ラップ面の潤滑特性とその改善に関する研究*

木 塚 慶 次^{*1}, 上 野 滋^{*2}
渡 部 武 弘^{*3}, 吉 田 嘉 太 郎^{*3}

Lubricating Ability of Lapped Surface for Guideways and Its Improvement

Yoshitsugu KIZUKA, Shigeru UENO,
Takehiro WATANABE and Yoshitaro YOSHIDA

This paper describes the reasons why the lubricating ability of lapped surfaces is worse than that of scraped or milled surfaces, and method of improvement also is proposed. First, the permeability of the lubricant on the surfaces machined by some machining methods was measured using an optical flat. Next, oil grooves with 0.6 mm intervals on a lapped surface were produced by laser machining for improving the lubricating ability. Friction forces and rising values of a table from the guideway in each of sliding surfaces were measured using a prototype machine. As a result, the lapped surface improved by laser machining illustrated the possibility of a high-accuracy slider.

Key Words: Guideway, Friction, Lubrication, Lapping

1. 緒 論

現在, キサゲ案内面は工作機械の滑り案内面に多く使用され, 熟練技能者により製作されている。しかし, 現在でもこれら熟練技術者は不足しているため, キサゲ案内面に代わる機械加工の可能な新しい高精度滑り案内面の開発が重要な課題となっている。そこで, この研究の第一歩として, 負荷能力に優れ, 理想平面に最も近い高精度平面加工が可能なラップ案内面を取り上げ, その潤滑特性について検討した。

滑り案内面に関しては, 昭和40年頃から実験的にも理論的にも検討されてきた^{(1)~(5)}。しかし, 高精度な平面加工が可能でありながら潤滑性の悪さから, ラップ仕上げの滑り案内面の研究は見当たらない。そこで, ラップ仕上げ面の潤滑特性を調べるため, 仕上げ加工法による潤滑油の浸透性の変化を, アボットの負荷曲線⁽⁶⁾から導いた平均間げきと浸透面積増加率で表し, ラップ摺動面の潤滑性の悪さの原因を検討した。さらに, ラップ摺動面における潤滑油の浸透性を改善するために, ラップ表面に一定間隔の細溝を作成し, 試作

した実験装置によりラップ仕上げのみの面の摺動特性と比較し, ラップ面の潤滑性改善による高精度滑り案内面の可能性を検討した。

2. 実 験 方 法

図1に, 潤滑油の浸透状況の測定に用いた装置の概略図を示す。潤滑性はテストピースとオプティカルフラットとの接触面間に供給された潤滑油の浸透状況により評価した。テストピースは, 面精度が波長オーダーのオプティカルフラットの形状に適合させるため, 工作機械に多く使用されているく形の滑り面形状を円形にモデル化した。その鋳物製(FC20)テストピースの外形

図1 測定装置

* 原稿受付 平成2年6月4日。

^{*1} 正員, 千葉大学大学院 (〒260 千葉市弥生町1番33号)。

^{*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。

寸法と油溝形状を図2に示す。なお、面圧による浸透の影響が小さかったため、試作したテストピースの面圧は取扱い上から、工作機械のすべり面に使用されている値より小さい2.8 kPaとした。潤滑油には粘度17 c. S. t.~1614 c. S. t. の鉱油製ベースオイルを使用した。

測定方法は、表面の油脂成分を石鹼で洗浄した後、水分を除去したオプティカルフラット上に、アセトンにより表面を脱脂したテストピースを載せ、油注入口面の高さまで潤滑油を供給した。同時に潤滑油が案内面へ浸透する様子を、下部に設置したカメラにより一定時間間隔で写真撮影した。表1に、実験に使用した案内面の表面粗さを触針式粗さ計により測定した結果と平面度について示す。

