

# ステンレス鋼の表面改質を利用した金型加工に関する研究

熊本大学大学院 自然科学研究科 産業創造工学専攻

准教授 坂本 重彦

(平成 18 年度奨励研究助成 AF-2006032)

キーワード：切削加工，超精密切削加工，加工変質層

## 1. はじめに

オーステナイト系ステンレス鋼は、高い延性や低い降伏応力を有し、代表的な炭素鋼と比べて比較的高い最大引張強さを示す金属として知られている。近年、オーステナイト系ステンレス鋼の機械加工において、金属表面がナノ結晶構造に変化するとの研究報告がなされている。ナノ結晶構造をもつ金属表面は、本来金属材料がもつ特性とは異なる仕上げ面となるため、金型などへのニアネットシェイプ加工への応用が考えられる。また、研究代表者らは、オーステナイト系ステンレス鋼の超精密切削において、SUS316 と比べて、SUS304 において良好な仕上げ面を得にくいことを確認している<sup>1-3)</sup>。SUS304 の超精密切削仕上げ面上に、本来存在するオーステナイト組織がマルテンサイト変態していることを確認している。マルテンサイト組織が工具摩耗を促進し、仕上げ面粗さを悪化させていると判断した。これらステンレス鋼の仕上げ面上における変質や変態などの議論は、これまで加工変質層として扱われ、詳細な分析が行われていなかった。本研究では、まず超精密旋盤を使用して、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 に超精密正面旋削を行い、切込み深さなどの加工条件が仕上げ面に与える影響を検討した。さらに、仕上げ面におけるオーステナイト系ステンレス鋼の変態を分析した。次に、同じく SUS304 に対してエンドミルによる切削加工を行い、普通切削における加工変質層を分析した。金型製作などにおいて、加工変質層の厚さを制御することは、最適加工条件を明確にすることとなり、仕上げ面粗さの向上と工具寿命を伸ばすことに寄与する。

## 2. SUS304 の超精密切削加工

SUS304 の被削性は、普通切削において SUS316 より良く、良好な仕上げ面を得やすい。しかしながら、切り込み量が非常に微小となる超精密切削において、SUS316 の超精密切削仕上げ面は、SUS304 のときと比べて良好になる。普通切削との異なる振る舞いを示す SUS304 では、切り込み量が微小である超精密切削が、仕上げ面上でマルテンサイト変態を起こしている。そこで、超精密正面旋削を行って、切込み深さが仕上げ面に及ぼす影響を実験的に検討する。

### 2.1 実験条件

超精密正面旋削実験は、図 1 に示す超精密旋盤 (ULC-100A：東芝機械) を使用して、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 に対して行った。主な実験条件を表 1 にまとめる。実験で使用した工具は、(TiAl) N 系の PVD コーティングが被覆された超硬コーティング工具である。加工中、切削点近傍に水溶性切削油剤をミスト状に供給した。得られた仕上げ面は、ノマルスキー式微分干渉顕微鏡および非接触式表面形状測定装置 WYKO にて観察した。また、得られた仕上げ面の硬度を測定するために、ダイナミック超微小硬度計を用いた。

### 2.2 実験結果及び考察

切削速度  $V = 100 \text{ m/min}$  において得られた SUS304 の仕上げ面を図 2 に示す。切込み量  $d = 2 \mu\text{m}$  における仕上げ面  $270 \times 270 \mu\text{m}$  の範囲における 3 次元仕上げ面粗さは、図 3 (a) に示すように  $Rz_{3D} = 96 \text{ nm(P-V)}$  と非常に良好な結果を得た。また、工具送り方向への 2 次元仕上げ面粗さは、図 3 (b) のように  $Rz = 58 \text{ nm(P-V)}$  となった。一方、切込み量  $d = 5 \mu\text{m}$  のとき、WYKO 3 次元像からわかるとお

表 1 超精密正面旋削の実験条件

Machine tools :	Ultra-precision Lathe ULC-100A
Cutting tools :	Coated cemented carbide tool Nose radius: 0.4 mm Rake angle: 0 deg Relief angle: 7 deg
Workpiece material :	Stainless steel SUS304
Cutting fluid :	Water-immiscible cutting fluid
Cutting conditions :	Cutting speed: $V = 95-125 \text{ m/min}$ Depth of cut: $d = 2, 5 \mu\text{m}$ Feed rate: $f = 2 \mu\text{m/rev}$

