

ステンレス鋼のヘール加工

岩本竜一*，栗毛野裕太*

Non-rotational Cutting Process for Stainless Steels

Ryuichi IWAMOTO and Yuta KURIGENO

ステンレス鋼（SUS304）を対象にヘール加工の実験を行った。この結果、ビビリ痕（波長：9～14 μm 程度）とうねり痕（波長：500～600 μm 程度）の2種類の振動痕が発生した。工具先端にDLCコーティングを施すこと等によりビビリ痕を低減させることができた。また、工具ホルダに制振合金（M2052）を採用することにより、うねり痕の波長をより長くすることができ、シール面の密着性向上に寄与できた。

Keyword：ヘール加工，ステンレス鋼，切削抵抗，ビビリ痕，表面粗さ

1. 緒言

電気・電子・半導体関連の製造工程において、高真空状態を維持することができるアルミ合金製またはステンレス鋼製のチャンバー状の製造装置が広く使用されている¹⁾²⁾。これらの製造装置は、接合面（以下、シール面）にOリングを介して密封することで内部の真空を維持している。シール面の加工では従来エンドミル工具による溝切削が慣用的に行われてきたが、その加工面には切削工具の運動軌跡としての円弧状切削痕が残ることが避けられず、この切削痕に沿って微かに気体がリークする恐れが指摘されるようになった。この対策として、エンドミル溝加工後に円弧状の切削痕を除去するため、手作業によるシール面の磨きを行っているのが現状である。上述のような製造装置は、製品となるフラットディスプレイパネル等の大画面化等に伴って製造装置本体が大型化しているため、溝全長もメートル単位となり手作業によるシール面の磨きには長時間を要するネック工程となっている。近年、これらの課題を解決する方法としてヘール加工の活用が注目されている³⁾⁴⁾。

ヘール加工は、直線刃のカンナのような工具をマシニングセンタ主軸に取付けて、工具を回転させずに直線運動させることで運動方向と平行な加工筋目をシール面に創成することを目的として行われる。この方法により得られる加工筋目は、気体のリーク方向と直交する方向となるため、高真空を維持するための堤防状のテクスチャ構造としての役割が期待されている。

このような状況から、電気・電子・半導体関連産業の集積がある本県内の中小企業においても、特にステンレス鋼を対象として、ヘール加工対応のマシニングセンタを導入し、参入を図りたいとの相談が増加している。しかし、ヘール加工は切削幅が大きくビビリ振動が発生しやすいことが知られており、県内中小企業においては、容易に参入できる状況ではない。

そこで本研究では、当所の汎用のマシニングセンタを用いて、ヘール加工のモデル実験を行い、加工時の切削抵抗や得られた加工面の表面性状等を調べたので、この結果について報告する。

2. 実験方法

2.1 ヘール加工機の仕様

図1に実験に用いた工作機械を示す。当所では、ヘール加工に対応できる工作機械を所有していない。そこで、汎用のマシニングセンタを用いてヘール加工のモデル実験が行える装置を試作した。当初は、主軸にヘール工具を取付けた上で物理的に回り止めをして実験を行う計画だったが、ヘール加工に伴う高い切削負荷によって主軸セラミッ

