

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 7 月 7 日現在

機関番号：55301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06135

研究課題名(和文) レーザ加工による工作機械しゅう動案内面のきさげ加工レス化に関する基礎研究

研究課題名(英文) Fundamental study to replace the finishing method of sliding guide surface of machine tool from scraping to laser beam machining

研究代表者

小西 大二郎 (konishi, daijiro)

津山工業高等専門学校・総合理工学科・教授

研究者番号：80186717

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,600,000円

研究成果の概要(和文)： 研究の目的は、工作機械案内面を研究対象にした性能改善にある。鏡面研磨されたしゅう動面の表面上に、「きさげ加工」面を模し、機械加工もしくはレーザー加工でくぼみや油溝を設け、潤滑油をしゅう動面に保持し、かつ潤滑油をしゅう動面全体に拡張することで、しゅう動摩擦抵抗を低減しようとする。

研究により、境界潤滑条件下では、くぼみをしゅう動面に設けることはしゅう動摩擦低減につながる場合がある。しゅう動方向に対して直角に油溝を設けることはしゅう動摩擦増加につながるが、油溝角部に面取り処理を施すとその増加割合が低減できる。流体潤滑条件下では、しゅう動面上のくぼみや油溝は流体抵抗を増加させることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の目的は、表面同士が互いに接触・しゅう動する機械部品を対象とし、潤滑油膜の形成が難しい境界潤滑領域下でゼロ摩擦に近づけることのできる表面制御・設計法を見出すことである。

油溝を設けることはしゅう動摩擦低減につながらなかったが、くぼみをしゅう動面に設けることはしゅう動摩擦低減につながる場合があることがわかった。また、画像処理の手法を用いて、くぼみや油溝に保持されている油溜り量変化を定量的に把握すれば、潤滑油挙動からしゅう動摩擦変化の様子を知ることができるとわかった。これらのことは機械しゅう動部品の摩擦損失低減化につながり、持続可能な社会構築に貢献できる。

研究成果の概要(英文)： The purpose of this study is to improve the performance of machine tool guide surfaces. Dimples or oil grooves imitated the scraping surface were created on the surface of the mirror-polished sliding surface by machining or laser processing. It is intended to reduce the sliding frictional resistance by holding the lubricating oil on the sliding surface and expanding the entire moving surface.

According to the present study, under boundary lubrication conditions, (1) Providing dimples on the sliding surface may lead to reduction of sliding friction. (2) Providing oil grooves at right angles to the sliding direction lead to increase of sliding friction, but chamfering the corners of the oil groove can reduce the rate of increase. It was found that the dimples and oil grooves on the sliding surface increased the fluid resistance under the hydrodynamic lubrication conditions.

研究分野：工学

キーワード：トライボロジー 工作機械 案内 きさげ レーザ加工 ディンプル グループ

1. 研究開始当初の背景

(1) 工作機械案内のしゅう動面は、高速送り時には潤滑油膜が十分形成される流体潤滑条件下での運転となる。他方、低速送り時には潤滑油膜が十分形成できない境界潤滑条件下での運転となる。したがって極端な低・高速送り条件では、しゅう動抵抗は増加してしまい工作機械の送り案内装置の運動・位置決め精度の低下をまねき、これによって工作物の加工精度が低下するという問題が解決すべき課題である。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、工作機械送り案内装置を研究対象とし、案内面仕上げ方法を「きさげ加工」から従来の機械加工（フライス加工）と微細加工（レーザ加工）による複合テクスチャに置き換えるという手段を用いて、工作機械案内しゅう動面の摩擦抵抗を低減することのできる表面制御法や設計法をトライボロジー的知見から見出し、ゼロ摩擦化の手段の実用化につなげる。

