

平成21年6月9日現在

研究種目：基盤研究(B)
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19360060
 研究課題名（和文） 切削—摩擦攪拌複合加工による金属表面へのナノ結晶層の
 創成と表面改質
 研究課題名（英文） Formation of Nanocrystalline Structure on the Metal Surface Layer and its
 Enhancement by Cutting-Frictional Stir Burnishing Combined Process
 研究代表者
 笹原 弘之 (SASAHARA HIROYUKI)
 東京農工大学・大学院共生科学技術研究院・准教授
 研究者番号 00205882

研究成果の概要：

優れた形状創成能力を有するエンドミル形状工具による切削加工と同時に、切削面のごく表層を積極的に摩擦攪拌することにより、圧縮残留応力の付与と数十ナノメートルまでの結晶微細化を行い、強度、耐疲労破壊性、耐食性、耐摩耗性に優れた機能表面を創成する新たな加工法の開発に関する研究を行った。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	8,500,000	2,550,000	11,050,000
2008年度	5,800,000	1,740,000	7,540,000
年度			
年度			
年度			
総計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

研究分野：機械加工学

科研費の分科・細目：生産工学・加工学

キーワード：切削，工具，摩擦攪拌バニシング，表面改質，ナノ結晶，耐食性

1. 研究開始当初の背景

航空機用アルミニウム合金製構造部材をはじめとして、ブロック材から5軸制御マシニングセンタなどにより一体削り出しで製作する部品（モノリシック構造部材）が急速に増加しつつある。このような切削加工部品の耐疲労腐食性および耐疲労破壊性を向上させるために、切削加工後にショットピーニングを行うものが少なくない。しかしながら、この作業には、ロケットのエンジン切削加工部材や大型航空機翼内リブなどにみられるような、数メートル長の大型部材が多くなっており、5軸制御マシニングセンタによる複雑な加工形状あるいは深い凹部などショットが届きにくい場合も増加しつつある。ショ

ットピーニングを行うこと自体、工程数の増加になるだけでなく、ショットピーニングによる応力発生に起因した部品の変形が生じるという問題もあり、要求される圧縮残留応力を付与するために必要な最適ショットピーニング条件の設定に時間がかかる、などの問題が顕在化しており、その対応のためのコストが増大し競争力低下の原因となっている。

研究開始当初までに、切削部とは別に加工表面を摩擦攪拌する部分を設けた工具により、圧縮残留応力を生成することが可能であること、加工硬化層が生成することが明らかとなっていた。さらに、申請者らは摩擦攪拌形のバニシング加工を提案し、加工表面の機

械的性質を大きく改善する方法として有望であることを示していた。それらを統合発展し、新しい加工法として確立することが必要であり、同時に金属組織学的にも新しい知見が得られるのではないかとこの発想に至った。

2. 研究の目的

摩擦攪拌形バニシングとは、高速回転するバニシングピンで金属工作物表面を擦過し、大塑性変形を伴う摩擦攪拌を行うことで改質層を得る手法である。加工部では高垂直応力下で金属組織が攪拌されている。本研究では、摩擦攪拌形バニシング加工によって創生される金属組織（改質層）の特徴と、その創成機構を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

(1)表面改質条件

本加工法の加工条件のパラメータとしては、主軸回転速度 $S[\text{min}^{-1}]$ 、送り速度 $F[\text{mm}/\text{min}]$ 、クロスフィード量 $CF[\text{mm}]$ 、工具押込み量 $D[\text{mm}]$ もしくは工具押し込み力 $P[\text{N}]$ 、工具先端半径 $R[\text{mm}]$ がある。

加工に用いる工具を図1に示す。上記実験条件のうち、工具押込み量 D を指定する場合は、位置制御を行う必要があるが、その大きさが 0.1mm 未満と小さいため、安定的に改質層を創成することが困難であった。そこで、新たな工具（図1(c))を開発することにより、工具押し込み力 $P[\text{N}]$ を制御することが可能となった。これにより、安定的な表面改質が可能となった。工具の変更に伴い、研究後半では実験パラメータの工具押し込み量 D を廃止し、代わりに工具押し込み力 $P[\text{N}]$ を導入した。

