

研究成果報告書

研 究 題 目		プラズマ窒化処理を施した医療用オーステナイト系ステンレス鋼製ドリルの長寿命化	実 施 年 度
			2025年度
代 表 研 究 者	所 属	津山工業高等専門学校	
	氏 名	半田 祥樹	印
1. 研究の目的・背景 オーステナイト系ステンレス鋼は、酸化クロムや酸化鉄などの酸化物からなる不働態被膜により高い耐食性を持つ。そのため、金属イオンの溶出を避ける必要がある医療器具に用いられている。しかし、オーステナイト系ステンレス鋼は、硬度や耐摩耗性が低いため工具などへの適用は制限される。このオーステナイト系ステンレス鋼の機械的特性向上のためにプラズマ窒化処理が注目されている。オーステナイト系ステンレス鋼に対して 400 ℃以下の低温でプラズマ窒化処理を施すと、窒素の過飽和相である拡張オーステナイト相が形成される。この拡張オーステナイト相は、窒素が 30 at%以上固溶し、窒素の固溶により圧縮の残留応力が発生し硬度が上昇する。さらに、固溶窒素が腐食の際に腐食部に溶出し、腐食部をアルカリに傾け再不働態化を補助するため耐食性も向上することが知られている。 本研究では、手術の際に顎骨へ穴あけを行う医療用ドリルに対して低温プラズマ窒化処理を施し、ドリルの切れ刃およびチゼルに拡張オーステナイト相を形成する。この拡張オーステナイト相により耐摩耗性や刃部の形状安定性を向上させることでドリルの長寿命化を目指す。ドリルは、直径 2.35 mm と非常に細く、刃部も薄い。しかし、窒化処理により形状安定性や耐摩耗性の向上が認められれば、先端の細い縫合針や鉗子といった手術器具へと応用が可能となる。微細な器具ほど寸法に対する窒化層の割合が相対的に大きくなり、表面近傍の機械的特性改善の影響が相対的に大きく現れることが予測されるためである。 本研究の目的は、低温プラズマ窒化処理により拡張オーステナイト相を形成し、オーステナイト系ステンレス鋼製ドリルの刃部やチゼルの耐摩耗性および形状安定性を向上させ、長寿命化を達成することである。これにより、プラズマ窒化処理の有用性を明らかにする。			

2. 研究成果及び考察

本研究では、プラズマ窒化処理によりオーステナイト系ステンレス鋼（SUS304）製ドリルの長寿命化を目指した。以下、申請時に挙げた目標ごとに記述する。

1. ドリルに形成する拡張オーステナイト相の最適化

直径 2.35 mm の SUS304 製ドリル(Fig.1)を製作し窒化処理を施した。ドリルは、平板試料と異なり、窒化層が形成されにくく、表面硬度の増加が見られた条件は限られていた。そのため、ドリルに形成する窒化層の最適化には至っていない。窒化処理により表面硬化が確認された条件を Table 1 に示す。処理雰囲気圧力は 0.7–0.75 Pa、処理温度は 410 °C とした。プラズマ洗浄では、ガス比率をアルゴン：水素＝3:1 とし、試料バイアスを -60 V とし、1 時間行った。また、窒化処理はガス比率をアルゴン：水素：窒素＝2:2:1 に設定し、試料バイアスは -35 V で、3 時間と 6 時間行った。



Fig.1 Austenitic stainless steel drill

Table 1 Cleaning and nitriding conditions of austenitic stainless steel drills

Gas ratio of Cleaning	Ar : H ₂ = 3 : 1
Cleaning time	1 hour
Sample bias of Cleaning	-60 V
Gas ratio of Nitriding	Ar : N ₂ : H ₂ = 2 : 2 : 1
Sample temperature	410 °C
Processing pressure	0.7 - 0.75 Pa
Processing time	3 , 6 hours
Sample bias of Nitriding	-35 V

Table 1 の条件で処理されたドリルの表面硬度は、刃先から 200 μm 以内の範囲を Edge、それ以上離れた領域を Body と定義し、これらの領域で硬度を測定した。測定結果を Table 2 にまとめる。未処理のドリルの表面硬度は、450 HV であったが、これは SUS304 の一般的な表面硬度の目安である 150–200 HV と比較して 2 倍程度高い値を示した。これは、ドリルが冷間引き抜き材を用いて製作され、さらに研削加工が施されているため、加工硬化が生じて硬度が上昇したと推測される。未処理の硬度が高く、加工硬化の影響が大きいことから、これが窒化層形成を阻害した可能性がある。一方で、プラズマ窒化処理により刃先近傍で 2 倍程度の表面硬度が得られた。刃先から離れた領域では、硬度上昇はほぼ見られなかった。これは、試料バイアスによるエッジ効果がドリルの刃先に発生したため、刃先で窒化処理がより強く進行した結果と考えられる。

