He イオンビーム加工による表面粗さの改善

井上 徳之*, 志真 俊夫**

Improvement in Surface Roughness by He Ion-Beam Machining

Noriyuki INOUE* and Toshio SHIMA**

Ion-beam machining has been investigated for its effect in decreasing surface roughness, and it has already been reported that low surface roughness can be obtained by low-energy argon ion-beam machining. In this study, low-mass helium ions were used to decrease the roughness of a mirror finished SKD 1 (high chromium-high carbon steel) surface. The results obtained were as follows: (1) A greater decrease in surface roughness was obtained with helium ion-beam machining than with low-energy argon ion-beam machining. (2) There is an optimum machining condition for decreasing the surface roughness, and the lowest surface roughness ($6 \text{ nm } R_{\text{max}}$) obtained at a beam energy of 2 keV, a beam current density of 4 A/m^2 and a beam angle of 70° . (3) The decrease in surface roughness is obtained within the oxide layer (about $0.03 \mu\text{m}$). (4) The mechanism of the decrease in the surface roughness is discussed in terms of the knock-on cascade model.

Key Words: Ion-beam Machining, Surface Roughness, Block Gauge, Helium Ion, Surface Finish

1. 緒 言

イオンビーム加工は、セラミックスや半導体などの高脆材料の超微細加工として用いられている。加工物の表面粗さは機械的特性を制御するための重要な因子である。一般に、イオンビーム加工は加工物の表面粗さを増大させてしまう。イオンビーム加工における表面粗さについては加工条件による影響が報告されており^{1), 2)}, これに基づき低イオンエネルギーでの表面粗さが減少する可能性が検討されている³⁾。

本研究ではイオンの質量に注目し、ヘリウムイオンを用いることにより、表面粗さをさらに減少させる可能性とその機構について検討した。

2. 実験方法

2.1 供試材料

加工物は、ブロックゲージに用いられるSKD 1（高クロム高炭素鋼）である。加工物表面はダイヤモンドラッピングにより約 $10 \text{ nm } R_{\text{max}}$ に鏡面仕上げされている。なお、ラッピングではこれ以下の表面粗さを得るのは非常に困難である。

2.2 イオンスパッタ加工

イオンスパッタ加工にはイオン入射角を制御しながら試料表面を均一（直径70mmの範囲）に加工できる、カウフマンタイプのイオン源を持つイオンスパッタ加工

装置を用いた（図1）。加工物表面の一部をマスクして試料ステージに取り付ける。これは未加工部と加工部との段差より加工深さを測定するためである。そして、試料ステージを水平面から垂直面まで回転させることによりイオン入射角 θ を制御した。ここで、 θ はイオンが加工物表面に垂直に入射する場合を 0° とした。なお、試料ステージは水冷している。

実験は、イオンエネルギー E 、イオン電流密度 D 、イオン入射角 θ 、加工時間 t のイオン照射条件を変化させて行った。

2.3 加工量および表面粗さの測定

加工量および表面粗さの測定にはタリステップ（最大倍率： 10^4 倍、ランク・テラー・ホブソン社）を用いた。加工量は加工深さにより表した。表面粗さは加工物表面につけた2個所のマイクロビッカース圧痕を目印にして、

Fig. 1 Schematic diagram of ion-beam machining apparatus.

* 東海大学大学院（〒259-12 神奈川県平塚市北金目1117）
Graduate School, Tokai Univ. (1117, Kita-Kaname,
Hiratsuka-shi, Kanagawa 259-12)
** 東海大学工学部（〒259-12 神奈川県平塚市北金目1117）
Fac. of Eng., Tokai Univ. (1117, Kita-Kaname, Hira-
tsuka-shi, Kanagawa 259-12)

Fig. 2 Change of machining depth by argon and helium ion under same machining condition.

