工作機械のすべり面を対象とした高能率仕上げ加工*

山根八洲男** 福田将彦*** 鳴瀧則彦**

High Speed Finishing for Guide Ways of Machine Tools

Yasuo YAMANE, Masahiko FUKUTA and Norihiko NARUTAKI

In order to develop high efficiency finishing for guide ways of machine tools, hardened and ground die steel SKD61 was lapped by using a robot or a milling machine. Lapping, in general, is carried out on a machined surface to obtain fully flat surface, this means that the machined surface is lapped away completely. In this study, however, the purpose of the lapping is to make a surface having a superior wear characteristics without damage of the geometrical accuracy obtained by grinding. Gray cast iron and a layered soft disk made by a rubber, a sponge and an acrylic resin were used for the lap. It was found that lapping by the robot with gray cast iron lap was difficult because of many scratches and geometrical damage on the lapped surface, while lapping by the milling machine with the iron lap could get a fairly good surface finish without any geometrical damage except some scratches. The best surface finish was obtained by using the layered soft disk lap.

Key words: guide way, machine tool, lapping, grinding, robot

1. 緒 言

工作機械の案内面はその精度を決定する上で最重要部品の一つであり、形状精度と摩耗特性が常に問題となる。特に形状精度は機械の精度に直接影響を及ぼすため重要視され、加工上様々な注意が払われている。一方摩耗特性は、経年変化として性能に明確に現れるが、初期状態では目に見える形で性能に影響を及ぼすことはほとんどない。このためか、今日NC工作機械で多く用いられている焼入鋼-転がりあるいは焼入鋼-樹脂張付けの案内面では、通常、焼入れされた側の面は研削加工で、また樹脂張付けの面ではきざぎざ加工で仕上げられているのが現状であろう。

しかしながら、転がりであれすべりであれ、案内面の摩耗特性が長い目で見れば性能に影響を及ぼすことは明らかであり、工作機械のすべり面の摩耗特性を研削加工面について研削加工後ラップ仕上げにより向上させようという試み¹⁾は、幾つかの工作機械で行われているようである。しかしラップ面が大面積になることやロット数が限られていることなどからほとんどがハンドラップで行われ、コスト的には大きな問題を抱えている。

本研究では、工作機械のすべり面を想定したラップ加工を対象にその機械化を試みた。実験ではハンドラップを模したロボットによるラップ加工およびフライス盤を使用した回転ラップ、さらにプラスチックやゴム等を積層した柔らかい円盤による加工を行い、加工面の粗さや精度あるいは加工速度を比較・検討した。

2. 工作機械のすべり面の仕上げ加工

工作機械のすべり面は機械の精度に最も大きな影響を及ぼすことから、超精密加工機などでは、機械仕上げの後、ラップ加工により必要な精度を出す場合が多い。しかしながら一般の生産機械では案内面の面積も広く、ラップ加工で精度を出すにはコストが非常に高

くなることから、焼入面については研削加工による仕上げ、これに接する柔らかい面についてはきざぎざによる仕上げ、が一般的であろう。

ところで、工作機械のすべり面同士は常に停止・移動を繰り返しており、また、移動速度も数十mm/minから数十m/minと1000倍近い差がある。このため動圧すべり面では境界潤滑領域で使用される場合が多く、油膜の形成・保持能力がすべり面の摩耗に大きな影響を及ぼす。表面粗さと潤滑についてはこれまでの研究をまとめた詳細な報告がなされている²⁾。また転がり軸受については、仕上げ面の方向性が摩耗に大きな影響を及ぼしているとの報告³⁾がなされており、加工目が周方向（転動体の進行方向）よりも軸方向（転動体の進行方向に直角な方向）の方が油膜形成能力が優れており、さらにバレル加工で仕上げたような加工目の方向性のない、いわゆる等方性仕上げ面の方が、同じ大きさの最大粗さであっても、油膜の破断する確率が低いことが明らかにされている。

