イオンビームによるステンレス鋼ナイフエッジの バリ取りと形状制御*

玉置 司** 岡田 晃*** 植村賢介† 宇野義幸†† 高木利樹†††

Study on Deburring and Shape Control of Stainless Steel Knife Edge by Ion Beam Machining

Tsukasa TAMAOKI, Akira OKADA, Kensuke UEMURA, Yoshiyuki UNO and Toshiki TAKAGI

Forming the cutting edge of stainless steel cutlery is generally carried out by grinding wheel and polishing with leather strop. Nanometer-level shape controllability of the edge in the polishing process is strongly required for better cutting performance. In order to achieve stably high shape accuracy of cutting edge, high technical skill has been needed, considering the wear of lather strop and the changes in environmental conditions, such as temperature and humidity. In this study, deburring and shape control of cutting edge by ion beam machining were experimentally investigated as an alternative to the conventional leather strop polishing. Experimental results clarified that ion beam irradiation from the front to the edge made the edge shape dull, while that from the side made it sharp. By continuously changing the direction of ion beam irradiation to the edge, the burr was perfectly removed and the edge radius in several nm was successfully obtained. Furthermore, the cutting performance was highly improved by plasma nitriding after the edge finishing with the multi-directional ion beam irradiation, compared with that of conventionally finished one with leather strop.

Key words : ion beam, stainless steel cutlery, edge shape, multi-directional, cutting performance

1. 緒 言

ステンレス製刃物の刃先は、マルテンサイト系ステンレス材料の薄板に焼き入れ、焼き戻し処理を施し、さらに砥石研削を行った後に皮砥^①による研磨でバリを除去する工程を経て形成される。図1(a)に示した皮砥研磨前の刃先 SEM 写真は、砥石研削によって大まかな刃先が形成されていることがわかるが、最先端にはバリが残っているため、例えばカミソリでは髭を剃ることができない。一方、図1(b)は、皮砥研磨によって刃先のバリが完全に除去され、滑らかに仕上がっていることがわかる。このような研磨加工はカミソリのみならず、カッターナイフや包丁などでも行われており、十数年前には理髪店でも皮で刃先を研ぐ光景を目にすることができた。また、刃の種類は切断対象物によって様々なサイズや刃先厚み形状が存在し、中でも精密な切断を要する刃については、切れ刃の鋭利さにおいてナノメートルオーダでの形状精度が求められているため、研磨によるバリ除去と同時に刃先形状を制御する必要がある。従来の皮砥研磨等、機械加工で高精度な刃先形状を安定的に形成するには、皮砥自身の摩耗による形状変化や、研磨時の気温・湿度等を考慮した取り扱いが必要である。よって安定した品質の刃先を作るには長年の経験的スキルが必要とされる。また、皮砥は職人が1枚1枚手作りで製作しているため、製品毎に特性が異なることや、後継者不足により安定的供給ができなくなる可能性が懸念されている。

近年、機械加工による研磨に代わるエッチング技術が発達したことで、電子デバイスやマイクロマシンを対象とした微細加

工技術が急速に成長している。中でもプラズマエッチングは^{②③}、半導体製造プロセスに欠かせない存在となっている。著者らは、これまでプラズマ窒化による刃先の高硬度化を達成しており^④、プラズマプロセスでは微細な加工もできることから、より効率が高く異方性を有するイオンビームエッチング^{⑤⑥}によって刃先のバリ取りと高精度な形状加工が可能になるのではないかと考えられる。そこで本研究ではイオンビームによる刃先のバリ取りと刃先形状変化について実験的に考察し、高精度な刃先形成の可能性を検討した。

2. 装 置 概 要

図2に本研究で使用したイオンビーム加工装置^⑦を模式的に示す。装置は真空チャンバ、真空ポンプ、イオンビームガンで構成されている。イオンビームガン内部に導入されたアルゴンガスは、2.0mm 幅のスリットからイオン加速電圧の印加によってプラズマ状態で照射される。放出されたイオンは、スリットから90mm 離れた位置に設置された試料表面で60mm 幅に拡散され、試料に衝突することで刃先の加工を行う。