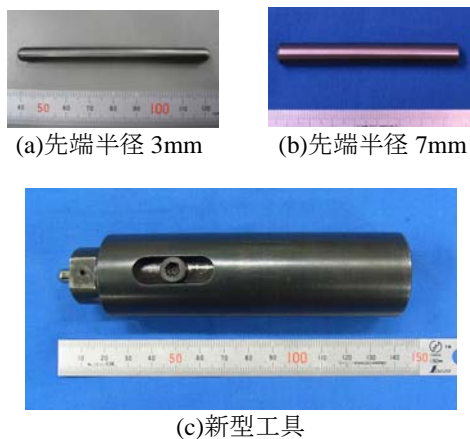


図1 摩擦攪拌形バニシング工具

(2)改質層の機械的特性の評価

創成された改質層の機械的特性は次のような方法で評価した。

- ・コンフォーカル顕微鏡（光学顕微鏡）による改質層断面の金属組織の観察

- ・微小硬さ試験機による硬さ試験
- ・電気化学アナライザによる耐食性試験

また、改質層の創成機構を明らかにするため、上記評価方法に加え、次の測定を行った。

- ・熱電対による加工温度の測定

4. 研究成果

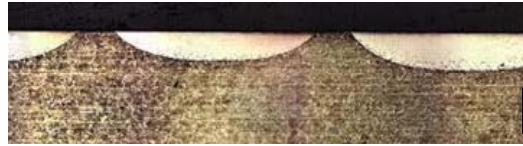
(1)得られる改質層

炭素鋼 S45C に対して、摩擦攪拌形バニシング加工を行ったところ、数種類の改質層が得られることが分かった。図2に、得られた改質層の断面をナイタールエッチングした顕微鏡写真を示す。これらは、主軸回転速度 S と送り速度 F を変えることによって得られたものであり、図2(a)は $S=3300\text{min}^{-1}$ 、 $F=600\text{mm}/\text{min}$ 、(b)は主軸回転速度を高くした $S=10000\text{min}^{-1}$ 、 $F=600\text{mm}/\text{min}$ 、(c)は送り速度を下げた $S=10000\text{min}^{-1}$ 、 $F=200\text{mm}/\text{min}$ という条件で行った。その他の加工条件は同一で、クロスフィード $CF=2\text{mm}$ 、工具押込み量 $D=0.075\text{mm}$ 、工具先端半径 $R=7\text{mm}$ である。図2(a)に示すように、表面近傍に薄い改質層が生成されているのが分かる。同図(b)からは、 $200\mu\text{m}$ 程度の比較的均一な白い改質層が生成しているのが分かる。同図(c)からは、 $600\mu\text{m}$ 程度の厚い層が生成しているのが分かり、マルテンサイトのような針状の組織が確認できる。

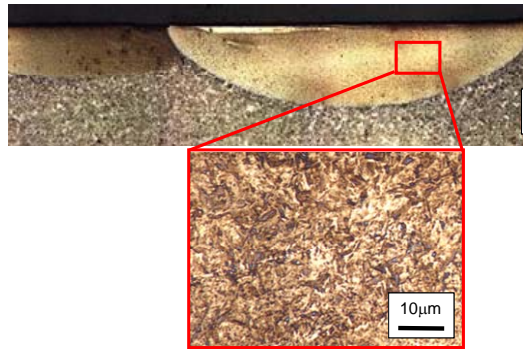
図3に、これらの改質層の硬さを深さ方向に測定した結果を示す。送り速度が等しい場合、主軸回転速度が低い条件の方が、金属表面へ与えられる仕事量が少なく、摩擦による温度上昇も小さいと考えられる。また、主軸回転速度が等しい場合、送り速度が低い方が金属表面へ与えられる仕事量が多く、摩擦による温度上昇も大きいと考えられる。硬質層が得られた要因として、マルテンサイト変態、加工硬化、結晶粒微細化が候補に挙げられる。本加工法は、大塑性ひずみと摩擦とによる局所加熱することが可能であり、その被加熱範囲に比べて試験片の大きさが大きいので、工具通過後直ちに温度は低下すると考えられる。したがって、加工時の温度が A_3 変態点以上の高温となれば、本加工法によってマルテンサイト変態しうると考えられる。一方、加工時の温度が高いと転位の蓄積が困難となるため、加工硬化や結晶粒微細化に対しては不利な状態になると考えられる。ここで比べた3条件の中では、得られた組織や硬度から、 $S=10000\text{min}^{-1}$ 、 $F=200\text{mm}/\text{min}$ マルテンサイト組織である可能性が高いと考えられる。その他の条件においては、加工硬化や結晶粒微細化が関わっている可能性があると考えられる。



