

直動ボールガイドシステムの高精度化に関する研究*

—クラウニングとウェービングの関係—

高橋 徹** 野口 昭治***

The Study on Highly Precise Linear Motion Ball Guide System
—The Relationship between Crowning and Waving—

Tohru TAKAHASHI and Shoji NOGUCHI

Linear Motion Ball Guide is widely used over various industrial machines commencing with machine tool, which becomes now an essential necessity as machine component. In the field where required high precision, however, a peculiar phenomenon in Linear Motion Ball Guide called “Waving” has been questioned and which kept some clients at a distance from using Linear Motion Ball Guide. It is known that the generating factor of Waving and Ball Circulation are linked closely, so I decided to apply the load distribution theory to each and every position of moving balls of Linear Motion Ball Guide to ascertain the condition of load distribution and posture displacement. What I found is that the crowning of raceway is intimately related to Waving, and that there is a configuration in crowning which minimize Waving. By applying this technology to the condition of clients using Linear Motion Ball Guide, and I developed the Linear Motion Ball Guide which can be used without problem even in the field of high precision.

Key words : linear motion ball guide, load distribution, accuracy, high precision, crowning, waving

1. 緒 言

直動ボールガイド (LMBG: Linear Motion Ball Guide) が発明・上市されてから約半世紀が経過しようとしている。これまでに種々の研究がなされてはいるが回転用玉軸受に比べると歴史が浅いこともあり、それほど多いとはいえない。中でも一体型レールと一体型キャリッジとからなる現在の構造となった LMBG の主に精度に関する研究は、そのほとんどが清水により精度・剛性¹⁾²⁾、精度平均化効果³⁾などの発表がされてきた。その中で、LMBG は転動体が転がることによってキャリッジが移動しているため、キャリッジと転動体の相対位置が常に変化しているという状態となり、力のバランスが常に変化しそれに伴い発生する僅かな姿勢変位、あるいは振動を生じることが報告されている。この現象のことをウェービングや玉通過振動と呼んでいる。これまでの一般的な認識ではウェービングの振幅値はテーブルに対して精度を要求する位置にもよるが 1/10 μm 台であるといわれている。

LMBG に対する市場要求が多様化する中で、特に高精度要求分野でこのウェービングが問題視されてきた。清水はこのウェービングはキャリッジ軌道面両端部に施されたクラウニングと密接な関係があることを指摘している⁴⁾。筆者はこのウェービング振幅値を 1/100 μm 台位まで低減させることができないか、そして最小値なるものが存在するかの、等の問題に取り組んできた。この点に関しては玉通過振動⁵⁾⁶⁾として研究発表がなされているが、クラウニング長さをある範囲に限定したものや、各玉条列の玉配置の影響に関するものに焦点を絞った内容にとどまっ

ている。

そこで本研究では、LMBG が工作機械のテーブルなどに実際に使用されている状態を想定した LMBG システムにて、一部改良した負荷分布理論式⁷⁾をたて、ウェービングの発生要因を解明し、軌道面両端部のクラウニングとウェービングの関係と、最小値の存在の有無について明らかにした。さらに、実験により検証した結果を報告する。

2. キャリッジ変形を考慮した LMBG システムの負荷分布解析

本研究では図 1 のように 4 個のキャリッジで支持された LMBG システムを想定し、座標原点を x 軸方向はキャリッジ番号 $k=1,2$ および $3,4$ の中央、 y 軸方向はレール $1,2$ の中央、 z 軸方向は玉列番号 $j=1,4$ および $2,3$ の中央線上となる位置とし、座標原点に作用する外力を右手系座標系として垂直荷重 F_z 、水平荷重 F_y 、 x 、 y 、 z 軸回りに作用するモーメントをローリング M_x 、

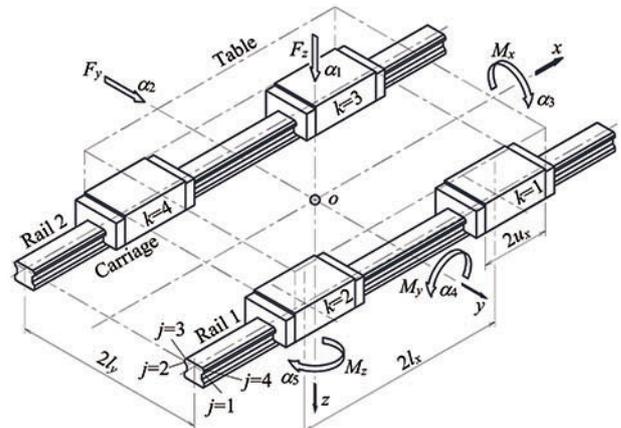


Fig.1 LMBG system structure and coordinate system

* 原稿受付 令和元年 9月 11日
 掲載決定 令和元年 11月 28日
 ** 正会員 THK 株式会社 (東京都大田区東糞谷 4-9-16)
 *** 正会員 東京理科大学 (千葉県野田市山崎 2641)

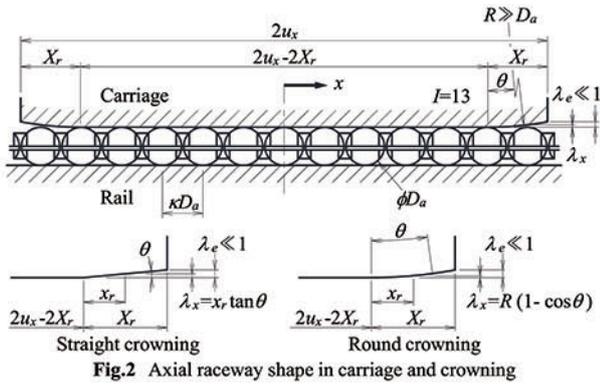


Fig.2 Axial raceway shape in carriage and crowning

ピッチング M_y , ヨーイング M_z とし、それぞれの方向の垂直変位を α_1 , 水平変位 α_2 , ローリング方向変位 α_3 , ピッチング方向変位 α_4 , ヨーイング方向変位 α_5 が生じるものとする。また、キャリッジ軌道面の軸方向断面は、図2に示すようにキャリッジ軌道面長さ $2u_x$ の両端部に接触角方向逃げ量として長さ X_r , 逃げ量 λ_e のクラウニングが直線状や単一 R 状に与えられているものとし、玉ピッチは連結リテーナによって均一な κD_a に整列されている。図2では $2u_x$ 内に配列されている玉位置は左右対称で、玉数として $I=13$ となっている。図からも明らかなように玉数は $2u_x$ と κD_a の値で決まる。しかし、実際はテーブルの移動によりキャリッジ軌道面に対する玉位置は常に変化していくので、その瞬間の玉位置によって決定される値となる。さらに、簡単のため、ベース、テーブル、レールやキャリッジに生じる加工誤差や取り付け時に生じるミスアライメント等は無視することとするが、キャリッジが略コの字形状をしていることによる変形は無視できないと考え考慮するが、それについては後述する。