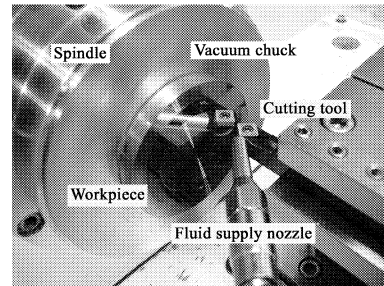
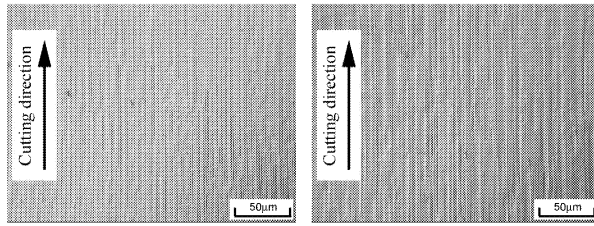


図 1 超精密旋盤による実験装置外観



(a)  $d = 2 \mu\text{m}$  (b)  $d = 5 \mu\text{m}$

[ $f = 2 \mu\text{m}/\text{rev}$ ,  $V = 100 \text{ m}/\text{min}$ ,  $L = 275 \text{ m}$ ,  
Water-immiscible type cutting fluid]

図 2 SUS304 の表面写真

り、非常に大きな切削斑が確認された。得られた仕上げ面は、 $Rz_{3D} = 209 \text{ nm}$  (P-V),  $Rz = 150 \text{ nm}$  (P-V) と非常に大きな粗さとなった。

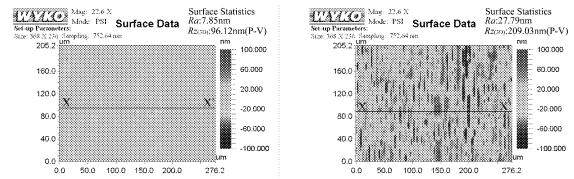
得られた仕上げ面表層の硬さを比較するために、比較的小さな荷重 10 gf でピッカース式硬度計を用いて圧痕を付けた。刻まれた圧痕は、図 3 (c) に示すように走査型電子顕微鏡にて観察され、それぞれの硬度を測定した。SUS304 における本来の硬度が  $Hv = 190$  程度であるのに対し、 $d = 5 \mu\text{m}$  の仕上げ面では  $Hv = 408$ 、と非常に大きな値を示した。一方、 $d = 2 \mu\text{m}$  の仕上げ面では  $Hv = 380$  となった。得られた 2 種類の仕上げ面では、良好な仕上げ面となった切込み  $d = 2 \mu\text{m}$  で得られた加工条件の方が、仕上げ面の硬度が低くなった。

SUS304 の表面改質について詳しい解析を行うため、仕上げ面に対して腐食し、仕上げ面上の組織を比較した。腐食後の仕上げ面顕微鏡写真を図 4 に示す。腐食された仕上げ面上に、結晶粒が明確に確認できる。黒い結晶粒が、切込み  $d = 5 \mu\text{m}$  の仕上げ面上に非常に多く観察される。一方、切込みが小さい  $d = 2 \mu\text{m}$  の仕上げ面では、本来のオーステナイト組織が青く観察されている。次に、それぞれの仕上げ面に対して永久磁石を近づけたところ、加工前の SUS304 には検知されなかった透磁性を示した。切込み  $d = 5 \mu\text{m}$  の仕上げ面は、 $d = 2 \mu\text{m}$  の仕上げ面に対して強い透磁性を有していた。つまり、黒い結晶粒がマルテンサイト組織であることは明確であり、切込み  $d = 5 \mu\text{m}$  の仕上げ面上に、 $d = 2 \mu\text{m}$  の仕上げ面よりも多くのマルテンサイト組織が存在している。