同じ箇所での変化を測定した。また、オージェ分光分析により加工物表面の酸素濃度変化を調べた。

3. 実験結果および考察

3. 1 ヘリウムのイオンエネルギー

図2はヘリウム入射イオンとアルゴンイオンの同一加工条件における加工深さを示している。両者の加工深さを比較してみると、ヘリウムはアルゴンの約10分の1になっている。このことよりヘリウムの入射イオンエネルギーは非常に低いことがわかる。

また、両者のエネルギー伝達係数⁵⁾ [$\gamma = 4 M_1 M_2 / (M_1 + M_2)^2$] より求めたヘリウムの入射エネルギーはアルゴンの場合の約4分の1程度になっていることより、衝突時の入射イオンエネルギー比がそのままスパッタ比にならないことも示している。この理由についてはヘリウムのイオン半径が小さいために生ずるチャネリング効果と、ヘリウム入射イオンにより形成される衝突カスケードのエネルギーが非常に低いことに起因していると考えられる。

3. 2 イオンエネルギーおよびイオン電流密度の影響

図3はイオン電流密度 4 A/m^2 、イオン入射角 0° として、イオンエネルギーを1, 1.5, 2 keVに変化させた場合の表面粗さの変化を示している。表面粗さはいずれのイオンエネルギーにおいても加工初期に減少している。そしてその減少傾向はイオンエネルギーが低くなるにつれアルゴンの場合と同様に遅い時期に現れている。このうち最も減少した表面粗さは、イオンエネルギー1.5 keVで表面粗さは約7 nm R_{max} である。さらに加工を続けた場合表面粗さはいずれも増加している。

図4は1.5 keV, 0° として、イオン電流密度を2, 4, 6 A/m^2 に変化させた場合の表面粗さの変化を示している。イオン電流密度の大きい6 A/m^2 の場合は

Fig. 3 Effect of ion energy on surface roughness.

Fig. 4 Effect of ion current density on surface roughness.

表面粗さはほとんど変化していないが、イオン電流密度の小さい2 A/m^2 の場合には4 A/m^2 と同程度に減少している。

以上のことより表面粗さを減少させるには、アルゴンイオンの低エネルギーの場合と同様に、最適なイオンエネルギー、イオン電流密度が存在することがわかる。

3. 3 イオン入射角の影響

図5は図3の加工条件のうち、イオン入射角を 70° にした場合の表面粗さの変化を示している。図よりイオン入射角の効果が現れ、表面粗さはいずれも 0° の場合より減少しているが、イオンエネルギーの高い2 keVの方が1.5 keVより表面粗さは減少している。この場合に、表面粗さ約6 nm R_{max} が得られた。この値は今までの実験結果では得られなかった最小の表面粗さである。

図6は図4の加工条件のうち、イオン入射角を 70° にした場合の表面粗さの変化を示している。この場合表面粗さは4 A/m^2 ではイオン入射角の効果が現れているが、他の2, 6 A/m^2 ではイオン入射角の効果は特に現れていない。また、図5においてイオンエネルギーの違いによる表面粗さはあまり変わらないのに対し、この図のイオン電流密度では 0° の場合と比べて、それらの差

Fig. 5 Effect of ion energy on surface roughness at 70 degrees.

Fig. 6 Effect of ion current density on surface roughness at 70 degrees.

が大きく現れている。このことより、イオンの斜め入射によって入射イオン量が少ない場合には、その多少が、より顕著に表面粗さに影響することがわかる。これは主にヘリウムのイオン径が小さいために生ずる表面原子との衝突確率の影響と考えられる。

図7に加工前の表面粗さと改善された表面粗さ6 nm R_{max} の表面形状($E=1.5\text{keV}$, $D=4\text{ A/m}^2$, $\theta=70^\circ$)を示している。

3. 4 イオンスパッタ加工の表面粗さ減少機構

図8(a)にヘリウムイオンを使用した場合の加工物表面形状の山と谷、すなわち凸部と凹部の凸部上端よりの加工深さの変化の一例を示している。この両者の差は表面粗さを表している。図より、加工初期に凸部の加工深さは増加するが、凹部の加工深さはほとんど変化しないため、その差が減少し10min加工付近で最小になり、表面粗さは最も減少している。その後の加工ではその差は増加している。

図8(b)はアルゴンイオンの場合で、同じく凸部と凹部の凸部上端よりの加工深さの変化を示している。この場合、加工初期には凸部と凹部の加工深さの差はほとんど

Fig. 7 Improved surface profile.

(a) before machining

(b) the smallest improved surface profile after 5 min machining

Fig. 8 Change of machining depth in upper and lower part of surface shape.