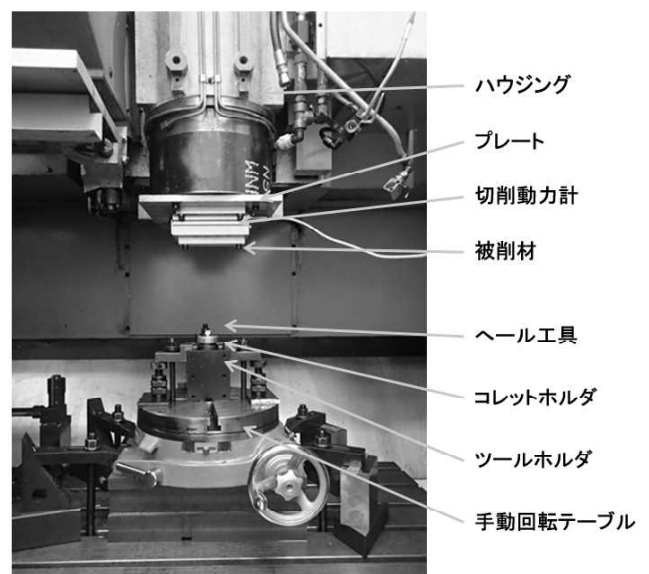


図1 ヘール加工機の仕様

* 生産技術部

クベアリングが破損する可能性を工作機械メーカから指摘されたため、図に示すように、ヘール工具は、主軸には固定せずベッド上の回転テーブルに上向きに固定した。主軸周りの切削油剤ノズル等は取外し、主軸ハウジング端面を露出させ、端面のノズル取付け穴等を利用して切削動力計および被削材を釣り下げる構造とした。これにより天井に取付けられた被削材を上向きのヘール工具が引っ掻くような加工方式となる。この実験方法では、主軸が使えないために例えば正面フライス等を使った被削材の平行出しができない。よって、事前に平面研削盤で被削材を仕上げ加工しておき、XYテーブルの運動による工具-被削材間距離の変動が、およそ0.01mm以下程度まで小さくなるよう調整した。さらに、同じ切込み量で数回切削パスを重ねることによって、切削条件の安定化を図った。

2. 2 被削材

実験に用いた被削材は、ステンレス鋼SUS304_No. 2Bの冷間圧延材である。表1に被削材の成分を示す。

図2に実験に用いた被削材を示す。幅50mm、厚さ16mmの定尺材を約150mm長に切断後、切削動力計に固定するため

表1 被削材成分

| | Chemical composition(%) | | | | | | |
|-----------|-------------------------|------|------|------|------|------|------|
| | C | Si | Mn | P | S | Ni | Cr |
| SUS304_2B | 0.04 | 0.28 | 1.79 | 0.32 | 0.18 | 8.78 | 18.6 |

※ミルシートより抜粋

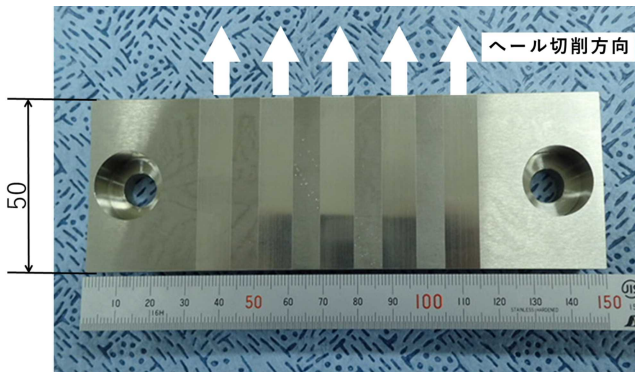


図2 被削材



図3 超硬ソリッド工具

表2 切削条件

| | | |
|--------------------------------|------------------------|--------|
| Cutting speed | 500, 750, 1000 | mm/min |
| Depth of cut | 2, 4, 6 | μm |
| Cutting fluids (Supply method) | A:Tapping splay Dry | |

2箇所を取付け穴を設けた。実験では、図に示すように一つの被削材に対して5本のヘール溝加工を行った。後述する実験結果は、全て、この5本のヘール加工溝の平均値である。

3. 実験結果および考察

3. 1 超硬ソリッド工具

3. 1. 1 使用工具および切削条件

図3に実験に使用したヘール工具を示す。超硬K種のソリッドタイプで、県内企業において試用されていたものと同タイプとした。工具幅は10mm、すくい角4°、逃げ角7°である。

表2に切削条件を示す。なお、主軸周りの切削油剤ノズルを取外したため、切削油剤の供給はスプレーによる。

3. 1. 2 表面粗さ

加工した被削材の表面粗さを図4、5に示す。図4は乾式切削時、図5はタッピングスプレー供給時の表面粗さを示す。両図より、切込みを大きくすると表面粗さが小さくなる結果が得られた。県内企業への聞き取りによりヘール加工面の仕上げ面粗さの要求精度はRa0.8μm以下であった。このことから、切込みを4μm以上とすることが望ましい。しかし、切込みを大きくし過ぎると、工具が大きく欠損(切込み30μm程度)した。このため加工状況を注視しながら最大切込み設定6μmとした。

