac{L_{vi} - \bar{L}_v}{\sigma_x}, Y_i = \frac{L_{ei} - \bar{L}_e}{\sigma_y} \quad (1)$$

$$A = \begin{pmatrix} 1 & r \\ r & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{aligned}
 MD^2 &= XA'X \\
 &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} X_i & Y_i \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 1 & r \\ r & 1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \end{bmatrix}
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

3. 振動計測装置および方法

3・1 振動計測装置について

本研究では、検査員が行うハンドリングを模した回転揺動装置を製作し、振動計測を行った。Fig.2 と Fig.3 に回転揺動装置を示す。この回転揺動装置は二次元のフリージンバル機構を用いており、サーボモーターからの駆動軸 L_1 とボールジョイントで接続された揺動軸 L_2 をサーボモーター軸回りに回転させることで、ファンモータが連続的に揺動される。Fig.3 に示したように揺動装置に固定されたファンモータの水平面からの揺動角 θ は、サーボモーターからの駆動軸 L_1 と揺動軸 L_2 の寸法を適宜設計することで決まる。今回の振動計測では、揺動角 θ を 15° 、 30° 、 45° の3条件で行った。Fig.4 に計測システムの概要を示す。

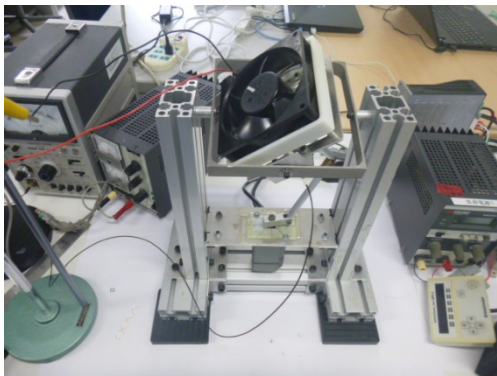


Fig.2 Overview of automatic rotary oscillating device

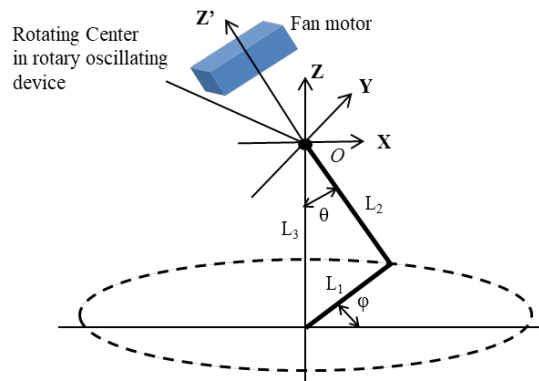


Fig.3 Schematic of automatic rotary oscillating device

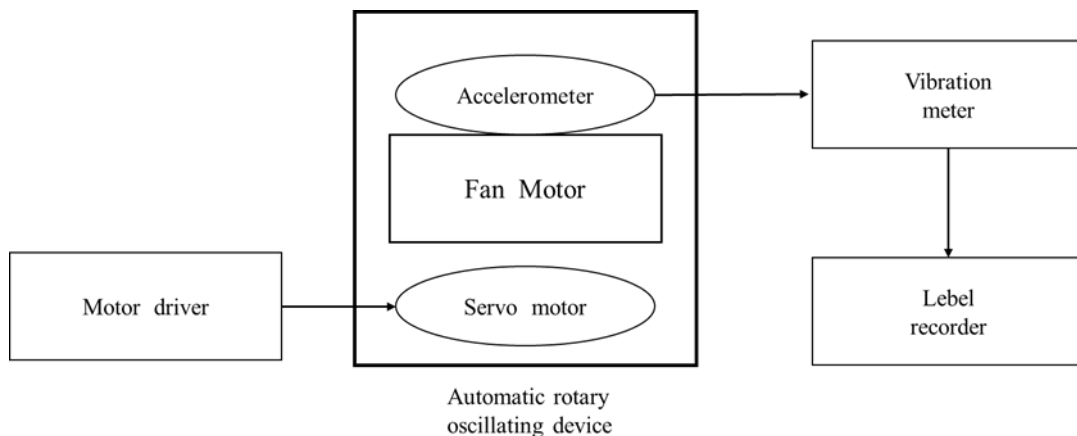


Fig.4 Block diagram of measurement system

3・2 実験方法

実験で使用したファンモータを Fig.5 に、また仕様を表 1 に示す。計測対象のファンモータは、製造年月の異なる生産ロットの中から製品 5 個を抽出した計 30 個である。振動の計測は、ファンモータの定格回転数 3400rpm、回転揺動装置のサーボモーターの回転数を 3rpm とし、計測時間を揺動回転 2 回分の 40 秒に設定

