

低圧高精度ショットピーニングによる 鋼の表面高機能化技術の開発

大同大学 機械システム工学科
教授 吉田 昌史
(2021 年度 一般研究開発助成 AF-2021020-B3)

キーワード：ショットピーニング，表面高機能化，微粒子，埋め込み

1. 研究背景

表面塑性加工であるショットピーニングはばね、歯車などの繰り返し荷重を受ける機械部品には必ず必要となる表面改質法である¹⁾。近年では微粒子を用いた噴射加工（微粒子ピーニング）が開発され、摩擦係数の低下、耐摩耗性や耐衝撃性の向上などの特性を機械部品に付与することが可能となっている²⁾。ショットピーニングによる表面形状制御技術が注目されており、機械部品のみならず金型にも適用されている³⁾。しかし、ショットピーニングは表面粗さを悪化させ、大きな凹部および亀裂生成などにより、被加工材のぜい化をもたらすことが問題とされている³⁾。また、対象部材の表面に高い衝撃荷重を加えることで表面を改質することから、微小部品に適用することは困難である。さらに、ショットピーニングによる表面高機能化のこれまでの試みは、表面形状制御による新規特性付与であり、これ以外のアプローチはほとんどない。諸特性の飛躍的な向上、新規特性の発現、複数の特性を同時に発現させ、微小部品にも適用させるためには、これまでにない斬新な方法を開発する必要がある。無欠陥表面を維持した状態で、新規な特性を微小部品表面に付与する技術が求められている。また、新材料は日々開発され難加工が進むとともに、成形品も複雑化している。金型に新規な表面機能を付与することも非常に重要である。

2. 研究目的

球状粒子と機能性粉末を混合した複合投射材を用いて、低圧ショットピーニングを鋼に適用する。任意の機能性粉末を表面に埋め込む技術を確立し、高機能化表面を有する鋼を開発することが本研究の目的である。

3. 実験方法

3.1 噴射加工装置

噴射加工機は秋山産業社製の汎用加工機（APM-2）であり、図1に示すような吸引式のものを使用した。ノズル材質は超硬であり、内径 $\phi 1.2$ mm のものを用いた。

3.2 投射材および投射条件

投射材には #180 のガラスビーズと埋め込み粉末の混合粉末を用いた。埋め込み粉末には、予備実験では平均粒径 $1\ \mu\text{m}$ の Fe_3O_4 粉末を用いた。 Fe_3O_4 粉末は黒色であり、外観観察で粒子埋込の有無や均一性を把握できるため

ある。本実験では平均粒径 $1\ \mu\text{m}$ と $50\ \mu\text{m}$ の TiN 粉末の混合粉末をそれぞれ用いた。なお、ガラスビーズ (GB) と埋め込み粉末の混合率 (埋め込み粉末/GB) は 0.75% とした。

投射距離 $30\ \text{mm}$ 、入射角 0° とし、投射圧力 $0.1\ \text{MPa}$ ~ $0.4\ \text{MPa}$ 、投射時間 $10\ \text{s}$ ~ $60\ \text{s}$ に変化させた。

3.3 被加工材

被加工材には機械構造用炭素鋼 (S45C) を用いた。形状は $\phi 15 \sim \phi 25\text{mm} \times 3\ \text{mm}$ とした。なお、被加工材の丸棒を所定の厚さに切断した後、切断面を #1500 のエメリー紙で湿式研磨した。その後、 $1\ \mu\text{m}$ のアルミナ懸濁液でバフ研磨およびアセトン洗浄を行った。本実験では、この研磨面を被加工面とした。

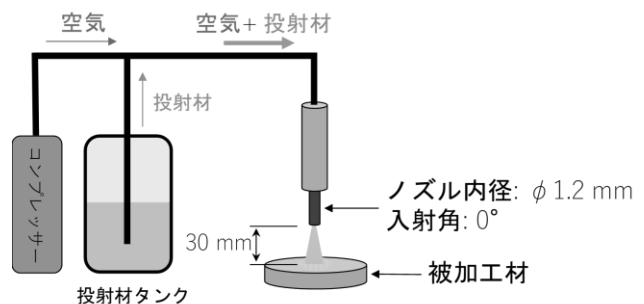


図1 噴射加工装置

4. 実験結果および考察

4.1 予備実験

基礎試験として投射材に粒径 $1\ \mu\text{m}$ の Fe_3O_4 粉末と粒径 $100\ \mu\text{m}$ のガラスビーズの混合粉末を用いて、鋼表面に加工を行い、被加工材表面への微粉末の埋込を試みた。投射圧力 $0.1\ \text{MPa}$ とし、表面色が黒色化するまで投射距離と入射角を変化させながら加工を行った。図2が加工後の表面であり、加工前は鏡面であったのに対して、加工後は黒色化していることが分かる。図3は加工後の断面組織を観察した結果であり、被加工材表面には $1\ \mu\text{m}$ 以下の微粒子が分散した粒子埋没層が確認された。粒子埋没層の厚さは約 $1\ \mu\text{m}$ であった。

