

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：32657

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420066

研究課題名(和文) 微細結晶粒鋼に対する高能率マイクロディンプル切削と表面機能の制御

研究課題名(英文) Control of surface functions with micro dimples machined on fine grained steels

研究代表者

松村 隆 (Matsumura, Takashi)

東京電機大学・工学部・教授

研究者番号：20199855

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)：インプラント材料として使用されるステンレス鋼に対して、小径エンドミルによるマイクロディンプルの加工技術を開発した。この加工法は工具を送り方向に傾けて高速に送り、空転時に各切れ刃による除去領域が干渉しないようにディンプルを加工する。例えば、3000 rpmで回転する2枚刃エンドミルの切削では、1分間に6000個のディンプルが加工できる。また、材料強度を向上させるために結晶を微細化したステンレスの切削では、パリの生成とともに表層部の加工変質が抑制できることを確認した。得られたディンプル表面では、水滴のピン止め効果によりぬれの拡がり抑制でき、表面機能が制御できることを確認した。

研究成果の概要(英文)：A micro dimple machining was studied to control the surface functions with the micro-scale structures on the stainless steel, one of the implant materials. The micro dimples are machined in milling with the inclined ball end mill at high feed rates. A mechanistic model was presented to control the shape and the size of the dimples to be machined. The micro dimples were machined on a plate of fine-grained stainless steel to reduce burr formation. The depth of the affected layer was also reduced in subsurface of the machining area by the fine crystal grains. Then, wettability on the dimpled surface changes by the pinning effect at the edges of the dimples.

研究分野：生産加工

キーワード：切削 エンドミル 微細加工 ディンプル 加工変質層 表面機能 結晶 インプラント

1. 研究開始当初の背景

近年、Fig. 1 のような低侵襲治療デバイスやインプラント部品の開発が進められている。これらのデバイスは小型で薄肉なものでも、十分に高い機械的強度を有し、さらに、表面に微細な凹凸を付与することで、付着性やぬれ性を制御できることが要求されている。

このようなニーズの中、最近では、結晶の微細化により材料強度を向上させる技術が開発された。Fig. 2 は、一般のステンレス鋼の結晶粒と、本研究で対象とする材料の結晶粒を EBSD で観察したものである。対象材料では平均粒径を 9 μm から 1.5 μm まで微細化して機械的強度を上げている。このように結晶を微細化した材料は、切削仕上げ面に対しても良い効果をもたらしている。例えば、Fig. 3 のように平削りによる微細切削では、粒径のばらつきが小さくなるため、良好な仕上げ面が得られる^{文献①}。

一方、表面に微細構造を加工することで、表面機能が制御できることが知られている。例えば、Fig. 4 のように平坦な表面に対して同図(b)のような微細構造を加工することで、ぬれ性が制御できる^{文献②}。

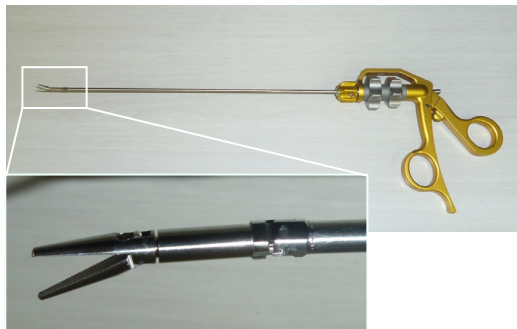
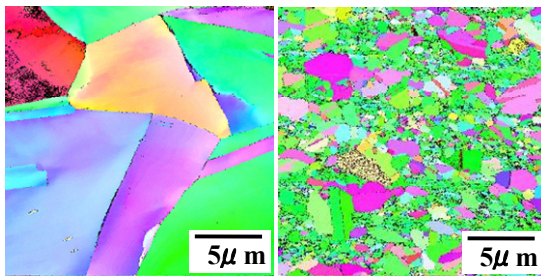
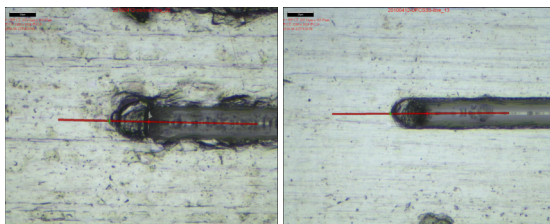


