

玉軸受の3次元NRRO解析

3-Dimension Analysis of NRRO in Ball Bearings

多田誠二 S. TADA

NRRO is one of the characteristics of a high precision ball bearing. The decrease of NRRO contributes to the track density improvement (memory capacity improvement) of hard disk drives.

Here, the NRRO analytical program of ball bearings has been developed, and the result of NRRO analysis is shown. The developed program is 3-dimension NRRO analytical program which fixes the contact angle, and a static analytical program including the concept of time.

Key Words: ball bearing, non-repeatable run-out, race behavior, 3-dimension analysis

1. はじめに

玉軸受の性能を示す指標のひとつにNRRO (Non-Repeatable Run-Out)がある。これは軸受の回転精度を示す重要な指標のひとつである。特にハードディスクドライブ(以下HDDと称す)スピンドル用軸受では、NRROがデータ読み書きに弊害を与えるトラッキングエラー発生やスピンドル共振の加振源となる可能性があり、トラック密度向上の妨げとなっている。よって、玉軸受のNRRO発生原因やその規則性を見出すこと、および回転軸の挙動形態を把握することは、NRROを低減する上で重要である。

玉軸受におけるNRROの実験的解析は、非常に進んでいる。玉軸受の主要なNRRO成分(1次成分)については古くから研究が行われており、実験的にほぼ解明されている^{1)~6)}。一方、NRROの数値解析については、動解析では多大な計算時間が必要なため、時間の大幅短縮を計る手法として、玉-軌道間のばね力(弾性復元力)を線形化した静的なラジアル方向(2自由度)の2次元線形解析法⁷⁾や、玉-軌道間のヘルツ接触を考慮した2次元非線形解析法⁸⁾が報告されている。後者の非線形解析では、NRROの1次成分だけでなく、2次成分が発生することも紹介されているが、詳細は不明である。また、2次元非線形解析の元で、軸受2個使いでの動解析法も紹介されている⁹⁾。これらは計算時間の大幅短縮を達成しているが、ラジアル方向のNRROの解析であり、アキシャル方向の解析には言及していない。

3次元NRRO解析を行う場合には、軸受動解析ソフトADORE¹⁰⁾を用いれば、玉接触角を考慮し、玉-軌道間のばね特性がヘルツ接触で非線形な5

自由度NRRO動解析が可能である。このソフトを用いれば、内・外輪の軌道うねり、玉ピッチ誤差、玉数等によるNRRO成分の影響を3次元空間で高精度に解析することが可能である。ただし、潤滑膜を考慮した接触状態を考慮するだけでなく、保持器の衝突問題まで含んだ動解析ソフトであるため、解析時間が非常にかかる。また、前者の2次元解析法で解析可能な玉うねりの影響も、3次元的なうねり情報を入力する必要があるため、現状では解析が困難である。よって、これらを全て補う解析プログラムがあれば、より高度なNRRO解析が可能と考えられる。

そこで、本研究では、玉が接触角を持ってヘルツ接触する玉軸受を解析モデルとし、接触角を固定(玉自転軸固定)とすることで、玉うねりも考慮可能とし、時間の概念を取り入れて準動的に解析を行うことで計算時間を飛躍的に短縮することが可能な3次元非線形NRRO解析プログラムを開発したので結果を示す。

2. 3次元NRRO解析

2.1 解析方法

玉表面および内・外輪軌道のうねりが原因で発生するNRROは、幾何学的な力の釣り合いから算出可能である。なお、NRROについての一般的説明は多くの文献でなされており前号(no. 160)でもとりあげられているので省略する。

うねりを考慮したNRRO計算プログラムについては、接触角を0 radとした2次元解析プログラムがいくつか紹介されているので^{7), 8)}、ここでは、軸受単品のNRRO測定時に使われている定圧予圧方式で軸受に予圧 P_L を加え、幾何学的理想形状で

接触角が固定(モーメントの釣り合い無視)され、玉が等配(進み遅れなし)された状態での3次元NRRO算出法について述べる。外輪回転時の解析モデルの模式図を図1に示す。同図では、軌道および玉転走面のうねりによって内輪幾何学中心 G_i (0, 0, 0)は固定のため変化しないが、外輪幾何学中心 G_o (x, y, z)が変化した模式図である。玉と内・外輪は、非線形ばね K_i, K_o でそれぞれ支持されており、接触角は初期予圧 P_L だけ付加された場合の値を用いている。この接触角は初期状態で、解析中一定であると仮定している。また、座標系は図1のように、z軸をアキシャル方向とする直交座標系とした。