4.2 TiN 粒子の埋め込み

4.2.1 投射圧力の影響

図4は平均粒径 $50\ \mu\text{m}$ の TiN 粒子を用いて $30\ \text{s}$ 間加工を行った後の被加工材の表面である。いずれの投射圧力においても被加工材の加工面は TiN 粉末の黄土色と同じ色

に変化した。図5は加工面の成分分析結果を示している。加工面にはTiが分布していることから、図4の加工面においては、TiN微粒子が付着あるいは埋没したものと考えられる。なお、加工後の被加工材を超音波洗浄したり、加工面に対して爪で引掻いたりしたが、加工面に付着・埋没した粒子が剥がれたりすることはなかった。

図4の圧力の変化による加工面の違いについて見ると、圧力の増加とともに、加工部中心部においては粒子付着が認められない領域が増加した。投射圧力が低い方が加工面に対して均一な粒子付着・埋没になると考えられる。

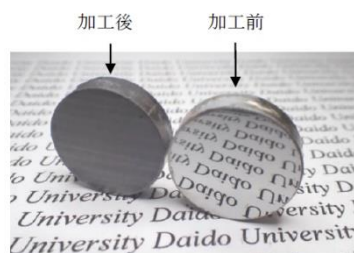


図2 Fe₃O₄粉末で加工した後の表面

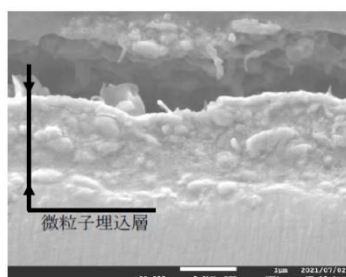


図3 Fe₃O₄粉末で加工した後の断面組織

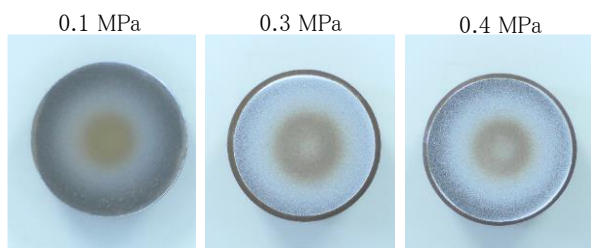


図4 各投射圧によりTiN粒子で加工した後の表面

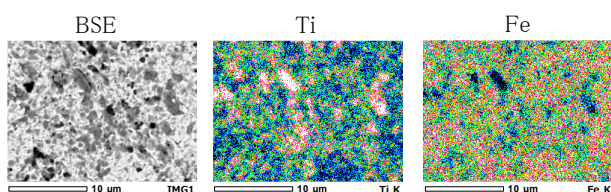


図5 TiN粉末で加工した後の被加工材表面の成分分析

4.2.2 投射時間の影響

図6は0.1 MPaの投射圧力で各投射時間加工を行った後の被加工材表面である。投射時間の増加にともない、加工範囲は増加した。図7は加工後の被加工材を切断し、断面を研磨した後、粒子埋没層深さを測定した結果である。投射時間の増加とともに、粒子埋没層深さは増加するが、

