直動ボールガイドシステムの高精度化に関する研究*

—テーブル剛性がウェービング振幅値に与える影響について—

高 橋 徹** 野 口 昭 治***

A Study to Enhance the Accuracy of Linear Motion Ball Guide System
—On the Influence That Table Stiffness Affect to the Value of Waving Amplitude—

Tohru TAKAHASHI and Shoji NOGUCHI

I reported in previous paper that high precision arrangement in LMBG (Linear Motion Ball Guide) System is able to realize by introducing an art to optimize the crowning shape in both ends of raceway surface. This art was spread in industrial sector centering on Machine Tool. However, it was reported that high precision cannot be obtained with this art for the rare occasion. When I watched a number of real machines reported, it seemed that most of them were equipped with slim table. I thought that LMBG causes waving phenomena alone so that the connected table deformed infectiously, and consequently the waving amplitude did not become smaller and high precision could not be acquired. In this study, therefore, I performed an analysis which combined the load distribution theory and table deformation calculation so as to take account of table stiffness by LMBG model for the breakthrough of stiffness and waving relation. In conclusion, there found that the waving of LMBG alone transforms the table and there is a correlation between them. I led of the stiffness of LMBG and table design guideline so as to realize high accuracy including the challenge of table deformation from those relation. I report, in addition, the relation between the table stiffness and waving amplitude value were clarified through the experimental verification.

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

1. 結 言

前報¹⁾で、直動ボールガイド (LMBG: Linear Motion Ball Guide) システムにてコの字形状キャリッジの開口部変形を考慮した負荷分布理論式をたて、軌道面両端部のクラウニングとウェービングの関係を明らかにし、実験検証を経てウェービング振幅値の最小値の存在を明らかにした。それにより、LMBG システムの高精度化が実現できるという内容を報告した。この技術は工作機械分野を中心に広がりを見せ、静圧案内等には及ばないもののそれ相応の好評価を受けている。

ところが、まれに本技術を適用しても高精度化されないという報告があがってきた。そこで、報告のあった実機を何台か見てみると、実際に LMBG を連結して使用されているテーブル (以降: 実機テーブル) の厚さが総じて薄いのではないかと感じた。一般的に工作機械分野では剛性を主目的の一つとしているため、実機テーブルは鋳鉄製を採用し内部にリブ等を入れた厚めの寸法となっていると認識していた。ところが近年では高速化、高サイクル化、コンパクト化、さらには低コスト化にも重点が置かれ、実機テーブルが薄型軽量設計になってきているとのことであった。

内部構造を含めた実機テーブルの厚さが異なると剛性や質量が異なるが、着目したのは剛性である。そもそも LMBG は単体でウェービング現象を起こすものなので、それにつられて連結している実機テーブルが変形してしまっているのではないかと、それゆえウェービング振幅値が小さくならず高精度化が実現できなかったのではないかと考えた。

さらに、工作機械以外の分野では剛性が主目的となっていないことが多い。例えば半導体製造装置等の分野では高速化、高サイクル化を主目的としているため、軽量化重視で実機テーブルは総じて薄く、アルミニウム製を採用していることもある。これらすべての分野において高精度化が図られなければ LMBG システムの高精度化が実現できるとはいえない。

そこで本研究では、実機テーブル剛性とウェービングの関係を解明するために、LMBG システムモデルにて、解析モデル用連結テーブル (以降: モデルテーブル) 剛性を考慮できるように負荷分布理論とモデルテーブル変形計算を連成した解析をおこなった。その結果、LMBG 単体のウェービングによりモデルテーブルは確実に変形しており、その両者には相関関係があることがわかった。それらの関係から、実機テーブル変形も含めた形で高精度化を実現するための、LMBG 部の剛性と実機テーブルの設計指針を導いた。また、実機テーブル剛性とウェービング振幅値の関係を実験検証により明らかにしたので報告する。

2. モデルテーブル剛性を考慮したウェービング解析

ウェービングは $2\kappa D_a$ ストローク周期で生じるキャリッジに対する相対玉位置の変化による負荷分布状態の変化から生じる姿勢変位、ということは前報¹⁾で明らかにしたとおりである。

