V-平ボールガイドの負荷分布と 精度に関する研究*

清水 茂夫** 井 沢 実**

Study on Load Distribution and Accuracy of V-Flat Ball Guide

Shigeo SHIMIZU and Minoru IZAWA

The formulae on the load distribution and the accuracy of the V-Flat ball guide in accordance with the reciprocating table movement of surface grinding machines are derived. The guiding accuracy of the table, the fluctuations of the load distribution, the accuracy of the works etc. are calculated. The following is the summary of the results: (1) In the V-Flat ball guide, the displacement components related to the rolling of the table due to the structural nonsymmetry are always jointed in the guiding accuracy. (2) The optimum conditions for the number of balls in the flat way and for the concave amounts of the saddle V ways exist for the purpose of the elevation of the guiding accuracy. (3) The slight convex shape of the saddle V ways is superior to the concave or the straight one of them concerning the load distribution, but that is inferior to this concerning the guiding accuracy. (4) It is made clear that the mutual diameter differences between the balls installed in each ball row are not so troublesome problems for the guiding accuracy and the load distribution in the V-Flat ball guide.

Key words: V-Flat ball guide, surface grinding machines, load distribution, guiding accuracy, mutual ball diameter differences

1. ま え が き

小型平面研削盤や万能工具研削盤などにおけるテーブルの案内にはテーブル側にそれぞれV溝と平面の案内ブロックを設け、サドル側には2列のV溝案内ブロックを設けてその間の保持器内に多数の鋼球を介在させる、いわゆるV-平ボールガイドを採用した機種がしばしば見受けられる。このような機種は小さな摩擦抵抗で軽快な動きができるうえ、潤滑保守も簡単であり、さらに研削粉や塵などの異物の侵入がなければ長期にわたる案内精度の保持も容易である。

Kunertはモーメント荷重を受けた2次元の転がり案内における負荷分布状態を解析し¹⁾、筆者らも転がり案内の負荷分布状態を2次元光弾性実験から解明した²⁾³⁾。また、転がり案内におけるV溝-転動体-V溝案内列とV溝-転動体-平面案内列との組合せの場合、各転動体列間のばね定数の差異に起因してテーブルの案内精度が低下することも指摘してきた⁴⁾。

一般に、工作機械や測定機などに多用されている各

種転がり案内の場合、転動体荷重はかなり小さいため転動面の剥離寿命はおよそ問題にならない⁴⁾、むしろ、テーブルの案内精度や剛性および加工精度などが問題視されるのであるが、このような問題に関する研究は従来ほとんどなされていない。V-平ボールガイドも同様であり、テーブルのピッチングやローリングなど最終精度の調整は、組立作業者の勘に依存する状況である。

本報では、このようなV-平ボールガイドにおける負荷分布式をたて、サドル案内面の中高、中低傾向や玉径相互差、V溝角度など種々の要因について解析し、各玉列の玉に働く負荷分布状態ならびにテーブルの案内精度などに検討を加えた。

2. 理 論 解 析

2.1 テーブルと各玉列の玉の動き

図1は、小型平面研削盤で実用されているボールガイドの概略図を示す。ここで、テーブルストロークは l_s であり、サドルは前後へテーブル上面幅を自機研削可能な距離だけ移動する。また、玉列1がV-V案内面であり、玉列2がV-平案内面である。このようなボールガイドは、一般にテーブルが $l_s/2$ だけ右方

* 原稿受付 昭和61年4月1日、昭和59年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和59年10月1日)にて発表

** 正 会 員 明治大学工学部(川崎市多摩区東三田1-1-1)

Fig. 4 Explanation of guiding accuracy of table

$$g_1 = W - \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^{N_j} F_{ji} = 0 \quad (9)$$

$$g_2 = WT_x - \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^{N_j} F_{ji} x_{ji} \quad (10)$$

$$g_3 = \sum_{i=1}^{N_1} F_{1i} - \sum_{i=1}^{N_2} F_{2i} = 0 \quad (11)$$

ただし,

$$F_{1i} = 2P_{1i} \cos \theta \quad (12)$$

$$F_{2i} = P_{2i} = 2P_{2i}' \cos \theta \quad (13)$$

また、式 (12), (13) においてラジアルすきま $\lambda_{ji} = 0$ のときの F_{ji} とテーブルとサドルの相互接近量 y_{ji} との比をとって無次元化すると次式となる、

$$C_{vv} = \frac{F_{1i}}{C_b y_{ji}^{3/2}} = \frac{\cos^{5/2} \theta}{\sqrt{2}} \quad (14)$$

$$C_{vf} = \frac{F_{2i}}{C_b y_{2i}^{3/2}} = \frac{2 \cos^{5/2} \theta}{(1 + 2^{2/3} \cos^{5/3} \theta)^{3/2}} \quad (15)$$