(a) Before polishing (b) After polishing
Fig.1 SEM images of blade edge before and after polishing with leather strop

* 原稿受付 平成 26 年 11 月 5 日

掲載決定 平成 27 年 1 月 19 日

** 正 会 員 カイインダストリーズ(株) (岐阜県関市小屋名 1110)

*** 正 会 員 岡山大学大学院 (岡山県岡山市北区津島中 3-1-1)

† アイタック(株) (兵庫県宝塚市新明和町 1 番 1 号)

†† 中国職業能力開発大学校 (岡山県倉敷市玉島長尾 1242-1)

††† カイインダストリーズ(株) (岐阜県関市小屋名 1110)

Fig.2 Ion beam machining equipment

3. 評価結果

3.1 イオンビームエッチング加工特性

イオンビームエッチングによるカミソリ刃のバリ取りと形状制御について検討するに当たり、はじめに処理時間とイオンガンの加速電圧値がエッチングレートに及ぼす影響を調査した。エッチング量の測定は、試料表面の一部を水糊でマスキングし、加工面と未加工面の段差をAFMにて測定した。加工条件を表1に示す。電圧を2~4kV、処理時間を60~180分と変化させ、試料は鏡面($Ra=0.02\mu m$)に仕上げた SUS420J2 を使用した。

イオンガンの電圧を3kVで一定とし、加工時間を60~180分に変化させた場合のエッチング量の測定結果を図3(a)に示す。エッチング量と加工時間はほぼ比例の関係にあり、処理時間が長くなるほどエッチング量は直線的に増加している。エッチングレートは約 $0.2\mu m/h$ となっている。次に加工時間を180分で一定とし、電圧を2kV~4kVに変化させた場合のエッチング量測定結果を図3(b)に示す。電圧によるエッチング量もほぼ比例の関係になっており、電圧が増加するにつれエッチング量も増えていることがわかる。エッチングレートは2kVで約 $0.1\mu m/h$ 、3kVで約 $0.2\mu m/h$ 、4kVで約 $0.3\mu m/h$ となっている。

3.2 イオンビームによる刃先のバリ取りと形状制御

3.2.1 照射角度と刃先形状の関係

本節では、イオンガンの加速電圧を変化させた場合にカミソリ刃先のバリがどのように除去されるかを観察した。加工条件を表2に示す。試料は一般的なカミソリ材料である SUS420J2 相当材(日立金属社製銀紙5号)を使用し、熱処理と砥石による研削工程を経て刃先を形成し、刃先は20度の角度で成形されている。次に刃先に対するビーム照射角度を変化させることでバリの状態と刃先形状の変化を評価した。図4(a)にイオンビーム照射方向と刃先の位置関係を示す。ビーム照射角度 $\theta=0^\circ$ の場合は、刃先に対して真上から180分間イオンビームが照射される。図4(b)に示すような $\theta=\pm 45^\circ$ および $\pm 90^\circ$ の場合、片側から90分照射した後に反対側からも90分、合計で180分間照射を行う。さらに、図4(c)に示すような連続的にビームを照射しながら θ を $0^\circ \sim \pm 90^\circ$ と変化させる方法も試みた。

イオンガンの加速電圧を2~4kVと変化させた場合、バリの除去具合と刃先形状がどのように変化するか確認した。イオンビームを刃先正面($\theta=0^\circ$)から照射した場合の、SEMによる観察結果を図5に示す。観察結果より、2kVでは刃先にバリが残っており、刃先が右側に倒れ込んでいる様子を確認できる。電圧を3kV、4kVと増加させるにつれ、刃先は大きくエッチングされ、バリが除去されている様子が確認できる。しかし、4kVの条件ではバリが除去される以上にエッチングが進み、イオンビーム照射前より鈍角に形成されていることがわかる。刃先角度はSEM

Table 1 Test conditions of ion beam etching for test pieces

Process pressure P Pa	0.1
Ion source voltage V kV	2, 3, 4
Ion current I A	0.4
Distance from ion gun to workpiece L mm	90
Process time t min.	60, 120, 180
Process gas	Argon

