磁気ディスクスピンドルの非再現性振動の解析*

小野京右** 齊木直人*** 真田洋太郎*** 熊野昭彦†

Analysis of Non-repeatable Radial Vibration of Magnetic Disk Spindles

Kyosuke ONO, Naoto SAIKI, Yotaro SANADA and Akihiko KUMANO

This paper describes the theoretical and experimental investigation on strict comparison of non-repeatable radial vibrations (NRRV) between time and frequency domains. The statistical characteristics of NRRV are revealed by analyzing amplitude distributions of both asynchronous and synchronous vibration components in frequency domain. As a result of this study, it is found that the main part of NRRV is composed of asynchronous components in almost all spindles. The amplitudes of some asynchronous components are varying randomly and can be approximately expressed by Rayleigh distribution function. It is also found that the synchronous vibrations include also non-repeatable components. The variance of NRRV in time domain is shown theoretically and experimentally to be equal to the total power of asynchronous components and varying components of synchronous ones. From this relation, the cause of tracking error can be analyzed quantitatively in frequency domain.

Key words: magnetic disk spindle, non-repeatable vibrations, asynchronous component, Campbell diagram, histogram, Rayleigh distributions

1. ま え が き

磁気ディスク記憶装置のトラック密度を上げるには、追従制御帯域の向上とともに、トラック誤差要因の低減も重要である。特に小型・低価格の固定磁気ディスク装置では、転がり軸受に起因するディスクスピンドルのラジアル方向の非再現性成分が主要なトラック誤差要因であるため、この特性を分析し、その主要成分を低減していくことが高トラック密度化の重要な課題となっている。磁気記録装置における転がり軸受に起因する振動については、回転磁気ドラムの共振現象および共振回避の設計に関する筆者の研究¹⁾、大型磁気ディスク装置における同様の問題に関する松下らの研究などがある²⁾。一方、トラックずれになる非再現性振動の定量的分析は、最近 Bouchard らによって行われ、転がり軸受の振動は、流体軸受に比して、約1けた大きいことが明らかにされている³⁾。しかし非再現性成分の要因の定量的分析は行われておら

ず、また時間領域と周波数領域の突き合わせ方についても明確にされていない。そこで本研究では、最も汎用的な5.25 inの磁気ディスクスピンドルを対象に、その半径方向の振動を分析し、トラックずれとなる非再現性成分の時間領域におけるヒストグラム解析と周波数領域におけるスペクトル解析を行い、トラックずれとなる非再現性成分の特性、トラックずれ量の周波数領域と時間領域の突き合わせ方などについて明確にしたので以下に報告する。

2. 実験装置と実験方法

図1に実験装置の概要を示す。実機のベースフレームに取り付けた供試スピンドルには1枚の5.25 in ディスクを取り付け、固定用フランジの側面の半径方向の変位を光学的微小変位計で測定する。微小変位計

Fig. 1 Experimental apparatus

* 原稿受付 昭和63年9月1日。精密工学会昭和63年度関西地方定期学術講演会(昭和63年7月19日)にて発表

** 正会員 東京工業大学工学部(東京都目黒区大岡山2-12-1)

*** 東京工業大学大学院

† シーゲイト・テクノロジー・ジャパン(東京都豊島区東池袋3-1-1)

はベースフレーム上にマグネットスタンドにより固定し、ベースフレームはクッションシートにより柔支持している。微小変位計の出力は、オシロスコープで観測するとともに専用FFTアナライザで分析する。FFTアナライザ内のデータはパーソナルコンピュータに転送し各種の処理を行う。実験には625 zz（玉数 $z=7$ 個、転動体径 $d=2.8$ mm、ピッチ円直径 $D=10.5$ mm）の転がり軸受を有するスピンドル3個（No. 1, 2, 3）および707 zz（玉数 $z=6$ 個、転動体径 $d=3.5$ mm、ピッチ円直径 $D=12.5$ mm）の転がり軸受を有するスピンドル3個（No. 4, 5, 6）の合計6個のスピンドルを用意した。固定磁気ディスクのトラックずれは、物理的な一定の回転角位置を示すインデックス信号をトリガとして記録した回転中心軸の振動波形の再現性のない成分に相当する。そこで回転速度を制御するホール素子出力から1回転1パルスのトリガ信号を作り、これを時間原点とする20 ms間の出力波形 $x_T(t)_i$ を N 個記録する。次にこの N 個の波形をパーソナルコンピュータに取り込み、その平均波形 $\bar{x}_T(t)$