30 s以上では深さの増加は認められなかった。粒子埋没層深さは約1 μm程度であった。

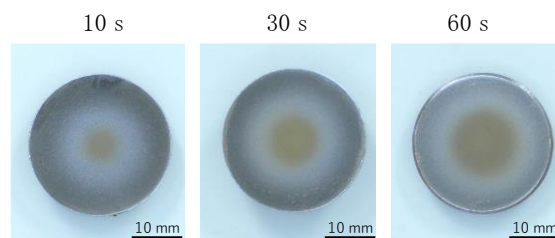


図6 各投射時間によりTiN粒子で加工した後の表面

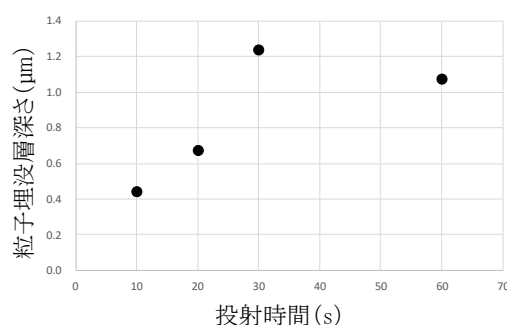


図7 粒子埋没層深さと投射時間の関係

4.2.3 断面組織観察

図8には投射圧力0.1 MPa、投射時間60 sで加工した後の被加工材の断面組織であり、反射電子像写真となっている。表層には1 μm以下の微粒子が存在している。図9の成分分析の結果を見ると、表層の微粒子からはTiとともにFeが確認された。このことから、被加工材表面の微粒子はTiNであり、TiN微粒子は被加工材表層に埋没している可能性がある。なお、平均粒径1 μmのTiN粒子を用いて同様の実験を行ったが、平均粒径50 μmのときと断面組織および加工面の外観に大きな違いは認められなかった。

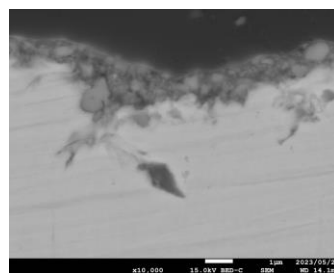


図8 TiN粉末で加工した後の断面組織

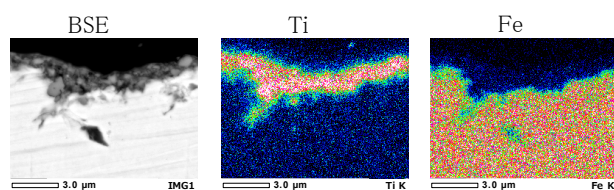


図9 TiN粉末で加工した後の被加工材断面の成分分析

4.2.4 表面評価

図 10 は加工後の被加工材表面を触針式表面粗さ計により表面粗さを測定した結果である。加工前の R_a 0.015 μm , R_z 0.136 μm であったのに対して、加工後は R_a 0.298, R_z 2.832 と粗さが約 10 倍増加した。

図 11 は加工後の表面に対してマイクロビッカース硬さ試験を行った結果であり、硬さと押し込み負荷荷重との関係となっている。加工前は押し込み負荷荷重によらず約 200 HV でほぼ一定であった。これに対して、加工後の硬さはいずれの負荷荷重においても増加した。また、負荷荷重により硬さが増加し、押し込み負荷荷重が小さい場合の硬さは約 400 HV~500 HV の値を示し、押し込み負荷荷重が 0.5 N 以上のときは約 300 HV であった。これらの硬さの増加は、TiN 粉末が表層に埋没していたこと、ガラスビーズの衝突により被加工材表層が加工硬化したことが主な原因と考えられる。押し込み負荷荷重が小さい場合の硬さの増加は、TiN 粉末の埋没による影響が大きく表れたものと考え、微粒子埋没により表面硬さの向上が得られることが分かった。

