

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 8 日現在

機関番号：33910

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420063

研究課題名(和文) 表面特性の向上を実現する高性能切削法の開発

研究課題名(英文) Development of high-performance cutting to improve surface integrity

研究代表者

水谷 秀行 (MIZUTANI, Hideyuki)

中部大学・工学部・教授

研究者番号：10201790

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：材料表面の圧縮残留応力は疲労寿命の延長につながるといわれているが、切削加工面は一般に引張残留応力状態となる。そこで、本研究では加工部品の疲労に対する強度的信頼性を高めるため、切削による高圧縮残留応力生成法を開発した。本研究の主な結果は以下の通りである。(1)切削によって-1000MPaを超える高い圧縮残留応力が生成され、これが材料の耐疲労性を著しく向上させる。(2)切削面は残留応力異方向性があり、工具送り方向は切削方向に比べて圧縮残留応力傾向が強く、耐疲労性に優れる。

研究成果の概要(英文)：It is well known that the compressive residual stress of a metal surface leads to an extension of fatigue life. However, the cut surface generally results in a tensile residual stress. Therefore, to improve the strength reliabilities of machine parts, we have developed a high compressive residual stress generation method that uses cutting.

The main results of this study are as follows. (1)A high compressive residual stress that exceeds -1000 MPa was generated by cutting, and the resistance of the material to fatigue was significantly improved as a result. (2)Residual stress anisotropy was evident in the cut surface and the tool feed direction of the surface had a strong compressive residual stress tendency and was superior to the cutting direction in terms of resistance to fatigue.

研究分野：機械工作

キーワード：切削 表面特性 残留応力 耐疲労性

### 1. 研究開始当初の背景

加工表面特性について重要なことは、残留応力を含む材料の表面特性が機械の構成部品、ひいては製品寿命に大きく影響するという点である。このため、真に高品質な機械部品を生産するためには、幾何学的性状だけでなく、仕上げ面表層の物理的、機械的性質にも配慮した加工技術の開発が不可欠である。

切削表面特性の向上技術については、国内外で継続的に研究が行われており、申請者らも切削残留応力の観点から実験的研究を行い、切削によって材料表面に相当高い圧縮残留応力の生成が可能であることを見出した。これら一連の研究は、JIMTOF2012 日刊工業新聞特集号 (2012. 11. 1 発行、12 面) や超音波 TECHNO (Vol. 25, No. 5 (2013)) にも取り上げられ、その重要性が紹介されている。

加工された材料は機械的、熱的作用により何らかの残留応力を内在し、これが部品の変形および寸法不良、割れの発生、応力腐食などの原因となるため、残留応力の発生は、一般には有害なものとしてこれを極力小さくする方法が検討される。しかし、一方で、材料表面の圧縮残留応力が部材の疲れ強さを向上させることも良く知られているが、一般に切削面は引張残留応力となる傾向があり、通常の切削において高圧縮残留応力生成効果を期待することはできない。そこで、航空機部品をはじめ設計上の要求が厳しい部分に対しては、切削後にショットピーニングなどの圧縮残留応力を付与するための工程が加えられる。これは工程数の増加による製造時間およびコストの増加だけでなく、仕上げ面粗さの低下にもつながるため、切削と同時に高い圧縮残留応力の生成が可能な加工技術の開発を行うことにした。

### 2. 研究の目的

本研究では、機械部品の疲労寿命の延長につながる表面特性の向上を目的とした切削による高圧縮残留応力生成法の開発を行う。特に超音波振動を援用した切削による高圧縮残留応力生成法の開発は新たな試みであり、仕上げ面粗さの向上や切削抵抗の低減効果などとともに超音波振動の応用技術としてその効果が期待できる。また、より高い圧縮残留応力生成条件を明らかにした上で疲労試験を実施し、切削による高圧縮残留応力の生成が部材の疲労特性を大きく向上させることを実証する。本研究の成果は、切削加工の高性能化に寄与するだけでなく、超音波振動の応用技術創出の観点からもその意義は大きい。