図3はキャリッジ番号 $k=1$ or 2 で玉位置が条列 j で揃っている状態の玉番号 i において、5方向の荷重、モーメント、すなわち F_y, F_z, M_x, M_y, M_z が座標原点位置に作用して、それぞれの方向に弾性変位 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ が生じている負荷分布状態を示す。これより玉番号 i , 条列 j , キャリッジ番号 k におけるキャリッジ側溝曲率中心 A_c は A_c' へ移動するので $y-z$ 面内の幾何学的な移動量 δ_y, δ_z が求まる。 $j=4$ におけるその状態を図4に拡大して示す。ここで、レール側の溝曲率中心 A_r とキャリッジ側溝曲率中心 A_c, A_c' との2点間距離 $|A_r - A_c|, |A_r - A_c'|$ の差が玉接触部の弾性変形量 δ となり、その量に比例して Hertz の弾性接触理論に基づく荷重 P が発生し接触角 β を形成する。なお、 x は玉座標, y_r, z_r はレール側溝曲率中心の座標, y_c, z_c はキャリッジ側溝曲率中心の座標, D_a は玉径, f は玉と溝の適合度, λ は標準サイズの玉径に対するオーバーサイズ量, λ_e はクラウニング部の玉位置における接触角方向逃げ量を表す。以上のことを式で表すとつぎのようになる。

キャリッジ側溝曲率中心 A_c が移動した量は

$$\delta_{yijk} = \alpha_2 - \alpha_3 z_{cijk} + \alpha_5 x_{yijk} \quad (1)$$

$$\delta_{zijk} = \alpha_1 + \alpha_3 y_{cijk} - \alpha_4 x_{zijk} \quad (2)$$

$|A_r - A_c|$ 間の距離は $(2f-1)D_a$ であるので、 $|A_r - A_c'|$ 間の y, z 方向の距離は

$$V_{yijk} = h_{y_j}(2f-1)D_a \cos \gamma_j + \delta_{yijk} \quad (3)$$

$$V_{zijk} = h_{z_j}(2f-1)D_a \sin \gamma_j + \delta_{zijk} \quad (4)$$

ここで方向を示す h_{y_j}, h_{z_j} は

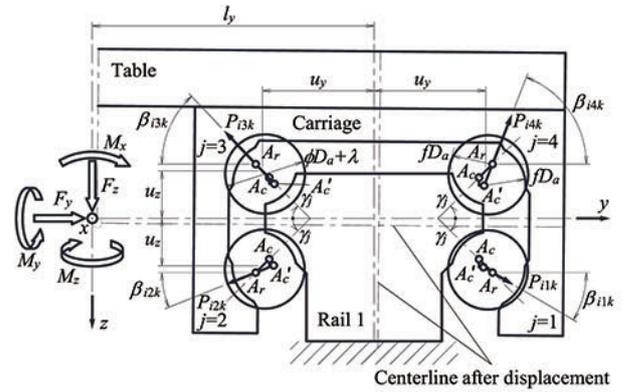


Fig.3 Load distribution in LMBG system

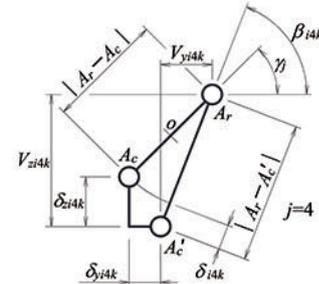


Fig.4 Enlargement of groove center portion of $j=4$ in Fig.3

$$\begin{aligned} h_{y1} = h_{y4} = -1, \quad h_{y2} = h_{y3} = 1 \\ h_{z1} = h_{z2} = -1, \quad h_{z3} = h_{z4} = 1 \end{aligned} \quad (5)$$

$|A_r - A_c'|$ 間の距離は

$$|A_r - A_c'| = \sqrt{V_{yijk}^2 + V_{zijk}^2} \quad (6)$$

したがって δ は

$$\delta = \left(\sqrt{V_{yijk}^2 + V_{zijk}^2} \right)^2 - (2f-1)D_a + \lambda - \lambda_{xijk} \quad (7)$$

ここで、Hertz 定数を C_b とすれば、

$$\begin{aligned} P_{ijk} = C_b \delta_{ijk}^{\frac{3}{2}}, \quad \delta_{ijk} > 0 \\ P_{ijk} = 0, \quad \delta_{ijk} \leq 0 \end{aligned} \quad (8)$$

また、

$$\tan \beta_{ijk} = \frac{V_{zijk}}{V_{yijk}} \quad (9)$$

となる。これより LMBG システム全体としての力とモーメントの釣り合い式はつぎのようになる。

$$g_1 = \sum_{k=1}^4 \sum_{j=1}^I P_{ijk} \sin \beta_{ijk} - F_z = 0 \quad (10)$$

$$g_2 = \sum_{k=1}^4 \sum_{j=1}^I P_{ijk} \cos \beta_{ijk} - F_y = 0 \quad (11)$$

$$g_3 = \sum_{k=1}^4 \sum_{j=1}^I f_{jk} \sum_{i=1}^I P_{ijk} w_{ijk} - M_x = 0 \quad (12)$$

$$g_4 = \sum_{k=1}^4 \sum_{j=1}^I P_{ijk} \sin \beta_{ijk} x_{jk} - M_y = 0 \quad (13)$$

$$g_5 = \sum_{k=1}^4 \sum_{j=1}^I P_{ijk} \cos \beta_{ijk} x_{jk} - M_z = 0 \quad (14)$$

ここで、ローリングモーメントの方向を示す f_{jk} は、

$$\begin{aligned} f_{1k} = f_{2k} = 1, \quad f_{3k} = f_{4k} = -1 : \text{Rail 1} \\ f_{1k} = f_{2k} = -1, \quad f_{3k} = f_{4k} = 1 : \text{Rail 2} \end{aligned} \quad (15)$$

ローリングモーメントの腕の長さ w_{ijk} は

$$w_{ijk} = y_{rijk} \sin \beta_{ijk} - z_{rijk} \cos \beta_{ijk} \quad (16)$$

である。この (10)~(14) 式の連立方程式を逐次計算法 (Newton-

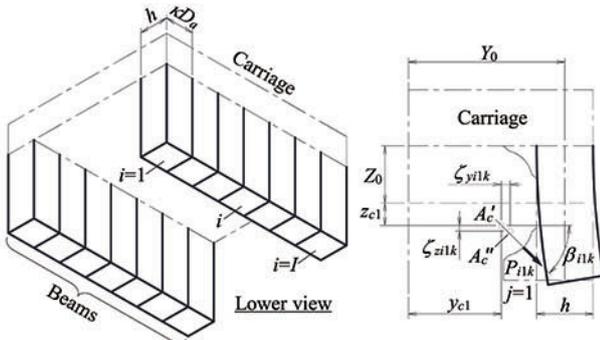


Fig.5 Installation dimensions for beams in carriage side portion

Raphson Method)にて解くことにより、未知数 $\alpha_1 \sim \alpha_5$ を求めることができる。以上の計算は玉位置や玉ピッチ等が各キャリッジ、各条列で揃っていない場合でも可能である。