3. 研究の方法

(1) 油膜形成や潤滑油の拡張の様相の観察としゅう動面間の摩擦係数の測定を同一の試験機、試験片で同時に観察・計測し、これらの結果を総合的・相互的に評価することが望ましい。しかし、しゅう動摩擦試験に用いるしゅう動体は金属製である必要があり、しゅう動面に形成される油膜形成や潤滑油の拡張の様相を外部から観察・評価することはできない。そこで、油溜量観察装置による試験（図1 実験A）と往復摩擦試験機による試験（図1 実験B）に分割し、次の2段階からなる実験研究の方法をとることにした。

(2) 第1段階として、くぼみと油溝を有する金属製固定試験体とガラス製回転しゅう動体を用い潤滑油の拡張や油溜の様相を観察しながら、それぞれの凹部形状の機能と性能を確認した（図1 実験A）。使用潤滑油に蛍光剤をあらかじめ添加しておき、これにUVランプ光源を照射・発光させることで、潤滑油の拡張や油溜の様相を、ガラス製回転しゅう動体を通してビデオカメラで観察した。動画データは判別分析法により2値画像処理を施した後、データ解析ソフトで油溜量を解析した。さらに測定開始時に、LEDを点灯させると同時に同期信号5Vを発生させることで動画データとロードセルからのデジタル出力電圧データの同期性を確保した。試験実面圧 0.1 MPa、しゅう動速度 17600 mm/min の運転条件で、粘度等級 ISO VG32 のタービン油を用いた。試験片（ $\phi=40$ mm）の試験面は研磨により表面粗さ $0.01 \mu\text{m Ra}$ に仕上げた。なお、この実験条件潤滑モードは流体潤滑であった。

(3) さらに第2段階として、くぼみと油溝を有する金属製固定試験体とSDK11製往復しゅう動体（研磨プレート：HRC61）とで摩擦特性を調査した（図1 実験B）。試験実面圧 0.05 MPa、しゅう動速度 90~6000 mm/min の運転条件で、粘度等級 ISO VG32 のター

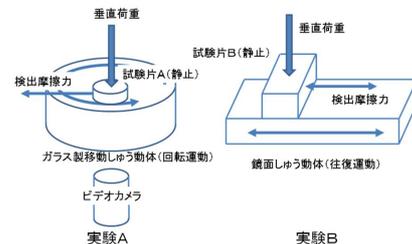


図1 実験方法

ピン油および一部の摩擦試験ではしゅう動面専用油を用いた。試験片 (b×l=20×20 mm)、研磨プレートの試験面は研磨により表面粗さ 0.01 μm Ra に仕上げた。

4. 研究成果

(1) まず、きさげ面の表面性状を計測し、その幾何学的特徴を数値化した。結果、粗さの干渉という点で低摩擦が期待できる機械加工面は研削面の場合よりも研磨面の場合であると考えられた。ただし、研磨面はきさげ面より油溜効果が期待できず、きさげ面を低摩擦が期待できる機械加工面に置き換えるためには、きさげ面とほぼ同様な油溜効果が期待できるように研磨面に凹状のくぼみまたは溝を設けたテクスチャの付加が必要となると推測された。きさげ面の幾何学的特徴を整理すると、平坦なプラトー部に凹形状の油溜部が点在し、その油溜深さ R_{vk} は約 2.6 μm、負荷面積率は約83%であった。

(2) 数値化されたきさげ面の負荷面積率の値を参考にして従来のフライス加工でくぼみ (直径 $d=2, 4$ mm, 深さ $h=0.1$ mm) としゅう動方向に対して直角に設けた油溝 (幅 $w=2$ mm, 2本, 深さ $h=0.1$ mm) を有する試験片 (HRC61) をそれぞれ個別に作成した。研磨のみの試験片と5パターンのSDK11製くぼみ試験片HからCと1パターンの油溝試験片とで摩擦試験した。なお、くぼみ試験片と油溝試験片の当たり面積率 OS はそれぞれ、75, 94%と80%とした。