$$\bar{x}_T(t) = \sum_{i=1}^N x_T(t)_i / N \quad (1)$$

および各波形の平均波形からの変動成分 $\Delta x_T(t)_i$

$$\Delta x_T(t)_i = x_T(t)_i - \bar{x}_T(t) \quad (i=1 \sim N) \quad (2)$$

を求める。 $\Delta x_T(t)_i$ がトラックずれ波形に相当する。またトラックずれの統計的な性質を知るため $\Delta x_T(t)_i$ のヒストグラムを求める。ここで記録時間を20 msにしたのは、使用回転数3600 rpmで1回転を含み且つ実際のトラックずれ成分にはならない1回転以上の回転速度変動を含まないようにするためである。時間領域における統計処理のためのサンプル数は $N=64$ 個とし、ヒストグラムは3600 rpmと4500 rpmにおいて測定した。

次にこのトラックずれの原因を明らかにするために、専用FFTアナライザを用いてスペクトル解析する。しかし20 ms間の波形のスペクトルは50 Hzの周波数分解能しかないので無意味である。又専用FFTアナライザでは二つの記録波形の差の波形の分析はできない。そこでFFTアナライザの記録データ数が1024個であり、スペクトル数が400ラインであることを考慮し、最大分析周波数を500 Hz、周波数分解能を1.25 Hzとし、記録時間0.8 sの出力波形 $x_T(t)_i$ をスペクトル解析し振幅分布を求めた。非再現性成分の原因を知るには、広い回転速度範囲のスペクトル分布を知る必要がある。そこでスピンドルの回転速度を3300 rpmから4800 rpmまで変化させる制御

Fig. 2 Examples of non-repeatable vibration and histograms of $\Delta x_T(t)$ averaged over 64 data

回路を作り、この範囲でのキャンベル図を作成した。

さらにトラックずれに寄与する周波数成分を定量的に知るために、5章に示す理論に従ってその変動成分を抽出し、 $N=128$ 個のデータから各周波数成分の振幅の変動分布と分散を求めた。

出力波形をデジタルデータとして記録するFFTアナライザのダイナミックレンジは66 dBなので、より微小な振動成分を測定するために、フランジ部の形状および光の反射むらが生ずる定常的な変動波形の振幅を極力小さく押さえ $5 \mu\text{m}$ 以下とした。この場合理論上は3 nm以上の振動成分が測定できることになるが、キャンベル図では $0.01 \mu\text{m}$ (−54 dB) 以上の成分に注目した。なお、光学的微小変位計からFFTアナライザのノイズは十分−60 dB以下になっている。

3. 時間領域における非再現性成分の解析

図2にスピンドルNo. 1の3600 rpmにおける出力波形の変動成分 $\Delta x_T(t)_i$ の3個の代表例を、また図2(b)に、3600および4500 rpmにおける $N=64$ 個の $\Delta x_T(t)_i$ のヒストグラム $p_i(x)$ の平均 $p(x)$ を実線で示す。 $p_i(x)$ は各データ i によって異なりまたガウス分布ともかなり違っているが、その $N=64$ 個の平均値 $p(x)$ はガウス分布に近い。破線はこの $\Delta x_T(t)_i$ ($i=1 \sim 64$) から分散 σ^2 を求め、この σ を用いて正規化したガウス分布関数である。これからトラックずれの大きさはガウス分布関数で表すことができ、トラックずれの許容値が与えられれば、トラックエラー発生確率を求めることができる。

