

超音波クーラントを援用したチタン材の微細加工技術の開発

古木 辰也

鈴木 浩文 (中部大学), 藤井 一二 (日進工具), 森 里恵 (松井機工)

内視鏡手術や腹腔鏡手術などの開口部の小さな低侵襲医療は患者の術後負担が小さいことから、利用実績が増加している一方で、生体組織適合性が高いチタン材料製の鉗子等の小型化・高精密化の需要も増加している。しかしながら、チタンは熱伝導率が低いことや化学的に高活性なことから、切削加工時の工具温度上昇や切りくず凝着が生じやすく、小径切削工具の欠損を引き起こすため、微細加工の困難な材料である。本研究課題では、超音波振動援用クーラントおよび高耐熱温度の cBN エンドミルを提案し、チタン材料の高精密微細加工技術を開発した。

1. はじめに

従来の外科手術では腹部等を大きく切開することで治療を行うことが一般的であり、術中・術後の患者負担が大きいことが課題である。その一方で近年では、内視鏡手術や腹腔鏡手術といった腹部等に小さな穴を開け、内視鏡や鉗子等を挿入し治療する患者負担の小さい低侵襲医療が発達している¹⁾。さらに低負荷な治療のためには、鉗子の小型化が要求されており、図1のような円筒材料側面に微細な溝や鋸歯形状を機械加工しなければならない。さらに材料は生体親和性の高い純チタンであることが求められ、その難削性から高精度・高能率加工が難しい。そこで本研究では、切削加工時のクーラントに超音波振動を付与する超音波振動援用クーラントを供給するとともに、耐熱温度が優れる cBN を工具材料とした cBN エンドミルを用いた微細加工技術を開発した。



図1 鉗子先端形状の例

2. 提案する純チタンの微細加工方法

2.1 超音波振動援用クーラント

一般的な外部供給クーラントは工具切れ刃まで十分に供給されないことで(図2(a)), 特に熱伝導率の低いチタンの切削加工では切れ刃温度が上昇し、工具摩耗が促進される。本研究では、クーラントに超音波振動を付与することで、加工点付近までクーラントを供給する超音波振動援用クーラントを用いた。クーラントに超音波振動を付与することで液中に微細な気泡が形成されることで、冷却性や潤滑性、凝着剥離性の改善を期待できる²⁾(図2(b))。超音波振動をクーラントに付与する方法には、クーラントノズルに圧電素子を取り付けることで行った。圧電素子は高周波電源に接続されており、本研究の電源仕様は超音波周波数が 1MHz、電力が 40 W である。

2.2 cBN エンドミル

被削材である純チタンは熱伝導率が低いため、切削時に切れ刃温度が上昇しやすく耐熱温度の低い切削工具を用いた場合、切れ刃摩耗が促進する。一般的に工具材料として使用されている超硬合金の耐熱温度は 1000°C 以下であるため、本研究では耐熱温度が 1300°C と高温である cBN を用いた。cBN は超硬合金と比べて約 3 倍の硬度を有するので耐摩耗性も高い。cBN エンドミルの製作方

法の模式図を図3に示す。cBNチップと超合金製シャンクを銀ろうにより接合し、cBNチップにレーザにより切れ刃形状を創成する。その後、ダイヤモンド砥石により切れ刃をシャープにすることで製作した。