して行った. また, ファンモータの揺動角 θ を 15° , 30° , 45° の 3 条件とし, ファンモータのケーシングに取付けた加速度計により軸方向と径方向の振動加速度レベルを計測した.

計測した振動加速度レベルの時間変化から RMS 値とレベルの最大値と最小値との差である偏差を算出し, そこから MD を算出した.

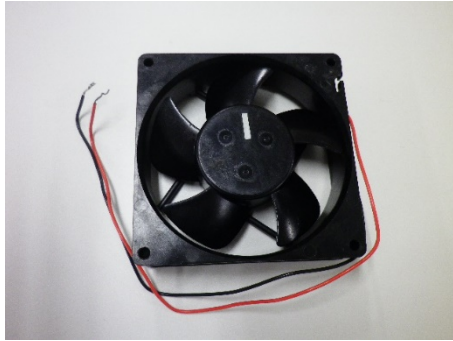


Fig.5 Test fan

Table 1. Specification of fan

Fan flame size	92.5×92.5×25.4(mm)
Blade number	5
Rated Voltage	DC12V
Rotational speed	3400(rpm)

4. 実験結果

4・1 回転揺動装置での計測結果

Fig.6 はファンモータを水平状態に設置した時のそれぞれ軸方向, 径方向の振動加速度レベルの相関を示す. 一見, 軸方向と径方向の振動加速度に相関があるように見えるものの, 個体のばらつきが少なく 1 つの集団として固まっているものもある. 測定対象のファンモータの個数 30 個は, 統計的に少ないと思われるが今回この測定対象の中で, 振動加速度レベルの小さいものから大きいものから比較的相関のある測定対象 (呼称: 2015C1, 2014L, 2015C5, 2014K, 2014E Fig.6 中の赤印記号) の 5 つのファンモータに着目した. 表 2 に, 熟練の官能検査員によるこの 5 つのファンモータの音と振動についての特徴をまとめている. ファンモータ 2014K と 2014E は, 他の 3 つと比較すると振動または音が大きいことが官能検査員から確認された. そこで Fig.7, Fig.8, Fig.9 にファンモータ 2014E, 2014K と振動および音が小さいと判定された 2015C1 について, 回転揺動時の振動加速度レベル値の変化を比較している.

Fig.7(a), (b) は, 2014E のファンモータについて揺動角 $\theta = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ における回転揺動装置を 2 回転させた時の駆動角に対するそれぞれ軸方向, 径方向の振動加速度レベルの変化を表している. Fig.7(a) の軸方向の振動加速度レベルでは, 揺動角 15° の時に, サーボモータの駆動角 $\phi = 90^\circ, 270^\circ$ 付近で振動加速度レベルが大きくなりピークを示している. これは揺動角 30° と 45° の時も同じような傾向になっている. Fig.7(b) の径方向では, 揺動角が 45° の時に振動加速度レベルが軸方向と同様な変化をしているが, 全体的に軸方向のような大きな変化は見られず, 最大値と最小値との偏差は小さくなっている.