Table 1 Peak to peak value and rms value of tracking error in time domain

Spindle No.	Rotational speed rpm	P-P value μm	rms value σ_i μm
1	3 600	0.953	0.120
	4 500	1.702	0.197
2	3 600	0.788	0.095
	4 500	0.881	0.085
3	3 600	0.905	0.107
	4 500	0.916	0.092
4	3 600	0.979	0.130
	4 500	1.285	0.158
5	3 600	0.993	0.120
	4 500	0.965	0.111
6	3 600	0.957	0.095
	4 500	1.063	0.119

表1は6個のスピンドルの3 600および4 500 rpmにおけるトラックずれの標準偏差 σ_i (rms値)およびPeak-to-Peak (P-P) 値の測定値である。これから回転速度の高い方が必ずしも σ_i は大きいとは限らないことが分かる。また全測定データ中のトラックずれのP-P値は標準偏差 σ_i の8から10倍になっている。3 600 rpmにおける分散はNo. 2, 3, 6がNo. 1, 4, 5に比してやや小さいが、P-P値はいずれも1 μm 弱となっている。No. 1の4 500 rpmおよびNo. 4, 5などのトラックずれがなぜ大きいのかについては次に述べるキャンベル図から明らかになる。

なお、スピンドルの回転数変動およびFFTアナライザのサンプリング間隔($T/1024$)による時間原点の変動があると、定常的な変位波形がずれ、非再現性成分として計算されるので、これらの時間軸変動による標準偏差への影響を考察する。

$x_n(t) = a_n \sin n\omega t$ の波形に最大 $\pm \Delta T$ の時間軸変動が一樣確率で生じるとすると、1周期の平均的な分散は $\overline{\Delta x_n^2} = (a_n n \omega \Delta T)^2 / 6$ で与えられる。よって、 $a_n (n\omega)^2 = \text{一定}$ と考えられる通常の周波数成分をもつ定常波形の標準偏差は

$$\sigma = \sqrt{\sum \Delta x_n^2} = a_1 \omega \Delta T \pi / 6$$

(3)

で表される。いま、 $a_1 = 2 \mu\text{m}$ 、 $\omega = 4500 \text{ rpm}$ 、最大時間軸変動 $\pm 0.15\%$ と仮定すると、 $\sigma = 0.015 \mu\text{m}$ となり、表1の標準偏差の約15%ではほぼ無視できる値となっている。

4. キャンベル図

図3はスピンドル No. 1を3 300から4 800 rpmにわたり150 rpmごとに周波数分析し、周波数を縦横に、振幅を丸印の径の大きさに表したキャンベル図で、図3(a)は128個のデータの各成分の振幅の最大値、図3(b)は平均値である。白丸およびその中心を結んだ実線は回転数の整数倍の周波数成分(以下、同期成分という)で、黒丸とその中心を結んだ破線はそれ以外の周波数成分(以下、非同期成分という)である。非同期成分は同期成分に比して10倍拡大して示している。図3(a)および(b)から、非同期成分の振幅はかなり変動しているが、同期成分はほとんど変動していない。

図3において190 Hzおよび240 Hz近傍で非同期成分の振幅が大きくなっており、スピンドル機構と内輪のうねりによる後まわりの励振力とが共振を起こしているものと予想される。表1においてNo. 1の4 500 rpmにおけるトラックずれの標準偏差がかなり大きいのもこの共振のためである。これから使用回転数においては、転がり軸受の主要な励振力がスピンドルの固有振動数と一致しないようにすることが重要であるといえる。

図4はスピンドル No. 2, 4および6のスペクトルの

Fig. 3 Campbell diagrams of the maximum and averaged amplitude of radial vibration for No. 1 spindle

Fig. 4 Campbell diagrams of the maximum amplitude of radial vibrations for test spindles

