

令和 4 年 5 月 25 日現在

機関番号：53401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04160

研究課題名(和文) 表面超強加工による高機能ナノ組織表層の創出とトライボロジー特性の向上

研究課題名(英文) Tribological properties of ultra-fine grained materials produced by surface severe plastic deformation

研究代表者

加藤 寛敬 (Kato, Hirotaka)

福井工業高等専門学校・機械工学科・教授

研究者番号：30311020

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：摩擦の影響を受けた材料表面には、ひずみ勾配をもつ巨大塑性ひずみによりナノ組織が形成される。したがって、工具を材料表面に押し付けながら相対運動を与える摩擦加工(滑りバニシング)を行えば、材料表面が超微細化・ナノ組織化して硬度が上昇し耐摩耗性が飛躍的に向上する。本研究では、加工前の表面性状と滑りバニシング加工条件が、加工後の表面性状と生成した表層組織・硬さに及ぼす影響を調査して、平滑化と高硬度化の両立を実現する最適な加工条件を明らかにし、さらに加工面のトライボロジー特性を評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

極めて大きな塑性ひずみを与える超強加工により作製可能となったナノ/サブミクロン微細結晶粒材料は、合金元素に頼らずに高強度であるため次世代の構造材料として注目されている。とくに本研究で提案した滑りバニシングは、材料表面が超微細化・ナノ組織化して硬度が上昇し、耐摩耗性が飛躍的に向上する。したがって、本研究で得られた、平滑化と高硬度化の両方を満足する最適な加工条件や加工前の表面性状が及ぼす影響に関する知見、さらにはその加工面の優れた摩擦摩耗特性に関する研究成果は、微細組織構造材料をトライボロジー分野に応用展開する上で大きな意義がある。

研究成果の概要(英文)：Sliding burnishing process is a surface severe plastic deformation technique, in which the surface of the workpiece is subject to compressing and rubbing by the application of a ball as a tool. This process provides many advantages; burnishing generates a smooth surface by plastic deformation of surface irregularities without removal of material from the surface, and increases the surface hardness of the workpiece due to the microstructural evolution such as grain refinement, which in turn improves the wear resistance.

In the present study, the effects of burnishing process parameters such as force and speed on the surface roughness, microstructure and hardness of carbon steel were investigated. Also the present work was carried out to investigate effects of initial turned surface roughness on the burnished surface roughness and hardness. In addition the sliding wear properties of the burnished surface layers were studied using a ball-on-disk friction method.

研究分野：微細組織金属材料のトライボロジー

キーワード：トライボロジー 超強加工 滑りバニシング 微細結晶粒材料 耐摩耗性

1. 研究開始当初の背景

金属材料の結晶粒が微細化すると、転位の運動が結晶粒界で妨げられ強度が増すことが一般に知られている。したがって、対数相当ひずみ 5 以上の極めて大きな塑性ひずみを与える超強加工または巨大ひずみ加工 (Severe Plastic Deformation : SPD) により作製可能になったナノ/サブミクロン微細結晶粒材料は、合金元素を添加せずに高強度化・高硬度化が可能という新しい発想に基づいた画期的材料であるために、希少資源・リサイクルの観点から次世代の構造材料候補として注目を集めている [1]。SPD は、高圧ねじり加工などバルク材を対象にしたバルク SPD と、ショットピーニングなど材料表面を対象にした表面 SPD に分けられる [2]。バルク SPD では、導入ひずみ量を多くしても結晶粒微細化現象が飽和してしまうことが知られており、結晶粒サイズが 0.2~0.3 μm までの微細化が限界である [3]。一方、表面 SPD では、ひずみ勾配をもつ巨大塑性ひずみによりナノ組織化が可能で、高面圧摺動部や切削・研削加工、摩擦摩耗など摩擦の影響を受けた材料表面には、バルク SPD では達成できない 20~50 nm のナノ結晶微細組織が形成されることから、摩擦加工も表面 SPD の一種であると言える。