3. 潤滑油の浸透性について

3.1 面の状態と浸透性 図3に、各種テストビ

図2 試作摺動面の外形図

図3 試作摺動面の浸透性

ースにおけるベースオイル (304 c. S. t.) 注油後の浸透状況を経過時間と潤滑油の浸透割合 (浸透面積/試料面積) を用いて示した。以下この浸透割合を浸透率と呼ぶ。また、浸透が開始してから浸透率が約0.6までの線形的に増加している単位時間当たりの浸透面積を浸透面積増加率と呼ぶ。浸透開始時刻については、ラップ加工面では30秒以上要したが、他の加工面では注油とともに浸透を開始した。表1に示すように、ラップ加工面での平面度は1 μm と小さく、粗さの値も他の加工面に比べ極端に小さくなっている。このため接触面での間げきが小さく、油溝内の空気の出抵抗が大きいため、浸透性が低下したものと考えられる。また、ラップ加工面の浸透面積増加率は、機械加工およびキサゲ加工の1/3~1/5の値である。他の加工面については、キサゲ加工面、カップ砥石加工面、フライス加工面の順に浸透面積増加率は大きくなり、加工面の粗さとオプティカルフラット表面との間げきの増加により浸透増加率が大きくなっている。この関係は、Poiseuilleの流れにより、平行二面間の放射状の流れの流量が間げきの三乗に比例することから定性的に説明できる⁽⁷⁾。図4に、潤滑油の注油後45秒経過時の浸

表1 試作摺動面の表面粗さ

Machining Roughness	Lapping	Scraping (10 bearings)	Scraping (20 bearings)	Grinding (Cup wheel)	Milling
R_{max} (μm)	0.8	12.5	10.7	19.0	21.0
R_z (μm)	0.5	7.4	7.7	11.2	15.1
Flatness (μm)	1	16	14	23	30

図4 各種仕上げ面での油の浸透性 (45秒経過後)

透状況を示す。ラップ加工面では、ガラス面と案内面の間げきが小さいため溝に沿って潤滑油が進行し、加工面への浸透は見られなかった。それに対しキサゲ加工面では、潤滑油の進行距離が長く、加工面への浸透も大きく、潤滑油の境界面はランダムな形を示している。カップ砥石加工面の場合には、定盤基準の加工面であるラップ加工面やキサゲ加工面などに比較すると、浸透面積増加率は大きく、研削加工溝に沿って進行していた。フライス加工面の場合は、最も浸透面積増加率が大きく、潤滑油が接触面全体に広がった。

この関係を表面の幾何学的形状と関連させるため、案内面の粗さは測定方向に直角な方向に同様に分布すると仮定し、各種案内面の表面粗さをアボットの負荷曲線で表し、その最大値に空孔率（図5参照；斜線面積/全面積）を乗じたものを平均間げきと定義する。図5に各案内面のアボット曲線と平均間げきの値を示す。キサゲおよびフライス加工面のアボット曲線は、鋭角な突起を示し、ラップ加工面では鈍角な突起を示しており、負荷能力に優れていることがわかる。各々の加工面の平均間げきの値は、十点平均粗さの約半分

Machining	Abbott's bearing curve (μm)	Vacant space rate	Average gap (μm)
Lapping		0.24	0.19
Scrapping		0.38	4.75
Grinding		0.38	7.22
Milling		0.42	8.82

図5 アボット曲線と平均間げき

図6 浸透面積増加率と平均間げきの関係

前後の値になった。

図6に、各種加工面を平均間げきで表し、油粘度を変えた場合の平均間げきと浸透面積増加率の関係を示す。浸透面積増加率は、平均間げきとともに増加し、粘度の増加とともにその割合は減少していることがわかる。粘度1614 c. S. t. の潤滑油では、平均間げき8.8 μm のフライス加工面においても浸透面積増加率は小さくなっている。一般に工作機械に使用される粘度60 c. S. t. ~ 300 c. S. t. においては、平均間げきによる浸透面積増加率の影響が現れている。

3・2 試料摺動時の潤滑油の挙動 次に、ラップ加工面における摺動時の潤滑油の挙動を調べるために、硬質ガラス面上のラップ摺動体をワイヤにより800 gの水平力を滑車にて加え、各経過時間での挙動を下部に設置したカメラにより撮影した。可視化のため、304 c. S. t. のベースオイルに約1~2 μmの銀粉を加えた。図7は、ラップ摺動面の油溝に潤滑油が充てんした時に摺動を開始させた摺動面の連続写真である。潤滑油が油溝より摺動方向と反対側だけに広がっており、潤滑油の境界面が不規則になっていることが分かる。この現象の原因をより明確にするため、ラップ加工面の表面粗さから検討した。