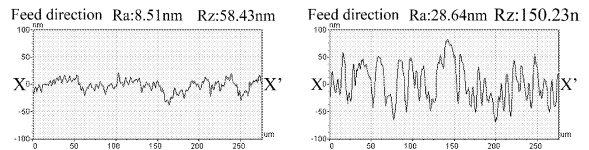
前述の切込み量を変化させた超精密切削実験から、切込み量の深さが、仕上げ面にマルテンサイト変態を起こす要因であるといえる。マルテンサイト変態を伴う SUS304 の加工変質層では、過大な切込み量は加工によるマルテンサイト変態量を増加させ、硬度を増す働きを示す。切込み量が大きくなることで、被削材である SUS304 に与える応力を大きくし、加工誘発マルテンサイト変態を促進しているといえる。

[  $d = 2 \mu\text{m}$  ]

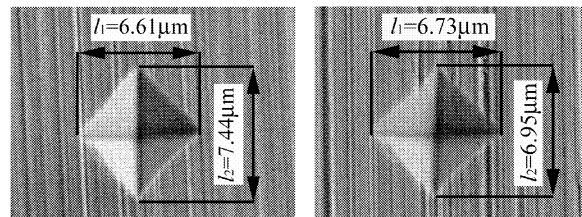
[  $d = 5 \mu\text{m}$  ]



(a) WYKO 3D images



(b) WYKO 2D images



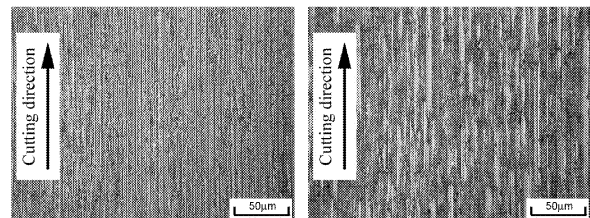
[ $Hv = 380$ ]

[ $Hv = 408$ ]

(c) Vickers marks

[ $f = 2 \mu\text{m}/\text{rev}$ ,  $V = 100 \text{ m}/\text{min}$ ,  $L = 275 \text{ m}$ ,  
Water-immiscible type cutting fluid]

図 3 SUS304 における超精密切削仕上げ面の測定結果



(a)  $d = 2 \mu\text{m}$

(b)  $d = 5 \mu\text{m}$

[ $f = 2 \mu\text{m}/\text{rev}$ ,  $V = 100 \text{ m}/\text{min}$ ,  $L = 275 \text{ m}$ ,  
Water-immiscible type cutting fluid]

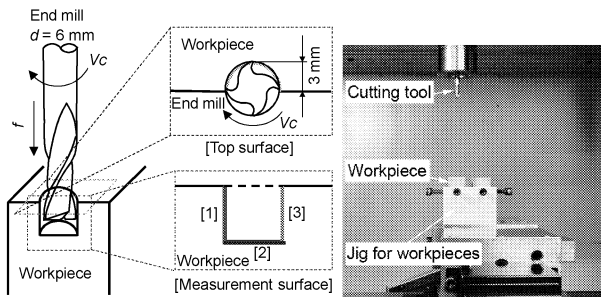
図 4 超精密切削された SUS304 の腐食面

### 3. SUS304 のエンドミル加工

SUS304 は、切削加工によって仕上げ面上にマルテンサイト変態を起こすことが確認された。マルテンサイト組織を含む加工変質層は、強度および硬度を上昇させている。言い換えれば、マルテンサイト組織を多く含む加工変質層を創成することが、製品を高強度化することになる。本実験では、SUS304 にエンドミルを使用して切削加工を行い、創成される加工変質層の深さを比較する。また、切削速度と送り速度を変化させ、加工条件が加工変質層に与える影響を検討した<sup>4)</sup>。

表 2 エンドミルによる切削の加工条件

Machine tools :	Vertical type of machining center SV-400, V56
Cutting tools :	Cemented-carbide square nose end mill, Diameter : $d = 6.0$ mm Number of cutting edge : 2
Workpiece material :	Stainless steel SUS304
Cutting fluid :	Water-immiscible cutting fluid
Cutting conditions :	Cutting speed: $V_c = 9, 55, 100, 200, 300, 375$ m/min Feed rate: $f = 0.001, 0.003, 0.008, 0.010, 0.030$ mm/rev