(a) $S=3300\text{min}^{-1}$, $F=600\text{mm/min}$



(b) $S=10000\text{min}^{-1}$, $F=600\text{mm/min}$



(c) $S=10000\text{min}^{-1}$, $F=200\text{mm/min}$

図2 改質層断面顕微鏡写真
($CF=2\text{mm}$, $D=0.075\text{mm}$, $R=7\text{mm}$)

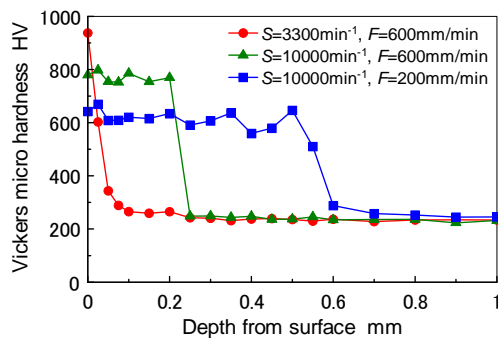
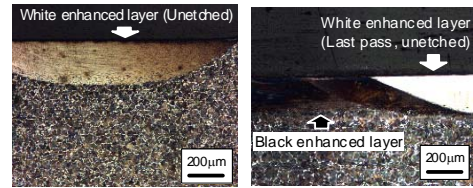


図3 改質層の深さ方向の硬さ分布
($CF=2\text{mm}$, $D=0.075\text{mm}$, $R=7\text{mm}$)

また、図2(b)に示したような白い改質層は、図4(a)に示す $S=10000\text{min}^{-1}$, $F=200\text{mm/min}$, $CF=2\text{mm}$, $D=0.075\text{mm}$, $R=3\text{mm}$ という加工条件においても得られた。そして、この加工条件のうち、クロスフィードのみを $CF=0.3\text{mm}$ と小さくすると、図4(b)に示すように最後のパスで加工した部分のみがエッチング後に白く、他は黒く見られた。図5に示す改質層の深さ方向の硬さ分布からは、黒く変質することで硬度も低くなることが分かる。この条件では1回の加工パスによって得られる改質層の幅に比べて、クロスフィード量が小さいために、既に加工された部分に後続のパスが重複する。既加工部は後続パス

で再び摩擦攪拌される部分と、摩擦攪拌はされないが後続パスからの熱伝導により温度上昇する部分がある。黒い改質層は、白い改質層が後続加工時の温度上昇により焼き戻しのような状態となったものと考えられる。



(a) $CF=2\text{mm}$ (b) $CF=0.3\text{mm}$

図4 改質層断面顕微鏡写真
($S=10000\text{min}^{-1}$, $F=200\text{mm/min}$,
 $D=0.075\text{mm}$, $R=3\text{mm}$)

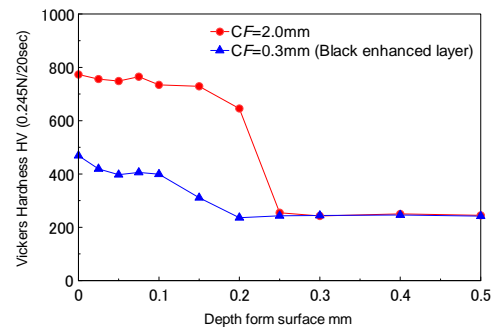


図5 改質層の深さ方向の硬さ分布
($S=10000\text{mm}$, $F=200\text{mm}$,
 $D=0.075\text{mm}$, $R=3\text{mm}$)

硬度が高く、層の厚さも比較的大きい図2(b)や図4(a)に示すような白い改質層について、電気化学アナライザを用いて耐食性試験を行った。得られたターフェルプロットを図6に示す。白い改質層と母材の腐食電流を比べると、ほとんど差がないため、腐食が起きる条件下においては、その腐食速度は同程度であることがわかる。しかし、腐食電位が高くなっていることから、腐食が起きるか起らないかという熱力学的な安定性については、向上していると考えられる。