塚田らの論文⁽⁸⁾⁽⁹⁾によると、ラップ加工面のように方向性のない表面凹凸では、高さの標準偏差および平均傾斜角度が下記の式で適用できることが示されている。

$$\sigma = H_{pv} / (6.01 - 0.049 H_{pv}) \quad \dots\dots\dots (1)$$

図7 試料摺動時の潤滑油の挙動（ラップ加工面）
（ベースオイル：304 c. S. t. + 銀粉）

$$\sigma_e = 0.26\{1 - \exp(-1.33\sigma)\} \dots\dots\dots (2)$$

$$\tan \theta_a = 1.54\sigma_e \dots\dots\dots (3)$$

H_{pv} : 粗さ

σ : 高さの標準偏差

σ_e : 微小突起の傾斜の標準偏差

θ_a : 微小突起の平均傾斜角度

ラップ加工面の相当粗さ H_{pv} に R_{max} の値 $0.8 \mu\text{m}$ を代入し、式(1)より粗さ高さの標準偏差 $\sigma = 0.133 \mu\text{m}$ が求まる。この値を式(2)、(3)に代入し、平均の傾斜角度 3.7 度が計算される。このように、ラップ加工面の表面形状はこう配の小さい不規則な疑似円すい形状になっていると想像される。そのため、ラップ加工面の平均間げきの値は、粗さが測定方向に直角に同様に分布すると仮定した値に比べ、実際には $20 \sim 30\%$ 大きいと考えられる。しかし、ラップ加工面のような高精度平面加工された面との組合せでは、表1に示したように、間げきが $1 \mu\text{m}$ 以下と小さいため潤滑油の表面吸着の影響⁽¹⁰⁾が大きい。そのため、毛細管現象による油の浸透が減少し、キサゲ面のような潤滑油の浸透速度は期待できない。したがって、摺動面への潤

滑油の供給量が少なく、可動時における摺動面では油溝を境に進行方向の前方には油膜が形成されず、後方の油溝付近でのみ潤滑油膜が形成され、全体に安定した油膜を形成することはできない。

3.3 ラップ案内面における潤滑性の改善 以上のようにラップ加工面では潤滑油の供給量が少ないため、油膜形成が円滑に行われていないことがわかった。ところが、図4 a)に示すように油溝に沿って 1 mm 程度の浸透が観察されたため、ラップ加工面にレーザー光により 0.6 mm ピッチの一定間隔の細溝を作成し、その改善を図ることとした。なお、この抜けた細溝は両端に貫通した溝とし、油溝内のエア抜きにより潤滑油の浸透性を向上させている。図8にその溝の形状を示し、この加工面を改良ラップ加工面と呼ぶこととする。

図9に潤滑性を改善したラップ加工面における、潤滑油の粘度と浸透性の関係を示す。横軸は粘度を、縦軸は潤滑油を注入し、30秒後の浸透率をプロットとしたものである。改良ラップ加工面では、低粘度から高粘度に至るすべての粘度範囲でラップ加工面の浸透率より数倍大きい値を示した。これは、案内面表面の細溝の毛細管現象による潤滑油の流動作用に原因していると思われ、良好な潤滑油の浸透を示している。

次に、改良ラップ加工面の摺動時の潤滑油の挙動を図10に示す。細溝により油溝の後方全体に潤滑油が浸透している。また、粘度 17 c. S. t. の場合には油溝の進行方向の面にも潤滑油の浸透が観察された。これは、毛細管現象による浸透性の増加と細溝間に浸透した潤滑油の表面張力の作用と考えられるが、潤滑油の物性の関与も考えられ、今後メカニズムも含め詳しく検討する予定である。

