

氏 名	うえはら よしたか 上原 義貴
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	博 甲 第 789 号
学位授与の日付	平成 28 年 3 月 25 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専 攻	工芸科学研究科 設計工学専攻
学 位 論 文 題 目	油潤滑下における摩擦低減のための微細塑性加工に関する研究
審 査 委 員	(主査)教授 太田 稔 教授 荒木栄敏 教授 森脇一郎 准教授 江頭 快

論文内容の要旨

地球温暖化防止の観点から、自動車などの産業機械の高効率化が求められている。産業機械の高効率化を実現するためには摺動部の摩擦を低減することが有効である。これまで、油潤滑下での摩擦低減技術として微細テクスチャによる摩擦低減技術の研究が行われてきた。特に摺動方向前方の端部の勾配が大きな微細形状（以下、3 次元微細形状）による摩擦低減技術が注目されている。本研究では、この 3 次元微細形状を高い能率で加工できる加工技術として、塑性加工を応用した Micro Form Rolling 法（以下、MFR 法）を提案し、MFR 法を実現するために必要な要素技術の開発を行うとともに、形成した 3 次元微細形状による摩擦低減効果の実証を行った。

まず、塑性加工を応用した MFR 法による 3 次元微細形状の加工を実現するために、インデンテーション法を用いて 3 次元微細塑性加工メカニズムの検討を行い、工具形状や加工条件が加工される 3 次元微細形状の加工形状に与える影響を明らかにした。また、これらの結果から 3 次元微細塑性加工メカニズムの検討を行い、3 次元微細形状の端面角度は工具押付け角度を変えてほとんど変化しないが、工具稜部の半径の大きさに反比例して低下することから、本実験での加工条件の範囲では 3 次元微細形状の端面部は工具端面と被加工物との接触ではなく、工具稜部と被加工物との接触によって形成されることがわかった。

続けて、弾塑性変形シミュレーションを用いて、さらに詳細な 3 次元微細塑性加工メカニズムの解析を行った。解析では非対称三角形形状の工具を被加工物に垂直に押付けて 3 次元微細形状を加工する加工状態について計算を行い、3 次元微細加工現象の検討を行った。その結果、工具形状が加工される 3 次元微細形状の加工形状に与える影響および加工時に工具内部に働く応力に与える影響を明らかにした。また、MFR 法用ローラ工具の長寿命化を実現するために、これらの結果を基に加工形状に大きな影響を与えるに、加工時に工具内部に働く応力を低減できる工具形状の検討を行った。その結果、工具外周部の全ての端面に適切な勾配を設けることで、加工される 3 次元微細形状の加工形状に大きな影響を与えるに、加工時に工具内部に発生する応力を大幅に低減できることを明らかにした。

さらに、本研究で提案している MFR 法においてキー技術の一つとなるローラ工具の加工技術について検討を行った。ローラ工具の材料として超微粒超硬合金を用い、ローラ工具の加工を行う

ために不可欠なマイクロメートルオーダーの微細な溝加工を行うための研削加工技術の開発を行った。その結果、新たに開発した超硬合金ボンドの砥石を用いることで、研削加工時の加工力による被加工物の破損などを起こさずに、実用的な工具寿命を達成できる加工技術を開発することができた。

上記の結果を基に、MFR 加工装置およびローラ工具を製作し、焼入れ鋼への 3 次元微細形状の加工実験を行い MFR 法による 3 次元微細形状の加工の検討を行った。その結果、製作した MFR 加工装置およびローラ工具によって 3 次元微細形状の高能率加工を実現できた。また、上記の弾塑性変形シミュレーションの結果を基に、加工時に工具に発生する応力を低減できる長寿命ローラ工具の設計、製作を行い、その効果の検証を行った。その結果、新たに設計したローラ工具は従来のローラ工具に対して 4 倍以上の実用的な耐久性を有していることが確認できた。

最後に、3 次元微細形状による摩擦低減効果を実証するために、3 次元微細形状を加工した試験片の摩擦特性の評価を行った。3 次元微細形状およびお椀状の断面形状を持つ微細形状を加工した試験片を製作し、内接 2 円筒試験および往復摺動試験によって、摩擦特性の評価を行った。その結果、どちらの試験においても 3 次元微細形状の方が、お椀状の断面形状を持った微細形状に対して、より高い摩擦低減効果があることがわかった。本研究により、油潤滑下での摺動部に 3 次元微細形状による摩擦低減技術を適用することによって、自動車などの産業機械の高効率化が促進されるものと期待される。

論文審査の結果の要旨

本論文は、自動車などの産業機械の高効率化に繋がるマイクロメートルオーダーの微細形状を利用した摩擦低減技術に関するものである。特に摺動方向前方の端部の勾配が大きな微細形状（以下、3 次元微細形状）による摩擦低減技術に着目したものである。従来、マイクロメートルオーダーの微細形状を加工するために、切削加工やレーザー加工などの様々な加工法が適用されてきたが、加工能率が低く、生産コストも高いため、自動車など大量生産される一般的な産業機械への適用が困難であった。また、加工する微細形状の断面形状の制御が困難であり、3 次元微細形状を適用した摩擦低減の実証例は皆無であった。本論文では、塑性加工を応用した微細形状加工法である Micro Form Rolling 法（以下、MFR 法）を開発することで、3 次元微細形状を高硬度焼入れ鋼に高能率で加工できる加工法を実現した。このことから、3 次元微細形状を用いた摩擦低減技術の自動車などの一般的な産業機械への適用に道筋を示すことができたと考えられる。

MFR 法では 3 次元微細形状の形成は材料の微細塑性変形によって行われる。この微細塑性変形現象を、球形状、円錐形状、三角錐形状などの単純な形状の押込みによる現象ではなく、直角三角形のような非対象で複雑な形状の押込みによる現象について検討した事例はなく興味深い。また、3 次元微細形状による摩擦低減効果は計算では推測されているものの、実証された例はなく、摩擦低減技術に関して新たな道を示すことができたと考えられる。さらに、高硬度焼入れ鋼に高能率で 3 次元微細形状を加工できる加工法を開発した点は、自動車などの産業機械への適用の道を切り拓く成果であり、産業への波及効果も大きいため工業的にも大きな価値があると認められる。

このように、本論文によって自動車などの産業機械を高効率化するための 3 次元微細形状による摩擦低減技術に関する基盤技術を開発できたことは、材料単体での機能を上回る表面機能を、

表面微細構造によって付与できることを意味しており、産業機械の究極の効率を目指した新たな技術になるものと期待できる。

本論文の内容は、以下の4報の学術誌として公表済みまたは掲載決定済みであり、これら4報すべては申請者を筆頭著者とするものである。

- (1) Yoshitaka Uehara, Minoru Ota, and Toshikazu Nanbu, “Analysis of 3 Dimensional Micro Plastic Deformation Phenomenon Using Indentation Method”, International Journal of Automation Technology, Vol.6 No.6, (2012) pp.742-748.
- (2) 上原義貴, 太田稔, 南部俊和, “3次元微細塑性加工メカニズムの解析”, 砥粒加工学会誌, VOL.57, No.3, (2013) pp.162-167.
- (3) 上原義貴, 太田稔, 南部俊和, “マイクロフォームローリングによる3次元微細塑性加工技術の研究”, 砥粒加工学会誌, VOL.57, No.12 (2013) pp.796-799.
- (4) 上原義貴, 南部俊和, 肥塚洋輔, 中山達臣, 太田稔, “内接2円筒試験および往復摺動試験における微細形状による摩擦低減”, 精密工学会誌 (掲載決定日: 平成27年10月29日).