### 3. 研究の方法

#### (1) 切削実験装置および実験方法

切削実験は、旋盤による正面切削および縦型フライス盤による平面フライス加工とした。旋盤による正面切削実験は、図1に示す超音波振動装置および三分力工具動力計を

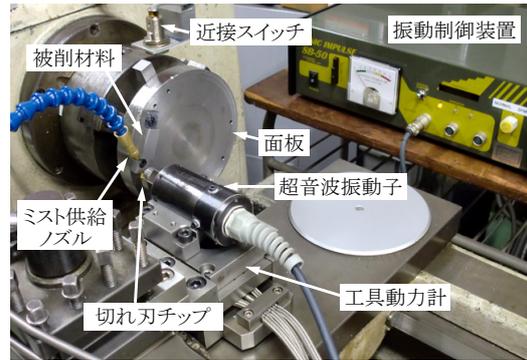


図1 旋削用超音波振動切削装置の構成

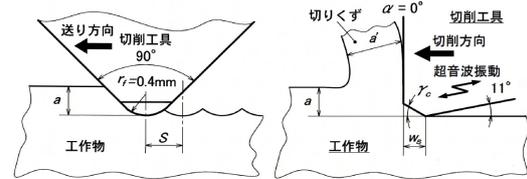
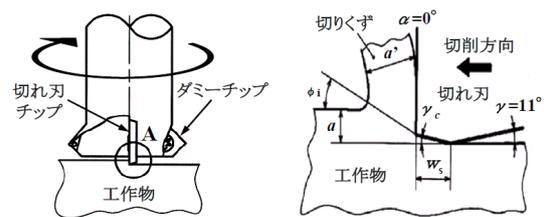


図2 工具先端形状

備えた切削装置を使用し、工具は図2に示す逃げ面接触幅  $w_s$  および接触角  $\gamma_c$  を変化させて残留応力に及ぼす影響を調べた。 $w_s$  および  $\gamma_c$  はそれぞれ市販のサーメット工具を  $w_s=0 \sim 0.75 \mu\text{m}$ 、 $\gamma_c=0 \sim 20^\circ$  に研磨整形して使用した。

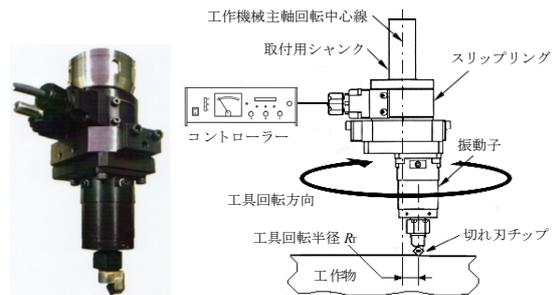
また、フライス加工実験は、図3に示す1枚刃の平面フライス加工用工具および図4に示すフライス加工用超音波振動切削装置を使用して、所定の切れ刃形状と切削条件のもとで行った。図4のフライス加工用超音波振動切削装置は、本研究用に設計、製作したものである。

被削材料は、機械構造用炭素鋼 S55C 焼鈍材である。切削面の残留応力状態と耐疲労性との関係を調べる場合の平面曲げ疲労試験



(a) フライス工具 (b) 切れ刃先端A部詳細

図3 フライス工具と切れ刃形状の詳細



(a) 外観写真 (b) 切削時の装置の構成

図4 平面フライス用超音波振動切削装置

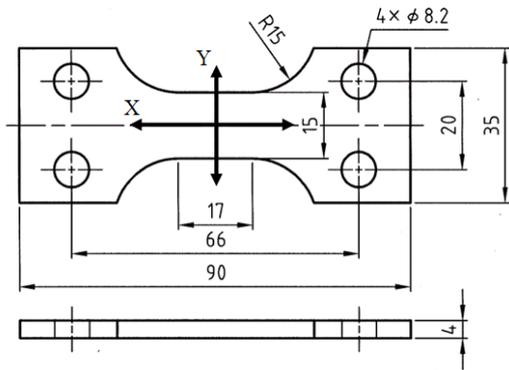


図5 疲労試験片の形状・寸法 (JIS-Z-2275)