つぎに、前述のキャリッジ変形を考慮する手法について述べる。キャリッジは略コの字形状をしており、レールに向かって略コの字の開口部が下向きになるような状態でテーブルにボルトで連結されている。さらに略コの字の両側先端部分には玉循環のための穴も空いており、各玉から異なる荷重が玉ピッチで複数個作用していることになるので、その変形を求めることは簡単ではない。

そこで、擬似的に図5に示すように略コの字状キャリッジ両側先端部分を、玉番号*i*に対応する幅 κD_a 、厚さ*h*からなる片持ちばりが*I*個並んでいるものと見なし、(1)~(16)にて最初に行った計算 ($N=1$) にて得られた P_{ijk} より、キャリッジ側溝曲率中心部の変形量 ζ_{yijk} 、 ζ_{zijk} ($j=1,2$ のみ) を求めることにより、キャリッジ側溝曲率中心が A_c' から A_c'' へ移動したと見なせる。しかし、実際のはりは単独ではなく玉番号 $i=1 \sim I$ までの連続体であるため、特にピッチングモーメント M_y やヨーイングモーメント M_z が作用したときには、各条列内の玉荷重が顕著に異なってくるため、LMBG 単体での剛性実験により確認すると、実際のピッチング方向変位 α_a やヨーイング方向変位 α_s 測定結果との整合性が取れ難くなるという現象が生じてしまう。そこで、玉番号 *i* 部分におけるはり変形が、玉番号 $i=1 \sim I$ までの全てのはり変形の影響を受けているものと想定し、キャリッジ変形を FEM 解析を用いて詳細に計算した結果と整合性を取れるように適当な平均化手法を当てはめていったところ、次式のような重み付き平均値を用いた場合が最も適しているという結論に至った。これより、この重み付き平均値を用いて全てのはりの変形量を算出することにした⁹⁾。

$$\zeta_{yijk}' = \frac{A_y}{B}$$

$$A_y = \frac{1}{i-1} \zeta_{yijk} + \dots + \frac{1}{3} \zeta_{y(i-3)jk} + \frac{1}{2} \zeta_{y(i-2)jk} + \frac{1}{1} \zeta_{y(i-1)jk} + \zeta_{yijk} + \frac{1}{1} \zeta_{y(i+1)jk} + \frac{1}{2} \zeta_{y(i+2)jk} + \frac{1}{3} \zeta_{y(i+3)jk} + \dots + \frac{1}{I-i} \zeta_{yijk}$$

$$B = \frac{1}{i-1} + \dots + \frac{1}{3} + \frac{1}{2} + \frac{1}{1} + \frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{I-i}$$

$$\zeta_{zijk}' = \frac{A_z}{B}$$

$$A_z = \frac{1}{i-1} \zeta_{zijk} + \dots + \frac{1}{3} \zeta_{z(i-3)jk} + \frac{1}{2} \zeta_{z(i-2)jk} + \frac{1}{1} \zeta_{z(i-1)jk} + \zeta_{zijk} + \frac{1}{1} \zeta_{z(i+1)jk} + \frac{1}{2} \zeta_{z(i+2)jk} + \frac{1}{3} \zeta_{z(i+3)jk} + \dots + \frac{1}{I-i} \zeta_{zijk}$$

$$B = \frac{1}{i-1} + \dots + \frac{1}{3} + \frac{1}{2} + \frac{1}{1} + \frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{I-i}$$

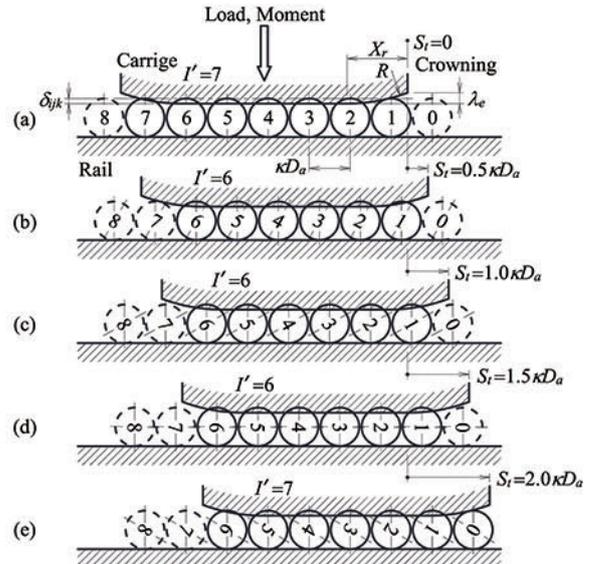


Fig.6 The relativity of carriage and ball position by stroke

この移動した溝曲率中心 A_c'' を新たなキャリッジ側溝曲率中心 A_c として再度 (1)~(16) にて計算 ($N=2$) を行う。ここで、次式

$$\sum_{k=1}^4 \sum_{j=1}^4 \sum_{i=1}^4 P_{ijk}(N) - \sum_{k=1}^4 \sum_{j=1}^4 \sum_{i=1}^4 P_{ijk}(N-1) < 10^{-3} \quad (19)$$

を満たせば計算終了とし、満たさなければさらに計算を繰り返す ($N=N+1$)。最終的に収束したところで計算終了とし荷重分布解析を終了とする。

3. ウェーピング発生要因推定

冒頭で述べたように、LMBG はレールに対して玉が転がることによってキャリッジ、テーブルがストロークする。よってキャリッジに対する相対玉位置はストロークと共に変化していくことになる。その様子を図6に示す。