次に、ラジアルすきま λ_{ji} の考え方を簡単に述べる。いま、テーブル側案内面は真直であって、サドル側案内面が両端で零、中央で $2\lambda_{\max}$ となるような放物線状で中低または中高傾向に研削仕上されているものとする。さらに、玉径相互差を $2\lambda_{uji}$ とすれば、 λ_{ji} は次式で表されるものとする。すなわち

$$\lambda_{ji} = \lambda_{\max} \left[1 - \left\{ \frac{2x_{ji}}{(N_1 - 1)p_1 + \frac{l_s}{2}} \right\}^2 \right] + \lambda_{uji} \quad (16)$$

以上、式 (1)~(8) および式 (12), (13), (16) の関係を逐次式 (9)~(11) に代入し、Newton-Raphson 法を適用して未知数 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ に関して解けば、ボールガイド内負荷分布が求められる。

2.3 テーブルの精度と自機研削精度

サドルの前後送りも真直面内でなされているとして、テーブルの移動量が $T_x = 0$ と $T_x = \pm l_s/2$ のときのそれぞれの解 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ および $\alpha_1^*, \alpha_2^*, \alpha_3^*$ が求められたとする。そして、テーブルの各位置における z

Fig. 5 f_{vv}, f_{vf} , coefficients of ball movements and C_{vv}, C_{vf} , coefficients of total elastic approaches, vs. θ , contact angle and VD, V way angle

座標上の変位がそれぞれ図 4 に示すように y_1, y_2 および y_1^*, y_2^* で表されたとすれば、

$$y_1 = \alpha_2 - \alpha_3 z_1, \quad y_1^* = \alpha_2^* - \alpha_3^* z_1 \quad (17)$$

$$y_2 = \alpha_2 + \alpha_3 z_1, \quad y_2^* = \alpha_2^* + \alpha_3^* z_1 \quad (18)$$

したがって、テーブルの左右方向移動に伴う上下方向位置の差異をテーブルの精度 Δ とすれば

$$\Delta_1 = y_1 - y_2 = -2\alpha_3 z_1$$

$$\Delta_2 = y_1 - y_1^* = \alpha_2 - \alpha_2^* - (\alpha_3 - \alpha_3^*) z_1$$

$$\Delta_3 = y_1 - y_2^* = \alpha_2 - \alpha_2^* - (\alpha_3 + \alpha_3^*) z_1$$

$$\Delta_4 = y_2 - y_1^* = \alpha_2 - \alpha_2^* + (\alpha_3 + \alpha_3^*) z_1$$

$$\Delta_5 = y_2 - y_2^* = \alpha_2 - \alpha_2^* + (\alpha_3 - \alpha_3^*) z_1$$

$$\Delta_6 = y_2^* - y_1^* = 2\alpha_3^* z_1$$

の内、絶対値が最大のものとなる。すなわち

$$\Delta = \max |\Delta_k|, \quad k = 1, 2, \dots, 6 \quad (19)$$

一方、平面研削盤では機械の最終精度出しにテーブル上面の自機研削加工を行う。そこで、砥石による切込み量を δ とすれば、自機研削後のテーブルあるいは電磁チャック上面の形状は

$$y = \delta - (\alpha_2 - \alpha_3 z) \quad (20)$$

のように求められる。

3. 解析結果と考察

ここで計算に用いるボールガイド諸元は、玉径 $D_a = 15.875$ mm, 玉列 1 の玉ピッチ $p_1 = 23$ mm, 玉列間ピッチ $p_s = 124$ mm, テーブルストローク $l_s = 350$ mm および玉列 1 の玉数 $N_1 = 18$ 個である。また、外荷重 W はテーブルの重量 70 kgf, 電磁チャック重量 40 kgf の計 $W = 110$ kgf である。

まず、図 5 は玉移動係数 f_{vv}, f_{vf} ならびにテーブルとサドルの弾性接近係数 C_{vv}, C_{vf} と接触角 θ との関係を示す。これより、 $\theta = 60 \sim 30^\circ$ すなわち V 溝角度

Fig. 6 Δ , guiding accuracy of table vs. N_2 , number of balls in ball row $j=2$

Fig. 7 P_{max} , maximum distribution load, vs. N_2
 $P_{maxI}=0$ table stroke, $P_{maxII}=175$ mm table stroke