最大振幅のキャンベル図である。No. 3 は No. 2 とほぼ同じ特性を有し、又 No. 5 は No. 4 とほぼ同じ特性を有する。これらの図からスピンドルの振動の特性は、(i) 全体的に非同期成分の振幅は小さく、あまり顕著な共振現象もみられないもの (No. 2, 3), (ii) 顕著な共振はみられないが、全領域にわたり非同期成分の振幅が大きいもの (No. 4, 5), (iii) 比較的大きな共振現象がみられるもの (No. 1, 6) に分類することができる。もちろん (i) が望ましい特性で、(ii) は軸受の精度が悪く、(iii) はスピンドルの機構系の設計に改善の余地があるといえる。

非同期成分は転がり軸受の内・外輪のレース面のうねり、玉の径の不均一、玉のきず又は非真球性、内・外輪のはめあい部の不均一さによる弾性変形によって生じ、その発生機構の概略は五十嵐⁴⁾⁵⁾、松下²⁾によって論じられている。それらの説明を参考にして、本実験結果に現れる周波数成分を整理すると表 2 となる。図 3 および 4 に示す各記号は表 2 に示す計算式の値に対応する。この表において $nzf_c \pm mf_r$ ($m \geq 1$), $2nf_b + f_c - mf_r$ ($m \geq 1$) など、従来報告されていないが、本実験結果には現れている成分である。

5. 非再現性成分の分散の周波数領域における評価法

次に、トラックずれの周波数成分の大きさを評価し、時間領域の分散 σ_t^2 との関係式を求める。図 5 に示すように、一定速度で回転する軸の測定断面の x 軸方向の変位 $x(t)$ の時間変動成分を測定する場合を考える。図 5 から、 $x(t)$ は回転中心点 O_1 の軸受中心

Table 2 Frequencies of asynchronous vibrations due to ball bearing

f_r ; rotational frequency of inner race
 $f_i = f_r - f_b$
 $f_c = f_r/2\{1 - (d/D)^2\}$; rotational frequency of retainer
 $f_b = f_r D/2d\{1 - (d/D)^2\}$; spin frequency of ball

Cause	Frequency
Waviness of inner race	nzf_i $nzf_i \pm mf_r$
Waviness of outer race	nzf_c $nzf_c \pm mf_r$
Irregularity of ball	$2nf_b \pm f_c$ $2nf_b \pm f_c - mf_r$
Difference of ball diameters	nf_c

Fig. 5 Cross sectional view of measurement

O からの時間的変動 $e(t)$ の x 軸方向成分と、トリガ作動点 a からの回転角位置 ωt における測定表面の非

真円成分 (r の変化成分) との和であり, 記録時間 T の波形 $x_T(t)_i$ は次式で表される.

$$x_T(t)_i = \sum_{n=1} (a_n \cos 2\pi n f_r t + b_n \sin 2\pi n f_r t) + \sum_m (c_{mi} \cos 2\pi m f_r t + d_{mi} \sin 2\pi m f_r t) \quad (4)$$

ここで右辺の上段の和はデータ i によって変化しない回転数に同期した再現性成分で, n は整数である. 不釣り合い振動は本来 $e(t)$ に含まれる成分であるが, 再現性をもつので上段の和の項に入っていると考える. 右辺下段の和は $e(t)$ 中に含まれる非再現性成分で, m は整数 (同期成分) および非整数 (非同期成分) の値をとり, いずれの場合も

$$\overline{c_{mi}} = 0, \quad \overline{d_{mi}} = 0 \quad (5)$$

が成り立つ. ここで $\overline{\quad}$ はデータ i に関する集合平均を表す. 時間領域の非再現性成分の分散 σ_i^2 は, パーセバルの公式より, 次式で与えられる.

$$\begin{aligned} \sigma_i^2 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{T} \int_0^T \{x_T(t)_i - \overline{x_T(t)}\}^2 dt \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T x_T(t)_i^2 dt - \frac{1}{T} \int_0^T \overline{x_T(t)}^2 dt \right\} \\ &= \frac{1}{2} \sum_m \{ (\overline{a_n^2 + b_n^2}) + (\overline{c_{mi}^2 + d_{mi}^2}) \} \\ &\quad - (\overline{a_n^2 + b_n^2}) \end{aligned} \quad (6)$$

上式で, 再現性成分については $\overline{a_n^2} = \overline{a_n^2} = a_n^2$, $\overline{b_n^2} = \overline{b_n^2} = b_n^2$ が成り立つ. よって, $x_T(t)_i$ のパワースペクトルから $\overline{x_T(t)}$ のパワースペクトルを引けば

$$\sigma_i^2 = \sum_m (c_{mi}^2 + d_{mi}^2) / 2 \quad (7)$$

が求まることになる.