図 1 に改めてその様子を示す。用いた記号等は前報¹⁾と同様のため詳細説明は省略する。キャリッジ軌道面内の玉位置が、ストロークとともに (a)~(e) のように相対位置を変化させていき、玉ピッチ κD_a の 2 倍となる $2\kappa D_a$ ストロークすると元の (a) の状態に戻る。この間、軌道面内の玉位置は左右の対称性が変化し、外力やモーメントに対する力のバランスが変化し、その力に応じた弾性変形量に変化し、キャリッジが姿勢変位を起こすということである。そして、 $2\kappa D_a$ 周期でこれが繰り返される。

すなわち LMBG は単体で、上下 α_1 方向、水平 α_2 方向、ロー

* 原稿受付 令和 2 年 3 月 22 日

掲載決定 令和 2 年 6 月 30 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.1 The relativity of carriage and ball position by stroke

実際には LMBG の 5 方向のウェービングにより実機テーブルは 3 次元的に変形していると思われるが、板状の実機テーブル変形を考えたとき、大きくは LMBG のローリング α 方向とピッチング α 方向によるものであると考えられる。しかし、LMBG は前述のような構造であるので、特にローリング α 方向には接点変動による自動調整能力が高く、実機テーブルを変形させるほどの大きなモーメントを生じさせないと考えられる。よって、図 2 に示すような、レール 1 本、キャリッジ 2 個を中実のモデルテーブルで組み付けた LMBG システムモデルを設定して、ピッチング α 方向のみによるモデルテーブル変形を対象として解析をおこなった。座標原点を y 軸方向 LMBG の中央とした以外、用いた記号等は前報¹⁾と同様のため詳細説明は省略する。LMBG は 4 章の実験に供した ISO #25 Type としたが、詳細は 4 章に示す。

The diagram illustrates a beam model for a model table. The beam is divided into segments $k=1$ and $k=2$, with a total length of $2l_x$. A coordinate system (x, y, z) is shown. Forces F_z and F_y are applied at the center of segment $k=2$. Moments M_x , M_y , and M_z are applied at the ends. The beam is labeled "Rail 1" and "Model table". The diagram also shows indices $j=1, 2, 3, 4$ and $\alpha=1, 2, 3, 4$.

Fig.2 LMBG system for analysis

Fig.3 Analysis model

$$\theta_{0l} = \theta_{cl} + \theta_{tl} \quad (1)$$

$$\theta_{02} = \theta_{c2} + \theta_{p2} \quad (2)$$

$$\theta_{02} = \theta_{c2} + \theta_{p2} \quad (2)$$

図4に、LMBGのオーバーサイズ量 $\lambda = 8 \mu\text{m}$ 予圧付与品にて、モデルテーブル材質をヤング率 205 GPa の鋼 S45C とし、 $T=10, 20, 40, 60, 80, 100 \text{ mm}$ としたときの解析結果を示す。ここでオーバーサイズ量とは、レールとキャリッジの4つの玉列の軌道面間寸法はちょうど玉径に設計されているが、LMBGの剛性向上等を目的として、そこへ少し寸法の大きな玉を組み込むことで予圧を付与させている。その設計上の玉径に対して玉径を少し大きくした量のことである。グラフは横軸の両端にキャリッジ中心がくるという表現をした。これよりモデルテーブルが変形している状況が確認でき、モデルテーブル厚さが $T=10 \text{ mm}$ から $T=100 \text{ mm}$ へと厚くなっていくにしたがってモデルテーブル変形が小さくなっていく様子が確認できる。実機におけるLMBGシステムのウェーピングは、このモデルテーブル変形のように実機テーブルが変形した分が加算されて現れているの

Fig.4 Model table deformation analysis of various model table thickness between each carriage

Fig.5 Model table deformation analysis of different preload and material between each carriage

で、モデルテーブル厚さ、すなわち剛性が LMBG システムのウェービングに大きく関与していることがわかる。

図 5 には、 $T=100$ mm のモデルテーブルで材質にヤング率 205 GPa の鋼 S45C と同 70.6 GPa のアルミニウム合金 A5052、LMBG のオーバーサイズ量 $\lambda=8$ μm の予圧付与品と $\lambda=0$ μm の 0 すきま品における解析結果を示す。これより同じ予圧付与品におけるモデルテーブル材質違い、すなわち剛性違いでは、想定どおり剛性が高いほどモデルテーブル変形は小さいことがわかる。ところが、0 すきま品の場合モデルテーブルの剛性にあまり影響されず変形は小さい。これは、LMBG 部の剛性が予圧付与品よりも 0 すきま品の方が低く、モデルテーブルを変形させるだけの前述の不確定モーメントが生じなかったからである。