(a) 観察部 (b) 工作物の取り付け

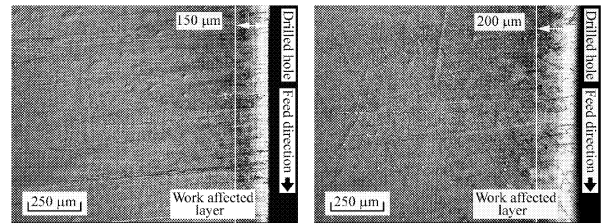
図 5 エンドミルによる SUS304 切削加工実験の外観

### 3.1 実験条件

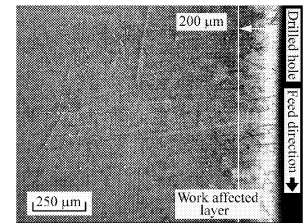
立形マシニングセンタ (V56 : 牧野フライス製作所) および立形マシニングセンタ (SV-400 : 森精機製作所) を使用して, SUS304 の普通切削加工を行った. 加工法は, 図 5 に示すように, エンドミルを用いた突き加工である. また, 加工変質層の観察を容易にするために, エンドミルの半分を使用して加工した. 加工変質層の厚さ測定は, 図 5 に示す観察部[1], [2], [3]に対して行った. 主な実験条件を表 2 にまとめる. 使用した工具は, 市販されている径  $d=6$  mm の超硬スクエアエンドミルである. ステンレス鋼 SUS304 の組織を判別しやすくするために, 図 5 に示した観察面を研磨し, 腐食させた. 腐食後の観察面をノルムスキー式微分干渉顕微鏡で観察し, 加工変質層の厚さを計測した.

### 3.2 実験結果および考察

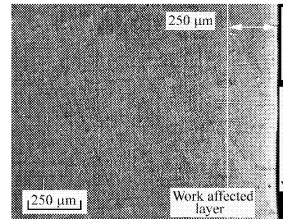
切削速度の変化による加工変質への影響を確認するために, 切削速度  $V_c = 9 - 375$  m/min を変化させて切削した. 送り速度は, 全て  $f = 0.030$  mm/rev で統一している. 加工変質層の境界を定めた基準は, 被削材の中央部から加工面に向かって組織を比較して, オーステナイト組織ではない組織を明確に確認したところとした. 端面から判定した境界線までの箇所を加工変質層として, 加工変質層厚さを計測した. 各切削速度で得られた観察部[1], [2], [3]における加工変質層は, 図 6~8 に示した顕微鏡写真で求められる. すべての写真における右側に加工でエンドミルが通過した面を配置している. 写真の左部が, 未



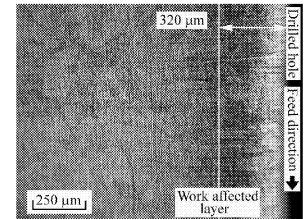
(a)  $V_c = 9$  m/min



(b)  $V_c = 55$  m/min



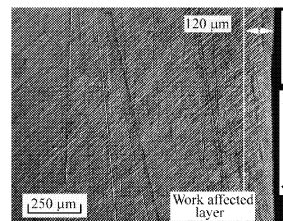
(c)  $V_c = 100$  m/min



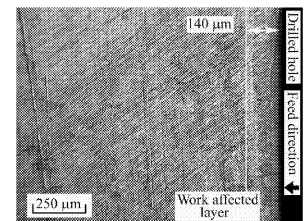
(d)  $V_c = 375$  m/min

[ $f = 0.030$  mm/rev, Water-immiscible cutting fluid]

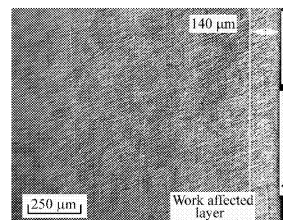
図 6 エンドミル加工した SUS304 の観察部[1]