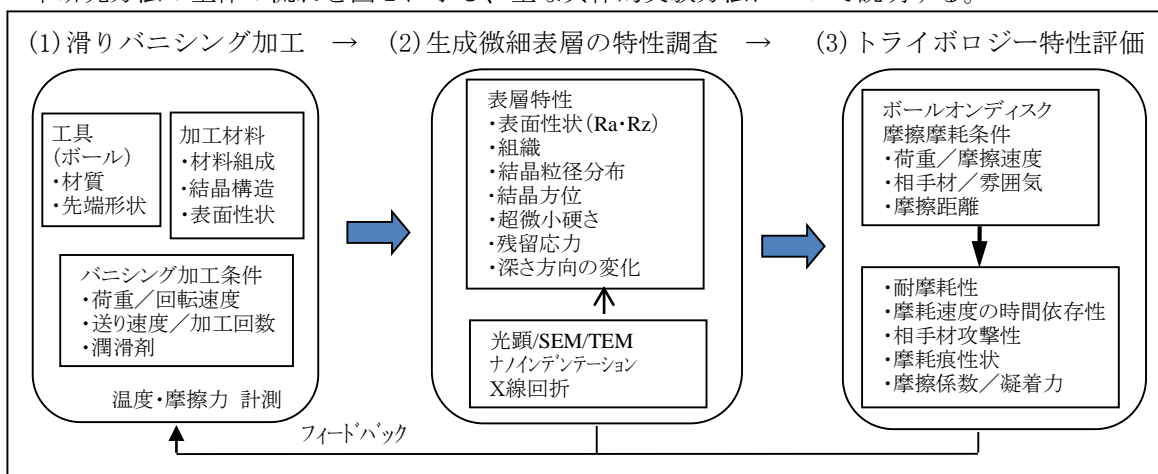
ところで、ボールやローラなどの回転可能な工具を材料表面で転がして塑性変形を与え、表面を滑らかに仕上げる転がりバニシング加工がある [4]。ここで発想を転換して、工具に回転運動を与えずに材料表面を押し付けながら相対運動を与える摩擦加工 (滑りバニシング (Sliding-Burnishing: SB) を行えば、摩擦による大きな塑性ひずみにより材料表面が超微細化・ナノ組織化して硬度が上昇し、耐摩耗性が飛躍的に向上すると考えられ、トライボロジー分野への応用が期待される。しかしながら、この SB 加工では、表面平滑化と結晶粒微細化はトレードオフの関係にあると推測され、表面平滑化と高硬度化の両立が可能かどうか、またこの加工により実際にトライボロジー特性が向上するかどうかは不明である。

2. 研究の目的

本研究では、(1)大きな摩擦ひずみの導入が可能な SB 加工において、加工前の表面粗さと SB 加工条件が加工後の表面性状と表層組織・硬さに及ぼす影響を調査して、平滑化と高硬度化の両立を可能にする最適な加工条件を明らかにすること、(2)SB 加工した表面の摩擦摩耗試験によりトライボロジー特性を評価し、低摩擦・低摩耗を実現する高機能表層を創出すること、を目的とした。

3. 研究の方法

本研究方法の全体の流れを図 1 に示し、主な具体的実験方法について説明する。



(1)滑りバニシング (SB) 加工

図 2 に、今回提案した SB 加工方法の概略図を示す。SB 加工は、自動送り機能付きの汎用旋盤を用いて行った。旋盤の主軸に取り付けたディスク試験片を回転させ、ばねを内蔵させたボール治具を刃物台に固定し、ディスク表面にボールをばね力で押しつけながら送りを与えて加工を行った。SB 加工に用いる試験材料は φ60×t5 mm の炭素鋼 S45C とし、工具であるボール材質には Si₃N₄ (直径 6.35 mm、12.7 mm) を用いた。加工前の表面粗さの影響を見るために、旋削条件 (送り速度 : 0.1~0.51 mm/rev) を変えて粗さの異なるディ