Fig.3 Variation of etching amount with process condition

Table 2 Ion beam etching conditions for razor blades

Process pressure P Pa	0.1
Ion source voltage V kV	3
Ion current I A	0.4
Distance from ion gun to workpiece L mm	90
Process time t min.	180
Ion beam angle θ degree	0, ± 45 , ± 90 , Multi-directional
Process gas	Argon

Fig.4 Ion beam irradiating method

Fig.5 Variation of etching amount with acceleration voltages ($\theta=0^\circ$)

画像解析ソフト“Scandium”にて測定すると約 $70\sim 80^\circ$ になっている。これは、イオンビーム入射角によるエッチングレートの違い⁸⁾、すなわちビーム照射角度が 50° 前後の場合に、エッチングレートが最大となる現象に起因していると考えられる。その角度依存性により結果として 80° の刃先形状が形成されたと考えられる。

Fig.6 SEM images of blade edge with various ion beam angles

Fig.7 SEM images of blade edge with multi-directional ion beam irradiation for various process times

次に、ビームの照射角度が刃先形状へ及ぼす影響を検討した。その結果を図6に示す。図より、照射角 0° すなわちイオンビームを刃先から鉛直下向きに照射した場合は、バリの除去はできているが、最先端が鈍角に形成される。また、照射角 45° で加工した場合は、刃先形状はあまり変化しておらず、鋭角が保たれている。しかしながら、刃先のバリは完全に除去されていないことが確認できる。さらに、照射角 90° で加工した場合も照射角 45° と同様、刃先形状の変化は少ないが、バリは完全に除去されない結果となった。側面からの照射により、ビームはエッチングレートの小さい照射角となり、刃先のバリ除去効率が低下したと考えられる。

$\theta=0^\circ$ の条件では、バリの除去はできるものの刃先が鈍角になる。一方、側面からの照射すなわち $\theta=\pm 45^\circ$ および 90° の条件では形状の変化は少なく刃先は鋭角に保たれるが、バリが除去できない結果となった。そこで、刃先の鈍角化を抑えつつバリの除去を行うことができる方法として、イオンビーム照射角を 0° から $\pm 90^\circ$ の角度で連続的に変化させ、正面と側面の照射を同時に行う実験を行った。これを多方向照射(Multi-directional)と呼ぶ。この実験で照射角度を $0^\circ \Rightarrow 90^\circ \Rightarrow 0^\circ \Rightarrow -90^\circ \Rightarrow 0^\circ$ と変化させ、1周期は20秒に設定した。エッチング前と多方向照射で120分および180分の処理時間で加工した刃先SEM写真を図7に示す。図7(b)の120分の処理では、バリの除去が十分出来ていることが確認することができる。刃先先端をSEMにて10万倍で拡大撮影し、3.2.1で使用した画像解析ソフトで先端半径Rを計測した結果 $3\sim 5\text{nm}$ となり、従来の皮砥加工で作製することは不可能な、小さな先端半径の切れ刃を形成することができた。一方、図7(c)に示す処理時間180分の刃先は、120分の処理と比べバリの除去具合や先端半径の仕上がりに大きな変化は見られないが、表面が荒れていることがわかった。

次に、刃先の形状変化を定量的に測定した。測定には3.2.1で使用した画像解析ソフトを用いた。測定結果を図8に示す。横軸に刃先最先端からの距離、縦軸にその距離での刃の厚みを示す。図より皮砥で研磨した刃先は加工前よりも研磨により刃先

Fig.8 Variations of thickness with distance from the edge for various ion beam angles

Fig.9 Schematic illustration of cutting test

Fig.10 Cutting test result compared ion beam etching

が丸くなり、厚み形状が増加している。また、イオンビーム照射角 0° の場合の刃先はイオンビーム照射前より鈍角に形成されたため、最先端のみ厚み形状が大きくなっている。さらに、照射角 $\pm 45^\circ$ 、 $\pm 90^\circ$ の条件において刃先形状は照射前とほぼ同等になった。これらに対し、多方向照射は照射前の刃よりも厚みが薄く、刃先角度が小さくなっている。