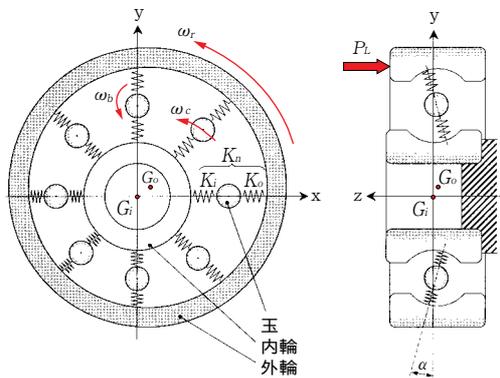


図1 解析モデルの模式図(外輪回転時)
Scheme of analysis model (outer race rotation)

玉表面および内・外輪軌道うねりは、フーリエ級数に展開可能であるから、内・外輪軌道半径を r_i, r_o 、玉半径を r_b 、各山のうねり振幅と位相差をそれぞれ a_i, a_o, a_b, ϕ_j (j :山数)とすれば、 t 秒後の j 番目の玉における内・外輪および玉のうねり形状を含んだ玉接触位置でのうねり形状関数 W_{ij}, W_{oj}, W_{bj} は(1)で示される。

$$\begin{aligned}
 W_{ij} &= r_i + \sum_{k=1}^N a_{ik} \cos(j\omega_i t - \phi_{ik}) \\
 W_{oj} &= r_o + \sum_{k=1}^N a_{ok} \cos(j\omega_o t - \phi_{ok}) \\
 W_{bj} &= 2r_b + \sum_{k=1}^N [a_{bk} \{ \cos(j\omega_b t - \phi_{bk}) + \cos(j\omega_b t - \phi_{bk} + \pi) \}]
 \end{aligned} \tag{1}$$

ここで、

- ω_c : 玉公転角速度
- ω_b : 玉自転角速度
- ω_r : 外輪角速度 [rad/sec]
- i, o, b : 内輪, 外輪, 玉
- j : j 番目の玉
- k : うねりの山(次数)

である。よって、 t 秒後の j 番目の玉位置での弾性変位量 δ_j は(2)で示される。

$$\delta_j = (W_{ij} - W_{oj}) \cos \alpha + W_{bj} + d_{pl} \tag{2}$$

ここで、 d_{pl} : 初期予圧に伴う内・外輪と玉間における接触角 傾いた接触方向の弾性変位量

となる。ヘルツ理論により1個の玉において転動体荷重 Q と弾性変位量 δ_j との間には(3)の関係がある¹¹⁾。

$$Q = K_n \delta_j^{1.5} \tag{3}$$

ここで K_n は定数であり、玉-内輪間の定数を K_i 、玉-外輪間の定数を K_o とすれば、 K_n は(4)で示される。

$$K_n = \frac{K_i K_o}{[K_i^{2/3} + K_o^{2/3}]^{1.5}} \tag{4}$$

以上から、外輪幾何学中心の各軸への変位 x, y, z を変数とすると、力の釣り合いは、(5)で示される。

$$\left. \begin{aligned}
 \sum_{j=1}^Z K_j \{ \delta_j - (x \cos \theta_j + y \sin \theta_j) \cos \alpha - z \sin \alpha \}^{1.5} \cos \alpha \cos \theta_j &= 0 \\
 \sum_{j=1}^Z K_j \{ \delta_j - (x \cos \theta_j + y \sin \theta_j) \cos \alpha - z \sin \alpha \}^{1.5} \cos \alpha \sin \theta_j &= 0 \\
 \sum_{j=1}^Z K_j \{ \delta_j - (x \cos \theta_j + y \sin \theta_j) \cos \alpha - z \sin \alpha \}^{1.5} \sin \alpha &= F_a
 \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

ここで、 θ_j は任意の時刻における j 番目の玉の角位置(x 軸上を0 degとし時計回り方向の角度)である。なお、(4)式は、それぞれ x, y, z 方向の力の釣り合いで、この非線形連立方程式を解くことで、各時間における各要素のうねりを考慮した外輪の挙動を解析できる。また、接触角 α は、予圧によって変化するが、うねりの大きさでは変化しないとし、玉自転軸を固定している。これにより、ADOREでは計算が困難であった玉うねりの影響も限定的ではあるが解析可能である。ただし、モーメントの釣り合い、遠心力やうねりによる接触角の変化は無視している。