$VD=60\sim 120^\circ$ の範囲で f_{vf} は $0.33\sim 0.46$ だけ変化し、玉列 2 の移動量は玉列 1 と等しくはならず若干遅延することがわかる。一方、 C_{vv} と C_{vf} は $VD=97^\circ$ 付近以外は等しくならず、したがって f_{vv} と f_{vf} ならびに C_{vv} と C_{vf} の差異により、 y - z 面内の回転すなわちローリングが生ずることがわかる。

次に、サドル各案内面が真直に研削され、玉相互差が零の場合における研削盤テーブルの精度 Δ と玉列 2 の玉数 N_2 との関係を種々の V 溝角度に対して計算した結果を図 6 に示す、これより、 VD が大きいほどテーブルの精度は高くなり、また VD に対して最も高精度の案内面が得られる N_2 値が存在することもわかる。また、図 7 はボールガイド内最大分布荷重 P_{max} と N_2 の関係を示す、ここで、 P_{maxI} は $T_x=0$ mm, P_{maxII} は $T_x=175$ mm のときの最大分布荷重値である。これより、 P_{maxI} は P_{maxII} に比べてかなり小さいことがわかる。

図 8 は $N_2=18$ とした場合で、サドル案内面を中低または中高に研削仕上げした場合のテーブルの精度を示す、これより、最も高精度の案内面構造が得られる組合せは $VD=120^\circ$ で $2\lambda_{max}=-10\mu m$ すなわち $10\mu m$ 中低に仕上げるとよいことがわかる。さらに、 $VD=60\sim 90^\circ$ の間はサドル案内面に中低傾向をつけず真直に研削するとよいこともわかる。このようにサドルに中低または中高傾向をつけた場合のボールガイド内最大分布荷重 P_{maxI} , P_{maxII} の変化状況を図 9, 10 に示す、これより、いずれの最大分布荷重値も $2\lambda_{max}=4\mu m$ 付近すなわち $4\mu m$ 中高で最小値をとることがわか

Fig. 8 Δ vs. $2\lambda_{max}$, concave/convex of saddle guide ways

Fig. 9 P_{maxI} vs. $2\lambda_{max}$

Fig. 10 P_{maxII} vs. $2\lambda_{max}$

る。また、図 11~13 に $2\lambda_{max}$ がそれぞれ $\pm 10\mu m$ と $0\mu m$ で $VD=120^\circ$ の場合におけるボールガイド内荷重分布の変動状態を示す、これより、 $2\lambda_{max}$ が $10\mu m$ 中低の場合、ほぼ 2/3 の玉が外荷重を支持し、残り 1/3 の玉はほとんど外荷重を支持しないことがわかる。また、 $2\lambda_{max}$ が $0\mu m$ すなわちテーブルとサドル各案内面が真直に加工されている場合には $T_x=175$

Fig. 11 Load distribution vs. x
 $2\lambda_{\max} = -10 \mu\text{m}$, $VD = 120^\circ$

Fig. 12 Load distribution vs. x
 $2\lambda_{\max} = 0 \mu\text{m}$, $VD = 120^\circ$

Fig. 13 Load distribution vs. x
 $2\lambda_{\max} = 10 \mu\text{m}$, $VD = 120^\circ$

mm すなわちテーブルが右端位置にきたとき左端の玉は無負荷となり、さらに $2\lambda_{\max} = 10 \mu\text{m}$ の中高状態ではおもに中央部の玉が外荷重を支持していることがわかる。

図 14 は 自機研削をした後の電磁チャック上面の形状を示す。JIS B 6213 によると、工作物上面の真直度あるいは工作物の厚さの均一さに対する許容値は、測定長さあるいは工作物の間隔 300 mm について 0.005 mm となっている。したがって、 $2\lambda_{\max} = 10 \mu\text{m}$ の場合は JIS の許容値に入らないが、 $2\lambda_{\max} = -10 \mu\text{m}$, $0 \mu\text{m}$ の場合は許容値に入るので、サドルは中低にするか真直にしなければならないことがわかる。

次に、図 15 に直径 15.875 mm の鋼球の玉径相互差許容値の分布を示す。ここで、精密級、上級、並級の各等級に対して 3σ 値はそれぞれ $\lambda_d = \pm 0.25$, ± 0.5 , $\pm 1.0 \mu\text{m}$ とした。これより、Box-Muller 法⁵⁾ を用い正規乱数を発生して各玉列の玉径を決め、100 台の研削盤を作製した場合を想定し、テーブルの精度ならびにボールガイド内最大分布負荷を求めた結果を表 1 と図 16 に示す。これらより、当然のことながら精密級の玉をボールガイドに組み込むとテーブルの移動に伴う精度のばらつきは最も小さいが、並級や上級の玉でも精密級より高精度の案内面を作れる場合があることもわかる。