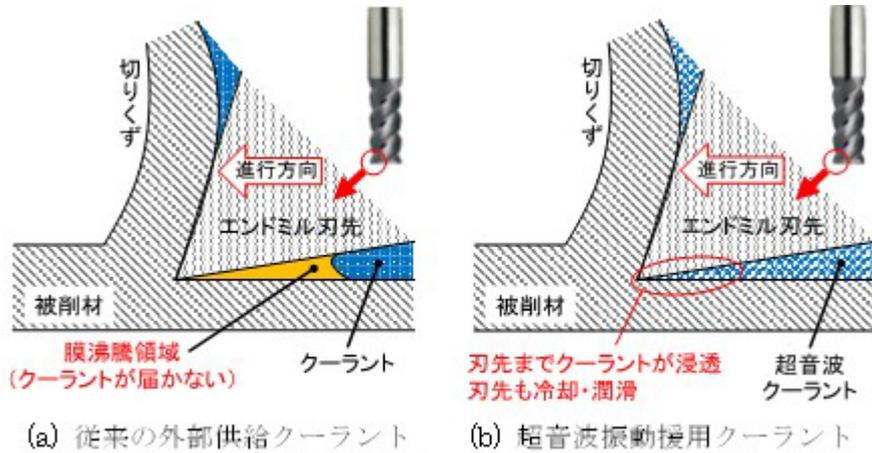


図2 超音波振動援用クーラントの効果

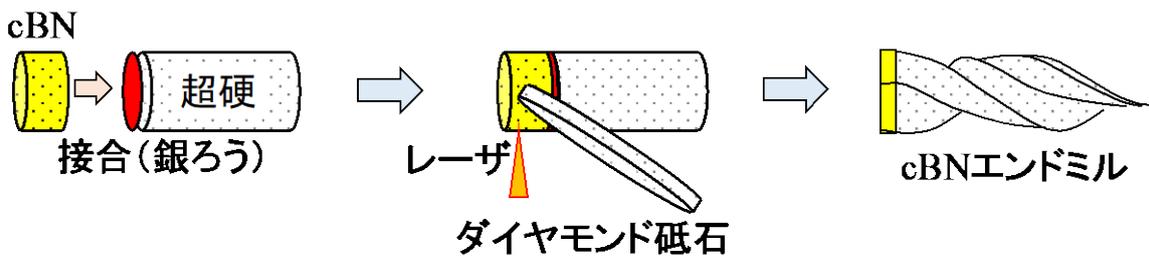


図3 cBN エンドミルの製作方法

3. 純チタン板の微細加工実験による提案法の有効性検証

3.1 穴あけ加工による超音波振動援用クーラントの有効性検証

超音波振動援用クーラントの効果を確認するために、純チタン板に対して超硬ドリルを用いて穴あけ加工を行った。使用したドリルは超合金製ドリルであり図4に外観写真を示す。工具外径は $\phi 0.3$ mm、刃長は0.75 mm、刃数は2枚である。実験条件は以下のとおりである。被削材は純チタンであり、厚みは $t0.5$ mm、ドリルの回転数を10000, 20000, 35000 min^{-1} に変更して実験した。切込み深さは0.65 mmであり、0.2 mm毎にステップ加工した。切り込み速度は0.5 mm/min、クーラントはソリューションであり、超音波振動付与の有無（有：40 W、無：0 W）の2条件である。加工機には同時4軸制御超精密加工機 ULG-100D(SH3)を用いた。切削加工中の切削抵抗を測定するために、純チタン板は三成分切削動力計上に黄銅製ジグを介して図5に示すように固定した。

穴あけ実験における切削抵抗の測定結果を図6に示す。切削抵抗には工具軸方向の切削抵抗である背分力を採用している。回転数が35000 min^{-1} の高速領域では超音波ありの方が、切削抵抗が大きくなっている。この理由について考えると、高速回転では摩擦による発熱が増大しているはずである。切削点付近の発熱量が大きくなることで、工作物側の温度も上昇していると考えられる。工作物が温度上昇すると、工作物の剛性は低下し切削力による変形が容易になる。すなわち、工作物が変形することで、指令した切り込み量に対して実際の切り込み量が小さくなるので、単位時間あたり

の除去量も小さくなる。したがって、単位時間あたりの除去量が小さいことは、発熱が大きいと考えられるため、超音波振動を付与した方が、冷却効果が高いといえる。さらに、切込み深さが 0.6 mm から 0.65 mm に進行する過程を見ると、超音波振動を付与した場合には切削抵抗が急激に小さくなっており、ここでドリルが純チタン板を貫通していることがわかる。その一方で、超音波振動させない場合には、切削抵抗は増加しており、貫通していないことがわかる。この点からも、超音波振動させない場合には、切り残しが大きい加工が行われていたと考えられる。以上より、超音波振動援用クーラントの冷却効果が優れていることを確認できた。