2.2 うねり付加時のNRRO解析結果

2.2.1 単一うねりが付加された場合のNRRO

前節で説明した式を用いて3次元NRRO解析プログラムを作成し、内・外輪玉のうねりと外輪挙動の関係を解析した結果の例を示す。なお、入力うねりは、全振幅(p_p 値)で、NRROの値は、外輪幾何学中心に対しハニング窓適用後、FFT解析にて得られたパワースペクトル値の2倍(p_p 値)で示している。また、内・外輪軌道うねりは、軌道底径がうねりによってラジアル方向に増減するが、軌道半径(曲率)は変化しないものとする。

表1に基準モデルの解析パラメータを示す。

表2に単一うねりの場合のNRRO出現周波数を示す。ここで、表2に示した $nZ \pm 1$ 山のうねり成分は、(4)式の指数部を排除した線形方程式でも確認でき、NRROの大きさは、予圧、材質、接触角等の入力パラメータに関係なく一定であった。図2に解析結果例を示す。うねりに対するNRROの大きさは、解析モデルさえ決まれば、うねりの大きさと出現するNRRO成分の大きさは比例関係にある。ただし、玉については、玉数を増加させるとNRROが減少している(線形モデルでは、反比例の特性を示す)。一方、アキシアル方向のNRRO成分、玉うねりによる成分は、予圧、残留ラジアルすきま(接触角)が変化すると、NRROは非線形特性を示す。

表1 基準解析モデル
Standard analysis model

| | | | |
|---------|------|---------|--------------------------|
| 回転区分 | 外輪回転 | 予 圧 | 20N |
| 予圧方式 | 定圧予圧 | ヤング率 | 2.08×10^{11} Pa |
| 玉ピッチ円直径 | 7 mm | ポアソン比 | 0.3 |
| 玉 径 | 1 mm | ラジアルすきま | 10 μ m |
| 玉 数 | 8 | | |

表2 単一うねり付加時のNRRO 1次成分

The first element of NRRO when single waviness is added

| 入力うねり | うねり山数 | x, y方向 [Hz] | z方向 [Hz] |
|---------------|----------|---------------|------------|
| 内輪(静止輪) | nZ | - | nf_i |
| | $nZ + 1$ | nf_i | - |
| | $nZ - 1$ | nf_i | - |
| 外輪(回転輪) | nZ | - | nf_o |
| | $nZ + 1$ | $nf_o + f_r$ | - |
| | $nZ - 1$ | $nf_o - f_r$ | - |
| 玉 ($Z = 8$) | $2n$ | $2nf_o - f_c$ | - |
| | | $2nf_o + f_c$ | - |
| | | - | $2nf_o$ |

注記(1): 玉数, 接触角(ラジアルすきま), 材質, 予圧で変化

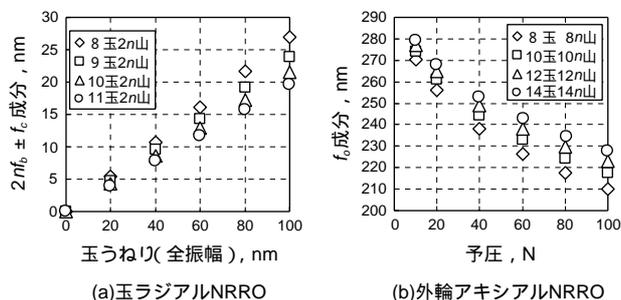


図2 NRRO解析結果例

Examples of NRRO analysis

次に、2次成分以上の高次成分について説明する。単一うねりのみを考慮した場合でも、非線形NRRO解析では、表2に示した以外の山数でNRRO成分が発生している。この発生形態をまとめると、表3のようになる。すなわち、内・外輪うねりの山数を W_n 、次数を j とすれば、

$$W_n = \frac{nZ}{j} \quad \text{出現周波数: 内輪; } nf_i \quad \text{外輪; } nf_o$$

$$W_n = \frac{nZ \pm 1}{j} \quad \text{出現周波数: 内輪; } nf_i \quad \text{外輪; } nf_o \pm 1$$

j : 次数, W_n : うねりの山数, n : 正の整数
右辺が正数のときNRRO発生

.....(6)

の関係にある。なお、解析の結果、NRROの次数が大きくなると、対数的にNRRO成分の大きさが小さくなっていく。よって、通常2次(多くても3次)の成分までを考慮すれば良いと思われる。ここでは、2次成分における考察結果を紹介する。

表3 NRRO高次成分(1次成分を含む)

