テーブル案内面の特性試験装置の性能*

木塚慶次^{*1}, 上野 滋^{*2}
渡部武弘^{*3}, 吉田 嘉太郎^{*3}

A Prototype Machine for Investigating Table Guiding Characteristics

Yoshitsugu KIZUKA, Shigeru UENO,
Takehiro WATANABE and Yoshitaro YOSHIDA

This paper describes construction and performance of a prototype machine which was made in order to clarify the effects of surface texture and lubrication on guideways. The prototype machine consists of inverse V-type guideways, a table, a DC servomotor and a ball screw. Scraped machining was adopted on table slide ways. Friction force between the table and guideways, and rising value of the table from the guideways are measured by a dynamometer and a noncontact displacement sensor, respectively. The guiding characteristics were investigated by changing the acceleration curves of the table.

Key Words: Surface Grinding, Guideway, Lubrication

1. 結 論

近年の平面研削加工における要求には、例えば、航空機部品に使用されるインコネル 918 などの耐熱合金の高効率研削加工または金型部品の高効率、高精度加工があり、そのためクリープフィード研削盤およびショートストローク研削盤⁽¹⁾などの開発が必要となってきた。これらの機械は従来の機械に比べ、クリープフィード研削加工においては低速送りに伴うスティックスリップによる不安定な摺動が、ショートストローク研削加工では高速送りによるテーブルの浮き上がりや摺動案内面の偏摩耗などが問題となっている。これらの問題の解決のためには現場的な設計の変更のみならず、根本的なすべり運動の現象解析が必要となってきた。すべり面の研究については、昭和 40 年頃から平板モデルによる多数の実験および解析が行われてきている^{(2)~(5)}。しかし、実験装置の大きさや形状などの点により、実際の機械の挙動を完全に現しているとはいえない。

そこで、実機に要求されている諸特性を満たすため

の必要パラメータを変化可能な試験装置を開発することとした。それにより摺動面の仕上状態や潤滑条件をパラメータにとり、低速送りによるスティックスリップ、高速送りによるテーブルの浮き上がり変動や案内面の摩擦抵抗などの諸特性を実験的および解析的に検討し、それらの結果から最適な案内面を作るために必要な資料を得ることを目的とした。

本報では、実験装置の詳細な構造と測定方法について述べるとともにその性能についても検討を加え、実験機としての性能評価結果について報告する。

2. 実験装置の設計指針

ここで必要とされる実験項目は、次に示す 2 項である。

A. 低速域から高速域における、テーブルの仕上面状態とテーブルの浮き上がりおよび摩擦力の変動の相関関係について

B. ショートストローク研削などの短いストローク距離での高速反転運転におけるテーブル速度変化とテーブルの浮き上がりなどの運動特性の関係について

そのため、実験装置が具備すべき設計項目を下記に示す。

(1) 実験装置は、実際の案内面の大きさに近く、

* 原稿受付 平成元年 12 月 4 日。

^{*1} 正員、千葉大学大学院 (〒260 千葉市弥生町 1-33)。

^{*2} 正員、(財)機械振興協会 (〒203 東久留米市八幡町)。

^{*3} 正員、千葉大学工学部。

図 1 装置の概略図

テーブルの高速運転を可能な大ききとするとともに製作上より案内面精度が保証でき、テーブルの交換などの操作に支障のない大ききとする。

(2) 案内面の構造は、運動精度が高く油溜りの少ない逆 V 形案内面構造とし、テーブル案内面を変更できるようにする。

(3) 装置の材質については、長時間の測定による案内面からの熱影響を極力避けるためベッドとテーブルの材質を低熱膨張鋳物とする。また、マスタ案内面には耐摩耗性のある焼入れ鋼を使用する。