モデルテーブル変形の形状が上下・左右対称とならないのは、LMBG が起こしているウェービング周期はそれぞれ $2\kappa D_a$ だが、その位相はキャリッジ番号 $k=1,2$ でずれており、対称でもない。よって、モデルテーブル両端に生じた 2 種類の不確定モーメントは、 $2\kappa D_a$ ストロークを 50 分割した各瞬間において全く異なっているからである。

以上より、個々のキャリッジが起こしているピッチング α 方向の変位により、モデルテーブルは曲げモーメントを受け変形していることがわかった。また、その量はモデルテーブル剛性と LMBG 部の剛性とのバランスで決まるということもわかった。

Fig.6 Analysis result in LMBG with $\lambda=8$ μm in terms of model table thickness T and mass m , flexural rigidity EI , waving amplitude $Aw\alpha$, model table deformation Δ , $Aw\alpha+\Delta$

Fig.7 Analysis result in LMBG with $\lambda=0$ μm in terms of model table thickness T and mass m , flexural rigidity EI , waving amplitude $Aw\alpha$, model table deformation Δ , $Aw\alpha+\Delta$

3. LMBG システムの実機テーブル設計指針・手法

2 章で述べた内容をもとに、モデルテーブル厚さ、モデルテーブル質量、モデルテーブル曲げこわさ、モデルテーブルを剛体とした LMBG システム中央直上のウェービング解析値、モデルテーブル変形量、の関係から、モデルテーブル変形を含めた状態で LMBG システムの高精度化を実現するために有効な、LMBG 部の剛性とモデルテーブル設計の関係を構築できる。

図 2 に示した LMBG システムにて 2 章で解析したデータをもとに関係グラフを描く。横軸にモデルテーブル厚さ T mm、左縦軸にモデルテーブル質量 m kg、モデルテーブル曲げこわさ EI N·mm²、右縦軸にモデルテーブルを剛体とした LMBG システム中央直上のウェービング解析値 $Aw\alpha$ μm 、モデルテーブル変形量 Δ μm 、モデルテーブル変形を含めたウェービング振幅値であるその両者の和 $Aw\alpha+\Delta$ μm の関係を、モデルテーブル材質を鋼とアルミニウム合金の 2 種類として、図 6 に $\lambda=8$ μm の LMBG のとき、図 7 に $\lambda=0$ μm の LMBG のときについてそれぞれ示す。なお、鋼は実線、アルミニウムは破線で示す。また、図 6 と図 7 では右縦軸の数値が異なる。

図 6 の予圧を付与した LMBG システムにおいて、鋼、アルミニウムとも、モデルテーブル厚さ T に比例してモデルテーブル質量 m 、モデルテーブル曲げこわさ EI が増加していき、モデルテーブル変形量 Δ が減少していく様子がわかる。モデルテーブルを剛体としたウェービング解析値は、モデルテーブル厚さや質量の影響をあまり受けずほぼ一定値である。これより、モデルテーブル厚さとモデルテーブル変形を含めたウェービング振幅値の関係がわかり、安定した系であることもわかる。また、質量の影響もあるが、詳細は 4.5 章で述べる。

これより、実現したいウェービング振幅値を右縦軸から左にたどり、 $Aw\alpha+\Delta$ 線との交点から下にたどりモデルテーブル厚

さを求め、そのモデルテーブル厚さにおけるモデルテーブル曲げこわさと同等になるように実機テーブルを設計すればよいという指針が示せる。例えば、図2, 3で示した状態のLMBGシステムを実機で製作する場合、実現したいウェービング振幅値が $0.06\text{ }\mu\text{m}$ だとすると、 $Aw\alpha_1$ が $0.06\text{ }\mu\text{m}$ のところから、鋼製実機テーブルを使用するなら実線の $Aw\alpha_1+\Delta$ 線との交点から下にたどり、モデルテーブル厚さ T が約 50 mm となり、そのときのモデルテーブル曲げこわさ EI が $1\times 10^{11}\text{ N}\cdot\text{mm}^2$ となるように実機テーブルの断面設計をおこなえばよい。