4. 案内特性について

次に、ラップ表面に一定の細溝を作成したことによる案内特性の変化を調べるために、試作した案内面試

図8 溝形状

図9 潤滑性を改良したラップ加工面の粘度と浸透性 (注入30秒後)

図10 改良ラップ加工面の潤滑油の挙動

験装置を使用し、テーブル摺動時におけるテーブルの浮上がりおよび摩擦力の変動について検討した。

4・1 実験装置 試作した案内面試験装置の概略を図 11⁽¹¹⁾に示す。テーブルスライダ⑪のすべり面にラップ加工面または改良ラップ加工面を設置し、各々の案内面におけるテーブル浮上がりと摩擦力を比較した。テーブルの浮上がりは、運動中のテーブルの姿勢を測定するため、テーブルセンタから左右に 55 mm 離れた 2 箇所で測定した。

4・2 実験結果

4・2・1 定常状態での比較 初めに、ラップ加工面および改良ラップ加工面において、潤滑油をテーブル上のオイルカップより供給した後、テーブルの往復運動を行った場合の浮上がり量およびテーブル摩擦力の変化を測定した。図 12 にテーブル送り速度を 30 mm/s、サイクルを 1 s で往復運動した時のテーブルの浮上がり量と摩擦抵抗の変化を示す。なお、浮上がり量および摩擦抵抗は、ストローク中の最大値を測定値とした。ラップ加工面では、ストローク初期においては潤滑油が面全体に広がらないため浮上がりは少なく、テーブルの摩擦力は大きな値を示した。ストローク回数が増すと潤滑油が浸透し、摩擦力が減少した。油膜厚さおよび摩擦力は、180 ストロークで定常状態に達した。それに対し、改良ラップ加工面では、摺動開始とともに浮上がりおよび摩擦力は一定値を示している。

図 13 に、すべり運動中の安定性を調べるため、定常状態でのテーブルストローク中のテーブルの浮上がり変動および摩擦力の変動を示す。同図 a) は、テーブル摺動時の速度変化を示している。Y の正方向へ 0.125 秒間一定加速を行い、速度が 30 mm/s に達した後、

0.25 秒間一定速度を保持する。その後減速し、左右反転する。ラップ加工面では、同図 b-1) に示すようにテーブルの前端と後端の浮上がりの差が $0.3 \mu\text{m}$ と大きく、テーブルの浮上がりは、1 往復のテーブルストロークを周期に進行方向に対し後端上がりで変動をしている。それに対し、改良ラップ加工面では、同図 b-2) に示すようにストローク中の浮上がり変動量は $0.13 \mu\text{m}$ と小さく、テーブル前端と後端の浮上がり量の差も小さい。さらに、改良ラップ加工面では、ストローク中の油膜厚さが均一で速度による浮上がり変動量が少ないことがわかる。一方、同図 c) に示すようにラップ加工面では、速度の変動により摩擦力が大きく変動しているのに対し、改良ラップ加工面では、速度の影響が少ない。

平面研削盤に代表される高精度すべり面の設計では、作業中の研削力とテーブルの摩擦力によりテーブル駆動力を決定しなければならない。しかし、通常の比接線抵抗は 5 N/mm 程度⁽¹²⁾であるため、滑り案内面でのテーブル駆動力の多くは、摩擦力により決定される。したがって、ラップ加工案内面では摺動初期の

(a) ラップ案内面

(b) 改良ラップ案内面

図 12 ストローク回数による摩擦力および浮上がりの変化

図 11 案内面実験装置の概略図

摩擦力が大きいと、テーブル駆動力を大きくする必要がある。さらに、浮上りが定常状態になるまでに多くの時間を要する。しかも定常状態でのテーブルの姿勢変化が大きい。これらの理由より、ラップ加工された案内面は、平面の精度は良好であるが滑り案内面としては不適當であると考えられる。それに対し、改良ラップ加工面では、テーブルの姿勢変化が小さいおよび左右反転を開始するとともに浮上りが安定になるなど、高精度案内面としての必要条件を備えている。