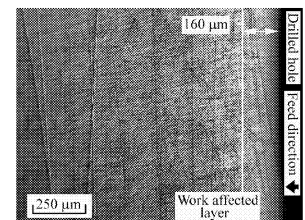
(a)  $V_c = 9$  m/min



(b)  $V_c = 55$  m/min



(c)  $V_c = 100$  m/min

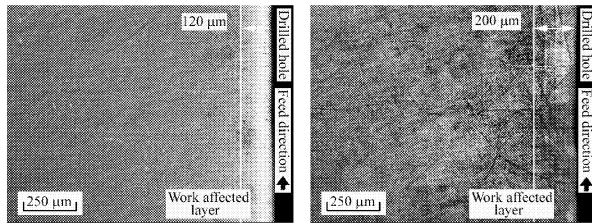


(d)  $V_c = 375$  m/min

[ $f = 0.030$  mm/rev, Water-immiscible cutting fluid]

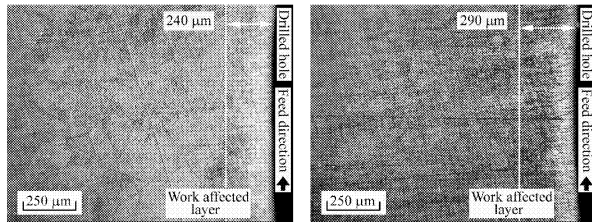
図 7 エンドミル加工した SUS304 の観察部[2]

加工である SUS304 が本来持つオーステナイト組織である. 一方, すべての観察部において, 加工点近傍に角ばったオーステナイト組織とは異なる結晶粒が存在している. 加工変質層が, SUS304 には本来ない特性である透磁性を有していたことから推測して, 超精密切削と同様にマルテンサイト誘起変態が起こっているといえる. 本加工は, 切削油剤を供給することで, 冷却作用によって温度変化を極力抑えて行われた. このことは, 温度的な影響が出にくい, 極低速である切削速度  $V_c = 9$  m/min においても, 加工変質層が確認されていることから, 被削材の仕上げ面に生じる応力がマルテンサイト変態を創成しているといえる.



(a)  $V_c = 9$  m/min

(b)  $V_c = 55$  m/min

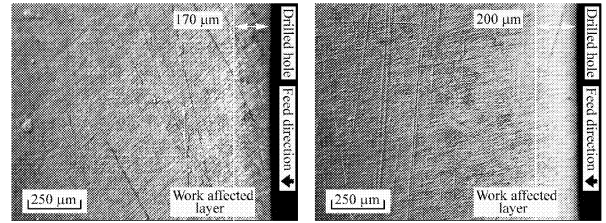


(c)  $V_c = 100$  m/min

(d)  $V_c = 375$  m/min

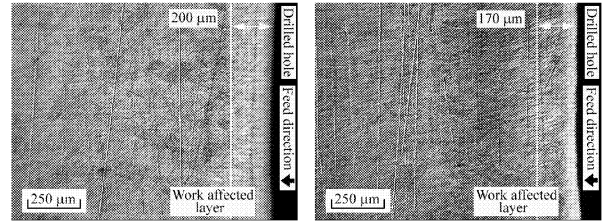
[ $f = 0.030$  mm/rev, Water-immiscible cutting fluid]

図 8 エンドミル加工した SUS304 の観察部[3]



(a)  $f = 0.001$  mm/rev

(b)  $f = 0.003$  mm/rev

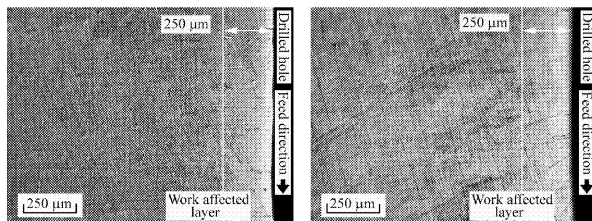


(c)  $f = 0.008$  mm/rev

(d)  $f = 0.010$  mm/rev

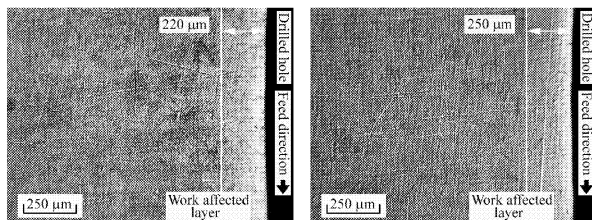
[ $V_c = 375$  m/min, Water-immiscible cutting fluid]