そこで、一部の工作機械では図1に示すように、研削加工後のすべり面の表面粗さを改善すると共に油膜形成能力を高めるために研削加工による幾何学的な形状精度を崩さない程度に軽くラップ加工を施しているとの報告⁴⁾がある。焼入鋼を用いた工作機械のすべり面では、通常、すべり方向と研削方向とが一致するが、ラップ加工を行った場合、研削方向とラップ方向を直交させることが出来るため、より等方性仕上げ面に近い面となり、動圧あるいは転がりのいずれにおいても油膜形成能力の向上が期待できる。

しかしながら工作機械の案内面のような大面積のラップ加工では軽度のラップ加工でも加工に要する時間が長く、また均一に加工する必要があることなどから、コスト的には大きな問題を含んでいる。そこで本研究では研削加工された焼入鋼の表面を高能率で図1に示すような面に加工する方法を検討した。

3. 実験方法

本研究では、すべり面を想定した被削材として焼入鋼 SKD 11 (HRC60, 長さ400mm, 幅200mm, 厚さ60mm)を用いた。研削加工はWA46JV砥石により研削速度1767m/min, 切込み3 μ m,

* 原稿受付 平成9年6月23日

** 正 会 員 広島大学工学部 (東広島市鏡山1-4-1)

*** 学生会員 広島大学大学院

Fig.1 Surface finish model of grinding and lapping

送り20m/min, スパークアウト3回とした。研削加工における最大仕上げ面粗さは $1\sim 1.2\mu\text{m}$ であった。

ラップ加工は図2に示す3通りの方法で試みた。(a)は通常のハンドラップと同様の铸铁(FCD300)製ラップ盤(140mm×55mm×45mm)を多関節型ロボットにより保持・移動させるもの、(b)は同じく铸铁製の円盤状ラップ盤($\phi 120\text{mm}\times 30\text{mm}$)をフライス盤の主軸に取り付け回転ラップさせるもの、(c)は柔らかい材料でラップ盤($\phi 160\text{mm}\times 30\text{mm}$)を作り、同じくフライス盤の主軸に取り付け回転ラップを行うものである。(a)および(b)のラップ盤には切りくずの除去を目的として20mmピッチで幅2mm, 深さ2mmの溝をつけた。なお、(c)の軟質ラップでは溝は設けていない。

ラップ剤としてはダイヤモンドペースト(平均粒径 $3\mu\text{m}$)を用い、専用の薄め液で希釈した。

仕上げ面の評価には、小坂研究所製触針式微小形状測定器(SE30D)を用いた。なお、断面曲線のみでは定量的な比較が困難なため、微小突起の高さ分布を示すことにより評価を試みた。すなわち、得られた断面曲線をフィルタを用いてうねり成分を除去した後、一定区間内の中心線より上部(山)の高さおよび個数を測定した。また、加工面の平面度測定には(株)ミットヨ製3次元形状測定器(BHN305)を用いた。

4. 実験結果および考察

4.1 铸铁製ラップ盤を用いたロボットによるラップ加工

実験ではまず、ハンドラップを模した、ロボットによるラップ加工を試みた。ロボットには多関節型ロボット(ASEA, IRB60)を用い、手首の移動はPTP方式により行った。ラップは上下方向は自由に移動可能とし、加工圧力はおもりにより調節した。

ラップの移動速度および加工圧を変えながら種々の条件で実験を行ったが、最終的に満足のいく結果が得られなかった。図3に送り速度600mm/min, ラップ圧力35kPaの条件で行った場合の加工面の様子を示すが、多数のスクラッチが観察され、工作物周辺部ではだれも認められた。これは、いずれも加工圧の調整がうまく行かなかったためと考えられる。すなわち、手作業による磨き加工ではラップにかかる研削抵抗の微妙な変化を指先で検知し、ラップの動きを調整(例えばラップが重く感じられたらラップを少し持ち上げ、被削材とラップとの間に研磨剤及びラップ液を取り込むなどの操作)をしたり、あるいは磨き方向を適宜変化させている⁴⁾のに対し、今回の実験ではこのような調節を行っていないためと考えられる。まただれについては、ハンドラップでは被削材の端部では力を加減し、ラップが被削材のエッジを強くこすることがないように調節しているのに対し、実験では同様にこのような調整が出来ていないため、端部での加工圧力が高くなり、より多くの加工を行ったため