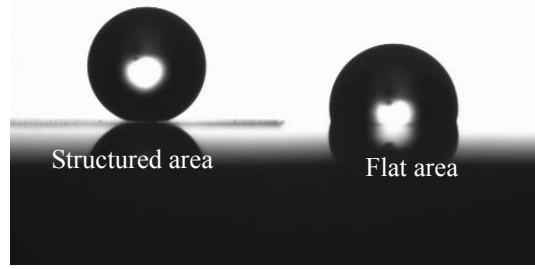
Fig. 1 An example of forceps



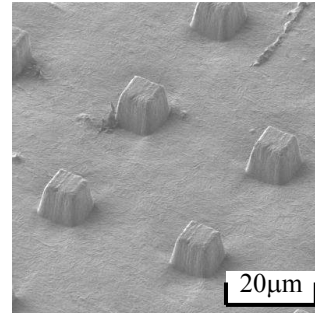
(a) Standard (b) Fine grained
Fig. 2 Micro structures of stainless steels



(a) Standard (b) Fine grained
Fig. 3 Surface finishes



(a) Water droplets



(b) Micro pillars array

Fig. 4 Control of wettability with surface structure

2. 研究の目的

本研究では、エンドミル切削における形状創成機構を利用し、表面機能を制御できる微細構造として、マイクロディンプルの高速加工技術を開発することを目的としている。ここでは、Fig. 2 の微細結晶粒ステンレス鋼に対するディンプル加工を対象とし、結晶粒の大きさが切削特性に及ぼす影響を明らかにする。また、ディンプル表面がぬれ性に及ぼす影響を調べた。

3. 研究の方法

Fig. 5 のように 2 枚刃のボールエンドミルを傾け、深さ方向の切込みを工具半径以下にすると、2 枚の刃が材料に接触しない時間が存在する。対象とする加工では、この空転時に各切れ刃の除去領域が干渉しないように送りを大きく設定し、ディンプルを加工する。

Fig. 6(a)は、先端部のノーズ半径 ρ のボールエンドミルをモデル化したものである。ボールノーズ部の曲率中心を原点とする U-V-W 座標系において、切れ刃上の点 P は工具底部からの軸方向に対する角度 ε と底刃からの遅れ角 λ で与えられる。したがって、ボールノーズ部の切れ刃に対しては、 ε は 0° から 90° の範囲で与えられる。ここで、ノーズ部終了点 $\varepsilon = 90^\circ$ の遅れ角を λ_0 とすると、切れ刃 i の点 P の遅れ角は、

$$\gamma = (i-1) \frac{2\pi}{n} + \lambda_0 \cdot (1 - \cos \varepsilon) \quad (1)$$

角速度 ω で回転する点 P の時刻 t における座標は、

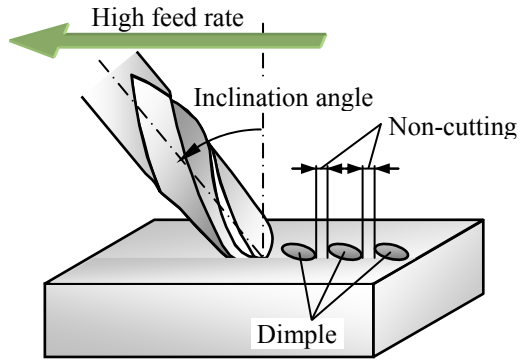
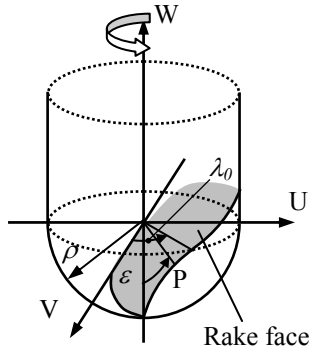
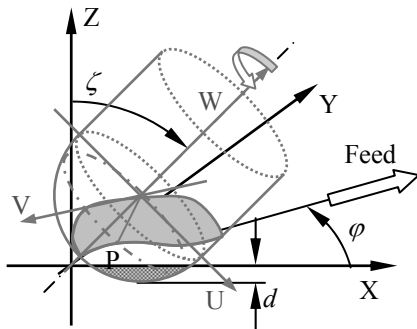