LMBG システム全体に作用した荷重やモーメントが $k=1 \sim 4$ の各キャリッジに分布され、各キャリッジがそれぞれ分布荷重や分布モーメントといった外力を受けることになる。その分布荷重や分布モーメントによりキャリッジがレールに対して弾性変位している状態で、今玉番号1がクラウニング内で正に軌道面と接触している瞬間をストローク0状態 (a) とし、キャリッジを図内右方向へ玉ピッチ κD_a の半分ずつ $2.0 \kappa D_a$ までストロークした5種類の状態 (a)~(e) を示した。なおここではわかりやすくするため接触部の弾性変形をキャリッジ側のみで生じているように示した。ストローク0 (a) のとき軌道面内で実際に荷重を受けている有効玉数 $I'=7$ であるが、ストロークが $0.5 \kappa D_a$ (b) のとき玉番号1は軌道面内に入っていくが玉番号7が軌道面から出てしまっている。その結果有効玉数 $I'=6$ となっている。続けてストローク $1.0 \kappa D_a$ (c)、 $1.5 \kappa D_a$ (d) のときは玉番号1~6はそのまま軌道面内を転がっているが、キャリッジに対する相対玉位置は変化している。最後にストローク $2.0 \kappa D_a$ (e) のとき、これまで軌道面内に入っていなかった玉番号0が新たにクラウニング内に入ってきてちょうど軌道面と接触した状態となっており、有効玉数は $I'=7$ となる。この状態はストローク0 (a) 状態とキャリッジと相対玉位置が全く同じ状態となっている。すなわち、キャリッジと相対玉位置は玉ピッチ κD_a の2倍ストロークすると元の状態 (a)=(e) に戻るので、これが1周期となりこの間で状態が変化することになる。これ以上のストロ

ークではこの周期が繰り返されることになる。

この間、キャリッジに作用している分布荷重や分布モーメントに変化はないが玉から受ける反力位置は変化し、さらにクラウニング内で受けている反力はその大きさも位置も変化している。これによりキャリッジ内の負荷分布状態は変化し変位量も変化することになり、4個のキャリッジに組み付けられたテーブルがストローク $2\kappa D_a$ 内で姿勢変位を生じることになる。これが LMBG システムがストローク $2\kappa D_a$ 周期でウェービングを生じる原因であるといえる。このウェービングを解析するには、図 6 に示したストローク $2\kappa D_a$ 内のキャリッジに対する相対玉位置をストローク 0 から $2\kappa D_a$ まで細分化した位置で負荷分布解析を行い、得られた姿勢変位 5 成分をストロークとの関係でグラフにプロットして線分でつなげることでストロークとウェービングの関係を表すことができる。近似的ではあるがストローク $2\kappa D_a$ 間のウェービング解析を行ったことと同値といえる。

4. ウェービング解析

ウェービング解析を行う対象の LMBG システムとその使用条件は、全て次章で説明する実験条件に準じており、詳細は次章にて説明する。また、ここでは、不確定要素を省くために各キャリッジ内の相対玉位置を全て揃えた状態からスタートするものとする。

まず、クラウニング形状が標準仕様となる深さ $\lambda_e = D_a/250$ 、長さ $X_r = 1.2D_a$ の Straight crowning (以後 Crowning No.1) の LMBG システムにて、ストロークを変動周期 $2\kappa D_a$ の 2 倍となる $4\kappa D_a$ までの間の測定子先端の z 方向変位を解析した結果を図 7 に示す。これより、測定子先端が z 方向にうねるような動きとなっており、ストローク $2\kappa D_a$ 周期のうねりを 2 回繰り返した形となっていることがわかる。これは推定したとおりのいわゆる玉循環によるウェービングが生じているということである。すなわちストロークすることによりキャリッジに対する相対玉位置が変化し、負荷分布状態の変化と変位量の変化が生じていることの現われであるといえる。ここで、うねりの最大値と最小値の差をウェービング振幅と呼び、値を $w_{\alpha 1}$ で示せば $w_{\alpha 1} = 0.083 \mu\text{m}$ ということになる。

つぎに、クラウニング形状が特殊仕様 (標準仕様以外は全て特殊) とされる深さ $\lambda_e = D_a/350$ 、長さ $X_r = 3.0D_a$ の Straight crowning (以後 Crowning No.2) の LMBG システムにて、上記同様にストロークを変動周期 $2\kappa D_a$ の 2 倍となる $4\kappa D_a$ までの間の測定子先端の z 方向変位を解析した結果を図 8 に示す。こちらもストローク $2\kappa D_a$ 周期のうねりを生じていることがわかり、玉循環によるウェービングが生じているといえる。ウェービング振幅値は $w_{\alpha 1} = 0.026 \mu\text{m}$ となっており、標準仕様の Crowning No.1 に対して特殊仕様の Crowning No.2 はどれほど高精度化されるかという見方をすると、 $0.083/0.026 \approx 3.2$ より、約 3.2 倍高精度化されるということになる。

そして、クラウニング形状とウェービングの関係について見ていくために、クラウニング形状を標準仕様より深さ方向は浅く、長さ方向は長くなるような範囲で解析を行った。その理由としては、“クラウニングは浅く長く”，した方がウェービングは小さくなるということが経験上いわれていたからである。そこで、クラウニング深さ λ_e は $D_a/250$ 、 $D_a/300$ 、 $D_a/350$ の 3 種類とし、クラウニング長さ X_r は玉径 D_a の 1 倍から 4 倍まで変化させた。解析結果を、測定子先端の z 方向ウェービング振幅値を図 9 に、テーブルのピッチング角振幅値を図 10 に、LMBG シ