Higher-order elements of NRRO (first element including)

| 入力うねり | うねり山数 | x, y方向 [Hz] | z方向 [Hz] |
|-------|-------------|---------------|------------|
| 内 輪 | $n(Z + 1)j$ | nf_i | - |
| | $n(Z - 1)j$ | nf_i | - |
| | nZ/j | - | nf_i |
| 外 輪 | $n(Z + 1)j$ | $nf_o + f_r$ | - |
| | $n(Z - 1)j$ | $nf_o - f_r$ | - |
| | nZ/j | - | nf_o |

n : 正の整数, j : 次数(うねり山数が正の整数時発生)

図3に軌道うねりの大きさ、予圧、ラジアルすきま(接触角)が変化した場合のNRRO 2次成分の変化を示す。同図は、表3で、 $j = 2, n = 1$ とした外輪軌道うねり入力した結果で、左図が外輪アキシアル方向、右図が外輪ラジアル方向のNRRO 2次成分の大きさを示している。

1次成分では、ラジアル方向のNRROが予圧やラジアルすきまの変化に関係なく一定であったのに対して、2次成分では非線形特性を示していることがわかる。また、うねりの大きさの増加に対して、NRRO 2次成分は2乗に比例して大きくなっている。さらに、2次成分では、1次成分とことなり、同じ入力うねりであれば、玉数が増加するほどNRRO成分が増加している。

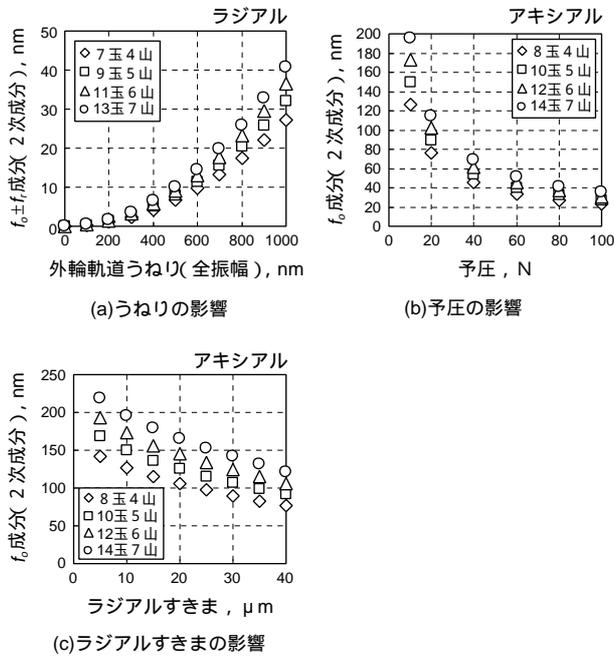


図3 NRROの2次成分の解析結果

Analytical result of the second element of NRRO

最後に、単一うねりを外輪に付加した場合の、NRRO出現周波数を表4に示す。同表は玉数および外輪軌道のうねり山数を20までとし、1～3次のNRRO成分を記述している。内輪(固定輪)に対しては、(6)式に示したように、出現周波数が異なるだけで、この結果と同じ玉数、うねり山数でNRRO成分が発生する。

表4 NRRO発生周波数(1～3次成分)

Generation frequency of NRRO (from 1st to 3rd element)