境界潤滑条件下で得られたくぼみ試験片の結果を図2に示す。図2では研磨のみの試験片の場合に得られた摩擦係数の値を1として、各試験片での結果を相対的に表している。図2、3から潤滑モードにかかわらず研磨のみの試験片の結果よりもくぼみ試験片の摩擦係数が小さくなる場合があった。また、しゅう動面専用油を用いれば概ね摩擦係数を低減できることがわかった。また、予備実験からくぼみ試験片の場合と比べ、油溝試験片の場合の摩擦係数が極端に大きくなることがわかった。なお、以後の摩擦試験はすべてISO VG32のみを用いた。

(3) フライス加工油溝が摩擦面を横断する FCD250製油溝 ($w=4$ mm, 2本, 深さ $h=0.1$

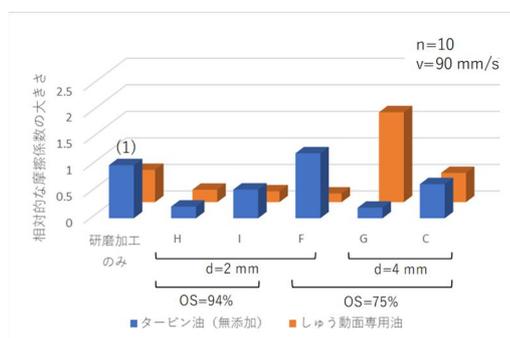
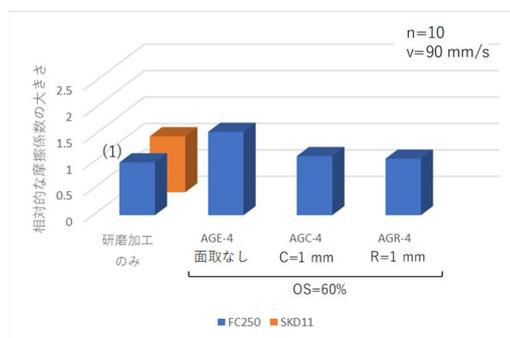
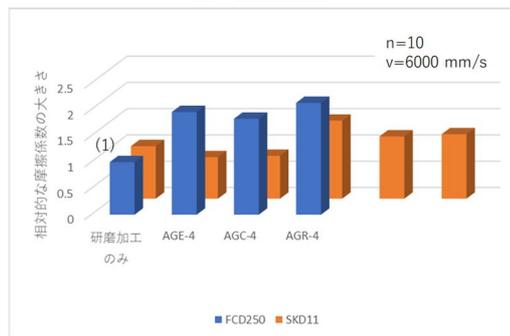


図2 くぼみ試験片の摩擦試験結果



(b) 境界潤滑条件



(a) 流体潤滑条件

図3 フライス加工油溝試験片の摩擦試験結果

mm) 試験片AGE-4, AGC-4, AGR-4を使って、油溝角部の面取り処理の効果を調べた。図3から、面取り処理をすれば、油溝のない研磨試験片の場合よりもやや大きな摩擦係数となるが、境界・混合潤滑域で油溝設置による摩擦係数増大が抑制できることがわかった。また流体潤滑条件下では、くぼみ試験片の結果と比べて、油溝試験片の流体抵抗が大きかった。

(4) フライス加工くぼみ (d=2 mm×4) - 油溝 (w=4 mm, 2本, 面取りなし) 複合試験片のくぼみの配列は、くぼみのピッチp=10 mmとしたものとp=8, 14 mm混合の2種としたものをそれぞれAGE1-4とAGE2-4とした。図4から、境界潤滑域でくぼみ - 油溝複合試験片の場合の結果が最も摩擦係数が低かった。このことから、くぼみを油溝と複合・連結させれば、研磨のみの場合よりもしゅう動摩擦を低減できることが実証できた。しかし、流体潤滑域で油溝の流体抵抗が大きく、くぼみによる摩擦軽減効果の大きさを上回る結果となった。ただし、くぼみ間のピッチpを短くすれば、摩擦・流体抵抗ともに低減できることがわかった。

