直動ボールガイドシステムの高精度化に関する研究*

—ミスアライメントがウェービング振幅値に与える影響の理論解明—

高橋 徹** 野口 昭治***

A Study to Enhance the Accuracy of Linear Motion Ball Guide System
—Theoretical Elucidation of the Influence of Misalignment to Waving Amplitude—

Tohru TAKAHASHI and Shoji NOGUCHI

In the previous reports, it was clarified that waving amplitudes in linear motion ball guide (LMBG) systems can be suppressed by optimization of the crowning shape on end of carriage's raceways. Moreover, the evaluation algorithm of waving amplitude considered table deformation and the design method of table parameters based on a desired waving amplitude were developed. Mounting surface errors for LMBG significantly affect the motion accuracy of LMBG, however, this phenomenon has not been clarified yet. In this study, therefore, this issue is clarified analytically. At first, the analytical model of LMBG system is constructed; the model can set on the initial five-way errors for carriage and rail of LMBG: horizontal direction, vertical direction, roll angle, pitch angle and yaw angle. Then, load distribution theory analyses with various misalignment are carried out. The analyses results show that the only horizontal error significantly affects the waving amplitude; other four-way errors affect little. These results also suggest that the proposed analysis can evaluate necessary mounting surface accuracy to achieve a desired waving amplitude. Furthermore, it is clarified that the LMBG's rating life is affected by the additional load due to misalignment.

Key words : linear motion ball guide, load distribution, accuracy, high precision, crowning, waving, misalignment, mounting surface accuracy, rating life

1. 緒 言

第1報¹⁾で、クラウニング形状を最適化する技術を適用することで、直動ボールガイド (LMBG: Linear Motion Ball Guide) システムの玉循環によるウェービング現象低減に関する高精度化を実現できることを報告した。第2報²⁾では、LMBG システムの高精度化に影響を与えるものとして実機テーブルの変形に着目し、LMBG 単体のウェービングによって実機テーブルが変形し、高精度化に影響を与えていることを導いた。そこで、モデルテーブル変形を含めた状態でウェービング振幅値を評価するアルゴリズムを確立し、実現したいウェービング振幅値から必要な実機テーブル諸元を導ける実機テーブル設計指針を示した。

しかし、テーブルの高精度化に対しては、まだ考慮すべき要因が考えられる。LMBG を装置に取り付ける際には、レール、キャリッジ、テーブル等を締結する必要があるが、その際必ずミスアライメントが生じる。機械組立時に許容されるミスアライメントは要求される運動精度に依存して個々に決められているが、ミスアライメントとLMBG運動精度の関係を定量的に評価した研究は、まだおこなわれていない。

そこで、今回はこの課題を理論的に解明するために本研究に取り組んだ。ミスアライメントと言っても捉えにくい現象なので、ここでは、ミスアライメントをLMBGのレール、キャリッジの初期位置誤差として、第1,2報より用いている垂直、水平、ローリング、ピッチング、ヨーイングの5方向に与えることにしてモデル化をおこなった。本モデルにて解析できるように従来からのLMBGシステム負荷分布理論¹⁾を改良し、種々

のミスアライメントを与えて解析を実施した。

その結果、ミスアライメントのうち水平方向のみがウェービング振幅値に大きく影響を与えており、その他の方向については影響を与えていないという結果が得られた。今回の手法によるシミュレーションをおこなえば、実現したいウェービング振幅値にするために必要な取付面精度を提案できる可能性が示唆された。また、ミスアライメントによって生じた荷重増加が定格寿命へ与える影響も検討したので報告する。

2. ミスアライメントを考慮した解析

解析は図1に示すようなLMBGシステムを対象とし、個々のLMBG 中心部においてキャリッジおよびレールが自由に位置を変えられるようにした。LMBG 中心部に $o'-x'y'z'$ 右手系座標系を設け、座標原点 o' を x' 軸方向はキャリッジ長さの中央、 y' 軸方向はレール幅方向中央、 z' 軸方向は玉列番号 $j = 1, 4$ お