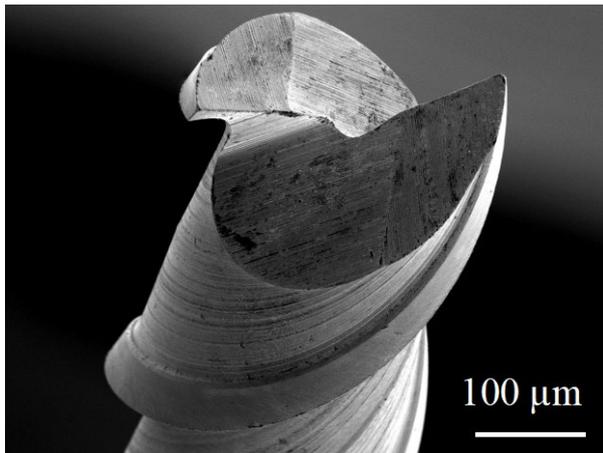


図4 超硬ドリルのSEM画像

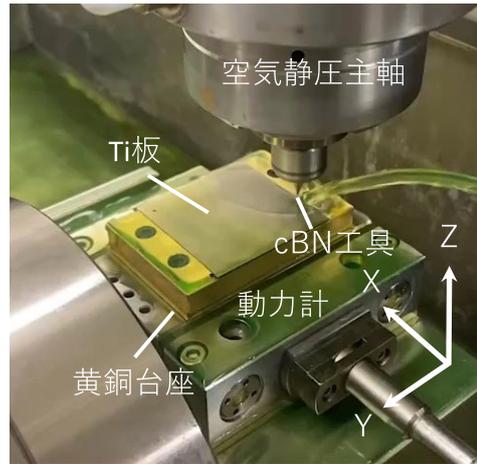
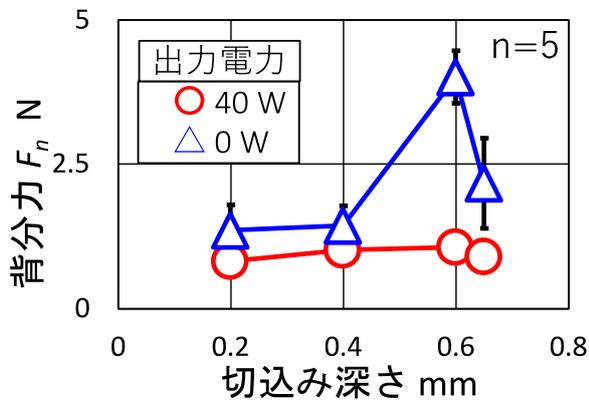
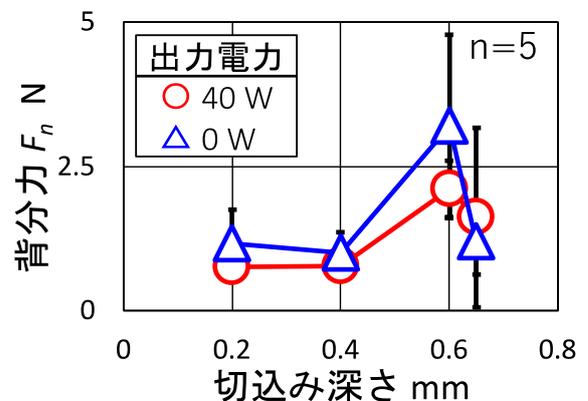