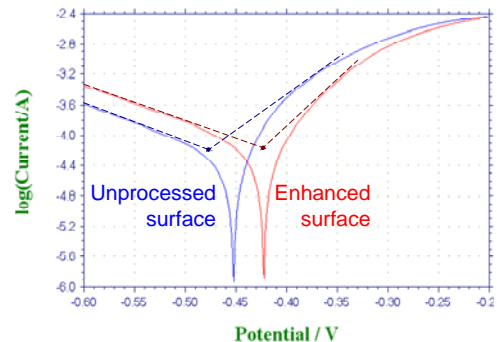


図6 ターフェルプロット

(2)改質機構の推定

①SUS304 の加工

炭素鋼 S45C への加工により得られた白い硬質層は、前述の通り再加熱により焼戻され、硬度が低下することから、改質層の硬度が大きく上昇する要因としては熱変態が寄与している可能性が高いということが分かった。ここでは、焼入れ硬化性を示さないオーステナイト系ステンレス SUS304 を加工し、摩擦攪拌形パニングが試験片表面へ与える熱変態以外の影響を抽出・考察することとした。安定的に改質層を創成できる新型工具を用い、 $S=10000\text{min}^{-1}$, $F=200\text{mm/min}$, $CF=0.3\text{mm}$, $R=3\text{mm}$ という条件で加工を行った。押込み力 P は 750N と 500N の 2通りとした。

図 7 に、それぞれの条件で加工を施したものの断面の組織写真を示す。いずれも黒い縞模様が見られる。また、改質部は母材に比べて色が濃く見え、改質部と非改質部の境界が確認できる。拡大図を見ると、色が濃く見える部分は、粒界部分の占める割合が大きくなっていることが分かる。

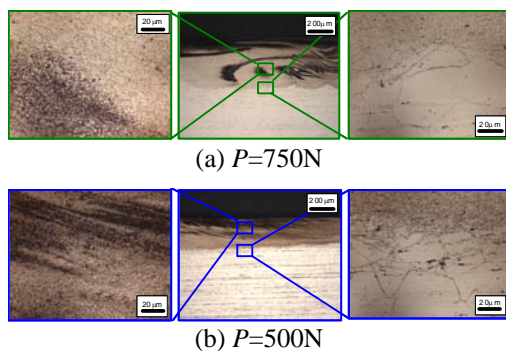


図 7 改質層断面顕微鏡写真
($S=10000\text{min}^{-1}$, $F=200\text{mm/min}$,
 $CF=0.3\text{mm}$, $R=3\text{mm}$)

図 8 に示した深さ方向に計測したマイクロビッカース硬度の分布を見ると、S45C ほど高い硬度は得られていないが、表面近傍の硬度が高くなっているのがわかる。特に $P=500\text{N}$ の条件の方が硬度上昇が著しい。

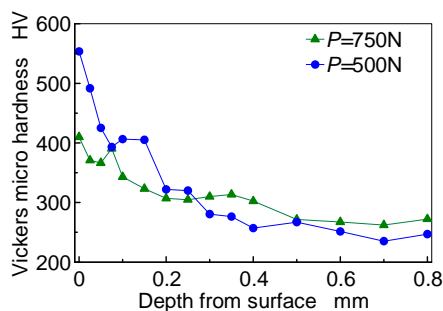


図 8 改質層の深さ方向の硬度分布
($S=10000\text{min}^{-1}$, $F=200\text{mm/min}$,
 $CF=0.3\text{mm}$, $R=3\text{mm}$)

加工によって硬度上昇したのは S45C の場合と同様に、動的再結晶による結晶粒微細化が起きたためである可能性がある。また、一般的には焼入れ硬化性を示さない SUS304 ではあるが、その組織はオーステナイト相であるがゆえ、摩擦攪拌によって加工面に引張応力が作用すれば M_s 点が上昇し、マルテンサイト変態する可能性がある。この加工誘起変態が硬化の原因である可能性も考えられる。