図 10 エンドミル加工した SUS304 の観察部[2]



(a)  $f = 0.001$  mm/rev

(b)  $f = 0.003$  mm/rev

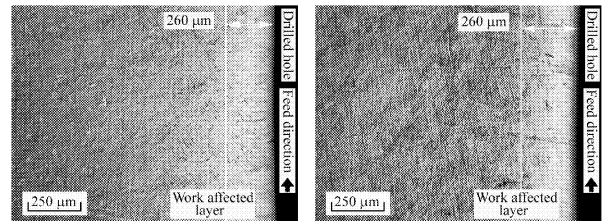


(c)  $f = 0.008$  mm/rev

(d)  $f = 0.010$  mm/rev

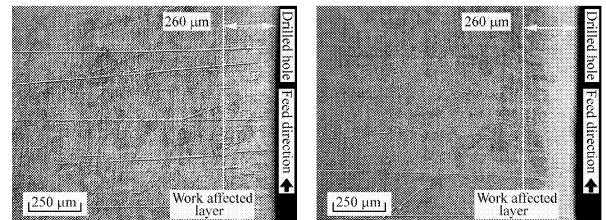
[ $V_c = 375$  m/min, Water-immiscible cutting fluid]

図 9 エンドミル加工した SUS304 の観察部[1]



(a)  $f = 0.001$  mm/rev

(b)  $f = 0.003$  mm/rev



(c)  $f = 0.008$  mm/rev

(d)  $f = 0.010$  mm/rev

[ $V_c = 375$  m/min, Water-immiscible cutting fluid]

図 11 エンドミル加工した SUS304 の観察部[3]

次に、加工変質層の厚さについて比較する。エンドミル先端で随時創成される観察部[2]においては、図 7 にまとめるように、切削速度の変化による加工変質層深さの違いは見られなかった。一方、エンドミルの側面刃が、加工中、常に接触し続ける観察部[1]および[3]における切削速度の違いを比較すると、切削速度の上昇に伴い加工変質層深さが厚くなっていった。切削速度が速い場合、工作物に加わる力も大きくなり、その応力が蓄積されてマルテンサイト変態量が増加したと考えられる。切削速度が最も速い  $V_c = 375$  m/min における加工変質層の厚さは、最も遅い  $V_c = 9$  m/min と比べて  $200 \mu\text{m}$  も厚く生じていた。また、切れ刃の侵入口である観察部[1]、切れ刃の出口にあたる観察部[3]において厚さの比較を行うと、二つの加工変質層深さに差は、生じていなかった。

送り速度が加工変質層の厚さに及ぼす影響を確認する。切削速度は、前述の通り加工変質層の厚さが最も大きく観察された  $V_c = 375$  m/min に統一して行った。各送り速度で切削を行った観察部[1]、[2]、[3]の観察結果を図 9 ~ 11 にまとめる。エンドミルの側面刃が大きく関与する観察部[1]、[3]では  $250 \mu\text{m}$  前後の加工変質層が構成されていた。一方、エンドミル先端部が創成する観察部[2]では  $170 \mu\text{m}$  前後と薄めの加工変質層が創成された。一般的に、送り速度の上昇は、仕上げ面に加わる力を大きくするといえる。しかしながら、マルテンサイト変態を伴う加工変質層の創成においては、送り速度が  $f = 0.010$  mm/rev 以下では、いずれの条件下でも大きな差が確認されなかった。ただし、送り速度が  $f = 0.030$  mm/rev まで大きくすると、エンドミルの側面刃が大きく関与する観察