しかし FFT アナライザに T 時間記録された波形の原点はトリガ点に対してサンプリング間隔 $\Delta T = T/1024$ 以内でランダムに変化しており, T が大きい場合, 同期成分の位相変動 $2\pi n f_r \Delta T$ により a_n, b_n が正確に求められない. すなわち, 原点の時間ずれ Δt_i による位相変動 $2\pi n f_r \Delta t_i = n\phi_i$ をもつ n 次成分の波形を FFT アナライザで分析すると, その実部および虚部は

$$\begin{aligned} A_n &= a_n \cos n\phi_i + b_n \sin n\phi_i \\ -B_n &= -b_n \cos n\phi_i + a_n \sin n\phi_i \end{aligned} \quad (8)$$

となる. よってそのパワースペクトル

$$A_n^2 + B_n^2 = a_n^2 + b_n^2 \quad (9)$$

は真の波形のパワースペクトルを表すが, A_n, B_n の集合平均は ϕ_i が $-\phi_m \leq \phi_i \leq \phi_m$ で一様な確率密度をもつとすると

$$\begin{aligned} \overline{A_n} &= a_n \sin(n\phi_m) / n\phi_m \\ \overline{B_n} &= b_n \sin(n\phi_m) / n\phi_m \end{aligned} \quad (10)$$

となる. したがって $\overline{A_n}, \overline{B_n}$ を $\overline{a_n}, \overline{b_n}$ とみなして式 (6) の右辺を計算すると $\overline{a_n^2} > \overline{A_n^2}$, $\overline{b_n^2} > \overline{B_n^2}$ であるため, 式 (6) の右辺は式 (7) の σ_i^2 より大きくなってしまふ. そこで式 (4) において同期成分については, 再現性, 非再現性成分をまとめて

$$\text{同期成分の和} = \sum_{n=1} E_{ni} \cos(2\pi n f_r t + \varphi_{ni}) \quad (11)$$

$$E_{ni} = \sqrt{(a_n + c_{ni})^2 + (b_n + d_{ni})^2} \quad (12)$$

$$\tan \varphi_{ni} = -\frac{(b_n + d_{ni})}{(a_n + c_{ni})} \quad (13)$$

と表す. ここで E_{ni} は同期成分の振幅である. いま, $(c_{ni}^2 + d_{ni}^2) / (a_n^2 + b_n^2) = O(\varepsilon^2) \ll 1$ と仮定して, 同期成分の振幅の分散 $(E_{ni} - \overline{E_n})^2$ を求めてみると,

$$\begin{aligned} (E_{ni} - \overline{E_n})^2 &= E_{ni}^2 - \overline{E_n}^2 \\ &= \frac{2(a_n^2 c_{ni}^2 + b_n^2 d_{ni}^2)}{a_n^2 + b_n^2} + O[\varepsilon^3(a_n^2 + b_n^2)] \end{aligned} \quad (14)$$

となる. ここでさらに同期成分の非再現成分の位相はランダムに変化していると考えてよいから, $\overline{c_{ni}^2} = \overline{d_{ni}^2} = \overline{d_{ni}^2}$ が成立する. そこでこれを式 (14) へ適用すると次式をうる.

$$(E_{ni} - \overline{E_n})^2 = 2\overline{c_{ni}^2} = \overline{c_{ni}^2} + \overline{d_{ni}^2} \quad (15)$$