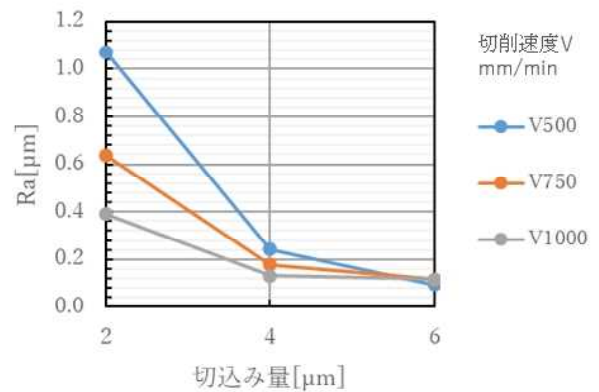


図4 表面粗さ (Dry)

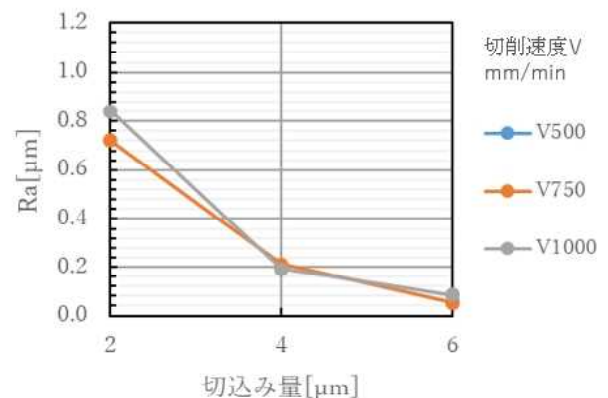


図5 表面粗さ (タッピングスプレー)

また、図4の乾式切削時では、切削速度を大きくしても表面粗さが小さくなる傾向が認められたが、切込みが4 μm 以上の場合には、切削油供給の有無による違いは認められなかった。

工具刃先丸みの形状測定結果を図6に示す。図より工具刃先は先端から約4 μm の範囲で刃先丸みがあることがわかる。これより切込みが4 μm 以下の範囲では、工具の先端の丸み部分(負のすくい角)で切削することになってしまう。したがって、切込み4 μm 以下の場合には、押しならし加工を主体とする加工形態となり、切込み4 μm 以上の場合には、切削を主体とする加工形態となっていることが推察される。

表面粗さの測定結果から認めることはできなかったが、加工面には図7の顕微鏡観察写真(偏光照明)に示すような波長9~14 μm 程度(100 μm □格子あたり7~11本の筋目)の「ビビリ痕」が認められた。このビビリ痕の解消の対策として図3の工具に薄膜のDLCコーティングを施した。これはDLC皮膜特有の摩擦抵抗低減効果に期待したものである。この工具で加工した被削材の顕微鏡観察写真を図8に示す。図から明らかのようにビビリ痕が解消されていることがわかる。図4、5の表面粗さ測定結果から、切削速度および切込みの増加により表面粗さが小さくなっているが、ビビリ痕も同時に低減していることが顕微鏡観察結果より確認できている。なお、厚膜のDLCコーティングを施すと刃先丸みが膜厚分増加する可能性があることから、ビビリ痕低減のためには、コーティング層の薄膜化に加え切削油剤の供給による摩擦抵抗低減などの対策が必要と考えられる。

このビビリ痕とは別に、焦点移動法による顕微鏡観察結果から図9に示すような「うねり痕」が認められた。このうねり痕の波長は500~600 μm 程度(振幅0.8 μm 程度)であった。DLCコーティングや切削油剤の供給など、ビビリ痕の対策で効果のあった摩擦抵抗低減対策では、このうねり痕を改善することができなかった。