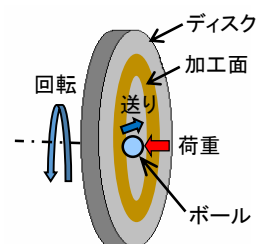


図 2 滑りバニシング (SB) 加工方法の概略図

スク試験片を準備した。加工条件として、押し付け荷重（50～800 N）、回転速度（200～1200 rpm）、ボール送り速度（0.01～0.05 mm/rev）を変化させてSB加工を行い、加工面の粗さや組織・硬さに及ぼす影響を調査した。

(2)生成した微細組織表層の特性調査

SB加工した試験片は、触針式表面粗さ計やデジタル顕微鏡を用いて加工面の表面性状を観察した後、摩擦方向に垂直および平行な断面で切断し、加工表層の光学顕微鏡、FE-SEM（電界放出型走査電子顕微鏡）による微細構造組織観察、および微小ビッカース硬さ試験による深さ方向の硬さ変化測定を行い、試験片の表面性状やSB加工条件が加工面の表面粗さや組織・硬さに及ぼす影響を調査した。

(3)トライボロジー特性評価

SB加工面のトライボロジー特性の評価は、雰囲気制御できるボールオンディスク摩擦摩耗試験機を用いて、摩耗量・摩擦係数・摩耗痕性状などを観察して行った。具体的な試験条件として、相手材ボールの材質は軸受け鋼、超硬合金、摩擦速度は0.5～100 mm/s、試験荷重は0.1～50 N、試験時間は0.2～30分、摩擦雰囲気はArガス中または大気中の条件で行った。

4. 研究成果

(1)バニシング加工面の表面性状

図3(a)に、送り0.41 mm/revの旋削面、図3(b)にその旋削面をSB加工した面のマイクロSCOPE観察画像と表面性状を示す。旋削面の凹凸はSB加工によって塑性変形し平滑化され、飛躍的にRaが低減した。

図4(a)に、ボール直径φ6.35 mmでSB加工した場合の旋削面のRzとSB加工面のRaの関係を示す。押し付け荷重250 Nにおいて、旋削面（SB加工前）のRzが32 μm以下では、SB加工によりRaが約0.2 μmに平滑化された。しかし、旋削面のRzが32 μm以上の場合、SB加工面に旋削痕の凹凸が残りRaは増加した。すなわち、加工前の表面粗さが大きいと旋削面の凹凸がSB加工面に残り、平滑化できるSB加工前の表面粗さには限界値（Rzlim）が存在する（この場合Rzlim = 32 μm）ことがわかった。一方、押し付け荷重500 NではRzlimは48 μmとなり、250 Nと比べて大きくなった。これは高荷重の方がSB加工面における塑性変形の程度が強くなり、凹凸を平滑化しやすいためである。なお、平滑化されたSB加工面の表面粗さは加工前の表面粗さや押し付け荷重の影響を受けないこと、加工前の表面粗さが大きい場合、高荷重の方がSB加工面のRaは低下することがわかった。

図4(b)に、押し付け荷重250 NでSB加工した際の旋削面のRzとSB加工面のRaの関係を示す。ボール直径φ6.35 mmではRzlim = 31 μm、φ12.7 mmではRzlim = 54 μmとなり、ボール直径が大きい方がRzlimは大きくなった。これは、ボール直径を大きくするとヘルツ接触面積が増加し、ディスクの回転に伴う単位面積当たりのボールの接触回数が増加して表面の凹凸を平滑化しやすくなったためと考えられる。

(2)SB加工面の組織と硬さ

図5に、φ6.35 mm、500 NでSB加工した表面近傍の平行断面組織とビッカース硬さ試験結果を示す。断面組織には、SB加工の摩擦力によって摩擦方向に曲げられた塑性流動組織と、非常に細かい超微細組織が