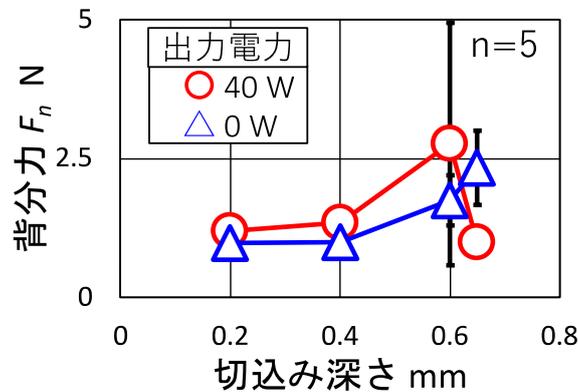
図5 ドリル加工実験の外観



(a) 回転数 10000 min⁻¹



(b) 回転数 20000 min⁻¹



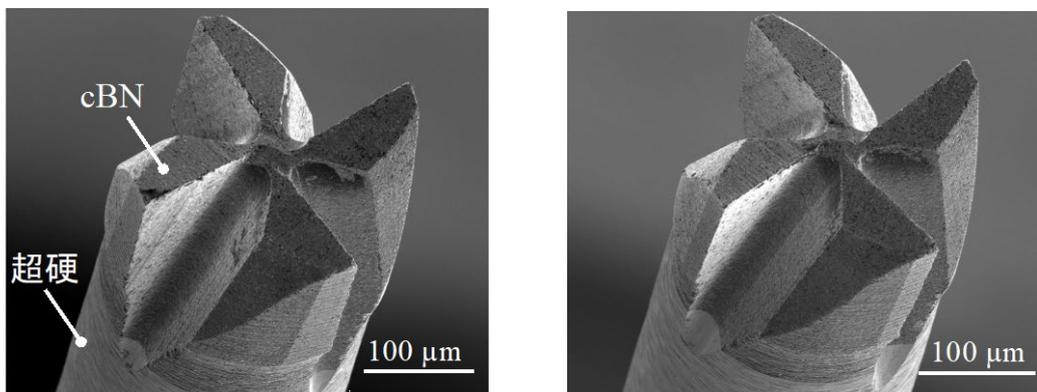
(c) 回転数 35000 min⁻¹

図6 純チタンの穴あけ加工において超音波振動援用クーラントが切削抵抗に与える影響

3.2 cBN エンドミルによる小判溝加工実験

本研究では図7に示す cBN エンドミルを試作した。外径は $\phi 0.3$ mm, 刃長は 0.13 mm, すくい角は 0° , 5° の 2 種類である。刃数は 4 枚である。cBN エンドミルの有効性検証では, 実際の薄肉パイプ材の加工を想定し, 厚さが $t0.1$ mm の薄板に対して小判形状の溝加工実験を行った。図8 (a)に示すような溝幅が 0.3 mm の貫通溝に cBN エンドミルを挿入し, 溝幅が 0.5 mm になるように側面切削加工した。板厚 $t0.1$ mm の純チタン板の用意は, 板厚 $t0.5$ mm の純チタン板に対して外径 $\phi 5$ mm と $\phi 0.3$ mm のエンドミルを用いて溝加工を図8 (b)に示すように行った。cBN エンドミルによる小判溝加工条件は以下のとおりである。被削材は厚さ $t0.1$ mm の純チタン板, 工具回転数は 10000, 20000, 35000 min^{-1} に変更して実験した。工具径方向切り込み量は 0.1 mm, 切込み深さは板厚と同じ 0.1 mm, 送り速度は 1 mm/min, クーラントはソリューションであり, 超音波振動付与の有無 (有 : 40 W, 無 : 0 W) の 2 条件である。加工機は前節と同じである。

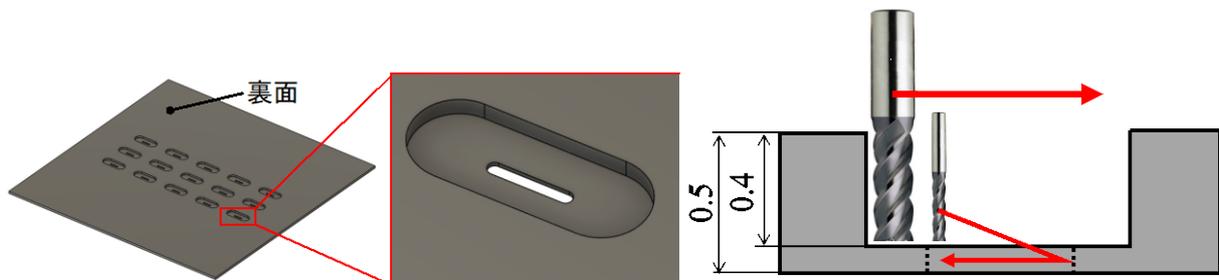
切削抵抗の測定結果を図9に示す。 5° のすくい角を有し, 比較的小さな切削速度の領域で超音波振動援用クーラントの効果が発現され, 切削抵抗が小さくなっていることがわかる。その一方で, すくい角が小さく, 高速回転領域では, 超音波クーラントの効果が見られない。さらに小判溝のエッジ部に生じたバリ (図10) の高さをレーザプローブ式3次元形状測定器で測定した結果を図11に示す。すくい角を設け, 低速回転領域でバリ高さは小さくなっており, 切削抵抗と同じ傾向を示した。以上より, 超音波振動援用クーラントを適用することで切削抵抗の減少やバリ発生抑制に効果があることがわかり, また cBN エンドミルによる小判溝の創成が可能であることもわかった。