Fig.1 Installation external loads, moments, coordinates for LMBG system and misalignment of each LMBG center position

* 原稿受付 令和2年9月30日
掲載決定 令和3年1月15日
** 正会員 THK株式会社 (東京都大田区東糀谷4-9-16)
*** 正会員 東京理科大学 (千葉県野田市山崎2641)

Fig.2 Load distribution in LMBG under misalignment condition

Fig.3 Setting misalignment in LMBG system

Fig.4 Normal distribution diagram in $E_1 \text{ max} = \epsilon_{1r} = 50 \mu\text{m}$

および2, 3の中央線上となる位置とし、それぞれの方向の微小位置誤差を、添え字 e をレール側は r 、キャリッジ側は c と表すものとして、垂直位置誤差 ϵ_{1e} 、水平位置誤差 ϵ_{2e} 、 x', y', z' 軸回りの位置誤差をそれぞれローリング位置誤差 ϵ_{3e} 、ピッチング位置誤差 ϵ_{4e} 、ヨーイング位置誤差 ϵ_{5e} とし、それらの値をミスアライメントと見なして個々のキャリッジやレールが自由に位置を変えられるようにした。図1にはキャリッジ番号 $k = 1$ にしか $o'-x'y'z'$ 右手系座標系を示していないが、すべてのキャリッジに設定した。なお、ほかの設定条件はキャリッジ軌道面の軸方向断面を含めて第1報¹⁾と同様のため詳細説明は省略する。

図2に、LMBG 中心部にてキャリッジ、レールともにミスアライメントと同値の位置誤差が生じていた状態に、LMBG システムに外力やモーメントが作用してモデルテーブルが垂直、水平、ローリング、ピッチング、ヨーイング方向に変位した状態における玉番号 i 、玉列番号 $j = 4$ 、キャリッジ番号 k の状態を示す。以下に詳しく説明する。

まず、外力やモーメントが作用していない静的な状態で、キャリッジ番号 k の LMBG 中心部におけるレール側のミスアライメント $\epsilon_{1r} \sim \epsilon_{5r}$ によって玉列番号 $j = 4$ の玉番号 i におけるレール側曲率中心 A_r が A_r' へ幾何学的に移動し、キャリッジ側

Table 1 LMBG specification

Type	ISO #25
Ball diameter	$D_a = 3.969 \text{ mm}$
Oversize volume	$\lambda = 0.0096 \text{ mm}$
Ball pitch	$\kappa D_a = 4.27 \text{ mm}$
Conformity factor	$f = 0.515$
Carriage length	$2u_x = 88.0 \text{ mm}$
Pitch of circulations	$2u_y = 23.172 \text{ mm}$
	$2u_z = 6.436 \text{ mm}$
Initial contact angle	$\gamma = 45^\circ$
Crowning shape	$\lambda_e = D_a / 330$
	$X_r = 4.8 D_a$

のミスアライメント $\epsilon_{1c} \sim \epsilon_{5c}$ によって同様にキャリッジ側曲率中心 A_c が A_c' へ幾何学的に移動する。

つぎに、外力やモーメントが作用してモデルテーブルが垂直、水平、ローリング、ピッチング、ヨーイング方向に変位することによりキャリッジ側曲率中心が A_c' から A_c'' へ幾何学的に移動する。この関係を用いて負荷分布理論解析¹⁾およびウェービング解析¹⁾をおこなえばよい。

図3にミスアライメントを与えた解析用 LMBG システムモデルを、表1に解析に用いた LMBG 仕様を示す。ISO #25 タイプで、オーバーサイズ量 $\lambda = 0.0096 \text{ mm}$ の予圧付与²⁾、クラウニングはウェービング最適品形状の長さ $X_r = 4.8 D_a \text{ mm}$ 、深さ $\lambda_e = D_a / 330 \text{ mm}$ 、レール全長 $L_0 = 640 \text{ mm}$ 、キャリッジは1レールに2個付きとし、キャリッジ間距離 $2l_x = 250 \text{ mm}$ 、レール間距離 $2l_y = 230 \text{ mm}$ に設定して剛体のモデルテーブルで連結した。