片は、ワイヤ放電加工により輪郭形状を切出した後、試料の表裏それぞれの面に対して所定の条件のもとで3層の切削を行い、図5に示す形状および寸法に仕上げた。

切削条件は、切削速度  $V=150$  m/minとしたが、超音波振動付与の効果調べる場合は、 $V=30$  m/minとした。また、工具送り量  $S=0.06$ 、 $0.12$ 、 $0.18$  mm/rev、切込み量  $a=0.1$  mmまたは $0.12$  mmなどとした。超音波振動切削の振動条件は、発振周波数： $19 \pm 1.5$  kHz、振動振幅(片振幅)： $13.5$   $\mu$ mである。

切削面の残留応力は、X線法によって切削方向 ( $\sigma_1$ ) とこれと直交する工具送り方向 ( $\sigma_2$ ) について測定し、それぞれの応力方向に対して疲労試験を行った。疲労試験は、平面曲げ疲労試験機を用い、負荷方法は完全両振りで繰返し数 1800c/minとした。設定負荷応力はS55C生材の引張強さを540MPaと仮定し、引張強さの55%である297MPaに設定し、疲労試験を行った。

#### (2) 切削による圧縮残留応力生成機構

図6は、切削面の高圧縮残留応力生成機構の模式図である。巨視的には図6(a)のように切削による材料除去が行われるが、切れ刃先端部に丸みや逃げ面接触部を有すると、図6(b)に示すようにバニシ作用(押ならしによる表面薄層の塑性変形)によって仕上げ面には高い圧縮残留応力が生成される。さらに、切削中の切れ刃に超音波振動を付与すると、同図(c)に示すような高加速度衝突現象によるピーニング作用(押し込みによる表面の引伸ばし効果)が加わり、切削面には高い圧縮残留応力の生成が期待できる。

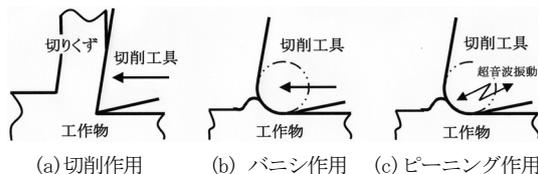


図6 切削における材料除去および表面生成現象

#### 4. 研究成果

研究代表者らは、これまでに切削面の残留応力分布は、工具の先端形状によって大きく

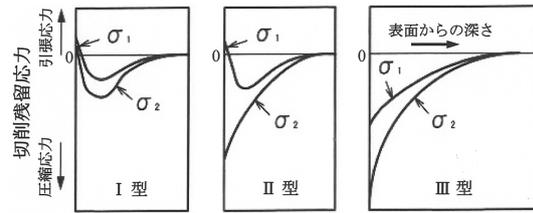
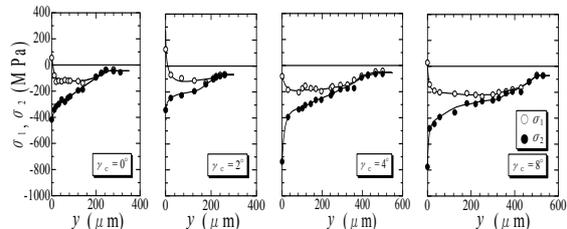


図7 切削面の残留応力分布形態の分類

変化し、その分布形態は、図7に示す特徴的な3つに大別できることを明らかにしている。このような変化は切削における表面生成現象の違いによるものと考えられるため、本研究においてもこの基本分類をもとに残留応力状態を検討することにした。

#### (1) 切削面の残留応力と耐疲労性との関係

図8は、切削面の残留応力分布に及ぼす逃げ面接触角  $\gamma_c$  の影響について調べた結果である。図中の  $\sigma_1$  および  $\sigma_2$  はそれぞれ切削方向の残留応力とこれに直角な方向(工具送り方向)の残留応力を示し、横軸  $y$  は切削表面からの深さを表す。図より、切れ刃が逃げ面接触幅(ここでは  $w_s=0.2$  mm)を有すると、 $\gamma_c=0^\circ$  においても工具送り方向に強い圧縮残留応力が生成され、切削面の残留応力状態に著しい異方性が生じ、分布形態は図7のII型となる。そして、逃げ面接触角  $\gamma_c$  が大きくなるにつれて残留応力分布は圧縮側へ移行し、侵入深さも増大する。このような切れ刃形状による残留応力の変化をもとに、フライス加工において種々の残留応力状態を生成し、疲労特性との関係を調べた。