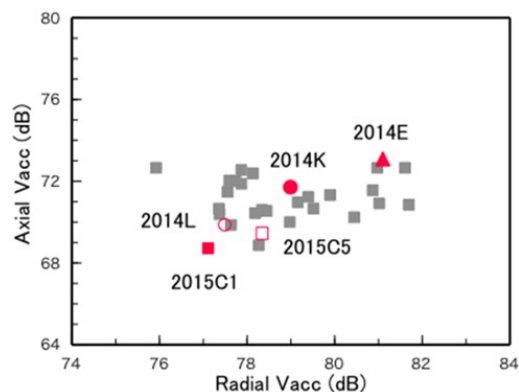


Fig.6 Acceleration level in the horizontal state

Table 2. Characteristic of the test fan by the inspector

Test fan #	振動の大きさ	回転音
2014E	普通	異音あり 回転立ち上がり, 停止時にジリジリ音, ビビ音
2014K	振動大 アンバランス	共振音
2014L	振動小 バランス良好	正常音
2015C1	振動小 バランス良好	正常音
2015C5	振動小 バランス良好	正常音

Fig.8(a), (b)はファンモータ 2014K の振動加速度レベルの結果を示している。2014K では、軸方向、半径方向共に 2014E のファンモータと比較してピークレベル値が大きくなっており、最大値と最小値の差である偏差が大きくなっている。このピークレベル値は揺動角度が大きいかほど高い値を示す傾向にある。

Fig.9(a), (b)に振動および音が小さなファンモータ 2015C1 の結果を示している。2015C1 は、ファンモータ 2014E と 2014K と比較すると軸方向、径方向の振動加速度レベルの変化は小さく、RMS 値も低くなっている。

ファンモータ 2014K は、水平状態に設置された状態での軸方向と径方向の振動加速度レベルは、共にほぼ集団の中央に位置しているが、回転揺動装置による振動の励起により軸方向、径方向で共に偏差が大きく表れる結果となった。また、特に Fig.8 に現われているように、サーボモーターによる駆動角 $\phi=90^\circ, 270^\circ$ の周期で振動が大きくなっている。これは、本回転揺動装置は 2 軸が直交したジンバル機構で構成されており、外側のジンバル軸の回転角度がほぼ 0° のとき振動加速度レベルは最小、揺動角 ($15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$) と一致するときにピークになっている。

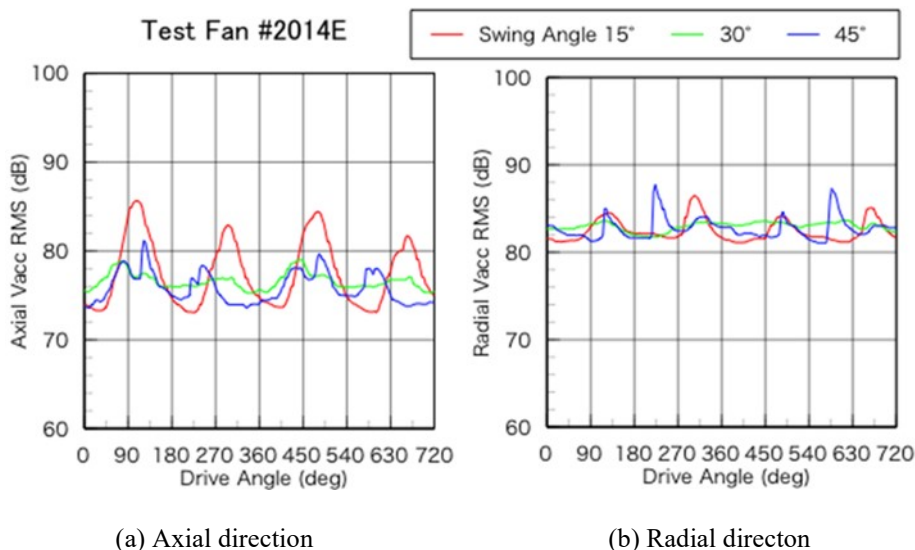


Fig.7 Acceleration level(RMS) of test fan #2014E with automatic rotary oscillating device