Fig. 5 Micro dimple machining



(a) Tool model



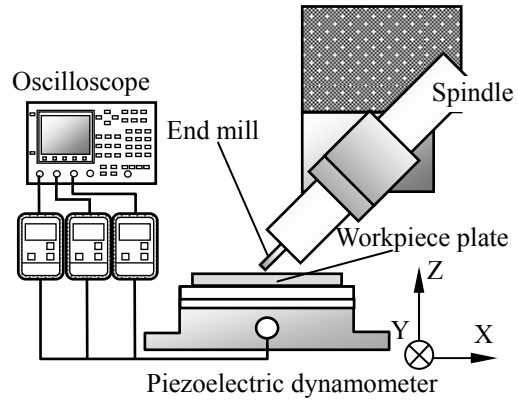
(b) Cutting model

Fig. 6 Simulation model

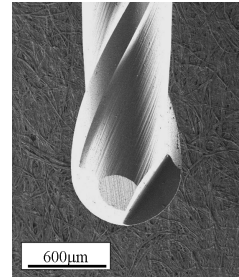
$$\left. \begin{aligned} u &= \rho \sin \varepsilon \cos(\omega t + \gamma) \\ v &= \rho \sin \varepsilon \sin(\omega t + \gamma) \\ w &= -\rho \cos \varepsilon \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

なお、Fig. 6(a)のようにすくい面が定義されているため、 ω は負の値をとる。Fig. 6(b)は、XZ平面においてZ軸からX軸方向に角度 ζ で傾いたボールエンドミルが、Z方向の深さ d 、送り速度 f でX軸に対して角度 φ の方向に切削する場合を示している。このときの点Pの座標は、次式で示される。

$$\left. \begin{aligned} x &= \rho \sin \varepsilon \cos(\omega t + \gamma) \cos \zeta \\ &\quad + \left(\frac{\rho - d}{\cos \zeta} - \rho \cos \varepsilon \right) \sin \zeta + ft \cos \varphi \\ y &= \rho \sin \varepsilon \sin(\omega t + \gamma) + ft \sin \varphi \\ z &= -\rho \sin \varepsilon \cos(\omega t + \gamma) \sin \zeta \\ &\quad + \left(\frac{\rho - d}{\cos \zeta} - \rho \cos \varepsilon \right) \cos \zeta \end{aligned} \right\} \quad (3)$$



(a) Setup



(b) End mill

Fig. 7 Cutting test



(a) Standard (9.1 μm)



(b) Fine grained (1.5 μm)

Fig. 8 Surface finishes in micro milling

そこで、 $z < 0$ となる場合に材料が除去されるものとしてディンプル形状を解析する。

4. 研究成果

Fig. 7のようにマシニングセンタの主軸ヘッドに、治具を介して最高回転数 50,000 rpm のスピンドルを工具送り方向に対して 45°に傾けて取り付ける。また、被削材の下には圧電型切削動力計(Kistler9257B)を固定し、切れ刃の接触を検出する。切削試験では、同図(b)の直径 0.4 mm、TiAlN コーティングの超硬 2

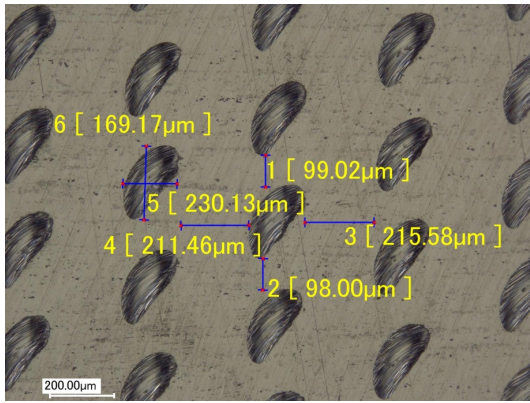
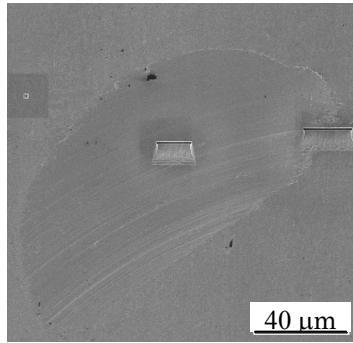
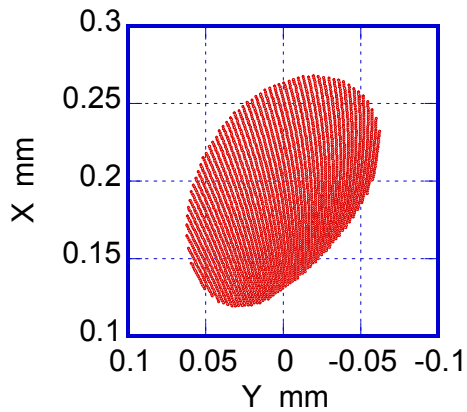