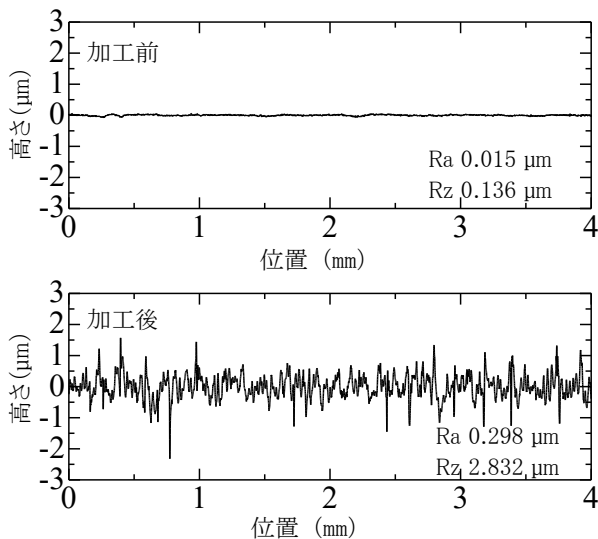


図 10 TiN 粉末で加工した加工面の表面粗さ結果

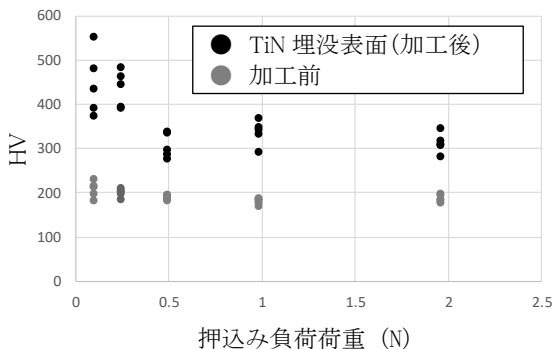


図 11 押し込み荷重と硬さの関係

図 12 は加工前後の加工面の X 線回折結果を示しており、上から未処理の被加工材 (S45C), TiN 粉末 (TiN), TiN を埋没させた被加工材 (TiN-Blast) の結果となっている。TiN を埋没させた結果を見ると、 αFe のピーク以外に TiN のピークが確認された。TiN 粉末は表層 1 μm の厚さであったため、TiN の回折強度が低かったものと考えられる。また、TiN 粉末と比較すると回折角の位置は殆ど同じであることから、被加工材への衝突や加工中の投射材同士の衝突などによる TiN 粉末の構造変化はなかったものと考えられる。原料粉末の結晶構造を維持した状態で、被加工材表面に粉末を埋没させることができるということが分かった。

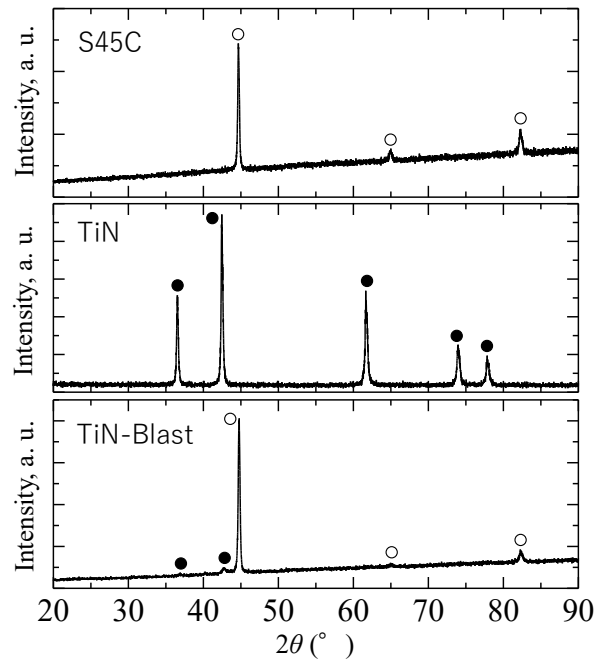


図 12 TiN 粉末で加工した加工面の X 線回折結果

埋没層の深さは約 1 μm 程度であり、図 12 の X 線回折結果からは詳細な表面状態の情報を得ることはできない。そこで、X 線光電子分光 (XPS) による最表層の表面分析を行った。図 13 は TiN 粉末を埋没した被加工材の表面に対して行った XPS による分析結果である。最表面の定性分析の結果から、埋没 TiN は Ti と N 以外に O, C, Na, Mg, Si, Ca が主に検出された。また、比較として投射前の TiN 粉末の結果を図 14 に示す。投射前の TiN 粉末からは Ti, N 以外に O, C が確認されており、埋没層で検出された O や C は原料粉末の TiN から得られたものと考えられる。なお、図 15 の結果を見ると、原料粉末の O は $\text{Ti-N}_x\text{-O}_y$ 系の酸化物と考えられる。なお、埋没 TiN は粉末 TiN に比べて O が多い結果となった。埋没時の加工熱の熱影響等により酸化が促進した可能性があるが、詳細は分かっておらず、今後検討する必要がある。その他、埋没層からは C, Na, Mg, Si, Ca なども検出されている。ガラスビーズは S

i O₂, CaO, MgO, Na₂Oなどで構成されている。被加工材表面にガラスビーズが衝突した際に、粉碎したものが被加工材表面に付着・埋没したことにより、これらの成分が検出されたと考えられる。断面観察等では粉碎したガラスビーズは確認できなかったが、極表層には存在していたものと言える。良質な改質層を得るためには、原料粉末のみを埋没させる必要がある。今後は容易に破碎しないような投射材を用いることにより、不純物の混入のない高品位埋没層を形成させることを検討する必要がある。