| 玉数 Z | うねり山数 W_n | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------|-------------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--|
| | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | |
| 7 | f_{o-} | f_{o+} | $2f_{o+}$ | $2f_{o+}$ | f_{o-} | f_{o-} | f_{o+} | $4f_{o+}$ | $3f_{o-}$ | $3f_{o+}$ | $5f_{o+}$ | $2f_{o-}$ | $2f_{o+}$ | $2f_{o+}$ | | $5f_{o-}$ | $5f_{o+}$ | | | |
| 8 | | f_{o+} | f_{o-} | $2f_{o-}$ | | f_{o-} | f_{o+} | f_{o+} | $4f_{o+}$ | $3f_{o-}$ | $5f_{o-}$ | | $2f_{o-}$ | $2f_{o+}$ | $2f_{o+}$ | | | $5f_{o-}$ | | |
| 9 | | f_{o-} | f_{o+} | $2f_{o+}$ | | f_{o-} | f_{o+} | f_{o+} | $4f_{o+}$ | $3f_{o-}$ | $3f_{o+}$ | $5f_{o-}$ | | $2f_{o-}$ | $2f_{o+}$ | $2f_{o+}$ | | | $5f_{o-}$ | |
| 10 | | | f_{o-} | f_{o+} | $2f_{o+}$ | | f_{o-} | f_{o+} | f_{o+} | $4f_{o+}$ | $3f_{o-}$ | $3f_{o+}$ | $5f_{o-}$ | | $2f_{o-}$ | $2f_{o+}$ | $2f_{o+}$ | | $5f_{o-}$ | |
| 11 | | | | f_{o+} | f_{o+} | $2f_{o+}$ | | f_{o-} | f_{o+} | f_{o+} | $4f_{o+}$ | $3f_{o-}$ | $3f_{o+}$ | $5f_{o-}$ | | $2f_{o-}$ | $2f_{o+}$ | $2f_{o+}$ | $5f_{o-}$ | |
| 12 | | | | | f_{o-} | f_{o+} | $2f_{o+}$ | | f_{o-} | f_{o+} | f_{o+} | $4f_{o+}$ | $3f_{o-}$ | $3f_{o+}$ | $5f_{o-}$ | | $2f_{o-}$ | $2f_{o+}$ | $5f_{o-}$ | |
| 13 | | | | | | f_{o+} | $2f_{o+}$ | | f_{o-} | f_{o+} | f_{o+} | $4f_{o+}$ | $3f_{o-}$ | $3f_{o+}$ | $5f_{o-}$ | | $2f_{o-}$ | $2f_{o+}$ | $5f_{o-}$ | |
| 14 | | | | | | | f_{o+} | $2f_{o+}$ | | f_{o-} | f_{o+} | f_{o+} | $4f_{o+}$ | $3f_{o-}$ | $3f_{o+}$ | $5f_{o-}$ | | $2f_{o-}$ | $2f_{o+}$ | |
| 15 | | | | | | | | f_{o+} | $2f_{o+}$ | | f_{o-} | f_{o+} | f_{o+} | $4f_{o+}$ | $3f_{o-}$ | $3f_{o+}$ | $5f_{o-}$ | | $2f_{o-}$ | |
| 16 | | | | | | | | | f_{o+} | $2f_{o+}$ | | f_{o-} | f_{o+} | f_{o+} | $4f_{o+}$ | $3f_{o-}$ | $3f_{o+}$ | $5f_{o-}$ | | |
| 17 | | | | | | | | | | f_{o+} | $2f_{o+}$ | | f_{o-} | f_{o+} | f_{o+} | $4f_{o+}$ | $3f_{o-}$ | $3f_{o+}$ | $5f_{o-}$ | |
| 18 | | | | | | | | | | | f_{o+} | $2f_{o+}$ | | f_{o-} | f_{o+} | f_{o+} | $4f_{o+}$ | $3f_{o-}$ | $3f_{o+}$ | |
| 19 | | | | | | | | | | | | f_{o+} | $2f_{o+}$ | | f_{o-} | f_{o+} | f_{o+} | $4f_{o+}$ | $3f_{o-}$ | |
| 20 | | | | | | | | | | | | | f_{o+} | $2f_{o+}$ | | f_{o-} | f_{o+} | f_{o+} | $4f_{o+}$ | |

注 重複する箇所は次数の低い成分を表記
 nf_{o+} : $nf_o + f_r$, nf_{o-} : $nf_o - f_r$

2.2.2 内外輪にうねりが付加された場合

内・外輪にうねりがある場合も、基本的に、単一NRRO成分の和(あるいは差)でNRROが出現する。ただし、解析を進めていく過程で例外的な成分が存在していることがわかった。それは、和差成分で発生するNRROである。すなわち、内輪および外輪に単一うねりの和あるいは差が前節の和

差成分と一致した場合、2次成分が発生する。しかし、その出現周波数は異なる。

今、内・外輪うねりの山数をそれぞれ W_{ni} , W_{no} とすると、

$$\left. \begin{aligned}
 &|W_{ni} + W_{no}| = nZ + 1 \text{ が成立した時} \\
 &\left| \frac{W_{ni}(nf_o + f_r) \mp nW_{no}f_i}{W_{ni} \pm W_{no}} \right| = |W_{no}f_r \mp nf_i| \text{ [Hz]} \\
 &|W_{ni} + W_{no}| = nZ - 1 \text{ が成立した時} \\
 &\left| \frac{W_{ni}(nf_o - f_r) \mp nW_{no}f_i}{W_{ni} \pm W_{no}} \right| = |W_{no}f_r \mp nf_i| \text{ [Hz]} \\
 &|W_{ni} \pm W_{no}| = nZ \text{ が成立した時} \\
 &\left| \frac{nW_{no}f_o \mp nW_{ni}f_i}{W_{ni} \pm W_{no}} \right| = |W_{no}f_r \mp nf_i| \text{ [Hz]}
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