(a) herium ion (b) argon ion

ど変わらず、その後はヘリウムと同様に増加している。

以上の結果より、表面粗さの減少機構は次のように考えられる。表面粗さを減少させるためには凹部をあまり加工せずに凸部を加工することが必要である。一般にスパッタリングの機構は、入射イオンのエネルギーが固体内で衝突カスケードを形成し、そのうち表面原子に達した衝突カスケードのエネルギーがその結合エネルギーを切り離すのに十分なときスパッタされると考えられている⁶⁾。それゆえ、表面原子がスパッタされるまでの衝突カスケードが長いほどエネルギーは減少しスパッタは起こりにくくなる。このことは、イオンの衝突箇所から表面までの距離が短いほどスパッタされやすいと考えられる。

以上のことより、凸部と凹部の衝突カスケードについ

Fig. 9 Model of knock-on cascade in convex and concave parts.

(a, b) perpendicular incident ion
(c, d) oblique incident ion

て比較した場合、モデル図9 (a) (b) に示すように、衝突カスケードは凸部では表面に達しやすく、凹部では達しにくい。このような機構で、凸部、凹部ともスパッタ率がほとんど同じ酸化層である場合には、凸部が優先的に加工されたと考えるとモデル図10 (a) に示すように図8 (a)において表面粗さが減少することが説明できる。なお、オージェ分析により加工物表面には酸化層が形成され、その厚さは約 $0.03\mu\text{m}$ であることが確認された。

また、図8 (b)において加工初期に、表面粗さがほとんど変化しなかったのは、凸部と凹部のスパッタがほとんど同程度に行われたことを示している。このことは、入射イオンエネルギーが高くなると加工物表面に達する衝突カスケードエネルギーも当然増加し、それが凹部においても表面原子を切り離すのに、より十分であると考え、衝突カスケードの長さの影響がなくなり、凸部と凹部がほとんど同程度に加工されることが説明できる(モデル図10 (b) 参照)。

さらに、斜め入射の場合に垂直入射より表面粗さが減少するのは、モデル図9 (c) (d) に示すように、垂直入射の場合より衝突カスケードは凸部、凹部とも、より表面部分に集中するが、凸部の衝突カスケードは極端に表面に達しやすくなり、凸部がより加工されるためと考えられる。

4. 結 言

鏡面加工したSKD1にヘリウムイオンを用いてイオンスパッタ加工を行い、表面粗さの改善に関し次の結果が得られた。

- (1) 質量の小さいヘリウムイオンを用いることにより、表面粗さをアルゴンの低イオンエネルギーの場合よりさらに減少させることができた。
- (2) 表面粗さを減少させるためには、加工前の表面粗さ

Fig. 10 Model of change in surface roughness.

(a) optimum machining condition
(b) non-optimum machining condition

に応じた最適なイオンエネルギー、イオン電流密度、イオン入射角があり、 2 keV 、 4 A/m^2 、 70° で最小の表面粗さ(約 $5\sim 6\text{ nm } R_{max}$)が得られた。

(3) オージェ分析結果より、酸化層内(約 $0.03\mu\text{m}$)で表面粗さが減少していることがわかった。

(4) 表面粗さが減少する機構について、凸部と凹部の加工量変化と衝突カスケードモデルなどにより解明を試みた。

(5) 同一加工条件におけるヘリウムの加工量はアルゴンの10分の1と非常に小さく、また、両者の入射イオンエネルギー比がそのままスパッタ比にならない。

なお、表面粗さを変化させることなく、酸化層(加工変質層)を除去することも可能である。

謝 辞

終わりにあたり、表面粗さ測定にご協力いただいた東海大学工学部光学工学科 横田英嗣教授、試料の提供をいただいた黒田精工(株)の川端 実氏および諸賢、オージェ分析をしていただいた(株)ミヨタの大矢頼武氏、白鳥典彦氏、沖 恭一氏に感謝します。また、実験に協力された東海大学卒業生清水啓一、柴崎 亘、内藤一成の諸君に感謝する。
(1992-6-30 受理)

文 献

- 1) 志真俊夫, 井上徳之; 精密工学会誌, **54**, 896 (1988)
- 2) T. Shima, N. Inoue; *Precision Engineering*, **12**, 157 (1990)
- 3) 志真俊夫, 井上徳之; 東海大学工学部紀要, 査読終了掲載待 (1992)
- 4) Y. Nishi, N. Inoue, K. Watanabe, T. Morishita, T. Shima; *J. Mater. Sci. Lett.*, **6**, 63 (1978)
- 5) 金原 繁; スパッタリング現象, p.46 (東京大学出版会, 1984)
- 6) P. Sigmund; *Phys. Rev.*, **184**, 383 (1969)