一般的には位置誤差 $\epsilon_{1e} \sim \epsilon_{5e}$ に相当するミスアライメントが各 LMBG のレール側、キャリッジ側に大小さまざまな無限の組み合わせで存在すると考えられるが、ここでは解析結果から傾向が見やすいようにレール1のみにミスアライメントを与えた。垂直位置誤差 ϵ_{1r} 、水平位置誤差 ϵ_{2r} 、ローリング位置誤差 ϵ_{3r} はレール全長に対して、ピッチング位置誤差 ϵ_{4r} 、ヨーイング位置誤差 ϵ_{5r} は、レール全長の中央での値がそれぞれ垂直位置誤差で ϵ_{1r} 、水平位置誤差で ϵ_{2r} となるような正規分布形状誤差を与え、モデルテーブルをレール全長の中央に配置したときの LMBG 中心部に傾き誤差として与えた。図4に位置誤差を E_1 、 $6\sigma = L_0$ として $E_1 \text{ max} = \epsilon_{1r} = 50 \mu\text{m}$ としたときの正規分布形状図と、その微分をした傾き $\epsilon_{3, 4, 5r}$ を示す。計算式は

$$E_1 = E_1 \text{ max} \cdot \exp \left\{ -4.5 \left(\frac{2x}{L_0} \right)^2 \right\} \quad (1)$$

$$E_{a1}' = -\frac{36}{L_0^2} E_{a1} \text{ max} \cdot \exp \left\{ -4.5 \left(\frac{2x}{L_0} \right)^2 \right\} x \quad (2)$$

とした。キャリッジ間距離 $2l_x = 250 \text{ mm}$ としてキャリッジをレール全長の中央に配置したときの各々のキャリッジ部の傾きがピッチング位置誤差 ϵ_{4r} 、ヨーイング位置誤差 ϵ_{5r} 、ローリング位置誤差 ϵ_{3r} となる。与え方は、まず垂直位置誤差 ϵ_{1r} 、水平位置誤差 ϵ_{2r} にある同値を与え、そのときのピッチング位置誤差 ϵ_{4r} 、ヨーイング位置誤差 ϵ_{5r} を算出し、それと同値にローリング位置誤差 ϵ_{3r} を決定するという方法とした。数値は、中精度レベルの一軸実機テーブル製作時の、LMBG のレールを取り付ける

Fig.5 Analysis result of relation between misalignment and waving

取付面精度のうち、2本のレール取付面の平行度許容誤差図面指示値 ε_{2r} の一般的な値が $10\mu\text{m}/\text{m}$ 程度であるが、ここではより大きな変化傾向を捉えられるためにミスアライメント ε_{1r} 、 ε_{2r} を $0 \sim 50\mu\text{m}$ まで変化させた。ちなみに $\varepsilon_{1r} = \varepsilon_{2r} = 50\mu\text{m}$ のとき $\varepsilon_{3r} = \varepsilon_{4r} = \varepsilon_{5r} = 2.765 \times 10^{-4}$ であり、例えばキャリッジ長手方向の傾きは $2u_x \times \varepsilon_{4r} = 0.024\text{mm}$ となる。

また、キャリッジやレールの軌道面のうねりといった形状誤差、軌道面半径の形状誤差、4つの軌道面の平行誤差、などのLMBG製作上の誤差はないものとして扱い、取付時に生じる上記ミスアライメントの影響のみを対象とした。

3. 解析結果

3.1 ウェービング解析

図5にミスアライメントに対するモデルテーブル直上のz方向のウェービング振幅値の解析結果を示す。誤差がない状態でのウェービング振幅値は $Aw\alpha_1 = 0.029\mu\text{m}$ である。ミスアライメントを $0 \sim 50\mu\text{m}$ へと増加させていくと、水平位置誤差 ε_{2r} のみが大きく影響を及ぼしており、ミスアライメントが 3, 18, 45 μm あたりに若干変曲点が見られるがほぼ一次関数的な比例関係となっている。垂直位置誤差 ε_{1r} 、ローリング位置誤差 ε_{3r} にはほとんど影響を受けておらずほぼ変化なしである。ピッチング位置誤差 ε_{4r} 、ヨーイング位置誤差 ε_{5r} はミスアライメントが $15 \sim 18\mu\text{m}$ あたりで若干増加するがその変化量は $0.001\mu\text{m}$ 台程度であり、それを過ぎるとまた一定値となっている。これより、LMBG取付時に生じるミスアライメントがウェービング振幅値に影響を与えるのは水平方向のみで、他の方向のミスアライメントにはほとんど影響を受けないということになる。