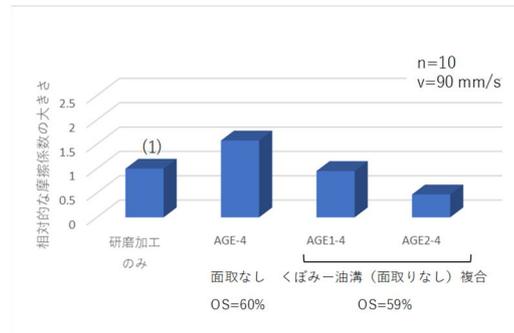


図4 複合試験片の摩擦試験結果

(5) 油溝端が摩擦面端部に達しないフライス加工油溝 (l×w=12×4 mm, 1本) のみを有する試験片MGと摩擦面端部まで達するCO₂レーザ加工油溝 (w=0.1 mm) と結合した試験片MGLとで試験した。ただし、FC250, S45C製試験片のフライス加工油溝角はそれぞれ面取り処理なし、R1フィレットとした。図5から、研磨のみの試験片の場合よりもやや大きな摩擦係数となるが、フライス加工油溝の長さが、試験片端部に達していなくても油溝角にR1フィレットを付ければ、境界/流体潤滑条件下で摩擦係数増大が抑制できることがわかった。また、面取り処理のないフライス加工溝の場合、これにCO₂レーザ加工油溝を結合させた場合の方が境界/流体潤滑条件下ともに摩擦係数が低く、CO₂レーザ加工油溝は摩擦低減に有効であった。一方、R1フィレットで面取り処理をした場合、これにCO₂レーザ加工油溝を結合させた場合の方が境界潤滑条件下で摩擦係数が高く、CO₂レーザ加工油溝は摩擦低減に有効ではなかった。また、図4に示したAGE-4と図5に示したMGの結果を比較すると、境界潤滑条件下ではフライス加工油溝を摩擦面端部まで設けた方が、流体潤滑条件下では溝を摩擦面端部まで設けない方が摩擦低減化に有効であることがわかった。

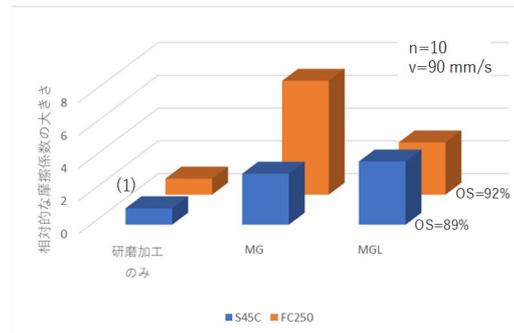


図5 複合油溝試験片の摩擦試験結果

(6) くぼみ配列の調査は、しゅう動方向に対して直角に設けた油溝軸線に対して、4個のくぼみを4 mmだけしゅう動方向に平行移動したくぼみ (d=2 mm×8, くぼみ間のピッチp=12 mm) - 油溝 (l×w=12×4 mm, 1本, R1フィレット処理) 複合試験片MG-8Pと、油溝軸線に対して鏡

像（線対象）とした($d=2\text{ mm}\times 8$, くぼみ間のピッチ $p=8, 16\text{ mm}$ 混合の2種) - 油溝

($l\times w=12\times 4\text{ mm}$, 1本, R1フィレット処理) 複合試験片 MG-8Lを用い、当たり面積率の調査は、くぼみ ($d=2\text{ mm}\times 8$) - 油溝 ($l\times w=12\times 4\text{ mm}$, 1本, R1フィレット処理) 複合試験片 MG-8P) とくぼみ (直径 $d=2\text{ mm}\times 4$) - 油溝