Fig. 9 An example of micro dimple machining



(a) Machined dimple



(b) Simulation

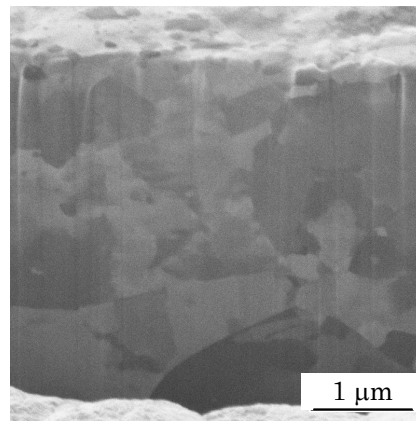
Fig. 10 Dimple shape

枚刃ボールエンドミルを用いた。被削材として、Fig. 2 の平均粒径 $9.1 \mu\text{m}$ と $1.5 \mu\text{m}$ の結晶粒を有するステンレス鋼 SUS304 に対して加工試験を実施した。

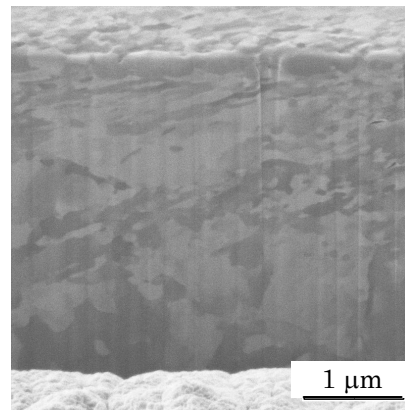
まず、工具回転数 3000 rpm、送り速度 60 mm/min、深さ $40 \mu\text{m}$ の溝を加工し、結晶粒径が仕上げ面に及ぼす影響を比較した。Fig. 8 のように結晶粒径 $9.1 \mu\text{m}$ のステンレス鋼では右側の縁部にバリが観察されるが、微細結晶粒のステンレス鋼ではバリが抑制されており、結晶粒の微細化の効果が確認できる。

Fig. 9 は工具回転数 1,000 rpm、送り速度 4,000 mm/min、設定切込み $20 \mu\text{m}$ で加工したマイクロディンプルの事例である。

Fig. 10 は工具回転数 3,000 rpm、送り速度 1,200 mm/min、設定切込み $10 \mu\text{m}$ の条件で、微細結晶粒のステンレス鋼に加工したマイクロディンプルとシミュレーションを比較