3. 2 制振合金製工具

3. 2. 1 使用工具および切削条件

超硬ソリッド工具では、うねり痕を低減できなかったため、新たに制振合金⁵⁾を採用したヘール工具を製作した。これを図10に示す。ホルダは制振合金(M2052)製で、チップは超硬M種のスローアウェイタイプで、市販のチップを活用し、安価に適用できるように工夫した。工具幅は10mm、すくい角4°、逃げ角7°である。

表3に切削条件を示す。超硬ソリッド工具において切削速度および切込みが大きい場合の方が、表面粗さが向上したため、表2の条件より切削速度および切込みをやや増加させている。被削材が天釣り状態のため、切削点に油剤が供

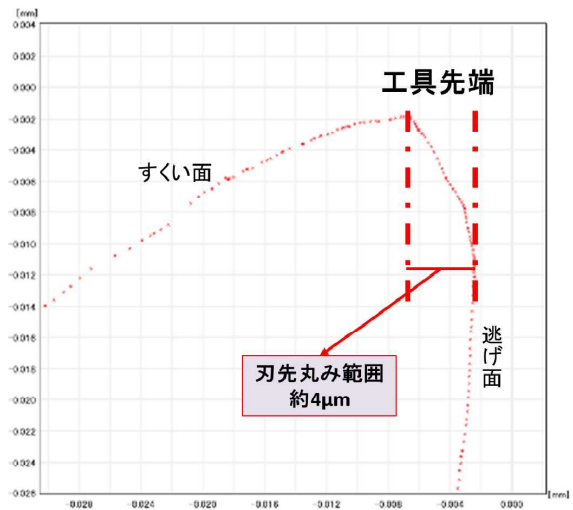


図6 工具刃先丸み形状

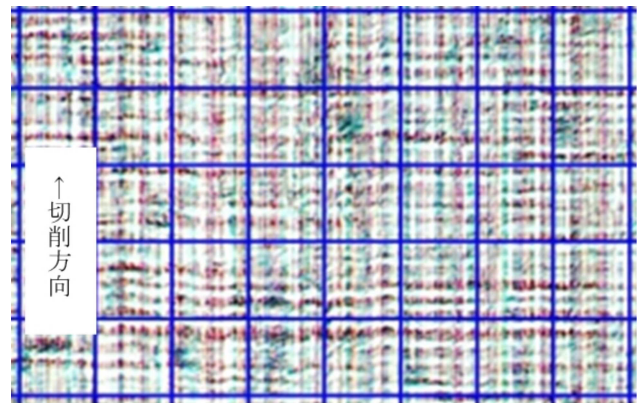


図7 被削材表面の顕微鏡写真



図8 被削材表面の顕微鏡写真(DLCコーティング)

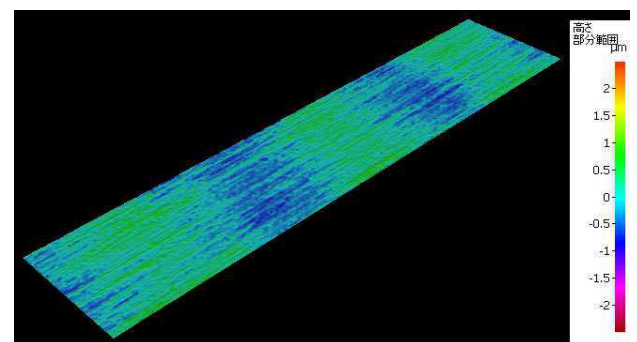


図9 うねり痕



図10 制振合金工具

表3 切削条件

| | | |
|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|
| Cutting speed | 500,750,1000,1500, 2000,3000,4000 | mm/min |
| Depth of cut | 2,4,6,8,10 | μm |
| Cutting fluids (Supply method) | A:Tapping splay | |
| | B:Machine oil | 2750mm ² /S (Brush paste) |
| | C:Machine oil | 720mm ² /S (Brush paste) |