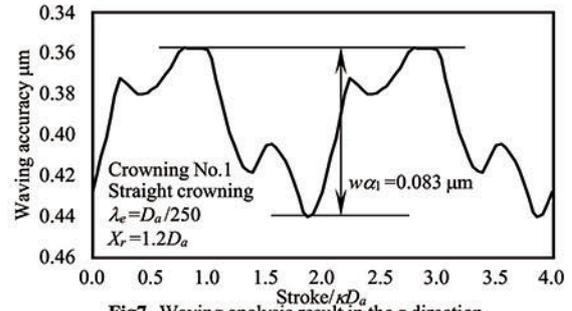


Fig.7 Waving analysis result in the z direction

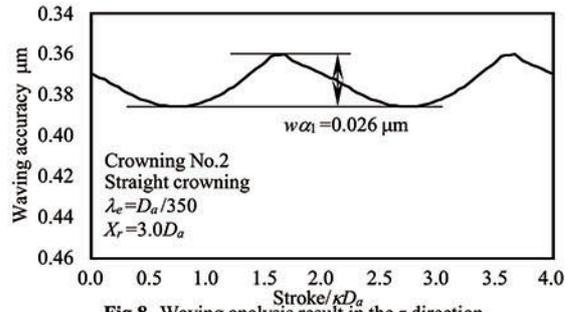


Fig.8 Waving analysis result in the z direction

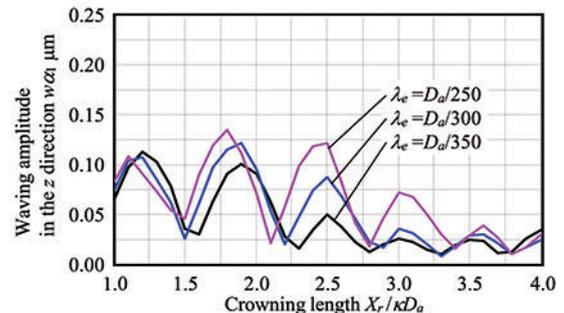


Fig.9 Waving amplitude analysis result difference in crowning shape

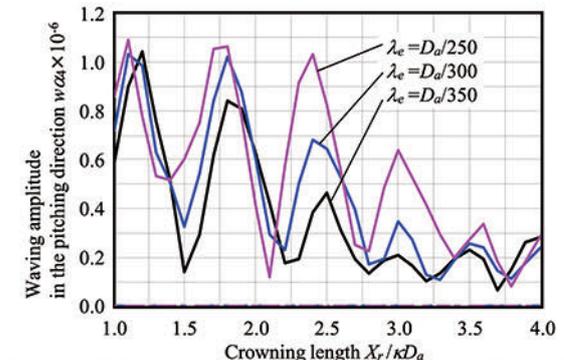


Fig.10 Waving amplitude analysis result difference in crowning shape

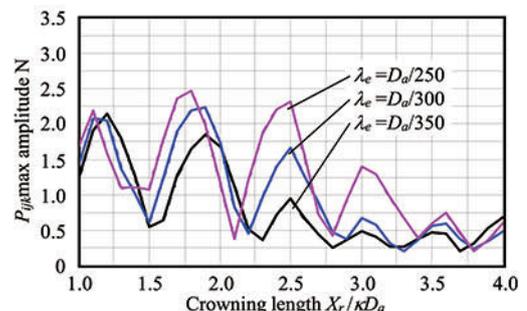


Fig.11 $P_{ij\text{max}}$ amplitude analysis result difference in crowning shape

ステム内最大玉荷重振幅値を図 11 に、それぞれ示す。これより、各々の振幅値がクラウニング深さと長さからなるクラウニング形状に大きく影響を受けていることがわかる。深さより

も長さの影響が大きく、振幅値が小さくなるクラウニング形状は数種類存在することが確認でき、各深さに対して長さ方向に周期的に存在している。また、各深さに対して長さが長くなるほど振幅値の変動幅も小さくなる方向へ推移していく様子が伺える。さらに z 方向振幅値、ピッチング角振幅値、最大玉荷重振幅値ともに小さくなるクラウニング形状はほぼ同一である。クラウニング長さをもっと長くすればさらに良くなるのではないかと考えられるが、長さ $X_r=3.1\sim 3.4D_a$ 辺りのときのウェービング振幅値、最大玉荷重振幅値に収束しているように見える。また、本解析対象の LMBG では、クラウニング深さ $\lambda_e=D_a/350$ は $11.3\ \mu\text{m}$ 、長さ $X_r=4.0D_a$ は $15.876\ \text{mm}$ であり $\theta=0.041^\circ$ である。この時点で既に機械加工にとっては厳しい値であり、さらにこれ以上の機械加工を求めても加工誤差に埋もれてしまう可能性もあり、本検討範囲位が現実的な値ではないかと考える。これより本実験条件で使用される LMBG システムのウェービングを最小とするためには、クラウニング深さ $\lambda_e=D_a/300\sim 350$ 、長さ $X_r=3.1\sim 3.4D_a$ のクラウニング形状とすればよいことがわかり、かつ、最小値であるといえる。

5. 実験

本理論を検証するために用いた実験装置の概略を図 12 に示す。LMBG を 1 軸テーブルに組み付けた LMBG システムで、駆動には 1 軸アクチュエータを用いるが、駆動装置そのものの影響を受けにくいように直接の固定ではなくロードセルを介し、テーブル振動等の影響も受けにくくするために極力低速にて駆動を与えた。テーブルに取り付けたフレームに非接触変位計の測定子を固定し、ベースに取り付けたフレームに直定規を設置して LMBG システムの姿勢変位を測定した。テーブルは長さ $340\ \text{mm}\times$ 幅 $280\ \text{mm}\times$ 厚さ $80\ \text{mm}$ の鋼製で質量は約 $60\ \text{kg}$ である。測定条件と使用機器を表 1 に示す。前述のウェービング解析もこの使用条件にて実施した。

実験に用いた LMBG の仕様を表 2 に示す。レールは共通としてクラウニング形状の異なる 2 種類のキャリッジを用意した。前述のクラウニング深さ $\lambda_e=D_a/250$ 、長さ $X_r=1.2D_a$ の Crowning No.1 を 4 個と、クラウニング深さ $\lambda_e=D_a/350$ 、長さ $X_r=3.0D_a$ の Crowning No.2 を 4 個である。この Crowning No.2 は図 9~11 の解析結果より得られたウェービングが最小となるクラウニング形状とは若干異なるが、ほぼそれに近いところの形状を示しており、Crowning No.1 との差は十分確認できると考える。また、LMBG は $j=1\sim 4$ 全溝で玉位置を揃えられるようにはなっていないため、玉位置は基本的に揃っていないと考えておかななくてはならない。

Crowning No.1 の測定結果、および各種分析結果を図 13 に、Crowning No.2 のそれを図 14 に示す。それぞれ 5 個の図を示しており、内容は以下の通りである。

- ストローク $160\ \text{mm}$ における測定子の z 方向の動きを測定した結果。テーブルの走り真直度を示す。
 - (a) の中から見た目でウェービングが確認できそうな部分を任意に拡大してウェービング振幅値を測定した結果。
 - (a) の結果より大きなうねり成分を除去して小さなうねり成分のみを取り出した結果。ほぼウェービングを示すものとする。大きなうねり成分は次式による移動平均という手法より導いた。
- $$(a) \text{ を } y = f(x) \quad (19)$$

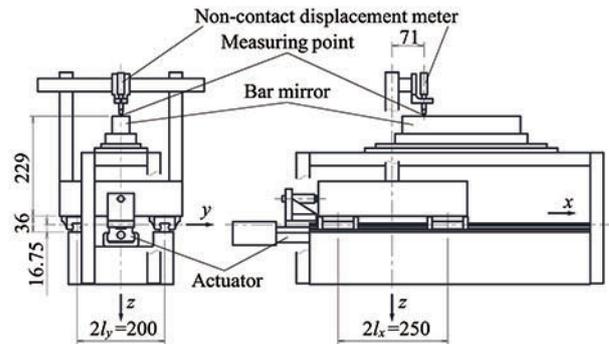


Fig12 Outline drawing of LMBG system for experiment

Table 1 Measurement condition and Instrument used

Feed device	KR4510/THK CO.,LTD.
Feed rate	1 mm/s
Stroke	160 mm
Straightedge	Bar mirror/NITTO OPTICAL CO.,LTD.
Displacement meter	Non-contact displacement meter / Japan Laser Corporation
Recorder	8840/HIOKI E.E. CORPORATION