(a) すくい角 : 0°

(b) すくい角 : 5°

図7 試作した cBN エンドミルの SEM 画像



(a) 薄肉試験片の外観

(b) 試験片の準備方法

図8 cBN エンドミルによる小判溝加工実験に用いる薄肉試験片の準備方法

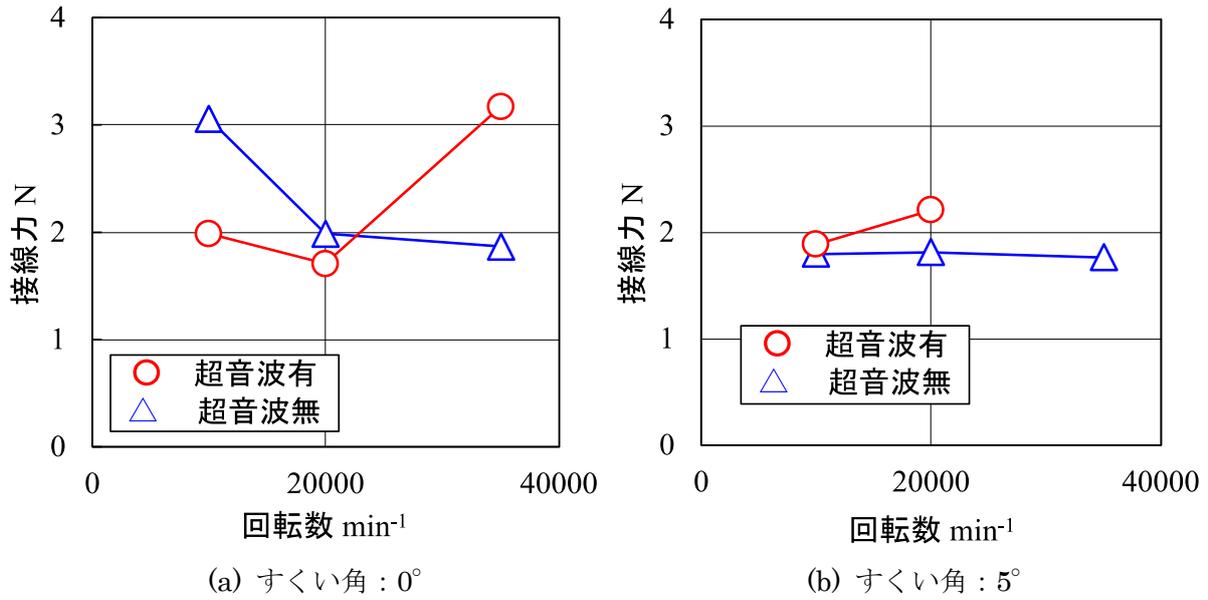


図9 cBN エンドミルによる小判溝加工において超音波クーラントとすくい角が与える影響

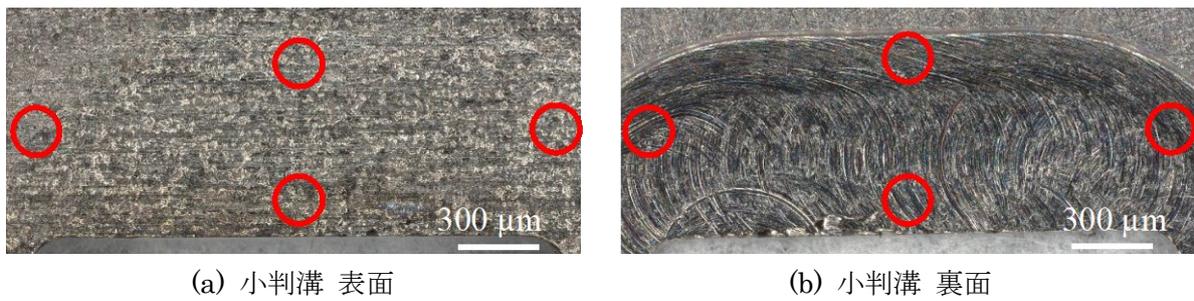


図10 cBN エンドミルで加工した小判溝の外観

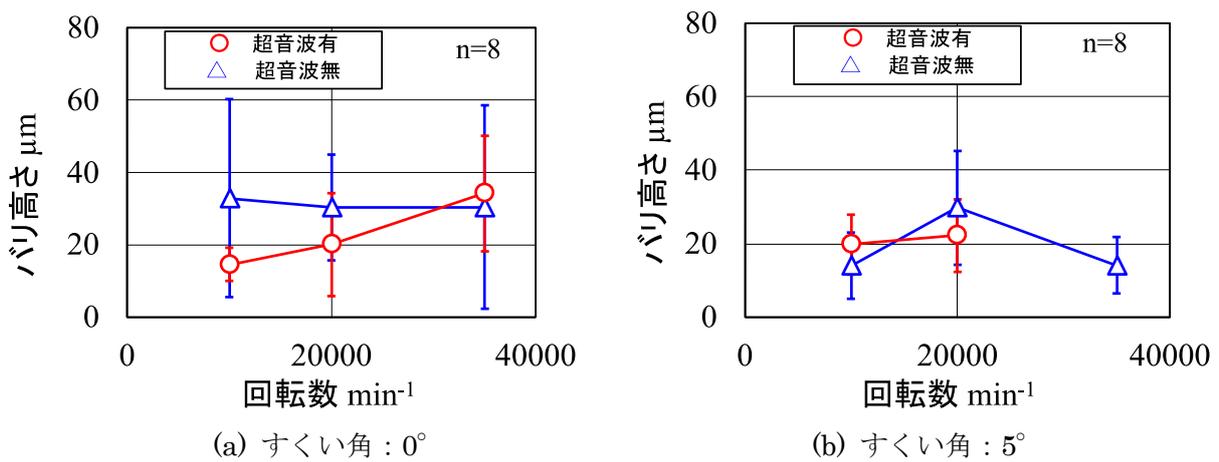


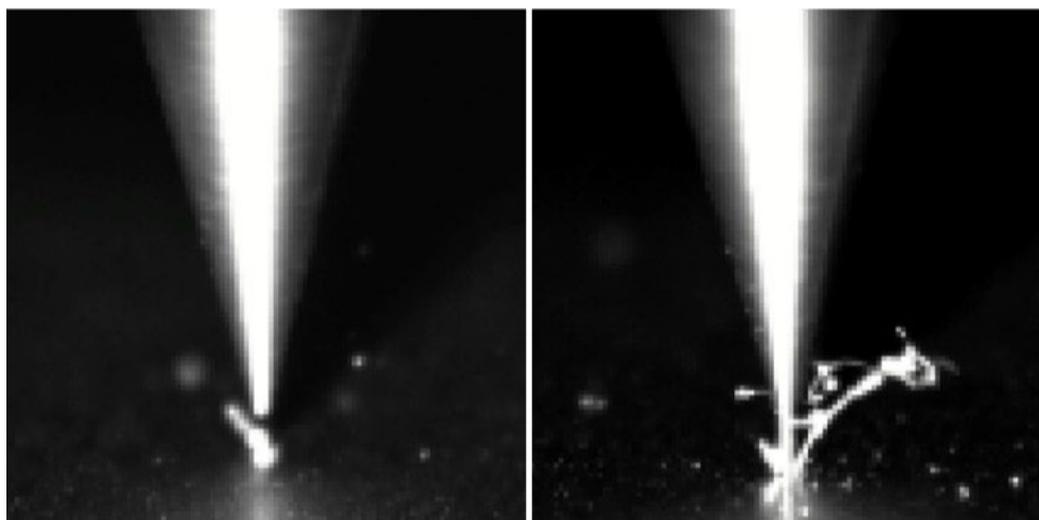
図11 小判溝エッジ部に生じたバリの高さの測定結果

3.3 穴あけ加工時のエンドミル挙動の評価

試作したエンドミルで純チタン板の穴あけ加工を行っている際の工具挙動の観察を、高速度カメラを用いて行った。使用した工具は外径がφ0.3 mmの超硬エンドミルとcBN エンドミルであり、

すくい角は 0° である。両工具を用いて厚さ $t0.5$ mmの純チタン板に対して穴あけ加工を行った。加工条件は以下のとおりである。回転数は 15915 min^{-1} 、送り速度は 32 mm/min 、切込み深さは 0.8 mm で、 0.09 mm 毎のステップ加工である。高速度カメラによる観察を行うためクーラントは無供給である。加工機には立形3軸マシニングセンタ S300Xd1 である。