給されやすいよう、やや高粘度の不水溶性油剤等を選択し、油剤の供給は、スプレーまたは刷毛塗りとした。

3. 2. 2 表面粗さ

制振合金工具を用いて加工した被削材の表面粗さを図11～13に示す。図11はタッピングスプレー、図12はプレス油、図13は不水溶性切削油剤を使用したものである。これまでの実験結果から、特に切込みの小さい範囲における加工形態が押しならし加工となる可能性があることや、被削材が天吊り状態であることも考慮し、高粘度のプレス油等も切削油剤として実験に使用した。

タッピングスプレーを使用した場合、切削速度が遅い領域で表面粗さが最良の結果となった。プレス油を使用した場合、全域で安定した表面粗さが得られた。不水溶性切削油剤を使用した場合、低切込みでは良好な結果が得られたが、切込みが大きくなると粗さが増大した。

3. 2. 3 切削抵抗

制振合金工具を用いて加工した時の切削抵抗を図14～16に示す。タッピングスプレー、プレス油、不水溶性切削油剤の全てにおいて、切削速度の違いによる切削抵抗の大きな変化は認められなかった。切込みの影響は、切込みが大きくなるとやや切削抵抗が大きくなる傾向は認められるものの、その差はわずかで一部では逆転しているデータもあった。

切削抵抗の絶対値は、主分力が400～700N程度、背分力は200～400N程度であり、いずれもタッピングスプレー使用時にやや大きくなる結果となった。プレス油使用時は、

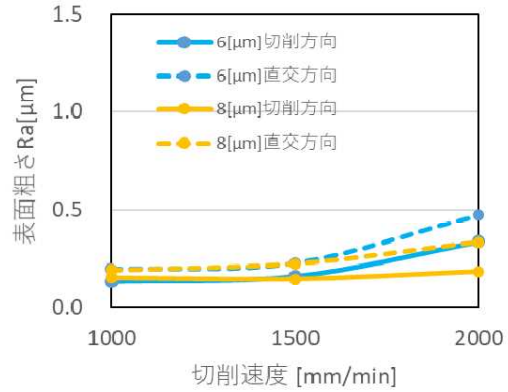


図11 表面粗さ (タッピングスプレー)

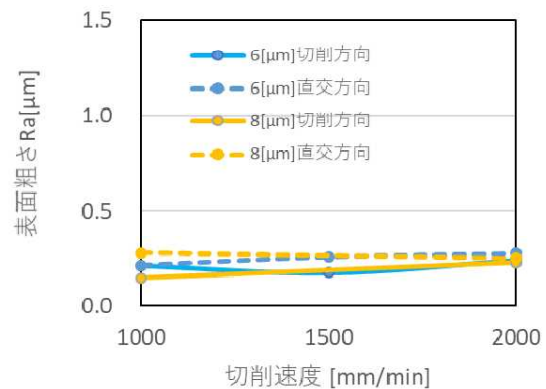


図12 表面粗さ (プレス油)

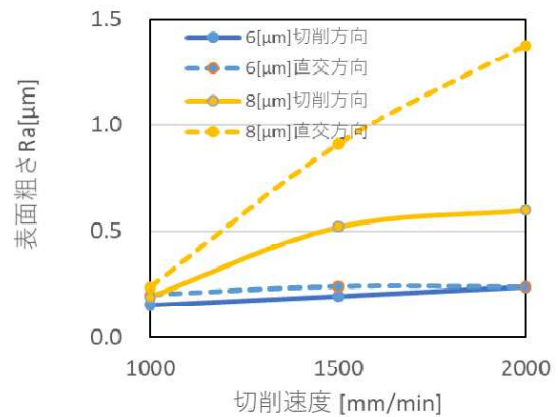


図13 表面粗さ (不水溶性切削油)