ところで、動的再結晶粒径は、低温でひずみ速度が高い条件下で加工される程小さくなる。また、オーステナイトを加工中に M_s 点が上昇したとしても、摩擦熱により加工時の温度が M_s 点よりも高くなる場合にはこの加工誘起変態も起こらないと考えられる。したがって、結晶粒微細化の度合いと加工誘起変態の有無は、いずれも加工時の温度に左右される。加工中に発生する摩擦熱は押込み力の小さい $P=500\text{N}$ の条件の方が少なかったと考えられ、これが $P=500\text{N}$ の条件の方が硬化が著しくなった要因であると考えられる。

②S45C への加工時の温度測定と組織変化

新型工具を用い、 $S=10000\text{min}^{-1}$, $F=200\text{mm/min}$, $CF=0.3\text{mm}$, $R=3\text{mm}$ という条件で加工を行った。押込み力 P は 750N と 500N の 2通りとした。10 パス加工を行い、このときの加工温度を同時に測定した。図 9 に得られた改質層の断面の顕微鏡写真を示す。図 10 には改質層の硬さを、層の幅方向に測定した結果を示す。 $P=750\text{N}$ とした際に得られた改質層は、最後のパスのみが白く、他が黒く変質しており、図 4(b) に示すものに良く似ている。図 10(a) の硬さの分布を見ると、場所によってばらつきがあるが、黒い部分は概して白い部分よりも硬度が下がっていることが分かる。一方、図 9(b) に示す $P=500\text{N}$ の場合に得られた改質層は、 $P=750\text{N}$ の場合と比べて改質層の厚さが薄いが見た目には均一な層が広がっている。図 10(b) の硬さの分布を見ると、 $P=750\text{N}$ の場合とは対照的に、加工パスが重複する $x=1\sim 2\text{mm}$ の部分において、1000HV 前後と非常に硬度の高い部分が存在するのがわかる。

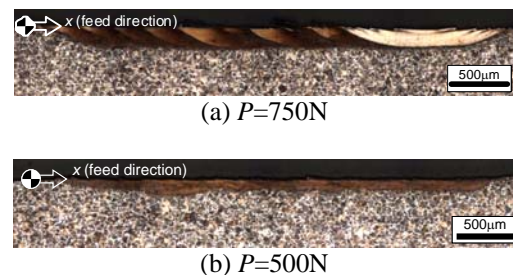


図 9 改質層断面顕微鏡写真
($S=10000\text{min}^{-1}$, $F=200\text{mm/min}$,
 $CF=0.3\text{mm}$, $R=3\text{mm}$)

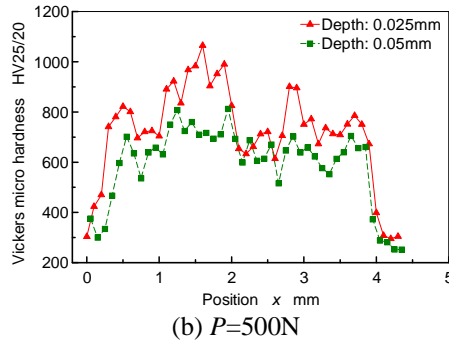
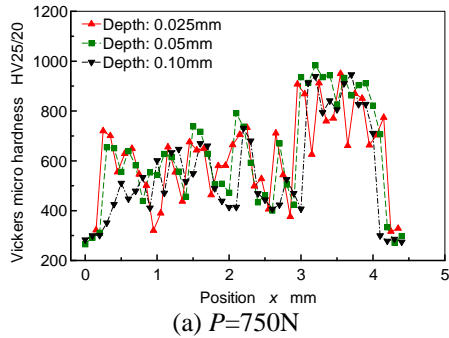


図 10 改質層の幅方向の硬さ分布
($S=10000\text{min}^{-1}$, $F=200\text{mm/min}$,
 $CF=0.3\text{mm}$, $R=3\text{mm}$)

図 11 に加工温度の測定結果を示す。この測定は、工具（超硬）と工作物（S45C）を熱電対とする工具—工作物熱電対法により行った。図 11 から、 $P=750\text{N}$ の場合には加工温度は概ね S45C の A_3 変態点である 780°C を超えていることが読み取れる。一方、 $P=500\text{N}$ の場合は加工温度は $500^\circ\text{C}\sim 600^\circ\text{C}$ 程度にとどまっている。