(a) Lapping by robot

(b) Lapping by hard disk

(c) Lapping by soft disk

Fig. 2 Experimental setup for the tests

Fig. 3 Surface finish obtained by robot lapping

Fig. 4 Surface profile of the guide ways before and after lapping by the hard rotary disk

と思われる。

以上の結果から、ロボットを用いてラップ加工を行うには、単純な動きの模倣だけでなく、ラップにかかる力を検知しそれをフィードバックさせる機構が必要であると思われる。

4.2 鑄鉄製ラップ盤を用いたフライス盤による回転加工

ロボットによるラップ加工の結果から、ラップを安定した状態（ラップと被削材との間にラップ液およびラップ剤が均一に存在する状態）に保ちながら加工することが最も重要であることがわかった。そこで、加工の安定性を主眼に、ラップを回転させる方法を試みた。実験にはフライス盤を用い、ラップ盤に対してはトルクのみを与え、加工圧力の調整はラップ上におもりを置くことにより行った。なお、ラップ液およびラップ剤をより効果的に被削材との間に取り込むため、ラップ盤の軸をラップの進行方向（実験にはフライス盤を使用しているため実際に移動するのは工作物となる）と逆向きに 0.5° 傾けた。また、ラップ軸の軸心とラップ盤の中心は5mm偏心させ、特定部分のみ強く加工されるのを防いだ。

図4に得られた結果の一例を示す。測定箇所は加工面のほぼ中央（幅方向）である。加工条件は、ラップ回転数55rpm、送り速度80mm/min、見かけのラップ圧は4.6kPa（ラップ軸の傾きを無視してラップの自重とおもりの重量を合計した値をラップ底面積で割った値）である。図より研削に直角な方向について被削材の粗さ曲線の凸部が一様に加工され比較的そろってきていることがわか

Fig. 5 Over cutting by inclined lap and surface profile of before and after lapped surface

る。また、研削方向に平行な方向についてはラップ加工の結果、微小な加工痕が新たに認められ図1に示したモデルに近い加工がなされていることがわかる。

なお、同方式では図2に示すようにラップ軸を傾けており、ラップは進行方向に対し後端部が最も強く当たる傾向がある。このためすべり面の幅方向で中低傾向が心配される。すなわち、直径120mmのラップ盤が 0.5° 傾けて取り付けられている場合、図5に示すように、フライス加工のような強制切込みを仮定すると、50mmのラップ幅で0.048mmの中低が生じる。そこで、幅方向について中央部をはさんで約50mmの長さの表面形状を粗さ計で測定した。測定結果を同図下段に示しているが、中低傾向はほとんど認められなかった。これは本方式でのラップによる加工量がラップ加工前の研削面の凸部を削り取る程度と小さく、またラップ加工を強制切込み加工と同じに考えることが出来ないためと思われる。

以上、同方式ではラップ液を適当に取り込み安定した加工をしているものの、場所によりラップの回転方向に深さ $1\mu\text{m}$ 程度の円弧状のスクラッチが観測され、特にラップ能力を上げるためにラップ圧を増加させると顕著に現れた。これはラップ剤や切りくずが適切に排出されず、ラップの溝に滞留し、その結果過切削を引き起こしたためと考えられる。そこで加工圧や加工速度などを変化させ、スクラッチを出さない条件を検討したが、スクラッチを皆無にすることは出来なかった。また、上述のように形状精度にはほとんど問題は無いものの、仕上げ面にはラップの運動による円弧状の模様が現れるなど、若干の問題が残ることがわかった。

4.3 軟質ラップ盤による高速加工

これまで述べたように、鑄鉄盤によるラップではスクラッチが最も大きな問題であることから、スクラッチを発生させない方法を検討した。スクラッチの発生原因は、前述のように、切りくずやラップ剤の排出がスムーズに行かず、溝に詰まった固まり状の砥粒による過切削と考えられることから、溝をなくすと同時に砥粒に出来るだけ均一な力をかけるため、ラップ盤を硬い鑄鉄から軟質のゴムに変え砥粒をより柔らかい弾性支持とすることを試みた。