ところが、図7の予圧を付与していないLMBGシステムにおいては、モデルテーブル質量 m 、モデルテーブル曲げこわさ EI は図6の予圧を付与したときと同じであるが、図5で一部示したようにモデルテーブル変形は小さく、モデルテーブル厚さ $T=50\text{ mm}$ 以上ではほとんど確認できないほどとなっている。モデルテーブルを剛体としたウェービング解析値は、鋼とアルミニウムで異なり、どちらもモデルテーブル厚さに比例して大きくなっている。予圧を付与されていないLMBGは、軌道面内の玉荷重はモデルテーブルの質量からしか作用しないため、その弾性変形量は予圧付与の場合と比べかなり小さい。よって、荷重変動による姿勢変位、すわちウェービング振幅値そのものが小さいが、質量の増加とともに、玉荷重の増加、弾性変形量の増加、荷重変動量の増加、姿勢変位量の増加とつながり、ウェービング振幅値が大きくなっていったといえる。その結果、モデルテーブル変形を含めたウェービング振幅値 $Aw\alpha_1+\Delta$ は、鋼とアルミニウムでは傾向が異なるが、どちらも単純比例とはなっておらず極小値を示すような関係となっている。このことから本解析は安定した系とはなっていないことがわかる。すなわち、実現したいウェービング振幅値に対してモデルテーブル厚さが2種類存在するといったことが起こり意的に求めることはできない。よって、予圧を付与していない場合には設計指針を示せたとはいえない。この理由は、モデルテーブルを剛体としたウェービング解析値が質量に影響をうけて大きくなっていくことに他ならない。予圧を付与して予圧量を増やしていけば、モデルテーブルを剛体としたウェービング解析値は質量に影響をうけずほぼ一定の値となっていく。したがって、本設計指針は予圧を付与することが前提といえる。

ただし、予圧を付与していない場合でも、本解析結果は、場合によってはモデルテーブル厚さが2種類存在することにはなってしまうが、他の要因としての質量の影響を考慮して、最適な方を設計者が選択するという方法としては利用できる。また、質量がかわるような設計変更をしながら本解析を繰り返しおこなっていき、最終的に実機テーブルを設計するという方法としても利用できる。

また、予圧の有無に関わらず、モデルテーブル厚さが増してモデルテーブル曲げこわさが上昇していくと、モデルテーブルを剛体としたウェービング解析値に漸近していく様子もわかる。

本解析は図2に示したLMBGシステムにおけるものだが、一般的な構成であるレール2本、キャリッジ4個からなるLMBGシステムでも解析は可能である。まず、モデルテーブルを剛体として最適なクラウニング形状を求め、ウェービング解析を実施する。つぎに、モデルテーブル変形を考慮したウェービング解析を実施しモデルテーブル変形量を算出する。ここでもピッチング α_1 方向のみによる変形量を算出しておいて差支えないと考える。その後は上記手法に則ればよい。この解析は、レール本数、キャリッジ個数に制限は受けず、あらゆるLMBGシ

テムに適用できる。

したがって、予圧を付与することを前提としたLMBGシステムを設計する際の指針を以下のように示せる。まず使用される機械に求められる仕様から、実機テーブルの長さ×幅寸法を決める。つぎに求める剛性や寿命から、LMBGの型式、サイズ、予圧量を決め、上記実機テーブル寸法などからレール間距離、キャリッジ間距離を決める。ここで、解析結果が安定した系となっていることを確認する必要がある。確認できたら、最後に実現したいウェービング振幅値から、本解析を適用して必要なモデルテーブルの曲げこわさを求め、その値になるように実機テーブルの材質および断面設計をおこなう。

もし上記で安定した系とならなかった場合、さらに求める機械仕様により元々予圧を付与しないことを前提としている場合には、解析結果が単純比例とはならず最小値が存在するような関係となってしまうので、もし、求めるモデルテーブル厚さが2種類存在するような場合には、質量の影響を考慮しながら設計者が最良の方を選択するという方法とする。さらに、質量等を変更して解析を繰り返すことにより、最終的に実機テーブル設計を完了させてもよい。

この設計指針・手法に則ってLMBGシステムを設計すれば、工作機械から一般産業機械まで幅広い分野で、無駄がなく効率的にLMBGシステムの高精度化が実現できる。

ただし、実機テーブルが変形してウェービング振幅値が増加することに対する実機テーブル設計指針・手法であるので、モデルテーブルを剛体としたLMBGシステムの最適クラウニング形状にて得られるウェービング振幅値以下にすることはできない。