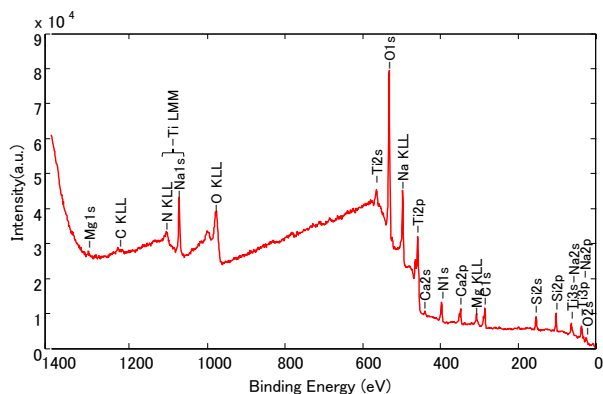


図 13 TiN 粉末で加工した加工面の XPS 分析結果

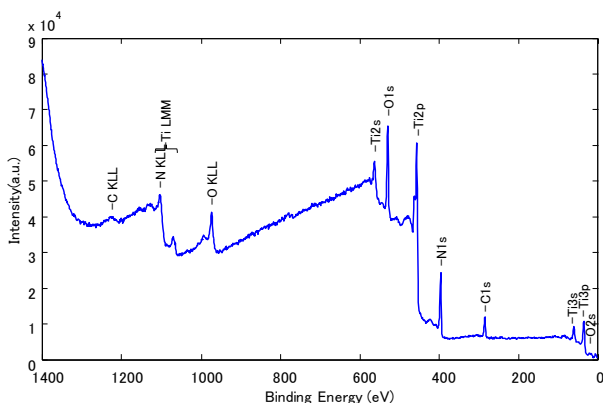


図 14 TiN 粉末の XPS 分析結果

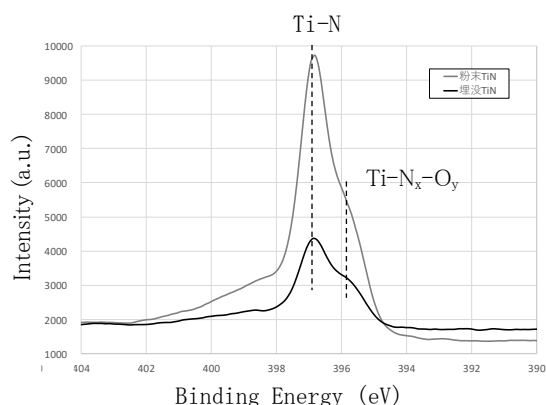


図 15 TiN 粉末と埋没層の XPS 分析結果

図 16 はノズルを走査させ、加工面全体に TiN 粉末を埋没させた後の被加工材の外観である。比較のため、加工前の被加工材外観も示している。加工前はバフ研磨を行っているため、鏡面となっているが、加工後は TiN 粉末の黄土色に加工面が変化していることが分かる。図 16 に示すように TiN 粉末の埋没には成功したが、埋没層の厚さが 1 μm と浅いことやミクロ的に見れば埋没粒子間には隙間があり緻密さに乏しかった。今後はより厚く緻密な埋没層を得る加工法を検討するとともに、得られた層の諸特性の評価を行うことを計画している。

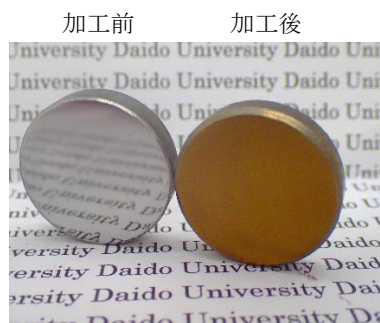


図 16 TiN 粉末の埋没前後の被加工材外観

5. まとめ

球状粒子と機能性粉末を混合した複合投射材を用いて、低圧ショットピーニングを鋼に適用した。TiN 粒子の埋込を行った結果、投射圧力が低い方が加工面に均一な粒子埋没となる。粒子埋没層深さは約 1 μm 程度であり、埋没粒子の大きさは 1 μm 以下であった。なお、加工面に埋没した粒子が容易に剥がれたりすることはなかった。加工後の表面硬さは加工前よりも約 2 倍増加した。硬さが増加した理由は、加工硬化および TiN 微粒子の埋没によるものと考えられる。TiN の埋没には成功したが、加工後は被加工材表面にガラスビーズが付着していた。また、埋没層の厚さが薄かった。今後は、埋没層の厚さ増加および緻密化、不純物混入のない層を得る方法を検討する必要がある。

謝 辞

本研究は公益財団法人天田財団の一般研究開発助成 (AF-2021020-B3) によって実施されました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 原田泰典, ショットピーニング, 表面技術, Vol. 67, No. 1, 2016, pp. 2-7.
- 2) 小林裕次, ピーニングによる表面改質, 精密工学会誌, Vol. 81, No. 21, 2015, pp. 1062-1066.
- 3) 松本良, 甲斐信宏, 富田雄人, 梶岡彰, 森章司, 宇都宮裕, ショットピーニング処理された超硬合金金型の表面性状の特徴と冷間リング圧縮における潤滑特性, 塑性と加工, Vol. 56, No. 656, 2015, pp. 53-57.