ただし、いずれも $W_{ni}, W_{no} \neq nZ, nZ \pm 1$

の周波数にNRRO 2次成分が発生する。

3. NRROの挙動解析結果

NRROの本質を知るためには、回転輪幾何学中心の挙動を把握することも、軸受の特性、測定方法を考える上で重要である。本章では、まず、単一のうねりに関する挙動を示す。次に、内輪(静止輪)ラジアルNRROの異方性について述べる。

3.1 軸受各要素に単一うねりがある場合の挙動

軸受各要素の1箇所に単一うねりが存在する場合の回転輪挙動は、NRROの理解を深める基本となるため、簡単に解説する。この場合、回転輪幾何学中心の挙動は4通りに分類できる。すなわち軌道に $nZ \pm 1$ 山うねりがある場合、軌道に nZ 山うねりがある場合、玉に $2n$ 山うねりがある場合、玉に直径相互差、周方向ピッチ誤差が存在する場合

である。

は、Z方向に対してNRRO発生周波数で往復運動し、この場合は、力のつりあう位置に外輪が移動し、保持器自転周波数 f_c [Hz] で回転方向に周回運動するので、これらは割愛する。および

の場合に対する解析結果を図4および図5にそれぞれ示す。軌道に $nZ \pm 1$ 山の単一うねりがある場合は、発生周波数でラジアル方向に周回運動をする(アキシャル方向に変動なし)。ただし、 $nZ + 1$ 山と $nZ - 1$ 山で周回方向が異なる。また内・外輪によっても回転方向が異なっている。これらの成分は、特に1次成分では線形解析でも確認できることから、単純な力の釣り合いで動くものとする。なお、2次成分も、同様の円運動をしており、円の直径はNRROの値と一致し、その

回転周期がNRRO発生周波数である．また，図5に示した玉の挙動は，1個の玉に2山のうねりを付加した場合のもので，他の成分と比べて複雑な挙動をしている．また，同図は外輪4回転分の挙動であり，解析点数を増やしていくと，ほぼガラス状の外形となる．挙動は，左回りの楕円状に回転（1往復が玉の1回転）しながら回転方向に少しずつずれていく（玉公転の影響）．

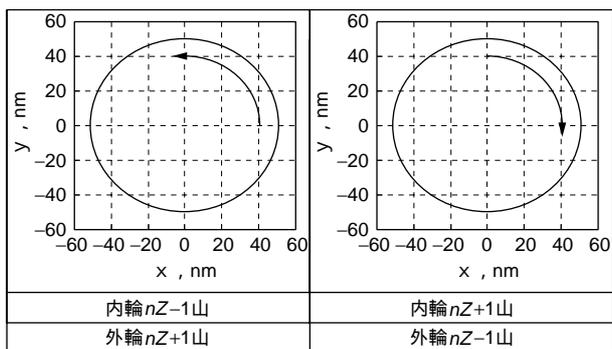


図4 $nZ \pm 1$ 山付加時の外輪幾何学中心挙動

Outer race geometrical center behavior when $nZ \pm 1$ robes is added

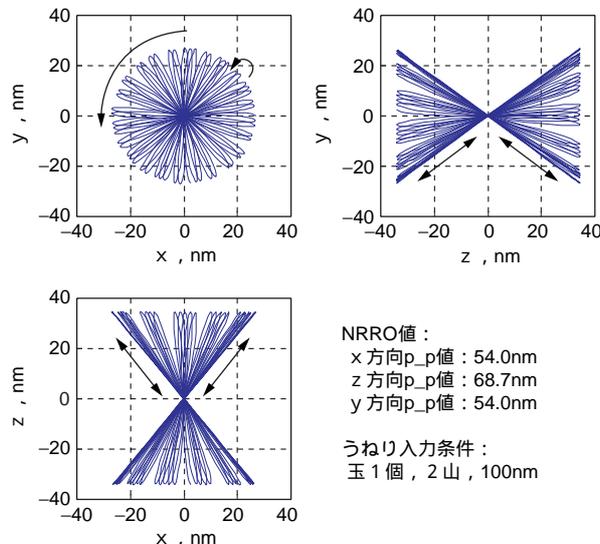


図5 玉2山成分うねり付加時の外輪幾何学中心挙動（玉自転軸，接触角固定，外輪4回転の挙動）

Outer race geometrical center behavior when waviness of two robes element of ball is added