切削条件を変えてもほとんど変化が認められなかった。

3. 2. 4 残留応力

制振合金工具を用いて加工した時の残留応力の測定結果を図17～19に示す。ほとんどの条件で引張りの残留応力が測定された。

疲労強度の向上などを目的として、ショットピーニングなどの表面処理を行い、圧縮の残留応力を付加する適用例は数多くあるが、本研究で対象としているシール面のような場合、圧縮・引張りに関わらず加工面に大きな残留応力が

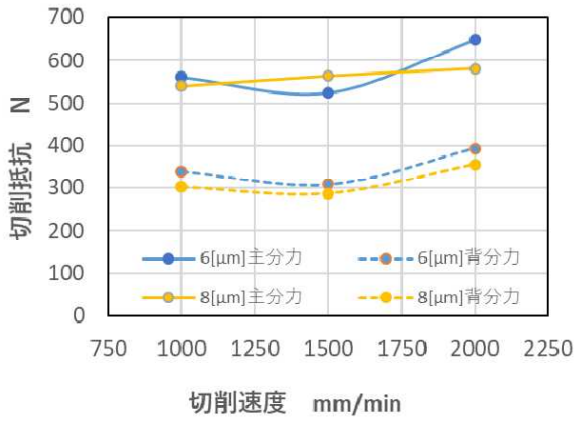


図14 切削抵抗 (タッピングスプレー)

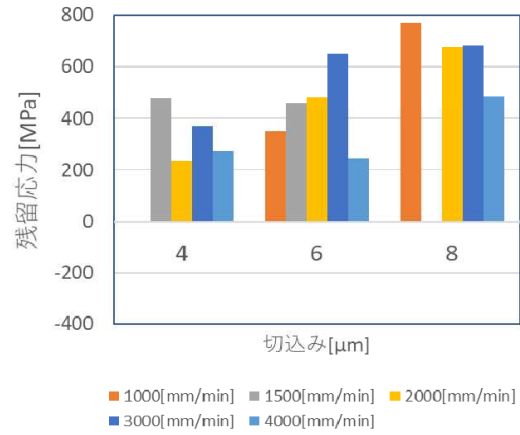


図17 残留応力 (タッピングスプレー)

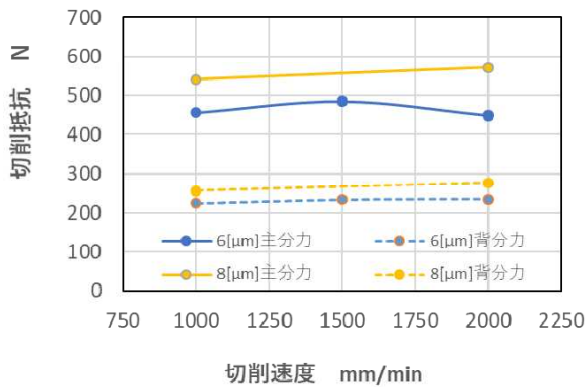


図15 切削抵抗 (プレス油)

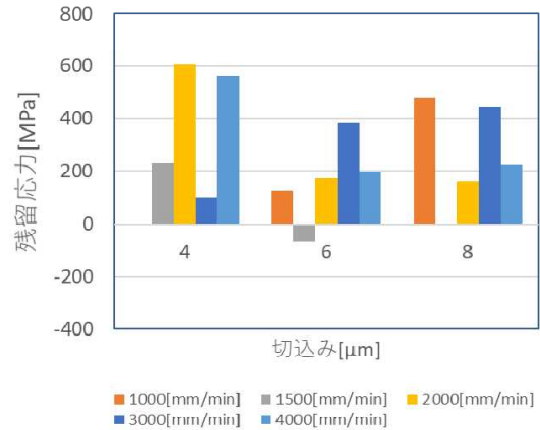


図18 残留応力 (プレス油)