($l\times w=12\times 4\text{ mm}$, 2本, R1フィレット処理) 複合試験片 M2G-4Pを比較対象とした。図6から、くぼみ配列については、油溝軸線に対して鏡像（線対象）とした場合の方が、混合潤滑条件下で摩擦係数が幾分か低かった。このことから、やはりしゅう動方向に対してのくぼみ間距離の長短が摩擦係数の大小に関係することがわかった。当たり面積率については、約75%とした場合の方が、境界潤滑条件下で摩擦係数が低かった。

(7) 油溜量観察実験では、フライス加工油溝が摩擦面を横断するFCD鋳鉄製油溝 ($w=4\text{ mm}$, 4本, 深さ $h=0.1\text{ mm}$) 試験片AGE-4, AGC-4, AGR-4を使って油溝角部に面取り処理することの効果と、フライス加工くぼみ ($d=2\text{ mm}\times 22$) と油溝 ($w=4\text{ mm}$, 2本, 面取りなし) を連結した複合試験片AGE2-4を使ってくぼみを油溝で連結することの効果とを調べた。図7から、試験片にテクスチャを施せば、摩擦係数の低減につながるが、摩擦距離の増大に伴い、概ねその低減の割合は小さくなり、研磨のみのA試験片の結果に漸近することがわかる。また図8から、周回数が進むにつれて油溜率が低下していることと図7から、油溜率は摩擦係数を低減させる要因の1つであり、油溜率が高いほどその効果も概ね大きいといえる。さらに試験片表面に設けた凹状の油溜部に保持されていた潤滑油は、摩擦距離が増大するにつれ漏れだし、一部は摩擦面に拡張することになるが、油溜率の低下割合は周回数が進むに減少し、ほぼ一定値に漸近することがわかった。油溜率の漸近する値は、油溝角部にC1面取りした場合が最も高く、くぼみと油溝を複合・連結した場合が最も低かった。このことから、くぼみと油溝を複合・連結した場合、運転初期は摩擦係数が低いが、摩擦距離増加に伴って油溜率低下、摩擦係数増加が他の試験片の場合より大きく、本来油膜保持の役割を持つくぼみは、油溝とつなげることによって拡張機能の役割に変化すると考えられた。

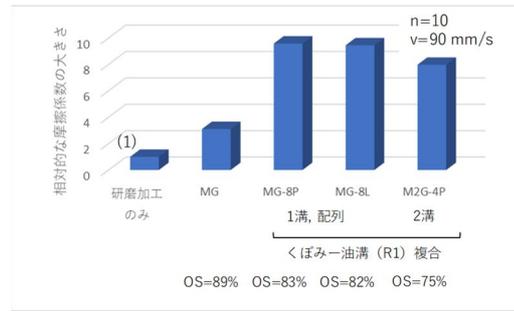


図6 複合試験片の摩擦試験結果

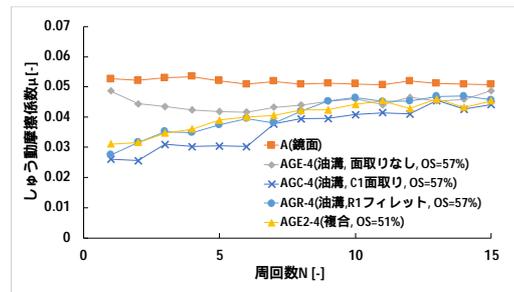


図7 しゅう動摩擦係数と周回数の関係

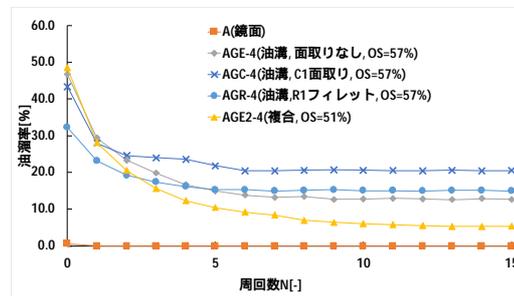


図8 周回数ごとの油溜率変化

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

「小西研究室」
<http://www.tsuyama-ct.ac.jp/konishi/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----