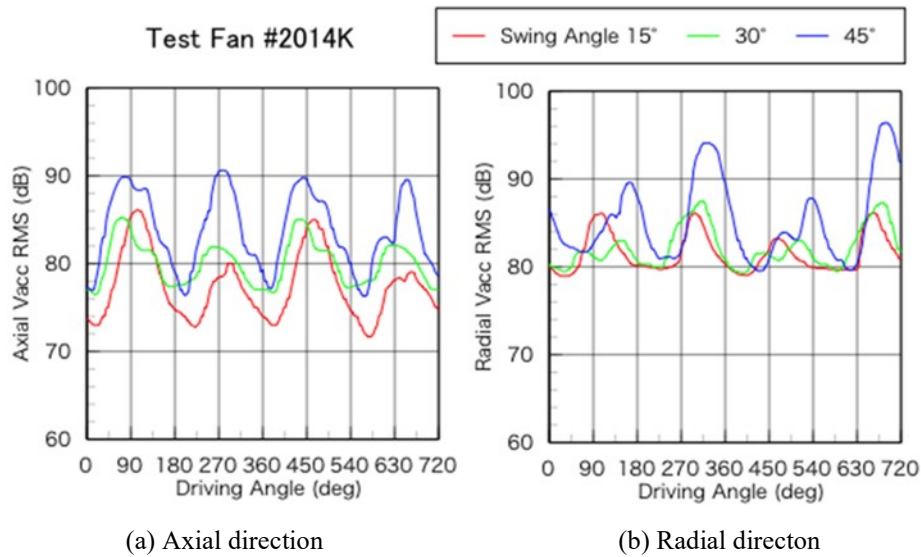


Fig.8 Acceleration level(RMS) of test fan #2014K with automatic rotary oscillating device

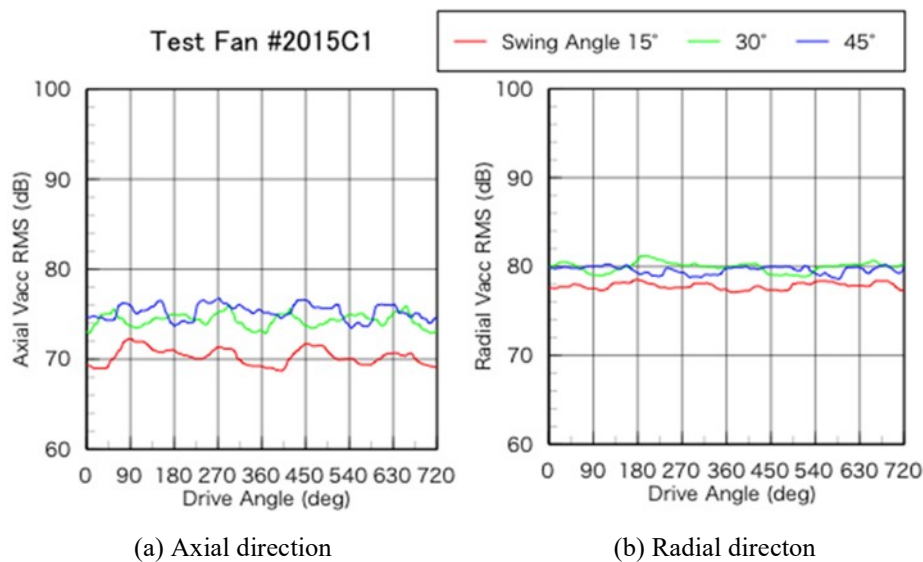


Fig.9 Acceleration level(RMS) of test fan #2015C1 with automatic rotary oscillating device

4・2 MT 法による判別方法

マハラノビス距離を用いて、振動の大きな個体を判定するためには、しきい値が必要となる。マハラノビス距離が 1 に近く小さい場合は単位空間に属すると判定し、その逆で、設定したしきい値を超えてマハラノビス距離が大きい場合は単位空間に属しないと判定する。マハラノビス距離を用いる場合のしきい値は、目安として 4 が良いと言われている。これは、統計数理上マハラノビス距離が 4 を超えると、対象データが単位空間に属する確率が小さくなるからである。