(a)  $\gamma_c=0^\circ$  (b)  $\gamma_c=2^\circ$  (c)  $\gamma_c=4^\circ$  (d)  $\gamma_c=8^\circ$

図8 切削面の残留応力分布に及ぼす逃げ面接触角の影響 ( $w_s=0.2$  mm,  $r_f=0.4$  mm)

図9は、種々の切れ刃形状によって生成された切削面の表面残留応力 ( $\sigma_{1-X}$ )<sub>s</sub> (切削方向) および ( $\sigma_{2-X}$ )<sub>s</sub> (工具送り方向) と試験片破断までの繰返し数  $N_f$  との関係を示す。グラフの横軸は右方向が圧縮側(負の値)にとっている。図より、データにばらつきはあるものの、両者の間には比較的強い相関関係が認められ、切削表面の圧縮残留応力が高くなる程、破断に至るまでの繰返し数  $N_f$  が増大しており、耐疲労性の向上が認められる。図中矢印で示す市販の通常切れ刃による切削表面の残留応力はプラス(引張り)領域にあり、この場合の破断までの繰返し数は小さいものであった。また、図9の○印で示す疲労試験

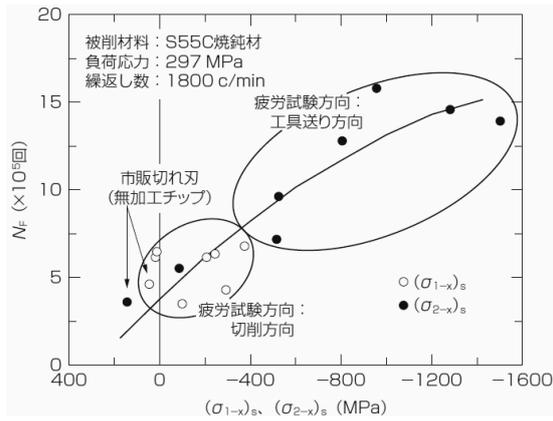


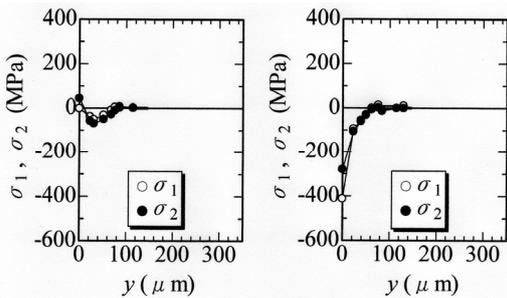
図9 切削面の表面残留応力と試験片破断までの繰返し数との関係

の応力負荷方向 (X 方向) を切削方向にとった場合のデータは  $N_f=5 \times 10^5$  回付近に集中しており、●印で示す応力負荷方向を送り方向とした場合に比べて耐疲労性に劣ることがわかる。すなわち、切削面の残留応力状態には異方性があり、耐疲労性も異なるため、部品の加工あるいは使用に際してはこの点も考慮する必要がある。

以上のように、S55C 焼鈍材の切削加工において  $-1000\text{MPa}$  を超える高い圧縮残留応力が生成され、これによって材料の耐疲労性を大幅に向上させることができた。

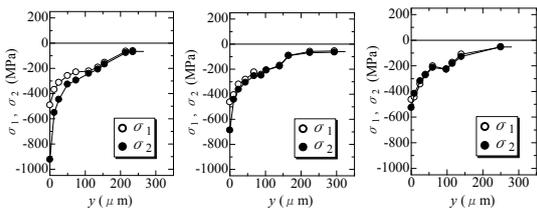
(2) 超音波振動切削による表面特性の向上

図 10 は、市販の工具チップを用いて切削面の残留応力分布に及ぼす超音波振動の影響を調べた結果である。図中の (a) が通常切削面、(b) が超音波振動切削面の残留応力分布を示す。図 10 の (a) と (b) の比較より、(b) の超音波振動切削面の残留応力分布形態は、図 7 の III 型