3.2.2 切断性能評価

本実験で処理をした試料を用いて、切断性能の評価を行った。切断性能評価装置を図9に示す。装置は試料刃物、電動シリンダ、切断荷重測定用ロードセルで構成され、 20° の角度で取り付けられた刃が、電動シリンダによって 0.025mm/s の速度でナイロンテグスを切断し、切断時の荷重をロードセルにて計測した。また、ナイロンテグスの直径は 0.1mm で保持部からの突き出し量は 5mm となっている。測定結果を図10に示す。図より、照射前の刃は、刃先にバリが大きく残っているためテグスの切断ができず、切断荷重が高くなっている。これに対し、従来の皮砥研磨で加工した刃では、刃先にバリがないためテグスを切断する

Fig.11 Photograph of cutting edge etched by multi-directional ion beam irradiation after cutting nylon string

ことが可能で、ピーク荷重は0.30Nであった。また、 $\theta=0^\circ$ 照射で加工した刃のピーク荷重は約0.27Nであり、皮砥によって研磨した試料よりも低い荷重でテグスを切断できた。これは、最先端は鈍角になったが、前述した通り皮砥研磨した刃よりも刃先形状が薄いため、切断抵抗が低くなったと考えられる。一方、多方向照射で加工した刃は、最も刃先角度が小さいにもかかわらず全くテグスが切断できない結果となった。この原因を確認するため、切断後の刃先を顕微鏡にて観察した。刃先写真を図11に示す。テグスの直径に当たる、約100 μ mの幅にわたって変形しており、刃先角度が小さすぎたことで刃先強度がテグスよりも低かったために、切断できなかったと考えられる。

3.3 イオンビームとプラズマ窒化処理による刃物の性能向上

3.3.1 加工条件と刃先形状の関係

多方向照射を行うことで、従来の加工方法では形成が不可能なレベルで、切れ刃先端半径の先鋭化ならびに刃先角度の鋭角化に成功した。しかしながら刃先の厚み形状が薄すぎることで、切断性能評価において刃先が破損してしまう結果となった。そこで、イオンビームエッチングの多方向照射(Multi-IB)によって刃先角度が小さくなった刃先に、プラズマ窒化処理(Plasma nitriding: PN)を施すことで硬度を上昇させ、切断性能と耐久性を兼ね備えた刃先を形成できるのではないかと考え、実験および評価を行った。

実験には図2で示したイオンビームエッチング装置を用い、その後プラズマ窒化処理を施した。試料は3.1.2で使用したカミソリ材にプレス、熱処理の後に砥石による刃付けを行い、仕上げの皮砥研磨は行っていないものを用いた。試料の加工工程を図12に示す。実験の工程として、はじめにイオンビームエッチングを多方向照射で120分加工し、次にプラズマ窒化を120分と180分施し、刃先を硬化させることで耐久性を付与した。

実験で作製した刃先写真を図13に示す。図13(a)は多方向照射によるイオンビームエッチング(Multi-IB)を120分処理したものの、図13(b)は多方向照射イオンビームエッチング後に120分プラズマ窒化を行い、図13(c)は同じくエッチング後に180分プラズマ窒化を行ったものである。写真より、多方向照射イオンビームエッチングのみで処理した刃先と比べ、プラズマ窒化を加えたものは、窒化処理時のエッチング効果によって刃先がわずかに鈍角になっていることがわかるが、これはプラズマ窒化処理のみを刃先に施した際の結果とほぼ一致する⁹⁾。次に、刃先形状の測定結果を図14に示す。図より、イオンビーム多方向照射とプラズマ窒化で作製した試料は、最先端が鈍角に形成された分厚み形状が増加していることを定量的に確認できる。また、厚み形状の増加は窒化処理時間に比例し、180分の処理で未処理の刃とほぼ同等になっている。未処理の刃は、バリがあるため刃物としては使用できず、皮砥研磨後の刃では厚み形状が大き

Fig.12 Procedure of ion beam etching and plasma nitriding process

(a) Multi-IB 120min. (b) Multi-IB 120min. + PN 120min. (c) Multi-IB 120min. + PN 180min.