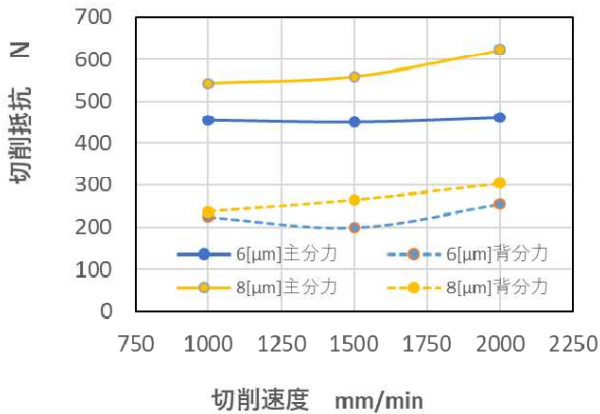


図16 切削抵抗 (不水溶性切削油)

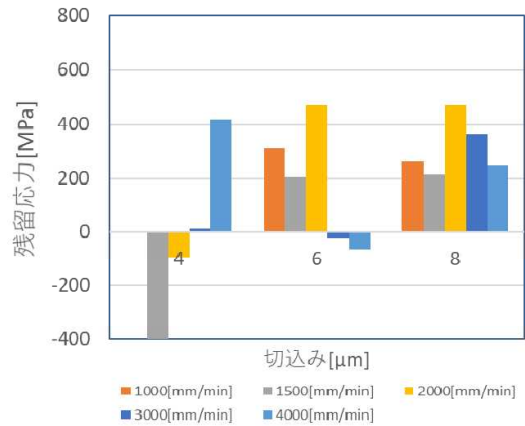


図19 残留応力 (不水溶性切削油)

が残ると、加工後に反りの原因となりやすいため、シール面の密着性を高めるためにも可能な限り残留応力が小さい方が望ましい。このような見地から、実験を行った範囲内では、プレス油を使用して切込み6μm、切削速度1500mm/min程度が最善である。不水溶性切削油を使って切込み6μm、切削速度3000~4000mm/min程度でも残留応力は良好であるが、仕上げ面粗さの点でやや劣る。

一般に、切れ味の良い切削加工面が引張りの残留応力となり、研削加工などの強加工面が圧縮残留応力となること

が知られている⁶⁾。

ここで、図3の超硬ソリッド工具を用いて加工した時の切削抵抗と残留応力の関係を図20, 21に示す。図より、超硬ソリッド工具使用の場合、ほとんどが圧縮の残留応力であり制振合金工具使用の場合と応力方向が逆である。この原因として、剛性の高い超硬ソリッド工具が被削面に強く作用して圧縮残留応力が付与されたと考えている。