4. 実験

図8に実機テーブル剛性とウェービング振幅値の関係を検証するために用いた実験装置の概略を示す。LMBGを1軸実機テーブルに組み付けたLMBGシステムで、実機テーブル剛性の影響を確認するために3種類の中実の実機テーブルを用意した。すべて長さ 340 mm ×幅 280 mm で、厚さ $T=100\text{ mm}$ の鋼製、 $T=20\text{ mm}$ の鋼製とアルミニウム製、質量は $T=100\text{ mm}$ 鋼製が約 75 kg 、 $T=20\text{ mm}$ 鋼製が約 15 kg 、 $T=20\text{ mm}$ アルミニウム製が約 5 kg である。駆動にはLMBGシステムの x 軸方向と並行に設置した1軸アクチュエータを用いた。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実機テーブル端部にロードセルを設置し、1軸アクチュエータから伸ばした連接棒にてロードセルを押す方法とした。さらに実機テーブル移動時の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。実機テーブル変形が最大に生じるのは実機テーブル中央付近と考えられるので、非接触変位計の測定位置を実機テーブル中央に、マグネットスタンドの固定位置も極力実機テーブル中央部に近くなるように固定した。そして定盤に固定した台座から伸ばしたア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。表1に測定条件と使用機器を、表2に実験に用いたLMBG仕様を示す。LMBGは予圧を付与したもので前報¹⁾と同タイプ、LMBGシステムも前報¹⁾と同条件であるので、クラウニング形状はそのときの最適形状であった深さ $h_e=D_a/350$ 、長さ $X_e=3.0D_a$ を採用した。

図9に測定子の z 方向の動きを測定し、ストローク始点と終点を0に合わせて表記した結果を示す。測定値の上下の幅が実機テーブルの走り真直度を表す。これより、ウェービングと思

Fig.8 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	150 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 shape	$\lambda_e = D_a / 350$
	$X_r = 3.0 D_a$

われる細かな振幅の大きさが、鋼： $T=100 \text{ mm}$ ＜鋼： $T=20 \text{ mm}$ ＜アルミニウム： $T=20 \text{ mm}$ の関係にあることが確認できる。LMBGは全く同一であるので、実験条件から考えて、解析でシミュレーションしたとおり個々のキャリッジが、主にピッチング α 方向の変位を生じたときに発生した不静定モーメントによって実機テーブルが変形していることの現れであると考えられる。真直度に関しては鋼： $T=100 \text{ mm}$ だけが他と比べて大きく下凸の形状となっていた。この理由については5章で考察する。

これから3種類の実機テーブルによる実験データのウェービングに関する各種比較分析をおこなっていくが、鋼： $T=100 \text{ mm}$ だけ下に凸形状となったままおこなうと正しい比較分析ができないと考えられるので、鋼： $T=100 \text{ mm}$ を鋼： $T=20 \text{ mm}$ 、アルミニウム： $T=20 \text{ mm}$ へ近づける補正をしていく。それは、それぞれの実験データから大きなうねり成分を取り出し、鋼： $T=100 \text{ mm}$ と、鋼： $T=20 \text{ mm}$ とアルミニウム： $T=20 \text{ mm}$ の平均との差分を元の鋼： $T=100 \text{ mm}$ のデータから差し引く方法とした。

図10に、図9で得られた結果から、小さなうねり成分を除去して大きなうねり成分だけを取り出した結果と、そこから鋼：

$T=20 \text{ mm}$ とアルミニウム： $T=20 \text{ mm}$ の平均を示す。大きなうねり成分とは、粗さ測定時に得られた断面曲線から得られるうねり曲線のこと、ここでは簡易的にうねり曲線と同等の結果を得られる次式による移動平均という手法より導いた。

図9の結果を

$$y = f(x) \quad (3)$$

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 に適当な数値を入力しながらグラフを見て、最も平滑なうねり成分が得られる値を探していく。今回は x_i を $2\kappa D_a$ 近辺の数値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

$$y_{average} = \frac{1}{2x_i} \sum_{k=x-x_i}^{x+x_i} f(k) \quad (4)$$

と表せる。このようにして得られたうねり成分の鋼： $T=100 \text{ mm}$ と、鋼： $T=20 \text{ mm}$ とアルミニウム： $T=20 \text{ mm}$ の平均値との差分を、図9における鋼： $T=100 \text{ mm}$ から差し引くことで、下に凸形状となっていたデータを補正できる。