以上のことから, 式 (11) において, 同期成分についてはその変動成分 c_{ni}, d_{ni} による位相変動 φ_{ni} が無視でき, $\varphi_{ni} = \varphi_n$ としてよいと考え, これを式 (6) へ代入した次式から非再現性成分の周波数領域の分散 σ_i^2 を算出すればよい.

$$\left. \begin{aligned} \sigma_i^2 &= \frac{1}{2} \sum_n (\overline{E_{ni} - \overline{E_n}})^2 \cdots \cdots \text{同期成分} \\ &\quad + \frac{1}{2} \sum_m (\overline{c_{mi}^2 + d_{mi}^2}) \quad (m \neq n) \\ &\quad \cdots \cdots \text{非同期成分} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

式 (16) の右辺第 1 項は, FFT アナライザによって得られた同期成分の振幅の分散から, 又第 2 項は非同期成分のパワースペクトルから直接求められる.

6. 周波数成分の振幅の変動特性と大きさ

まず代表例として, スピンドル No. 6 の 3600 rpm における非同期成分の FFT アナライザで分析された実部 c_{mi} および虚部 d_{mi} の 128 個のデータの平均値 $\overline{c_{mi}}, \overline{d_{mi}}$ を求めると, すべての成分が 0.43~3.08 nm の範囲にあった. これから $\overline{c_{mi}} = \overline{d_{mi}} = 0$ になっているとみなしてよく, したがって非同期成分に関して式 (5), したがって式 (16) が成立することが示された.

ところで周波数が確定的で振幅が不規則に変化する

Fig. 6 Amplitude distributions of asynchronous components for No. 6 spindle

現象は狭帯域確率過程と呼ばれ、その振幅 a の分布は Rayleigh 分布

$$p(a) = \frac{a}{\sigma_r^2} \exp\left[-\frac{a^2}{2\sigma_r^2}\right] \quad (17)$$

に従うことが証明されている⁷⁾。そこで代表例として、スピンドル No. 6 の 3 600 rpm における非同期成分の振幅の 128 個のデータのヒストグラムを図 6 に示す。破線は測定データから振幅の 2 乗平均値を求め、これが Rayleigh 分布の 2 乗平均値 $2\sigma_r^2$ に等しいとして描いた式 (17) の分布関数である。これらの図から幾つかの非同期成分の振幅はほぼ Rayleigh 分布に近いとみなしうることが分かる。ただし図 6 (d), (e), (g), (h) には 2 つ以上のピークが現れており、これから周期的に変動する性質も重ね合わされていると考えられる。転がり軸受に起因する非同期成分の振動振幅が不規則になるためには、予圧条件下において弾性接触しつつ転動する玉が酔歩運動をする必要があると考えられ、不規則振動の発生するメカニズムは今後の興味深い研究課題といえることができる。図 6 には各周波数成分の振幅の平均値、最大値および rms 値を示してあり、一見して玉の公転周波数成分と内輪のうねりによる振動の後ろまわり成分が支配的となっている。

次に式 (16) における同期成分について $n=1\sim 8$ までの振幅 E_{ni} の平均値および平均値からの変動分布を

図 7 に実線で示す。破線は変動成分の分散を求めて描いたガウス分布関数である。これから同期成分の中にも振幅がかなり変動しているものがあること、振幅変動は不規則的、調和的および両者が混在しているものなど各種あることが分かる。トラックずれに寄与する非再現性振動成分は、図 3 および 4 から分かるように、非同期成分が支配的である場合がほとんどであったが、スピンドル No. 6 においては図 7 から分かるように回転数の 2, 3 倍の成分も無視できない量になっている。ただしその rms 値は平均値 E_n の約 1/10 以下となっており、よって同期成分について式 (16) を導出した仮定が成立している。

表 3 に各スピンドルの 3 600 および 4 500 rpm における同期成分の振幅の変動成分の平均パワーの和 (式 (16) の右辺第 1 項) と非同期成分の平均パワーの和 (式 (16) の右辺第 2 項) を比較して示す。これから一般に非同期成分の平均パワーの和は同期成分のそれに比べて著しく大きい、No. 6 では同期成分も非同期成分に近い大きさとなっている。