Fig.13 SEM images of blade edge processed with various plasma treatment combinations

Fig.14 Variations of thickness with distance from the edge for various plasma treatment combinations

く増加している。よって、今回の実験で作製した多方向照射+プラズマ窒化120分の試料は、多方向照射のみの試料よりも形状は厚くなったが、従来の皮砥による仕上げよりは形状を薄く仕上げる 것이可能となった。

3.3.2 切断性能評価

イオンビームエッチングとプラズマ窒化によって作製した試料で、テグス切断による切断性能評価を実施した。結果を図15に示す。多方向照射によるエッチングのみで作製した試料は、3.2で示したようにテグスを切断する強度が十分でない。一方、多方向照射とプラズマ窒化で作製した試料は0.24Nと従来の皮砥研磨による刃先よりも低い切断荷重を示した。また、プラズマ窒化の処理時間120分と180分のものを比較すると、わずかに120分処理の切断荷重が低い結果となった。以上より、多方向照射によって刃先角度が小さくなった反面、テグスの切断に耐える強度がなくなった刃先に対してプラズマ窒化処理を施すことで、若干刃先の厚みは増加したもののテグス切断に耐える強度を付与し、従来の皮砥研磨で仕上げた刃先よりも約20%切断性能が向上したことが明らかとなった。

Fig.15 Cutting test result for various plasma treatment combination

3.3.3 剃り味評価試験

カミソリの切れ味を評価するうえで、剃り味試験は重要な評価方法の1つであるが、官能評価が故にその手法については確立されておらず、カミソリメーカー各社のノウハウとなっているのが現状である。ただし、剃り味試験は顧客の評価に最も近い評価方法であり、製品仕様を決定する際には必ず実施されている。そこで、今回作製したサンプルを用い、髭剃りとしての性能を比較した。剃り味試験の流れは下記の通りである。

①サンプルの準備と評価者の選定

今回の剃り味評価試験では、剃り味のサンプルとして皮砥研磨で仕上げた刃（サンプル A）と、皮砥研磨なしで、多方向照射によるイオンビームエッチングの後にプラズマ窒化処理 120 分を行った刃（サンプル B）に対し、チタン合金皮膜と PTFE 成膜を施した 5 枚刃カミソリを評価者へ配布した。評価者は年齢 20 代から 50 代まで各 5-9 名ずつ、合計 30 名を選定した。

②評価およびアンケート用紙の記入

サンプルを配布された評価者は、1 日 1 回の髭剃りを 5 日間に渡って、都度 2 種類のサンプルで左右片側ずつ髭を剃り、アンケート用紙に沿って点数評価を行う。アンケートの内容は、抵抗なくスムーズに剃れたか、深剃り具合はどうであったか、使用後の肌の状態はどうであったかという項目に対して評定尺度法を用いた。アンケートで用いた質問事項に対する尺度を表 3 に示す。被験者は質問に対して 1-5 点の点数をつけ、満足度が高いほど高得点とする。

③集計およびデータ解析

集計ではそれぞれの評価項目と使用回数に応じて平均点を算出し、点数の高い方が切れ味のよいカミソリとして判断する。

評価結果を表 4 に示す。結果より、平均点ではスムーズさと剃った後の肌の状態についてはサンプル B の方が平均点は高かった。これは、髭を剃る際の切断抵抗が低くなったことでスムーズにカミソリをストロークすることができたと考えられる。また、髭剃り後の肌の状態も、A と比較して快適に感じる結果となった。

一方、深剃りの項目ではサンプル A の方が平均点は高い結果となった。これは、サンプル A はヒゲを切る際の切断抵抗が高いため皮膚に不快感を伴う反面、切断時に髭が引っ張り出されたことで、より毛根に近い部分の髭をカットできたのではないかと考えられる。