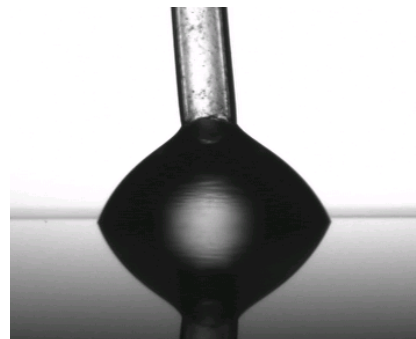


(a) Original

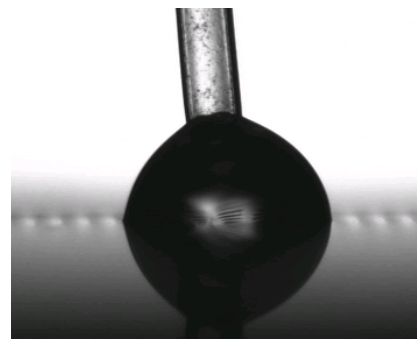


(b) Machined

Fig. 11 Micro structures in subsurfaces



(a) Flat



(b) Structured

Fig. 12 Water droplets

したものである。シミュレーション結果は、実測のそれとほぼ一致しており、シミュレーションの妥当性が確認できる。

Fig. 11 は、未加工部と Fig. 10 のディンプル

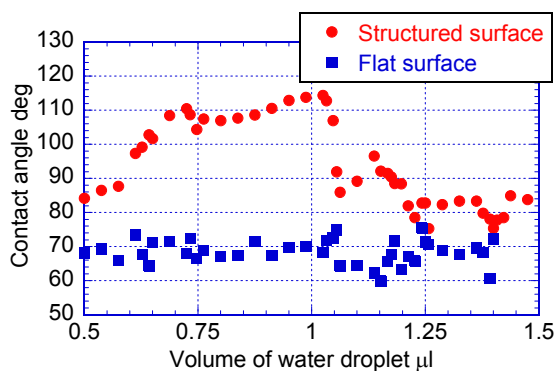


Fig. 13 Change in contact angle with volume of water

の中央部の表層部の結晶組織の断面を比較したものである。切削により表層部の結晶が切削方向に流動し微細化されていることがわかる。また、同図より加工変質層の厚みは1 μm程度であることがわかる。

Fig. 12は、平坦な試験材とディンプル表面でのぬれ性を比較したものである。液滴試験における液滴量は1.3 μlであり、接触角は平坦部で73.3°、ディンプル表面で85.6°であり、ディンプル表面では接触角の増加が確認できる。Fig. 13は、水滴の体積を連続的に増加させた時の接触角の変化を測定したものである。試験材表面は親水性であるが、ディンプルの縁部のピン止め効果により、ぬれの拡がりが増大されていることがわかる。

<引用文献>

- ① Komatsu, T., Matsumura, T., Torizuka, S., Effect of grain size in stainless steel on cutting performance in micro-scale cutting, *International Journal of Automation Technology*, Vol. 5, No.3, 2011, 334-341.
- ② Matsumura, T., Iida, F., Hirose, T., Yoshino, M., Micro machining for control of wettability with surface topography, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 212, 2012, 2669 – 2677

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① Komatsu, T., Musha, Y., Yoshino, T., Matsumura, T., Surface finish and affected later in milling of fine crystal grain stainless steel, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 19, 2015, 148-154
DOI:dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2015.06.003
- ② Matsumura, T., Musha, Y., Machining error in micro dimple milling, *Proceedings of the 4M/ICOMM2015 Conference*, Vol. 10, 2015, 134-137
DOI: 10.3850/978-981-09-4609-8 035

- ③ Matsumura, T., Takahashi, S., Nagase, N., Musha, Y., Micro dimple milling force structured surface, *Advanced Material Research*, Vol. 966-967, 2014, 145-151
DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.966-967.142

- ④ Matsumura, T., Watanabe, R., Musha, Y., An error model in micro dimple milling, *Key Engineering Materials*, Vol. 554-558, 2013, 2072-2078
DOI:doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.554-557.2072

- ⑤ 松村 隆、マイクロディンプルの高速加工、*機械技術*、Vol. 62, No. 1、2013、26-30

[学会発表] (計 4 件)

- ① Komatsu, T., Musha, Y., Yoshino, T., Matsumura, T., Surface finish and affected later in milling of fine crystal grain stainless steel, *Society of Manufacturing Engineers*, 2015年6月8日, USA, North Carolina at Charlotte

- ② 松村 隆、武者 祐治、小径エンドミルによるマイクロディンプル加工の加工誤差モデル、2015年度砥粒加工学会学術講演会、2015年9月9日、神奈川、日吉

- ③ Komatsu, T., Yoshino, T., Torizuka, S., Matsumura, T., Effect on stainless steel surfaces form micro cutting in different grain size, *Proceedings of the 9th International Conference on MicroManufacturing*, Vol. 9, 2014, 26C4-116, Singapore

- ④ 松村 隆、武者 祐治、小径エンドミルによるマイクロディンプル加工、*日本機械学会第5回マイクロナノシンポジウム*、2013年11月5日、宮城、仙台

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松村 隆 (MATSUMURA, Takashi)
東京電機大学・工学部・機械工学科
研究者番号：20199855