表 3 には式 (16) に基づいて、同期成分と非同期成分の平均パワーの総和の平方根から求めたトラックずれの標準偏差 σ_t と、表 1 の時間領域で求めた標準偏差 σ_r に対する σ_t の比をも示してある。これから分かるように、 σ_t は一般に σ_r より小さく、 σ_t の 67~89%

Fig. 7 Amplitude distributions of synchronous components for No. 6 spindle

Table 3 Total power of synchronous and asynchronous components and rms value of tracking error in frequency domain

Spindle No. Rotational speed rpm	Total power of frequency components		rms value σ_t μm	σ_t/σ_i
	Synchronous μm^2	Asynchronous μm^2		
1 3 600	0.000 405	0.007 516	0.089	0.743
4 500	0.000 834	0.016 911	0.133	0.677
2 3 600	0.000 130	0.004 278	0.066	0.702
4 500	0.000 175	0.003 094	0.057	0.672
3 3 600	0.000 261	0.007 732	0.089	0.837
4 500	0.000 580	0.052 310	0.076	0.825
4 3 600	0.000 042	0.010 465	0.103	0.788
4 500	0.000 523	0.011 794	0.111	0.703
5 3 600	0.000 106	0.011 107	0.105	0.877
4 500	0.000 713	0.007 640	0.088	0.794
6 3 600	0.003 102	0.004 126	0.085	0.891
4 500	0.003 528	0.007 158	0.103	0.868

となっている。 $\sigma_t/\sigma_i < 1$ となる理由としては、 σ_t の計算では500 Hz以下の成分しか集計していないことが考えられる。これは、表3において3600 rpmの場合より4500 rpmの場合の方が σ_t/σ_i が小さくなっていることから理解できる。他の理由としてはFFTのパワースペクトルの誤差が考えられる。FFTアナライザではリーケージ誤差を小さくするため、ハニングウィンドウを用いているが、もし注目する周期数が分解能1.25 Hzの中間に存在すると、振幅にして約85%に低下する。さらにすでに述べたように、スピンドルの回転数変動、FFTアナライザの時間原点のずれなどによって10%前後 σ_i の方が大きくなることも考えられる。よって現在の分析技術がもつこれらの不可避的な誤差を考慮すれば、表3の σ_t と表1の σ_i はかなりよく一致しているということができ、式(16)の妥当性が示された。

7. 結 論

- (1) 非再現性成分は主として非同期成分から構成されている。非同期成分の振幅は一般に不規則に変化し、その振幅はRayleigh分布で近似できるものがある。
- (2) 非同期成分の中には、従来報告されていない、 $nzf_c \pm mf_r$ および $2nf_b + f_c - mf_r$ などが含まれる場合がある。
- (3) 同期成分の振幅にも非再現性成分が存在し、その変動はガウス分布で近似できるもの、調和的に変化するもの、両者が混在しているものなどがある。
- (4) トラックずれの分散は、非同期成分の平均パワーの和と同期成分の振幅の変動成分の平均パワーの総和に等しいことが理論と実験により明らかになり、この関係を用いればトラックずれの原因となる周波数成分を定量的に分析できる。

なお本手法は一般に高精度スピンドルの回転精度を計測・分析する方法として用いることができる。

参 考 文 献

- 1) 小野京右：通研研究実用化報告，23，10（1974）218.
- 2) 松下修己ほか：日本機械学会論文集，(C)，52，474（1986）439.
- 3) G. Bouchard et al.：IEEE Trans. Magnetics，MAG 23，5，（1987）3687.
- 4) 五十嵐昭男：振動工学ハンドブック（谷口 修編），養賢堂（1976）973.
- 5) 五十嵐昭男：潤滑，32，5（1987）21.
- 6) S. Goldman（関 英男訳）：情報理論，近代科学社（1956）102.
- 7) S. H. Grandall & W. D. Mark：Random Vibration in Mechanical Systems，Academic Press，New York，N. Y.，（1963）48.