(4) テーブルの駆動方法は、駆動による影響がテーブル運動に及ばない構造とする。また、テーブルの運動速度および左右反転運動時の加減速特性を変更できるようにする。

(5) 潤滑油の供給は重力式給油方式を採用し、潤滑油の交換が円滑に行えるよう配慮する。

(6) 運動中のテーブルの浮き上がりおよび摩擦力変動を正確に測定できる設計とする。

3. 実験装置の概要と測定方法

3.1 実験装置の概要 実験装置の概略図を図 1 に示す。この実験装置のマスタ案内面は、ラップ加工により高い精度の加工ができやすい四角柱② (SKD 11) を用い、ベッドのやはり高精度に仕上げられた V 溝にはめ込む方式をとった。この際テーブルは、両 V 案内面による過剰拘束になるため、平行度、ねじれを $2\mu\text{m}$ 以下とする。摺動案内面の仕上状態を変えるため、テーブル側のスライダ案内面⑪部分を分割し、交換可能な方式とした。テーブル駆動部は、運動制御部、DC サーボモータ (300 W)、ボールネジ③、および直動転がり案内⑥より構成されている。なお、運動制御部には、テーブルを左右反転するためのオシレーションモードと位置決めのための定速モードの二つのモードがある。オシレーションモードでは、左右反転の加減速波形を変化でき、電圧振幅と周波数を変化させることによりテーブルの速度およびストローク距離を調整できるようになっている。最高速度は、ストローク距離が 160 mm の時に 180 mm/s である。

図 1 (c) は、継ぎ手部の詳細図である。ナット⑦とテーブル継ぎ手⑨を鋼球⑬を介して、締付け力を 50 N 以下で結合することにより、テーブル本体の上下方向の動きを拘束せず、テーブルを駆動できるように設計した。なお、継ぎ手はアッペの原理に基づき両スライダの中央に設置し、案内面と同一高さに駆動点を配置した。継ぎ手の中には、ロードワッシャ⑧を挿入し、テーブルの摩擦力を測定することができる構造となっている。

潤滑油はテーブル上のオイルカップより供給され、スライダ案内面の供給口へ送られる。潤滑油の種類は、粘度の異なる 4 種類のベースオイルを使用する。表 1 に使用する潤滑油の粘度と比重重量を示す。

図 2 に溝付きスライダ案内面の形状を示す。案内面の面粗さは、マスタ案内面が $0.4\mu\text{m} R_{\text{max}}$ 、スライダ案内面が $0.8\mu\text{m} R_{\text{max}}$ である。なお、直定規による案内面の真直度の測定結果は、長さ 70 mm で $0.4\mu\text{m}$ で

あった。

3・2 測定方法 テーブル浮き上がり量の測定方法は、まず、案内面の表面をエタノールで脱脂したテーブルをマスタ案内面上にセットし、ナットに 50 N の締付け力が作用するように調整する。次いで、無潤滑状態で、定速モードにてテーブルを原点から 4 mm/s の一定速度で Y の正方向(図 1)へ移動させる。その間、非接触変位計で測定したテーブルとベッド上面の基準面との間隔と磁歪センサで測定したテーブルの位置信号を AD 変換し、それらを、テーブル移動 0.1 mm ごとにパーソナルコンピュータのメモリに記憶し、測定の基準値とする。その後、オイルカップより潤滑油を注油し、潤滑油のエア抜きを行い、テーブルに潤滑油が行きわたって定常状態になるまでテーブルを低速で左右反転させ、その後、テーブルの運動幅中のテーブルの浮き上がりの測定および摩擦力の変動を測定する。測定値から、無潤滑状態で測定した基準値を差し引いた値を浮き上がり量と定義する。なお、潤

表 1 使用した潤滑油の特性

20°C

	PL-60	PL-150	PL-500	BS
Viscosity cSt	17.3	82.4	303.6	1614
Specific gravity ρ/cm^3	0.857	0.8631	0.869	0.873