3.2 LMBGシステム全体に着目した負荷分布解析

ウェービングは「転動体がキャリッジ内を転がりながら移動していくことによって生じる負荷分布状態の変化によるキャリッジの姿勢変位¹⁾」であるので、ミスアライメントによってこの負荷分布状態の変化が大きくなるとウェービングに与える影響が大きくなると考えられる。そこで、LMBGシステム内で玉荷重や総負荷玉数がどうなっているのかを知るために、ミスアライメントの増加に対して、全てLMBGシステム内の、図6に最大玉荷重、図7にウェービングを生じる $2\kappa D_a$ ストローク内の最大玉荷重の変動、図8に総玉荷重、図9に $2\kappa D_a$ ストローク範囲での総玉荷重の変動、図10に総負荷玉数の変化を解析した結果を示す。

最大玉荷重、総玉荷重、総玉荷重の変動は、水平位置誤差 ε_{2r} により大きく増加している。ピッチング位置誤差 ε_{4r} とヨーイ

Fig.6 Analysis result of relation between misalignment and P_{ijk} max Fig.7 Analysis result of relation between misalignment and change of P_{ijk} max in $2\kappa D_a$ stroke Fig.8 Analysis result of relation between misalignment and ΣP_{ijk} Fig.9 Analysis result of relation between misalignment and change of ΣP_{ijk} in $2\kappa D_a$ stroke

Fig.10 Analysis result of relation between misalignment and the number of the total affective balls in LMBG system

ング位置誤差 ε_{5r} についても増加はしているが、水平位置誤差 ε_{2r} に比べれば少ない。垂直位置誤差 ε_{1r} とローリング位置誤差 ε_{3r} についてはほとんど変化はないという似たような傾向である。

ところが、最大玉荷重の変動だけは、ピッチング位置誤差 ε_{4r} とヨーイング位置誤差 ε_{5r} がほぼ同値で他の位置誤差と比べて大きく増加している。それに、ミスアライメントが $5 \sim 12 \mu\text{m}$ 辺りで増加が一旦止まり、それを超えるとまた増加していくという現象となっている。この原因は後の考察で述べる。水平位置誤差 ε_{2r} についてはピッチング位置誤差 ε_{4r} とヨーイング位置誤差 ε_{5r} に比べれば少ないが増加はしている。垂直位置誤差 ε_{1r} とローリング位置誤差 ε_{3r} についてはほぼ変化はない。

総負荷玉数は、水平位置誤差 ε_{2r} のみが大きく減少しており、ミスアライメントが $10, 20, 25, 45 \mu\text{m}$ 辺りを変曲点として一定、緩やかに減少、急な減少、一定、急な減少と変化している。ピッチング位置誤差 ε_{4r} とヨーイング位置誤差 ε_{5r} についてはわずかに減少している。垂直位置誤差 ε_{1r} とローリング位置誤差 ε_{3r} についてはほぼ変化はない。

これより、図 5 の水平位置誤差 ε_{2r} のみがウェービング振幅値に影響を及ぼしているという結果から、大きく関連性が読み取れるのは、最大玉荷重の増加、総玉荷重の増加、総玉荷重の変動の増加、総負荷玉数の減少、といえそうであるが、ピッチング位置誤差 ε_{4r} とヨーイング位置誤差 ε_{5r} でもその変化は確認できるので、まだ不明確な部分が多い。