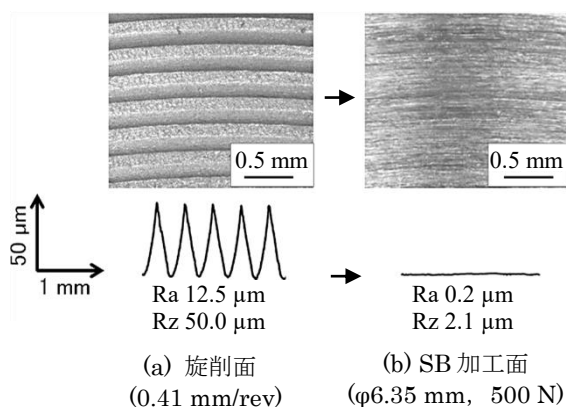


図3 旋削面とSB加工面の表面性状

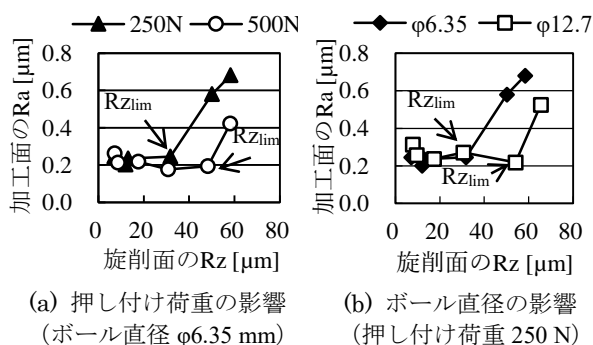


図4 加工条件が加工面のRaに及ぼす影響

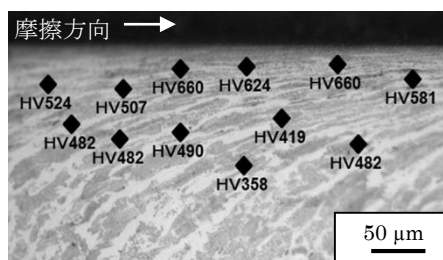


図5 SB加工面の断面組織と硬さ（押し付け荷重500 N、ボール直径φ6.35 mm）

表層に生成し、その組織の硬さは加工前の硬さ (HV250) と比べて大幅に上昇した。

図6に、ボール直径φ12.7 mmでSB加工した面の表面硬さを示す。押し付け荷重250 Nに比べ、500 Nは表面硬さが高くなった。これは、高荷重を用いることでディスク単位面積当たりの摩擦力が大きくなり、材料の塑性歪み量が増加したためと考えられる。また、加工後の表面硬さに加工前の表面粗さは影響しないことが分かった。

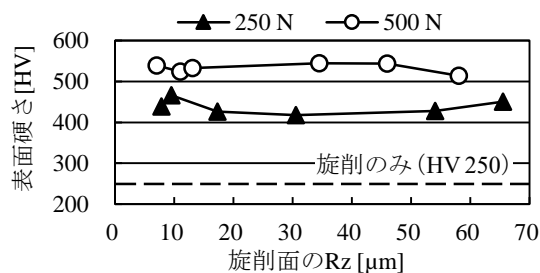


図6 SB加工面の表面硬さ (ボール直径φ12.7 mm)

(3)SB加工面のトライボロジー特性

図7に、旋削面とφ12.7 mmでSB加工した面の摩耗試験における摩耗痕深さを示す。旋削面に比べてSB加工面の摩耗痕深さは最小で1/37以下と非常に小さく、SB加工によって耐摩耗性が飛躍的に向上した。なお、旋削送り0.51 mm/rev、押し付け荷重250 Nのとき、他と比べて摩耗痕深さが大きくなった。これは、このSB加工面には旋削痕の凹凸が残っており、その影響によって摩耗が多くなったと考えられる。すなわち、表面粗さと硬さが優れているSB加工面の耐摩耗性は良くなった。