しかし、現在では MT 法におけるしきい値の決定方法に関する研究もされており χ^2 分布を用いてしきい値を設定する方法が、有効性が高いと報告されている[安部他, 2013]。そのため本研究でも χ^2 分布を用いてしきい値の設定を試みた。正例事象群の項目 k を用いて、式(4)によりマハラノビス距離の 2 乗に対するしきい値 s を定める。本研究では、正例事象群の項目数は平均値と偏差の 2 つであり、自由度が 2 に設定される。また、一般の χ^2 分布を用いた検定では優位確率が 5% に設定されている。従って、自由度 2、優位確率 5% の χ^2 分布の右側検定の逆関数からしきい値 6.0 とした。

$$s = \chi_k^2(\alpha) \tag{4}$$

Fig.10(a), (b)に、ファンモータの揺動角を 15°とした時の軸方向及び径方向におけるそれぞれの時間平均値と偏差の相関を示している。図の青い点は、マハラノビス距離が 6.0 になる位置を視覚化したものである。揺動角 15°では、振動の大きな個体(2014K)の MD が他の MD とあまり差がなく、しきい値内に収まっている。

Fig.11(a), (b)は、ファンの揺動角を 30°の時の時間平均値と偏差を示している。揺動角が 30°になると、2014K 以外のファンモータはほぼ一塊の集団となっている。これに対し 2014K は、集団から大きく離れ、Fig.11(b) に示した径方向のグラフではしきい値からはずれているのがわかる。さらに Fig.12(a), (b)の揺動角を 45°とした時も同様の傾向が見られ、軸方向、径方向共にしきい値からはずれる結果が得られた。この結果は、官能検査員によって振動が「大」と判断されたことと一致している。

このように、平置きの状態のファンモータから計測された振動加速度レベルが正常な集団範囲内であっても、揺動変位を与えた振動のデータ計測から、例えばファンモータ 2014K のようにマハラノビス距離がしきい値を大きく上回り「否」と判定することができる。

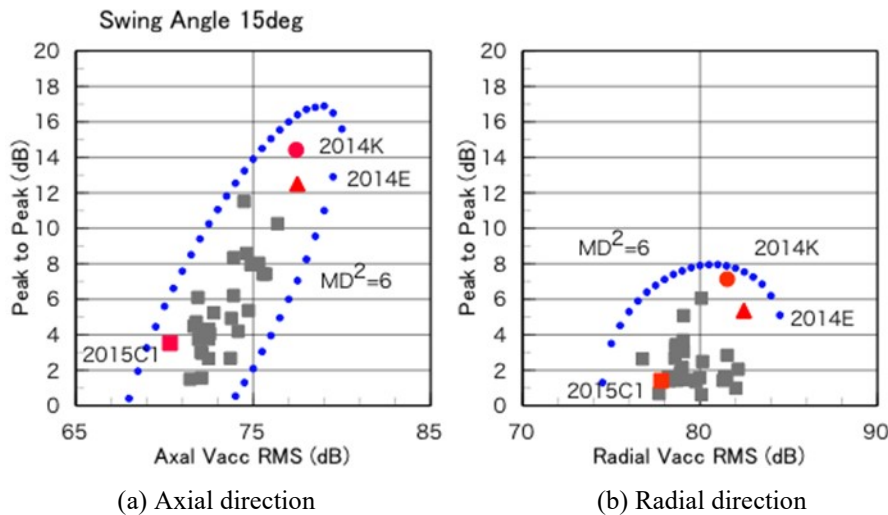


Fig.10 Threshold of visualized MD (Swing angle 15°)