Table 2 Surface hardness of drills

Nitriding conditions of drill	Surface hardness [HV _{0.01}]	
	Edge	Body
Untreated drill	450	450
Nitrided drill for 3 hours	900-1000	450
Nitrided drill for 6 hours	1200	500

2. ドリルの加工実験による切削特性の測定およびドリル寿命測定

ドリルの寿命測定のために、牛皮質骨に対して穴あけ試験を行った。Fig.2(a)に示すように、牛皮質骨試料には大腿骨骨幹部を用い、のこぎりを用いて輪切りにした後に、Fig.2(b)のように皮質骨を長さ 20 mm×幅 10 mm 程度の大きさに切り出した。皮質骨の厚さは 6 mm になるようやすり掛けをして形状を揃えた。皮質骨の内面および外面をビッカース硬度計で計測した結果は、どちらも 10 HV 程度であり、内外面で顕著な差は確認されなかった。

加工実験はフライス盤を用いて行い、回転数 100 rpm、送り速度 7 mm/min、穴深さ 4 mm とした。ドリルが変形するまで繰り返し加工実験を行い、変形した穴あけ回数を寿命とした。

Fig.3 に示すように、フライス盤上に取り付けられた六軸力覚センサ上の SS400 ブロックに、牛皮質骨を瞬間接着剤で貼り付け固定した。穴

あけ加工 1 回ごとに、5 分間の超音波洗浄を行った。その後、レーザー顕微鏡で刃部を観察し、刃部の変形が見られた時点で穴あけ試験を終了した。

穴あけ 1 回目、3 回目、5 回目のスラスト力を Fig.4 に示す。穴あけ 1 回目の時点で未処理のドリルのスラスト力が約 40 N であったのに対し、窒化処理を施した 2 種類のドリルでは約 60 N のスラスト力となり、未処理のドリルを上回った。穴あけ 3 回目でも同様に、窒化処理を施したドリルは未処理のドリルより高いスラスト力を示した。また、3 回目の穴あけで 3 時間の窒化処理を施したドリルが変形した。穴あけ 5 回目では、6 時間の窒化処理を施したドリルで高いスラスト力を示し、この時点で当該ドリルも変形した。さらに、Fig.4 に示した各回の最大スラスト力に注目すると、未処理のドリルが約 60 N だったのに対して、窒化処理を施したドリルでは 70–90 N の高いスラスト力を示した。未処理ドリルについて、変形するまで穴あけを繰り返したところ、10 回目で変形し 81 N のスラスト力を示した。一方で、変形時のスラスト力は、3 時間窒化処理を施したドリルで 94 N、6 時間窒化処理を施したドリルで 87 N であり、未処理ドリルに比べ窒化処理を施したドリルの方が高くなった。窒化処理を施したドリルでは、変形時のスラスト力が高かったことから、窒化処理により刃先近傍では硬度上昇が認められたが、チゼル部やその周辺では十分な形状安定化が得られなかったと考えられる。その一例として、Fig.5 に示すチゼル部の損傷が挙げられる。穴あけ 1 回目の時点で窒化処理を施したドリルでは、未処理のドリルと比較し、チゼル部および周辺刃部のわずかな変形が見られた。これにより、先端の鋭利さが失われ、被削材への食い込み性が低下したため、材料を切削する作用から押しつぶすような作用に移行し、スラスト力の増加につながった可能性がある。

