

ナノレベル精度にせまる直動転がり案内

Linear Motion Ball Guide drawing near the nanometer level accuracy

正 白井 武樹 (THK) 舟橋 浩 (THK)
○高橋 徹 (THK)

Takeki SHIRAI, THK, Nishigotanda3-11-6, Shinagawa-ku, Tokyo
Hiroshi FUNAHASHI, THK, Higashikojiya4-9-16, Ota-ku, Tokyo
Tohru TAKAHASHI, THK, Higashineko5600, Higashine-shi, Yamagata

To achieve the nanometer level running accuracy by Linear Motion Ball Guide, the fluctuation caused by the circulation of balls must be eliminated possibly. Therefore, authors felt strongly that to find out the reason of the fluctuation and to act against that guides us to develop the Linear Motion Ball Guide which realize the nanometer level running accuracy and new type of Linear Motion Ball Guide was developed. With new type of Linear Motion Ball Guide, fluctuation accuracy of $0.025\text{ }\mu\text{m}$ was obtained experimentally as a component and $0.008\text{ }\mu\text{m}$ as a system. This new Linear Motion Ball Guide upset conventional wisdom.

Key words : Linear motion, Ball guide, Roller guide, Accuracy, Straightness, Fluctuation

1. はじめに

直動転がり案内(Linear Motion Ball Guide : 以後 LMBG, LM ガイド)の原型が誕生してから今日までの 37 年間, 産業分野から民生分野に至るまで幅広く利用され, 現在では要素部品として欠かせないものとなっている。

この間, 技術の進歩と共に市場の要求は高速・高加減速, 高精度, 高剛性, 超寿命をはじめ, 高温, 高真空等, 全ての面において高まってきている。これらの要求に応えるべく LM ガイドも日々進化を遂げ続けている。その中で今回は超高精度化を実現すべく開発した LM ガイドについて報告する。

2. ウェービング対策技術

現在求められている高精度化の単位はナノオーダーであるといえる。その要求に応えるべく, LMBG 自体の精度等級の高い製品を使用し, レール, テーブル取付面を高精度に仕上げ, 最終的に補正を入れて高真直精度を目指すのだが, 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, 力のバランスが周期的に変化し, それに伴い発生する細かな姿勢変位あるいは振動が, 補正をかけるのが非常に困難であるということから問題となってしまうのである。よって, この問題を解決しない限り LMBG でのナノレベル運動精度の実現は不可能といえる。この細かな姿勢変位あるいは振動のような変動のことをウェービング(Fluctuation)と呼んでいる。

しかし, このウェービングについて著者は既にキャリッジ側の

転走面両端部のクラウニング形状に大きく影響を受けることを理論的に導いており, ウェービングを最小に抑えることができるクラウニング形状を見出す手法を確立している⁽¹⁾。また, テーブル剛性がウェービングに与える影響⁽²⁾などもこれまで明らかにしてきた。図 1 に同一の#25-LMBG システムでありながら, テーブル材質, 剛性, 質量などの違いによりウェービングが異なっている様子を示す。その値のみに注目すれば, ウェービングを最小に抑えられるクラウニング形状を施した LMBG にて, 鋼製で 100 mm 厚さのテーブルを組み込んで得られたウェービングは $0.024\text{ }\mu\text{m}$ (24 nm)であった。LMBG システムによるウェービングの一般論は $0.1\sim 0.3\text{ }\mu\text{m}$ (100~300 nm)位というものであったので, 驚異的な結果が得られたことになる。

3. ナノレベル精度の実現に向けて

これまでの高精度化への取り組みは, 全てテーブル付きの LMBG システムに対するものであった。それは, 図 1 から明らかなようにテーブル剛性が LMBG 単体のウェービングを抑える効果があるからなのである。しかし, それはユーザーサイドへの負担を強いてしまうこととなり, 本来好ましいことではない。特に近年では省エネルギー化も重要な要素となっているので, 装置の軽量化は不可欠でありアルミ製テーブルを使用するということはあることとなっている。したがって, LMBG 単体でウェービングを抑えてやる技術が求められているのである。

先にも述べたように, LMBG においてウェービングは宿命ともいべきものであり, その原因は有限の長さを持ったキャリッジ内に有限個の転動体である玉が移動して荷重バランスが周期的に変化しているためである。その視点に立てば, 油膜等で支え