Table 2 LMBG specification

Type	ISO #25
Ball diameter	$D_a = 3.969\ \text{mm}$
Oversize volume	$\lambda = 0.008\ \text{mm}$
Ball pitch	$\kappa D_a = 4.27\ \text{mm}$
Conformity factor	$f = 0.515$
Carriage length	$2u_x = 71.0\ \text{mm}$
Pitch of circulations	$2u_y = 23.172\ \text{mm}$ $2u_z = 6.436\ \text{mm}$
Initial contact angle	$\gamma = 45^\circ$
Crowning No.1	$\lambda_e = D_a/250$ $X_r = 1.2D_a$
Crowning No.2	$\lambda_e = D_a/350$ $X_r = 3.0D_a$

とし、移動平均は、 x に対応する y 値を、 x の前後任意の値 x_i より $x-x_i\sim x+x_i$ 間の平均値とすることにより求める。 x_i はグラフを見ながら決めていく。今回は $x_i=2\kappa D_a$ としたときが最も適していたので $x_i=2\kappa D_a$ とした。よって移動平均を $y_{average}$ とすれば

$$y_{average} = \frac{1}{2x_i} \sum_{k=x-x_i}^{x+x_i} f(k) \quad (20)$$

と表せ、これより本 (c) 図を y_{waving} とすれば

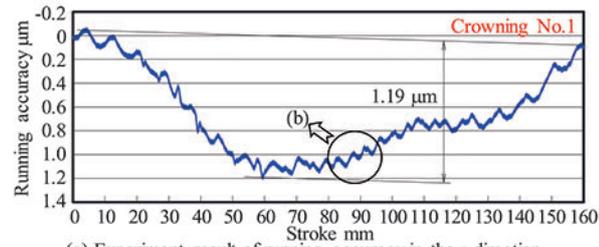
$$y_{waving} = y - y_{average} \quad (21)$$

で表せる。なお、 $x \leq 0$ 、 $160 \leq x$ の範囲は $x=0$ 、 $x=160$ の y 値と同値とした。

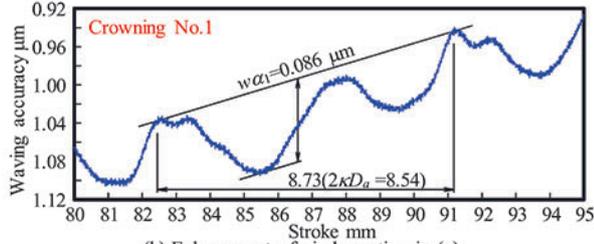
(d) (c) を波長解析した結果。

(e) (c) の $x=10\sim 150$ において、各 x 値の前後 κD_a 間、 $x-\kappa D_a\sim x+\kappa D_a$ 間、すなわち $2\kappa D_a$ 範囲内の最大値と最小値の差を示した結果。ほぼウェービングを示すものとする。

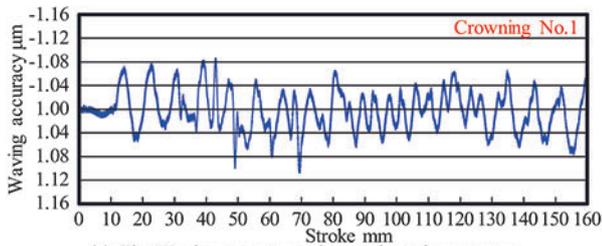
(a) から順に見ていく。測定子の動きは小さな波を打ったような動きの繰り返しとなっており、Crowning No.1 では顕著に見られ、Crowning No.2 でも同様に見られるが、縦軸目盛りのレンジを狭くしていることから、大分小さくなっているのがわかる。これが LMBG システムの玉循環によるウェービングであるかどうかは、理論上ウェービングの現れてくる周期が $2\kappa D_a$ であるのでその周期を調べれば判断できる。それぞれ真直度は



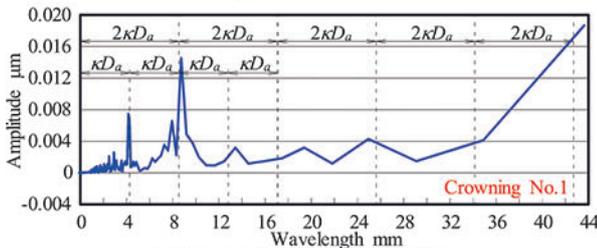
(a) Experiment result of running accuracy in the z direction



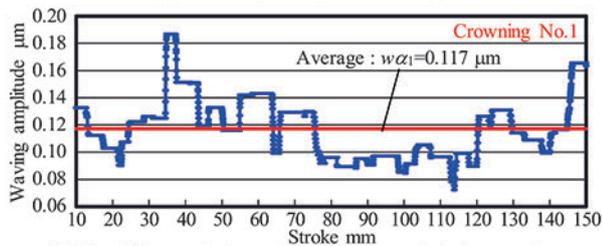
(b) Enlargement of circle portion in (a)



(c) The Waving accuracy subtracted moving average from measuring value



(d) Wavelength analysis result in (c)

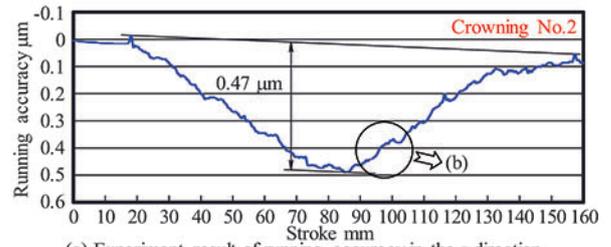


(e) The difference between the maximum and minimum value in the scope of $2\kappa D_a$ in (c)

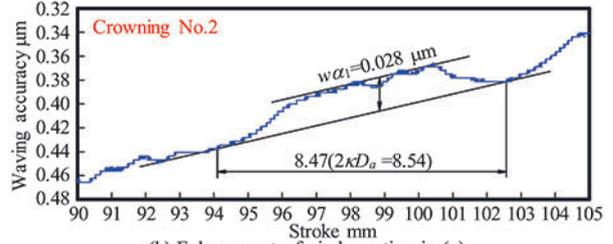
Fig.13 Running accuracy measuring result and various analysis results in Crowning No.1

Crowning No.1 が $1.19 \mu\text{m}$, Crowning No.2 が $0.47 \mu\text{m}$ となっている。不思議なのはキャリッジ以外全く同一部品であるのに真直度に差が出ていることである。これについては次章で考察する。