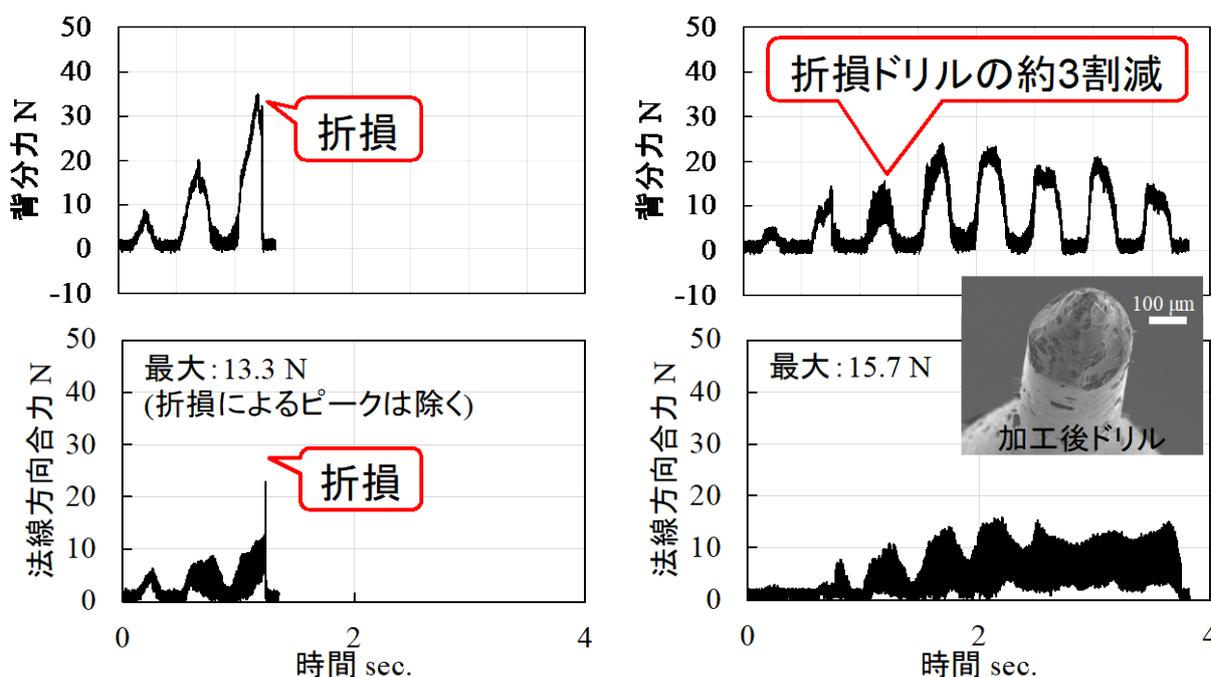
図1 2に超硬ドリルによる穴あけ加工時の高速度カメラ動画の抽出画像、図1 3に切削抵抗を示す。図1 2(a)の No.1 工具では切りくずが排出されず、首下の根本部において折損した。一方で、No.2 工具では連続的な切りくずが生成された。両者の違いは、動的振れによる影響と考える (No. 1: 振れ大, No. 2: 振れ小)。工具の振れが大きい場合、法線力の最大値が大きくなると思われたが、