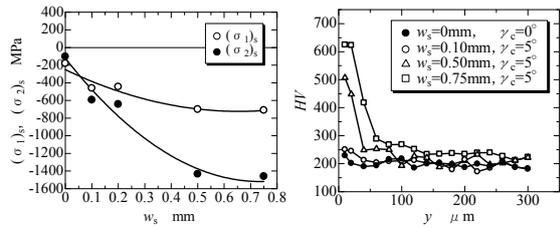
(a) 通常切削面 (b) 超音波振動切削面

図 10 切削面の残留応力分布に及ぼす超音波振動の影響



(a)  $S=0.06\text{mm/rev}$  (b)  $S=0.12\text{mm/rev}$  (c)  $S=0.18\text{mm/rev}$

図 11 超音波振動切削面の残留応力分布に及ぼす工具送り量の影響 ( $w_s=0.05\text{mm}$ ,  $\gamma_c=20^\circ$ )



(a) 表面残留応力の変化 (b) 硬さ分布の変化

図 12 超音波振動切削面の表面残留応力および硬さ分布に及ぼす逃げ面接触幅の影響

分布であり、(a) の通常切削に比べて圧縮傾向が強くなっている。通常切削において III 型分布にみられるような強い圧縮残留応力分布形態を得るためには、切れ刃すくい角を負の方向に大きくするか、あるいは大きな逃げ面接触部を設けるなどの方法が必要であり、切削抵抗の増大が問題となる。しかし、超音波振動切削では、市販の工具チップによる切削においても相当高い圧縮残留応力の生成が可能であることがわかった。このような超音波振動切削における高圧縮残留応力生成効果は、実験に使用した超音波振動装置の振動方向が切削方向に対して切込み方向に約  $7^\circ$  傾いているため、仕上げ面生成に際してピーニング効果と類似の効果が生じた結果とも考えられる。また、市販のチップの切れ刃エッジ部分には若干の面取りまたは R ホーニングが施されているため、圧縮残留応力生成効果の増大が考えられる。

図 11 は、超音波振動切削面の残留応力分布に及ぼす工具送り量  $S$  の影響を調べた結果である。図より、切削面の残留応力は工具送り量  $S$  が小さい程圧縮傾向が強くなり、図 11 (a) の  $S=0.06\text{mm/rev}$  では切削表面に約  $-1000\text{MPa}$  の高い圧縮残留応力が生成された。これは、工具送り量が小さいほど単位面積当たりの切れ刃通過回数が増えるため、これにともなって超音波振動による切れ刃の衝突回数が増え、ピーニング効果が増大した結果と考えられる。

図 12 は、超音波振動切削面の表面残留応力および硬さ分布に及ぼす切れ刃形状の影響を示す。まず、図中 (a) は、表面残留応力  $(\sigma_1)_s$  (切削方向応力) および  $(\sigma_2)_s$  (送り方向応力) に及ぼす逃げ面接触幅  $w_s$  の影響を調べた結果である。図より、切削方向、送り方向ともに切削表面残留応力は、逃げ面接触幅  $w_s$  の増加によって圧縮側へ移行するが、この傾向は、工具送り方向の残留応力  $(\sigma_2)_s$  に強く現れ、 $-1400\text{MPa}$  を超える高い圧縮残留応力が生成された。一方、図 12 (b) の結果より、圧縮残留応力の値が大きかった逃げ面接触幅  $w_s=0.50\text{mm}$  および  $0.75\text{mm}$  の工具を使用した場合は表面付近の硬さが著しく増大し、最大硬さは S55C の調質材にも匹敵する HV600 を超える値となった。この切削表面硬さの増大は圧縮残留応力の生成とともに部品の耐疲労性の向上に寄与するだけでなく、耐摩耗性の増大にもつながると考えられ、良好な切削表

面特性が得られたといえる。

現在のところ、データ数はまだ少ないが、超音波振動切削においても高い圧縮残留応力の生成が部材の耐疲労性の向上につながることを検証しつつあるので、本研究によって得られた成果をもとに、加工部品の強度的信頼性の向上に寄与する切削表面特性の制御技術をさらに進展させたい。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