一方、超硬ソリッド工具使用時の切削抵抗の絶対値は、主分力が500~800N程度、背分力が200~400N程度であり、

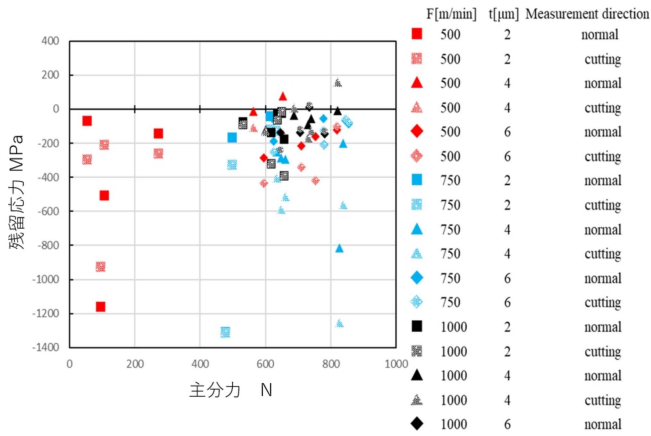


図20 主成分と残留応力

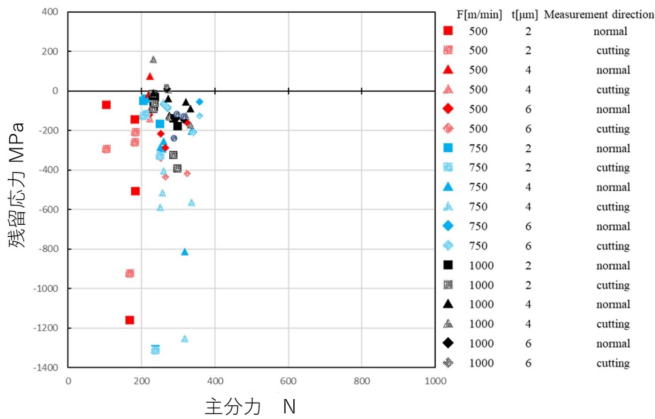


図21 背成分と残留応力

制振合金工具使用時に比べて主成分がやや大きいものの、特に、残留応力と関係が深いと考えられる背成分については大差が無いことから、切削抵抗の大小が、直接、被削材表面の加工変質層に影響を与えたとは考えにくく、今後さらに検討を要する。

3. 2. 5 うねり痕対策

制振合金工具を用いて加工した結果、3. 1. 2項で述べた波長500~600μm程度のうねり痕は、制振合金工具を使用することで図22のように、波長を約2300μm（4~5倍程度）に変更することができた。図より、ヘール工具による加工筋目が加工部全長にわたって確認できており、シール面の密着性が高まることが期待される。一方、振幅については、超硬ソリッド工具使用時と同じく0.8μm程度となり、これを低減することはできなかつた。なお、ビビリ痕については、制振合金工具を使用しても悪化することは無くビビリ痕は発生しなかつた。

4. 結 言

超硬ソリッド工具および新規に製作した制振合金工具を用いてヘール加工実験を行い、以下のことが明らかとなった。

- (1) ヘール加工面には、ビビリ痕（9~14μm程度）とうねり痕（500~600μm程度）の2種類の振動痕が発生した。

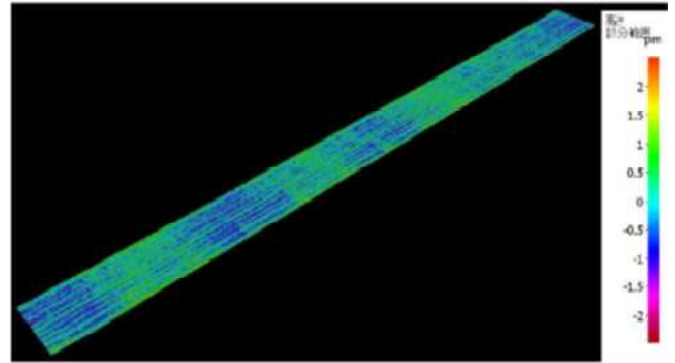


図22 うねり痕（対策後）

- (2) 工具先端にDLCコーティングを施すなどの摩擦抵抗低減の工夫により、ビビリ痕を低減させることができた。
- (3) 工具ホルダに制振合金を採用することにより、うねり痕の波長をより長くすることができ、密着性の向上に寄与できた。

謝 辞

本研究の推進にあたって、鹿児島工業高等専門学校の島名賢児先生、小原裕也先生に多くのご指導、ご助言をいただいた。厚くお礼申し上げます。また、実験に協力いただいた同校学生の浅江奎伍君、二木俊輔君、野口高史君、福留昂紀君、石原寛太君、野元稜久君、有川慎太郎君、上之園史弥君らに感謝いたします。残留応力の測定は、熊本県産業技術センターの川村浩二ものづくり室室長にご指導いただきました。

また、ヘール工具の製作にご協力いただいた株式会社信栄製作所、加工実験にご協力いただいた株式会社中川製作所、切削油剤をご提供いただいたタイユ株式会社にお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 株式会社アルバック <https://www.ulvac.co.jp/> (閲覧日 2022-7-15)
- 2) 神港精機株式会社 <https://www.shinko-seiki.com/> (閲覧日 2022-7-15)
- 3) 技研精機株式会社 <http://www.giken-sk.co.jp/products/hale.html> (閲覧日 2022-7-15)
- 4) 吉丸将史：“ヘール工具を用いた精密仕上げ加工に関する研究”九州工業大学 博士論文
- 5) 金材技研ニュース1994 No. 6

本研究は財団法人 JKAの「機械工業振興補助事業」により整備した機器を活用して実施しました。