3.2 静止輪Z±1山複合による異方性の解析

本節では内輪にZ+1山とZ-1山うねりの大きさと位相を変化させた場合の挙動について述べる．解析例(玉数8個)を図6に示す．

| | | Z+1山うねり(9山) | | | |
|-------------|------------------|----------------|--------------------|-----------------|----------------|
| | | 振幅0.25, 位相0° | 振幅: 0.5, 位相30° | 振幅: 0.75, 位相60° | 振幅1, 位相90° |
| Z-1山うねり(7山) | 振幅: 0.25 位相0° | | | | |
| | | a=0.5, b=0 | a=0.75nm, b=0.25nm | a=1, b=0.5 | a=1.25, b=0.75 |
| | | =0° | =135° | =90 (≡ 270°) | =45 (≡ 405°) |
| | | | | | |
| | a=0.75, b=0.25 | a=1, b=0 | a=1.25, b=0.25 | a=1.5, b=0.5 | |
| | =75 (≡ -105°) | =30° | =165° | =120 (≡ 300°) | |
| | 振幅: 1 位相90° | | | | |
| | | a=1.25, b=0.75 | a=1.5, b=0.5 | a=1.75, b=0.25 | a=2, b=0 |
| | | =45 (≡ -315°) | =0 (≡ -180°) | =135 (≡ -45°) | =90° |
| | | | | | |

図6 内輪Z+1山うねりの複合による異方性の解析例（Z=8, a: 長軸長さ, b: 短軸長さ, : 長軸の傾き）

Example of analyzing anisotropy when waviness of Z+1 robes of inner race is combined (Z=8, a: Length of major axis, b: Length of minor axis, : Inclination of major axis)

図より、内輪(静止輪)に $Z+1$ 山と $Z-1$ 山のうねりがある場合、NRROのリサージュは、うねりの大きさが同じ場合、線状になり、大きさが異なる場合は楕円形状になる。長軸の長さは、うねりの大きさの和に、短軸は差の絶対値になることがわかる。また、内輪うねりの位相差によって楕円形状長軸の傾きが決定される。今、 $nZ+1$ 山の位相差を ϕ_{z+1} 、 $nZ-1$ 山うねりの位相差を ϕ_{z-1} とすれば、外輪幾何学中心の楕円軌跡長軸の傾きは、

$$\phi = \left\{ \frac{\phi_{nz+1} - \phi_{nz-1}}{2} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

となる。図6中の位相の欄に(8)式を適用した長軸の傾きを示している(括弧があるものは、括弧内が計算結果)。よって、 f_z 成分は $Z \pm 1$ 山成分の和(楕円軌跡の長軸)で最大であるため、異方性を考慮した測定が必要である。

3.3 うねりが複数存在する場合の挙動

ここでは、軌道に対して $n=1$ の1次成分を全て付加した場合の挙動を示す。

図7に解析結果を示す。これは、玉数8個とし、内・外輪に7, 8, 9山うねりをそれぞれ20nm付加(計6成分)し、回転速度5400 min^{-1} , 0.8秒分(4096点)のデータを全てプロットした結果である。図7より、レースに存在する全ての1次成分($n=1$)だけでも、非常に複雑な挙動の形状を示すことがわかる。

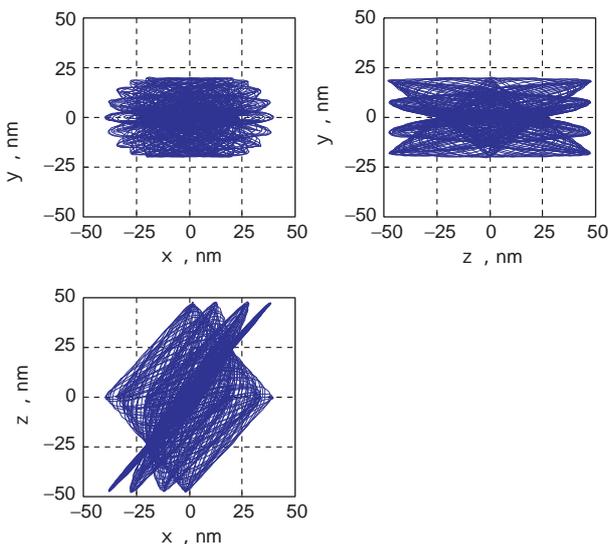


図7 複数のうねりを付加した場合の挙動
内・外輪に $Z-1, Z, Z+1$ 山うねりを
20nmずつ付加

Behavior when two or more element waviness are added
Waviness of $Z-1, Z,$ and $Z+1$ robes (20nm) is added to
inner/outer races