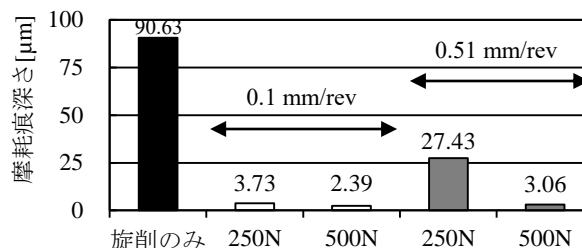


図7 摩耗試験における摩耗深さ (ボール直径φ12.7 mm)

5. まとめ

SB加工によって、材料表面は滑らかになり、硬さと耐摩耗性が向上した。表面粗さでは、ボール直径と押し付け荷重の増大に伴い、平滑化が可能な表面粗さの限界値 Rz_{lim} が大きくなった。硬さは、押し付け荷重を高めることで、材料の塑性歪み量が増加し、表面と断面組織の硬さが向上した。耐摩耗性は、SB加工材の摩耗深さが旋削材に比べて最小で1/37以下と非常に小さくなり、表面粗さと硬さが優れているSB加工面の耐摩耗性は極めて良くなった。

<引用文献>

- [1] 宮本博之：日本機械学会誌、114, 212 (2011).
- [2] Y. Estrin et al.: Acta Mater., 61, 782 (2013).
- [3] S. Descartes et al.: Mater. Sci. Eng., A528, 3666 (2011).
- [4] 岡田ら：塑性と加工、55, 642, 56 (2014).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kato Hiroataka, Yamashita Kouhei, Todaka Yoshikazu	4. 巻 846
2. 論文標題 Wear and Adhesion Properties of High-Pressure Torsion Processed Carbon Steel	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Key Engineering Materials	6. 最初と最後の頁 157 ~ 161
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.4028/www.scientific.net/KEM.846.157	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kato Hiroataka, Yamamoto Keitaro, Yasunaga Kazufumi	4. 巻 841
2. 論文標題 Nano-Crystallization of Steel Surface by Slide-Burnishing	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Key Engineering Materials	6. 最初と最後の頁 48 ~ 53
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.4028/www.scientific.net/KEM.841.48	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kato Hiroataka, Hirokawa Wataru, Todaka Yoshikazu, Yasunaga Kazufumi	4. 巻 12
2. 論文標題 Improvement in Surface Roughness and Hardness for Carbon Steel by Slide Burnishing Process	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Materials Sciences and Applications	6. 最初と最後の頁 171 ~ 181
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.4236/msa.2021.125011	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 1件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 H. Kato and Y. Todaka
2. 発表標題 Wear and Adhesion Properties of Ultra-Fine Grained Metals Produced by Severe Plastic Deformation
3. 学会等名 International Tribology Conference Sendai 2019 (ITC Sendai 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Kato, K. Yamashita and Y. Todaka
2. 発表標題 Wear and Adhesion Properties of High-pressure Torsion Processed Carbon Steel
3. 学会等名 2019 8th International Conference on Engineering and Innovative Materials (ICEIM 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Kato, K. Yamamoto and K. Yasunaga
2. 発表標題 Nano-Crystallization of Steel Surface by Slide-Burnishing
3. 学会等名 The 4th International Conference on Material Engineering and Application (4th ICMEA 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 加藤寛敬
2. 発表標題 微細組織材料の摩耗特性
3. 学会等名 広島市産業振興センター省エネルギー材料研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 加藤寛敬 (監修: 岩井善郎、新田勇)	4. 発行年 2021年
2. 出版社 シーエムシー出版	5. 総ページ数 7
3. 書名 トライボロジーの評価制御応用展開 微細組織材料のトライボロジー特性	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------