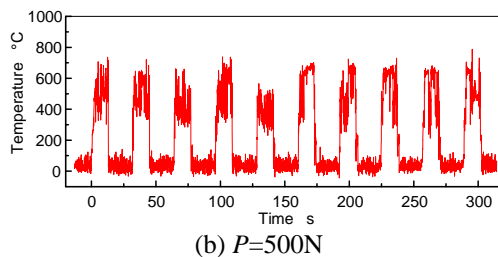
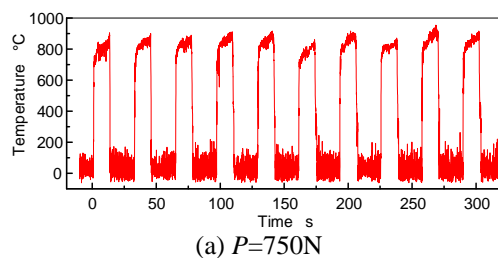


図 11 加工温度
($S=10000\text{min}^{-1}$, $F=200\text{mm/min}$,
 $CF=0.3\text{mm}$, $R=3\text{mm}$)

$P=750\text{N}$ にて加工したときの加工温度が概ね A_3 変態点を超えていることや、改質層に再び熱が加わると硬度が下がることから、この条件にて創成された改質層の改質機構の一つとしてマルテンサイト変態があると考えられる。そして、通常の焼入れ材よりも高硬度な層が得られていることから、マルテンサイト変態に加えて結晶粒微細化と加工硬化が同時に作用していると考えられる。図 2(b)や図 4 に示した改質層についても同様の改質機構だと考えられる。

$P=500\text{N}$ にて加工した際は、加工温度が A_3 変態点に満たないことや、既加工部に後続のパスからの伝熱による改質層の変質が見られないことから、マルテンサイト変態は起きていない可能性があると考えられる。また、パスが重なった部分の硬度が高くなっていることから、硬質層が得られた主な要因は加工硬化や結晶粒微細化であると考えられる。図 2(a)に見られた高硬度層の改質機構も、ここで得られた改質層の改質機構に近いと考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Hiroyuki Sasahara, Satoshi Kiuchi, Tomohiko Yata, Hiroyuki Murase, Keisuke Tominaga, Generation of Surface Hardened Layer on 0.45%C Steel by Frictional Stir Burnishing, Proc. GCOMM 2008, 査読有, (2008) CD – ROM #123.
- ② 笹原弘之, 圧縮残留応力および表面硬化層を付与する複合切削工具, 型技術, 査読無, 22, 13 (2007) pp.72-75.

[学会発表] (計 3 件)

- ① 木内智, 笹原弘之, 鉄鋼材料への摩擦攪拌形バニシング加工による表面強化 ～ S45C および SUS304 の比較～, 日本機械学会 第 7 回生産加工・工作機械部門講演会, 2008 年 11 月 21 日, 岐阜.
- ② 木内智, 笹原弘之, 摩擦攪拌形バニシングによる改質層の特性に及ぼす要因, 2008 年度精密工学会秋大会学術講演会, 2008 年 3 月 17 日, 川崎.
- ③ 笹原弘之, 矢田智彦, 富永啓介, 木内智, 摩擦攪拌形バニシング工具による表面改質 (第 3 報) —改質層の特性・組織に及ぼす加工条件の影響—, 2007 年度精密工

学会秋大会学術講演会, 2007年9月12日,
旭川.

[その他]

<http://www.tuat.ac.jp/~saslab/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

笹原 弘之 (SASAHARA HIROYUKI)

東京農工大学・大学院共生科学技術研究
院・准教授

研究者番号：00205882

(2) 研究分担者

堤 正臣 (TSUTSUMI MASAOMI)

東京農工大学・大学院共生科学技術研究
院・教授

研究者番号：90108217

佐藤 隆太 (RYUTA SATO)

東京農工大学・大学院共生科学技術研究
院・助教

研究者番号：60376861

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

木内 智 (KIUCHI SATOSHI)

東京農工大学・大学院生物システム応用科
学府・博士前期課程