図11に、図9の鋼： $T=100 \text{ mm}$ を補正したデータを鋼： $T=20 \text{ mm}$ とアルミニウム： $T=20 \text{ mm}$ とともに示す。これにより大きなうねり成分がほぼ同一の3種類の実機テーブルのデータとみなせる。

図12に図11で得られたデータを各種分析した結果を示す。それぞれ内容は以下の通りである。

- 図11のデータから前述の方法にてうねり成分を取り出し、元データからそのうねり成分を差し引き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。
- (a)を波長解析した結果。
- (a)の $x=10 \sim 140$ 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。ほぼウェービング振幅値を示すものとする。

これより本(a)図を y_{waving} とすれば

$$y_{waving} = y - y_{average} \quad (5)$$

で表せる。なお、 $x \leq 0$ 、 $150 \leq x$ の範囲は $x=0$ 、 $x=150$ の y 値と同値とした。

Fig.9 Experiment result of running accuracy in the z direction

Fig.10 Waviness profile of Fig.9, and average of aluminum: T=20 mm and steel: T=20 mm

Fig.11 Experiment result of running accuracy of steel: T=20 mm, aluminum: T=20 mm and corrected steel: T=100 mm in the z direction

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

(b) Wavelength analysis result in (a)

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

Fig.12 Various analysis results in Fig.11

Table 3 Experimental result of waving amplitude

Table	$w\alpha_1$ μm	Relative ratio
Corrected steel: T=100 mm	0.026	1
Steel: T=20 mm	0.055	2.1
Aluminum: T=20 mm	0.125	4.8

(a) より、明らかにウェービングの大きさは鋼: $T=100$ mm < 鋼: $T=20$ mm < アルミニウム: $T=20$ mm の関係になっていることが確認できる。

(b) より、3種類の実機テーブルのいずれにおいても波長 $2\kappa D_a = 8.54$ mm の基本波が確認でき、その半分の波長も確認できる。しかし、基本波の1.5倍や2倍の波長はよく確認できなかった。それと、アルミニウム: $T=20$ mm で顕著に約 2.5 mm 位の波長にピークがあり、その半分の整数倍に相当するピークが数か所確認できるが、LMBG を含め本実験装置に該当するものは確認できなかった。しかし、振幅はそれほど大きいとはいえないので無視しようとする。したがって、図 11 における細かな振幅はほぼウェービングであるといえる。

(c) より、前報¹⁾同様ストロークと共にウェービング振幅値が変化していることがわかるのと、はっきりと3種類の実機テーブルによる差が確認できる。表 3 に3種類の実機テーブルによるウェービング振幅平均値 $w\alpha_1$ と補正済み鋼: $T=100$ mm を 1 としたときのそれぞれの比率をまとめた。補正済み鋼: $T=100$ mm に対して鋼: $T=20$ mm で 2.1 倍、アルミニウム: $T=20$ mm で 4.8 倍ウェービング振幅値が大きくなっている。LMBG システムにおいて一般的に高精度といわれるウェービング振幅値が

Fig.13 Experiment result of running accuracy in the z direction

1/100 μm 台の値といわれており、補正済み鋼: $T=100$ mm で 0.026 μm、鋼: $T=20$ mm でも 0.055 μm と高精度化が実現していたものが、アルミニウム: $T=20$ mm だと 0.125 μm になり高精度化が実現しなくなってしまうということである。

以上の結果より、実機テーブル剛性はウェービングに影響を

与えており、図6の関係からも、予圧を付与したLMBGにおいては、実機テーブル剛性が高いほどウェービング振幅値は小さくなるということが明らかとなった。

さらに、質量の影響を見るために、鋼： $T=20\text{ mm}$ とアルミニウム： $T=20\text{ mm}$ に鋼： $T=100\text{ mm}$ の実機テーブルを固定せずに載せただけの実験もおこなった。図13にその結果を示す（それぞれ+Steel-100と表記）。これより鋼： $T=100\text{ mm}$ の実機テーブルを載せたことによりウェービング振幅値が小さくなっていることが確認できる。特にアルミニウム： $T=20\text{ mm}$ に鋼： $T=100\text{ mm}$ を載せた結果を詳細に見ていくと、振幅の上凸部分が丸くなり低くなっている様子がうかがえる。逆に下凸部分に変化はあまり見られない。これは実機テーブルが上凸側へ変形しようとするときだけ大きな実機テーブル質量によって押さえられ変形が抑制されたからと考えられる。また、ここでも真直度に関しては鋼： $T=100\text{ mm}$ を載せたものは大きく下凸の形状となっていた。この理由も5章で考察する。