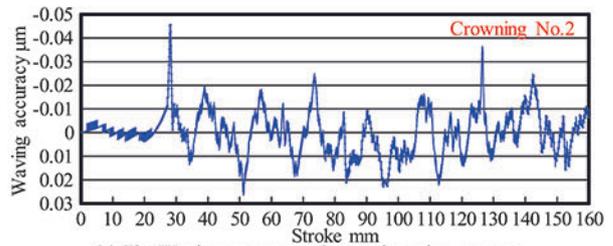
(a) における小さな波がウェービングであるか簡易的に調べるために (b) をまとめた。本 LMBG は玉ピッチが $\kappa D_a = 4.27 \text{ mm}$ であるため $2\kappa D_a = 8.54 \text{ mm}$ である。そこで Crowning No.1 の (b) を見てみると約 5.5 mm と 3 mm 強の周期で波が現れており 8.54 mm とはかけ離れている。しかし、これは進行方向前側キャリッジ $k=1,3$ による $2\kappa D_a$ 周期のウェービングと、後ろ側キャリッジ $k=2,4$ による $2\kappa D_a$ 周期のウェービングとが混在した形で現れていると推察される。再度注意して見ていくと、波の形状が一つ飛ばしの周期で捉えた方が形が似ていることに気付く。その



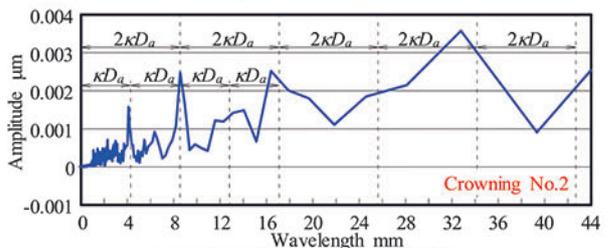
(a) Experiment result of running accuracy in the z direction



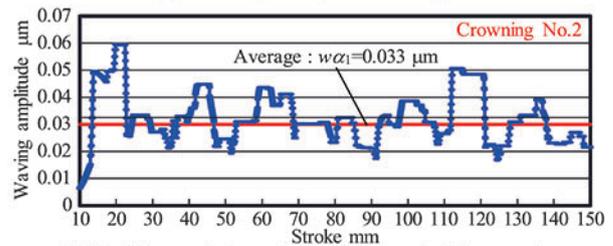
(b) Enlargement of circle portion in (a)



(c) The Waving accuracy subtracted moving average from measuring value



(d) Wavelength analysis result in (c)



(e) The difference between the maximum and minimum value in the scope of $2\kappa D_a$ in (c)

Fig.14 Running accuracy measuring result and various analysis results in Crowning No.2

一つ飛ばしの周期を測定してみると約 8.73 mm となっている。 $2\kappa D_a = 8.54 \text{ mm}$ に対して 0.19 mm のずれとはなっているが、これは軌道面内の玉位置の誤差の影響と考えればほぼ等しいと考えてよさそうである。玉ピッチは連結リテーナで均一に保持されているはずだが、リテーナの素材は樹脂製で伸縮はできるのでこの程度の誤差は十分考えられる。したがって、この約 8.73 mm 周期の波が玉循環によるウェービングであると考え、その振幅を測定すると $0.086 \mu\text{m}$ となっている。同様に Crowning No.2 を見ていくと、もともと振幅が小さくなっていることもあり Crowning No.1 に見られたような約 5.5 mm と 3 mm 強の周期といった混在の波は確認できず $2\kappa D_a$ 周期と思われるただ一つの波のみが確認できる。この周期を測定してみると約 8.47 mm と

なっており、 $2\kappa D_0=8.54\text{ mm}$ に対して 0.07 mm のずれであり、これも玉位置の誤差の影響と考えることができ、これも玉循環によるウェービングであると考え、その振幅を測定すると $0.028\text{ }\mu\text{m}$ となっている。これは図 7, 8 に示したウェービング解析結果、Crowning No.1 が $0.083\text{ }\mu\text{m}$ 、Crowning No.2 が $0.026\text{ }\mu\text{m}$ にかなり近い値となっている。ただし、これは簡易的に見るために一部分のみ抜粋したものに過ぎないため、ストローク全体にわたって生じている小さい波がウェービングなのかどうか、また、ウェービング振幅値の平均値はどうかを調べるために (c) ~ (e) をまとめた。

まず、(a) から大きなうねり成分を除去してしまった方が処理が簡略化されるため (c) をまとめた。これでほぼ直線上に小さなうねりだけがある状態となっているので、ほぼウェービングのみを示していると考えられる。ただし、 $2\kappa D_0$ 周期であるかどうかはわからない。

そこで、つぎに (c) を FFT 解析してみるが、今回波長が $2\kappa D_0$ という明確な数値がわかっているため波長解析を行った。それが (d) である。Crowning No.1 も Crowning No.2 も明確に波長 $2\kappa D_0$ の基本波が確認でき、さらに波長が半分と 1.5 倍、さらに 2 倍の第 2 次高調波が確認できる。第 3 次高調波以降もそれらしきものは確認できるが波長にずれも生じており不明瞭である。波長の短い部分にいくつかの小さなピークも確認できるがその振幅は小さい。よって、この基本波がほぼ全てであると考えられる。したがって、(c) で見られた小さな波はほぼ $2\kappa D_0$ 周期のウェービングであるといえる。

最後に、その振幅値を拾い出すために (e) をまとめた。これは (c) のデータより、ストローク $10\sim 150\text{ mm}$ 間の各 x 値において、その前後 κD_0 間、 $x-\kappa D_0\sim x+\kappa D_0$ 間、すなわち $2\kappa D_0$ 範囲内の最大値と最小値の差を示しており、ウェービングを示すと考えられる。ちなみに、本分析のため x 値の前後 $\kappa D_0=4.27\text{ mm}$ を使用する対象ストローク範囲を $10\sim 150\text{ mm}$ とした。周期 $2\kappa D_0$ 以下の最大値と最小値の差を捉えていることもあるとは考えられるが、(c) を見ていると特異点は無さそうなのでそれほど影響は無いと考えられる。これよりストローク全長でみるとウェービング振幅値はストローク位置により値を変えることがわかり、平均値は Crowning No.1 で $0.117\text{ }\mu\text{m}$ 、Crowning No.2 で $0.033\text{ }\mu\text{m}$ であった。一部分だけ抜粋した (b) における値も、本 (e) の同一位置部分に含まれていることがわかる。標準仕様の Crowning No.1 に対して特殊仕様の Crowning No.2 はどれほど高精度化されたかを見てみると、 $0.117/0.033\approx 3.5$ より、約 3.5 倍高精度化されたことになる。

6. 考 察

まず、前述の不思議な現象といった Crowning No.1 と Crowning No.2 の LMBG システムの真直度を測定した図 13 および図 14 の (a) の結果について考察する。改めて両者を比べてみると、Crowning No.1 では $1.19\text{ }\mu\text{m}$ であるのに対し、Crowning No.2 では $0.47\text{ }\mu\text{m}$ となっており、約 2 倍ほど Crowning No.2 の方が良い値となっていることである。共に同一のベース、レール、テーブルに組み付けられており、ただクラウニング形状が異なるだけのキャリッジというものであるため真直度に差が出ることは想定していなかった。これに対しては厳密に解析検証を行っていないので確たることはいえないが、主な理由として考えられることが 2 点ほどあげられる。