図 2 案内面溝形状

(a) ボールネジナット上の変位

(b) テーブル上の変位

図 3 モータのサーボ振動による変位

滑油の温度制御は行っていないが、以下のすべての実験は 20°C の恒温室で行った。

4. 特性試験装置の性能評価

浮き上がり量の測定において最も重要であるテーブル継ぎ手の性能と摺動案内面の摩擦力について測定を行った。

4・1 テーブル継ぎ手の性能 静止状態におけるモータのサーボ振動の大きさとテーブル継ぎ手による振動の減衰を測定するため、ボールネジのナット上部およびテーブル上部に加速度センサ(B&K 製 4366 形)を取付け、加速度信号を求め、これを FFT アナライザにより周波数領域において二重積分し、変位を求めた。この測定結果を図 3 に示す。ボールネジのナット部では 50 Hz の周波数で約 3 μm、100 Hz で約 1 μm の変位が生じている。しかし、テーブル上では低周波のノイズ成分しか現れていないことがわかる。したがって、鋼球を利用したテーブル継ぎ手により、サーボ振動のテーブルへの影響を避けることができた。

また、無潤滑状態において継ぎ手を取り外し、手動によりテーブルを送った場合と継ぎ手を取付け、速度 4 mm/s の一定速度で送った場合でのテーブルとベース上面の基準面との間隔を図 4 に示す。両者ともにほぼ等しい値を示していることから、テーブルの駆動方法による影響がほとんどないことがわかる。

4・2 摩擦力の測定 継ぎ手の中に取り付けた圧電形荷重変換素子(load washer)を用いて無潤滑状態における摺動案内面の摩擦力の時間変化を図 5 に示す。初期の摩擦力は 45 N を示し、その後、22 N(摩擦係数 0.22)で一定になっている。この値はバネ秤を用いて

(a) 手動による駆動

(b) 継ぎ手による駆動

図 4 テーブルとベッド間の間げき

測定した値とほぼ等しい値を示している。ただし、テーブルはストロークの反転時に加減速を伴うため、すべり面の摩擦力だけでなく慣性力が加わる。そのためここでは定常速度の間に測定し、その平均値を摩擦力

としている。

5. 試作した実験装置による 測定結果の一例

テーブル案内面には工作機械のすべり案内面に多く利用されているキサゲ仕上げを施し、テーブルの運動特性の測定を行った。使用したキサゲ仕上面は坪当り数を 20(当たり/inch²)に製作し、その表面粗さは 7.2 μm R_{max} でうねりが 1 $\mu\text{m}/20\text{mm}$ である。潤滑油には工作機械に一般的に使用されている粘度に近いベースオイル PL-500(304 cSt)を使用した。

テーブルの運動幅中のテーブルの傾きを測定するた

図 5 摩擦力の測定結果

(a-1) 一定加速時のテーブル速度モード

(b-1) 加速度変化時のテーブル速度モード

(a-2) 一定加速時のテーブル浮き上がり

(b-2) 加速度変化時のテーブル浮き上がり量

(a-3) 一定加速時のテーブル傾斜角度

(b-3) 加速度変化時のテーブル傾斜角度

(a-4) 一定加速時の摩擦力

(b-4) 加速度変化時の摩擦力

図 6 テーブル反転時の加減速による運動性能

め、テーブルの浮き上がり測定用の静電容量形変位計を用いてテーブルセンタから左右に 55 mm 離れた位置の 2 箇所で基準値からの差を測定し、個々の測定位置での差からテーブルの姿勢を計算した。

図 6 は、テーブル反転時の加減速の違いによる浮き上がり変動および摩擦力の変動を示す。同図(a-1)と(b-1)は、テーブルの速度変化を示している。同図(a-1)の場合 Y の正方向へ 0.125 s 間一定加速を行い、速度が 94 mm/s に達した後、0.25 s 間一定速度を保持する。その後減速を行い、左右反転を行う。一方、同図(b-1)では反転端でのショックを少なくするため、反転端の加減速を時間の二乗の速度変化する。同図(a-2)と(b-2)は、左右反転の速度変動におけるテーブルの浮き上がり変動を示す。両方ともにテーブルの浮き上がり量は、7.5~8.8 μm の間で変動している。速度の変化によるテーブル姿勢の変化が大きく作用し、反転端から加速域に移行したところでテーブル浮き上がりが最小となる。その後、加速域および定速域で浮き上がりが増加し、油膜が定常状態に移行する前に減速により浮き上がりが減少する。