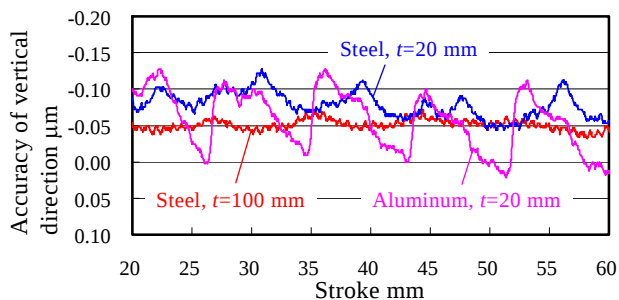


Fig.1 Fluctuation of #25-LMBG system by table material, table height(t).

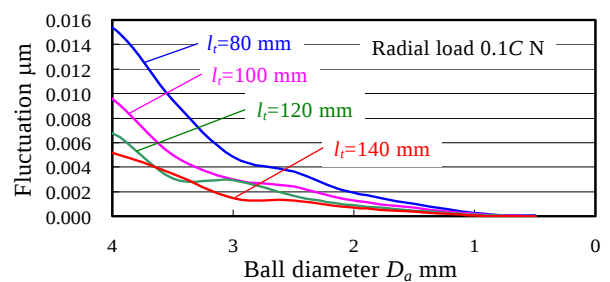


Fig.2 Theoretical fluctuation of #25-LMBG by carriage length l_t , ball diameter D_b

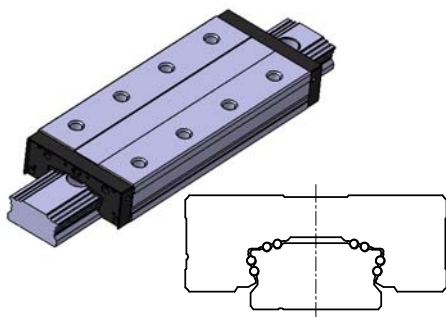


Fig.3 New type LMBG

られたすべり・静圧案内というものは、テーブル側は有限の長さであるかもしれないが、転動体に相当する部分が分子レベルまで極小化された無限に限りなく近い転動体が移動していると考えることができる。よって、テーブル移動に伴って力のバランスが崩れることがないため、LMBG システムのような周期的なウェービングがほとんど確認できないのである。よって、LMBG においてもキャリッジ長さを長くし、転動体を限りなく小径化してやれば、有限個である転動体数を増やしてやることのできる。それによって更なる高精度化が実現できるのではないかと、すなわちナノレベル精度により近づくことができるのではないかと考えられる。

そこで、キャリッジ長さ、転動体径の変化に対してウェービングがどのように変化するのか解析を行った。図 2 に#25-LMBG にてキャリッジ長さを 4 種類設定し、作用荷重を全ての条件における基本動定格荷重 C の 10 % としたときの玉径とウェービングの関係を解析した結果を示す。もちろん本解析は全ての条件でウェービングが最小となるクラウニング形状とした場合のものである。これより、若干の変動はあるが、総じてキャリッジ長さが長く、玉径が小さい方がウェービングが小さくなっていることがわかる。すなわち有効玉数が多い方がウェービングが小さいということである。解析結果的には玉径が 2.0 mm~2.5 mm 以下位からウェービングは 2 nm を切ってきており、この辺りならナノ運動精度実現へかなり近づけられるのではないかと考えられる。

しかし、玉径を小さくすることで、玉径に単純比例する基本動定格荷重も小さくなってしまいうという、望まざる結果となってしまうのである。そこで、新たな LMBG を考える必要が出てきた。

4. 新形 LMBG の開発

そこで新たに考案した LMBG の外観と断面を図 3 に示す。すなわち、ナノレベル精度実現へ向けた取り組みとしての小径玉を採用し、キャリッジ長さも実用の範囲内で長くした。さらに基本動定格荷重を確保するために玉条列数を従来の倍の 8 条列とした。これにより玉一つ当たりの分布負荷が減少し、更なる低ウェーピング化が望めることと同時に剛性向上の効果も期待できる。