外輪幾何学中心の運動を確認しても、全ての座標面で前向きと後ろ向きの振れ回りを含んだ複雑な挙動をしていることが確かめられた。なお、ADOREでもほぼ同形状の挙動が得られ、絶対値で最大1.5%ほどの誤差であることを確認している。また、このモデルでの計算時間はPentium III (850MHz)のコンピュータを用いて約5秒であった。

4. 3次元NRRO解析プログラムの特徴
について

今回開発した3次元NRRO解析プログラムは、玉軸受の内・外輪うねり、玉うねり、玉ピッチ誤差を時間経過の概念を取り入れて解析可能で、NRRO解析のほとんどをカバーできる。また、外輪幾何学中心の挙動、各要素の挙動もアニメーションによって視覚的に確認できるようにしたことで、多くの発見が得られた。

紙面の都合上今回は割愛したが開発プログラムでの解析結果は、ADOREでの解析結果と一致し、その妥当性が確認されている¹²⁾。

HDDに代表されるように、NRROの低減は、HDDの記録密度向上のカギを握っている^{13), 14)}。このような状況で、今回紹介したプログラムを用いたNRRO解析は、今後のNRRO低減のヒントを与えてくれるであろう。本プログラムは、軸受転走面のうねりを考慮した3次元NRRO解析であれば、十分な解析能力と処理スピードをもっており、NRRO本来の特性を知ることが出来る。

5. おわりに

HDD玉軸受用に準動的な3次元NRRO解析プログラムを開発し、NRROの非線形特性、挙動を中心に解析を行った。この結果、以下の結論を得た。

- 1) 内・外輪の $nZ \pm 1$ 山うねりによるラジアル方向のNRRO 1次成分は、材質や予圧、接触角、玉数に関係なく、うねりの全振幅と同等で、うねりの大きさと比例関係にある。
- 2) 内・外輪アキシアル方向の nZ 山うねりおよび玉 $2n$ 山うねりで発生するNRROは、非線形性が認められる。
- 3) 内・外輪うねりによるNRRO高次成分は全て非線形性を有している。また、単一うねりでの高次成分発生山数を数式化した。
- 4) 内輪および外輪にそれぞれ単一のうねりが存在する場合のうねり山数と2次成分発生周波数の関係を示した。

5) 静止輪 $Z + 1$ 山と $Z - 1$ 山うねりが重層する場合，外輪幾何学中心は楕円形状であることを示すとともに，その長軸の傾きを数式化した．
3次元NRRO解析プログラムは，玉の自転軸，接触角を固定することで，玉うねりの影響も解析可能となり，挙動解析を進めれば，さらに新しい事実を発見できる要素を含んでいると予想される．

参考文献

- 1) O. Gustafsson, SKF Report. AL 61 L 032 (1961).
- 2) O. Gustafsson, SKF Report. AL 62 L 005 (1962).
- 3) 五十嵐 昭男：「転がり軸受の音響および振動に関する研究論文集」，長岡技術科学大学機械系内五十嵐研究室(1986)。
- 4) G. Bonchard and L. Lau, "An Investigation of Non-repeatable Spindle Runout", IEEE Transactions on Magnetics, MAG-23, No.5, (1987) 3687.
- 5) W. O. Richter and F. E. Talke : "Nonrepeatable Radial and Axial Runout of 5 1/4" Disk Drive Spindles", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 24, No. 6, (1988) 2760.
- 6) K. Ono, et al., "Analysis of Nonrepeatable Radial Vibration of Magnetic Disk Spindles", Transaction of the ASME, Vol. 113, JULY, (1991) 292.
- 7) 坂口 智也，赤松 吉信：NTN Technical Review，No.69(2001) 69。
- 8) 野口 昭治，小野 京右：日本機械学会論文集 (C編) 64巻620号(1998-4) 282。
- 9) S. Deeyiengyang，小野 京右：日本機械学会論文集(C編) 66巻648号(2000-8) 32。
- 10) P. K. Gupta : "Advanced Dynamics of Rolling Elements", Springer -Verlag(1984)。
- 11) T. A. Harris : "ROLLING BEARING ANALYSIS - Third Edition", JOHN WILEY & SONS, INC. (1991)。
- 12) 多田誠二：KOYO Engineering Journal，no. 160(2001) 31。
- 13) 瀧井裕一：精密工学会誌，vol 67, no. 7 (2001) 1083。
- 14) 向笠正弘：Koyo Engineering Journal，no. 160(2001) 16。

筆者



多田誠二*
S. TADA

* 総合技術研究所 基礎技術研究所
軸受研究部 工学博士