しかし、浮き上がりの変動波形および前端と後端の浮き上がり量の変動に相違があるため、同図(a-3)と(b-3)に示すような運動幅中のテーブルの姿勢変化がある。等加速度のテーブルを移動する(a-1)方式に比べ(b-1)方式では定速になる直前で加速度が最大となるため、テーブル摺動面に作用する潤滑油の動圧力が増大し、テーブル進行方向での前端上がりが大きくなると考えられる。(b-1)方式では図(b-3)によりテーブル傾斜角度の最大値が 1.2 s で、(a-1)方式の場合より約 10 % 大きい値を示している。

次に摩擦力の変動を同図(a-4)、(b-4)に示す。等加速度の加減速による摩擦力の変化は速度の上昇とともに摩擦力も増加し、94 mm/s の定速で摩擦力 13 N (摩擦係数 0.13) で一定となった。それに対し、(b-1)方式では加速域より定速域に移行したところで、大きな摩擦力が発生していることがわかる。これは、テーブル運動の加速度変化により圧電荷重変換素子に力が加わったために生じており、定速領域では、両者とも等しい値を示している。以上の結果よりテーブル反転時の加減速波形の違いによって運動幅中のテーブル姿勢などの運動特性が相違することがわかった。今後、テーブルスライド面の面性状と運動特性の関係については、テーブル姿勢変化の少ない一定加速度による反転

方式を用いて検討を行っていく。また、高速反転形のテーブルストロークについては反転振動が問題となるため、テーブル反転の速度波形とテーブル上の振動の相関関係を調べ、テーブルの浮き上がり変動や摩擦抵抗などの運動特性とともに検討を行っていく必要がある。

6. 結 論

平面研削盤の案内面の摺動特性を評価するための試験装置を製作し、その性能について検討した。その結果、本試験装置は以下の特長を有している。

(1) テーブルを駆動するボールネジのナットとテーブルの接触を鋼球を介することにより、ボールネジの垂直方向の運動誤差は、テーブル上面には伝わらず、浮き上がり量に影響を及ぼさない。その結果、案内面のみの挙動の測定が可能となった。

(2) 油溜りの少なく、潤滑油の排出抵抗の少ない逆 V 構造としたため、テーブルの運動幅中のテーブル浮き上がり変動が明確に測定できた。

(3) 案内面の摺動特性を評価するため、運動幅中の浮き上がりおよび摩擦力の変動を同時に安定して測定可能となり、その相関を実験的に検討が可能となった。

以上のように摺動案内面の運動特性が評価可能となったため、案内面の面性状および油溝を変化させ最適案内面の面状態を検討していく予定である。さらに、高速反転形のテーブルストロークにおける反転端の加減速の影響についても検討を行っていく。

最後に、本研究を遂行する上で潤滑油をご提供いただいた(株)出光興産に厚くお礼申し上げる。また、実験に協力された本学学生・新門宏之君に感謝の意を表す。

文 献

- (1) 木塚・ほか 1 名、成形研削におけるショートストローク研削の特性、昭和 62 年精密工学会秋期大会、(1987-10)、419。
- (2) 中野・塩崎、平面研削盤テーブルの浮き上がりについて(第 1 報)、機論(第 3 部)、35-269(1969)、211。
- (3) 加藤・ほか 2 名、案内面の静摩擦特性に関する一考察(第 2 報)、機論(第 3 部)、39-317(1973)、339。
- (4) 岡村・ほか 2 名、しゅう動面油膜挙動に関する基礎解析、精密機械、35-8(1968)、490。
- (5) 加藤・ほか 2 名、工作機械案内面のしゅう動特性について(第 2 報)、機論(第 3 部)、35-273(1969)、1147。