3.3 各玉荷重に着目した負荷分布解析

そこでさらに、ミスアライメントがないときと設定が $\varepsilon_{1r} = 50 \mu\text{m}$ となる各方向の位置誤差を与えたときのキャリッジ内の負荷分布状態を詳細に見ていくことにする。代表して変化が大きいと考えられる実際にミスアライメントを与えているキャリッジ番号 $k=1, 2$ あるいは $k=1$ を見ていく。また、負荷分布はキャリッジ顎部の変形に大きく影響を受けるので、同時にキャリッジ顎部の変形状況¹⁾をイメージで描画する。図 11 にミスアライメントがないとき、このときはキャリッジの偏った変形は生じないのでイメージは省略した。図 12 に垂直位置誤差 $\varepsilon_{1r} = 50 \mu\text{m}$ のとき、図 13 に水平位置誤差 $\varepsilon_{2r} : \varepsilon_{1r} = 50 \mu\text{m}$ のとき、図 14 には水平位置誤差を $\varepsilon_{2r} : \varepsilon_{1r} = 0 \sim 50 \mu\text{m} \sim 10 \mu\text{m}$ ごとに变化させたとき、図 15 にローリング位置誤差 $\varepsilon_{3r} : \varepsilon_{1r} = 50 \mu\text{m}$ のとき、図 16 にピッチング位置誤差 $\varepsilon_{4r} : \varepsilon_{1r} = 50 \mu\text{m}$ のとき、図 17 にヨーイング位置誤差 $\varepsilon_{5r} : \varepsilon_{1r} = 50 \mu\text{m}$ のときの解析結果をそれぞれ示す。図は横軸を玉番号 i とし、縦軸に玉荷重を、玉列番号 $j=1, 2$ を下半分に、 $j=3, 4$ を上半分に示す。

いずれも軌道面両端に設けられているクラウニング部²⁾で荷重がキャリッジ端部に向かって徐々に小さくなっているのがわかる。また、キャリッジは顎部の変形により、レールに対して付与されたミスアライメント方向のみならず幾何的な方向への変位も生じている。垂直・水平・ローリング方向位置誤差は x' 方向に対称となっており、同じ玉列内の玉荷重はクラウニング部を除いて同じである。ピッチング・ヨーイング位置誤差はそれぞれ y' 軸・ z' 軸回りに 180 度回転させた 2 回回転対称形のようになっており、同じ玉列内で玉荷重が異なる。

図 14 の水平位置誤差の $10 \mu\text{m}$ ごとの変化では、玉荷重は玉列番号 $j=1, 4$ は水平位置誤差とともに比例的に増加し、 $j=2, 3$ は比例的に減少していくが、 $j=2$ は $\varepsilon_{2r} : \varepsilon_{1r} = 40 \sim 50 \mu\text{m}$ の間で、 $j=3$ は $\varepsilon_{2r} : \varepsilon_{1r} = 20 \sim 30 \mu\text{m}$ の間ですでに荷重が作用していない状態となっている。

4. 解析結果の考察

以上、LMBG システム内の最大玉荷重や総玉荷重、 $2\kappa D_a$ ストローク内での最大玉荷重や総玉荷重の変動、総負荷玉数、さらに各方向に位置誤差を与えたときの各玉荷重の分布状態の解析をおこなった。

図 6, 8, 9 より、最大玉荷重、総玉荷重、総玉荷重の変動が最も大きくなっているのは水平位置誤差を与えたときであり、ウェービング振幅値に影響を与えているのは玉荷重の増加や変動であるということはいえそうである。しかし、ピッチング位置誤差やヨーイング位置誤差でもそれらは増加しているがウェービング振幅値には影響を与えていない。図 7 より最大玉荷重の変動に至っては水平位置誤差のときよりも大きくなっている。よって、これだけでは説明ができない。