- ① 水谷秀行：超音波振動援用によるホーニング加工の仕上げ面性状，機械技術，65，7 (2017)，64-68. 【査読無】
- ② 水谷秀行：超音波振動援用加工の進展と将来動向，機械と工具，61，1 (2017)，24-29. 【査読無】
- ③ 水谷秀行：超音波振動切削による高圧縮残留応力の生成，超音波 TECHNO，28，6 (2016)，22-29. 【査読無】
- ④ N.Suzuki, R.Ishiguro, T.Kojima, I.Inasaki: Design of irregular pitch end mills to attain robust suppression of regenerative chatter, CIRP Annals, 65, 1, (2016), 129-132. 【査読有】
- ⑤ 水谷秀行：超音波振動を援用した小径内面ホーニング加工，超音波 TECHNO，27，2 (2015)，97-84. 【査読無】
- ⑥ 水谷秀行：機械加工における超音波振動の新たな応用を求めて，超音波 TECHNO，27，2 (2015)，104-108. 【査読無】
- ⑦ J.M.J.Becker, J.Borst, A.vd Veen, I.Inasaki: Improving the overall equipment effectiveness in high-mix-low-volume manufacturing environments, CIRP Annals, 64, 1, (2015), 420-422. 【査読有】

[学会発表] (計 11 件)

- ① 小林大祐，水谷秀行：超音波振動切削による高硬度・高圧縮残留応力の生成，砥粒加工学会先進テクノフェア(ATF2017)，ホテルプラザ勝川，愛知県・春日井市 (2017. 3. 3)。
- ② 水谷秀行：当音波振動援用による機械加工技術，かすがいビジネスフォーラム(中部大学テクノモール in 春日井)，春日井市総合体育館，愛知県・春日井市 (2016. 11. 18)。
- ③ 水谷秀行：超音波振動援用によるホーニング加工面の表面性状，ABTEC2016 (2016 年度砥粒加工学会学術講演会)，兵庫県立大学，兵庫県・姫路市 (2016. 9. 1)。
- ④ 水谷秀行：超音波振動援用による高性能ホーニング加工，砥粒加工学会次世代固定砥粒加工プロセス専門委員会第 68 回研究会(精密工学会「超砥粒ホイールの研削性能に関する研究専門委員会」，埼玉

大学東京ステーションカレッジ，東京都・千代田区 (2016. 8. 26)。【招待講演】

- ⑤ 水谷秀行：切削による高圧縮残留応力生成技術の開発，第 54 回マイクロ加工懇談会，理化学研究所・理研板橋連携研究センター，東京都・板橋区 (2016. 2. 24)。【招待講演】
- ⑥ 水谷秀行：表面特性の向上を実現する高性能切削法の開発，中部大学フェア 2015，中部大学，愛知県・春日井市 (2015. 9. 17)。
- ⑦ 水谷秀行：超音波振動切削面の残留応力に及ぼす工具および切削条件の影響，ABTEC2015 (2015 年度砥粒加工学会学術講演会)，慶応義塾大学，神奈川県・横浜市 (2015. 9. 9)。
- ⑧ 水谷秀行：切削による金属の耐疲労性向上技術の開発，テクノモール in 豊田，ホテル豊田キャッスル，愛知県・豊田市 (2015. 7. 1)。
- ⑨ 水谷秀行：超音波振動ホーニング加工の提案，日本機械学会東海支部第 64 期総会・講演会，中部大学，愛知県・春日井市 (2015. 3. 13)。【招待講演】
- ⑩ 水谷秀行・鷲見圭祐・滝澤勇太・深尾幸平・加藤恭之・田中翔悟・奥山了介：表面特性の向上を実現する高性能切削法の開発，第 16 回工作機械技術者会議，東京ビッグサイト，東京都・江東区 (2014. 11. 1)。
- ⑪ 水谷秀行：切削面の残留応力と疲労特性との関係，ABTEC2014 (2014 年度砥粒加工学会学術講演会)，岩手大学，岩手県・盛岡市 (2014. 9. 12)。

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

水谷 秀行 (MIZUTANI, Hideyuki)  
中部大学・工学部・教授  
研究者番号：10201790

##### (2) 研究分担者

稲崎 一郎 (INASAKI, Ichiro)  
中部大学・理事  
研究者番号：30051650