4. 結 言

イオンビームエッチングによるステンレス刃物のバリ取りと形状制御について研究を行った結果、以下の結論を得た。

- (1) イオンビームを刃先正面から照射すると、処理時間 180 分、

Table 3 Shaving test results

Score	Smoothly of shave	Closeness of shave	Skin condition
5	Very smooth	Very close	Very comfortable
4	Smooth	Close	Comfortable
3	Neither of them	Neither of them	Neither of them
2	Not smooth	Not close	Uncomfortable
1	Not smooth enough	Not close enough	Very uncomfortable

Table 4 Shaving test results

Evaluation points	Test number	Score		Subtract B-A
		Sample A	Sample B	
Smoothly of shave	1	3.71	3.83	0.13
	2	3.75	3.83	0.08
	3	3.73	3.82	0.09
	4	3.55	3.85	0.30
	5	3.50	3.70	0.20
Closeness of shave	1	3.67	3.50	-0.17
	2	3.75	3.67	-0.08
	3	3.73	3.68	-0.05
	4	3.70	3.60	-0.10
	5	3.65	3.55	-0.10
Skin condition	1	3.75	3.83	0.08
	2	3.71	3.92	0.21
	3	3.59	3.73	0.14
	4	3.60	3.70	0.10
	5	3.60	3.65	0.05

イオンガンの加速電圧 3kV の条件で刃先のバリを除去できるが、刃先は 80°に形成される。一方、刃先側面から照射すると、刃先形状の変化を抑えることができる反面、バリの除去効率が低下する。

- (2) イオンビームを多方向の角度から連続的に照射すると、バリの除去とともに刃先角度を極めて小さく形成できる。
- (3) 多方向照射によって形成された刃先は、その刃先角度の小ささゆえに強度が低下し、切断試験によってナイロン製テグスを切断することができない。

次に、イオンビームエッチングと後のプラズマ窒化処理によって、刃先の鋭角化と耐久性向上を両立させた刃先について検討を行った結果、以下の結論を得た。

- (4) 多方向照射によるイオンビームエッチング後にプラズマ窒化処理を行った刃先は、多方向照射のみの加工に比べ形状はやや厚くなったが、従来の皮砥加工よりも刃先角度を小さく形成でき、20%程度切断性能が向上する。
- (5) 多方向照射によるイオンビームエッチング後にプラズマ窒化処理を行った刃で剃り味評価試験を行った結果、剃り味のスムーズさと髭剃り後の肌の状態を問う項目において従来品よりも高い評価を得た。

参 考 文 献

- 1) 田淵鐵雄：実用新案公報、(1956)-3361.
- 2) 下川房男：エッチング技術の基礎、精密工学会誌、77, 2 (2011) 162.
- 3) 塚田勉、鶴飼勝三：各種ドライエッチング装置と加工特性、リアクティブイオンエッチング装置と加工特性、精密機械、51, 7 (1985) 1314.
- 4) 玉置司、植村賢介、岡田晃、宇野義幸：プラズマ窒化処理がステンレス刃物鋼の表面性状に及ぼす影響、精密工学会誌、78, 1 (2012) 72.
- 5) 宮本岩男：リアクティブイオンビームによるダイヤモンドの超精密加工、砥粒加工学会誌、38, 5 (1994) 262.
- 6) I.Miyamoto：Sharpening diamond knives having a small apex angle of less

than 55° with high-energy argon ion beams, Journal of materials science letters, 7, 11 (1988) 1175.

- 7) 玉置司, 岡田晃, 植村賢介, 宇野義幸: イオンビームによるナイフエッジのバリ取りと形状制御, 2012 年度精密工学会秋季大会学術講演

論文集, No.B03 (2012) 99.

- 8) 春日幸治: イオンビーム技術の開発, シーエムシー, (2001) 137.
9) 玉置司, 岡田晃, 植村賢介, 宇野義幸: プラズマ窒化処理がステンレス刃物の切断性能に及ぼす影響, 精密工学会誌, 79, 10 (2013) 950.