なお、ラップ盤を軟質とすることにより、

- (1) ラップ面内で加工速度や接触圧力分布が一樣とならず、うねり特に回転方向のうねりを形成しやすくなる、
- (2) ラップ軸の傾きを大きくする事によりラップ液およびラップ剤をより取り込みやすくなることが可能となる、
- (3) 硬質ラップではラップ圧調整のためラップ盤を軸方向に拘束しない構造としていたが、軟質ラップ盤ではラップ圧の調整は軸方向変位で与えることが出来るためラップ盤の支持が剛に出来る。このため、振動等の問題が少なくなり高速加工に対応できる。

等の利点が考えられる。なお、うねりについてはラップでの取り代が非常に少なく、また案内面にとっては幅方向となるため生じたとしても大きな問題とはならないと思われる。

使用したラップ盤の構成は図2に示したが、ラップを行う面はゴムとし、ゴムをバックアップする形でスポンジ、アクリル、ゴム、アクリルを積層した。それぞれの厚さはゴム板5mm、スポンジ10mm、アクリル5mmである。実験は当初、ゴム+スポンジ+アクリルの3層で行ったが、一定量押し付けたときのアクリル板の変形が大きく、ラップ盤の腰が柔らかく感じられたため、さらにゴムとアクリルを追加し5層構造とした。ラップ圧はラップを工作物に対し垂直方向に押しつけることで調整したが、実験ではラップと工作物との接触幅をラップ進行方向に対し40mmになるよう調節した。このときのラップ軸にかかる荷重は40Nであった。

図6に軟質ラップ盤を用いてラップ加工した場合の、加工前後の断面曲線を示す。なお加工条件は主軸回転数225rpm（ラップ盤外周部で113m/min）、送り80mm/min、加工長さは400mm、加工回数は3回とした。図より、研削に対し直交方向では軟質ラップ盤による加工でも突部のみが一樣に加工されていることが分かる。一方、研削に平行な方向では鑄鉄による回転ラップのようなはっきりとしたラップ痕は認められなかった。これは、ラップ盤が軟質となったことによりラップの砥粒にかかる力が硬質ラップ盤に比べ相対的に小さくなったため、砥粒1個当たりの切込みが減少したためと思われる。

図7に加工前後の突起部の高さ分布を示すが、同図は一定区間についてうねりを除いた粗さ曲線の中心線からのピークの高さとその累積個数を示したものである。図より、加工回数を重ねるにつれ高さの大きなピークの高さが減少する様子がわかる。また図8に軟質ラップ盤による加工後の仕上げ面の写真を示すが、硬質ラップ盤で最も大きな問題であったスクラッチは全く認められなかった。

なお、軟質ラップ盤による加工後の被削材表面のうねりについては、ラップ加工前後の被削材について3次元形状測定器で400mm×200mmの表面を50mmピッチで平面度の変化を測定したが、ラップ加工前が $2.5 \pm 0.5 \mu\text{m}$ 、ラップ加工後が $3.0 \pm 0.5 \mu\text{m}$ と、平面度の目立った低下は見られなかった。

以上、ラップを軟質盤としたことによりスクラッチについては問

Fig. 6 Surface profile of the guide ways before and after lapping by the soft rotary disk

S=225rpm, F=80mm/min, Contact width=40mm

Fig. 7 Unification of peak height on the guide ways after soft disk lapping

題が解決できたが、研削方向と直角方向にラップ痕により積極的に油溝を付けるということについては問題が残った。これについては、ラップ盤の硬さや現在 $3 \mu\text{m}$ としているラップ砥粒の粒度を調節することにより解決できる可能性があり現在検討中である。