その考察のため図 11～17 の各玉荷重の分布状態に着目する。全体を通して見てみると、玉荷重はピッチング位置誤差とヨーイング位置誤差のみが x' 方向に対称となっておらず、各玉列番号内の玉荷重が大きく異なっている。クラウニング部分の変化はあるものの、それを除いた軌道面中央ストレート部の玉荷重が一定ではない。LMBG の設計上、ピッチングやヨーイングモーメントが作用すれば一つの軌道面内の荷重が一定ではなくなることは想定でき、軌道面中央ストレート部端部に位置する玉に荷重が集中することになる。垂直荷重、水平荷重やローリングモーメントが作用した時には玉荷重は x' 方向に対称となるために一つの軌道面内の荷重は一定となり、どれか一つの玉に荷重が集中することはない。よって、ピッチングやヨーイングモーメントが作用したときの最大玉荷重は、垂直荷重、水平荷重やローリングモーメントが作用した時よりも大きくなると考えられる。しかし、それでも最大玉荷重、総玉荷重、総玉荷重の変動は水平位置誤差を与えたときを上回ってはいない。上回っているのは最大玉荷重の変動のみである。

そこで、図 11～17 において、徐々に $2\kappa D_a$ ストロークしていく状態、すなわち玉位置を動かしていく状態を考えると、垂直、水平、ローリング位置誤差のときに比べてピッチング、ヨーイング位置誤差は、 x' 方向に玉荷重が一定ではないので、軌道面中央ストレート部端部の玉に作用している最大玉荷重と、その玉がクラウニング部へ侵入していったとき、軌道面中央ストレート部端部へまだ移動していない隣の玉に最大玉荷重が作用したときでは、大きな最大玉荷重の差が生じると考えられる。よって最大玉荷重の変動が大きいという解析結果が図 7 に現れたといえる。もちろん、水平位置誤差を与えた場合でもこの最大玉荷重の変動は増加しているが、それは元々大きな最大玉荷重を発生させているから、その変動も相対的に大きくなっているからと考えられる。また、垂直やローリング位置誤差では最大玉荷重も総玉荷重も、それらの変動もほとんど確認できない。

したがって、ウェービング振幅値に最も大きく影響を与えているのは、LMBG システム内一個の最大玉荷重の増加やその変動ではなく、LMBG システム内での総玉荷重の増加であるということである。

では何故、水平位置誤差を与えた場合にだけそのようなことが起きるのか、その考察のため図 10 の総負荷玉数に着目する。これより、水平位置誤差を与えたときだけ極端に減少していることがわかる。すなわち総負荷玉数の減少が総玉荷重を大きくしたといえる。これは図 14 における玉列番号 $j=2$ は $\varepsilon_{2r} : \varepsilon_{1r} = 40 \sim 50 \mu\text{m}$ の間で、 $j=3$ は $\varepsilon_{2r} : \varepsilon_{1r} = 20 \sim 30 \mu\text{m}$ の間で荷重が

Fig.11 Analysis result of each ball load in no misalignment condition

 Fig.12 Analysis result of each ball load in $\epsilon_{1r} = 50 \mu m$ misalignment condition

 Fig.13 Analysis result of each ball load in $\epsilon_{2r} : \epsilon_{1r} = 50 \mu m$ misalignment condition

 Fig.14 Analysis result of each ball load in ϵ_{2r} changes from $\epsilon_{1r} = 0$ to $50 \mu m$ misalignment condition

 Fig.15 Analysis result of each ball load in $\epsilon_{3r} : \epsilon_{1r} = 50 \mu m$ misalignment condition

 Fig.16 Analysis result of each ball load in $\epsilon_{4r} : \epsilon_{1r} = 50 \mu m$ misalignment condition

 Fig.17 Analysis result of each ball load in $\epsilon_{5r} : \epsilon_{1r} = 50 \mu m$ misalignment condition

作用していない状態となっており、図 10 における総負荷玉数の減少が同様の位置で急激に起きていることと一致する。さらには図 5 のウェービング振幅値の増加の線図にも、前述のように同様の位置でほんのわずかな変曲点として現れている。