1 点目は、クラウニング形状の違いにより LMBG システム内

Table 3 Waving analysis result and average of experimental result unit : μm

$w\alpha_1$	Analysis	Average of Experiment
Crowning No.1	0.083	0.117
Crowning No.2	0.026	0.033
Hi precision ratio	3.2	3.5

の負荷分布状態が異なり、さらに最大玉荷重振幅値の変動も大きく異なることが前述の図 9~11 からわかっている。それらの影響が LMBG システムが持っている精度平均化効果の特性に影響を及ぼしたのではないかとということである。周辺部品の加工誤差やレール取付け時のミスアライメント等が全く同一であることより外力・外乱条件は全く同一といえるのに、例えば最大玉荷重振幅値が大きいということは、レールとキャリッジ間の相対変位が大きいことを意味しており、キャリッジ内の玉荷重が均一化されておらず偏っている状態であることが考えられる。逆にそれが小さいということはレールとキャリッジ間の相対変位が小さく、キャリッジ内の玉荷重に偏りがなく平均化している状態であると考えられる。これが精度平均化効果をもたらす、その効果が大きく働いたということである。

2 点目は、LMBG のキャリッジが Crowning No.1 と Crowning No.2 ではそれぞれ異なる個体であり、クラウニング形状が異なるだけではなくキャリッジそのものが別物である。よって、加工に伴う誤差の影響がそれぞれで当然異なっていると考えられ、その影響度合いで精度平均化効果の働きに大きな差が出たからではないかとということである。しかし、そのような影響だとすると図 13, 14 で示したウェービング実験結果がこれほど図 7, 8 で示したウェービング解析結果に近い値となるとも考えづらいので、1 点目の影響が大きかったと考えている。

つぎに、解析結果と実験結果について考察する。今回の解析は各キャリッジ内の相対玉位置を全て揃えた状態から玉も均等に移動することを前提にスタートさせているが、実験結果より、ウェービング振幅値がストロークすることによって変わることがわかった。何らかの変化が生じているということになるが、おそらく玉の移動がストロークと共に均等に行われていないのではないかと、ということが主として考えられる。図 13, 14 (e) に示されているように、解析結果は本図の最大値と最小値の範囲内に入っているが、平均値ではないということである。前述の通り、実際の LMBG は玉位置を揃えられるようになっていないため、解析は各キャリッジ内の相対玉位置が揃っていないこと、さらに均等に移動していないこと等を前提に考えていかなければならないといえる。そうすると、加工誤差等の不確定要素が入ってくることが想定され複雑になるとは考えられるが、引き続き研究を行っていく予定である。

しかし、表 3 に Crowning No.1 と Crowning No.2 のウェービング振幅値の解析結果と実験結果、およびそれらの比である高精度化率を示すが、上記解析精度の向上といった面での課題はあるにしても、本解析内容にて、ウェービングの発生要因を突き止め、ウェービングの最小値を見出し、解析にて 3.2 倍高精度化できるとの予測値に対して、実機にてウェービング振幅値 $0.117\text{ }\mu\text{m}$ を $0.033\text{ }\mu\text{m}$ まで 3.5 倍高精度化できたということは、現状でも十分に高精度化が実現できる技術であるといえる。よって実機に対しては以下のように行えばよい。図 9~11 にて示した通りあるクラウニング深さ d_c においてウェービングを最小に押さえられる最適なクラウニング長さ X_c は周期的に存在し、長さ に 比例して最小値へ収束していく様子が伺えるが、ある値

以上の長さではウェーピングの最小値は変化しておらずむやみに長くする必要はない。長さ X_r のオーダーが mm 単位であるのに対し深さ s_e のオーダーが μm 単位であり、あまり長すぎても機械加工の誤差に埋もれてしまう可能性がある。また、長すぎると有効玉数 I' が減少してしまうことも懸念され、剛性や寿命といった他の主たる性能へ悪影響を及ぼすことも考えられるので、周期的に現れるウェーピングが最小となる長さのうち、機械加工の誤差の影響が出にくい短めを選択して実施することが望ましい。

本研究より、冒頭で述べた市場要求が多様化する中で特に高精度要求分野でこのウェーピングが問題視されてきたというのは、元々 $1/10 \mu\text{m}$ 台のウェーピング振幅値が一般的な認識とされていたからであり、今回の技術はウェーピング振幅値を $1/100 \mu\text{m}$ 台まで向上させたという意味で高精度化技術が確立したといえる。実験でも $0.117 \mu\text{m}$ から $0.033 \mu\text{m}$ へと約 3.5 倍の高精度化を実現した結果が得られた。

7. 結 言

本研究により得られた結果を要約すると次のようである。

- (1) LMBG システムのウェーピングの発生要因は、キャリッジに対する相対玉位置の $2\kappa D_a$ ストローク内の変化に伴う負荷分布状態の変化により、4 個のキャリッジに組み付けられたテーブルが姿勢変位を起こすことによって生じる。
- (2) クラウニング形状により $2\kappa D_a$ ストローク内の負荷分布状態の変化の仕方が異なるため、ウェーピングに大きな影響

をもたらす。

- (3) ウェーピングが最小となるクラウニング形状の存在を見出した。
- (4) LMBG システム走行時の小さなうねりは、そのほとんどがウェーピングである。
- (5) LMBG システム内全ての玉は、ストロークと共に均等に移動していないであろうことがわかった。
- (6) LMBG システムを使用した各種機械、装置におけるウェーピング振幅値を、従来の一般認識としての $1/10 \mu\text{m}$ 台から $1/100 \mu\text{m}$ 台へと飛躍的に高精度化する技術を確立した。
- (7) 高精度分野でも問題なく使用できる、本技術を適用した LMBG を開発した。

参 考 文 献

- 1) 清水茂夫：直動ボールガイドシステムの負荷分布と精度・剛性に関する研究，精密工学会誌，56，8 (1990) 1445.
- 2) 清水茂夫：直動ボールガイドシステムの負荷分布と精度・剛性に関する研究，精密工学会誌，57，10 (1991) 1814.
- 3) 清水茂夫：直動ボールガイドシステムの精度平均化効果に関する研究，精密工学会誌，58，11 (1992) 1873.
- 4) 太田浩之，加藤総一郎，松本 淳，中野健太：転がり案内の玉通過振動を低減するクラウニングの設計法，日本機械学会論文集中編，69，686 (2003) 2795.
- 5) 太田浩之，北嶋芳樹，加藤総一郎，五十嵐 豊：転がり案内の玉通過振動に及ぼす玉の相対配置の影響，日本機械学会論文集中編，72，716 (2006) 1258.
- 6) 今井竜也，高橋 徹：FEM 解析を適用した直動ボールガイドシステム負荷分布理論の研究，精密工学会秋季大会講演論文集，(2010) 575.