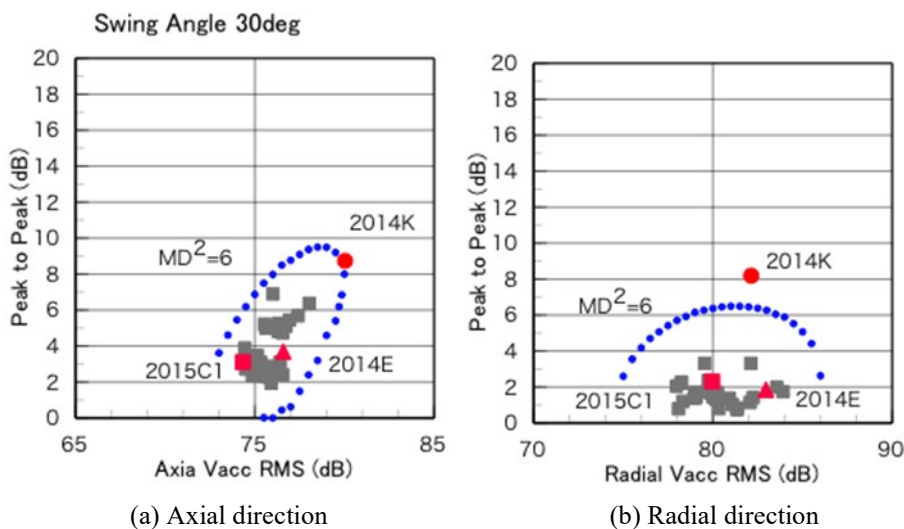


Fig.11 Threshold of visualized MD (Swing angle 30°)

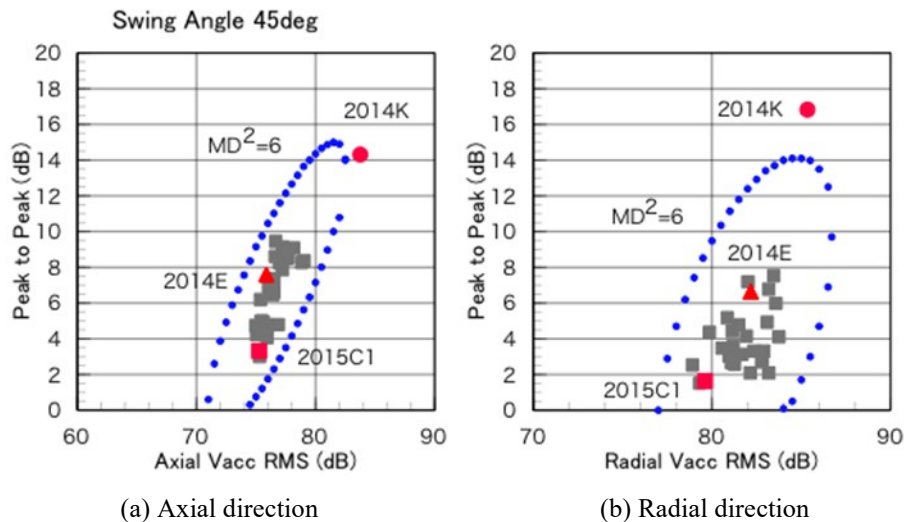


Fig.12 Threshold of visualized MD (Swing angle 45°)

5. 結 言

本研究で得られた結果として、動作中のファンモータに回転揺動変位を与えることで、面ぶれやアンバランスの要因を持ったファンモータの振動を励起させることを確認した。これは、面ぶれやアンバランスが大きい場合、軸方向および径方向の振動加速度レベルが大きくなることに起因すると考えられる。回転揺動中のファンモータの振動加速度レベルの時間変化を観察すると、揺動装置の回転角度が 90°と 270°の付近で振動加速度レベルがピークとなっている。これは外側のジンバルの回転軸が最大傾斜角になる点と一致しており、回転揺動装置の不安定な姿勢ではないかと推察する。また、揺動角を 15°,30°,45°と大きくなるにつれ、正常なファンモータはほぼ 1 つの集団として集まるようになり、異常なファンモータは集団から離れる。

今回、官能検査による確認製品として出荷されたものからサンプルとして抜き出したものに対し、本研究で開発した異常診断システムを用いて MD を算出し、しきい値を設定し診断することにより、「否」と判断できる製品を検出することができた。

参考文献

- (1) 安部将成, 松田 眞一, “MT 法におけるしきい値設定法の提案と比較”, Academia. Journal of the Nanzan Academic Society. Information Sciences and Engineering (2013), pp. 23-33.
- (2) 田口玄一, 「MT システムにおける技術開発」日本規格協会(2002),

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、オリエンタルモーター (株) からサンプルファンモータの提供と、官能検査を再度行っていただきました。関係者の方々に感謝申し上げます。