図 13 および図 14 に示したようなある玉列に荷重が作用していない状態は、LMBG 内の 4 つの玉列全てに荷重が作用している予圧状態から逸脱しており、予圧が解放されている状態である。他の方向の位置誤差を与えたときには予圧開放状態にはなっておらず、唯一、水平位置誤差を与えたときだけ予圧解放状態となっている。垂直位置誤差、ローリング位置誤差はともに、向きは異なるがキャリッジをレールに対して ε_3 方向へ回転させた状態、すなわち垂直位置誤差では若干キャリッジが $-z'$ 方向へ移動しているが、キャリッジを x' 軸まわりに回転させた状態であり、4 つの玉列でバランスを保ちながら荷重が変化していき、今回与えた誤差の範囲では予圧は解放されていない。ピッチング位置誤差、ヨーイング位置誤差も、方向は異なるがキャリッジをレールに対して x' 方向に回転させた状態、すなわちキャリッジを y' 軸まわり、 z' 軸まわりに回転させた状態であり、軌道面端部近傍の玉荷重が 3~4 個程度荷重が作用していない状態とはなっているが、4 つの玉列でバランスを保ちながら荷重が変化していき、今回与えた誤差の範囲では予圧は解放されていない。唯一、水平位置誤差のみが x', y', z' 軸まわりの回転とは異なり、どの軸に対しても対称形は保たれていない。これが早期の予圧開放、総負荷玉数の減少を招いたといえる。

したがって、ミスアライメントによって各 LMBG で予圧開放とならなければ、総負荷玉数も減少せず、総玉荷重の大きな増加も起こらず、全体としてウェービング振幅値に変化は生じないといえる。

また、図 7 の最大玉荷重の変動において、ピッチングやヨーイング位置誤差による増加が、ミスアライメントが 5~12 μm 辺りで増加が一旦止まり、それを超えるとまた増加していくという現象は、図 16, 17 で示したように軌道面内での玉荷重の分布が、初め均等であったものから徐々に不均等となっていく過程で、軌道面中央ストレート部とクラウニング部での負荷のバランスが保たれる範囲で変化が一旦止まり、その後またバランスが崩れていくという様子を表していると考えられる。

5. 定格寿命への影響

ミスアライメントによって LMBG 内の玉荷重に変化が生じているということは、当然定格寿命への影響も懸念される。そこで定格寿命の計算をおこなった。

ISO に定義されている定格寿命式³⁾は

$$L = \left(\frac{C}{P} \right)^3 \quad (3)$$

L : 定格寿命 km

C : 基本動定格荷重 N

P : 等価作用荷重 N

となっており、基本動定格荷重も等価作用荷重も大きさと方向の変わらない一定の荷重と定義されている。今回のように各玉、各玉列で荷重が異なる場合には本寿命式は適用できない。よって、ISO 式の元の考え方に準じて計算をおこなう必要がある⁴⁾。今回はミスアライメントを与えたキャリッジ番号 $k=1$ に着目し、ISO 式に準じてストロークはキャリッジ長さの 2 倍とする。また、ミスアライメントは実使用を想定し、使用されるスト

Fig.18 Analysis result of relation between misalignment and rating life

ク中に変化して存在するものとする。するとストローク中に作用荷重は変化し最大値と最小値が生じるので、一般的にその間をほぼ直線的に変化するものとする等価荷重算出式⁵⁾を用いて作用荷重を平均化する。

まず、キャリッジ側、レール側それぞれの軌道面 1 列の定格転動体荷重 Q_{cc} , Q_{cr} を求め、軌道面 1 列全体での定格転動体荷重 Q_{cj} を次式にて求める。

$$Q_{cj} = Q_{cc} \left\{ 1 + \left(\frac{Q_{cr}}{Q_{cc}} \right)^{-w} \right\}^{\frac{1}{w}} \quad (4)$$

つぎに各玉列の等価転動体荷重 P_{eqj} を、ミスアライメントによって生じている荷重のときを最大等価転動体荷重 $P_{eqj \max}$ 、ミスアライメントのない状態で生じている荷重のときを最小等価転動体荷重 $P_{eqj \min}$ として、それぞれ次式にて求める。

$$P_{eqj} = P_{ij \max} \left\{ \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I \left(\frac{P_{ij}}{P_{ij \max}} \right)^3 \right\}^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