したがって、実機テーブル剛性がウェービングに与える影響とはその構造が異なるが、実機テーブル質量もウェービングに影響を及ぼして、予圧を付与したLMBGにおいては、質量が大きいほどウェービング振幅値は小さくなるということがわかった。

5. 考 察

実験結果の、図9に示した鋼： $T=100\text{ mm}$ と、図13に示した鋼： $T=20\text{ mm}$ とアルミニウム： $T=20\text{ mm}$ に鋼： $T=100\text{ mm}$ の実機テーブルを固定せずに載せただけの真直度が、全体として下凸形状となっていたことに関しては、質量違いが主要因であると考えられる。 $T=100\text{ mm}$ 鋼製が約75 kg、 $T=20\text{ mm}$ 鋼製が約15 kg、 $T=20\text{ mm}$ アルミニウム製が約5 kgと $T=100\text{ mm}$ 鋼製だけが他と比べて格段に大きい。それにより z 方向下向きに変位が加算されていたと考えられる。

さらに、ストローク後半部分だけにその傾向が強くみられるが、この理由は、例えばレールを取り付けているベース底面の精度が本ストローク後半部分が凹形状傾向となっており、定盤との間にわずかな隙間が生じていた可能性が考えられる。よって、その部分を実機テーブルが通過するときにその質量によりベースが沈みこんだのではないかと推測できる。もちろんベースはボルトで固定しているが、ボルト本数は少なく、そのピッチは広めであった。これら3つの結果の真直度の傾向が似ていることからそのことがうかがえる。

また、別の要因も考えられる。本実験装置は本研究テーマにも則しているのだが、実機テーブルのキャリッジ取付面の加工精度・傾きは3種類で異なると考えられる。そして、キャリッジ4個の上面と面同士を接触させたときに両者の精度・傾き違いからすきまが生じ、それをボルトによって締結することによ

って実機テーブル側とキャリッジ側の両者が変形・変位するはずである。そのとき、3種類の実機テーブルによるすきまの状況違いと剛性違いによって個々のキャリッジ部に生じる不静定モーメントは異なり、変位も異なる。すると、静的な状態におけるLMBG個々のキャリッジの姿勢が3種類の実機テーブルで異なっていることになり、精度平均化効果^{2,3)}の発現の仕方が異なったからではないかということである。しかし、今回の場合は鋼： $T=100\text{ mm}$ 実機テーブルを載せたことにより変化しているので、質量違いとベース精度の影響が主だと考えられる。

本研究では、LMBGシステムの高精度化実現には欠かせないウェービング現象に影響を及ぼす要因である実機テーブル剛性について取り組んだが、究極の目標は何にも影響を受けないで高精度化が実現できるLMBGを開発することである。その目的に向かい今後も研究を継続していく予定である。

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単体のウェービングによって、LMBGシステムのモデルテーブルは変形するということがわかった。
- (2) LMBGシステムのモデルテーブル変形量は、LMBG部剛性とモデルテーブル剛性とのバランスで決定され、モデルテーブル剛性が低く、LMBG部の剛性が高いほど大きい。
- (3) LMBGシステムのウェービングは実機テーブル質量にも影響を受けていることがわかり、予圧を付与したLMBGの場合、ウェービング振幅値は実機テーブル質量が大きいほど小さい。
- (4) 予圧を付与したLMBGシステムにおいて、モデルテーブル変形を考慮したウェービング解析からモデルテーブル変形量を求めることにより、最終的に実現したいウェービング振幅値から、その条件を満たす実機テーブルの設計指針を導いた。
- (5) 予圧を付与していないLMBGシステムにおいては、最終的に実現したいウェービング振幅値とモデルテーブル厚さの関係は示せるが一意的には決められないので、解析結果から設計者が選択するか、モデルテーブル設計値を変更しながら解析を繰り返して最終的に実機テーブルを設計する手法を示せた。

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ビングの関係—, 精密工学会誌, 86, 3 (2020) 225.
- 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.