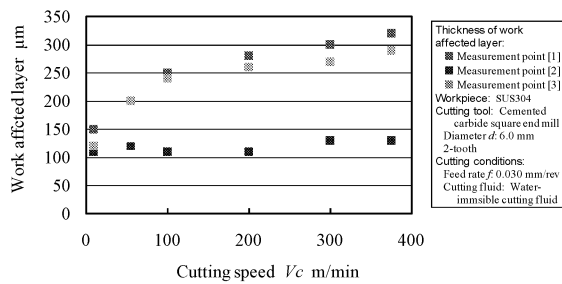


図 12 切削速度と加工変質層深さの関係

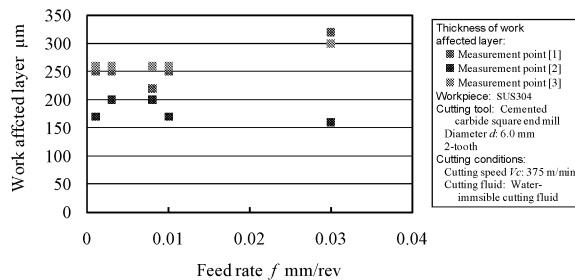


図 13 送り速度と加工変質層深さの関係

部[1], [3]では加工変質層の厚さは大きくなった。

最後に、切削速度と送り速度に対する加工変質層の厚さに関する関係を、それぞれ図 12 および 13 にまとめる。送り速度の変化に対して、加工変質量の厚さはほぼ一定である。それに対して、切削速度の上昇に伴って、工具側面刃が創成する切削面である観察部[1], [3]では、加工変質層の厚さが大きくなっていった。

#### 4. まとめ

SUS304 の超精密切削において、切込み深さが仕上げ面粗さに影響を及ぼすことを確認した。加工変質層にマルテンサイト変態を伴う仕上げ面上に創成されたため、仕上げ面の硬度は SUS304 本来の硬度よりも高い値を示した。切込み量  $d=5\ \mu\text{m}$  と大きいとき、多くのマルテンサイト組織が仕上げ面に含まれていたため、硬度が上昇している。同時に、透磁性が上がり、磁石との反応性が高まった。つまり、超精密切削における微小な切込み量の大きさは、加工誘発マルテンサイト変態が起こした。マルテンサイト組織が創成されることは、ナノメートル・オーダーの超精密仕上げ面粗さおよび工具摩耗に直接的に悪影響を及ぼす。

次に、エンドミルによる突き加工における SUS304 の仕上げ面では、切削速度の速さに依存して、加工変質層の厚さが変化した。切削工具の切れ刃が、加工中に大きく関与する仕上げ面において、早い切削速度で創成されると、加工変質層の厚さは大きくなった。しかも、得られた加工変質層は、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 が本来持たない透磁性を有していた。一方、送り速度の変化に対して、オーステナイトからマルテンサイト変態する表面改質の量に大きな差異は生じなかった。エンドミルの側面切れ刃は、仕上げ面に及ぼす応力のうち送り分力より主分力が大きくなるため、加工変質層の創成に大きく寄与するといえる。また、仕上げ面上の透磁性とマルテンサイト組織の関係を定量的に明確にすることはできなかったが、仕上げ加工における低切込みでの高速切削は加工変質層の増加につながり、超精密切削と同様に、工具摩耗を促進することがわかった。

#### 5. 謝 辞

本研究は財団法人天田金属加工機械技術振興財団に奨励研究助成として採択されたものであり、同財団からの研究助成に対し厚く謝意を表します。

また、本研究の遂行にあたり、工具等をご提供いただいた住友電気工業(株)ならびに住友電工ハードメタル(株)に、実験における工作機械の使用等にご協力いただいた(株)牧野フライス製作所に御礼申し上げます。

#### 6. 参考文献

- 1) 坂本重彦, 安井平司, 花岡俊作: ステンレス鋼 SUS304 の超精密切削仕上げ面上における加工変質層, 2003 年度精密工学会九州支部大分地方講演会, (2003), p.95
- 2) 坂本重彦, 安井平司, 篠崎烈, 藤森彰: コーティング超硬バイトによるステンレス鋼 SUS316 の超精密切削加工, 精密工学会誌, Vol.70, No.3, (2004), p.397
- 3) S. Sakamoto, H. Yasui, S. Hanaoka, H. Hayashi: Work Affected Layer of Machined Surface in Ultra-Precision Cutting of Austenitic Stainless Steel, Proceedings of The 19th Annual ASPE Meeting, Florida, USA, (2004).
- 4) S. Sakamoto, Y. Kajiwara, T. Matsutori: Work affected layer of the finished surface in precision cutting of austenitic stainless steel, Proceedings of the euspen International Conference, Zurich, Swiss, (2008), p.253.