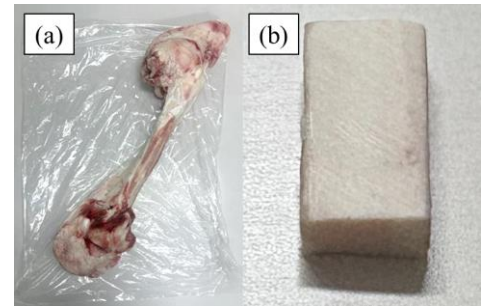


Fig.2 (a) Cow femur, (b) Cortical bone block



Fig.3 Experimental setup

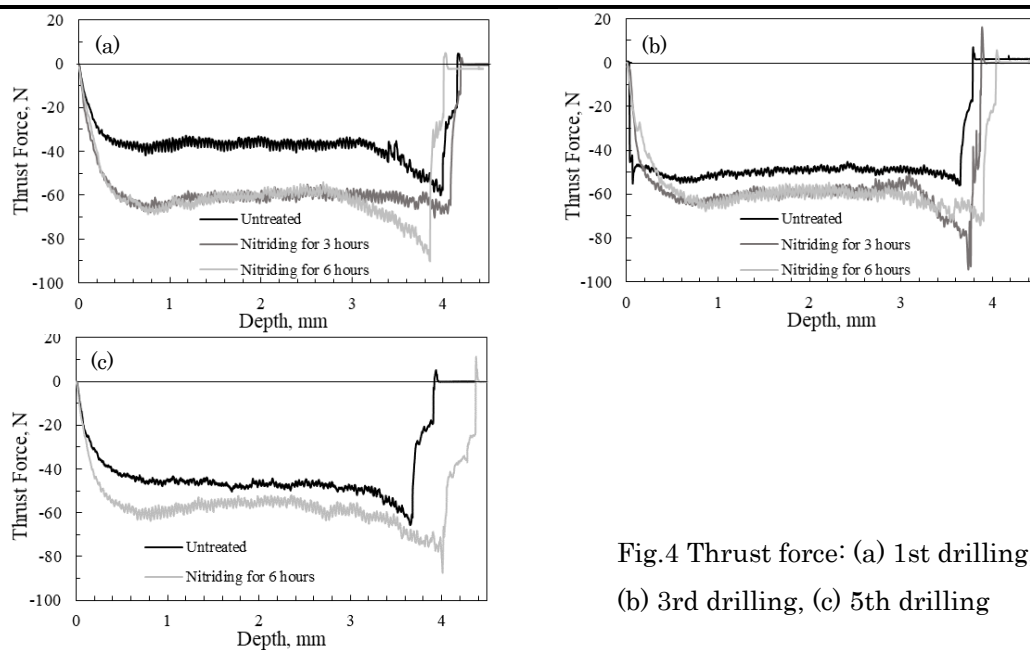


Fig.4 Thrust force: (a) 1st drilling, (b) 3rd drilling, (c) 5th drilling

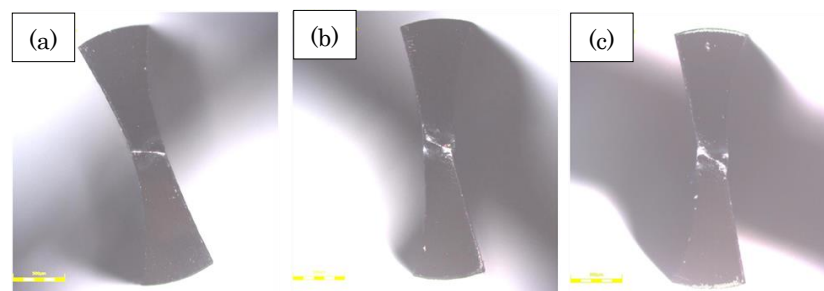


Fig.5 Photographs of drill tips: (a) untreated drill, (b) nitrided drill for 3 hours, (c) nitrided drill for 6 hours

3. 経費の使用状況

申請の通り、切削力の計測のための6軸力覚センサ（標準型）SFT200Dの導入とオーステナイト系ステンレス鋼製医療用ドリルの購入に使用した。オーステナイト系ステンレス鋼製ドリルの価格が当初予定よりも高くなったため、申請額を超えた分は共通機器使用料として申請していた分を充てた。

4. 将来展望

現状のプラズマ窒化処理による表面硬度の向上のみでは、ドリルの長寿命化は確認されなかった。そのため、切削時の発熱評価やX線回折による結晶構造の解析などにより、長寿命化に必要な要素を検討する。本研究では変形を寿命指標としたが、今後は切削性能の低下など、変形以外の要素も含めて寿命を定義する必要がある。また、ドリルの変形抑制についても検討する。ドリル寿命を適切に定義し、変形抑制手法を確立した後に、大気圧プラズマ窒化処理などへ応用展開し、実用化を目指す。

5. 成果の発表

引き続き、研究を継続し、本助成の研究成果を今年度中に日本金属学会で発表予定である。