早速、標準品と開発品にて比較テストを試みた。測定は LMBG 単体での上下方向の走行精度を、キャリッジ上面に非接触変位計の測定子を固定し、LMBG 上方にベース側に固定した直定規にてストローク 300 mm にわたり行った。駆動には一軸アクチュエータを用い、駆動装置の影響を受けにくいようにロードセルを介して連結した。図 4 に LMBG #25 相当単体の標準品と開発品の上下方向走行精度測定結果のうち、ウェービングが確認しやすい場所としてストローク 50~100 mm 部の拡大を示す。これより開発品のウェービングが標準品に比べ約 1/5 程度しか出なかったことが確認された。この値については、図 1 で示した LMBG システムでの測定におけるウェービングが $0.024 \mu\text{m}$ で、LMBG システムにおける値としては驚異的な数値であったと述べたことを踏まえると、単体で $0.025 \mu\text{m}$ というの

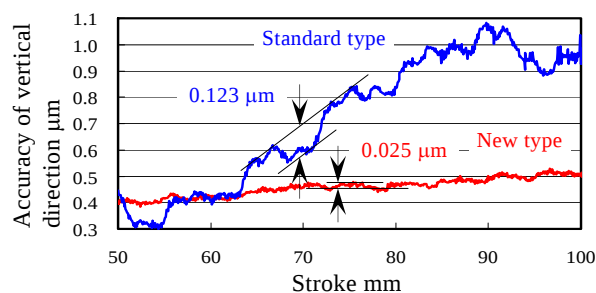


Fig.4 Running accuracy of LMBG in 50~100 mm stroke portion (full stroke : 300 mm)

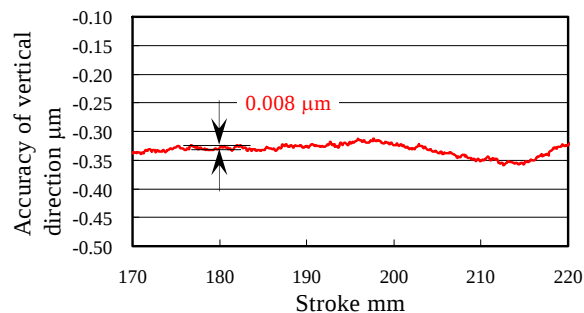


Fig.5 Running accuracy of new type LMBG system in 170~220 mm stroke portion (full stroke : 300 mm)

は LMBG にとっては更に驚異的な数値といってよいといえる。

つぎに、本開発品をテーブルに組付けた LMBG システムとしてテストを行った。測定は LMBG 単体での測定方法と同様の方法でストローク 300 mm にわたり測定した。図 5 に本開発品にテーブルを組付けた LMBG システムでの上下方向走行精度測定結果のうち、ウェービングが確認しやすい場所としてストローク 170~220 mm 部の拡大を示す。これより、ウェービングは $0.008 \mu\text{m}$ という驚愕する値であることが確認された。これは定常状態で生じている測定器のノイズレベルである。当社としても LMBG システムにて得られた値としては最高レベルであり、本開発品に盛り込んだ技術がナノレベル精度実現に沿った物であったことを裏付けていると考えている。

5. ま と め

まだ数少ない検証データではあるが、直動転がり案内にてナノレベル精度を実現したという事実については、本開発品に盛り込んだ考えが間違った物ではなかったという意味で非常に満足している。

ただ、本開発品が目指したナノレベル精度はウェービングの面からのアプローチであり、真直精度が含まれていない。いくら真直精度には補正がかけられるとはいっても、それを誰も望んでいないことは明白である。したがって、ウェービングが大方クリアできた今、つぎなるアプローチは真直精度におけるナノ運動精度の実現と考えている。LMBG の取付面精度に依存してしまう性質がある真直精度ではあるが、LMBG システムにおける機構、構造によりそれら外乱の影響を受けにくい転がり案内の開発を実現すべく、まだまだ研究を続けていく予定である。

参 考 文 献

- 1) 高橋 徹：直動ボールガイドの走行性能、一クラウニングとウェービングの関係—2001 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集、(2001) 565.
- 2) 高橋 徹：直動ボールガイドの走行性能、一テーブル剛性とウェービングの関係—2004 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集、(2004) 837.