4・2・2 速度の影響 図14に、速度によるテーブル浮上がりと摩擦力の変化を示す。ラップ加工面では、テーブル速度の上昇により、浮上りが線形的に増加しており、テーブル速度100 m/sで2 μm の浮上りを生じた。摩擦力については、テーブル速度40 mm/sまでは、減少傾向にあり、その後、線形的に摩擦力が増加した。それに対し改良ラップ加工面では、速度に

よる浮上がりの上昇は少なく、テーブル速度100 mm/sにおいて浮上がりは1.7 μm 、摩擦係数は0.38となっている。これは、潤滑油の浸透性を改善するために作成した一定間隔の細溝が摺動面の油溝として油の均一な供給を行う効果があり、ラップ加工面の潤滑挙動と異なっていることが考えられる。

4・2・3 潤滑油粘度の影響 図15に、潤滑油の粘度による案内特性の相違について示す。同図a)に示すようにラップ加工面では、摩擦力のテーブル送り速度による変化は、粘度により異なった挙動を示している。これに対し、同図b)の改良ラップ加工面では、速度の増加による変動が少なく安定している。

以上の結果より、改良ラップ加工面では速度および粘度による浮上がり量、摩擦力に対する影響が少なく、ストローク中の変動も少ないこともわかり、キサゲ案内面に変わる機械加工による新しい滑り案内面の可能性が示された。

(a) ラップ案内面

(b) 改良ラップ案内面

図13 摩擦力および浮上りの変動

(a) ラップ案内面

(b) 改良ラップ案内面

図 14 速度による摩擦係数および浮上りの変化

(a) ラップ案内面

(b) 改良ラップ案内面

図 15 粘度による摩擦係数および浮上りの変化

5. 結 論

ラップ加工面においては、平面精度は良好にもかかわらず潤滑性の悪さにより滑り案内面に使用されていなかった。本論文では、ラップ加工面の潤滑性の悪さを浸透性の観点より検討を加えると同時に一定間隔の細溝を摺動面に施した改良ラップ加工面の潤滑特性を検討し、下記の結果を得た。

(1) ラップ加工面は案内面間の間げきが小さいため潤滑油の浸透速度が小さく、摺動時に均一な油膜を形成することが難しい。

(2) ラップ加工面での往復運動時には、テーブルの姿勢変化が生じ、テーブルの浮上り量および摩擦力の変動も大きい。

(3) ラップ加工面に幅 0.2 mm, ピッチ 0.6 mm の一定間隔の細溝を作成することにより潤滑油の浸透面積増加率を改善できた。

(4) ラップ加工面と比較すると改良ラップ加工面の左右反転時のテーブルの挙動は、ストローク中のテーブル姿勢変化が少なく、速度および潤滑油によるテーブルの浮上り量および摩擦抵抗の変化が少ない。

以上の結果から、ラップ加工面に一定間隔の細溝を作成することにより高精度滑り案内面の作成の可能性が示された。今後、この潤滑メカニズムを解明し、適切な溝の設計および最適な潤滑油の選定ができるように研究を進めて行く予定である。

最後に、本研究を遂行する上で種々ご教示いただいた千葉大学・岡本純三教授および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。

文 献

- (1) 岡村・松原・大西・井上, 精密機械, 35-4(1969), 561.
- (2) 岡村・松原・青柳, 精密機械, 35-8(1969), 490.
- (3) 加藤・松林・佐藤, 機論, 37-299(1971), 1427.
- (4) 加藤・松林・佐藤, 機論, 39-317(1973), 339.
- (5) 小林・加藤・丸井・平田, 名城大学理工研究報告, No. 25, (1985), 57.
- (6) 築添, 精密測定学, (1987), 23, 養賢堂.
- (7) 上条・笹田, 潤滑, 14(1969), 287.
- (8) 塚田・阿武, 精密機械, 39-11(1973), 1168.
- (9) 塚田・阿武, 精密機械, 40-2(1974), 150.
- (10) 坂井, 潤滑, 21(1976), 76.
- (11) 木塚・上野・渡部・吉田, 機論, 56-530 C (1990), 2802.
- (12) 由井・渡部・吉田, 機論, 54-508, C(1988), 3095.