Fig. 14 Shape of upper surface of magnetic chuck after self-grinding

この理由は、玉径相互差が両端で大きく順次中央より小さくなって並んでいるからである⁶⁾。また、最大分布負荷の最大値は表 1 より $P_{\max II} = 15.8 \text{ kgf}$ であり、玉の永久変形量が $0.0001 D_a$ のときの荷重値を計算⁷⁾ すると 355 kgf であるから、ボールガイド内最大分布負荷はかなり小さいことが知れる。

4. ま と め

小型平面研削盤に用いられている V-平ボールガイ

Fig. 15 Mutual diameter differences between balls

Table 1 Means, standard deviations and ranges of guiding accuracy of table and of maximum distribution loads in ball guide, VD=120°, $N_1 = N_2 = 18$

$2\lambda_d$ μm	$2\lambda_{\max}$ μm	Δ μm			$P_{\max 1}$ kgf			$P_{\max 11}$ kgf		
		μ	σ	Range	μ	σ	Range	μ	σ	Range
2	-10	0.45	0.19	0.14-0.96	9.1	1.2	6.8-12.4	12.6	1.4	9.9-15.8
	0	1.85	0.29	1.20-2.81	5.1	0.7	3.8-7.4	8.0	0.8	6.3-10.0
	10	5.87	0.39	5.12-7.05	4.7	0.6	3.8-6.6	7.8	0.9	6.4-10.6
1	-10	0.37	0.13	0.12-0.68	9.0	0.7	7.4-10.6	12.6	0.7	11.2-14.3
	0	1.73	0.15	1.42-2.19	4.6	0.4	3.8-5.8	7.4	0.5	6.4-8.6
	10	5.80	0.20	5.42-6.40	4.1	0.3	3.5-5.1	7.0	0.4	6.2-8.4
0.5	-10	0.37	0.07	0.21-0.53	8.9	0.3	8.2-9.8	12.7	0.4	11.9-13.5
	0	1.70	0.07	1.54-1.93	4.4	0.2	4.0-5.1	7.2	0.3	6.7-7.9
	10	5.77	0.10	5.58-6.07	3.9	0.2	3.5-4.4	6.7	0.2	6.2-7.4

Fig. 16 Dispersions of guiding accuracy of table for 3 classes mutual diameter differences and concave/convex of saddle guide ways from 100 machines respectively
VD=120°, $N_1 = N_2 = 18$

ドの負荷分布式をたて、テーブルの案内精度や負荷分布の変動状態および工作物の精度などについて検討を加えた結果を要約すると、次のようになる。

- (1) V-平ボールガイドでは、その構造上必ずテーブルのローリング変位成分が入る。
- (2) テーブルの案内精度を高くするための、V側案内面玉数に対する平側案内面の最適玉数が存在する。
- (3) V溝の角度は鋭角より鈍角にするほど高精度となり、サドル案内面には最適中低量値が存在する。
- (4) サドル案内面を中高にすると、自機研削後

の電磁チャック上面の形状はやはり中高となり、JIS許容値内に入らなくなる。

- (5) 玉径相互差はそれほど問題としなくてもよい。むしろ、ボールガイド内の玉並び状態を両端から中央へ行くに従って小径の玉にするよう配列することが精度追及上有効である。

終わりに臨み、本研究に対し種々の御助言を賜りました元岡本工機(株)、現(株)岡本工作機械製作所の平田博氏に深く感謝申し上げる。

文 献

- 1) K. H. Kunert: Die Vorgespannte Wälzkörpergelagerte Geradführung, Konstruktion, 13, 7, (1961) 268.
- 2) 清水茂夫, 井沢 実: ころがり案内の負荷分布に関する研究(第1報), 潤滑, 28, 10 (1983) 761.
- 3) 井沢 実, 清水茂夫: ころがり案内の負荷分布に関する研究(第2報), 潤滑, 28, 10 (1983) 767.
- 4) 清水茂夫: 転がり案内, 機械設計, 22, 9 (1978) 131.
- 5) 日本規格協会: 品質管理便覧 (1977) 781.
- 6) 井沢 実, 清水茂夫, 政井孝久: ボールガイドを用いた機械の精度と剛性に関する研究, 昭和58年度精機学会秋季大会学術講演会講演論文集 (1983) 121.
- 7) T. A. Harris: Rolling Bearing Analysis, John Wiley & Sons, New York, N. Y., (1984) 326.