Fig.8 Surface finish obtained by soft disk lapping

Fig.9 Setup for oil film breaking test

4.4 ラップ面の性能評価

軟質ラップ盤による加工を施した面の油膜形成・保持能力を評価するため図9に示す装置で実験を行った。スライダには研削仕上げしたS45C (φ50mm, 厚さ8mm) を用い、すべり面を想定した被削材は軟質ラップ盤で加工したSKD11である。なお、被削材には市販の工作機械すべり面用の潤滑油 (ISO粘度32) を仕上げ面にスクレーパを用いて均一に塗布した。実験はスライダを静かに載せ、滑り落ちるまでの回路中の1.5kΩの抵抗の両端にかかる電圧をデジタルメモリで測定した。同回路ではスライダと被削材が金属接触すると、1.5kΩの抵抗の両端の電圧は約0.8Vとなり、金属接触の有無を検出することができる。なお、微視的に見た場合仕上げ面の凹凸が不規則なことやスライダが移動していることから、接触は動的に生じていることが予想されるため、短時間に生じる金属接触を検出する必要がある。このため、デジタルメモリのサンプリングタイムを1msとし、50秒間記録した。ただし実際に滑り落ちる時間は20秒程度であった。

結果の一例を図10に示すが、研削仕上げでは測定中はほぼ連続的に0.8Vの電圧が測定され、頻繁に金属接触が生じていることが分かる。一方研削仕上げ後ラップ加工した被削材では時折瞬間的に0.8Vの電圧が観察されるものの研削仕上げ面のような連続的な金属接触はほとんど見られず、良好な潤滑が得られていることがわかる。なお、研削仕上げとラップ仕上げでは滑り落ちるまでに時間が異なり、ラップ仕上げの方が時間が短くなっている。これは潤滑が良好なために滑り落ちる速度が研削仕上げの場合に比べ早かったことを示している。

Fig.10 Effect of lapping on metallic contact between guide way and slider

今日では多くの工作機械で厳重な切りくず対策や粉塵対策が行われており、切りくずや粉塵による摩擦はかなり少ないと思われる。従って、(焼入鋼-合成樹脂)の組合せのすべり面では、焼入鋼の鋭いピークは合成樹脂にとってスクラッチ摩擦を生じさせる最も大きな原因の一つと考えられ、焼入鋼側の仕上げ面のピークを除去することは工作機械の精度保持上非常に重要である。本研究で提案している方法は特殊な設備を必要とせず、また加工時間も短いことから、十分実用的な技術であると考えられる。

5. 結 論

工作機械の焼入鋼側すべり面を想定した軽度のラップ加工を高能率で行うことを目的にSDK11(HRC60)についてダイヤモンドパウダをラップ剤とし種々の方法・条件でラップ加工を行った結果、以下の結論が得られた。

- (1) 多関節型ロボットによるラップ加工では、切削抵抗のフィードバック系や工作物端面でのラップの加圧力の調整などかなり注意深い制御が必要と思われる、容易ではない。
- (2) 鋳鉄製の回転型ラップ盤による加工では、形状精度を崩すことなく良好な面を得ることが出来るが、加工能率を上げるためにラップの加圧力を増加させるとラップ回転方向にスクラッチが入る場合があり、加工面品位および能率の点から若干の問題がある。
- (3) スクラッチを防止するために、ゴム-スポンジ-プラスチック板を積層した軟質板で回転ラップ加工を行ったところスクラッチのない良好な面を高能率で加工することが出来た。

以上の結果から、軟質ラップ盤による高速加工は、特殊な装置を必要とせず、加工能率も高いことから、工作機械すべり面の表面特性改善法として十分実用化出来る可能性があると言える。

参 考 文 献

- 1) 徳毛滋明：マシニングセンタの設計・製造技術の特徴，Proc. 3rd Int. Machine Tool Engineeris Conf., (1988) 34.
- 2) 平野富二夫：表面あらさと潤滑，潤滑，27，2(1982)71.
- 3) 赤松良信：転がり軸受における表面キャラクタリゼーション，精密工学会誌，61，11 (1995) 1525.
- 4) 幸田盛堂：金型磨き面における表面キャラクタリゼーション，精密工学会誌，61，11 (1995) 1529.