(a) 超硬エンドミル No. 1

(b) 超硬エンドミル No. 2

図1 2 動的振れ量が異なる超硬エンドミルの挙動

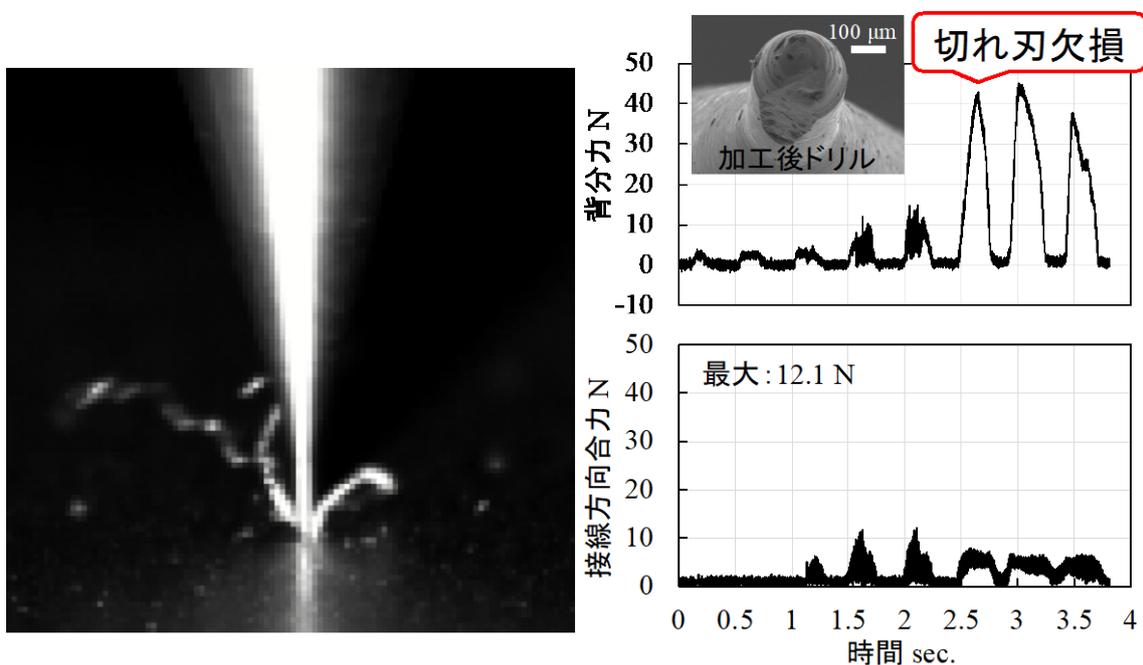


(a) 超硬エンドミル No. 1

(b) 超硬エンドミル No. 2

図1 3 超硬エンドミルによる純チタン板の穴あけ加工時の切削抵抗

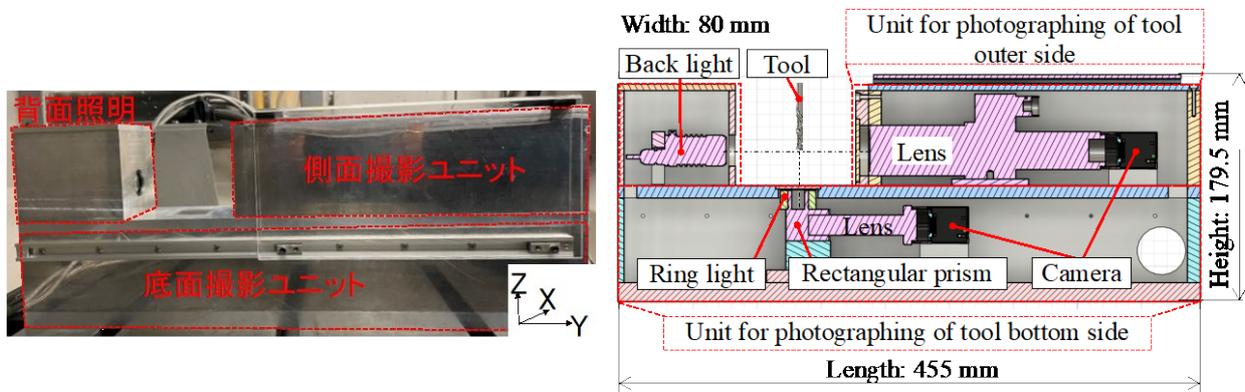
法線力に大きな違いはなく、背分力に違いが見られた。しかし、背分力を見ると、連続的な切りくずが生成された No. 2 工具は高周波成分の振幅が大きくなっているが、切りくずが生成されていない No. 1 工具では高周波成分がほぼ見られない。したがって、背分力の大きさの違いの根源は工具の動的振れであるが、切削されているか、されていないかを切削抵抗の周波数成分を見ることで評価できることがわかった。cBN エンドミルの穴あけ結果を図 1 4 に示す。cBN エンドミルでは連続的な切りくずが生成され、このときに大きな工具振れやたわみは見受けられなかった。切削抵抗も、加工中盤において切れ刃欠損が生じたと思われる点で値が大きくなっているが、超硬エンドミルと大きな違いはないように思われる。連続的な切りくずが生成されたエンドミルの実際の振れ量がどの程度であったかを測定した。測定には図 1 5 のオンマシン工具形状測定器³⁾を使用した。回転中のエンドミルの動的振れ量は $6 \mu\text{m}$ であり、この程度の振れ管理は最低限必要であるといえる。



(a) 加工時の工具挙動

(b) 切削抵抗

図 1 4 cBN エンドミルによる純チタン板の穴あけ加工時の工具挙動と切削抵抗



(a) オンマシン工具測定器の外観

(b) 測定器の内部構造

図 1 5 オンマシン工具形状測定器による動的振れ量の測定

4. おわりに

低侵襲医療技術の高度化に寄与する純チタン製鉗子の高精密微細加工技術の確立を目的として、超音波振動援用クーラントおよびcBNエンドミルによる純チタン板の穴あけ・小判溝加工を行い、以下の結果を得た。

1. 超音波振動援用クーラントの供給により、切削抵抗は減少する。ただし、高い切削速度条件下では十分に効果を発揮できない場合がある。
2. バリの大きさと切削抵抗にはおおよそ相関が見られ、超音波振動援用クーラントによりバリ発生を抑制できることが示唆された。
3. 工具振れは背分力に影響を与えるとともに、工具折損の危険性を大きく高めるため、数 μm レベルの動的振れ量の管理が必要である。
4. 切れ刃欠損（折損は除く）による切削抵抗の変化は小さく、切削動力計を使用せずインプロセスで評価することは難度が高い。工具が微細であり目視評価も困難であることから、工具振れや摩耗、欠損評価にカメラを使用することは有効であると考えられる。

今後は、超音波振動援用クーラントとcBNエンドミルを併用した場合の工具寿命について調査を続ける。

参考文献

- 1) Mordor Intelligence: Intravascular Catheter Market - Growth, Trends, and Forecasts (2023 - 2028), 2023.
- 2) 磯部浩巳他, 研削液に超音波振動エネルギーを重畳した研削加工- 第2報 研削点温度に与える効果 -, 精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2016), p.123-124.
- 3) Tatsuya Furuki et al., In Situ Evaluation of Drill Wear Using Tool Image Captured on Machining Center, International Journal of Automation Technology, 18, 2 (2024), p.181-188.