ここで得られた $P_{eqj \max}$ と $P_{eqj \min}$ より最終的な各玉列の等価平均転動体荷重 P_{eqje} を次式にて求める。

$$P_{eqje} = \frac{1}{3} (P_{eqj \min} + 2P_{eqj \max}) \quad (6)$$

最後に (4), (6) 式をもちいて定格寿命 L を次式により求める。

$$L = \left\{ \sum_{j=1}^4 \left(\frac{Q_{cj}}{P_{eqje}} \right)^{\frac{10}{3}} \right\}^{\frac{9}{10}} \quad (7)$$

図 18 に計算した結果を、横軸にミスアライメント、縦軸にミスアライメントがない時の定格寿命 L_B に対するミスアライメントがあるときの定格寿命 L_ε の比を示す。

これより、ミスアライメントによって明らかに定格寿命に影響を与えていることがわかる。特に水平位置誤差 ε_{2r} はその影響が大きく、ミスアライメントによって生じた荷重の影響を大きく受けていることがわかる。ピッチング位置誤差 ε_{4r} とヨーイング位置誤差 ε_{5r} はほぼ同じような影響を受けており、例えば 2 割低下するときのミスアライメントは $\varepsilon_{4r}, \varepsilon_{5r}: \varepsilon_{1r} = 25 \mu\text{m}$ 位とわかる。垂直位置誤差 ε_{1r} とローリング位置誤差 ε_{3r} もほぼ同じような影響を受けているが、影響の受け方がミスアライメントに対して緩やかで、ミスアライメントは $\varepsilon_{1r}, \varepsilon_{3r}: \varepsilon_{1r} = 50 \mu\text{m}$ 位でようやく 2 割程度低下する。

6. 結 言

本研究から得られた結果を要約するとつぎのようになる。

(1) LMBG 取付時に生じるミスアライメントのうち、ウェー

ピング振幅値に影響を与えるのは主に水平方向のミスアライメントであることがわかった。

- (2) その原因は, LMBG が予圧開放状態となり, 総負荷玉数が減少し, 総玉荷重が増加したからである。
- (3) 水平方向のミスアライメントのみが予圧開放を早めた理由は, LMBG にとって水平方向は, LMBG 中心に $o'-x'y'z'$ 右手系座標系を設定した場合, どの軸に対しても対称性がとれない方向に変位をするためである。
- (4) ミスアライメントによって生じた荷重により定格寿命も低下する。その度合いは, 水平方向は顕著で, ついでピッチング・ヨーイング方向, 垂直・ローリング方向は緩やかである。

以上, ミスアライメントがウェーピング振幅値に与える影響を理論的に解明してきたが, そのミスアライメントによって生じた荷重による定格寿命への影響も想定しておかなければならない。よって, ウェーピング振幅値を低減させた高精度実機テーブルを設計する際には, 本解析にてシミュレーションを実施

し, 実現したいウェーピング振幅値にするために必要な取付面精度と, その際に生じる定格寿命の低下も評価しておく必要がある。さらには必要な実機テーブル剛性²⁾も検討しておく必要がある。それらの結果から, 適正な定格荷重, 予圧量設定となる LMBG の形式選定や, あるいは 1 レール当たりのキャリッジ個数を増やすことでテーブル全体としての定格荷重を増加させることなどを検討していく必要がある。次報では, ミスアライメントとウェーピング振幅値の関係の実験検証を報告する。

参 考 文 献

- 1) 高橋 徹, 野口昭治: 直動ボールガイドの高精度化に関する研究—クラウニングとウェーピングの関係—, 精密工学会誌, 86, 3 (2020) 225.
- 2) 高橋 徹, 野口昭治: 直動ボールガイドの高精度化に関する研究—テーブル剛性がウェーピング振幅値に与える影響について—, 精密工学会誌, 86, 10 (2020) 793.
- 3) ISO 14728-1 (2017).
- 4) 清水茂夫: 機械系のための信頼性設計入門, 数理工学社, (2006) 付録 9.
- 5) 曾田範宗: 軸受, 岩波書店, (1964) 第 3 章.